

**بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ**



دانشکده مهندسی عمران  
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه

**بررسی تاثیر پودر شیشه و نانو سیلیس بر کارایی، خواص مکانیکی و دوام ملات  
خودتراکم تقویت شده با الیاف پلی پروپیلن**

نگارنده: مریم منظمی

اساتید راهنما

دکتر فرشید جندقی علائی

دکتر حسن حاجی کاظمی

شهریور ۱۳۹۵

شماره: ۹۵  
تاریخ: ۹۵، ۷، ۱۱  
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۷: صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم مریم منظمی به شماره دانشجویی ۹۲۱۳۶۲۴، رشته مهندسی عمران گرایش سازه تحت عنوان بررسی تاثیر پودر شیشه و نانو سیلیس بر کارایی، خواص مکانیکی و دوام ملات خودتراکم تقویت شده با الیاف پلی پروپیلن که در تاریخ ۱۳۹۵/۶/۱۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: بسیار خوب امتیاز: ۱۸،۷۵)  دفاع مجدد  مردود

نوع تحقیق: نظری  عملی

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

اعضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	دانشیار	دکتر فرشید جندقی علایی	۱- استاد راهنمای اول
	استاد	دکتر حسن حاجی کاظمی	۲- استاد راهنمای دوم
			۳- استاد مشاور
	استادیار	دکتر مهدی عجمی	۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر جلیل شفائی	۵- استاد ممتحن اول
	استادیار	دکتر ایمان آقایان	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

مَنّت خدای را عز و جل که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش مزید نعمت.  
شکر خداوند متعال که به من این توفیق را عطا کرد که این پایان نامه را به پایان برسانم.  
از اساتید گرانقدر خود جناب آقای دکتر جندقی علائی و جناب آقای دکتر حاجی کاظمی  
که همواره اینجانب را مورد لطف و محبت خود قرار دادند کمال تشکر را دارم.

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس فراوان و در کمال افتخار تقدیم می نمایم به :

به پدر و مادر عزیز، دلسوز و مهربانم که نفس خیر و دعای روح پرورشان در تمامی  
مراحل زندگی من بدرقه راهم بوده و محبت های بی دریغ آنها، بهترین دلگرمی روزهای  
خوب و بد من بوده است.

به همسفر مهربان زندگیم جناب آقای دکتر نوید هوشیار به پاس قدردانی از تمام محبت  
ها، عشق ها و صبوری هایش که محیطی سرشار از آرامش و آسایش برای من فراهم  
آورد.

## تعهد نامه

اینجانب مریم منظمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-سازه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تاثیر پودر شیشه و نانو سیلیس بر کارایی، خواص مکانیکی و دوام ملات خودتراکم تقویت شده با الیاف پلی پروپیلن تحت راهنمایی دکتر جندقی علائی و دکتر حاجی کاظمی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.

- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.

- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.

- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید.

- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.

### تاریخ

### امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

در این پژوهش آزمایشگاهی، از پودر شیشه بازیافتی در درصدهای ۱۰، ۱۵ و ۲۰ برحسب وزن سیمان به عنوان جایگزین سیمان در ملات خودتراکم استفاده شده است و آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی، جذب آب و مقاومت در برابر اسید روی نمونه‌های ملات خودتراکم صورت گرفت. سپس با افزایش پودر نانو سیلیس در درصدهای ۲، ۳ و ۴ به صورت تکی و همچنین همراه با پودر شیشه، اضافه کردن آن‌ها بر ملات خودتراکم مورد بررسی قرار گرفت. الیاف پلی‌پروپیلن نیز برای کنترل رشد ترک‌ها به ملات اضافه شد.

نتایج حاکی از آن است که اضافه کردن پودر شیشه تا ۲۰ درصد به عنوان جایگزین سیمان برای ساخت ملات با مقاومت و دوام بالا مناسب می‌باشد. مقاومت فشاری این نمونه‌ها که در روزهای ۷، ۱۴ و ۲۸ بعد از ساخت ملات به دست آمد، قابل مقایسه و یا در برخی موارد بالاتر از نمونه‌ی کنترل بوده و بنابراین اضافه کردن پودر شیشه به عنوان جایگزین سیمان در ملات خودتراکم عملی و مناسب می‌باشد. علاوه بر این، اضافه کردن ذرات نانو سیلیس نیز تا اندازه معین ۲ درصد به بهتر شدن خواص مکانیکی و دوام نمونه‌ها کمک می‌کند.

عکس‌های میکروگراف الکترون (SEM) گرفته شده در ۲۸ روز نمونه‌ها نشان می‌دهد که با اضافه کردن پودر شیشه، سرعت هیدراسیون سیمان افزایش پیدا می‌کند. به این صورت که بعد از ۲۸ روز، ملات بسیار یکنواخت با حداقل حفرات مشاهده می‌شود. با اضافه کردن پودر نانو مقدار  $\text{C-S-H}$  در عکس‌ها بیشتر و حاکی از بهبود مقاومت نمونه‌ها در حضور نانو سیلیس است. در این آزمایش حضور الیاف پلی‌پروپیلن در جلوگیری از فروریختن سریع ملات تحت فشار و کشش کاملاً مشهود است.

**کلمات کلیدی:** پودر شیشه، ملات خودتراکم، نانو سیلیس، الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، جذب آب، مقاومت در برابر اسید، SEM.

## فهرست مطالب

موضوع.....صفحه

### فصل اول: مقدمه

۱-۱-۱ مقدمه	۲
۱-۱-۱ مصالح ضایعاتی در بتن	۲
۲-۱-۱ ملات خودتراکم	۳
۳-۱-۱ نانو سیلیس در بتن	۴
۴-۱-۱ استفاده از الیاف در بتن و ملات	۶
۲-۱ بتن خودتراکم و ویژگیهای آن	۶
۱-۲-۱ کارایی بتن خود تراکم	۶
۲-۱-۲ مقاومت در برابر جاشدگی	۱۰
۳-۱-۲ توانایی عبور کنندگی	۱۱
۲-۲-۱ روشهایی برای دستیابی به قابلیت خودتراکمی	۱۳
۳-۲-۱ امتیازات استفاده از بتن خودتراکم	۱۴
۴-۲-۱ معایب بتن خودتراکم	۱۶
۵-۲-۱ توسعه مخلوطهای بتن خودتراکم	۱۷
۶-۲-۱ بتن خودتراکم و سیستمهای ساخت و طراحی سازههای جدید	۱۷
۷-۲-۱ انواع مواد پودری مورد استفاده در بتن خودتراکم	۱۸
۳-۱ دلایل استفاده از ملات خودتراکم بجای بتن خودتراکم	۱۹
۴-۱ روش و هدف تحقیق	۲۰

### فصل دوم: مروری بر استفاده از شیشه ضایعاتی در بتن

۱-۲ مقدمهای بر شیشه و بازیافت آن	۲۲
۱-۱-۲ شیشه ضایعاتی در تهران	۲۲
۲-۲ شیشه و کاربرد آن	۲۳
۳-۲ استفاده از شیشه ضایعاتی در بتن	۲۴
۴-۲ واکنش قلیای-سیلیسی در بتن حاوی شیشه	۲۶

### فصل سوم: مصالح مصرفی و طرح اختلاط

۱-۳ مواد مصرفی در بتن	۳۰
۱-۱-۳ سیمان	۳۰
۲-۱-۳ آب	۳۱
۳-۱-۳ الیاف پلیپروپیلن	۳۱
۴-۱-۳ نانو سیلیس	۳۱
۱-۴-۱ نحوه ی حل کردن نانوسیلیس	۳۳
۵-۱-۳ شیشه مصرفی	۳۴

۳۵	۶-۱-۳ فوقروانکننده
۳۶	۲-۳ روش آزمایش
۳۶	۱-۲-۳ مقدمه
۳۶	۲-۲-۳ آزمایش مقاومت فشاری
۳۷	۳-۲-۳ آزمایش مقاومت کششی
۳۸	۴-۲-۳ آزمایش درصد جذب آب
۳۹	۵-۲-۳ آزمایش مقاومت در برابر اسید
۴۰	۳-۳ طرح اختلاط بتن خودتراکم
۴۰	۱-۳-۳ مقدمه‌های بر طرح اختلاط بتن یا ملات خودتراکم
۴۱	۲-۳-۳ طرح اختلاط نهایی

### فصل چهارم: کنترل طرح اختلاط

۴۶	۱-۴ آزمایش استاندارد برای تعیین غلظت نرمال سیمان هیدرولیکی
۴۶	۱-۱-۴ دامنه کاربرد
۴۶	۲-۱-۴ وسایل آزمایش
۴۶	۳-۱-۴ دما و رطوبت
۴۶	۴-۱-۴ روش انجام آزمایش
۴۸	۲-۴ آزمایشات اولیه روی سنگدانه‌ها
۴۸	۱-۲-۴ وزن مخصوص مطلق
۴۹	۲-۲-۴ وزن مخصوص ظاهری
۴۹	۱-۲-۲-۴ شرح آزمایش
۴۹	۲-۲-۲-۴ محاسبات:
۵۰	۳-۲-۴ وزن مخصوص ظاهری ناخالص
۵۲	۴-۲-۴ آزمایش درصد رطوبت طبیعی
۵۲	۳-۴ دانه بندی ماسه بر اساس استاندارد ASTM C33
۵۳	۱-۳-۴ وسایل آزمایش
۵۳	۲-۳-۴ نمونه‌برداری
۵۴	۳-۳-۴ شرح آزمایش

### فصل پنجم: نتیجه‌ی آزمایشات قطر اسلامپ و مکانیکی

۵۶	۱-۵ کارایی ملات خود تراکم
۵۷	۲-۵ مقاومت فشاری
۷۱	۱-۲-۵ بررسی تاثیر پودر شیشه بر مقاومت فشاری ملاتهای خودتراکم حاوی پودر شیشه
۷۲	۲-۲-۵ بررسی تاثیر افزایش پودر شیشه بر مقاومت فشاری ملاتهای خودتراکم حاوی ۲ درصد نانو سیلیس بهصورت ثابت
۷۳	۳-۲-۵ بررسی تاثیر افزایش پودر نانو بر مقاومت فشاری ملاتهای خودتراکم حاوی ۱۵ درصد پودر شیشه بهصورت ثابت
۷۴	۴-۲-۵ تاثیر الیاف بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونهها



۷۵	..... مقاومت کششی
۷۸	..... ۱-۳-۵ تاثیر افزایش پودر شیشه بر مقاومت کششی نمونه‌های ملات خودتراکم
۷۸	..... ۲-۳-۵ تاثیر افزایش پودر شیشه بر مقاومت کششی ملات‌های خود تراکم حاوی ۲% نانو سیلیس بصورت ثابت
۷۹	..... ۳-۳-۵ تاثیر افزایش پودر نانو سیلیس بر مقاومت کششی ملات‌های خود تراکم حاوی ۱۵% پودر شیشه بصورت ثابت
۸۰	..... ۴-۳-۵ شکل شکست نمونه‌ها در آزمایش مقاومت کششی

### فصل ششم: نتایج آزمایشات دوام

۸۶	..... ۱-۶ آزمایش جذب آب
۸۷	..... ۱-۱-۶ تاثیر افزایش پودر شیشه بر جذب آب در ملات خودتراکم
۸۷	..... ۲-۱-۶ تاثیر افزایش پودر نانو بر جذب آب با در نظر گرفتن ۱۵% پودر شیشه در ملات بصورت ثابت
۸۸	..... ۳-۱-۶ تاثیر افزایش پودر شیشه بر جذب آب با در نظر گرفتن ۲% نانو سیلیس در ملات بصورت ثابت
۸۹	..... ۲-۶ آزمایش مقاومت در برابر اسید
۹۰	..... ۱-۲-۶ مقاومت نمونه های ملات خودتراکم در برابر سولفوریک اسید
۹۵	..... ۲-۲-۶ مقاومت نمونه‌های ملات خودتراکم در برابر هیدروکلریک اسید

### فصل هفتم: عکس های SEM

۹۸	..... ۱-۷ مروری بر واکنش هیدراسیون سیمان
۹۸	..... ۱-۱-۷ هیدراسیون کلسیمسیلیکات
۹۹	..... ۲-۱-۷ هیدراسیون کلسیم آلومینات
۹۹	..... ۲-۷ محصولات هیدراسیون سیمان
۹۹	..... ۱-۲-۷ ژل (Calcium-Silicate-Hydrate) C-S-H
۱۰۰	..... ۲-۲-۷ کلسیم هیدروکسید (Ca(OH) <sub>2</sub> ) یا (CH)
۱۰۰	..... ۳-۲-۷ اترینگیت (Ettringite, Aft) C <sub>6</sub> A <sub>3</sub> S <sub>3</sub> H <sub>32</sub>
۱۰۲	..... ۳-۷ تحلیل نتایج به‌دست‌آمده
۱۰۳	..... ۴-۷ عکس های SEM

### فصل هشتم: نتیجه گیری

۱۱۶	..... ۱-۸ نتیجه گیری
۱۱۸	..... ۲-۸ پیشنهادات
۱۱۹	..... منابع
۱۲۴	..... پیوست

## فهرست جداول

عنوان.....	صفحه
جدول ۱-۱ مواد پودری مورد استفاده در بتن خودتراکم بر حسب واکنشپذیری با آب [۳۱].....	۱۹
جدول ۱-۳ ترکیبات و خصوصیات سیمان پرتلند تیپ ۲ مشهد.....	۳۰
جدول ۲-۳ طرح اختلاط نمونهها ( $\text{Kg/m}^3$ ).....	۴۳
جدول ۱-۴ وزن مخصوص سنگهای طبیعی.....	۵۱
جدول ۲-۴ دانهبندی مناسب ماسه بر اساس استاندارد ASTM C33.....	۵۳
جدول ۱-۵ قطر اسلامپ نمونه های ملات خود تراکم.....	۵۶
جدول ۲-۵ مقاومت فشاری نمونه کنترل.....	۵۸
جدول ۳-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر شیشه.....	۵۹
جدول ۴-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۱۵ درصد پودر شیشه.....	۶۰
جدول ۵-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۲۰ درصد پودر شیشه.....	۶۱
جدول ۶-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۲ درصد پودر نانو.....	۶۲
جدول ۷-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۳ درصد پودر نانو.....	۶۳
جدول ۸-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۴ درصد پودر نانو.....	۶۴
جدول ۹-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۲% نانو سیلیس و ۱۰% شیشه ضایعاتی.....	۶۵
جدول ۱۰-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۲% نانو سیلیس و ۱۵% شیشه ضایعاتی.....	۶۶
جدول ۱۱-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۳% نانو سیلیس و ۱۵% شیشه ضایعاتی.....	۶۷
جدول ۱۲-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۲% نانو سیلیس و ۲۰% شیشه ضایعاتی.....	۶۸
جدول ۱۳-۵ مقاومت فشاری نمونه کنترل بدون الیاف.....	۶۹
جدول ۱۴-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۱۵% شیشه ضایعاتی بدون الیاف.....	۷۰
جدول ۱۵-۵ مقاومت کششی نمونههای ملات خودتراکم.....	۷۵
جدول ۱-۶ نتایج آزمایش جذب آب نمونههای ملات خودتراکم.....	۸۶
جدول ۲-۶ نتایج آزمایش مقاومت در برابر اسید در محلول سولفوریک اسید ۵ درصد.....	۹۲
جدول ۳-۶ نتایج آزمایش مقاومت در برابر اسید در محلول سولفوریک اسید ۳ درصد.....	۹۲
جدول ۴-۶ نتایج آزمایش مقاومت در برابر اسید در محلول هیدروکلریک اسید ۵ درصد.....	۹۶
جدول ۱-۷ نام، نقش و ترکیب اختصاری هریک از مواد تشکیلدهنده سیمان در هیدراسیون.....	۱۰۱

## فهرست اشکال

عنوان.....	صفحه.....
شکل ۱-۱ نمودار رسیدن به سیستم ساخت منطقی به وسیله بتن خودتراکم (پیشنهاد شده توسط Ozawa) [۳۰].....	۱۸
شکل ۱-۲ نمونه‌های از واکنش قلیایی-سیلیسی در بتن.....	۲۷
شکل ۱-۳ سیمان پرتلند تیپ ۲ مشهود.....	۳۰
شکل ۲-۳ نانو سیلیس تهیه شده از شرکت ابروسیل.....	۳۲
شکل ۳-۳ عکس های TEM نانو سیلیس.....	۳۲
شکل ۴-۳ تبدیل نانو سیلیس جامد به مایع نانو سیلیس.....	۳۳
شکل ۵-۳ پودر شیشه مصرفی در آزمایش.....	۳۴
شکل ۷-۳ قالب آزمایش مقاومت کششی.....	۳۸
شکل ۸-۳ توزین نمونه ها در آزمایش جذب آب.....	۳۹
شکل ۱-۴ تعیین غلظت نرمال سیمان هیدرولیکی.....	۴۷
شکل ۲-۴ خشک کردن سطح ماسه برای تعیین وزن مخصوص ظاهری ناخالص.....	۵۱
شکل ۴-۴ الک کردن ماسه برای آزمایش دانه بندی ماسه مصرفی.....	۵۴
شکل ۱-۵ دستگاه مقاومت فشاری.....	۵۷
شکل ۲-۵ نمونه کنترل پس از شکست در آزمایش مقاومت فشاری.....	۵۸
شکل ۳-۵ نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر شیشه پس از شکست ناشی از فشار.....	۵۹
شکل ۴-۵ نمونه حاوی ۱۵ درصد پودر شیشه پس از شکست ناشی از فشار.....	۶۰
شکل ۵-۵ نمونه حاوی ۲۰ درصد پودر شیشه پس از شکست ناشی از.....	۶۱
شکل ۶-۵ نمونه حاوی ۲ درصد پودر نانو پس از شکست ناشی از فشار.....	۶۲
شکل ۷-۵ نمونه حاوی ۳ درصد پودر نانو سیلیس پس از شکست ناشی از فشار.....	۶۳
شکل ۸-۵ نمونه حاوی ۴ درصد پودر نانو پس از شکست ناشی از فشار.....	۶۴
شکل ۹-۵ نمونه حاوی ۲ درصد پودر نانو و ۱۰% پودر شیشه پس از شکست ناشی از فشار.....	۶۵
شکل ۱۰-۵ نمونه حاوی ۲ درصد پودر نانو و ۱۵% پودر شیشه پس از شکست ناشی از فشار.....	۶۶
شکل ۱۱-۵ نمونه حاوی ۳ درصد پودر نانو و ۱۵% پودر شیشه پس از شکست ناشی از فشار.....	۶۷
شکل ۱۲-۵ نمونه حاوی ۲ درصد پودر نانو و ۲۰% پودر شیشه پس از شکست ناشی از فشار.....	۶۸
شکل ۱۳-۵ نمونه کنترل بدون الیاف پس از شکست ناشی از فشار.....	۶۹
شکل ۱۴-۵ نمونه حاوی ۱۰% پودر شیشه بدون الیاف پس از شکست ناشی از فشار.....	۷۰
شکل ۱۵-۵ شکست نمونه کنترل تحت کشش.....	۸۰
شکل ۱۶-۵ شکست نمونه حاوی ۱۵% پودر شیشه تحت کشش.....	۸۱
شکل ۱۷-۵ شکست نمونه حاوی ۲۰% پودر شیشه تحت کشش.....	۸۱
شکل ۱۸-۵ شکست نمونه حاوی ۲ درصد پودر نانو تحت کشش.....	۸۱
شکل ۱۹-۵ شکست نمونه حاوی ۳% پودر نانو تحت کشش.....	۸۲

- شکل ۵-۲۰ شکست نمونه حاوی ۳ درصد پودر نانو سیلیس و ۱۵ درصد پودر شیشه تحت کشش ..... ۸۲
- شکل ۵-۲۱ شکست نمونه حاوی ۲ درصد پودر نانو سیلیس و ۱۰ درصد پودر شیشه تحت کشش ..... ۸۲
- شکل ۵-۲۲ شکست نمونه کنترل بدون الیاف تحت کشش ..... ۸۳
- شکل ۵-۲۳ شکست نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر شیشه تحت کشش ..... ۸۳
- شکل ۶-۱ اسیدهای مورد استفاده در این آزمایش ..... ۸۹
- شکل ۶-۲ شکل ظاهری نمونهها در مرحله های مختلف آزمایش مقاومت اسیدی ..... ۹۱
- اشکال ۶-۳ عکس های SEM نمونه های کنترل و 10G ..... ۹۴
- شکل ۷-۱ اشکال مختلف ژل C-S-H ..... ۱۰۰
- شکل ۷-۲ کلسیم هیدروکسید (CH) ..... ۱۰۰
- شکل ۷-۳ اترینگیت ..... ۱۰۱
- شکل ۷-۴ روند واکنش هیدراسیون در طول زمان ..... ۱۰۲
- شکل ۷-۵ عکسهای SEM نمونه کنترل ..... ۱۰۳
- شکل ۷-۶ عکسهای SEM نمونه کنترل ..... ۱۰۵
- شکل ۷-۷ عکسهای SEM نمونه کنترل ..... ۱۰۵
- شکل ۷-۸ عکس های SEM نمونه 10G ..... ۱۰۶
- شکل ۷-۹ عکس های SEM نمونه 10G ..... ۱۰۶
- شکل ۷-۱۰ عکس های SEM نمونه 10G ..... ۱۰۷
- شکل ۷-۱۱ عکسهای SEM نمونه 10G ..... ۱۰۷
- شکل ۷-۱۲ عکس های SEM نمونه 15G ..... ۱۰۸
- شکل ۷-۱۳ عکس های SEM نمونه 15G ..... ۱۰۹
- شکل ۷-۱۴ عکسهای SEM نمونه 3N ..... ۱۱۰
- شکل ۷-۱۵ عکس های SEM نمونه 3N ..... ۱۱۱
- شکل ۷-۱۶ عکسهای SEM نمونه 3N ..... ۱۱۱
- شکل ۷-۱۷ عکس های SEM نمونه 3N15G ..... ۱۱۲
- شکل ۷-۱۸ عکس های SEM نمونه 3N15G ..... ۱۱۲
- شکل ۷-۱۹ عکس های SEM نمونه 3N15G ..... ۱۱۳
- شکل ۷-۲۰ عکس های SEM نمونه 3N15G ..... ۱۱۳

## فهرست نمودارها

عنوان.....	صفحه.....
نمودار ۱-۳ اندازه ذرات پودر شیشه مصرفی.....	۳۵
نمودار ۱-۴ تعیین غلظت نرمال سیمان.....	۴۸
نمودار ۲-۴ دانه بندی سیمان مصرفی.....	۵۴
نمودار ۱-۵ مقاومت فشاری نمونه کنترل.....	۵۸
نمودار ۲-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر شیشه.....	۵۹
نمودار ۳-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۱۵ درصد پودر شیشه.....	۶۰
نمودار ۴-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۲۰ درصد پودر شیشه.....	۶۱
نمودار ۵-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۲ درصد پودر نانو سیلیس.....	۶۲
نمودار ۶-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۳ درصد پودر نانو سیلیس.....	۶۳
نمودار ۷-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۴ درصد پودر نانو سیلیس.....	۶۴
نمودار ۸-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۲ درصد پودر نانو سیلیس و ۱۰ درصد پودر شیشه.....	۶۵
نمودار ۹-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۲ درصد پودر نانو سیلیس و ۱۵ درصد پودر شیشه.....	۶۶
نمودار ۱۰-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۳ درصد پودر نانو سیلیس و ۱۵ درصد پودر شیشه.....	۶۷
نمودار ۱۱-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۲ درصد پودر نانو سیلیس و ۲۰ درصد پودر شیشه.....	۶۸
نمودار ۱۲-۵ مقاومت فشاری نمونه کنترل بدون الیاف.....	۶۹
نمودار ۱۳-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر شیشه بدون الیاف.....	۷۰
نمودار ۱۴-۵ مقاومت فشاری نمونه های ملات خودتراکم در آزمایش فشار.....	۷۱
نمودار ۱۵-۵ تاثیر پودر شیشه بر مقاومت فشاری ملات های خودتراکم حاوی پودر شیشه.....	۷۲
نمودار ۱۶-۵ تاثیر افزایش پودر شیشه بر مقاومت فشاری ملاتهای خودتراکم حاوی ۲ درصد نانو سیلیس به صورت.....	۷۳
نمودار ۱۷-۵ تاثیر افزایش پودر نانو بر مقاومت فشاری ملات های خودتراکم حاوی ۱۵ درصد پودر شیشه به صورت ثابت.....	۷۴
نمودار ۱۸-۵ مقاومت فشاری نمونه های بدون الیاف.....	۷۵
نمودار ۱۹-۵ مقاومت کششی نمونه های ملات خودتراکم.....	۷۷
نمودار ۲۰-۵ تاثیر افزایش پودر شیشه بر مقاومت کششی نمونه های ملات خودتراکم.....	۷۸
نمودار ۲۱-۵ تاثیر افزایش پودر شیشه بر مقاومت کششی ملاتهای خودتراکم حاوی ۲% نانو سیلیس بصورت ثابت.....	۷۹
نمودار ۲۲-۵ تاثیر افزایش پودر نانو سیلیس بر مقاومت کششی ملاتهای خودتراکم حاوی ۱۵% پودر شیشه.....	۸۰
نمودار ۱-۶ تاثیر افزایش پودر شیشه بر جذب آب در ملات خودتراکم.....	۸۷
نمودار ۲-۶ تاثیر افزایش پودر نانو بر جذب آب با در نظر گرفتن ۱۵% پودر شیشه در ملات بصورت ثابت.....	۸۸
نمودار ۳-۶ تاثیر افزایش پودر شیشه بر جذب آب با در نظر گرفتن ۲% نانو سیلیس در ملات بصورت ثابت.....	۸۸
نمودار ۴-۶ درصد کاهش جرم نمونه ها در محلول سولفوریک اسید ۵ درصد.....	۹۵
نمودار ۵-۶ درصد کاهش جرم نمونه ها در محلول سولفوریک اسید ۳ درصد.....	۹۵



# فصل اول:

## مقدمه

## ۱-۱ مقدمه

### ۱-۱-۱ مصالح ضایعاتی در بتن

با افزایش میزان مصرف‌کنندگان، مواد زائدی که باید در محل‌های دفن زباله دفن شوند، به‌سرعت رو به افزایش است. از طرفی تعداد مکان‌های دفن زباله و ظرفیت این مکان‌ها بسیار محدود می‌باشد و بسیاری از مواد زائد که در این مکان‌ها دفن می‌گردند، نیازمند مدت زمان زیادی برای تجزیه و بازگشت به چرخه طبیعی هستند. بتن به عنوان یکی از مهم‌ترین ترکیبات مورد استفاده در ساخت و ساز، راه حل بسیار مناسبی برای مصرف این مواد زائد می‌باشد. این کاربرد از طرفی موجب کاهش میزان این مواد در طبیعت شده و نیاز به محل‌های دفن زباله کمتر می‌گردد و از طرف دیگر باعث کاهش آلودگی‌های زیست محیطی می‌گردد. علاوه بر این، استفاده از مواد زائد فوق در بتن موجب کاهش هزینه می‌گردد. ضایعاتی که حتی اگر ترکیبات خطرناکی برای محیط‌زیست نباشند، در صورت عدم بازیافت، برای دفن فضایی اشغال خواهند نمود و می‌دانیم که امروزه عدم وجود فضای کافی در نظر گرفته شده برای محل دفع زباله‌ها، برای حفظ محیط‌زیست معضلی پدید آورده است. از سوی دیگر کاهش منابع طبیعی موجود و همچنین صرفه‌ی اقتصادی از جمله پارامترهایی می‌باشند که مهندسين را بر آن داشته تا از مواد ضایعاتی در ساختار بتن استفاده نمایند و به‌خصوص به‌دنبال ماده-ی مناسبی جهت جایگزینی سیمان باشند. زیرا تولید سیمان آثار مخربی روی محیط‌زیست گذاشته و علاوه بر تولید میزان زیادی گاز  $CO_2$ ، میزان بالایی انرژی در فرایند تولید آن صرف می‌شود. از جمله این مواد، ضایعات ساختمانی آجر، سرامیک، شیشه، کاشی و غیره می‌باشند. سالیانه ساختمان‌های فراوانی در کشور تخریب و به‌جای آن‌ها ساختمان‌های جدید بنا می‌شوند که در نتیجه آن مقدار فراوانی مصالح ناشی از تخریب تولید می‌شود. همچنین مورد دیگری که شاید کمتر به آن توجه می‌شود، تولید نخاله‌های ساختمان‌های نوساز می‌باشد که درصد قابل توجهی از آن نیز قابل بازیافت



است. در کنار موارد فوق سالیانه مقدار قابل توجهی بطری‌های شیشه‌ای نوشیدنی‌های مختلف به عنوان ضایعات دور ریخته می‌شود که بازیافت این مواد هزاران سال طول خواهد کشید.

امروزه با توجه به بحران اقتصادی در دنیا و مقوله‌های محیط‌زیستی، بهره‌وری و روند رو به رشد کاهش منابع تولید و توجه به استفاده از مواد بازیافتی الزامی می‌باشد. از سوی دیگر تولید مقادیر انبوه ضایعات در مناطق شهری، دپو این مواد را به معضلی بزرگ تبدیل کرده است.

یکی از راه‌های بازیافت مواد ضایعاتی حاصل، استفاده از پودر آن‌ها به عنوان جایگزین سیمان و استفاده از آن‌ها به عنوان پرکننده جهت پر کردن خلل و فرج و افزایش استحکام ملات است. واکنش پذیری پرکننده‌های استفاده شده و توانایی آنها برای پر کردن خلل و فرج به اندازه ی ذرات بستگی دارد. بطوریکه هر چقدر این ذرات کوچک‌تر باشند، نقش خود را بهتر ایفا می‌کنند.

#### ۱-۱-۲ ملات خودتراکم

بتن خودتراکم (SCC)<sup>۱</sup> به عنوان یک پیشرفت در ساخت بتن در دهه اخیر معرفی شده است. در آغاز توسعه این بتن، نیروی کار متخصص برای آن بسیار کم بود. با این حال این نوع بتن مزایای اقتصادی بسیار زیادی را به اثبات رساند. در ابتدا تکنولوژی ساخت بتن خودتراکم در کشور ژاپن توسعه پیدا کرد و امکان ساخت آن با رشد و توسعه فوق‌روان‌کننده‌ها<sup>۲</sup> فراهم شد. هم اکنون بتن خودتراکم در سرتاسر اروپا مورد استقبال قرار گرفته و برای کارهای ساختمانی و ساخت قطعات پیش‌ساخته استفاده فراوان دارد. ژاپنی‌ها از سال ۱۹۹۰ به بعد، از بتن خودتراکم که نیاز به هیچ ویبره ای نداشت و به تراکم کامل می‌رسید در ساخت پل‌ها، تونل‌ها و ساختمان‌ها استفاده کرده اند [۱ و ۲]. بتن خودتراکم، بتنی است که احتیاج به هیچ ویبره داخلی و خارجی ندارد و با وزن خود، خود را متراکم می‌نماید و زمانی که در قالب جاری می‌شود به طور کامل هواگیری می‌گردد و فقط با استفاده

<sup>1</sup> Self-Compacting Concrete

<sup>2</sup> Super Plasticizer

از نیروی جاذبه ناشی از وزن خود، قالب را پر نموده و آرماتورهای موجود را پوشانده و هم زمان یکنواختی خود را حفظ می‌نماید.

بتن خودتراکم در بخش‌های مختلف سازه به طور کامل تمام خلاءها و فواصل را در بین آرماتورها پر می‌کند و مانند عسل جریان می‌یابد و بعد از ریختن بتن، سطحی نزدیک به افق دارد. ترکیب آن، شامل همان ترکیبات معمولی و بیبره شده از قبیل: سیمان، سنگدانه، آب و مواد افزودنی می‌باشد که می‌تواند بدون هیچ‌گونه تلاشی برای و بیبره کردن و اطمینان از پر شدن کامل قالب، حتی زمانی که به علت فاصله کم بین آرماتورها امکان دسترسی وجود نداشته باشد، تحت وزن خود ریخته و متراکم - شود [۳].

در سال ۱۹۷۵ و ۱۹۷۶ بعضی از بتن‌ها که دارای این شرایط بودند، مورد مطالعه قرار گرفتند. در آن زمان هیچ‌یک از مواد مدرن که بر مبنای فوق‌روان‌کننده‌ها و عامل اصلاح‌کننده لزجت بودند، در دسترس نبودند. با این وجود مصرف هم‌زمان ملامین و یا نفتالین با درصد بالای مصالح ریزدانه، ثابت کرد که می‌تواند در اصلاح لزجت و روانی مؤثر باشد [۴].

غالباً مصالح بتن خودتراکم در مقایسه با بتن معمولی گران‌تر هستند، ولی افزایش هزینه‌ها باعث بهتر شدن تولید و کوتاه‌تر شدن زمان ساخت و بهبود شرایط کار خواهد شد. [۵]. در کشور ژاپن در جهت بهره‌برداری مطلوب‌تر، بتن خودتراکم در ساختمان‌های بلند و همچنین برای انواع تونل‌های پیشرفته در ترکیب با الیاف فولادی استفاده می‌شود [۷و۶]. همچنین در کشور سوئد با افزایش بهره‌وری از این بتن، استفاده از آن تا حدود ۶۰٪ در پل‌ها و بزرگراه‌ها مشاهده شده است [۸].

### ۱-۱-۳ نانو سیلیس در بتن

با توجه به رشد سریع تحقیقات علمی در زمینه نانو، صنعت ساخت‌وساز نیز از این تکنولوژی مستثنی نبوده است. در سال‌های اخیر محققان جنبه‌های مختلفی از علم نانو را در صنعت ساختمان به

کار گرفته‌اند. از استفاده از الیاف نانومتری گرفته تا استفاده از پودرهای نانو استحکام‌دهنده‌ی بتن [۹-۱۵]. سیلیسیم دی اکسید ( $\text{SiO}_2$ ) فراوان‌ترین ماده سازنده پوسته زمین است. این ترکیب که ساختاری شبیه الماس دارد به دو شکل بلوری و آمورف (بی‌شکل) یافت می‌شود و دمای ذوب و جوش آن بسیار بالا است. یکی از نیازهایی که در رشته‌ی مواد ساختمانی به وجود آمده، بتن با عملکرد بالا<sup>۳</sup> می‌باشد که بتنی با مقاومت و دوام بالا است. بنابراین مطالعات ساختار بتن در اندازه نانو می‌تواند برای دستیابی به بتن با مقاومت و دوام بالا حائز اهمیت باشد.

استفاده از مواد نانو در بتن خودتراکم چند سالی است که محققان زیادی را به تحقیق واداشته است. هدف از طراحی بتن خودتراکم با نانو سیلیس، کم کردن مقدار سیمان مصرفی در این بتن، که مقدار سیمان طرح اختلاط آن از بتن های معمولی بیشتر است، می‌باشد. طی چند سال اخیر نانوهای متفاوتی از جمله نانو سیلیس، نانو آلومینیوم، نانو روی و... در بتن و یا ملات خودتراکم آزمایش شده است. [۱۴-۱۷]

واکنش محلول نانوسیلیس<sup>۴</sup> با هیدروکسید کلسیم در مقایسه با میکرو سیلیکا<sup>۵</sup>، بسیار سریع تر انجام می‌گیرد و مقدار بسیار کم این ماده همانند مقدار زیادی پوزولان عمل کرده و در سنین اولیه و همچنین در درازمدت خواص مطلوبی به بتن می‌بخشد. اصلی‌ترین دلیل این خاصیت، ریز بودن ذرات نانو سیلیکا است. این ذرات عموماً دارای سطح ویژه حدوداً ۱۸۰ متر مربع در یک گرم می‌باشند، که در مقایسه با میکروسیلیکا که دارای سطح ویژه حدوداً ۱۵-۲۵ متر مربع در گرم است به اندازه‌ی قابل توجهی بالاتر است.

با استفاده از نانو سیلیس می‌توان تراکم ذرات را در بتن افزایش داد که نتیجه‌ی آن ساختار محکم‌تر بتن و در نتیجه خواص مکانیکی بهتر بتن و همچنین دوام بالای آن می‌باشد.

