

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی

پایان نامه کارشناسی ارشد

## بررسی تاثیر نانوحباب بر بتن سبک سلولی

نگارنده: حسین سلطانی

استاد راهنما:

دکتر سید فضل اله ساغروانی

استاد مشاور:

دکتر سعیدرضا زارع

شهریور ۱۳۹۶

## تقدیم اثر

به پاس تعبیر عظیم شان از کلمه ایثار،

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان در سردترین روزگاران،

به پاس قلب‌های بزرگ‌شان که سرگردانی و ترس در پناه‌شان به شجاعت می‌گراید،

و به پاس محبت‌های بی‌دریغ‌شان که هرگز فروکش نمی‌کند،

این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می‌کنم...

## تشکر و قدردانی

شکر و سپاس خداوند باری تعالی، که به من قدرت فکر کردن و آموختن ارزانی داشت.

بر خود لازم می‌دانم تا...

از زحمات و رهنمودهای مشفقانه استاد فرزانه، جناب آقای دکتر ساغروانی، عضو محترم هیئت علمی دانشگاه صنعتی شاهرود، که چه در این پژوهش و چه در طول دوره تحصیل همواره یاری‌ام نموده‌اند تشکر و قدردانی کنم.

از جناب آقای دکتر زارع، ریاست محترم هیئت مدیره انجمن بتن سبک ایران، که منت بر سر اینجانب نهاده و در انجام آزمایشات، تهیه تجهیزات مورد نیاز و ایجاد مکان مناسب آزمایشگاهی در محل کارخانه‌ی ایشان، قبول زحمت فرمودند و بنده را در انجام این تحقیق همواره یاری نمودند، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

از جناب آقای مهندس مظفری برای فراهم کردن نمونه‌ی آب میکرونانوحباب و در اختیار گذاشتن اطلاعات تخصصی مورد نیاز این سیال، قدردانی و از خداوند منان برای ایشان و همکاران‌شان در شرکت نوفناروان میناب طوس مشهد، آرزوی توفیق روزافزون مسئلت دارم.

از برادر عزیزم، جناب آقای مهندس محمود سلطانی، که بنده را در اخذ مجوز برای انجام آزمایشات مربوط به آب در آزمایشگاه تصفیه‌خانه مشهد یاری نمودند قدردانی کنم و سپاس از وجود پرمهرشان که همواره دلگرمی بنده در مسیر تحقیق و پژوهش بود.

# تعهد نامه

اینجانب حسین سلطانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه: **بررسی تاثیر نانوحباب بر بتن سبک سلولی** تحت راهنمایی دکتر سید فضل اله ساغروانی 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.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ ۱۳۹۶/۶/۲۶

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:

میکروحباب‌ها و نانوحباب‌ها، حباب‌های بسیار کوچکی از هوا هستند که به وسیله آب احاطه شده‌اند و اندازه‌ی آن‌ها به ترتیب دارای ابعاد ۱۰ تا ۵۰ میکرومتر و کمتر از ۲۰۰ نانومتر می‌باشند. ذرات ریز و پایدار هوا در میناب (آب حاوی میکرونانونوحباب‌ها) باعث سریع‌تر شدن واکنش بین سیمان و آب می‌شود. بتن سبک سلولی عبارتست از بتن دارای سلول‌های پایدار هوا که به‌طور یکنواخت در مخلوط بتن توزیع شده‌اند. برای تولید این بتن از ملات ماسه، سیمان و کف فوم پایدار (از نوع پروتئین حیوانی و شیمیایی) و افزودنی‌های مجاز استفاده می‌گردد. در فوم بتن، هر چگالی در بازه‌ی  $300 \text{ kg/m}^3$  الی  $1600 \text{ kg/m}^3$  کاربرد مخصوص خود، اعم از سازه‌ای، بلوک‌های غیرباربر و باربر و یا نقش پرکننده دارد.

در این پژوهش مقایسه‌ای بین آب معمولی و آب حاوی میکرونانونوحباب‌های هوا در زمینه‌ی فوم بتن انجام شد. تمرکز آزمایشات روی یک طرح اختلاط و با تکرارهای بالا است تا بتوان به‌صورت قطع به نتایج استناد کرد. آزمایشات برنامه ریزی شده و دارای طرح اختلاطی شامل عیار سیمان  $350 \text{ kg/m}^3$ ، پودر سنگ  $\text{kg/m}^3$  ۳