---

<sup>3</sup> High performance concrete

<sup>4</sup> Nano-Silica

<sup>5</sup> Micro-Silica

## ۱-۱-۴ استفاده از الیاف در بتن و ملات

بتن الیافی<sup>۶</sup> به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود نسبت به بتن معمولی، مورد توجه مهندسين عمران قرار گرفته است. هر ساله تحقیقات زیادی بر روی استفاده از انواع الیاف از جمله الیاف معدنی، الیاف گیاهی و الیاف مصنوعی در بتن انجام می‌شود. تاثیر استفاده از الیاف یا فایبرها را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

۱- جذب انرژی بالا

۲- جلوگیری از پیشرفت سریع ترک‌ها

۳- جلوگیری از ریزش یکباره بتن تحت فشار

۴- افزایش نرمی بتن

۵- افزایش شکل‌پذیری بتن

## ۱-۲ بتن خودتراکم و ویژگی‌های آن

### ۱-۲-۱ کارایی بتن خود تراکم

از نظر کارایی، خود تراکم‌شوندگی به صورت توانایی بتن برای جاری شدن فقط تحت شتاب ثقل پس از خروج از پمپ و هم چنین قابلیت آن برای پرکردن فضاهای مورد نظر در قالب به منظور دستیابی به بتنی بی‌نقص و باکیفیت یکنواخت و همگن تعریف می‌گردد. خودتراکم‌شوندگی مستلزم ارضاء وظایف زیر برای بتن تازه می‌باشد:

۱- توانایی پرکنندگی<sup>۷</sup>

<sup>6</sup> Fiber-reinforced concrete

<sup>7</sup> Filling ability

۲- مقاومت در برابر جداسدگی<sup>۸</sup>

۳- توانایی عبورکنندگی<sup>۹</sup>

## ۱-۲-۱ توانایی پرکنندگی

توانایی کامل پر کردن قالب و در برگرفتن تقویت کننده ها (میلگردها) مستلزم بتن همگن می باشد. حرکت اصولی افقی و عمودی بتن درون قالب، نیازمند استفاده از مصالحی با خصوصیات سیالی و روانی اساسی می باشد یا به عبارتی توانایی پرکردن یعنی سیالیت بالا یا تغییرشکل پذیری بتن که سیال بودن یا جریان پذیر بودن مناسبی را تحت وزن خود بوجود می آورد.

از آنجایی که بتن خودتراکم باید قابلیت تغییرشکل خوبی تحت وزن خود داشته باشد، قابلیت پرکنندگی از دو جنبه مورد بررسی قرار می گیرد. اول بر حسب میزان مسافتی که بتن می تواند از محل تخلیه طی کند (ظرفیت تغییرشکل) و دوم سرعتی که با آن جاری می شود (سرعت تغییر شکل). با استفاده از آزمایش جریان اسلامپ، ظرفیت تغییر شکل<sup>۱۰</sup> می تواند به عنوان قطر نهایی جریان بتن بعد از اینکه تغییرشکل بتن متوقف شود، مورد ارزیابی قرار گیرد. سرعت تغییر شکل<sup>۱۱</sup> نیز با استفاده از همان آزمایش می تواند بر اساس زمانی که این سرعت، بتن را به تغییر شکل معینی می رساند، مورد ارزیابی قرار بگیرد.

برای داشتن قابلیت پرکنندگی مناسب باید بین ظرفیت و سرعت تغییرشکل بتن تعادل برقرار باشد. به عنوان مثال، بتن مقاومت بالا با نسبت آب به سیمان خیلی پایین و میزان بالای فوق روان کننده، معمولاً ظرفیت تغییر شکل زیادی دارد. در حالیکه سرعت تغییرشکل آن بسیار پایین است، یعنی اینکه بسیار لزج و احتیاج به ویبره دارد. برای دستیابی به توانایی پرکنندگی مناسب، بتن باید ویژگی های زیر را داشته باشد [۱۸].

<sup>8</sup> Resistance to segregation

<sup>9</sup> Passing ability

<sup>10</sup> Deformation Capacity

<sup>11</sup> Velocity of deformation

## • اصطکاک کم بین ذره‌ای (Small Inter-Particle Friction)

برای داشتن بتنی با تغییرشکل مناسب باید اصطکاک بین ذرات جامد (درشت دانه، ریزدانه و همه انواع پودرها) را کاهش داد. لازم به ذکر است که مواد پودری در کشورهای مختلف متفاوت بوده و لیکن در اروپا معمولاً ذرات کوچکتر از ۷۵ و ۱۲۵ میکرومتر و در ژاپن کوچکتر از ۹۰ میکرومتر به عنوان مواد پودری در نظر گرفته می‌شوند و مواد سیمانی و فیلرها در دامنه تعریف آن قرار می‌گیرند [۱۸].

برای کاهش اصطکاک بین سنگ‌دانه‌ها، باید امکان تماس بین ذرات سنگ‌دانه را کم کرد. یکی از راه‌های رسیدن به افزایش فاصله بین ذره‌ای، کاهش میزان سنگ‌دانه یا به عبارت دیگر افزایش خمیر سیمان می‌باشد. البته اصطکاک بین مصالح پودری را نمی‌توان با افزایش فاصله بین ذره‌ای حاصل از افزایش آب خمیر کاهش داد. زیرا خود خمیر باید توانایی تغییرشکل بسیار زیادی داشته و بدین منظور ذرات ریز باید پراکندگی مناسبی در خمیر داشته باشند. این امر توسط عوامل فعال کننده سطحی از قبیل روان‌کننده‌ها صورت می‌گیرد. از طرفی استفاده از مقدار زیاد آب، منجر به جدایش سطحی و عملکرد نامطلوب بتن سخت شده از جمله مقاومت و دوام آن می‌گردد. همچنین نوع سنگ‌دانه در میزان اصطکاک بین سنگ‌دانه‌ها اثر می‌گذارد. سنگ‌دانه‌های تیز گوشه اصطکاک بیشتری در مقایسه با سنگ‌دانه‌های گرد گوشه دارند.

همچنین شکل ذرات پودری بر میزان مصرف آب و فوق‌روان‌کننده مؤثر است. بدین منظور استفاده از پوزولان‌های کروی شکل از قبیل خاکستر آتشفشانی (PFA)<sup>۱۲</sup> در این زمینه مؤثر می‌باشد. البته باید توجه داشت که کاهش اصطکاک بین سنگ‌دانه‌ها و مواد پودری، منجر به کاهش مقاومت در برابر جدایش می‌گردد. در این صورت مؤثر است که افزایش در قابلیت تغییر شکل خمیر و بتن یک‌جا صورت نگیرد، بلکه بیشتر افزایش در لزجت خمیر ایجاد شود [۱۸].

---

<sup>12</sup> Pulverized Fly Ash

## • خمیر با توانایی تغییر شکل عالی (Paste with Excellent Deformability)

برای رسیدن به خودتراکم شونده‌گی، تنها کاهش اصطکاک بین ذرات فاز جامد کافی نیست، بلکه خمیر نیز باید قابلیت شکل‌پذیری مناسبی داشته باشد. این نکته بسیار با اهمیت است که SCC باید دو ویژگی توانایی روان‌گرایی بالا (تنش تسلیم پایین) 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 شکل‌پذیری خمیر دارد و با استفاده از فوق‌روان‌کننده‌ها می‌تواند افزایش پیدا کند، در حالیکه استفاده از آب بیشتر، دو عامل تنش تسلیم و لزجت را کاهش می‌دهد. ولی استفاده از فوق‌روان‌کننده باعث کاهش بیشتر تنش تسلیم (قابلیت روانی بهتر) و کاهش محدود در لزجت می‌گردد. در نتیجه بتنی با روان‌گرایی بالا بدون کاهش قابل توجه در قوام قابل دستیابی است. از طرفی کاهش نسبت آب به پودر ( $w/p$ ) می‌تواند توانایی تغییر شکل خمیر سیمان را محدود نماید.

بنابراین میزان نسبت  $w/p$  باید کنترل گردد، زیرا میزان خیلی زیاد یا خیلی کم این نسبت منجر به شکل‌پذیری نامناسب می‌گردد. خمیر دارای فوق‌روان‌کننده 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  $w/p$  برای رسیدن به قابلیت شکل‌پذیری مناسب و همچنین سرعت تغییر شکل کافی به کار می‌روند.

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

## • افزایش قابلیت تغییر شکل خمیر

۱. فوق‌روان‌کننده‌ها

۲. نسبت  $w/p$  متعادل

## • کاهش اصطکاک بین ذره‌ای

۱. حجم کم سنگدانه درشت (میزان بالای خمیر)
۲. مناسب‌ترین پودر دانه‌بندی شده نسبت به سنگدانه‌ها و سیمان مصرفی [۱۸].

### ۱-۲-۱-۲ مقاومت در برابر جداشدگی

توانایی ذرات معلق (بتن تازه) با حفظ همگنی و یکنواختی مخلوط در فرآیند انتقال و بتن‌ریزی را می‌گویند. جداشدگی بتن تازه در اثر پخش غیریکنواخت مواد متشکله آن ایجاد می‌گردد که این امر باعث توزیع غیر یکنواخت ویژگی‌های بتن موردنظر در سازه می‌شود.

بتن امکان دارد تمایل به جداشدگی در طی شرایط مشخصی از جابجایی را از خود نشان ندهد، ولی در شرایط دیگر مثلاً در هنگام عبور از میان مقاطع با آرماتور زیاد جداشدگی اتفاق بیفتد.

در بتن خودتراکم نباید انواع جداشدگی‌های زیر در هنگام سکون و یا حرکت اتفاق بیفتد:

۱. آب انداختگی
  ۲. جداشدگی خمیر و سنگدانه
  ۳. جداشدگی سنگدانه‌های درشت که منجر به انسداد می‌شود
  ۴. توزیع غیریکنواخت هوا
- به منظور جلوگیری از جداشدگی بین آب و ذرات جامد، باید میزان آب قابل حرکت (آب منقول) در مخلوط کم گردد. منظور از آب منقول آبی است که چسبیده به ذرات جامد نیست و می‌تواند در مخلوط، مستقل از ذرات جامد حرکت کند. آب منقول را می‌توان با مصرف آب کم، نسبت  $w/p$  پایین و همچنین استفاده از مواد پودری با سطح مخصوص بالا کاهش داد. زیرا مواد پودری با سطح مخصوص بالا، مقدار آب بیشتری جذب خواهند کرد. همچنین مقاومت در برابر جدایی بین آب و مواد جامد را می‌توان به کمک مواد لزوج کننده بهبود بخشید. سایر جداشدگی‌ها با داشتن فاز خمیری که



بتواند ذرات سنگ‌دانه و هوا را با کمترین جابجایی نسبی نگه دارد، قابل جلوگیری است. این امر با داشتن نیروی اندرکنش زیاد بین دو فاز میسر می‌شود. این نیرو می‌تواند ترکیبی از نیروی اصطکاکی و چسبندگی در نظر گرفته شود.

بالا بردن مقاومت در برابر جداشدگی با اضافه کردن اصطکاک زیاد بین ذرات، اثر نامطلوبی بر توانایی شکل‌پذیری داشته و امکان ایجاد انسداد را بالا می‌برد. بنابراین افزودن چسبندگی بین دو فاز روش مفیدتری به نظر می‌رسد. در اجرا چنین عادت شده که از خمیر با نسبت  $w/p$  پایین به منظور افزایش چسبندگی فاز به فاز استفاده شود. بعضی مواقع هم از افزودنی‌های لزج‌کننده استفاده می‌گردد. به منظور داشتن مقاومت مناسب در برابر جداشدگی اقدامات زیر باید انجام شود:

#### • کاهش فاصله بین ذرات جامد

این امر از طریق محدود کردن سنگدانه‌های مصرفی، کاهش در حداکثر اندازه سنگدانه مصرفی، کاهش نسبت  $w/p$  و استفاده از مواد لزج‌کننده انجام می‌گیرد.

#### • به حداقل رساندن آب‌انداختگی

این عمل از طریق استفاده از آب کم، کاهش نسبت  $w/p$ ، مواد پودری با سطح مخصوص بالا و استفاده از مواد لزج‌کننده انجام می‌پذیرد.

#### ۱-۲-۳- توانایی عبور کنندگی

قابلیت بتن برای عبور از موانع و بازشوهای باریک در قالب و به خوبی میلگردهای تقویتی را بدون مسدود شدن و بلوکه شدن ذرات سنگدانه و بدون در بر گرفتن فضای خالی را، قابلیت عبور کنندگی بتن می‌گویند [۱۸].

یکی از مهمترین موضوعات اصلی برای کنترل کیفیت بتن، قابلیت عبور از میان موانع باریک و مسدود شده‌ی بتن تازه می‌باشد. اگرچه که این پدیده به طور مشخص و واضح بر اساس تشخیص شهودی و عینی، قابل درک و ارزیابی می‌باشد [۱۹].

بتن خودتراکم برای داشتن عملکرد مؤثر باید کارایی و روانی کافی، همراه با مقاومت مناسب در برابر جداسازی را داشته باشد و در مواقعی که قالب‌ها دارای بازشوهای تنگ و باریک هستند و یا با تراکم بالای آرماتور مواجه هستند نیاز به ارضاء مواردی می‌باشد تا از ایجاد انسداد سنگدانه‌های درشت در دهانه باریک جلوگیری شود. بنابراین ایجاد سازگاری بین اندازه و مقدار ذرات درشت در بتن خودتراکم و فاصله آزاد بین آرماتورها و بازشوهای قالب که بتن باید از میان آنها عبور کند، الزامی است.

مکانیزم ایجاد پدیده انسداد به سادگی قابل بیان می‌باشد. مکانیزم انسداد به این صورت اتفاق می‌افتد که در زمان عبور بتن از بازشو، ذرات سنگدانه موجود در اطراف بازشو باید مسیر حرکتی خود را تغییر دهند و این امر باعث می‌شود برخورد بین ذرات سنگدانه زیاد شده و برخوردهای لحظه‌ای زیادی بین ذرات سنگدانه در مجاورت بازشو ایجاد گردد. با توجه به این برخوردها، امکان اینکه بعضی سنگدانه‌ها به شکل قوس پایدار در کنار هم قرار بگیرند، وجود دارد که این عمل باعث توقف جریان حرکتی بتن می‌گردد.

این پدیده زمانی که اندازه ذرات بزرگ و همچنین میزان سنگدانه زیاد باشد آسان‌تر شکل می‌گیرد. برای ذرات کوچکتر، این حالت برای مقدار بیشتر سنگدانه اتفاق می‌افتد و زمانی که ذرات جامد نسبت به ابعاد دریچه کوچک باشند امکان شکل‌گیری پدیده قوسی شدن وجود ندارد [۱۸].

به طور خلاصه برای بتن خودتراکم با توانایی پرکنندگی مطلوب و مقاومت مناسب در برابر جداسازی، انسداد تحت شرایط زیر امکان‌پذیر است:

۱- حداکثر اندازه سنگدانه بسیار بزرگ باشد.

۲- میزان سنگدانه درشت بسیار زیاد باشد.

اگر بتن مستعد جداسدگی، حاوی 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 ماکزیمم اندازه سنگدانه مشخص و میزان معینی از سنگدانه درشت استفاده می- شود. با به کار بردن آرماتور با قطر زیاد ممکن است امکان وقوع انسداد در بتن افزایش یابد. زیرا آرماتور با قطر زیاد، تکیه گاه پایدارتری را برای تشکیل قوس حاصل از قرار گرفتن در کنار هم فراهم می کند. برای کاهش انسداد باید سازگاری مناسبی بین سنگدانه های درشت و فواصل آزاد آنها در نظر گرفته- شود به این منظور اقدامات زیر موثر می باشد:

۱- کاهش حجم سنگدانه درشت

۲- کاهش حداکثر اندازه سنگدانه ها [۱۸]

### ۲-۲-۱ روش هایی برای دستیابی به قابلیت خودتراکمی

روش رسیدن به خودتراکمی فقط از قابلیت تغییر شکل پذیری بالای خمیر و یا ملات شامل نمی- شود، بلکه باید مقاومت در برابر جداسدگی بین سنگدانه ها و ملات را نیز در نظر گرفت مخصوصاً هنگامی که بتن از مسیر محدود شده میلگردهای تقویتی عبور کند.

اکامورا و از او روش های زیر را برای رسیدن به خودتراکمی به کار برده اند:

۱- محدودیت حجم درشت دانه ها

۲- کاهش نسبت آب ریزدانه ها ( $W/p$ )

۳- استفاده از فوق روان کننده

همانطور که فاصله بین ذرات سنگدانه‌ها کاهش می‌یابد، برخورد و تماس بین سنگدانه‌ها افزایش می‌یابد. در هنگام شکل گرفتن بتن، تنش داخل بتن افزایش می‌یابد. مخصوصاً نزدیک موانع که تنش داخلی بسیار زیاد می‌شود. این انرژی برای جریان یافتن توسط تنش داخلی افزایش یافته مصرف می‌شود که منجر به مسدود شدن ذرات سنگدانه‌ها می‌شود. محدود کردن حجم درشت‌دانه‌ها، این انرژی را به یک سطحی پایین به نسبت نرمال می‌رساند که در جلوگیری از بلوکه شدن و مسدود شدن بسیار موثر می‌باشد [۲۰].

نسبت (w/p) پایین در حجم مشخصی از سنگدانه‌ها میزان تصادف و برخورد بین ذرات سنگدانه را کاهش می‌دهد. بنابراین توانایی عبور کردن را بهبود می‌بخشد و مقدار فوق‌روان‌کننده هم سیالیت و هم مقاومت در برابر جداشدگی را تامین می‌کند [۱۸].

کارهای عملی و آزمایشگاهی اثرات مشخص و روشنی را برای رفع مسدود شدن بین میلگردها و حجمی از سنگدانه‌ها و خصوصیات روانی مجموعه معرفی می‌کند و نسبتی منطقی از مخلوط SCC را نشان می‌دهد [۲۱].

### ۱-۲-۳ امتیازات استفاده از بتن خودتراکم

استفاده از بتن خودتراکم مزایای بسیار ارزشمندی را در امر ساخت و ساز فراهم می‌آورد که از جمله این مزایا عبارتند از:

- ۱- کاهش نفوذپذیری: به علت حجم بالای ذرات ریز در مخلوط که تراکم بتن را حفظ می‌نماید که این احتمالاً نتیجه همگنی بالای بتن خود تراکم است [۲۲].
- ۲- توسعه تغییرات معماری: امکان ایجاد مقاطع نازک و باریک و یا با شکل‌های پیچیده‌تر که امکان بتن‌ریزی در آنها در گذشته به‌خوبی فراهم نبوده است.

- ۳- طول عمر بیشتر قالب‌ها: به دلیل فشار کمتر اعمال شده به قالب‌ها (تا حدود ۵۰٪) در اثر فقدان ویبره خارجی طول عمر قالب‌ها افزایش می‌یابد [۲۳ و ۲۴].
- ۴- ساخت در زمان کوتاه‌تر: به علت تراکم بیشتر و استفاده از فیلر در مقایسه با بتن‌های معمولی کسب مقاومت اولیه با سرعت بیشتری رخ داده و امکان بهره‌برداری سریع از سازه فراهم می‌شود که موجب بهره‌وری در تولید می‌گردد [۲۵].
- ۵- کاهش در نیروی کار در محل: به علت عدم نیاز به ویبره خارجی و مسائل پیرامون در بتن‌ریزی نیاز به نیروی کار کمتر احساس خواهد شد.
- ۶- سطوح کار تمام شده بهتر: به علت ویسکوزیته بالا و خاصیت خودتراکمی سطوح کار تمام شده از کیفیت بهتری برخوردار است.
- ۷- جابجایی آسانتر: به علت ویسکوزیته بالا و خاصیت خودتراکمی جابجایی و ریختن بتن راحت‌تر از حالت بتن‌های نرمال صورت می‌گیرد.
- ۸- بهبودی دوام: به علت تراکم بالا و مصرف بالاتر پودر، امکان نفوذ مواد مضر در بتن کمتر شده و دوام آن افزایش می‌یابد.
- ۹- آزادی عمل بیشتر در طراحی: به دلیل امکان عبور بتن خودتراکم در میان آرماتوربندی پیچیده، امکان طراحی سازه‌های بتنی با هر حجم آرماتور و فاصله آرماتوربندی امکان‌پذیر می‌گردد [۲۶].
- ۱۰- کاهش سر و صدای ناشی از ویبره نمودن: به علت حذف ویبره خارجی، آلودگی صوتی ناشی از آن کاهش می‌یابد.
- ۱۱- محیط کار ایمن‌تر: به علت حذف ویبره خارجی، خطرات احتمالی ناشی از کار کردن با آن کاهش می‌یابد.
- ۱۲- حذف مسائلی که ممکن است با ویبره کردن بوجود بیاید. به دلیل عدم مهارت نیروی کار امکان ویبره نمودن غیر اصولی موجب خطر جداشدگی مصالح و آب افتادن آن می‌گردد که با حذف آن، این مشکلات مرتفع می‌گردد.

۱۳- رسیدن به مقاومت بالاتر: به دلیل امکان ایجاد تراکم بهتر، امکان رسیدن به مقاومت بالاتر با بتن خودتراکم آسان تر به نظر می‌رسد.

۱۴- کاهش مصرف انرژی و هزینه: به دلیل عدم استفاده از دستگاه‌های ویبراتور، مبالغی که برای مصرف انرژی در آن‌ها به کار گرفته می‌شود کاهش می‌یابد.

۱۵- شکل‌پذیری بهتر: به دلیل کاهش مدول الاستیسیته بتن خودتراکم در مقایسه با بتن‌های نرمال، این بتن از شکل‌پذیری نسبتاً بیشتری برخوردار است [۲۷].

ابداع بتن خودتراکم به صورت مثبتی روند ساخت را تغییر داده و منجر به بهبود مهمی در رابطه با محیط زیست و سلامتی و ایمنی گردیده است. به دلیل صدای کم‌تر، مصرف بتن خودتراکم باعث بهبود محیط هم برای کارگران دست‌اندرکار و هم مردم همسایه گردیده است.

لرزاننده‌های به‌کاررفته برای تحکیم بتن عامل عمده تولید صدا در طول بتن‌ریزی می‌باشند. در هر دو حالت بتن‌ریزی درجا یا پیش‌ساخته، کار از نظر فیزیکی، خستگی کمتری را به دنبال خواهد داشت و کارگران به دلیل اینکه ویبراتور بتن کار نمی‌کند کمتر دچار آسیب بدنی و روحی خواهند شد. در نتیجه کاربرد بتن خودتراکم از این نظر نیز به دلیل پایین آوردن خستگی توصیه شده است. بتن‌های تازه و سخت‌شده خودتراکم از نظر نشت مواد شیمیایی نیز مورد اندازه‌گیری قرار گرفته و هیچ تفاوتی در فیلر مقایسه با بتن سنتی تحکیم شده یافت نشده است، که این مورد و موارد ذکر شده در این بخش موید تاثیر و بهبود مصرف بتن خودتراکم در حفظ محیط‌زیست و سلامتی افراد دست‌اندرکار می‌باشد. [۲۸].

#### ۱-۲-۴ معایب بتن خودتراکم

این نوع بتن به علت مقدار زیاد فیلر و همچنین نسبت آب به سیمان کم‌تر، در مقابل آتش نسبت به بتن ویبره شده ضعیف‌تر می‌باشد. همچنین در صورت استفاده از فیلر آهکی، این نوع بتن در مقابل حمله سولفات‌ها، مقاومت ضد سولفات کمتری را نسبت به بتن ویبره شده از خود نشان می‌دهد. برای

مثال اگر مقدار رطوبت ریز دارنه ها ۱ درصد تغییر کند، اثر زیادتری روی رئولوژی بتن خود تراکم دارد. همچنین این نوع بتن نسبت به بتن معمولی هزینه بیشتری دارد [۲۹]. علاوه بر این، به دلیل ماهیت بتن خودتراکم در صورت عدم نظارت دقیق ممکن است مشکلاتی در ساخت بتن در مقایسه با بتن معمولی بوجود آید.

### ۱-۲-۵ توسعه مخلوط‌های بتن خودتراکم

مخلوط‌های بتن خودتراکم بایستی ۳ ویژگی اساسی را دارا باشند:

- توانایی جریان یافتن و پرکردن در داخل قالب‌های پیچیده تحت اثر وزن خود
- توانایی عبور از میان یک شبکه آرماتوربندی حجیم و پیچیده تحت اثر وزن خود
- مقاومت بالا در برابر با جداشدگی

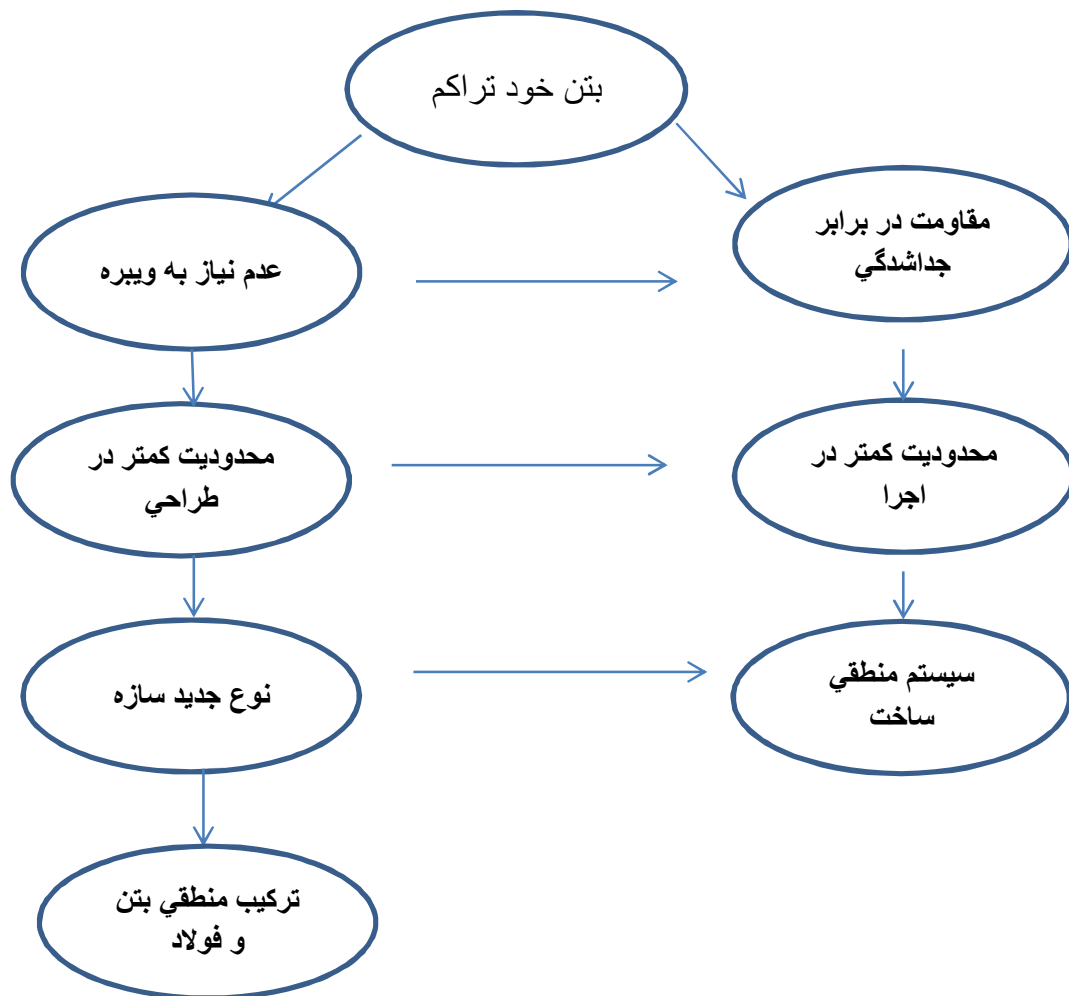
مخلوط‌های بتن خودتراکم به گونه ای طراحی می‌شوند تا نیازهای پروژه را تامین کنند. به عنوان مثال در یک پروژه در ژاپن لازم بود تا اینکه بتن در طولی برابر ۲۰۰ متر پمپ شود در عین حال از ارتفاعی برابر ۵ متر بدون هیچ‌گونه جداشدگی سقوط کند و بطور موفقیت‌آمیزی از میان یک شبکه آرماتور عبور نماید. بنابراین لازم بود تا به گونه‌ای بتنی فراهم شود تا همه شرایط فوق را دارا باشد و با توجه به ویژگی‌های اساسی بتن خود تراکم توسعه این بتن توانست این شرایط را فراهم کند.

### ۱-۲-۶ بتن خودتراکم و سیستم‌های ساخت و طراحی سازه‌ای جدید

با استفاده از بتن خودتراکم می توان هزینه تراکم و بیره‌ای را کاهش داد. این درحالی است که تراکم بتن در سازه می‌تواند کاملاً مطمئن باشد. اگر چه هزینه‌های کلی برای ساخت جز در سازه‌های بزرگ همیشه نمی‌تواند کاهش یابد.

بتن خودتراکم می‌تواند سیستم‌های ساخت قبلی را که اساس آن نیاز بتن به ویره کردن جهت تراکم آن بود، بهبود بخشد. تراکم به وسیله ویره نمودن سنتی به آسانی می‌تواند باعث جدا شدگی

گردد که این خود به عنوان یک مانع برای کار ساخت محسوب می‌شود. با ساخت بتن خودتراکم این مانع حذف شده و یک سیستم ساخت جدید که شامل قالب‌بندی، آرماتوربندی و طراحی سازه‌ای است می‌تواند توسعه یابد. شکل ۱-۱ ارتباط ساخت بتن خودتراکم و یک طراحی منطقی را بیان می‌کند [۳۰].



شکل ۱-۱ نمودار رسیدن به سیستم ساخت منطقی به وسیله بتن خودتراکم (پیشنهاد شده توسط Ozawa) [۳۰]

### ۱-۲-۷ انواع پودری مورد استفاده در بتن خودتراکم

مواد پودری مورد استفاده در بتن‌های خودتراکم بر حسب واکنش آنها با آب در جدول ۱-۱ آمده

است.



جدول ۱-۱ مواد پودری مورد استفاده در بتن خودتراکم بر حسب واکنش پذیری با آب [۳۱]

نوع پودر	وضعیت شیمیایی	رده پودر
فیلرهای معدنی (پودر سنگ آهک و دولومیت و ...)	خنثی و نیمه خنثی	رده I
خاکستر بادی، میکرو سیلیس	یوزولانی	رده II
سرباره کوره	هیدرولیکی	

### ۱-۳ دلایل استفاده از ملات خودتراکم بجای بتن خودتراکم

از آنجا که خواص رئولوژی بتن خودتراکم بخاطر نیاز به وسایل پیچیده اغلب دشوار است، برای تعیین ویژگی‌های بتن خودتراکم، از ملات خودتراکم استفاده می‌شود [۳۱]. مطابق نظر Domone و همکاران [۳۲]، ملات خودتراکم با اهداف زیر مورد آزمایش قرار می‌گیرند.

۱- بتن خودتراکم نسبت به بتن معمولی شامل درشت‌دانه کمتری است (۳۱ تا ۳۵ درصد حجمی)، بنابراین خواص ملات بسیار نمایان می‌باشد.

۲- ارزیابی خواص ملات، یک قسمت کامل طراحی فرآیند طرح اختلاط بسیاری از بتن‌های خودتراکم می‌باشد، بنابراین آگاهی از خواص ملات خودتراکم به خودی خود مهم است.

۳- ملات خودتراکم در مقایسه با بتن خودتراکم، نسبت به تغییرات حساس‌تر است و در نتیجه تاثیر تغییر در اختلاط را واضح‌تر نشان می‌دهد.

۴- آزمایش ملات آسان‌تر از آزمایش روی بتن است.

## ۴-۱ روش و هدف تحقیق

روش تحقیق در این پژوهش، روش آزمایشگاهی بوده و هدف آن یافتن و ساخت طبقه جدیدی از ملات خود تراکم با استفاده از مواد ضایعاتی، نانو سیلیس و الیاف است که بتواند عملکرد بالایی در کارایی، مقاومت و دوام از خود نشان دهد.

در این آزمایش برای بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های ساخته شده آزمایش‌های مقاومت فشاری<sup>۱۳</sup> و مقاومت کششی<sup>۱۴</sup> روی نمونه‌ها انجام شد و دوام نمونه‌ها به کمک آزمایش‌های جذب آب<sup>۱۵</sup> و مقاومت در برابر اسید<sup>۱۶</sup> بررسی شد. همچنین برای کنترل خودتراکمی نمونه‌ها آزمایش مینی-اسلامپ<sup>۱۷</sup> و V-funnel<sup>۱۸</sup> روی آنها انجام شد.

---

<sup>13</sup> Compressive strength test

<sup>14</sup> Tensile strength test

<sup>15</sup> Water absorption test

<sup>16</sup> Acid resistance test

<sup>17</sup> Mini-slump test

<sup>18</sup> V-funnel flow time

فصل دوم:

# مروری بر استفاده از شیشه ضایعاتی در بتن

## ۲-۱ مقدمه‌ای بر شیشه و بازیافت آن

شیشه از جمله ضایعات جامد مهم در بسیاری از کشورها می‌باشد. بر اساس گزارشات سازمان اروپایی سیمان<sup>۱۹</sup>، تولید سیمان در سال ۲۰۱۵ در دنیا ۴/۶ تن بوده است که نسبت به سال قبل خود ۶/۳ درصد افزایش داشته‌است [۳۳]. تولید سیمان در ایران بر اساس بررسی های سازمان زمین شناسی آمریکا<sup>۲۰</sup> در سال ۲۰۱۴، ۷۵ میلیون تن بوده که جایگاه هشتم تولید سیمان در جهان را داراست. این در حالی است که تولید سیمان قاره اروپا در سال ۲۰۱۴، ۱۶۵/۸ میلیون تن است. از تولید هر تن سیمان، یک تن CO<sub>2</sub> وارد هوا می‌شود [۳۴] که از جمله گازهای گلخانه‌ای مخرب کره زمین و لایه اوزون است.

بازیافت شیشه، آلودگی ناشی از دفع آن را به اندازه قابل توجهی کاهش می‌دهد. انرژی‌ای که بابت بازیافت یک بطری شیشه ذخیره می‌شود، می‌تواند یک لامپ ۱۰۰ وات را برای ۴ ساعت روشن نگه دارد. همچنین آلودگی هوا را ۲۰ درصد کاهش و آلودگی آب را ۵۰ درصد کاهش می‌دهد.

مقدار زیادی از شیشه‌های مصرف‌شده دوباره بازیافت می‌شوند و قسمتی نیز برای مصارف گوناگون از جمله سنگدانه‌های بتن به کار می‌روند. مقدار زیادی از این مواد شرط لازم برای بازیافت را فراهم نمی‌کنند و این مواد برای دفن فرستاده می‌شوند. فضای مورد استفاده برای دفن قابل توجه است و این فضا می‌تواند برای مصارف دیگری به کار برده شود.

### ۲-۱-۱ شیشه ضایعاتی در تهران

تولید هزاران تن مواد زاید شیشه‌ای در شهر تهران که ناشی از فعالیت‌های روزمره و صنعتی و تجاری است، مسأله بازیافت را امری اجتناب‌ناپذیر کرده‌است. بدین ترتیب که دفن یا رهاسازی این مواد که قابل بازیافت هستند، در حوالی شهرها به عنوان عامل ایجادکننده مشکلات زیست‌محیطی

<sup>19</sup> The European cement association

<sup>20</sup> U.S. Geological Survey

مطرح است و از طرفی با دفن یا سوزاندن این مواد، در اصل، ثروت و سرمایه ملی را دورریخته و هدر داده‌ایم. طبق آمار سازمان بازیافت و تبدیل مواد شهرداری تهران در سال ۸۵، ۲٪ وزنی کل مواد زاید جامد را ضایعات شیشه تشکیل می‌دهد. سالانه در زباله‌های تهران ۵۲ هزار و ۲۲۶ تن شیشه وجود دارد که متأسفانه از این میزان ضایعات شیشه‌ای تولید شده تنها مقدار ناچیزی مورد بازیافت قرار می‌گیرد و بخش زیادی از آن به همراه سایر ضایعات دفن می‌شود، به طوری که می‌توان گفت متوسط ماهانه نرخ بازیافت شیشه در شهر تهران حدود ۲٪ است.

بازیافت شیشه موجب صرفه‌جویی در مصرف منابع و مواد اولیه، صرفه‌جویی در مصرف انرژی، صرفه‌جویی در هزینه و فضای لازم جهت دفن، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی از جمله آلودگی هوا، آلودگی آب، آلودگی معدنی، خروج گازهای گلخانه‌ای و همچنین ایجاد اشتغال، افزایش مشارکت و آگاهی‌های زیست‌محیطی می‌شود.

## ۲-۲ شیشه و کاربرد آن

شیشه‌های سیلیکاتی بیشتر شفاف‌اند. از این رو کاربرد فراوانی دارند. از آن جمله می‌تواند به کاربرد فراوان آن‌ها در صنعت ساختمان و در و پنجره‌های شیشه‌ای اشاره کرد. هرچند امروزه بیشتر از آن به عنوان روکش مواد دیگر استفاده می‌شود چون می‌تواند هر شکلی را به خود بگیرد. کاربرد دیگر شیشه، استفاده‌ی سنتی آن به عنوان کاسه، گلدان، بطری و ... است. اگر شیشه صلب‌تر باشد، در تولید وسایل تزئینی شیشه‌ای کاربرد پیدا می‌کند. شیشه می‌تواند بازتابنده یا شکننده نور باشد. این ویژگی‌ها می‌تواند با برش یا جلا بدست آید و در تولید عدسی، منشور یا ظرف‌های بلوری کاربرد داشته باشد. همچنین با کمک نمک‌های فلزی می‌توان به شیشه رنگ داد یا آن را رنگ‌آمیزی کرد. این توان باعث کاربرد فراوان شیشه در کارهای هنری و شیشه‌های رنگی شد. شیشه با اینکه شکننده است، اما بسیار پایدار است. عمر برخی از شیشه‌های یافت‌شده به دوران آغازین ساخت شیشه باز می‌گردد.

به طوری که هر بطری شیشه‌ای می‌تواند تا ۱۵ بار در چرخه بین تولید و مصرف مورد استفاده مجدد قرار گیرد. بازیافت شیشه مقرون به صرفه‌است و قیمت مصرف آن را کاهش می‌دهد. بازیافت شیشه به ذخیره انرژی منجر می‌شود و موجب حفظ محیط زیست نیز می‌گردد.

## ۲-۳ استفاده از شیشه ضایعاتی در بتن

در دهه‌ی ۱۹۶۰ تحقیقات گسترده‌ای مبنی بر استفاده از شیشه ضایعاتی به جای سنگدانه‌ها صورت گرفت و نتیجه آن شکست همه نمونه‌ها بود [۳۵-۳۸].

از سال ۱۹۹۶ به دلیل هزینه بالای دفع شیشه‌های ضایعاتی و همچنین مضرات محیط زیستی آن، تحقیقات مبنی بر استفاده از شیشه در بتن از سرگرفته شد [۳۹-۴۵]. Meyer و Baxter تحقیقات گسترده‌ای را در سالهای ۱۹۹۷ و ۱۹۹۸ مبنی بر استفاده شیشه به جای سنگدانه‌ها انجام دادند [۴۵-۳۹]. نتیجه کار آن‌ها به دست آوردن نمونه بتن با مشخصات قابل قبول با استفاده ۱۰۰ درصدی از شیشه به جای سنگدانه ( ۲۵ درصد شیشه شفاف عبور داده شده از الک شماره ۸، ۲۵ درصد شیشه کهربایی عبور داده شده از الک نمره ۱۶، ۲۵ درصد شیشه کهربایی عبور داده شده از الک شماره ۳۰، ۱۵ درصد شیشه کهربایی عبور داده شده از الک شماره ۵۰ و ۱۰ درصد شیشه کهربایی عبور داده شده از الک شماره ۱۰۰). او در این آزمایش از ۸۰٪ سیمان پرتلند تیپ ۳ و ۲۰ درصد متاکائولین و مقدار کافی روان کننده در بتن استفاده کرد.

تحقیقات مبنی بر استفاده از پودر شیشه به عنوان جایگزین سیمان از سال ۱۹۹۵ توسط Archibald و همکاران شروع شد [۴۶]. بر اساس ASTM C618 شیشه را می‌توان به عنوان پوزولان کلاس N گروه بندی کرد [۴۷]. محققان دیگری مانند Shao و همکاران در سال ۲۰۰۰ [۴۸]، Dyer و همکاران در سال ۲۰۰۱ [۴۹]، Shayan و همکاران در سال ۲۰۰۴ [۵۰]، Byars و همکاران در

سال ۲۰۰۴ [۴۳]، Shi و همکاران در سال ۲۰۰۴ و [۵۱-۵۲] Shayan و همکاران در سال ۲۰۰۶ [۵۳]، بر روی استفاده شیشه به عنوان جایگزین سیمان تحقیقاتی را انجام دادند.

در این تحقیقات، در آزمایشی که توسط shayan و همکارانش در سال ۲۰۰۶ [۵۳] و همینطور در تحقیقی که توسط Taha و همکارانش در سال ۲۰۰۸ [۵۴] انجام گرفت، استفاده از پودر شیشه نتایج منفی روی خواص بتن سخت شده داشت.

بر اساس استاندارد ASTM 1260 هرچقدر پودر شیشه ریزتر باشد، احتمال واکنش قلیایی-سیلیسی در آن کم تر خواهد بود [۵۵]. دلیل این قضیه پخش بیشتر سیلیس در ماتریس سیمان است. Shao و همکاران [۴۸] در سال ۲۰۰۰ شیشه‌های ساختمانی را به سه دسته تقسیم کردند: شیشه ۱۵۰ میکرومتری: شیشه‌ای که از الک شماره ۱۰۰ رد شد و روی الک شماره ۲۰۰ باقی ماند. شیشه‌ی ۷۵ میکرومتری: شیشه‌ای که از الک شماره ۲۰۰ رد شد و روی الک شماره ۴۰۰ باقی ماند و شیشه ۳۸ میکرومتری که از الک ۴۰۰ رد شد. نتیجه این شد که شیشه ۳۸ میکرومتری بعد از ۷ روز به مینیمم مقاومت و بعد از ۲۱ روز با افزایش مقاومت مواجه شد. مقاومت نمونه ۱۵۰ میکرومتری زیر حد مجاز و نمونه ۷۵ میکرومتری نمونه متعادلی بود. (در حالی که مقاومت ۷ روزه آن کمی پایین تر از حد مجاز بود با بهبود مقاومت در ۲۱ روز به مقدار استاندارد مقاومت رسید).

Dyer و همکارش در سال ۲۰۰۱ [۴۹] سه نمونه شیشه خرد رنگی را با مقداری از سیمان جایگزین کردند: شیشه سفید، سبز و کهربایی. نتایج مقاومت با توجه به رنگ شیشه‌ها متفاوت بود: رنگ سفید و سبز بعد از ۲۸ روز به مقاومت اندکی بیشتر از نمونه کنترل رسیدند و شیشه کهربایی مقاومتی نزدیک به نمونه کنترل داشت. در این آزمایش ۱۰ درصد سیمان با شیشه جایگزین شد. آنها همچنین به این موضوع پی بردند که افزایش مقاومت بتن حاوی خرده شیشه بین ۷ تا ۲۸ روز گذشته از عمل آوری آن بسیار قابل توجه است.

Lee و همکارانش در سال ۲۰۱۱ [۵۶] به این نتیجه رسیدند که اضافه کردن خاکستر بادی در ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد انبساط نمونه‌های بتنی حاوی پودر شیشه را کاهش می‌دهد.

یکی از اسیدهای بسیار مخرب برای بتن، سولفوریک اسید است که خسارت‌های جدی برای بتن به دنبال می‌آورد. اگرچه سولفوریک اسید برای همه نوع بتن خطرناک است، نوع بتن و محتویات آن تاثیر زیادی روی رفتار بتن در مقابل اسید دارد. در بین تمامی روش‌هایی که برای بهبود عملکرد بتن در مقابل اسید پیش‌بینی شده است [۵۷-۵۹]، استفاده از مواد جایگزین سیمان معمول‌ترین این روش‌ها می‌باشد. تحقیقات بسیار کمی روی تاثیر اسید بر بتن حاوی پودر شیشه صورت گرفته است. Ling و همکارانش [۶۰] تاثیر خرده‌شیشه آبی را به عنوان جایگزین سنگدانه روی ملات خودتراکم امتحان کردند و نتیجه کار آن‌ها به این صورت بود که نمونه‌های حاوی پودر شیشه در برابر اسید مقاومت کمتری نسبت به نمونه کنترل داشته و کاهش وزن قابل ملاحظه ای داشتند.

در سال ۲۰۱۶ Siad و همکاران [۶۱] تحقیقی مبنی بر استفاده از پودر شیشه در ملات سیمان انجام دادند و نتیجه ی آن تاثیر خوب پودر شیشه بر مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی و مقاومت در برابر اسید نمونه‌ها بود.

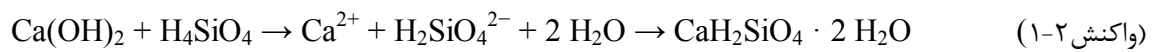
## ۲-۴ واکنش قلیای - سیلیسی در بتن حاوی شیشه

شیشه یک قلیایی غیرپایدار است که در محیط بتن می‌تواند باعث بوجود آمدن مشکلات ناشی از واکنش قلیایی - سیلیسی (ASR) شود. واکنش ASR واکنشی است که در طول زمان در بتن بین خمیر سیمان بسیار قلیایی و سیلیس چگال فعال که در بسیاری از سنگدانه ها وجود دارد، اتفاق می‌افتد. این واکنش موجب انبساط سنگ‌دانه‌ها توسط تشکیل ژل کلسیم-سیلیکات-هیدرات می‌شود که این ژل در کنار آب افزایش حجم پیدا کرده و موجب به وجود آمدن فشار داخلی در بتن و خرد شدن



آن و در نتیجه کاهش مقاومت خواهد شد که در نتیجه منجر به شکست خواهد شد. نمونه ای از تاثیر واکنش قلیایی سیلیسی بر بتن در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.

واکنش ASR همان واکنش پوزولانی که یک واکنش ساده بر پایه اسید بین کلسیم هیدروکسید و سیلیسیک اسید است که واکنش آن به صورت زیر می باشد:



شکل ۱-۲ نمونه‌ای از واکنش قلیایی-سیلیسی در بتن



فصل سوم:

مصالح مصرفی، آزمایشات

و طرح اختلاط

## ۳-۱ مواد مصرفی در بتن

### ۳-۱-۱ سیمان

در مطالعه‌ی آزمایشگاهی حاضر از سیمان پرتلند تیپ دو مطابق استاندارد ASTM C150 استفاده شده است که از کارخانه سیمان مشهد مطابق شکل ۳-۱ تهیه شده است [۶۲]. این سیمان متداول‌ترین سیمانی است که مورد استفاده قرار می‌گیرد و برای مصارف در کارهای ساختمانی عمومی مناسب است. ترکیبات سیمان تیپ ۲ مشهد در جدول ۳-۱ ارائه شده است.

جدول ۳-۱ ترکیبات و خصوصیات سیمان پرتلند تیپ ۲ مشهد

Chemical Analysis (%)	Cement
SiO <sub>2</sub>	21.56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.67
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.17
CaO	49.88
MgO	4.51
SO <sub>3</sub>	2.75
K <sub>2</sub> O	0.76
Na <sub>2</sub> O	0.43
LOI	2.79



شکل ۳-۱ سیمان پرتلند تیپ ۲ مشهد

### ۳-۱-۲ آب

آب استفاده شده در آزمایش، آب لوله کشی شهر مشهد می باشد.

### ۳-۱-۳ الیاف پلی پروپیلن

در این آزمایش از الیاف پلی پروپیلن با طول ۱۲ میلی متر، به عنوان فایبر در ملات خودتراکم استفاده شده است. اطلاعات بیشتر در خصوص این الیاف در پیوست ارائه شده است.

### ۳-۱-۴ نانو سیلیس

ذرات نانو مطابق شکل ۲-۳ از شرکت ایروسیل آلمان تهیه شد که مشخصات آن در زیر ارائه شده است. عکس های TEM این ذرات نیز توسط شرکت نانو پیشگامان تهیه شده و مطابق شکل ۳-۳ می باشد.

**Silicon Oxide Nanoparticle (SiO<sub>2</sub>, 99+%, 11-13 nm)**

**Details:**

Silicon Oxide (SiO<sub>2</sub>)

Purity: 99+%

APS: 11-13 nm

SSA: 200 m<sup>2</sup>/g

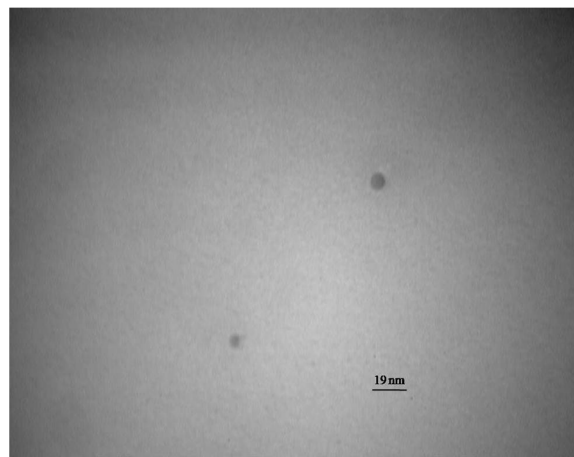
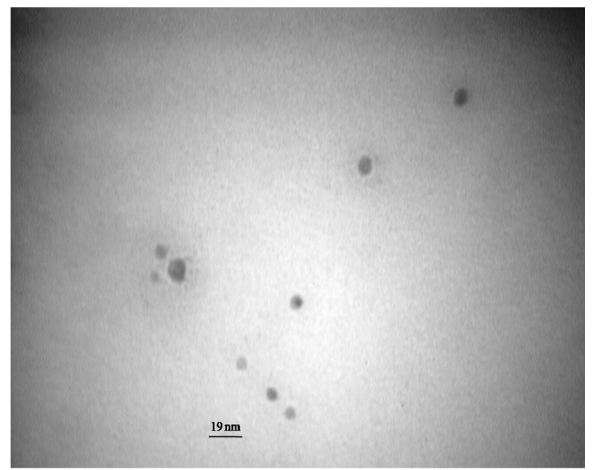
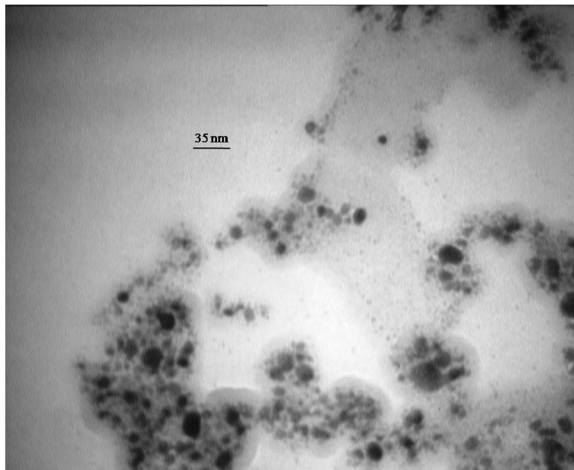
Color: white

Bulk density: <0.10 g/cm<sup>3</sup>

True density: 2.4 g/cm<sup>3</sup>



شکل ۲-۳ نانو سیلیس تهیه شده از شرکت ایروسیل



شکل ۳-۳ عکس های TEM نانو سیلیس

### ۳-۱-۴-۱ نحوه ی حل کردن نانوسیلیس

با توجه به اینکه ذرات نانو سیلیس سبک هستند و در هنگام میکس کردن در هوا پخش می‌شوند، باید آن‌ها را به مایع تبدیل کنیم. روش تبدیل پودر نانو سیلیس به مایع نانو سیلیس به این صورت است که ابتدا پودر نانو سیلیس را داخل بشر ریخته و آب مورد نظر را به آن اضافه می‌کنیم. سپس مگنت را در بستر بشر قرار داده و بشر را روی دستگاه هیدراستیر گذاشته و با سرعت ۲۵۰-۳۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۶ ساعت هم می‌زنیم. وقتی که بشر را روی دستگاه گذاشتیم، حفره‌ای در وسط بستر روی سطح آب مطابق شکل ۳-۴ ایجاد می‌شود که مانند موج عمل کرده و ذرات نانو را که بسیار سبک هستند به پایین سطح می‌آورد و بالعکس. این عمل باعث می‌شود سوسپانسیون یکنواختی در آب حاوی نانو سیلیس شکل بگیرد.



شکل ۳-۴ تبدیل نانو سیلیس جامد به مایع نانو سیلیس

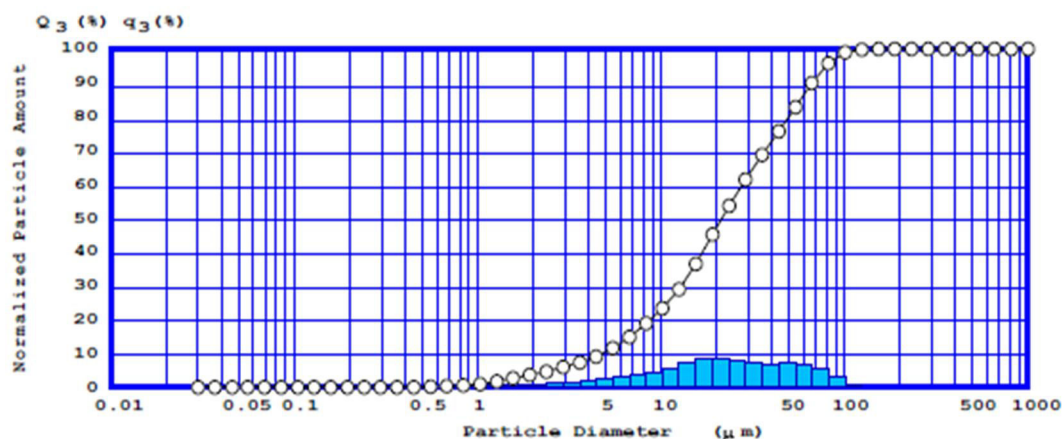
### ۳-۱-۵ شیشه مصرفی

شیشه‌های آزمایش مطابق شکل ۳-۵ بصورت مخلوطی از شیشه‌های رنگی از کارگاه شیشه بری عمرانی در شهر مشهد تهیه شد. این کارگاه، شیشه‌های خود را از کارخانه شیشه کاوه ساوه تهیه می‌کند که بر اساس تماسی که با کارخانه گرفته شد، میزان سیلیس این شیشه‌ها بین ۷۰ تا ۷۵ درصد می‌باشد. همچنین اندازه ذرات پودر شیشه مصرفی در این آزمایش در نمودار ۳-۱ ارائه شده است. در این آزمایش الیاف پلی‌پروپیلن از شرکت پلی‌پی‌سازان، برای استفاده در ملات‌ها به کار برده شدند که خصوصیات الیاف پلی‌پروپیلن در پیوست ارائه شده است.



شکل ۳-۵ پودر شیشه مصرفی در آزمایش





Diam	Cum	Diff	Diam	Cum	Diff	Diam	Cum	Diff			
x (μ m)	Q <sub>3</sub> (%)	q <sub>3</sub> (%)	x (μ m)	Q <sub>3</sub> (%)	q <sub>3</sub> (%)	x (μ m)	Q <sub>3</sub> (%)	q <sub>3</sub> (%)			
1	1000.000	100.000	0.000	18	28.988	61.522	7.826	35	0.840	0.746	0.200
2	811.975	100.000	0.000	19	23.538	53.695	8.519	36	0.682	0.546	0.166
3	659.303	100.000	0.000	20	19.112	45.176	8.672	37	0.554	0.380	0.191
4	535.337	100.000	0.000	21	15.518	36.505	7.489	38	0.450	0.188	0.145
5	434.680	100.000	0.000	22	12.601	29.015	5.527	39	0.365	0.043	0.041
6	352.949	100.000	0.000	23	10.231	23.488	4.529	40	0.297	0.002	0.002
7	286.586	100.000	0.000	24	8.308	18.959	3.948	41	0.241	0.000	0.000
8	232.700	100.000	0.000	25	6.746	15.011	3.248	42	0.196	0.000	0.000
9	188.947	100.000	0.000	26	5.477	11.763	2.515	43	0.159	0.000	0.000
10	153.420	100.000	0.046	27	4.447	9.248	1.852	44	0.129	0.000	0.000
11	124.573	99.954	0.826	28	3.611	7.396	1.377	45	0.105	0.000	0.000
12	101.150	99.128	3.313	29	2.932	6.019	1.250	46	0.085	0.000	0.000
13	82.131	95.815	5.834	30	2.381	4.768	1.092	47	0.069	0.000	0.000
14	66.689	89.981	7.076	31	1.933	3.677	0.949	48	0.056	0.000	0.000
15	54.149	82.905	7.169	32	1.570	2.728	0.885	49	0.046	0.000	0.000
16	43.968	75.736	6.987	33	1.275	1.843	0.697	50	0.037	0.000	0.000
17	35.701	68.749	7.227	34	1.035	1.146	0.400	51	0.030	0.000	0.000

نمودار ۳-۱ اندازه ذرات پودر شیشه مصرفی

### ۳-۱-۶ فوق‌روان‌کننده

فوق‌روان‌کننده مصرفی در این آزمایش با نام PCE (Vand Super Plast) بر اساس استاندارد ASTM C494 TYPE F انتخاب شده و از شرکت ژیکواوا تهیه شده است. این فوق‌روان‌کننده از نوع فوق‌روان‌کننده‌های برپایه کربوکسیلات می‌باشد و وزن مخصوص آن ۱.۰۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب و pH آن ۷ است. حداکثر مقدار مصرفی این فوق‌روان‌کننده ۲ درصد می‌باشد.

## ۳-۲ روش آزمایش

### ۳-۲-۱ مقدمه

یکی از مهم‌ترین آزمایش‌ها روی بتن سخت‌شده، آزمایش مقاومت فشاری می‌باشد. این آزمایش به دلیل سهولت انجام آن و همچنین به دلیل اهمیت ذاتی مقاومت فشاری بتن از جمله مهم‌ترین آزمایش‌ها می‌باشد. آزمایش‌های بتن به‌طور کلی به دو دسته آزمایش‌های تخریبی و بدون تخریب تقسیم می‌شوند که آزمایش‌های کششی، فشاری و مقاومت در برابر اسید صورت گرفته در این تحقیق آزمایش تخریبی و آزمایش جذب آب آزمایش بدون تخریب است.

### ۳-۲-۲ آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM C 109 صورت گرفته است [۶۳]. براساس این استاندارد، نمونه‌های مکعبی ۵۰ میلی‌متری ساخته شده و ملات در قالب‌های فولادی ریخته می‌شود. باید توجه داشته باشیم که ضروری است که قالب‌ها کاملاً به هم قفل و بست شده باشند. نمونه ای از قالب‌های آزمایش مقاومت فشاری در شکل ۳-۶ ارائه شده است. قفل و بست خوب قالب‌ها از نشست ملات جلوگیری می‌کند. سطح داخلی قالب‌ها باید با لایه‌ی نازک از روغن چرب شوند تا ملات به قالب نچسبد. روند آزمایش به این صورت است که پس از ساخت ملات خودتراکم، ملات در قالب‌های مکعبی که از قبل چرب شده اند ریخته شده و هیچ‌گونه عمل تراکم روی آن صورت نمی‌گیرد. قالب‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای  $23 \pm 3$  درجه سانتیگراد نگهداری می‌شوند. سپس نمونه‌ها از قالب خارج شده و تا زمان آزمایش در حوضچه آب با دمای  $23 \pm 2$  درجه سانتیگراد نگهداری می‌شوند. برای آزمایش نمونه‌ها را از آب خارج کرده و سطح خارجی آنها را کاملاً خشک کرده و آنها را برای آزمایش حاضر می‌کنیم.

در آزمایش مقاومت فشاری، نمونه‌های مکعبی با سطح کاملاً صاف در تماس با صفحه ماشین قرار می‌گیرد. در این آزمایش سرعت بارگذاری ۱۳۵۰ نیوتون بر ثانیه انتخاب شد.



شکل ۳-۶ قالب آزمایش مقاومت فشاری

### ۳-۲-۳ آزمایش مقاومت کششی

در این آزمایش از قالب‌های پروانه‌ای مطابق شکل ۳-۷ با عمق ۲۵ میلی‌متر و ضخامت ۲۵ میلی‌متر برای تعیین مقاومت کششی نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM C307 استفاده می‌شود [۶۴]. نحوه کار در این آزمایش مشابه آزمایش مقاومت فشاری است. به این صورت که ملات خودتراکم بعد از اختلاط در این قالب‌ها که از قبل روغن کاری شده‌اند ریخته می‌شود. این قالب‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای  $23 \pm 3$  نگهداری می‌شوند و سپس نمونه‌ها از قالب خارج می‌شوند و تا روز آزمایش در حوضچه‌ی آب با دمای  $23 \pm 2$  نگهداری می‌شوند. پس از خروج نمونه‌ها از آب، سطح آنها کاملاً خشک شده و برای آزمایش آماده می‌گردند.

دستگاه مقاومت کششی دارای دو فک است که نمونه‌ها را از دو طرف داخل فک می‌گذارند و خوب محکم می‌کنند. این دستگاه از یک طرف دارای یک خط‌کش است که روی آن اندازه‌هایی بر حسب نیوتون مشخص شده است. موقعی که نمونه‌ها را داخل دستگاه می‌گذاریم باید تعادل داشته باشد، به این صورت که خط‌کش باید تعادل داشته باشد. سپس دستگاه را روشن کرده و فک‌ها شروع به حرکت می‌کنند و نمونه‌ها از دو طرف به حالت کشش درمی‌آیند و خط‌کش نیز از طرفی دیگر شروع به حرکت می‌کند تا نمونه‌ها بشکنند و اندازه‌ی نیروی شکست روی خط‌کش مشخص می‌شود. سپس

مساحت ناحیه شکست به وسیله‌ی کولیس اندازه‌گیری می‌شود و از تقسیم نیرو بر مساحت شکست، تنش شکست کششی نمونه‌ها به دست می‌آید.



شکل ۳-۷ قالب آزمایش مقاومت کششی

### ۳-۲-۴ آزمایش درصد جذب آب

آزمایش جذب آب بر اساس استاندارد ASTM C642-13 روی نمونه‌های مکعبی انجام می‌شود. [۶۵]. روند این آزمایش به این صورت است که نمونه‌ها بعد از ۲۸ روز که در حوضچه‌ی آب قرار دارند، در اون با دمای  $110 \pm 5$  درجه سانتیگراد به مدت ۴۸ ساعت قرار می‌گیرند. سپس نمونه‌ها از اون خارج می‌شوند و بعد از خنک‌شدن وزن شده و درون حوضچه‌ی آب با دمای ۲۱ درجه سانتیگراد به مدت ۴۸ ساعت قرار می‌گیرند. بعد از ۴۸ ساعت نمونه‌ها از آب خارج شده و سطح آنها کاملاً خشک شده و دوباره توزین می‌شوند. شکل ۳-۸ توزین نمونه‌ها را در آزمایش جذب آب نشان می‌دهد. این آزمایش تا زمانی تکرار می‌شود که فاصله دو وزن خشک و دو وزن تر متوالی کمتر از ۵ درصد باشد. در نهایت درصد جذب آب نمونه‌ها از فرمول زیر بدست می‌آیند:

$$\text{water absorption} = \frac{B-A}{A} \times 100 (\%) \quad (\text{فرمول ۳-۱})$$

B: وزن ملات در حالت اشباع

A: وزن ملات در حالت خشک



شکل ۳-۸ توزین نمونه ها در آزمایش جذب آب

### ۳-۲-۵ آزمایش مقاومت در برابر اسید

در این آزمایش‌ها نمونه‌ها بعد از ۲۸ روز نگهداری در حوضچه‌ی آزمایش از حوضچه خارج شده و سطح خارجی آنها کاملاً خشک می‌شود و نمونه توزین می‌گردد. سپس نمونه‌ها به مدت ۵۶ روز در آب حاوی سولفوریک اسید با غلظت‌های ۳ و ۵٪ وزن آن قرار می‌گیرد. بعد از ۵۶ روز نمونه‌ها از محلول خارج شده و سطح تحلیل رفته آنها کاملاً شسته و سپس سطح آنها کاملاً خشک می‌شود و دوباره وزن می‌شوند و بعد از توزین روی آنها آزمایش مقاومت فشاری به روش اشاره شده قبل انجام می‌شود.

## ۳-۳ طرح اختلاط بتن خودتراکم

### ۳-۳-۱ مقدمه‌ای بر طرح اختلاط بتن یا ملات خودتراکم

اصولا برای رسیدن به خودتراکمی نیاز است تا خمیر یا ملات قابلیت شکل‌پذیری زیادی داشته باشد. در نتیجه هنگام جریان بتن بین میلگردها، احتمال جداشدگی زیاد است. مقاومت بتن در برابر جداشدگی از عوامل مهمی است که باید مد نظر قرار گیرد.

خودتراکمی به مقدار بسیار زیادی به مشخصات مصالح و طرح اختلاط بستگی دارد. برای افزایش قابلیت تغییر شکل‌پذیری باید میزان آب به سنگدانه را زیاد کرد و یا از روان‌کننده استفاده کرد. از سوی دیگر باید توجه داشت که شرط لازم دیگر خودتراکمی لزجت بالاست که خود کاهش نسبت آب به سنگدانه را می‌طلبد. از این رو بهترین روش رسیدن به خودتراکمی اضافه کردن فوق‌روان‌کننده به بتن است.

Okamura برای حل مشکل فوق پیشنهاداتی را ارائه کرد [۳۰] که از جمله آنها محدود کردن حجم سنگدانه‌های درشت، استفاده از مقادیر زیاد پودر و حفظ نسبت آب به پودر برای دستیابی به غلظت موردنظر با توجه به اینکه مقدار زیاد سیمان موجب بروز مشکل در بتن می‌شود، سعی می‌شود از پودرهای خنثی مانند پودر سنگ آهک، خاکستر بادی و ... استفاده شود. استفاده از پودر باعث کاهش یا حذف نیاز به مواد کنترل‌کننده‌ی غلظت می‌شود. مهم‌ترین نکته در طرح اختلاط اوکامورا نقش کلیدی پودر در خودتراکمی است.

Okamura و همکارش طرح اختلاط خود را به شکل زیر ارائه دادند:

۱. درصد سنگدانه درشت باید محدود گردد. به این ترتیب که درصد سنگدانه‌ی درشت به حجم کل جامدات باید به ۵۰٪ محدود گردد.

۲. مقدار سنگدانه‌ی ریز باید محدود گردد و معادل ۴۰٪ حجم ملات باشد. ذرات کوچک‌تر از ۹۰ میکرون باید جز پودر حساب شوند.

۳. نسبت حجمی آب به پودر بین ۰.۹ تا ۱ بسته به خواص پودر در نظر گرفته شود.

۴. مقدار روان‌کننده و مقدار نهایی آب به پودر به‌گونه‌ای باشد که خودتراکمی اتفاق بیفتد.

Van و همکاران نیز [۶۶] روش ساده‌ای را برای اختلاط بتن خودتراکم معرفی کرد:

۱. ابتدا یک اختلاط معمولی به روش هراختلاط پذیرفته‌شده‌ی دیگر با اسلامپ ۱۰۰ میلی‌متر بدون روان‌کننده تهیه می‌شود.

۲. با افزایش روان‌کننده اسلامپ بتن را به ۱۶۰ تا ۱۸۰ میلی‌متر می‌رسانیم. (در صورت مشاهده‌ی هرگونه آب‌انداختگی یا جداسدگی، قسمتی از سنگدانه درشت توسط سنگدانه‌ی ریز تا ۵٪ جایگزین می‌شوند.

۳. برای رسیدن به بتن خودتراکم، سنگدانه‌های درشت توسط پودر جایگزین می‌شوند تا جریان اسلامپ ۵۰۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر بدست آید.

طرح‌های دیگری نیز توسط محققان دیگر ارائه شد که از جمله می‌توان به طرح اختلاط پیشنهاد شده توسط خیاط [۶۷] که برای تعیین نسبت مخلوط از داده‌های آماری استفاده کرد اشاره کرد.

### ۳-۲ طرح اختلاط نهایی

طرح اختلاط نهایی آزمایش بعد از اجرای آزمایشات اولیه و آزمون و خطا به‌صورت ارائه شده در جدول ۳-۲ انتخاب شد. در طراحی این طرح اختلاط، استاندارد EFNARC مدنظر بوده است [۳۱]. در این استاندارد بتن یا ملاتی خودتراکم است که نه تنها دارای ویژگی‌های بیان شده در فصل ۲ باشد،

بلکه مقدار اسلامپ آن و همینطور سرعت جریان آن در قیف V شکل در محدوده استاندارد EFNARC باشد.

در نهایت طرح اختلاط نهایی به صورت زیر می باشد:

مقدار سیمان ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمربع برای رسیدن به ملات خودتراکم، در نظر گرفته شده است.

سایر مواد براساس درصد وزنی سیمان در نظر گرفته شده اند به صورت زیر:

مقدار آب به سیمان ثابت و در تمام نمونه ها ۰/۴ وزن سیمان نمونه کنترل

(water/binder=0.4) فرض شده است.

مقدار الیاف در تمام نمونه ها ۰/۳ درصد برحسب وزن سیمان نمونه کنترل فرض شده است.

مقادیر نانو بر اساس وزن سیمان از ۰/۲ تا ۰/۴ متغیر است.

مقدار شیشه ضایعاتی ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ وزن سیمان در نظر گرفته شده است.



در این آزمایش ۱۳ طرح اختلاط متفاوت ساخته شد که ترکیبات هر طرح اختلاط در جدول ۲-۳

آورده شده است.

جدول ۲-۳ طرح اختلاط نمونه‌ها ( $\text{Kg/m}^3$ )

SCM name	Sand ( $\text{Kg/m}^3$ )	Cement( $\text{Kg/m}^3$ )	Glass( $\text{Kg/m}^3$ )	Nano-Silica ( $\text{Kg/m}^3$ )	Water( $\text{Kg/m}^3$ )	PP(%)
CO	1200	700	0	0	280	0.3
10G	1200	630	70	0	280	0.3
15G	1200	595	105	0	280	0.3
20G	1200	560	140	0	280	0.3
2N	1200	686	0	14	280	0.3
3N	1200	679	0	21	280	0.3
4N	1200	672	0	28	280	0.3
2N15G	1200	581	105	14	280	0.3
3N15G	1200	574	105	21	280	0.3
2N10G	1200	616	70	14	280	0.3
2N20G	1200	546	140	14	280	0.3
CONP	1200	700	0	0	280	0
10GNP	1200	6300	70	0	280	0



فصل چہارم:

# کنترل طرح اختلاط

## ۴-۱ آزمایش استاندارد برای تعیین غلظت نرمال سیمان هیدرولیکی

### ۴-۱-۱ دامنه کاربرد

این روش آزمایش برای تعیین غلظت نرمال سیمان هیدرولیکی به کار می‌رود. برای تعیین مقدار آب لازم جهت تهیه‌ی خمیر سیمان با غلظت نرمال، که در آزمایش‌های دیگر به کار می‌رود، از این آزمایش استفاده می‌شود.

### ۴-۱-۲ وسایل آزمایش

- ۱- ترازو: دقت و صحت ترازو باید برای توزین ۱۰۰۰ گرم ارزیابی گردد.
- ۲- استوانه مدرج شیشه‌ای: این استوانه باید دارای ظرفیت ۲۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌لیتر باشد.
- ۳- دستگاه ویکات که در شکل ۴-۱ قابل مشاهده می‌باشد.

### ۴-۱-۳ دما و رطوبت

دمای هوای محل اختلاط، سیمان خشک، قالب‌ها و صفحات زیر حلقه باید بین ۲۰ تا ۲۷/۵ درجه سانتیگراد باشد. دمای آب مخلوط نباید بیش از  $\pm 1/7$  درجه سانتیگراد نسبت به دمای ۲۳ درجه سانتیگراد تغییر کند.

### ۴-۱-۴ روش انجام آزمایش

- ۱- آماده کردن خمیر سیمان: ۶۵۰ گرم سیمان را با مقدار مشخصی آب تمیز مخلوط نمایید.
- ۲- قالب‌گیری نمونه آزمایش: پس از پوشیدن دستکش به سرعت خمیر سیمان ساخته شده را تقریباً به شکل توپ درآورده و سپس آن را ۶ بار از فاصله‌ی آزاد ۶ اینچ از این دست به آن دست پرتاب نمایید، طوری که گلوله نسبتاً کروی ایجاد شود که با کمترین دست‌خوردگی به راحتی وارد حلقه‌ی ویکات شود. گلوله را در کف یک دست گرفته و آن را در انتهای گشادتر حلقه که در دست دیگر است، به داخل حلقه فشار دهید، طوری که حلقه کاملاً از خمیر پر شود. با یک حرکت کف دست، خمیر

اضافی را از انتهای بزرگتر حلقه بردارید و سپس حلقه را از طرف گشادترش روی صفحه ی پایه گذاشته و توسط یک ماله با لبه های تیز که با زاویه ی کمی نسبت به بالای حلقه نگهداشته شده، خمیر اضافی بالای حلقه را با یک حرکت برش دهید و در صورت لزوم با چند حرکت آرام ماله سطح آن را صاف نمایید. لازم است توجه شود که طی عملیات بریدن و صاف کردن، خمیر سیمان فشرده نشود.

۳- تعیین غلظت: حلقه ی پر از خمیر سیمان را که روی صفحه‌ای قرار دارد، زیر میله قرار می‌دهیم. انتهای نفوذکننده را پایین آورده و در تماس با سطح خمیر قرار می‌دهیم و پیچ را محکم می‌کنیم. نشانه‌ی متحرک را روی صفر قرار داده و بلافاصله میله را آزاد کنید. اگر میله ۳۰ ثانیه پس از آزاد- کردن به مقدار  $1 \pm 10$  میلی‌متر در خمیر نفوذ کند، غلظت خمیر نرمال بوده است. برای رسیدن به چنین مخلوطی لازم است خمیرهای سیمانی آزمایشی با درصدهای مختلف آب ساخته شوند تا غلظت نرمال به دست آید. بدیهی است که هر نمونه آزمایش از ابتدا ساخته می‌شود و از خمیر قبلی در آن استفاده نمی‌گردد.

وزن سیمان: ۳۵۰ گرم

وزن آب اولیه: ۸۰ گرم

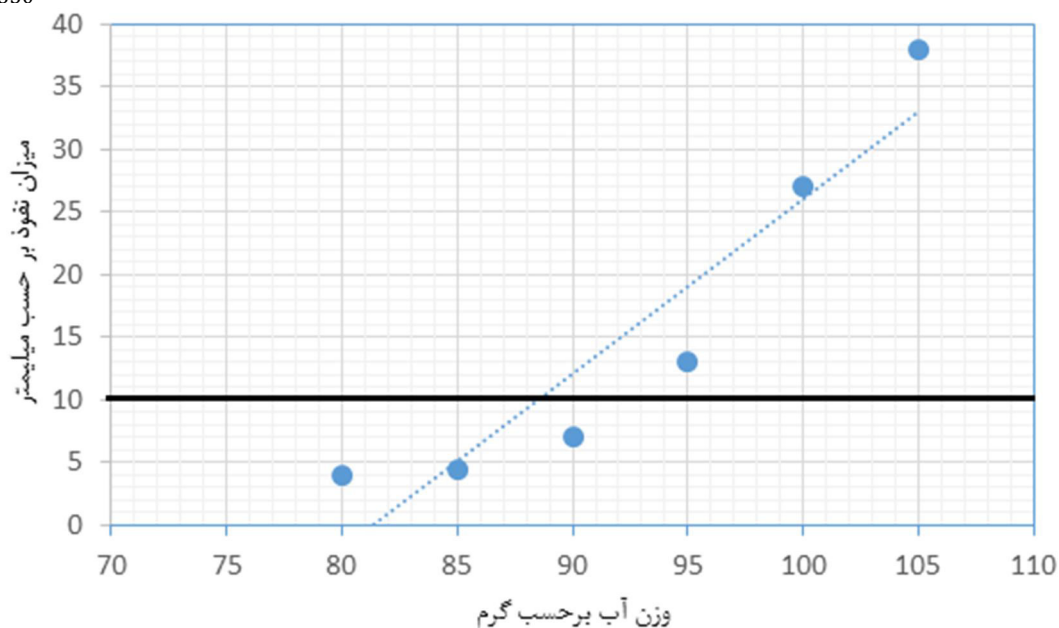


شکل ۴-۱ تعیین غلظت نرمال سیمان هیدرولیکی

غلظت نرمال سیمان، غلظتی است که میله ویکات به اندازه ۱۰ میلیمتر در ملات نفوذ کند. بر اساس نمودار ۱-۴، وزن آب مورد نیاز برای غلظت نرمال سیمان در این آزمایش برابر ۸۸ گرم و در نتیجه نسبت آب به سیمان برای غلظت نرمال سیمان از فرمول ۱-۴ محاسبه می شود.

$$\frac{88}{350} = 0.25$$

(فرمول ۱-۴)



نمودار ۱-۴ تعیین غلظت نرمال سیمان

## ۲-۴ آزمایشات اولیه روی سنگدانه‌ها

از آنجا که سنگدانه‌ها عمدتاً حاوی منافذ هم قابل نفوذ و هم غیر قابل نفوذ می‌باشند، لذا ضروری است ابتدا انواع وزن مخصوص تعریف گردد.

### ۱-۲-۴ وزن مخصوص مطلق

به حجم مواد جامد منهای حجم کلیه منافذ، مربوط می‌شود و آن را می‌توان بصورت نسبت وزن مواد جامد در ارتباط با خلا، به حجم آب مقطر بدون گاز که هر دو در یک درجه حرارت مشخص شده-

ای تعیین شده باشند، تعریف نمود. لذا برای از بین بردن منافذی که غیر قابل نفوذ هستند، لازم است که مصالح بصورت پودر بسیار نرم درآورده شود و این آزمایش بسیار حساس می باشد.

#### ۲-۲-۴ وزن مخصوص ظاهری

اگر حجم مواد جامد به گونه ای در نظر گرفته شود که شامل منافذ غیر قابل نفوذ باشد، وزن مخصوص ظاهری به دست می آید. در این صورت وزن مخصوص ظاهری برابر است با نسبت وزن سنگدانه های خشک با حرارت ۱۰۰ تا ۱۱۰ درجه سانتیگراد در ۲۴ ساعت، به وزن آب هم حجم مواد جامدی که شامل منافذ غیر قابل نفوذ هم باشد.

این وزن را با استفاده از ظرفی که می توان آن را بادقت تا حجم معینی پر نمود به دست آورد. این ظرف که پینکومتر نام دارد، ظرفی شیشه ای است که بر روی آن دری مخروطی شکل با سوراخ کوچکی در راس پیچ می شود. بنابراین پینکومتر را هر بار میتوان با حجم ثابتی از آب پر نمود.

#### ۱-۲-۲-۴ شرح آزمایش

وزن کاملاً خشک سنگدانه ها را اندازه می گیریم: A

وزن پینکومتر پر از آب را اندازه می گیریم: B

وزن نمونه اشباع با سطح خشک را اندازه می گیریم: S

وزن پینکومتر حاوی ماسه و آب را اندازه می گیریم: C

#### ۲-۲-۲-۴ محاسبات:

وزن مخصوص ظاهری از رابطه زیر بدست می آید:

(فرمول ۲-۴)

$$\text{وزن مخصوص ظاهری} = \frac{A}{B+A-C} = 2/76$$

$$A = 552/31 \text{ g}$$

$$B = 1655/32 \text{ g}$$

$$C = 2007/52 \text{ g}$$

#### ۳-۲-۴ وزن مخصوص ظاهری ناخالص

وزن مخصوص ظاهری ناخالص بر اساس حالت داخل اشباع و سطح خارجی خشک (SSD) تعیین

می‌شود. به این دلیل که رطوبتی که در منافذ سنگ‌دانه‌ها وجود دارد در واکنش شیمیایی سیمان

تاثیر می‌گذارد. لذا چنانچه وزن سنگ‌دانه‌ها در حالت SSD برابر  $W_4$  باشد. وزن مخصوص ظاهری

ناخالص آن برابر است با:

(فرمول ۳-۴)

$$\text{وزن مخصوص ظاهری ناخالص} = \frac{S}{B+S-C} = 2/69$$

$$S = 560/86 \text{ g}$$

این وزن مخصوص که به آسانی تعیین می‌شود، برای محاسبات طرح اختلاط و مقدار سنگ‌دانه‌ها

مورد نیاز است. اکثر سنگ‌دانه‌های طبیعی دارای وزن مخصوصی بین  $2/6$  تا  $2/7$  هستند. حدود

مقادیر آنها در جدول ۱-۴ نشان داده شده است. شکل ۲-۴ خشک کردن سطح ماسه برای تعیین وزن

مخصوص ظاهری ناخالص را نشان می‌دهد.





شکل ۲-۴ خشک کردن سطح ماسه برای تعیین وزن مخصوص ظاهری ناخالص

جدول ۱-۴ وزن مخصوص سنگ‌های طبیعی

گروه سنگ	وزن مخصوص متوسط	حدود وزن مخصوص
بازالت	۲/۸۰	۲/۶-۳
فلینت	۲/۵۴	۲/۴-۲/۶
گرانیت	۲/۶۹	۲/۶-۳
گریت	۲/۶۹	۲/۶-۲/۹
هرنفل	۲/۸۲	۲/۷-۳
سنگ آهک	۲/۶۶	۲/۵-۲/۸
پور فیلی	۲/۸۳	۲/۶-۲/۹
کوارتزیت	۲/۶۲	۲/۶-۲/۷

#### ۴-۲-۴ آزمایش درصد رطوبت طبیعی

۵۰۰ گرم ماسه طبیعی را به مطابق شکل ۳-۴ مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد

قرار می‌دهیم. بعد از ۲۴ ساعت دوباره ماسه را وزن کرده و درصد رطوبت طبیعی آن از رابطه ۲-۴

بدست می‌آید:

رابطه ۲-۴

$$\frac{w_1 - w_2}{w_1} = \frac{500 - 489}{500} \times 100 = 2.2 \%$$



شکل ۳-۴ ماسه استفاده شده در تهیه ملات خودتراکم

#### ۳-۴ دانه بندی ماسه بر اساس استاندارد ASTM C33<sup>۲۱</sup>

اگر چنانچه نتایج تحلیل اندازه‌ی دانه‌ها بصورت منحنی نشان داده شود، خیلی ساده تر قابل درک خواهد بود و به‌همین دلیل است که منحنی دانه‌بندی بصورت کاملاً وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با رسم منحنی می‌توان مشخص نمود که آیا منحنی با آنچه به عنوان استاندارد مشخص شده مطابقت دارد یا خیر. جدول ۲-۴ استاندارد ارائه شده‌ی استاندارد ASTM C33 برای دانه بندی ماسه می‌باشد [۶۸].

<sup>21</sup> specification for concrete aggregates

جدول ۲-۴ دانه‌بندی مناسب ماسه بر اساس استاندارد ASTM C33

**TABLE 1 Grading Requirements for Fine Aggregate**

Sieve (Specification E11)	Percent Passing
9.5-mm (3/8-in.)	100
4.75-mm (No. 4)	95 to 100
2.36-mm (No. 8)	80 to 100
1.18-mm (No. 16)	50 to 85
600- $\mu$ m (No. 30)	25 to 60
300- $\mu$ m (No. 50)	5 to 30
150- $\mu$ m (No. 100)	0 to 10
75- $\mu$ m (No. 200)	0 to 3.0 <sup>A,B</sup>

<sup>A</sup> For concrete not subject to abrasion, the limit for material finer than the 75- $\mu$ m (No. 200) sieve shall be 5.0 % maximum.

<sup>B</sup> For manufactured fine aggregate, if the material finer than the 75- $\mu$ m (No. 200) sieve consists of dust of fracture, essentially free of clay or shale, this limit shall be 5.0 % maximum for concrete subject to abrasion, and 7.0 % maximum for concrete not subject to abrasion.

### ۳-۴-۱ وسایل آزمایش

۱- ترازو با دقت ۰/۵ گرم

۲- الک‌های استاندارد باید طوری چیده شوند تا سنگ‌دانه‌ها هنگام الک‌کردن به بیرون پرتاب نشود

اندازه آنها از بالا به پایین مطابق شکل ۴-۴ به ترتیب زیر است:

۴ ، ۸ ، ۱۶ ، ۳۰ ، ۵۰ ، ۱۰۰ ، زیر الک و درب

لرزاننده مکانیکی الکها: لرزش باید بصورت قائم و افقی به الک منتقل شود، بطوریکه دانه‌ها درروی

الک به بالا و پایین پریده و بغلظند تا در جهات مختلف روی سطح الک قرار بگیرند.

کوره : کوره باید قادر به تولید دمای یکنواخت ۱۰۰ درجه سانتیگراد باشد.

### ۳-۴-۲ نمونه‌برداری

الف) نمونه باید از ارتفاع متوسط توده ماسه برداشته شود بطوریکه هنگام برداشت دانه‌ها از ظرف

بیرون نریزد و باید از لحاظ توزیع دانه‌ها، نماینده کل دپوی ماسه باشد .

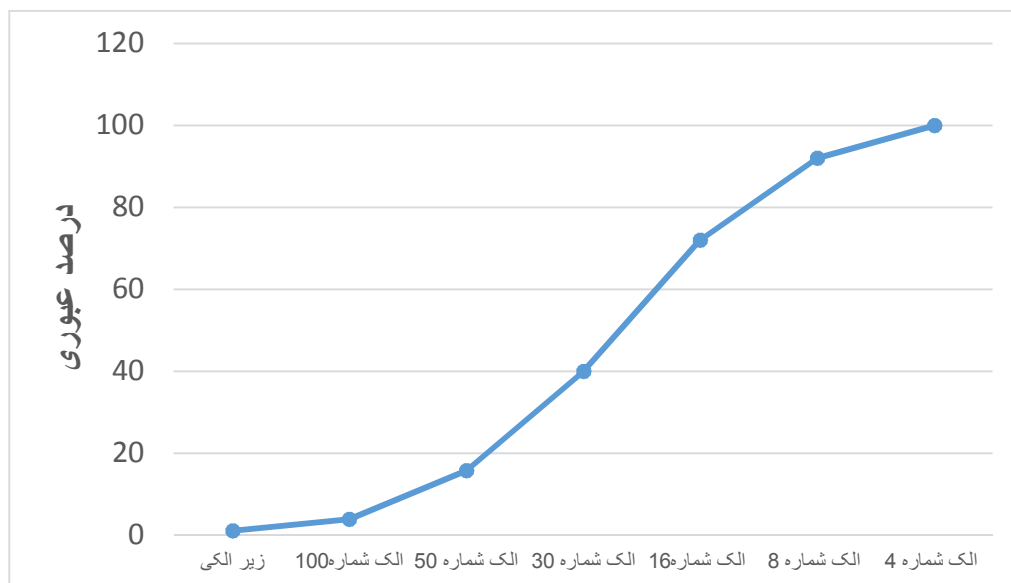
ب) مقدار تقریبی نمونه مورد آزمایش دو کیلوگرم باشد.

### ۳-۳-۴ شرح آزمایش

مقدار ۲ کیلوگرم ماسه خشک را که در فر در دمای ۱۰۰ درجه به مدت ۲۴ ساعت کاملاً خشک شده و از الک‌های مذکور عبور می‌دهیم و وزن مانده روی هر الک را جداگانه بدست می‌آوریم. داده‌های به‌دست آمده از آزمایش را در نموداری مطابق نمودار ۲-۴ رسم می‌کنیم. در صورتیکه منحنی در محدوده استاندارد ASTM C33 قرار نگیرد و حتی قسمتی از آن از محدوده بیرون رود، باید پیشنهادات لازم جهت اصلاح دانه بندی ارائه شود.



شکل ۴-۴ الک کردن ماسه برای آزمایش دانه بندی ماسه مصرفی



نمودار ۲-۴ دانه بندی سیمان مصرفی

فصل پنجم

نتیجہ آزمایشات قطر

اسلامپ و مکانیکی

## ۵-۱ کارایی ملات خود تراکم

آزمایش اسلامپ برای تعیین کارایی ملات و همچنین کنترل خودتراکمی بتن انجام شد. نتایج این آزمایش در جدول ۵-۱ ارائه شده است. همانطور که اشاره شد، مقدار فوق‌روان‌کننده در این آزمایش برای رسیدن به قطر اسلامپ ۲۴ تا ۲۶ سانتی متر متغیر بود. با اینحال حضور نانو سیلیس، کارایی بتن را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داد، بطوریکه استفاده حداکثری از فوق‌روان‌کننده باز هم نتوانست اسلامی برابر نمونه کنترل بدهد. حضور پودر شیشه نیز کارایی بتن را به مقدار کمی کاهش داد. بطوریکه با اضافه کردن فوق‌روان‌کننده بیشتری، اسلامپ برابر با نمونه کنترل به دست آمد.

جدول ۵-۱ قطر اسلامپ نمونه های ملات خود تراکم

SCM	قطر اسلامپ (cm)	درصد فوق روان کننده
CO	۲۶	۰.۵
10G	۲۶	۱
15G	۲۵	۱
20G	۲۵	۱.۵
2N	۲۵	۱.۵
3N	۲۵	۱.۵
4N	۲۴	۲
2N15G	۲۴	۲
3N15G	۲۴	۲
2N10G	۲۵	۲
2N20G	۲۴	۲
CONP	۲۶	۰.۵
10GNP	۲۶	۱

## ۲-۵ مقاومت فشاری

آزمایش‌های مقاومت فشاری نمونه‌های ملات بر اساس ASTM 109 انجام شده‌است. دستگاه آزمایش مقاومت فشاری در شکل ۱-۵ نشان داده شده است. روند این آزمایش به اینصورت است که بار یکنواخت ۱۳۵۰ نیوتن بر ثانیه به نمونه‌ها اعمال می‌شود. این آزمایش در روزهای ۷، ۱۴ و ۲۸ پس از ساخت نمونه‌ها روی آن‌ها انجام شد.



شکل ۱-۵ دستگاه مقاومت فشاری

## نمونه کنترل

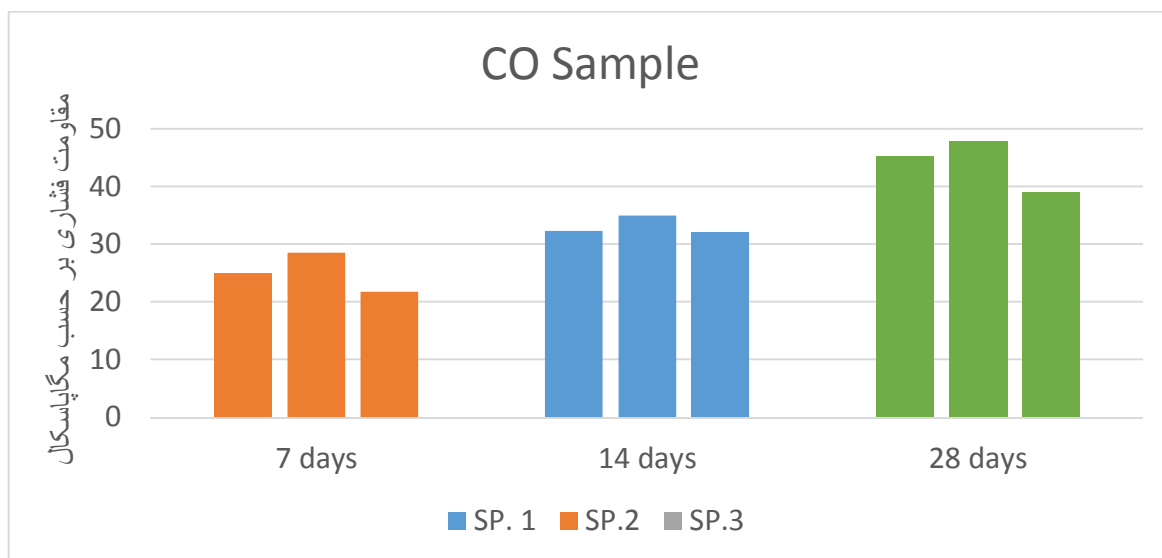
در شکل ۲-۵ تصاویر نمونه‌های کنترل پس از شکست ناشی از فشار نشان داده شده است و در جدول ۲-۵ و نمودار ۱-۵ مقادیر مقاومت فشاری برحسب مگاپاسکال ارائه شده است.



شکل ۲-۵ نمونه کنترل پس از شکست در آزمایش مقاومت فشاری

جدول ۲-۵ مقاومت فشاری نمونه کنترل

مقاومت فشاری ۲۸ روز			مقاومت فشاری ۱۴ روز			مقاومت فشاری ۷ روز			نام نمونه
۳۹	۴۷/۸	۴۵/۲	۳۲/۱	۳۵/۰	۳۲/۳	۲۵	۲۱/۸	۲۸/۵	CO



نمودار ۱-۵ مقاومت فشاری نمونه کنترل



## نمونه حاوی ۱۰٪ پودر شیشه

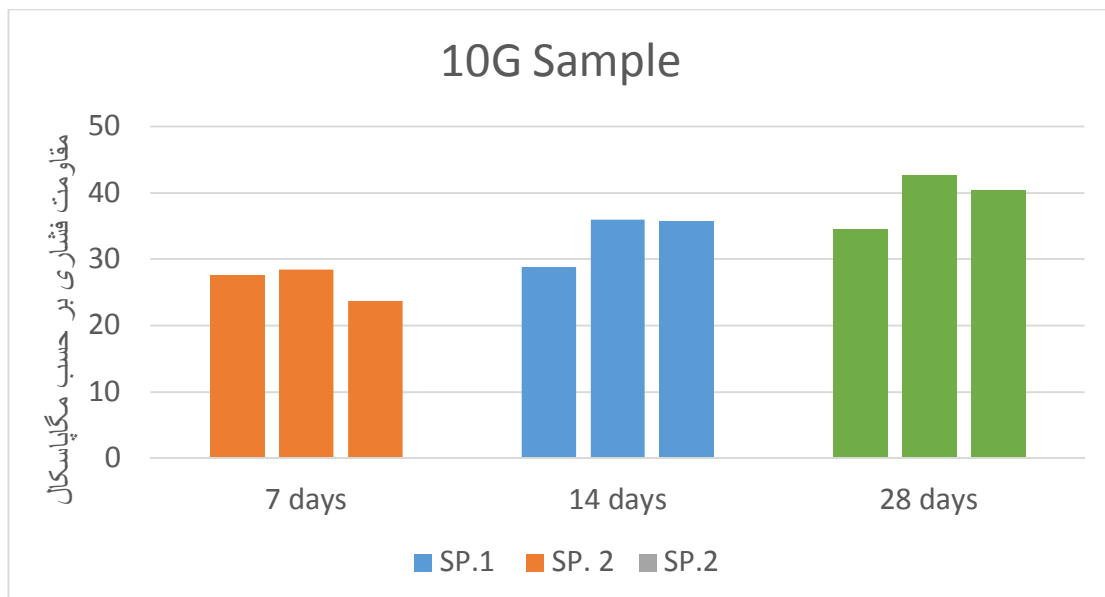
در شکل ۳-۵ تصاویر نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد پودر شیشه پس از شکست ناشی از فشار نشان داده شده است و در جدول ۳-۵ و نمودار ۲-۵ مقادیر مقاومت فشاری برحسب مگاپاسکال ارائه شده است.



شکل ۳-۵ نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر شیشه پس از شکست ناشی از فشار

جدول ۳-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر شیشه

مقاومت فشاری ۲۸ روز			مقاومت فشاری ۱۴ روز			مقاومت فشاری ۷ روز			نام نمونه
۴۰/۴	۴۲/۶	۳۴/۵	۳۵/۸	۳۶/۰	۲۸/۸	۲۳/۷	۲۸/۴	۲۷/۶	10G



نمودار ۲-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر شیشه

## نمونه حاوی ۱۵٪ پودر شیشه

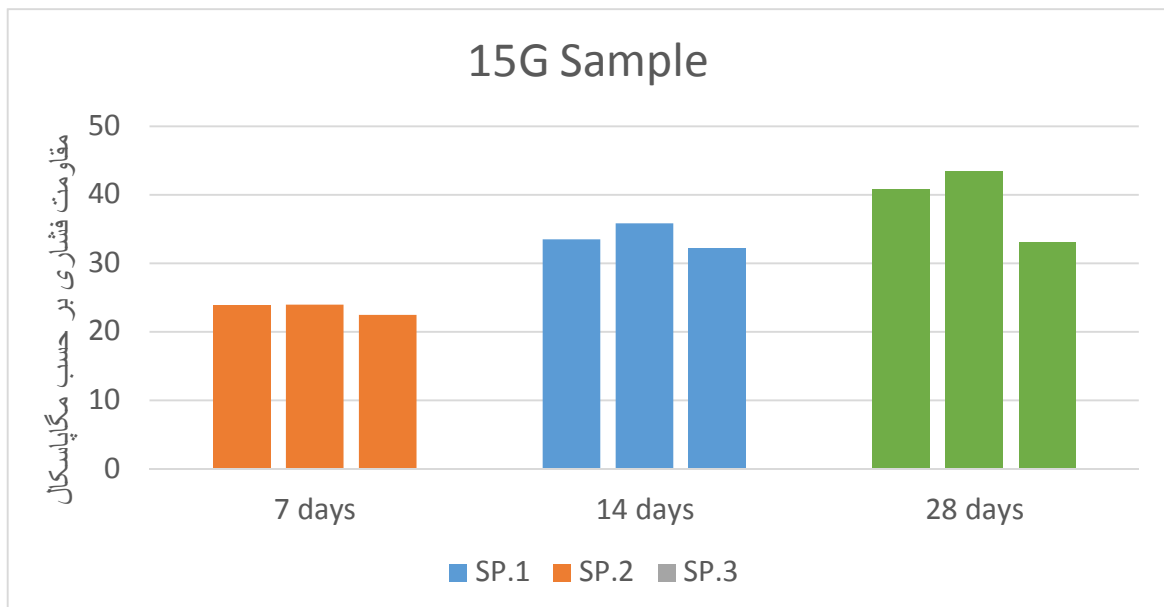
در شکل ۴-۵ تصاویر نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد پودر شیشه پس از شکست ناشی از فشار نشان داده شده است و در جدول ۴-۵ و نمودار ۳-۵ مقادیر مقاومت فشاری برحسب مگاپاسکال ارائه شده است.



شکل ۴-۵ نمونه حاوی ۱۵ درصد پودر شیشه پس از شکست ناشی از فشار

جدول ۴-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۱۵ درصد پودر شیشه

مقاومت فشاری ۲۸ روز			مقاومت فشاری ۱۴ روز			مقاومت فشاری ۷ روز			نام نمونه
۴۰/۴	۴۳/۵	۴۰/۸	۳۲/۳	۳۵/۸	۳۳/۵	۲۲/۵	۲۴/۰	۲۴/۰	15G



نمودار ۳-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۱۵ درصد پودر شیشه

## نمونه حاوی ۲۰٪ پودر شیشه

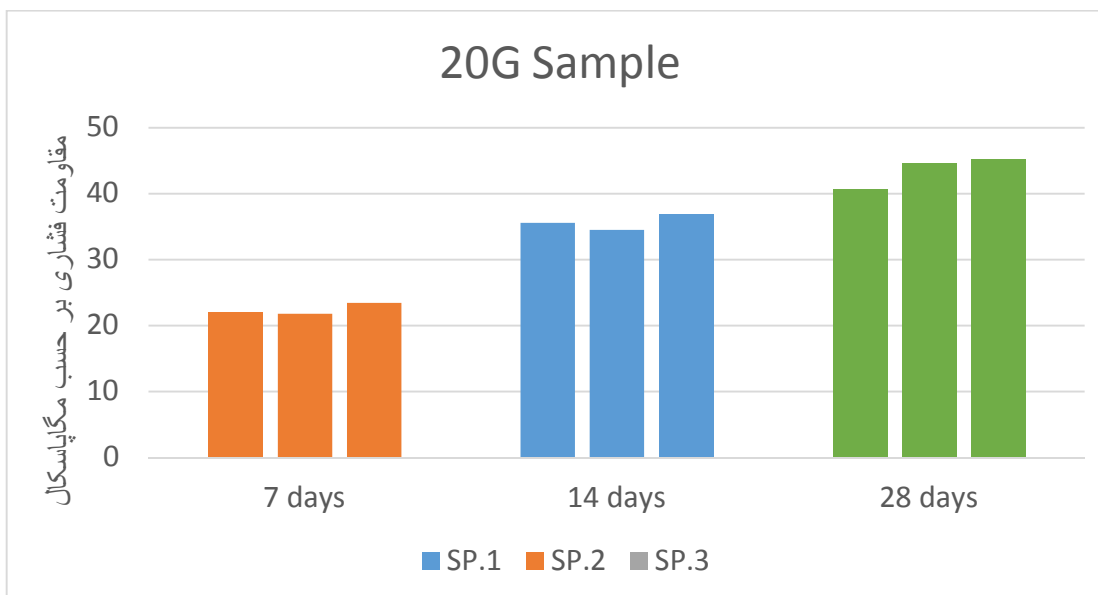
در شکل ۵-۵ تصاویر نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد پودر شیشه پس از شکست ناشی از فشار نشان داده شده است و در جدول ۵-۶ و نمودار ۴-۶ مقادیر مقاومت فشاری برحسب مگاپاسکال ارائه شده است.



شکل ۵-۵ نمونه حاوی ۲۰ درصد پودر شیشه پس از شکست ناشی از فشار

جدول ۵-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۲۰ درصد پودر شیشه

مقاومت فشاری ۲۸ روز			مقاومت فشاری ۱۴ روز			مقاومت فشاری ۷ روز			نام نمونه
۴۵/۲	۴۴/۶	۴۰/۷	۳۶/۸	۳۴/۵	۳۵/۶	۲۳/۴	۲۱/۸	۲۲/۰	20G



نمودار ۴-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۲۰ درصد پودر شیشه

## نمونه حاوی ۲٪ نانوسیلیس

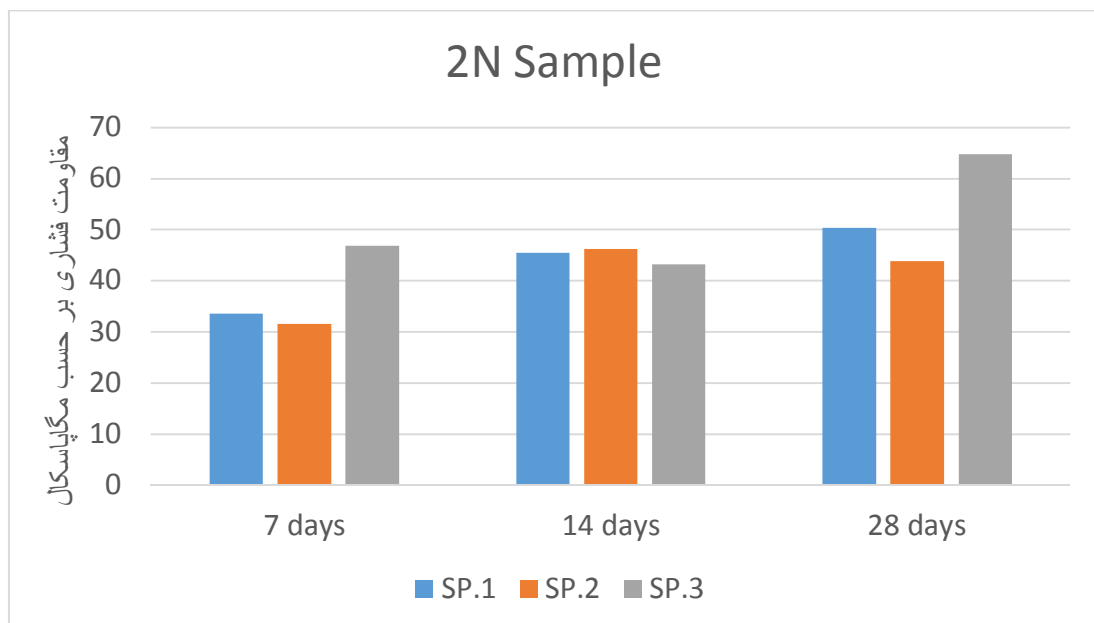
در شکل ۵-۶ تصاویر نمونه‌های حاوی ۲ درصد نانوسیلیس پس از شکست ناشی از فشار نشان داده شده است و در جدول ۵-۶ و نمودار ۵-۵ مقادیر مقاومت فشاری برحسب مگاپاسکال ارائه شده است.



شکل ۵-۶ نمونه حاوی ۲ درصد پودر نانو پس از شکست ناشی از فشار

جدول ۵-۶ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۲ درصد پودر نانو

مقاومت فشاری ۲۸ روز			مقاومت فشاری ۱۴ روز			مقاومت فشاری ۷ روز			نام نمونه
۶۴/۸	۴۳/۸	۵۰/۴	۴۳/۲	۴۶/۲	۴۵/۵	۴۶/۹	۳۱/۶	۳۳/۶	2N



نمودار ۵-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۲ درصد پودر نانو سیلیس

## نمونه حاوی ۳٪ نانوسیلیس

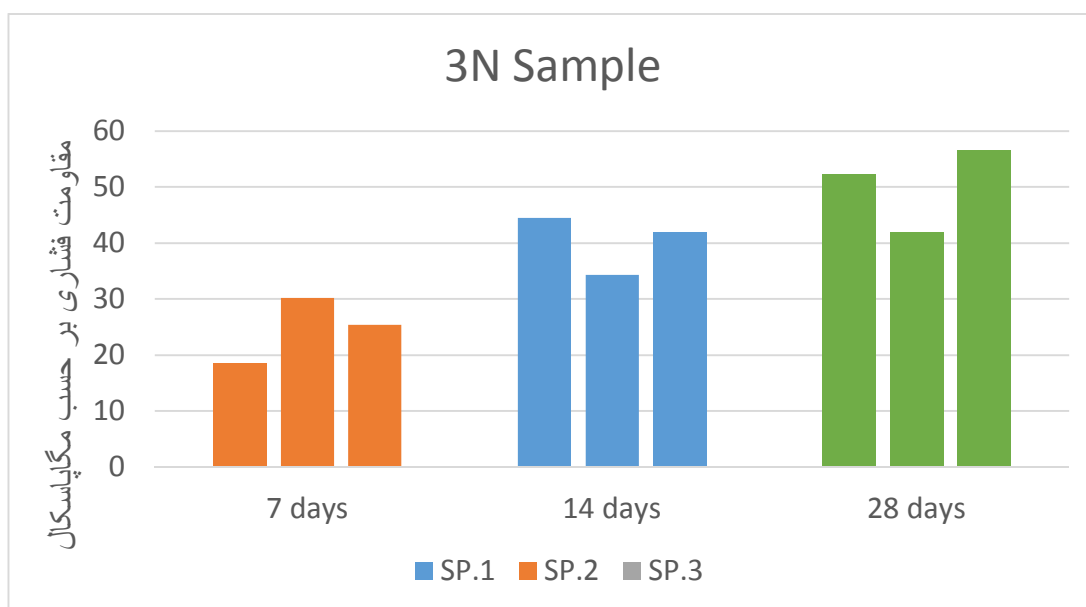
در شکل ۷-۵ تصویر نمونه حاوی ۳ درصد نانوسیلیس پس از شکست ناشی از فشار نشان داده شده است و در جدول ۷-۵ و نمودار ۶-۵ مقادیر مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال ارائه شده است.



شکل ۷-۵ نمونه حاوی ۳ درصد پودر نانوسیلیس پس از شکست ناشی از فشار

جدول ۷-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۳ درصد پودر نانو

مقاومت فشاری ۲۸ روز			مقاومت فشاری ۱۴ روز			مقاومت فشاری ۷ روز			نام نمونه
۵۶/۵	۴۱/۹	۵۲/۳	۲۳	۳۴/۳	۴۴/۵	۲۵/۴	۳۰/۲	۱۸/۶	3N



نمودار ۶-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۳ درصد پودر نانو سیلیس

## نمونه حاوی ۴٪ نانو سیلیس

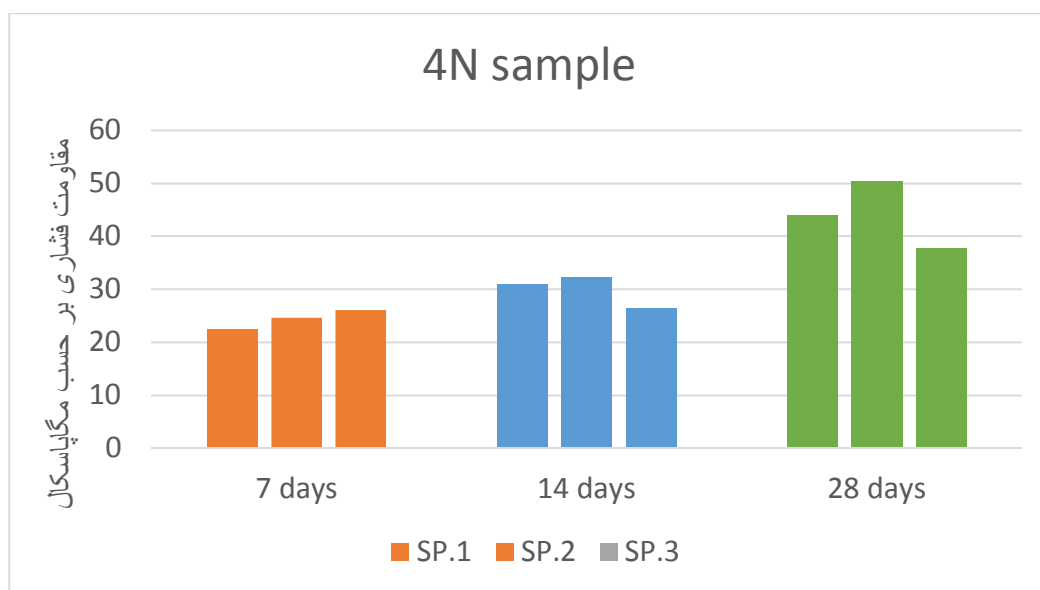
در شکل ۵-۸ تصاویر نمونه‌های حاوی ۴ درصد پودر نانوسیلیس پس از شکست ناشی از فشار نشان داده شده است و در جدول ۶-۸ و نمودار ۶-۷ مقادیر مقاومت فشاری برحسب مگاپاسکال ارائه شده است.



شکل ۵-۸ نمونه حاوی ۴ درصد پودر نانو پس از شکست ناشی از فشار

جدول ۵-۸ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۴ درصد پودر نانو

مقاومت فشاری ۲۸ روز			مقاومت فشاری ۱۴ روز			مقاومت فشاری ۷ روز			نام نمونه
۳۷/۸	۵۰/۴	۴۴	۲۶/۴	۳۲/۴	۳۱/۱	۲۶/۱	۲۴/۷	۲۲/۵	4N



نمودار ۷-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۴ درصد پودر نانو سیلیس

## نمونه حاوی ۲٪ نانو سیلیس و ۱۰٪ شیشه ضایعاتی

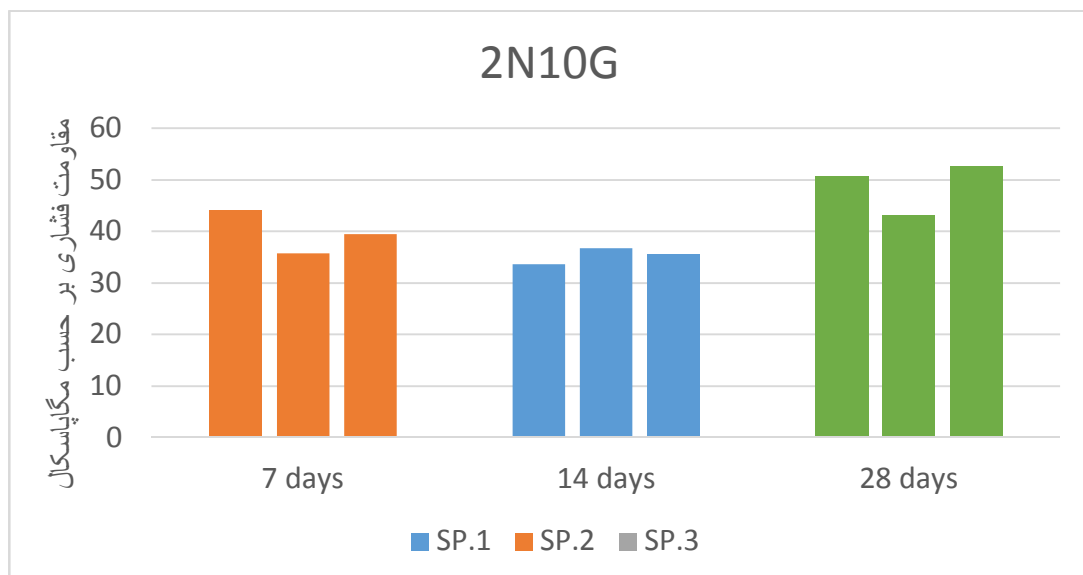
در شکل ۵-۹ تصاویر نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد پودر شیشه و ۲ درصد نانوسیلیس پس از شکست ناشی از فشار نشان داده شده است و در جدول ۵-۹ و نمودار ۵-۸ مقادیر مقاومت فشاری برحسب مگاپاسکال ارائه شده است.



شکل ۵-۹ نمونه حاوی ۲ درصد پودر نانو و ۱۰٪ پودر شیشه پس از شکست ناشی از فشار

جدول ۵-۹ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۲٪ نانو سیلیس و ۱۰٪ شیشه ضایعاتی

مقاومت فشاری ۲۸ روز			مقاومت فشاری ۱۴ روز			مقاومت فشاری ۷ روز			نام نمونه
۵۲/۶	۴۳/۲	۵۰/۷	۳۵/۵	۳۶/۷	۳۳/۶	۳۹/۴	۳۵/۷	۴۴/۰	2N10G



نمودار ۵-۸ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۲ درصد پودر نانو سیلیس و ۱۰ درصد پودر شیشه

## نمونه حاوی ۲٪ نانو سیلیس و ۱۵٪ شیشه ضایعاتی

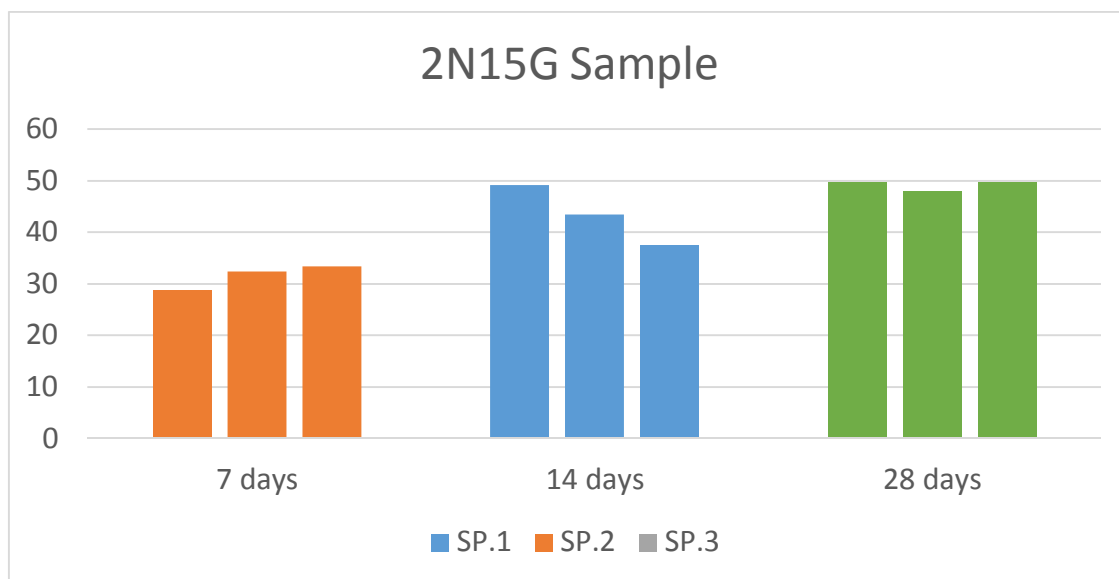
در شکل ۵-۱۰ تصاویر نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد پودر شیشه و ۲ درصد نانوسیلیس پس از شکست ناشی از فشار نشان داده شده است و در جدول ۵-۱۰ و نمودار ۵-۹ مقادیر مقاومت فشاری برحسب مگاپاسکال ارائه شده است.



شکل ۵-۱۰ نمونه حاوی ۲ درصد پودر نانو و ۱۵٪ پودر شیشه پس از شکست ناشی از فشار

جدول ۵-۱۰ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۲٪ نانو سیلیس و ۱۵٪ شیشه ضایعاتی

مقاومت فشاری ۲۸ روز			مقاومت فشاری ۱۴ روز			مقاومت فشاری ۷ روز			نام نمونه
۴۹/۸	۴۸/۰	۴۹/۷	۳۷/۶	۴۳/۴	۴۹/۲	۳۳/۴	۳۲/۴	۲۸/۸	2N15G



نمودار ۵-۹ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۲ درصد پودر نانو سیلیس و ۱۵ درصد پودر شیشه



## نمونه حاوی ۳٪ نانو سیلیس و ۱۵٪ شیشه ضایعاتی

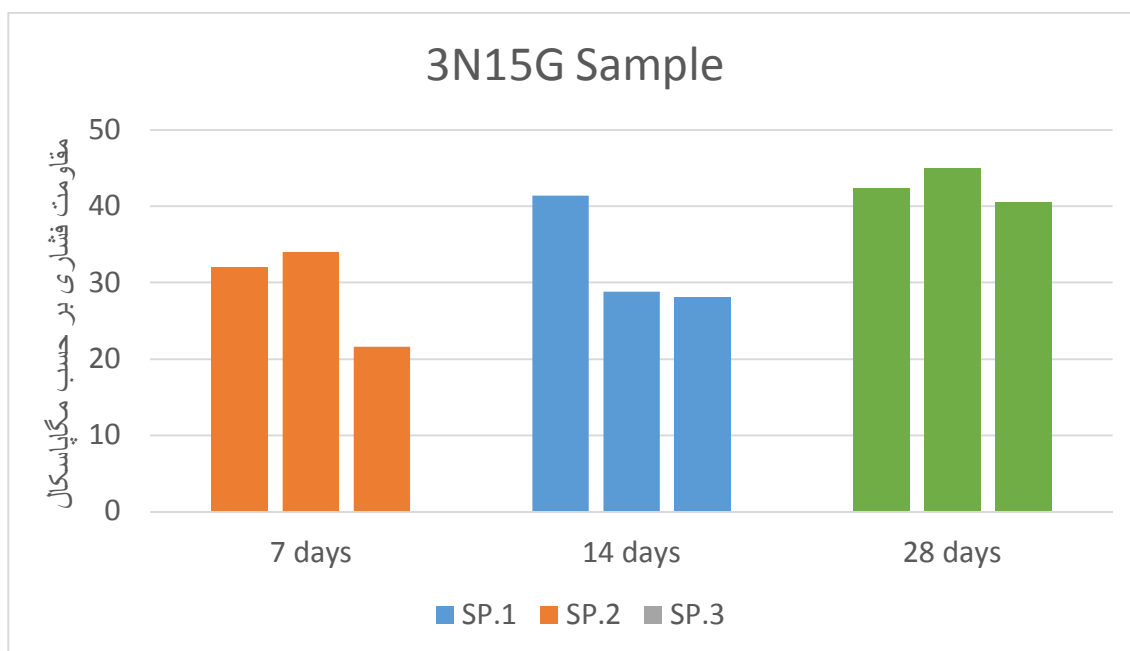
در شکل ۱۱-۵ تصاویر نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد پودر شیشه و ۳ درصد نانوسیلیس پس از شکست ناشی از فشار نشان داده شده است و در جدول ۱۱-۵ و نمودار ۱۰-۵ مقادیر مقاومت فشاری برحسب مگاپاسکال ارائه شده است.



شکل ۱۱-۵ نمونه حاوی ۳ درصد پودر نانو و ۱۵٪ پودر شیشه پس از شکست ناشی از فشار

جدول ۱۱-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۳٪ نانو سیلیس و ۱۵٪ شیشه ضایعاتی

مقاومت فشاری ۲۸ روز			مقاومت فشاری ۱۴ روز			مقاومت فشاری ۷ روز			نام نمونه
۴۰/۶	۴۵	۴۲/۴	۲۸/۱	۲۸/۸	۴۴/۴	۲۱/۶	۳۴/۰	۳۲/۰	3N15G



نمودار ۱۰-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۳ درصد پودر نانو سیلیس و ۱۵ درصد پودر شیشه

## نمونه حاوی ۲٪ نانو سیلیس و ۲۰٪ شیشه ضایعاتی

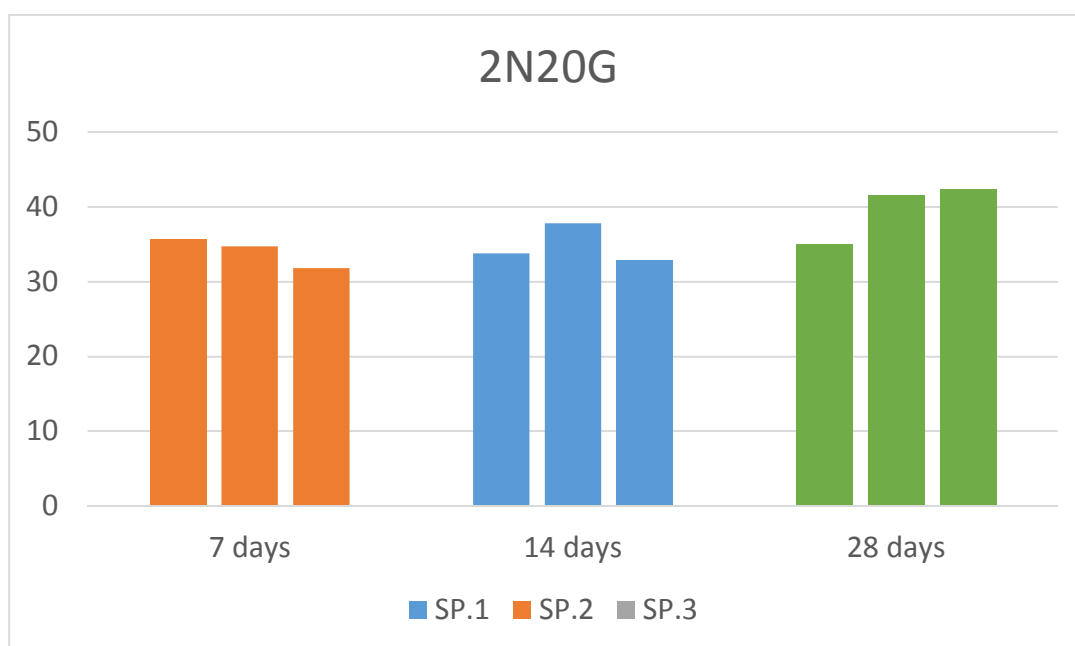
در شکل ۵-۱۲ تصاویر نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد پودر شیشه و ۲ درصد نانوسیلیس پس از شکست ناشی از فشار نشان داده شده است و در جدول ۵-۱۲ و نمودار ۵-۱۱ مقادیر مقاومت فشاری برحسب مگاپاسکال ارائه شده است.



شکل ۵-۱۲ نمونه حاوی ۲ درصد پودر نانو و ۲۰٪ پودر شیشه پس از شکست ناشی از فشار

جدول ۵-۱۲ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۲٪ نانو سیلیس و ۲۰٪ شیشه ضایعاتی

مقاومت فشاری ۲۸ روز			مقاومت فشاری ۱۴ روز			مقاومت فشاری ۷ روز			نام نمونه
۴۲/۴	۴۱/۶	۳۵/۰	۳۲/۹	۳۷/۸	۳۳/۸	۳۱/۸	۳۴/۷	۳۵/۷	2N20G



نمودار ۵-۱۱ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۲ درصد پودر نانو سیلیس و ۲۰ درصد پودر شیشه

## نمونه کنترل بدون الیاف

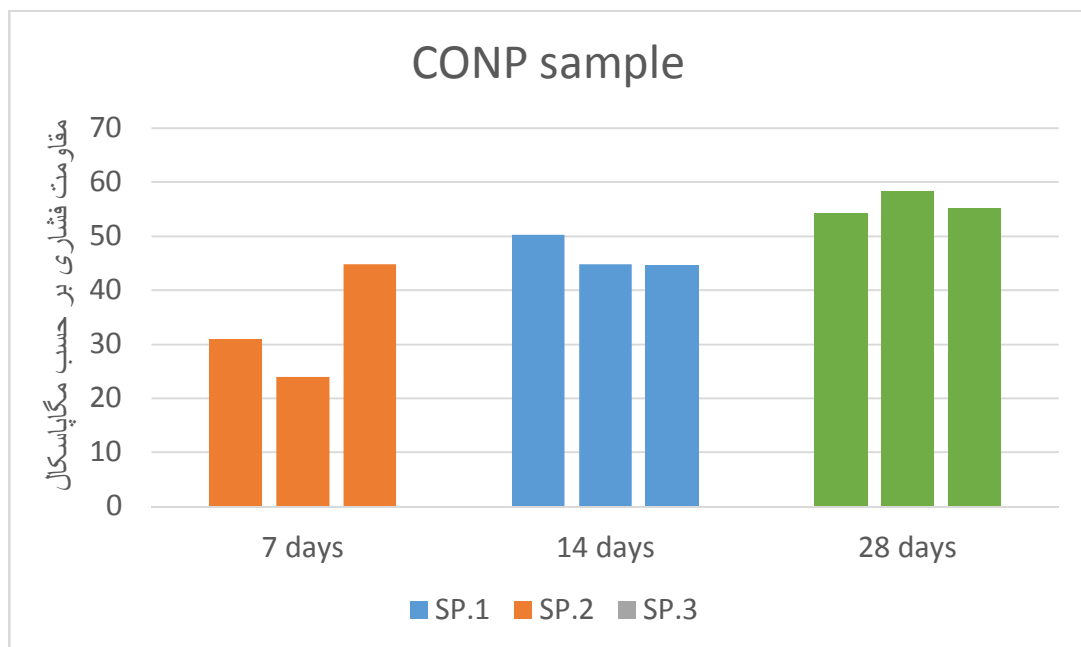
در شکل ۱۳-۵ تصاویر نمونه‌های کنترل بدون الیاف پس از شکست ناشی از فشار نشان داده شده است و در جدول ۱۳-۵ و نمودار ۱۲-۵ مقادیر مقاومت فشاری برحسب مگاپاسکال ارائه شده است.



شکل ۱۳-۵ نمونه کنترل بدون الیاف پس از شکست ناشی از فشار

جدول ۱۳-۵ مقاومت فشاری نمونه کنترل بدون الیاف

مقاومت فشاری ۲۸ روز			مقاومت فشاری ۱۴ روز			مقاومت فشاری ۷ روز			نام نمونه
۵۵/۱	۵۸/۳	۵۴/۲	۴۴/۶	۴۴/۸	۵۰/۳	۴۴/۸	۲۴/۰	۳۱/۰	CONP



نمودار ۱۲-۵ مقاومت فشاری نمونه کنترل بدون الیاف

## نمونه ۱۰٪ پودر شیشه بدون الیاف

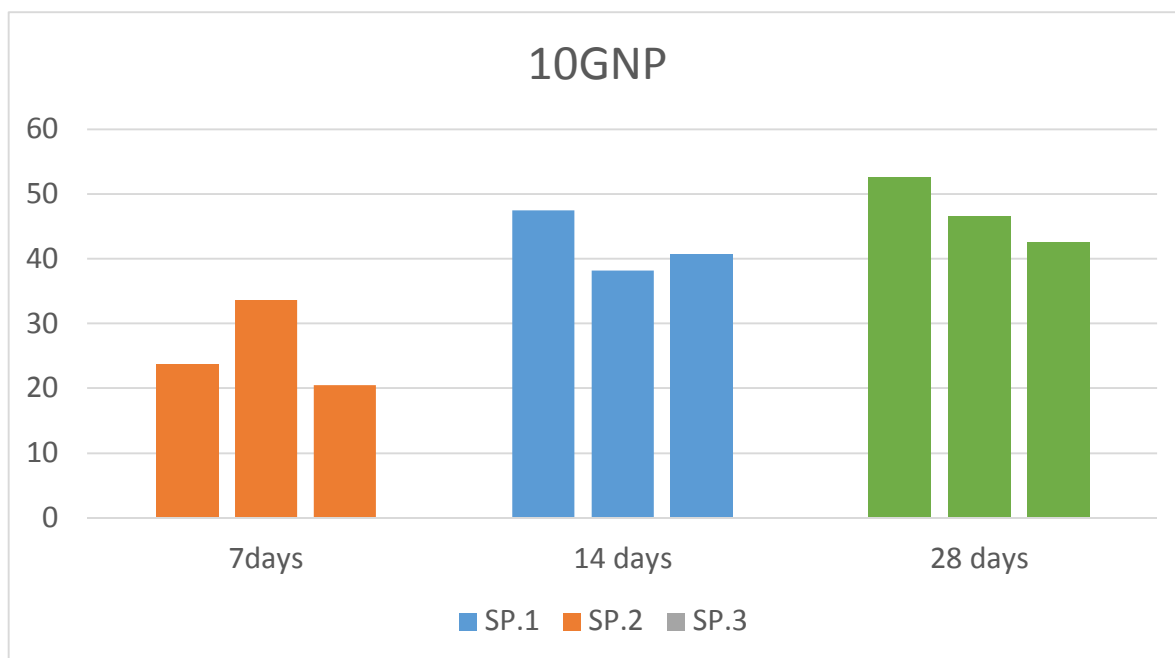
در شکل ۱۴-۵ تصاویر نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد پودر شیشه بدون الیاف پس از شکست ناشی از فشار نشان داده شده است و در جدول ۱۴-۵ و نمودار ۱۳-۵ مقادیر مقاومت فشاری برحسب مگاپاسکال ارائه شده است.



شکل ۱۴-۵ نمونه حاوی ۱۰٪ پودر شیشه بدون الیاف پس از شکست ناشی از فشار

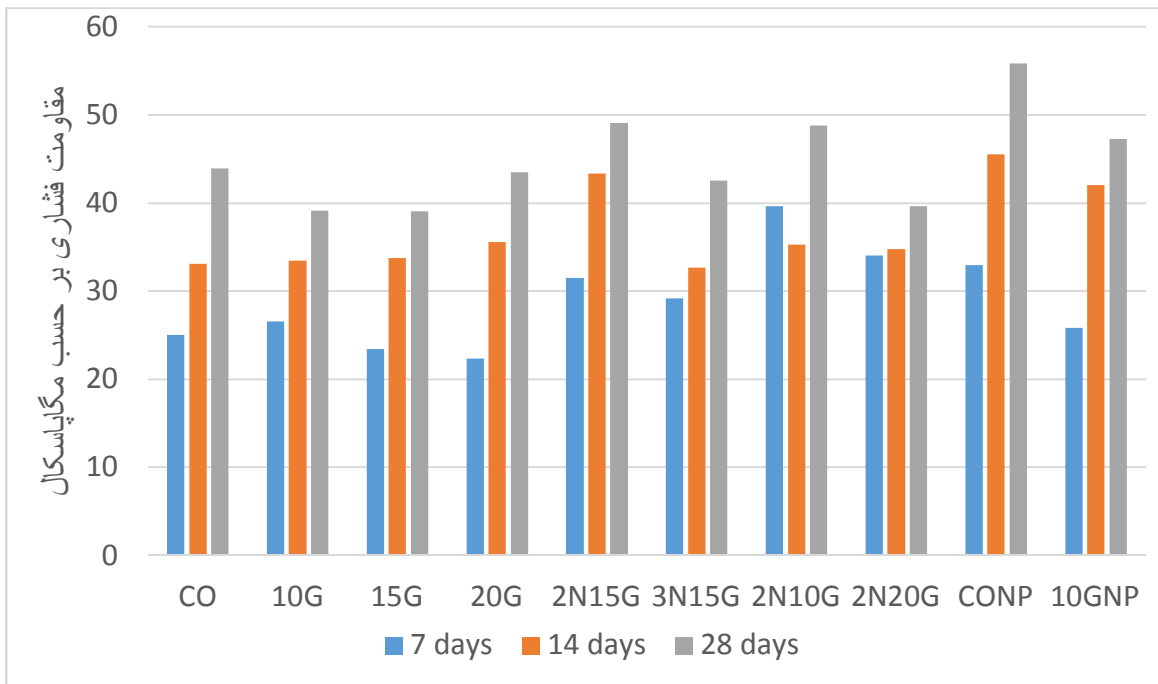
جدول ۱۴-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۱۵٪ شیشه ضایعاتی بدون الیاف

مقاومت فشاری ۲۸ روز			مقاومت فشاری ۱۴ روز			مقاومت فشاری ۷ روز			نام نمونه
۴۲/۶	۴۶/۶	۵۲/۶	۴۰/۷	۳۸/۲	۴۷/۵	۲۰/۵	۳۳/۶	۲۳/۷	10GNP



نمودار ۱۳-۵ مقاومت فشاری نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر شیشه بدون الیاف

نمودار ۵-۱۴ نتایج مقاومت فشاری تمام نمونه‌ها را برای تحلیل بهتر در قالب نمودار نشان می‌دهد.

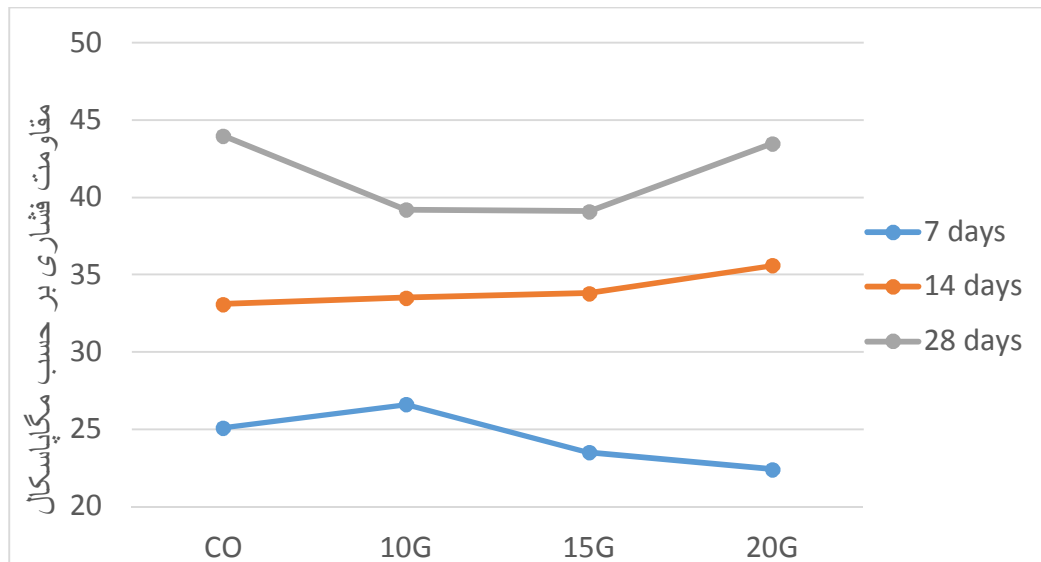


نمودار ۵-۱۴ مقاومت فشاری نمونه‌های ملات خودتراکم در آزمایش فشار

### ۵-۲-۱ بررسی تاثیر پودر شیشه بر مقاومت فشاری ملات‌های خودتراکم حاوی پودر شیشه

همانطور که در نمودار ۵-۱۵ مشخص است اضافه کردن پودر شیشه به ملات خود تراکم در ابتدا (تا سن ۷ روز) سبب کاهش اندکی در مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود. درصد کاهش یا افزایش مقاومت در ۷ روز برابر ۶+، ۶- و ۱۱- برای نمونه‌های 10G و 15G و 20G است. این کاهش در ۱۴ روز کمتر شده و همانطور که در شکل ارائه شده است در ۲۸ روز نمونه حاوی ۲۰ درصد پودر شیشه و هم مقاومت فشاری نسبتاً بهتری در مقایسه با نمونه کنترل پیدا کرده است. این نتیجه بیانگر این موضوع است که مدت زمان بیشتری طول می‌کشد (بعد از ۱۴ روز) که سیلیس موجود در شیشه وارد واکنش هیدراسیون شود و بعد از ۲۸ روز نه تنها پودر شیشه می‌تواند جایگزین مناسبی برای سیمان شود، بلکه نتایج به‌دست‌آمده از پودر شیشه نتایج به‌مراتب بهتری را نسبت به نمونه کنترل نشان می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده حاکی این موضوع است که ممکن است اضافه کردن بیش از ۲۰ درصد پودر شیشه نیز

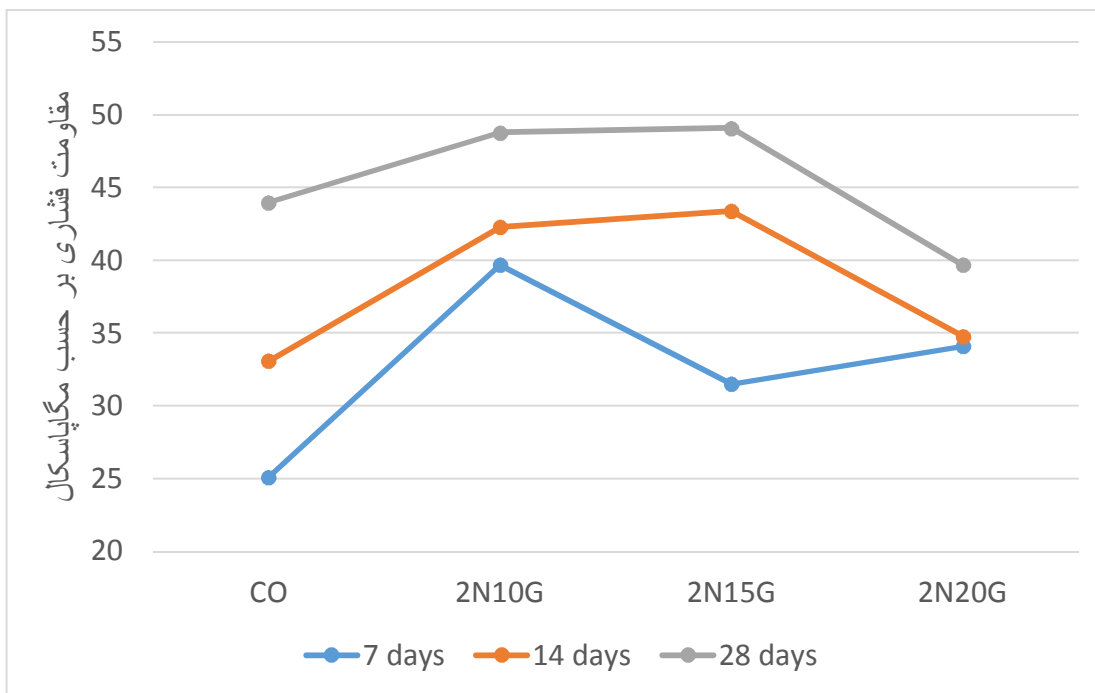
نتایج مثبتی روی مقاومت فشاری نمونه‌ها داشته باشد. به همین دلیل استفاده بیش از ۲۰ درصد پودر شیشه در ملات خودتراکم در تحقیقات بعدی توصیه می‌شود.



نمودار ۵-۱۵ تاثیر پودر شیشه بر مقاومت فشاری ملات‌های خودتراکم حاوی پودر شیشه

#### ۵-۲-۲ بررسی تاثیر افزایش پودر شیشه بر مقاومت فشاری ملات‌های خودتراکم حاوی ۲ درصد نانو سیلیس به صورت ثابت

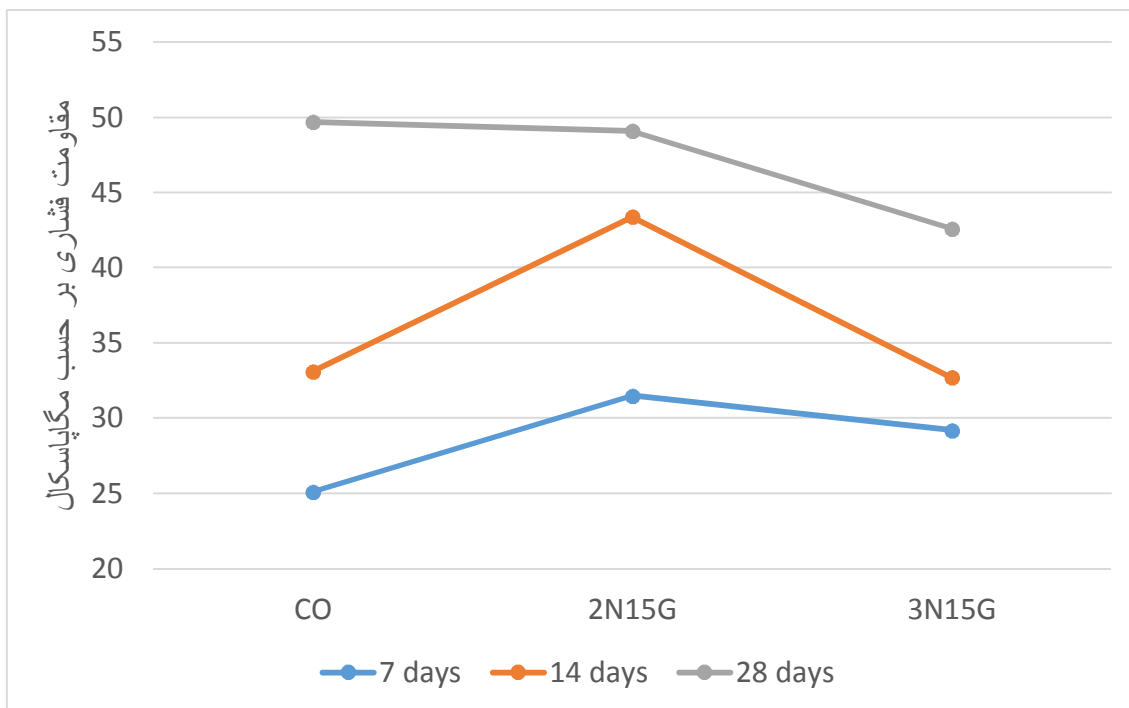
همانطور که در نمودار ۵-۱۶ مشخص است با اضافه کردن نانو سیلیس نتایج نسبت به حالت قبل کمی متفاوت خواهد بود. در این حالت بهترین درصد پودر شیشه ۱۵ درصد به دست می‌آید و نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد پودر شیشه در ۱۴ روز و ۲۸ روز کاهش قابل توجهی در مقاومت خواهد داشت.



نمودار ۵-۱۶ تاثیر افزایش پودر شیشه بر مقاومت فشاری ملات‌های خودتراکم حاوی ۲ درصد نانو سیلیس به صورت ثابت

### ۵-۲-۳ بررسی تاثیر افزایش پودر نانو بر مقاومت فشاری ملات‌های خودتراکم حاوی ۱۵ درصد پودر شیشه به صورت ثابت

همانطور که در نمودار ۵-۱۷ ملاحظه می‌شود، بهترین درصد استفاده از نانو در حضور ۱۵٪ شیشه، ۲ درصد می‌باشد. اضافه کردن ۳ درصد نانو سیلیس نه تنها ملات خودتراکم تازه را بسیار سفت می‌کند، بلکه بر مقاومت آن نیز تاثیر منفی می‌گذارد.



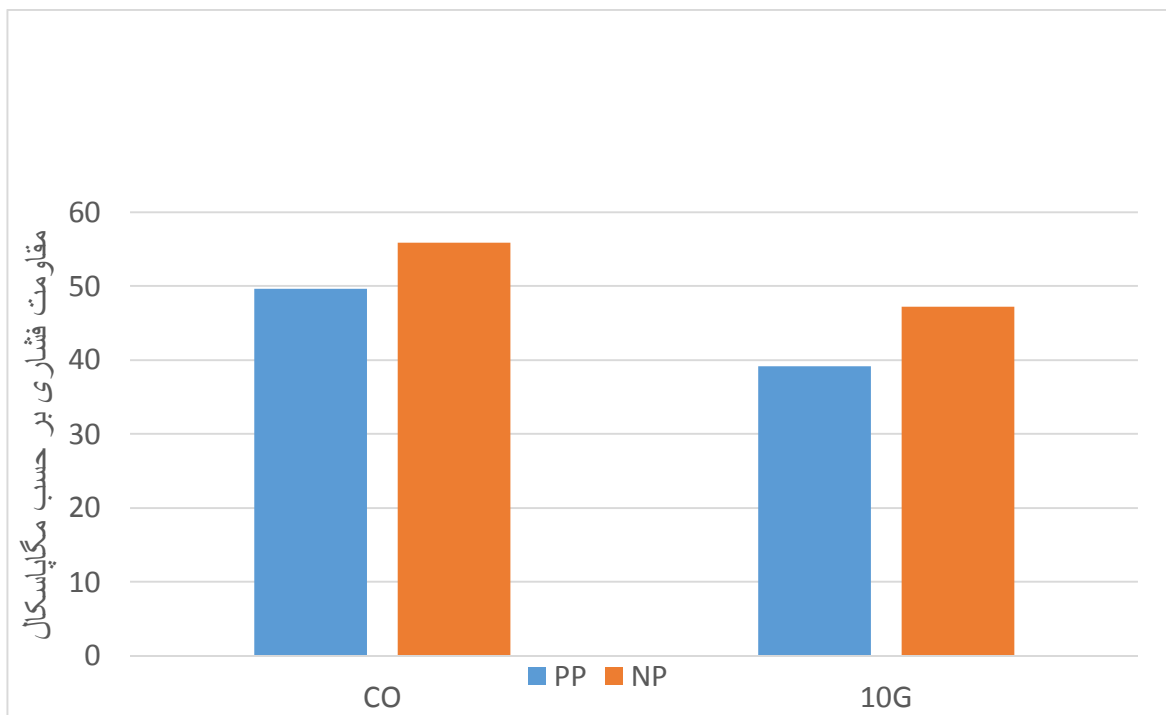
نمودار ۵-۱۷ تاثیر افزایش پودر نانو بر مقاومت فشاری ملات های خودتراکم حاوی ۱۵ درصد پودر شیشه به صورت

ثابت

#### ۵-۲-۴ تاثیر الیاف بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها

همانطور که در نمودار ۵-۱۸ مشخص است، الیاف پلی پروپیلن مقاومت فشاری نمونه‌ها را کاهش می‌دهند. به نظر می‌رسد حضور پودر شیشه تا ۱۰ درصد، تاثیر قابل توجهی در بیشتر یا کمتر کردن این کاهش مقاومت نداشته است و نمونه‌های CO حدود ۶ مگاپاسکال و نمونه های 10G حدود ۸ مگاپاسکال از مقاومت فشاری خود را در حضور الیاف از دست داده‌اند.





نمونه ۱۸-۵ مقاومت فشاری نمونه‌های بدون الیاف

### ۳-۵ مقاومت کششی

مقاومت کششی نمونه‌ها در ۲۸ روز در جدول ۱۵-۵ ارائه شده است.

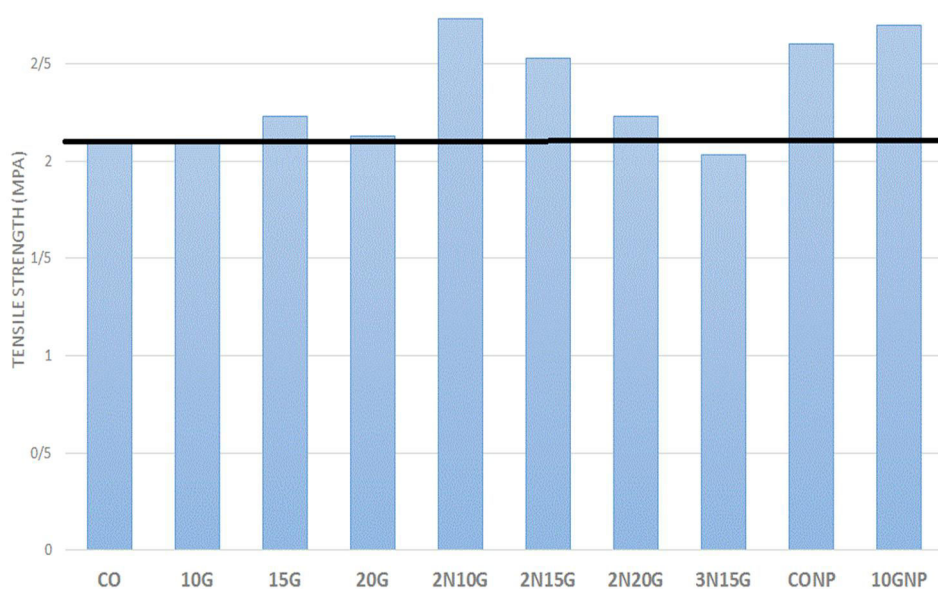
جدول ۱۵-۵ مقاومت کششی نمونه‌های ملات خودتراکم

نام نمونه	مقاومت کششی (کیلو نیوتن)	میانگین
CO	۲	۲/۱
	۲/۱	
	۲/۲	
10G	۲/۳	۲/۱
	۲/۱	
	۱/۹	
15G	۲/۲	۲/۲۳
	۲/۲	

	२/३	
20G	२/१	२/१३
	२/२	
	२/१	
2N	३	३/१
	३/२	
	३/१	
3N	२/२	२/४
	२/४	
	२/६	
4N	२/६	२/११
	२/८	
	२/११	
2N15G	२/३	२/१५
	२/११	
	२/६	
3N15G	२	२/०३
	२/१	
	२	
2N20G	२/३	२/२३
	२/१	
	२/३	
2N10G	२/११	२/१३
	२/११	
	२/८	

CONP	۳/۲	۲/۶
	۲/۷	
	۲/۵	
10GNP	۲/۸	۲/۷
	۲/۸	
	۲/۵	

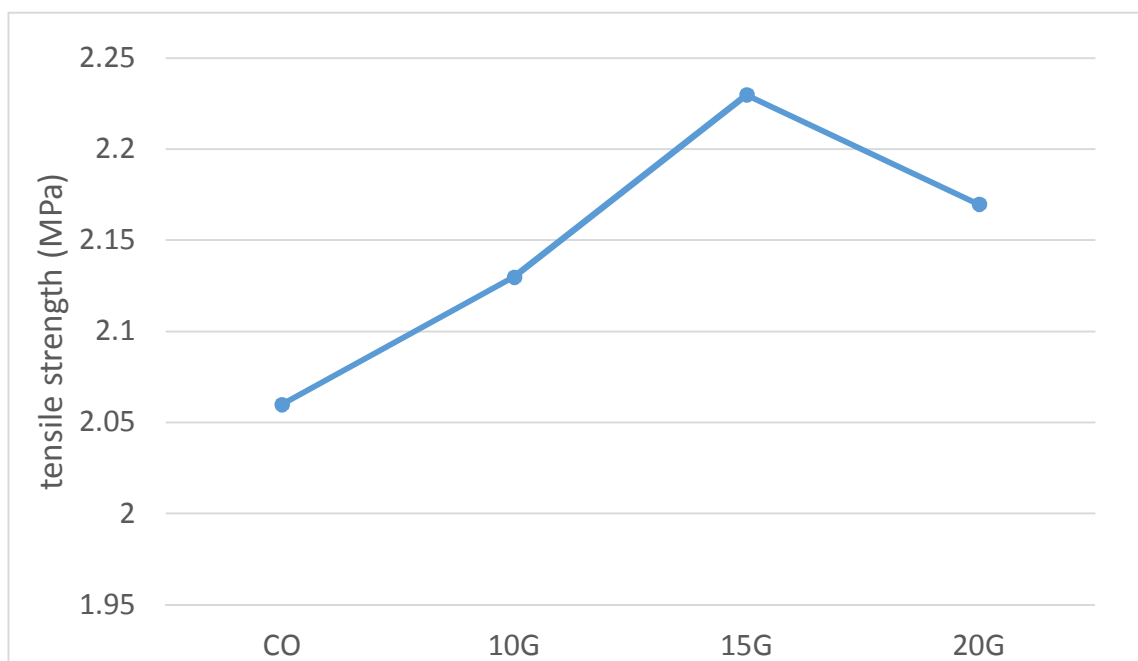
همانطور که در نمودار ۵-۱۹ مشخص است مقاومت کششی تمامی نمونه‌ها بجز 3N15G از نمونه کنترل بیشتر است و بیشترین مقدار مقاومت کششی مربوط به نمونه‌های حاوی ۲٪ نانو سیلیس و ۱۰ و ۱۵ درصد پودر شیشه و کمترین مقدار مقاومت کششی مربوط به نمونه حاوی ۳ درصد نانو سیلیس و ۱۵٪ پودر شیشه می‌باشد. در ادامه تاثیر اضافه کردن افزودنی‌ها بصورت جداگانه بررسی می‌شود.



نمودار ۵-۱۹ مقاومت کششی نمونه های ملات خودتراکم

### ۵-۳-۱ تاثیر افزایش پودر شیشه بر مقاومت کششی نمونه‌های ملات خودتراکم

همانطور که در نمودار ۵-۲۰ مشخص است افزایش مقدار پودر شیشه مقاومت کششی نمونه‌ها به مقدار اندکی بالا می‌برد. با اینکه بهترین درصد پودر شیشه ۱۵ درصد می‌باشد، با اضافه کردن ۲۰ درصد پودر شیشه نیز مقاومت کششی از نمونه کنترل بیشتر خواهد بود و به همین دلیل اضافه کردن بیشتر از ۲۰ درصد پودر شیشه در تحقیقات آینده توصیه می‌شود.

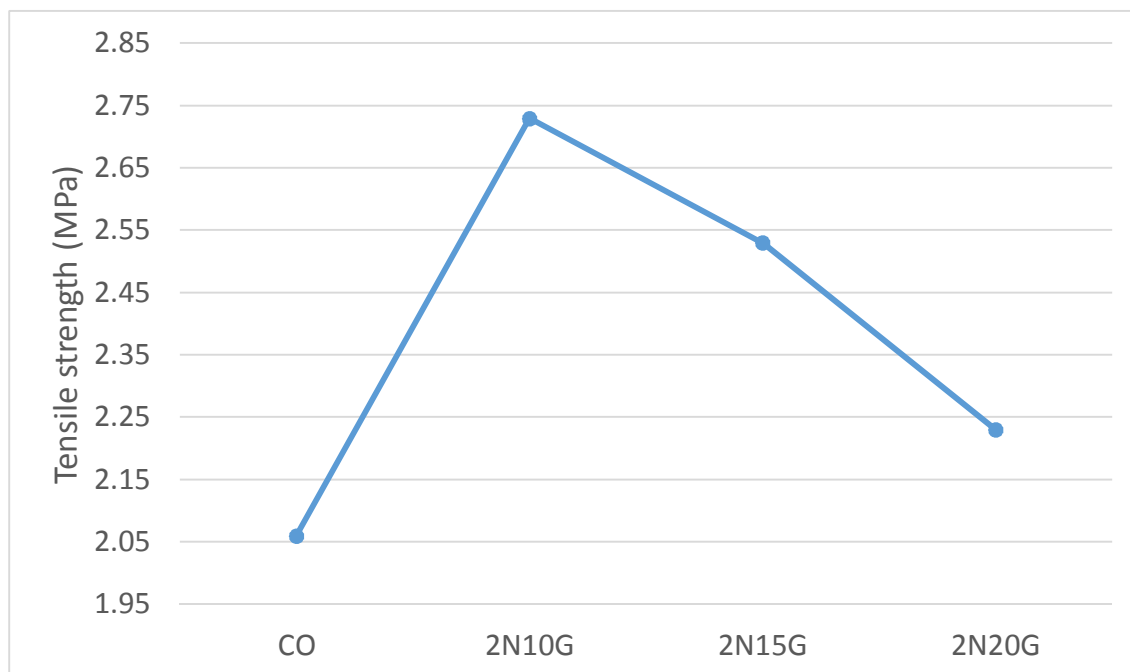


نمودار ۵-۲۰ تاثیر افزایش پودر شیشه بر مقاومت کششی نمونه‌های ملات خودتراکم

### ۵-۳-۲ تاثیر افزایش پودر شیشه بر مقاومت کششی ملات‌های خود تراکم حاوی ۲٪ نانو سیلیس بصورت ثابت

همانطور که در نمودار ۵-۲۱ مشخص است، اضافه کردن پودر شیشه بصورت کلی سبب افزایش مقاومت کششی نسبت به نمونه کنترل می‌شود. علاوه بر این مقاومت کششی نمونه‌های حاوی ۲٪ نانوسیلیس به مقدار قابل توجهی نسبت به نمونه‌های مشابه آنها از لحاظ درصد شیشه بیشتر است.

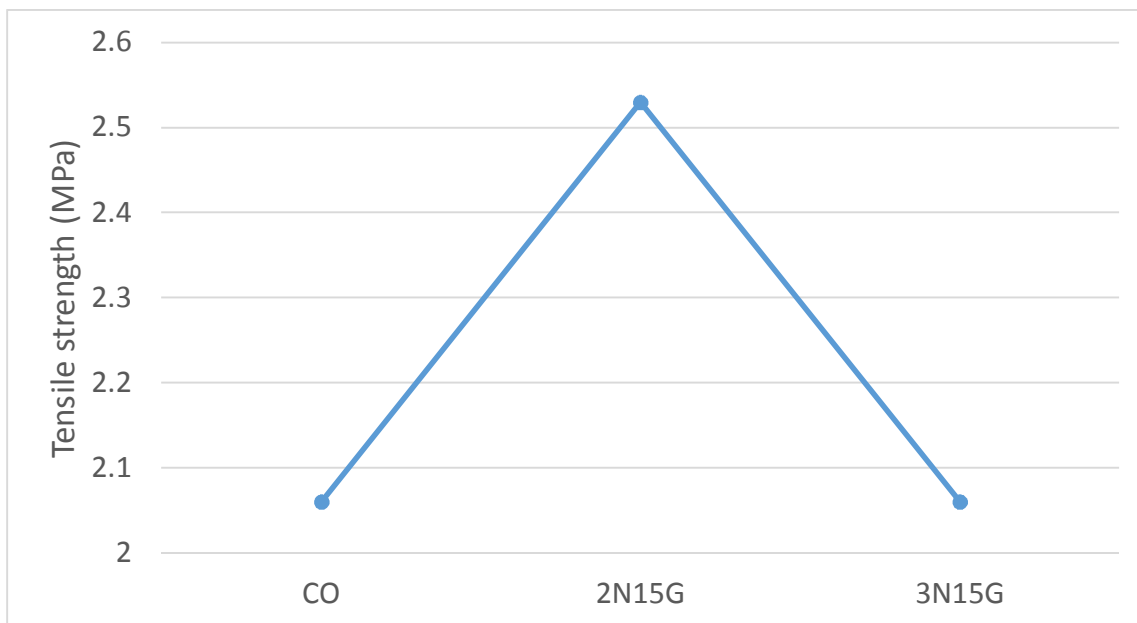
برای مثال نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر شیشه مقاومت کششی برابر ۲/۱۳ مگاپاسکال و مقاومت کششی نمونه حاوی ۲ درصد نانوسیلیس و ۱۰ درصد پودر شیشه ۲/۷۳ مگاپاسکال می‌باشد.



نمودار ۵-۲۱ تاثیر افزایش پودر شیشه بر مقاومت کششی ملات‌های خودتراکم حاوی ۲٪ نانوسیلیس بصورت ثابت

### ۵-۳-۳ تاثیر افزایش پودر نانو سیلیس بر مقاومت کششی ملات‌های خود تراکم حاوی ۱۵٪ پودر شیشه بصورت ثابت

باتوجه به نمودار ۵-۲۲ افزایش نانو سیلیس تا ۲٪ موجب افزایش مقاومت کششی به مقدار قابل توجهی می‌شود و افزایش نانوسیلیس به مقدار ۳ درصد مقاومت کششی را به اندازه‌ی نمونه کنترل کاهش می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که در حالتی که ۱۵ درصد پودر شیشه بصورت ثابت در ملات خودتراکم استفاده شده است، مقدار بهینه نانوسیلیس ۲ درصد می‌باشد و استفاده بیش از ۲ درصد نانو سیلیس، بر روی مقاومت کششی نمونه‌ها تاثیر منفی قابل توجهی می‌گذارد.



نمودار ۲۲-۵ تاثیر افزایش پودر نانوسیلیس بر مقاومت کششی ملات‌های خودتراکم حاوی ۱۵٪ پودر شیشه بصورت

ثابت

### ۵-۳-۴ شکل شکست نمونه‌ها در آزمایش مقاومت کششی

شکل های ۱۵-۵ تا ۲۳-۵، شکل ظاهری نمونه ها را تحت کشش در آزمایش مقاومت کششی نشان

می دهد.



شکل ۱۵-۵ شکست نمونه کنترل تحت کشش



شکل ۱۶-۵ شکست نمونه حاوی ۱۵٪ پودر شیشه تحت کشش



شکل ۱۷-۵ شکست نمونه حاوی ۲۰٪ پودر شیشه تحت کشش



شکل ۱۸-۵ شکست نمونه حاوی ۲ درصد پودر نانو تحت کشش



شکل ۱۹-۵ شکست نمونه حاوی ۳٪ پودر نانو تحت کشش



شکل ۲۰-۵ شکست نمونه حاوی ۳ درصد پودر نانو سیلیس و ۱۵ درصد پودر شیشه تحت کشش



شکل ۲۱-۵ شکست نمونه حاوی ۲ درصد پودر نانو سیلیس و ۱۰ درصد پودر شیشه تحت کشش





شکل ۲۲-۵ شکست نمونه کنترل بدون الیاف تحت کشش



شکل ۲۳-۵ شکست نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر شیشه تحت کشش



فصل ششم:

# آزمایش های دوام

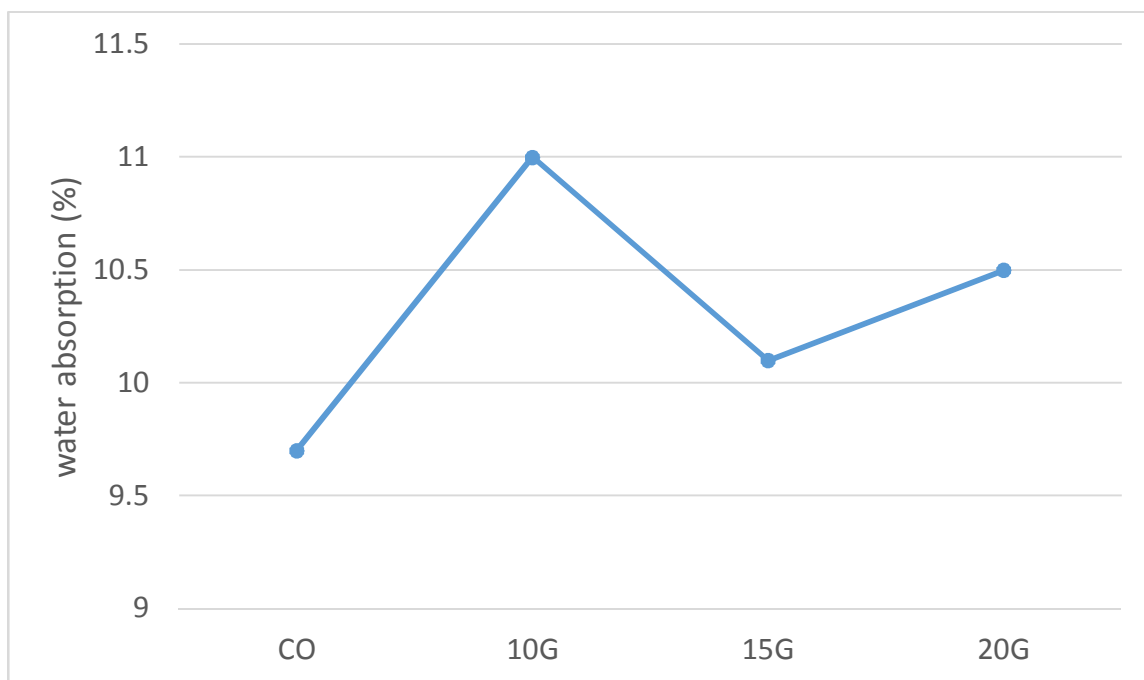
## ۱-۶ آزمایش جذب آب

نتایج حاصل از آزمایش جذب آب در جدول ۱-۶ ارائه شده است.  
جدول ۱-۶ نتایج آزمایش جذب آب نمونه‌های ملات خودتراکم

	SSD		DRY		WATER ABSORPTION (%)
	SSD	DRY	AVERAGE	AVERAGE	
CO	285/4	260/4	289	263/5	9.7
	289/1	263/7			
	292/4	266/3			
10G	281/8	254/8	285/9	257/6	11
	289/9	260/3			
15G	286/4	260	284/5	258/3	10.1
	282/6	256/6			
20G	281	254/9	280/23	253/7	10/5
	278/8	252/7			
	280/9	253/4			
2N10G	288/4	258/9	284/3	263/3	8
	280/3	267/7			
2N15G	280/9	259/4	282/3	261/15	8/1
	283/7	262/9			
2N20G	272/2	249.9	276/5	246/1	12/4
	280.9	242.2			
3N15G	276	248/4	285	249/4	14/3
	294	250/4			
CONP	285/9	264	287/15	263/35	9
	288/4	262/7			
10GNP	285/4	264/7	285/3	264/2	8
	285/2	263/7			

### ۱-۱-۶ تاثیر افزایش پودر شیشه بر جذب آب در ملات خودتراکم

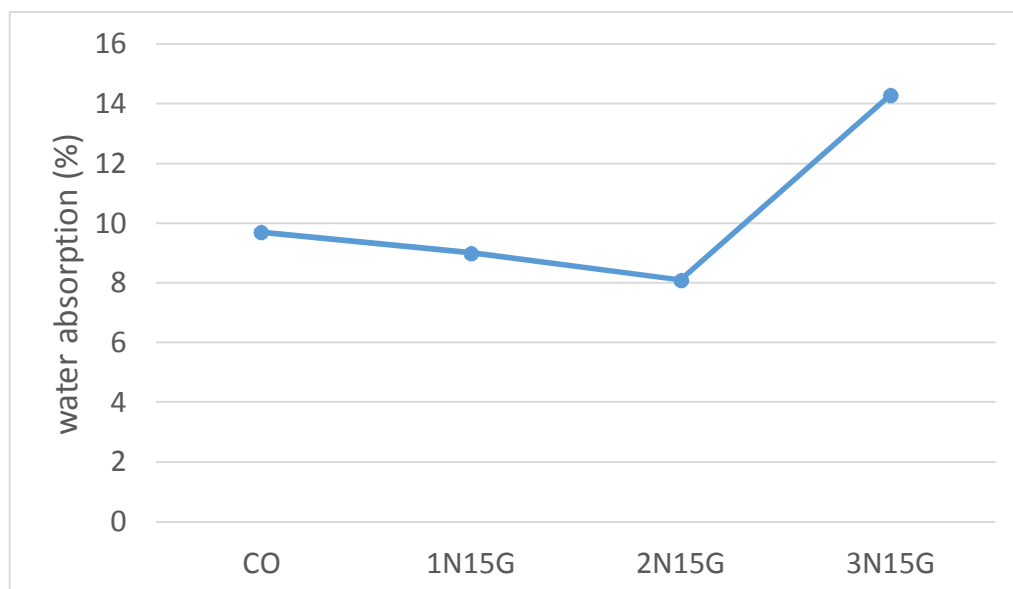
اضافه کردن پودر شیشه در ملات خودتراکم بطور کلی باعث افزایش جذب آب نمونه ها می شود. افزایش جذب آب نمونه ها مطابق نمودار ۱-۶ برابر ۱۳، ۴ و ۸ درصد می باشد. در این آزمایش مقدار بهینه جذب آب در نمونه حاوی ۱۵ درصد پودر شیشه بدست می آید. از این رو برای بدست آوردن درصد بهینه نانو نمونه ها را با ۱۵٪ پودر شیشه بصورت ثابت ساختیم.



نمودار ۱-۶ تاثیر افزایش پودر شیشه بر جذب آب در ملات خودتراکم

### ۲-۱-۶ تاثیر افزایش پودر نانو بر جذب آب با در نظر گرفتن ۱۵٪ پودر شیشه در ملات بصورت ثابت

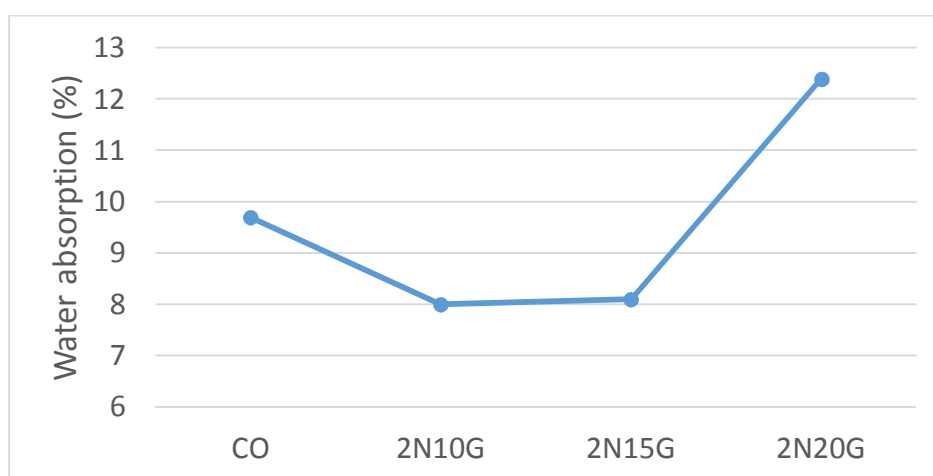
همانطور که در نمودار ۲-۶ مشخص است، با افزایش مقدار نانوسیلیس تا ۲ درصد جذب آب نمونه ها به مقدار کمی کاهش می یابد و با اضافه کردن ۳ درصد نانوسیلیس به نمونه ها، جذب آب آن ها افزایش می یابد. بنابراین بهترین درصد استفاده از نانو سیلیس در ملات خود تراکم ساخته شده ۲ درصد می باشد.



نمودار ۲-۶ تاثیر افزایش پودر نانو بر جذب آب با در نظر گرفتن ۱۵٪ پودر شیشه در ملات بصورت ثابت

### ۳-۱-۶ تاثیر افزایش پودر شیشه بر جذب آب با در نظر گرفتن ۲٪ نانو سیلیس در ملات بصورت ثابت

همانطور که در نمودار ۳-۶ است نمونه‌های حاوی پودر نانوسیلیس به همراه ۱۰ و ۱۵ درصد پودر شیشه به عنوان جایگزین سیمان جذب آب کمتری نسبت به نمونه کنترل دارند. درصد کاهش جذب آب آنها برابر ۱۶ و ۱۷ درصد برای 2N10G و 2N15G می‌باشد. با افزایش پودر شیشه به ۲۰ درصد جذب آب نمونه‌ها افزایش خواهد یافت. با این حال این افزایش نسبت به نمونه کنترل قابل قبول می‌باشد.



نمودار ۳-۶ تاثیر افزایش پودر شیشه بر جذب آب با در نظر گرفتن ۲٪ نانو سیلیس در ملات بصورت ثابت

## ۶-۲ آزمایش مقاومت در برابر اسید

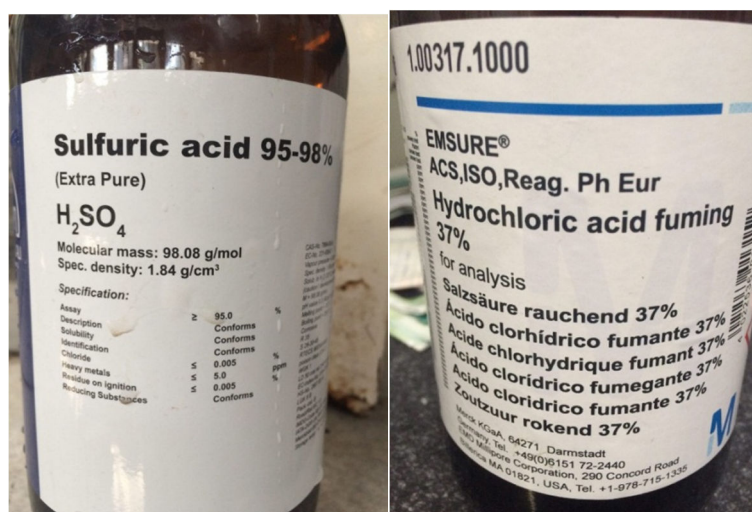
سیمان پرتلند معمولاً مقاومتی در برابر اسید ندارد. اسید می‌تواند سیمان هیدراته نشده و سیمان هیدراته شده و همچنین سنگ‌دانه‌ها را مورد حمله قرار دهد. هرچقدر pH محیط اطراف بتن کمتر شود، تخریب بتن بیشتر خواهد شد. یکی از اسیدهای مخرب بتن، سولفوریک اسید است که به اشکال گوناگونی می‌تواند در اطراف بتن حضور داشته باشد:

۱- در زباله‌های صنعتی: در زباله‌های صنعتی مقدار زیادی سولفوریک اسید وجود دارد که بر خط لوله‌های بتنی در کوتاه‌مدت یا درازمدت تاثیر زیادی می‌گذارد.

۲. آب‌های زیرزمینی معمولاً حاوی مقدار قابل توجهی سولفات هستند که سولفوریک اسید هم یکی از محصولات واکنش سولفات‌ها می‌باشد.

۳- باران‌های اسیدی که نتیجه اکسیداسیون  $\text{SiO}_2$  می‌باشد. عامل ایجاد باران‌های اسیدی، کارخانه‌های صنعتی از جمله کارخانه‌های نفت و پتروشیمی و زغال‌سنگ هستند. باران اسیدی pH بتن را کاهش و در نتیجه منجر به تخریب بتن می‌شود.

شکل ۶-۱ تصاویر سولفوریک اسید و هیدروکلریک اسید مورد استفاده در این آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱ اسیدهای مورد استفاده در این آزمایش

## ۶-۲-۱ مقاومت نمونه های ملات خودتراکم در برابر سولفوریک اسید

شکل های ۶-۲ شکل ظاهری نمونه ها قبل و بعد از تماس با سولفوریک اسید را نشان می دهد. نمونه های ملات خودتراکم بعد از اینکه به مدت ۲۸ روز در آب نگهداری شدند، از آب آورده شده و در محلول سولفوریک اسید با غلظت ۳ و ۵ درصد به مدت ۵۶ روز نگهداری شدند. بعد از ۵۶ روز نمونه ها کاملاً شسته شده و کاهش جرم و مقاومت فشاری آنها اندازه گیری شد و تاثیر پودر شیشه بر مقاومت آنها در برابر اسید مورد مطالعه قرار گرفت. در این شکل ها کاملاً مشهود است که بتن در معرض سولفوریک اسید به مقدار قابل توجهی خورده شده است. شکل الف نشان می دهد که بحرانی ترین زمان خوردگی لحظه وارد کردن نمونه در محلول است که حباب های ریز بسیاری اطراف نمونه ایجاد شده و موجب خوردگی بتن در لحظات اول می شود.



الف: لحظه وارد کردن نمونه ها در محلول سولفوریک اسید





ب: شکل ظاهری نمونه‌ها ملات خودتراکم در سولفوریک اسید ۵ درصد



ج: شکل ظاهری نمونه‌ها ملات خودتراکم در سولفوریک اسید ۳ درصد



د: شکل ظاهری نمونه‌های ملات خودتراکم پس از شستن کامل نمونه‌ها  
 شکل ۲-۶ شکل ظاهری نمونه‌ها در مرحله‌های مختلف آزمایش مقاومت اسیدی

نتایج کاهش جرم و مقاومت فشاری نمونه‌ها در اسید ۳ و ۵ درصد در جدول های ۲-۶ و ۳-۶ ارائه شده است.

جدول ۲-۶ نتایج آزمایش مقاومت در برابر اسید در محلول سولفوریک اسید ۵ درصد

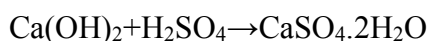
نمونه ملات خودتراکم	جرم اولیه نمونه (گرم)	جرم نمونه بعد از گذاشتن در اسید (گرم)	مقاومت فشاری نمونه (مگاپاسکال)
CO	294/0	282/1	52
10G	288/1	277/9	41/7
15G	278/1	269/9	43/3
20G	282/6	274/5	46/2

جدول ۳-۶ نتایج آزمایش مقاومت در برابر اسید در محلول سولفوریک اسید ۳ درصد

نمونه ملات خودتراکم	جرم اولیه نمونه (گرم)	جرم نمونه بعد از گذاشتن در اسید (گرم)	مقاومت فشاری نمونه (مگاپاسکال)
CO	294/2	288/2	60/2
10G	286/9	280/1	69/1
15G	273/0	266/8	67/4
20G	278/8	272/4	65/2

درصدهای کاهش جرم نمونه‌های ملات خودتراکم در نمودارهای ۴-۶ و ۵-۶ ارائه شده است. این درصدها حاکی از این است که اضافه کردن پودر شیشه به نمونه‌ها تاثیر زیادی بر کاهش جرم نمونه‌ها در برابر اسید نداشته و نمونه‌های حاوی پودر شیشه تا ۲۰ درصد نیز کاهش جرم قابل توجهی نسبت به نمونه کنترل نشان نداد. واکنش سولفوریک اسید در بتن به صورت زیر است:

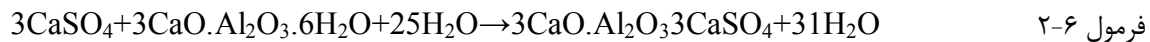
سولفوریک اسید با کلسیم هیدروکسید واکنش داده و کلسیم سولفات تولید می‌کند.



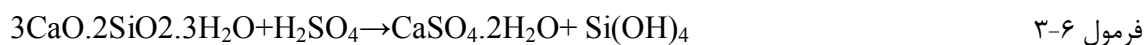
فرمول ۱-۶

کلسیم سولفات یا از بتن خارج شده و یا با کلسیم آلومینات واکنش می‌دهد.

با واکنش کلسیم سولفات با کلسیم آلومینات، اترینگیت تولید می‌شود. اترینگیت موجب ترک خوردگی و انبساط در بتن می‌شود.



کلسیم سیلیکات هیدرات که محصول اصلی واکنش هیدراسیون و دلیل اصلی افزایش مقاومت در بتن است، با سولفوریک اسید واکنش داده و ژل سیلیکا تولید می‌شود.

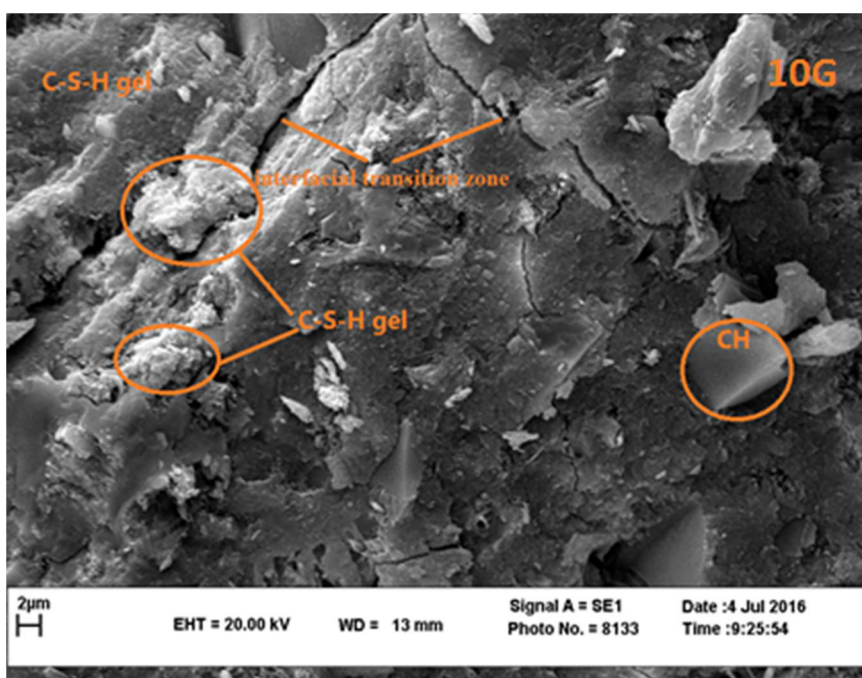
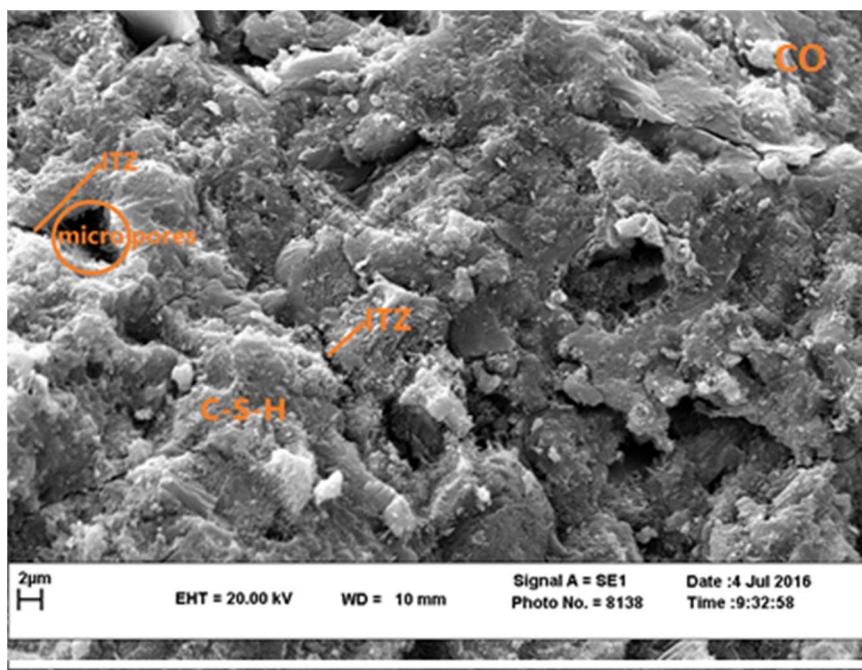


مقاومت ملات خودتراکم و همچنین کاهش جرم آن وابسته به موارد زیر می‌باشد:

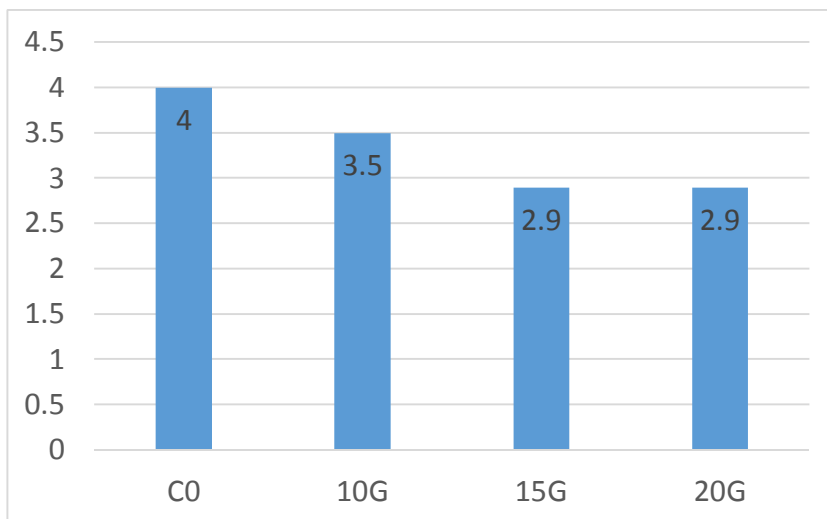
۱- ساختار حفرات: ساختار حفره‌ها در ملات، تاثیر زیادی روی مقاومت بتن‌ها در برابر اسید دارد. هرچقدر ملات سخت شده ساختار یکنواخت تری داشته باشد، در برابر اسید و محیط‌های مضر، مقاومت بهتری از خود نشان می‌دهد. شکل ۳-۶ عکس‌های SEM نمونه کنترل و همچنین نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد شیشه را نشان می‌دهد. این عکس‌ها ساختار حفرات را به خوبی در مقیاس ۲ میکرومتر نشان می‌دهد. بر اساس این تصاویر نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر شیشه ساختار تقریباً یکنواخت‌تری را نسبت به نمونه کنترل نشان می‌دهد. این نمونه راه‌های ارتباطی کمتری (ITZ) بین حفرات نسبت به نمونه کنترل نشان می‌دهد.

۲- تعداد و اندازه حفرات: تعداد و اندازه حفرات نقش مهمی در دوام بتن و مقاومت آب در محیط‌های اسیدی دارند. هرچقدر حفرات کمتر و اندازه آنها کوچکتر باشد، بتن بادوام تری در برابر حملات اسید خواهیم داشت. همان‌طور که از تصویرها مشخص است تعداد و اندازه حفرات در دو تصویر تقریباً برابر است.

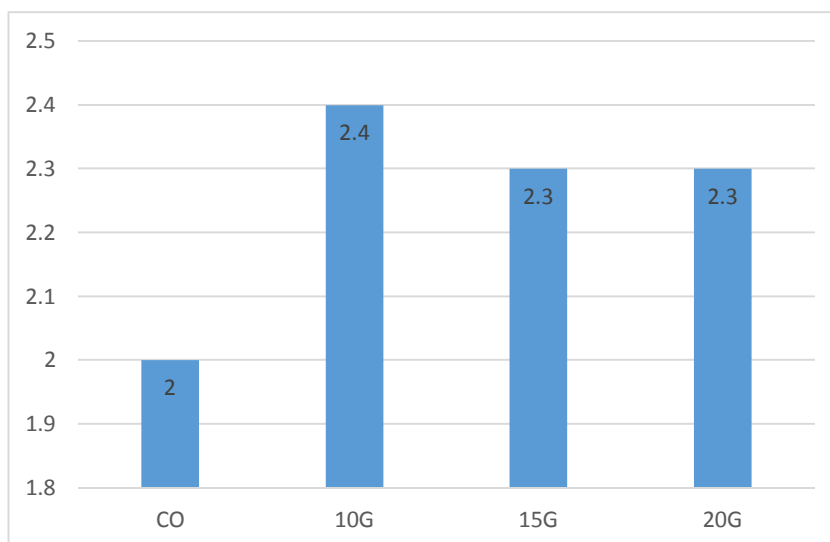
۳- غلظت اسید و pH محلول: طبیعتاً هرچقدر غلظت اسید بیشتر و pH محلول کمتر شود، تاثیر مخرب بیشتری روی بتن خواهد گذاشت.



اشکال ۳-۶ عکس های SEM نمونه های کنترل و 10G



نمودار ۴-۶ درصد کاهش جرم نمونه‌ها در محلول سولفوریک اسید ۵ درصد



نمودار ۵-۶ درصد کاهش جرم نمونه‌ها در محلول سولفوریک اسید ۳ درصد

### ۲-۲-۶ مقاومت نمونه‌های ملات خودتراکم در برابر هیدروکلریک اسید

نتایج کاهش جرم نمونه‌ها و مقاومت فشاری آنها در تماس با هیدروکلریک اسید در جدول ۴-۶ ارائه شده است. نمونه‌های ملات خود تراکم بعد از ۲۸ روز نگهداری در آب، از آب خارج شده و در محلول هیدروکلریک اسید ۵ درصد قرار می‌گیرد. لازم بذکر است هیدروکلریک اسید استفاده شده در این آزمایش دارای غلظت ۴۱ درصد بود.

نتایج، حاکی از مقاومت خوب نمونه های حاوی پودر شیشه در برابر هیدروکلریک اسید است. بطوریکه با اضافه کردن ۲۰ درصد پودر شیشه، مقاومت فشاری نمونه ها حدوداً ۱۰ مگاپاسکال بیشتر خواهد بود. در کنار مقاومت فشاری بهتر، کاهش جرم نمونه های حاوی پودر شیشه نیز کمتر از کاهش جرم نمونه کنترل بوده و نمونه ها دوام بسیار خوبی را در برابر هیدروکلریک اسید نشان دادند. دلیل اصلی نتیجه بهتر، ساختار منظم تر و بهتر نمونه حاوی شیشه در مقایسه با نمونه کنترل است. کلر یکی از مخرب ترین مواد برای بتن و بخصوص بتن آرمه می باشد. زنگ زدن یک واکنش خطرناک برای فولاد و در نتیجه برای بتن می باشد. دلیلی اصلی مضر بودن واکنش زنگ زدن، افزایش حجم این واکنش می باشد. در واکنش زنگ زدن به دلیل افزایش حجم ناشی از این واکنش، فشار داخلی در بتن به وجود آمده و ترک های ریز در داخل بتن به وجود می آید. زنگی که اطراف میلگرد به وجود می آید خود محافظی برای سالم ماندن فولاد داخلی خود است. اما با حضور یون کلر، فولاد این محافظت خود را از دست داده و یون کلر باعث ادامه این واکنش مخرب تا زنگ زدن کامل بتن می شود. از طرف دیگر با افزایش زنگ زدگی فولاد، فشار داخلی نمونه ها بیشتر شده و در نتیجه ترک خوردگی بتن بیشتر و بتن نیز تخریب خواهد شد. بنابراین مطالعه مقاومت بتن در برابر اسیدهای حاوی کلر بسیار پراهمیت است، مخصوصاً برای بتن هایی که در محیط های مرطوب قرار دارند و یا برای سازه های دریایی.

جدول ۴-۶ نتایج آزمایش مقاومت در برابر اسید در محلول هیدروکلریک اسید ۵ درصد

مقاومت فشاری نمونه (مگاپاسکال)	جرم نمونه بعد از گذاشتن در اسید (گرم)	جرم اولیه نمونه (گرم)	نمونه ملات خودتراکم
56/6	289/1	294/7	CO
56/1	276/3	279/4	10G
62/2	274/9	278/7	15G
65/0	273/9	276/4	20G

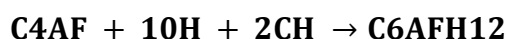
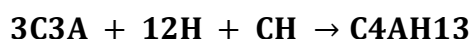
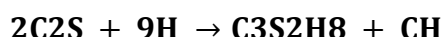
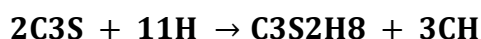
فصل هفتم:

# عکس‌های SEM

## ۱-۷ مروری بر واکنش هیدراسیون سیمان

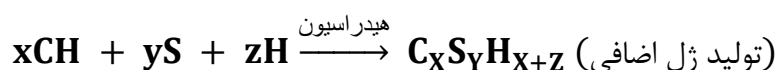
واکنش هیدراسیون، واکنش بین سیمان و آب است که نتیجه آن تشکیل ماده چسبنده‌ای است که تعیین‌کننده‌ی خصوصیات اصلی بتن در کوتاه‌مدت و درازمدت می‌باشد. واکنش‌هایی که در هیدراسیون رخ می‌دهند بصورت زیر می‌باشند:

واکنش‌های ۱-۷



نقش سیلیکا موجود در مواد پوزولانی

واکنش ۲-۷



## ۱-۱-۷ هیدراسیون کلسیم‌سیلیکات

واکنش ۳-۷



۱- مقدار تولید CH در هیدراسیون  $C_2S$  کمتر است که برای دوام بتن در محیط‌های سولفاتی بسیار موثر است.

۲- واکنش  $C_3S$  بسیار سریع است. مقاومت اولیه بتن از حدود ۲ ساعت تا ۱۴ روز در نتیجه هیدراسیون  $C_3S$  است.

۳- واکنش  $C_2S$  آرام اتفاق می‌افتد و مسوول مقاومت بعد از ۷ تا ۱۴ روز اول است.

۴- در اثر هیدراسیون  $C_3S$  گرمای بیشتری آزاد می‌شود.



## ۲-۱-۷ هیدراسیون کلسیم آلومینات

واکنش  $C_3A$  با آب بسیار سریع اتفاق می‌افتد و گرمای زیادی آزاد می‌کند. برای کنترل دمای هیدراسیون،  $C_3A$  گچ  $(CSH_2)$  به سیمان اضافه می‌شود.

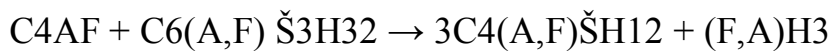
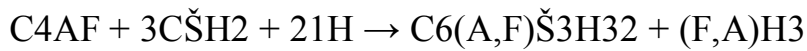


وقتی مقدار بیشتری  $C_3A$  باقی می‌ماند:



واکنش  $C_4AF$  آهسته‌تر و مقدار گرمای آزاد شده در آن کمتر از  $C_3A$  است. این واکنش با حضور گچ به اندازه قابل توجهی به تاخیر می‌افتد.

واکنش های ۶-۷

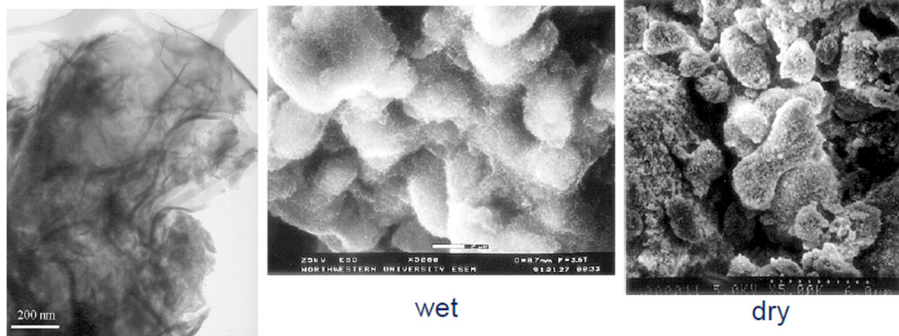


محصولات هیدراسیون  $C_4AF$  در مقایسه با محصولات واکنش  $C_3A$  مقاومت بیشتری در برابر حملات سولفات‌ها دارند.

## ۲-۷ محصولات هیدراسیون سیمان

### ۱-۲-۷ ژل (Calcium-Silicate-Hydrate) C-S-H

شکل ۱-۷ اشکال متفاوت ژل کلسیم-سیلیکات-هیدرات را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۷ اشکال مختلف ژل C-S-H

### ۲-۲-۷ کلسیم هیدروکسید ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) یا (CH)

اشکال متفاوتی می‌تواند داشته باشد. از شش ضلعی‌های ضخیم و نازک گرفته تا بصورت کریستال‌های بلند. (مطابق شکل ۲-۷)

حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد حجم خمیر سیمان را اشغال می‌کند.

سطح مخصوص آن بسیار کمتر از C-S-H است.

تاثیر زیادی روی مقاومت ندارد.

محیط بتن را بازی نگه می‌دارد. (PH بین ۱۲/۴ و ۱۳/۵)



شکل ۲-۷ کلسیم هیدروکسید (CH)

### ۳-۲-۷ اترینگیت ( $\text{C}_6\text{A}\check{S}\text{H}_32$ (Ettringite, Aft)

○ سوزنی شکل مطابق شکل ۳-۷

○ آب زیادی جذب می‌کنند.

○ کارایی بتن یا ملات را کم می‌کنند.

○ تاثیر کمی روی مقاومت اولیه دارند.



شکل ۷-۳ اترینگیت

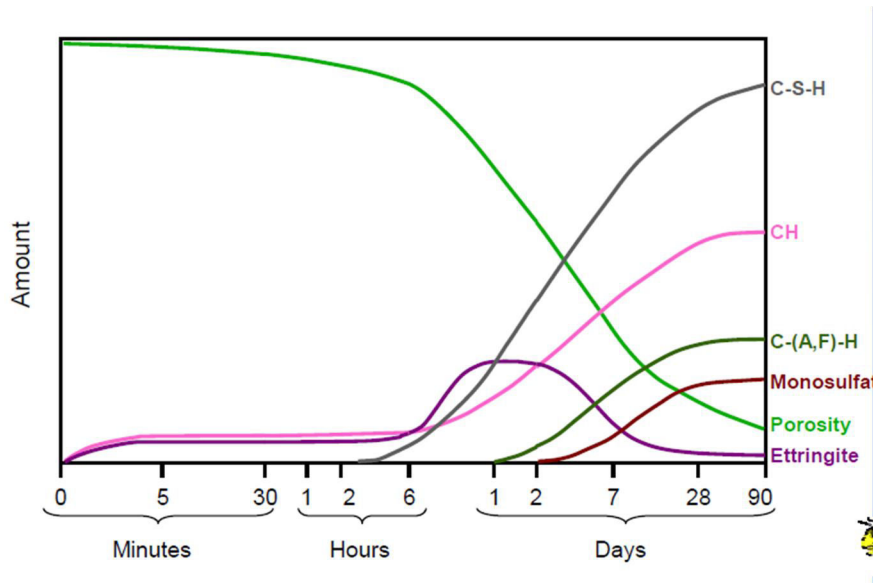
جدول ۷-۱ نام، ترکیب شیمیایی و تاثیر هر یک از مواد تشکیل دهنده‌ی سیمان روی واکنش

هیدراسیون را بررسی می‌کند:

جدول ۷-۱ نام، نقش و ترکیب اختصاری هر یک از مواد تشکیل‌دهنده‌ی سیمان در هیدراسیون

ترکیب اختصاری	نام علمی	نقش
C <sub>3</sub> S	(Tricalcium silicate) Alite	به سرعت سخت و هیدراته می‌شود و مسوول مقاومت اولیه و گیرش است.
C <sub>2</sub> S	Dicalcium silicate (belite)	به آرامی سخت و هیدراته می‌شود و مسوول مقاومت بتن بعد از ۷ روز می‌باشد.
C <sub>3</sub> A	Tricalcium aluminate	گرمای زیادی در روزهای اول ایجاد می‌کند. مقدار اندکی روی مقاومت اولیه بتن تاثیر مثبت دارد. هرچقدر میزان C <sub>3</sub> A کمتر باشد، مقاومت بتن در برابر حملات سولفات بیشتر خواهد بود.
C <sub>4</sub> AF	Tetracalcium aluminoferrite (ferrite)	به سرعت هیدراته می‌شود، ولی تاثیر بسیار کمی روی مقاومت اولیه دارد. دلیل خاکستری شدن سیمان هیدراته شده وجود فریت هیدراته شده است.

شکل ۴-۷ روند واکنش هیدراسیون در طول زمان را نشان می دهد



شکل ۴-۷ روند واکنش هیدراسیون در طول زمان

### ۳-۷ تحلیل نتایج به دست آمده

پودر شیشه حاوی مقدار قابل توجهی سیلیس با اندازه دانه‌های کوچکتر از ۱۵۰ میکرومتر مانند پوزولان عمل کرده و با واکنش با کلسیم هیدروکسید (CH) تاثیرات زیر را بر بتن خواهد داشت:

۱- تولید ژل C-S-H بیشتر در اثر واکنش سیلیس با کلسیم هیدروکسید

۲- ژل های تولید شده به حفرات بتن نفوذ کرده و تخلخل بتن را کاهش می دهند.

۳- پودر شیشه تاثیر مثبتی روی ساختار بتن و همگن کردن آن دارد.

نانو سیلیس به دلیل سطح مخصوص بسیار زیادی که دارد به سرعت وارد واکنش می شود و تاثیر آن روی مقاومت زود هنگام بیشتر از مقاومت طولانی مدت است. نانو سیلیس می تواند در موارد زیر به بهتر شدن مقاومت و دوام ملات کمک کند.

۱- نانو سیلیس به دلیل ریز بودن ذرات و در نتیجه بالا بودن سطح مخصوص آن به سرعت وارد واکنش با آب و کلسیم هیدروکسید می شود.

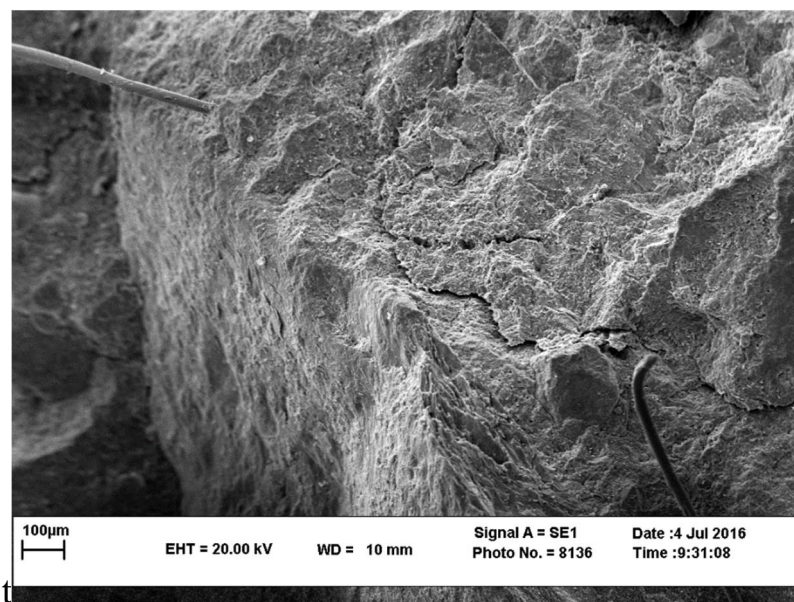
۲- نانو سیلیس با ذرات بسیار کوچکش به *interfacial transition zone* بتن وارد شده و با مسدود کردن این راه‌های ارتباطی بین حفرات، مانع از انتقال مواد مضر مانند باران‌های اسیدی، آب-های حاوی کلر بین حفره‌ها می‌شود.

۳- نانو سیلیس بیش از ۲ درصد، سبب ایجاد حفرات بزرگ در بتن و در نتیجه کاهش مقاومت فشاری و کششی می‌شود.

## ۴-۷ عکس‌های SEM

### عکس‌های SEM نمونه کنترل (CO)

شکل ۵-۷ عکس SEM نمونه کنترل را در مقیاس ۱۰۰ میکرومتر نشان می‌دهد. اگرچه این شکل ساختارهای داخلی نمونه را نشان نمی‌دهد، با اینحال جاگیری الیاف در این نمونه کاملاً مشخص و همچنین قطر آنها بین ۲۳ تا ۳۱ میکرومتر با استفاده از خط مقیاس به دست می‌آید. ترک‌های بزرگی که روی نمونه مشهود هستند، احتمالاً ناشی از عملیات شکست نمونه برای عکس برداری SEM است.



شکل ۵-۷ عکس‌های SEM نمونه کنترل

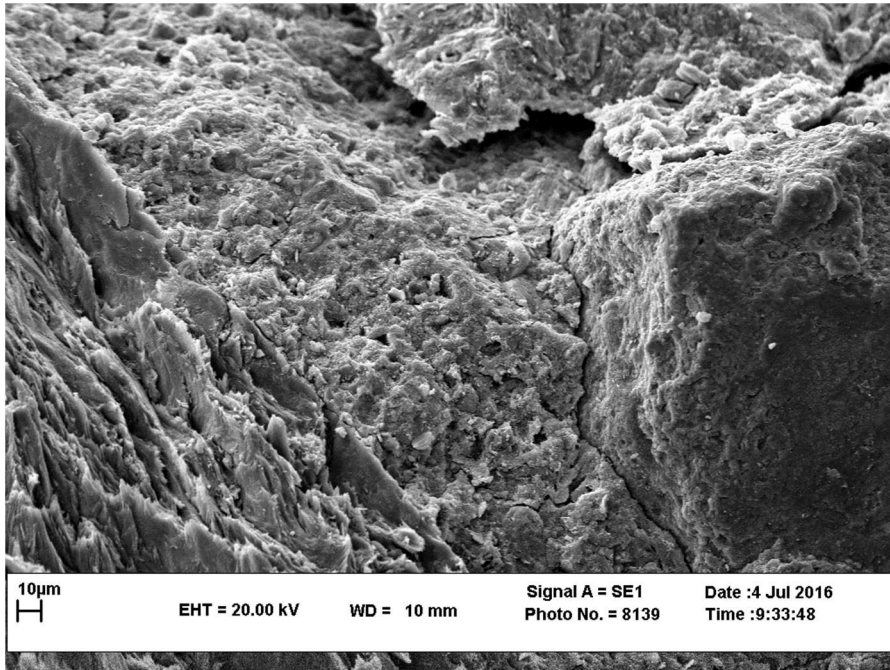
شکل ۶-۷ تصویر SEM مربوط به نمونه کنترل را در مقیاس ۱۰ میکرومتر نشان می‌دهد. در این شکل حفرات کوچکتر از ۱۰ میکرومتر در سرتاسر ساختار نمونه کاملاً مشهود است. حفرات در بتن به گروه های زیر تقسیم بندی می شوند:

**C-S-H interlayer zone**: معمولاً به صورت راه‌هایی هستند که بین محصولات کلسیم-سیلیکات-هیدرات در ملات وجود دارند و عرض این مسیرها معمولاً بین ۰/۵ تا ۲/۵ نانومتر است. این مسیرها با اینکه روی مقاومت بتن یا ملات تاثیری ندارند، می‌توانند مسیر مناسبی برای عبور مواد مضر در بتن و در نتیجه تخریب بتن باشند. (این حفرات به مقدار آب به سیمان وابسته نیستند)

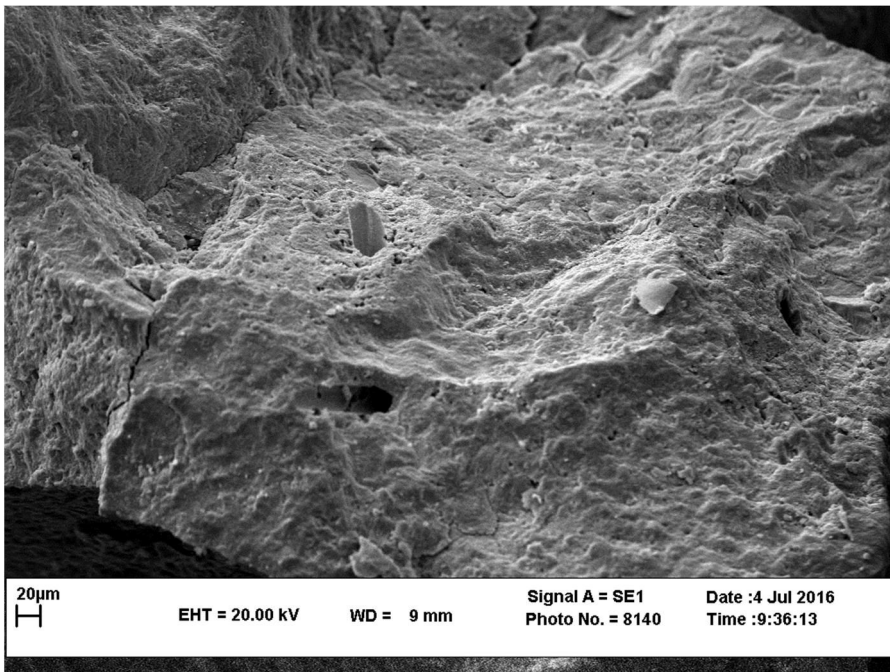
**Capillary pores**: فضایی که توسط سیمان و محصولات واکنش هیدراسیون پر نشود، باعث به وجود آمدن حفراتی به نام **capillary pores** یا حفرات مویینه می‌شود. اندازه این حفرات در سیمان خوب هیدراته شده معمولاً بین ۲/۵ تا ۵۰ نانومتر است. (این حفرات به مقدار آب به سیمان وابسته هستند) هر چقدر مقدار آب به سیمان بیشتر باشد، مقدار این حفرات و اندازه آن‌ها بیشتر و بزرگ‌تر خواهد بود. همچنین درجه هیدراسیون هم روی تعداد و اندازه این حفرات تاثیرگذار خواهد بود. لازم بذکر است حفرات مویینه معمولاً شکل هندسی منظمی ندارند.

**Macro-pores**: این حفرات دارای قطر بیشتر از ۵۰ نانومتر هستند و دلیل اصلی کاهش مقاومت بتن یا ملات محسوب می‌شوند.

**Entrained air**: حفراتی که توسط انسان در بتن ایجاد می‌شود. این حفرات معمولاً اندازه ای بین ۷۰ تا ۵۰۰ میکرومتر دارند و معمولاً برای افزایش مقاومت بتن در برابر یخبندان به آن اضافه می‌شوند. با توجه به توضیحات بالا حفرات نشان داده شده در شکل ۶-۷ و همچنین ۷-۷ جز گروه ماکرو حفرات هستند. این حفرات که بیش از ۵۰ نانومتر قطر دارند، دلیل اصلی کاهش مقاومت در بتن هستند. هر چقدر که این حفرات بزرگ‌تر باشند و یا تجمع آنها در یک قسمت بیشتر از مناطق دیگر باشد، بتن مقاومت کم‌تری خواهد داشت و ضعیف‌تر خواهد بود.



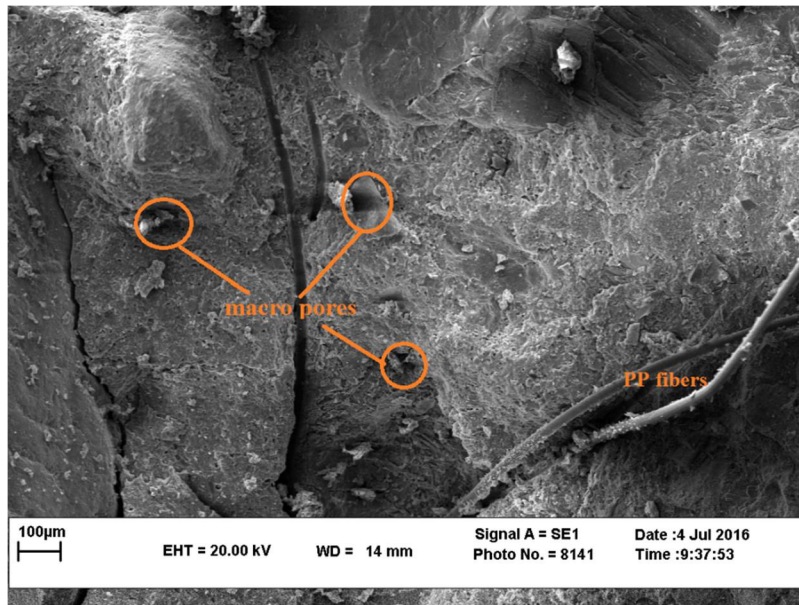
شکل ۶-۷ عکس‌های SEM نمونه کنترل



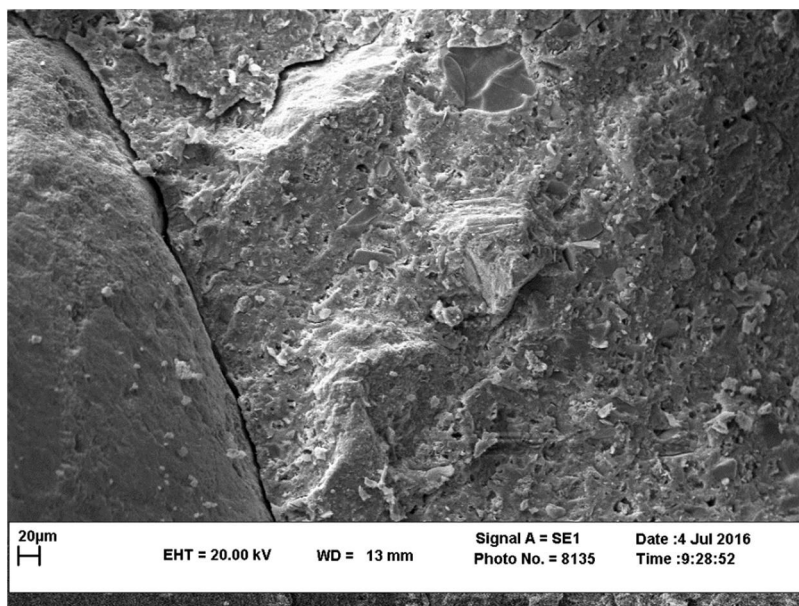
شکل ۷-۷ عکس‌های SEM نمونه کنترل

## عکس‌های SEM نمونه 10G

شکل ۷-۸ و ۷-۹ عکس‌های SEM نمونه های حاوی ۱۰ درصد پودر شیشه را در مقیاس ۱۰۰ میکرومتر و ۲۰ میکرومتر نشان می دهد. در این شکل ها الیاف پلی پروپیلن، حفرات و پراکندگی آنها در بتن کاملا مشخص است. در شکل ۹-۴ ساختار بهتر و یکنواخت تر ملات خودتراکم حاوی ۱۰ درصد پودر شیشه نسبت به نمونه کنترل کاملا مشهود است.



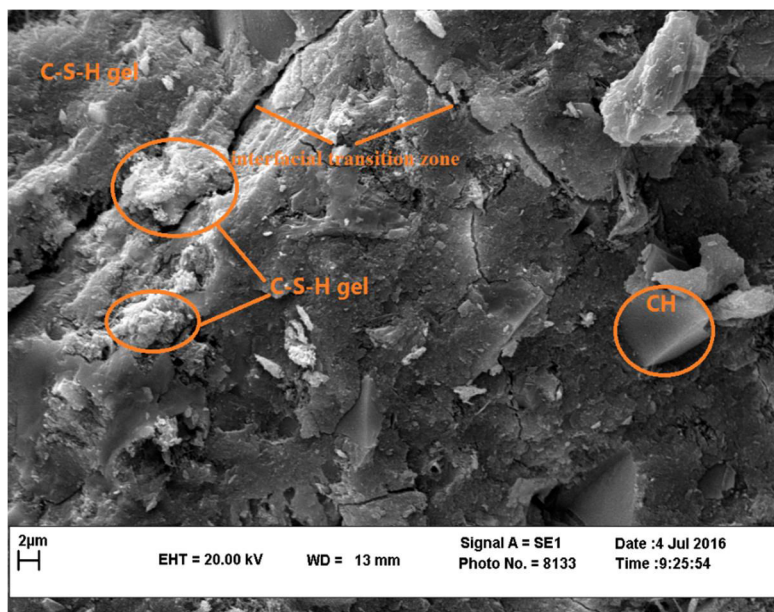
شکل ۷-۸ عکس های SEM نمونه 10G



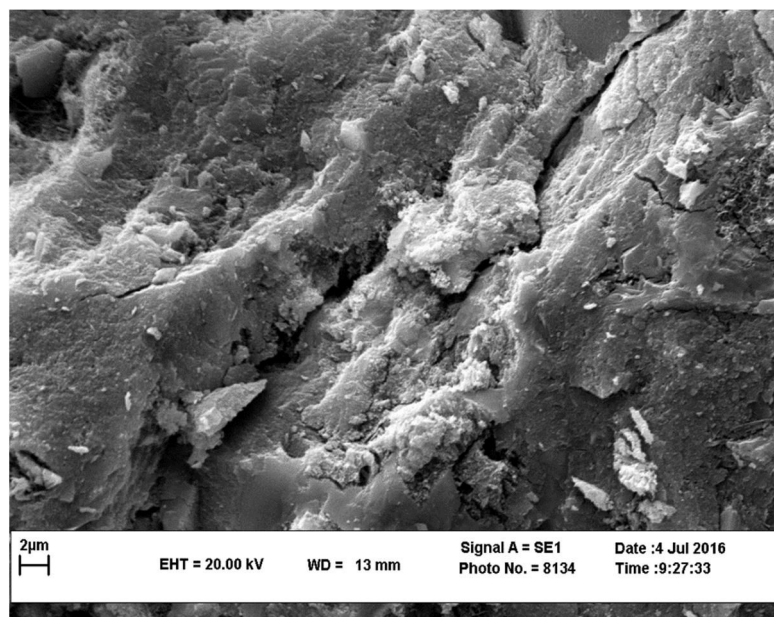
شکل ۷-۹ عکس های SEM نمونه 10G



شکل های ۷-۱۰ و ۷-۱۱ عکس SEM نمونه حاوی ۱۰ درصد پودر شیشه را در مقیاس ۲ میکرومتر نشان می دهند. در این شکل ها فضای خالی بین دو توده کلسیم-سیلیکات-هیدرات کاملا مشخص است. این فضا به دلیل اینکه می تواند ارتباط بین حفرات باشد و مواد مضر مانند اسیدها و نمک ها را از خود عبور دهد، بسیار دارای اهمیت می باشد. علاوه بر این، در این شکل حفرات بسیار کمی یافت می شود که دلیل آن، تاثیر خوب اضافه کردن پودر شیشه به ملات خودتراکم است.



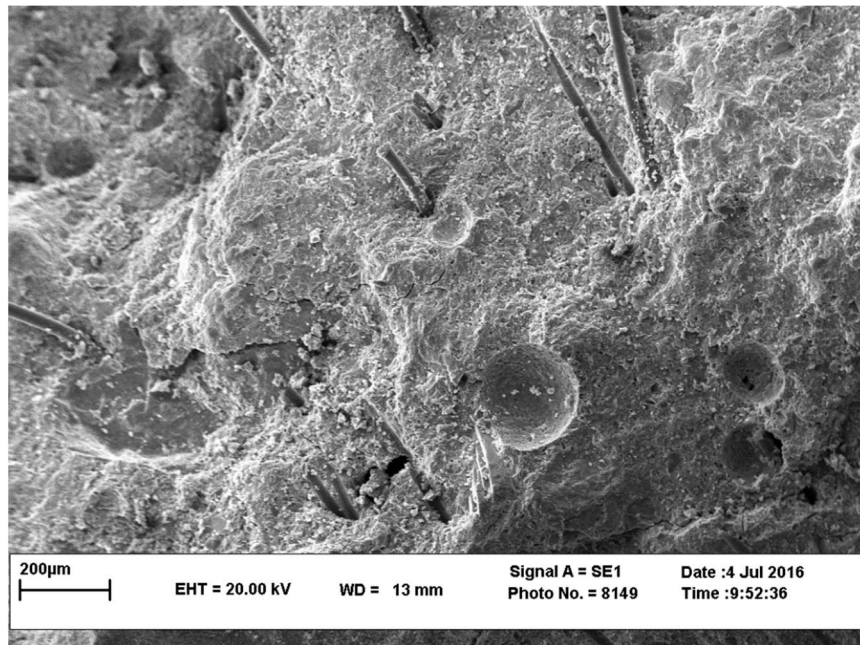
شکل ۷-۱۰ عکس های SEM نمونه 10G



شکل ۷-۱۱ عکس های SEM نمونه 10G

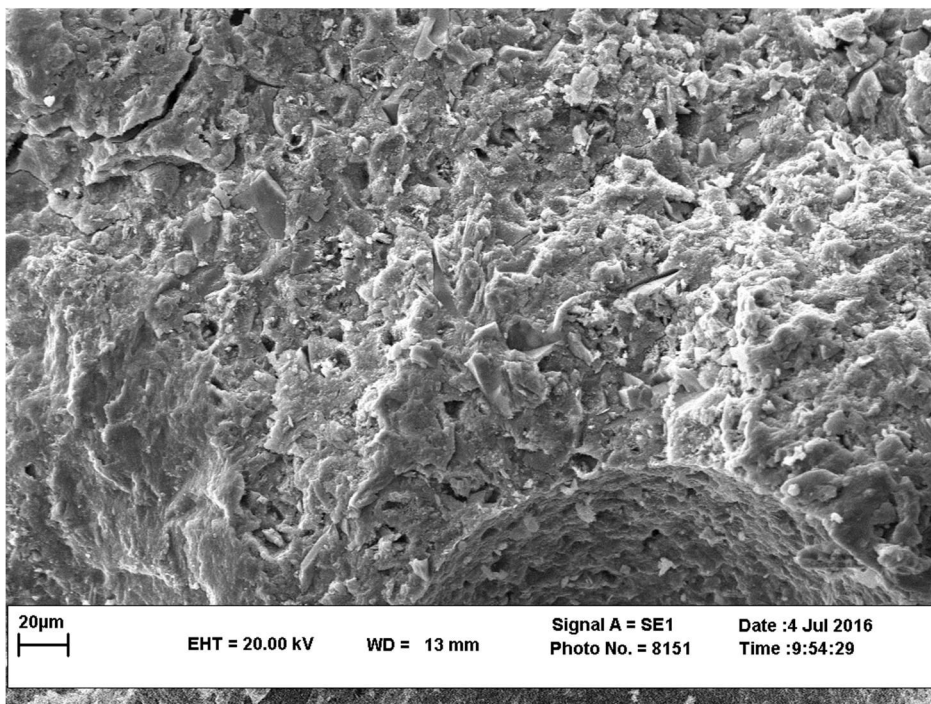
## عکس‌های SEM نمونه 15G

شکل ۷-۱۲ عکس‌های SEM نمونه حاوی ۱۵ درصد پودر شیشه را در مقیاس ۲۰۰ میکرومتر نشان می‌دهد. این شکل جاگیری مناسب الیاف را در ملات سخت شده نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است الیاف تقریباً به فاصله ۴۰۰-۶۰۰ میکرومتر از یکدیگر قرار گرفته و ساختار یکنواختی را از نظر جاگیری الیاف می‌سازد.



شکل ۷-۱۲ عکس‌های SEM نمونه 15G

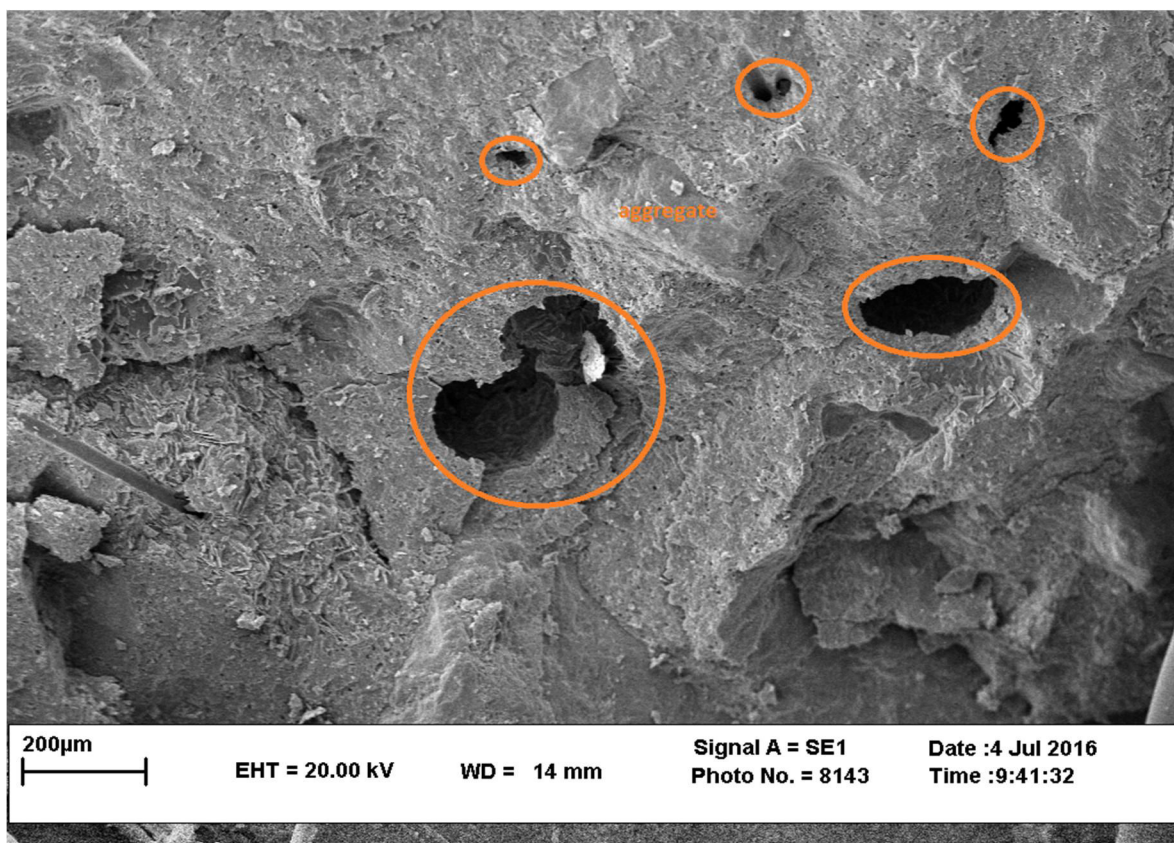
در شکل ۷-۱۳ ساختار بسیار خوبی از ملات خودتراکم حاوی ۱۵ درصد پودر شیشه نشان داده شده. در این شکل اکثر حفرات کمتر از ۱۰ میکرومتر هستند، این حفرات به صورت منظم در کل ساختار ملات پخش شده‌اند، راه ارتباطی بین این حفرات وجود ندارد و در نتیجه ساختار بسیار یکنواختی از ملات خودتراکم تشکیل شده است. نتیجه خوب این ساختار، نتیجه بهتر در آزمایش‌های مقاومت و دوام است که در فصل‌های قبلی به اثبات رسیده است.



شکل ۷-۱۳ عکس های SEM نمونه 15G

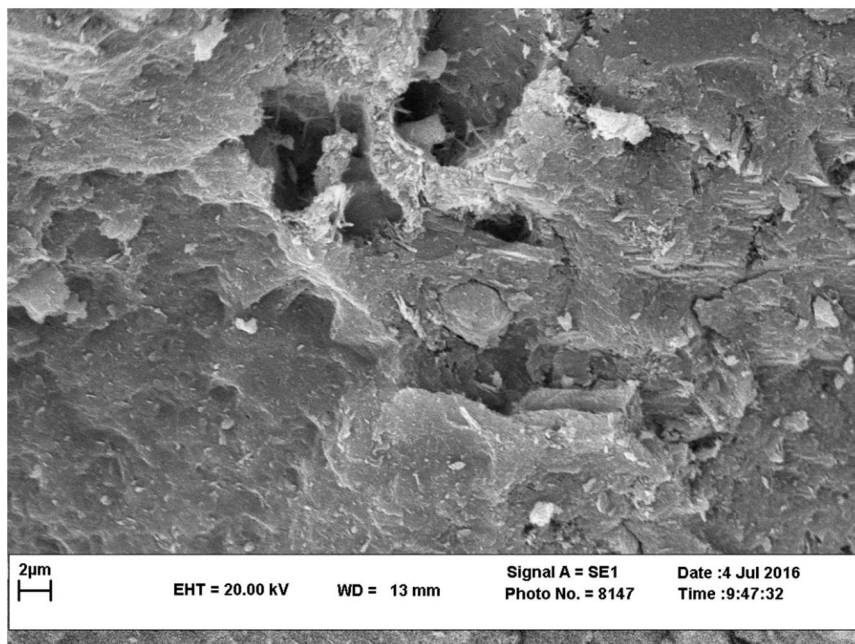
### عکس های SEM نمونه 3N

در آزمایشات مقاومت مکانیکی و دوام، نمونه های حاوی ۳ درصد نانوسیلیس اغلب نتایج خوبی نشان ندادند و مقدار بهینه استفاده از نانو سیلیس در این آزمایش ۲ درصد به دست آمد. عکس های SEM این نمونه نیز تاثیر منفی اضافه کردن ۳ درصد پودر نانوسیلیس به ملات خودتراکم را تصدیق می کند. در شکل ۷-۱۴ ساختار نمونه 3N نشان داده شده است. در این شکل حفرات بسیار بزرگ در ساختار ملات به چشم می خورد. این حفرات دلیل اصلی کاهش مقاومت نمونه های حاوی ۳ درصد نانو سیلیس هستند.

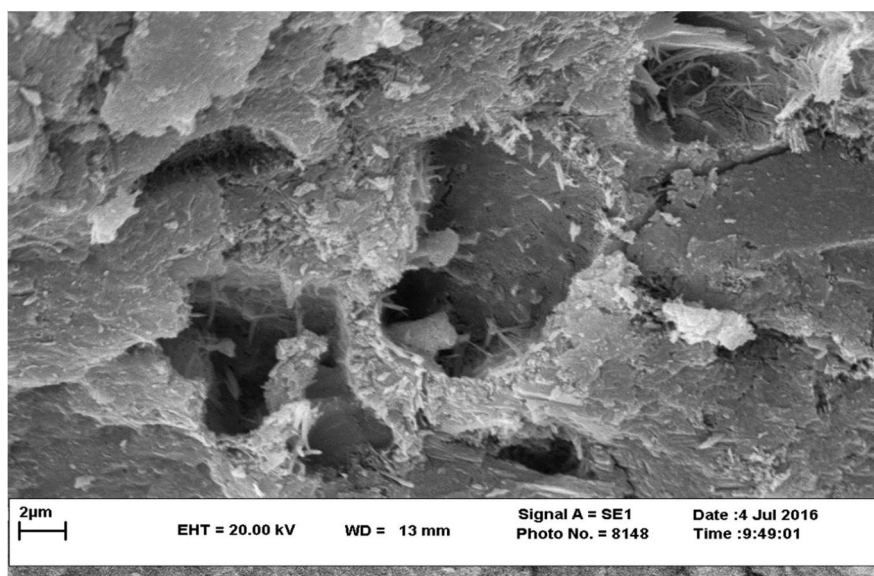


شکل ۷-۱۴ عکس‌های SEM نمونه 3N

شکل‌های ۷-۱۵ و ۷-۱۶ عکس‌های SEM نمونه حاوی ۳ درصد نانو سیلیس را در مقیاس ۲ میکرومتر نشان می‌دهد. این شکل‌ها فرق بزرگی با شکل‌های قبلی ارائه شده در این فصل دارند و آن حضور بیش از اندازه ذرات سوزنی شکل ریز یا همان اترینگیت‌ها در ملات است. اترینگیت‌ها ذرات سوزنی شکل هستند و دلیل اصلی ترک‌خوردگی و انبساط در بتن می‌باشند. در این شکل‌ها حفرات بزرگ در ملات و همچنین عدم یکنواختی در پخش این حفرات کاملاً مشهود است.



شکل ۷-۱۵ عکس های SEM نمونه 3N

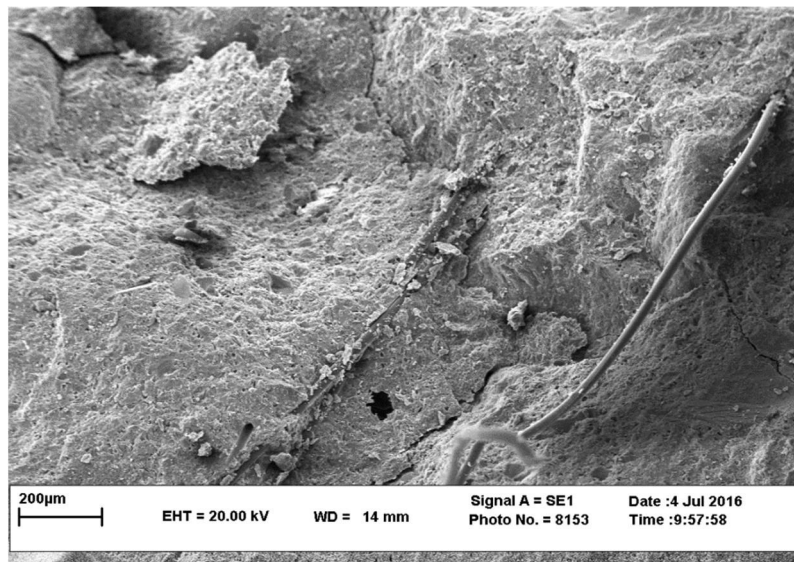


شکل ۷-۱۶ عکس های SEM نمونه 3N

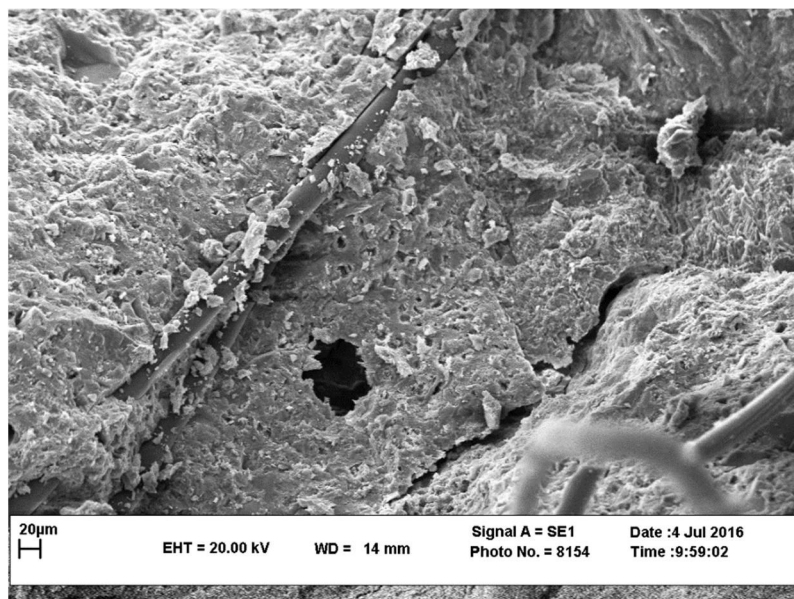
### عکس های SEM نمونه 3N15G

شکل های ۷-۱۷ و ۷-۱۸ عکس های SEM ملات خودتراکم حاوی ۳ درصد نانو سیلیس و ۱۵ درصد پودر شیشه را در مقیاس های ۲۰۰ میکرومتر و ۲۰ میکرومتر نشان می دهند. در این شکل ها جاگیری

الیاف پلی پروپیلن در ملات خودتراکم به خوبی مشخص است. این شکل‌ها همچنین حضور حفراتی با قطر بیش از ۵۰ میکرومتر را تصدیق می‌کنند.



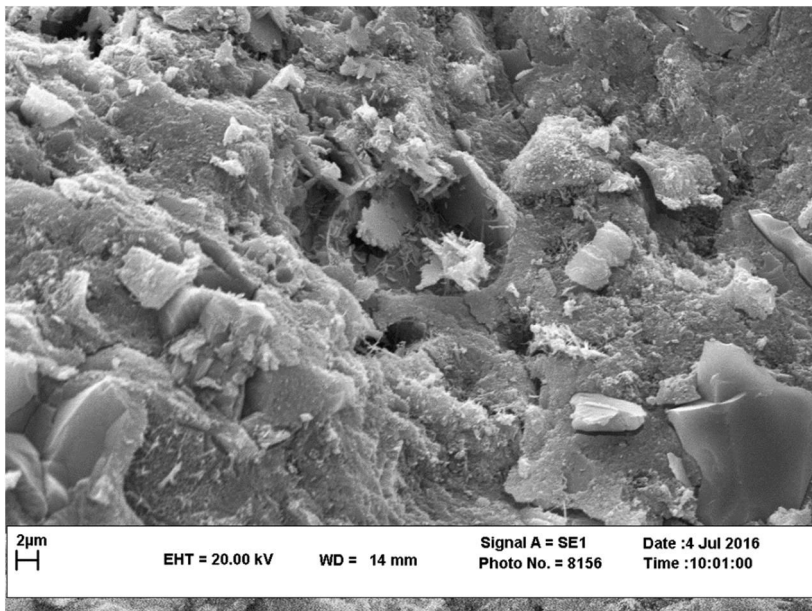
شکل ۷-۱۷ عکس های SEM نمونه 3N15G



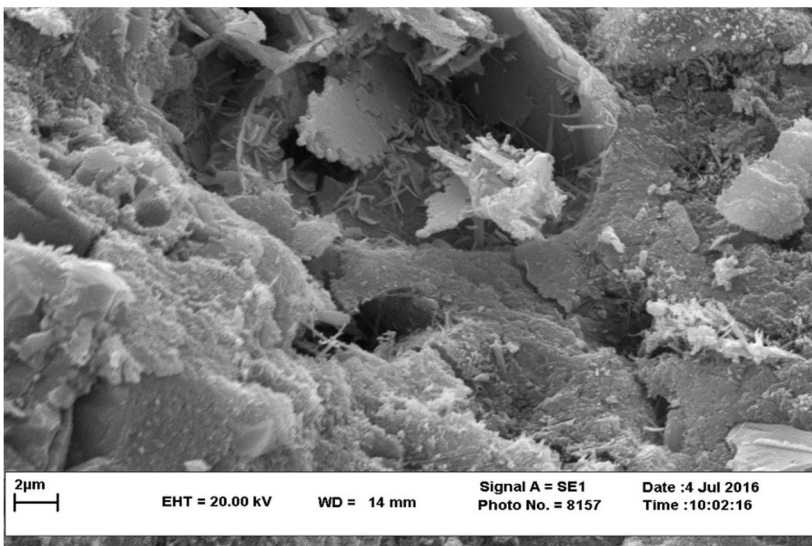
شکل ۷-۱۸ عکس های SEM نمونه 3N15G

شکل‌های ۷-۱۹ و ۷-۲۰ عکس‌های SEM نمونه حاوی ۳ درصد نانوسیلیس و ۱۵ درصد پودر شیشه را در مقیاس ۲ میکرومتر نشان می‌دهد. در این شکل‌ها ساختار نامنظم نمونه‌ها کاملاً مشهود

است. در این نمونه‌ها نیز به مقدار زیادی اترینگیت در ساختار ملات دیده می‌شود که بر روی مقاومت ملات تاثیر منفی می‌گذارد.



شکل ۷-۱۹ عکس های SEM نمونه 3N15G



شکل ۷-۲۰ عکس های SEM نمونه 3N15G





فصل هشتم:

# نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## ۸-۱ نتیجه گیری

نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده در بخش‌های قبل به صورت خلاصه به شرح زیر است:

۱- با توجه به جدول ۵-۱ همان‌طور که انتظار می‌رفت، اضافه کردن نانوسیلیس به ملات خودتراکم کارایی این ملات را به اندازه قابل توجهی کاهش می‌دهد بطوریکه برای رسیدن به اسلامپ ۲۴ سانتی‌متر از حداکثر مقدار مجاز فوق‌روان‌کننده استفاده شد.

۲- اضافه کردن پودر شیشه به ملات خودتراکم مطابق جدول ۵-۱ قطر اسلامپ را به مقدار کمی کاهش داد. با اینحال مقدار این کاهش قابل قبول بوده و با مقدار کمی افزایش فوق‌روان‌کننده جبران شد.

۳- با توجه به نمودار ۵-۱۴ اضافه کردن پودر شیشه تا ۲۰ درصد مقاومت فشاری ملات خودتراکم را افزایش داده و نمونه‌های ملات حاوی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد پودر شیشه مقاومت فشاری نسبتاً خوبی را نسبت به نمونه کنترل نشان دادند. با افزودن پودر نانو تا ۲ درصد مقاومت نمونه‌ها بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت، تا جایی که نمونه حاوی ۲ درصد پودر نانو و ۱۵ درصد پودر شیشه توانست فشار ۵۰ مگاپاسکال را تحمل کند. این در حالی است که نمونه حاوی ۲٪ نانوسیلیس به تنهایی، توانست مقاومت فشاری ۵۳ مگاپاسکال را تحمل کند.

۵- حضور الیاف پلی‌پروپیلن مقدار مقاومت فشاری را کاهش داد بطوریکه در نمونه‌های کنترل و 10G حضور الیاف مقاومت فشاری را به ترتیب حدود ۱۰ و ۸ مگاپاسکال کاهش داد. با اینحال تاثیر الیاف در جلوگیری از فروریختن ملات در شکل‌های ارائه شده در فصل پنجم که مربوط به نتایج آزمایشات فشاری و کششی می‌باشد، کاملاً مشخص است.

۶- افزایش مقدار پودر شیشه، مقاومت کششی نمونه‌ها را به مقدار اندکی بالا می‌برد. با اینکه بهترین درصد پودر شیشه ۱۵ درصد می‌باشد، مقاومت کششی نمونه حاوی ۲۰ درصد پودر شیشه فقط اندکی از نمونه کنترل بیشتر است.

۷- بهترین درصد استفاده از نانو در حضور ۱۵٪ شیشه، ۲ درصد می‌باشد. اضافه کردن ۳ درصد نانو سیلیس نه تنها ملات خودتراکم تازه را بسیار سفت می‌کند، بلکه بر مقاومت آن نیز تاثیر منفی می‌گذارد.

۸- در آزمایش مقاومت کششی الیاف پلی‌پروپیلن مشابه طنابی از جداشدن کامل نمونه‌ها تحت کشش جلوگیری می‌کنند.

۹- اضافه کردن پودر شیشه در ملات خودتراکم بطور کلی باعث افزایش جذب آب نمونه‌ها می‌شود. در این آزمایش مقدار بهینه جذب آب در نمونه حاوی ۱۵ درصد پودر شیشه بدست می‌آید که اندکی از نمونه کنترل کمتر بود.

۱۰- همانطور که در عکس‌های SEM مشخص است، حضور پودر شیشه در ملات خودتراکم ساختار کلی ملات را یکپارچه و حفرات آن را ریزتر و کمتر می‌کند.

۱۱- در عکس‌های SEM حاوی ۳ درصد پودر شیشه، حضور حفرات بزرگ و عدم یکنواختی ساختار دلیل اصلی نتایج منفی این نمونه‌ها می‌باشد.

## ۸-۲ پیشنهادات

۱. استفاده از پودر شیشه بیشتر در ملات خود تراکم و بررسی مقاومت و دوام نمونه های جدید.
۲. تحقیقات گسترده تر مقاومت در برابر اسید برای نمونه های ساخته شده در این آزمایش. برای مثال بررسی نفوذ اسید در ملات با استفاده از فنولفتالین.
۳. بررسی احتمال واکنش قلیایی- سیلیسی در نمونه های ساخته شده بر اساس استاندارد ASTM1260 و یا سایر استانداردهای معتبر.
۴. بررسی ساختار قسمتی از ملات که تحت تاثیر اسید قرار گرفته با استفاده از عکس های SEM
۵. اجرای سایر آزمایشات دوام از جمله مقاومت الکتریکی و نفوذ یون کلراید بر روی نمونه های ساخته شده.
۶. اضافه کردن سایر مواد پوزولانی از جمله متاکاؤلین و خاکستر بادی به طرح اختلاط طراحی شده در این آزمایش.
۷. بررسی پودر شیشه ریزتر و درشت تر از پودر شیشه مصرفی در این آزمایش و بررسی تاثیر اندازه پودر شیشه بر مقاومت و دوام بتن و ملات خودتراکم.

## منابع

- [۱] یاسر ملاح "بررسی تجربی مشخصات مکانیکی بتن خود تحکیم و رفتار خمشی تیرهای بتن آرمه ساخته شده از SCC"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران ۱۳۸۴
- [2] Skarendahl , A ; Peterson, O : self compacting concrete. State of the art report of RILEM Technical committee174. RILEM Report No 23, (2000)
- [3] Frank dehn “self compacting concrete time development of the material properties and Bond Behavior “ 3<sup>rd</sup> International symposium on self compacting concrete, Reykjavik, Iceland (2000)
- [4] V. Corinal desi, G. Moriconi “Durable fiber reinforced self compacting concrete” (2003)
- [5] Klaus Holschemacher ,Y. Vette klug “ A database for the evaluation of hardened properties of scc” LACER No 7, (2002)
- [6] B. persson, Technical report, Japan society for the promotion of science, report 9803: Division of Building materials, Lund Institute of Technology, Lund (1998)
- [7] B. persson, Travel report from workshop on Autogenous shirinkage in Hiroshima, Japan report 9806: Lund Institute of Technology, Lund (1998)
- [8] B. persson, compatibility between flooring on concrete concerning emissions, Moisture and carbonation effect of production methods in indoor environment, Report TVBM (1999)
- [9] Du, Hongjian, Suhuan Du, and Xuemei Liu. "Durability performances of concrete with nano-silica." *Construction and Building Materials* 73 (2014): 705-712.
- [10] Gao, Di, Mariel Sturm, and Y. L. Mo. "Electrical resistance of carbon-nanofiber concrete." *Smart Materials and Structures* 18, no. 9 (2009): 095039.
- [11] Shekari, A. H., and M. S. Razzaghi. "Influence of nano particles on durability and mechanical properties of high performance concrete." *Procedia Engineering* 14 (2011): 3036-3041.
- [12] Said, Aly M., Mohamed S. Zeidan, M. T. Bassuoni, and Ying Tian. "Properties of concrete incorporating nano-silica." *Construction and Building Materials* 36 (2012): 838-844.
- [13] Mohseni, E., Miyandehi, B.M., Yang, J. and Yazdi, M.A., 2015. Single and combined effects of nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano-TiO<sub>2</sub> on the mechanical, rheological and durability properties of self-compacting mortar containing fly ash. *Construction and Building Materials*, 84, pp.331-340.

- [14] Mohseni, Ehsan, Mojdeh Mehrinejad Khotbehsara, Farzad Naseri, Maryam Monazami, and Prabir Sarker. "Polypropylene fiber reinforced cement mortars containing rice husk ash and nano-alumina." *Construction and Building Materials* 111 (2016): 429-439.
- [15] Khotbehsara, Mojdeh Mehrinejad, Ehsan Mohseni, Mohammad Ali Yazdi, Prabir Sarker, and Malek Mohammad Ranjbar. "Effect of nano-CuO and fly ash on the properties of self-compacting mortar." *Construction and Building Materials* 94 (2015): 758-766.
- [16] Madandoust, Rahmat, Ehsan Mohseni, S. Yasin Mousavi, and Maryam Namnevis. "An experimental investigation on the durability of self-compacting mortar containing nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano-CuO." *Construction and Building Materials* 86 (2015): 44-50.
- [17] Yang, J., Mohseni, E., Behforouz, B. and Khotbehsara, M.M., 2015. An experimental investigation into the effects of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZnO<sub>2</sub> nanoparticles on the mechanical properties and durability of self-compacting mortar. *International Journal of Materials Research*, 106(8), pp.886-892.
- [18] Professor A. Skarendhal, Orjan- Peterson " State of the art report of RILEM Technical committee 174. RILEM Report No 23, (2000)
- [19] Sheinn .D.W , Tam .C.T " Effect of particle shape on paste Rheology of SCC " National University of Singapore , pp. 232-239 (2002)
- [20] Okamura .H, and Ouchi .M " Application of self compacting concrete in Japan" Kochi university of Technology, Proceeding of the first international RILEM SCC, Japan, pp 3-9 (2000)
- [21] T. Noguchi , S.G. and F. Tomosawa , " Rheological Approach to passing ability between reinforcing bars of self compacting concrete " University of Tokyo , Japan, (2000), pp59-63
- [۲۲] میر احمد احمدی راد " بررسی و مقایسه پتانسیل خوردگی آرماتورهای مدفون در بتن های خود تراکم حاوی پودر سنگ آهک، خاکستر پوسته برنج و دوده سیلیس " پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه گیلان اسفند (۱۳۸۵)
- [23] Marco Borroni, "self compacting concrete for high performance structures" Ready-mix Concrete Production and Application Development.
- [24] Tiloproske, Carl- Alexander Graubner " self compacting concrete pressure on formwork and ability to dearete" Darmstadt concrete 17, (2002)
- [25] Zho .W , Gibbs, J.C. Bartos P.J.M. " uniformity of in site properties of self compacting concrete in full scale structure elements" CEM & CON Composite 23 (2001), pp57-64

[26] Mashiro Ouchi, "self compacting concrete Development , Applications and Investigations" Proceedings of the 17th Nordic Concrete Research Symposium, pp.29-34, Reykjavik, August (1999).

[27] Schlumpf .J , " Self compacting concrete structures in Switzerland" Tunneling and underground space Technology 19, (2004)

[28] " Brite Euram Proposal No BE 963801 SCC" (2000) [29] Tarun R. N, Rakesh K, Bruce W. R, Fethullah C "Development of high-strength, economical self-consolidating concrete" Construction and Building Materials 30 pp. 463–469 (2012)

[30] Okamura, Hajime, and Masahiro Ouchi. "Self-compacting concrete." *Journal of advanced concrete technology* 1, no. 1 (2003): 5-15.

[31] EFNARC , Specification and guideline for self compacting concrete, Feb (2002)

[32] Domone PL, Jin J Properties of mortar for self compacting concrete . In: Proceeding of the first International RILEM symposium on selfcompacting concrete. Stockholm, Sweden, pp.109-120 (1999)

[33] <http://www.cembureau.be/2015-activity-report>

[34] Pelisser, Fernando, Airton Barcelos, Diego Santos, Michael Peterson, and Adriano Michael Bernardin. "Lightweight concrete production with low Portland cement consumption." *Journal of Cleaner Production* 23, no. 1 (2012): 68-74.

[35] Pike RG, Hubbard D, Newman ES. Binary silicate glasses in the study of alkali-aggregate reaction. High Res Board Bull 1960;275:39–44.

[36] Schmidt A, Saia WHF. Alkali-aggregate reaction tests on glass used for exposed aggregate wall panel work. ACI Mater J 1963;60:1235–6.

[37] Phillips JC, Cahn DS, Keller GW. Refuse glass aggregate in portland cement. In: Proceedings of 5th Mineral Waste Utilization Symposium. Chicago, III: IIT Research Institute; 1972. p. 385–90.

[38] Johnston CD. Waste glass as coarse aggregate for concrete. J Test Eval 1974;2(5):344–50.

[39] Meyer C, Baxter S, Jin W. Alkali-aggregate reaction in concrete with waste glass as aggregate. In: Proceedings of 4th Materials Engineering Conference: Materials for the New Millennium. Reston, Va: ASCE; 1996. p. 1388–97.

[40] Meyer, C., and Baxter, S., 1998. Use of recycled glass and fly ash for precast concrete." Rep. NYSERDA 98-18 (4292-IABR-IA-96) to New York State Energy Research and Development Authority, Dept. of Civil Engrg. and Engrg. Mech., Columbia University, New York.

- [41] Pollery C, Cramer SM, De La Cruz RV. Potential for using waste glass in portland cement concrete. *J Mater Civ Eng* 1998;10(4):210–9.
- [42] Bazant ZP, Zi G, Meyer C. Fracture mechanics of ASR in concretes with waste glass particles of different sizes. *J Eng Mech* 2000;126:226–32.
- [43] Byars EA, Morales-Hernandez B, Zhu HY. Waste glass as concrete aggregate and pozzolan. *Concrete* 2004;38(1):41–4.
- [44] Topcu IB, Canbaz M. Properties of concrete containing waste glass. *Cem Concr Res* 2004;34:267–74.
- [45] Chen CH, Huang R, Wu JK, Yang CC. Waste E-glass Particles used in cementitious mixtures. *Cem Concr Res* 2006;36:449–56.
- [46] Archibald JF, DeGagne'ı DO, Lausch P, De Souza EM. Ground waste glass as a pozzolanic consolidation agent for mine backfill. *CIM Bull* 1995;88:80–7.
- [47] <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C618-15>
- [48] Shao Y, Lefort T, Moras S, Rodriguez D. Studies on concrete containing ground waste glasses. *Cem Concr Res* 2000;30(1):91–100.
- [49] Dyer TD, Dhir RK. Chemical reactions of glass cullet used as cement component. *J Mater Civ Eng* 2001;13(6):412–7.
- [50] Shayan A, Xu A. Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cem Concr Res* 2004;34:81–9.
- [51] Shi C, Wu Y, Shao Y, Riefler C. Alkali-aggregate reaction of concrete containing ground glass powder. In: *Proceedings of the 12th International Conference on AAR in Concrete*; 2004. p. 789–95.
- [52] Shi C, Wu Y, Riefler C, Wang H. Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. *Cem Concr Res* 2005;35:987–93.
- [53] Shayan A, Xu A. Performance of powder as pozzolansci materials in concrete: A filed trail on concrete slabs. *Cem Concr Res* 2006;36:457–68.
- [54] Taha, Bashar, and Ghassan Nounu. "Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement." *Construction and Building Materials* 22, no. 5 (2008): 713-720.
- [55] <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C1260-14>
- [56] Wang, X.-Y., Cho, H.-K., Lee, H.-S., 2011. Prediction of temperature distribution in concrete incorporating fly ash or slag using a hydration model. *Comp. Part B: Engineering*. 42(1), 27–40. doi:10.1016/j.compositesb.2010.09.017



- [57] Japan Sewage Works Agency, Technical Manual of Prevention and Protection to Corrosion for Sewage Concrete Structures, Sewage Business Management Centre, 2007.
- [58] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, R. Polder, Corrosion of Steel in Concrete Prevention-Diagnosis Repair, Wiley, New York, 2004. pp. 315–328.
- [59] P. Ramsburg, Preventing Sewer Corrosion: Precasters Take Biology Lesson, The Concrete Producer, 2004. pp. 39–43.
- [60] T.C. Ling, C.S. Poon, Properties of architectural mortar prepared with recycled glass with different particle sizes, Mater. Des. 32 (5) (2011) 2675–2684.
- [61] Siad, H., Lachemi, M., Sahmaran, M. and Hossain, K.M.A., 2016. Effect of glass powder on sulfuric acid resistance of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 113, pp.163-173.
- [62] <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C150C150M-16e1>
- [63] <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C109C109M-16a>
- [64] [http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C307-03\(2012\)](http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C307-03(2012))
- [65] <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C642-13>
- [66] Van Khanh, B., and D. Montgomery. "Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume." In *International RILEM symposium on self-compacting concrete*, pp. 373-384. 1999.
- [67] Ferrara, Liberato, Yon-Dong Park, and Surendra P. Shah. "A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete." *Cement and Concrete Research* 37, no. 6 (2007): 957-971.
- [68] <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C33C33M-16>

## پیوست

خصوصیات الیاف پلی پروپیلن استفاده شده در این آزمایش

Polypropylene fiber	properties
molecular formula	$(C_3H_6)_n$
specific weight	900 Kg/m <sup>3</sup>
density	
length	12mm
diameter	25 $\mu$ m
tensile strength	350 N/mm <sup>2</sup>
melting point	160°C

## **Abstract**

In this experimental research, ground glass (GG) and nano-silica were incorporated in self-compacting mortar (SCM) as cement replacement. The substitution percentage for GG was 10, 15 and 20% and 2, 3 and 4% for nano-silica. The experiments included slump diameter, compressive strength, flexural strength, water absorption and acid resistance tests. The specimens were also reinforced with polypropylene fibers.

The results indicates that although the optimum percentage for GG was 15% replacement, samples with 20% GG also show desirable mechanical strength and also acceptable durability properties. Consequently incorporation of GG in SCMs is absolutely feasible and contributes to the better performances. In addition, using nano-silica up to 2% of cement weight is an effective way for even better properties.

Scanning electron micrograph (SEM) photos of samples at 28 days of curing demonstrates the increased amount of C-S-H gel in samples containing GG. A uniform pore distribution of samples was also perceptible when GG was added to samples. The SEM photos also shows many pores as big as 20  $\mu\text{m}$  in samples containing 3% nano silica.

**Key words:** ground glass, self-compacting, nano-silica, polypropylene fibers, compressive strength, flexural strength, water absorption, acid resistance, SEM photos



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Civil Engineering**

**M.Sc. Thesis in Structural Engineering**

Workability, mechanical and durability properties of  
Polypropylene reinforced self-compacting mortar containing  
ground glass and nano silica

By: Maryam Monazami

Supervisors:

Dr. Farshid Jandaghi Alaei

Dr. Hasan Haji kazemi

September 2016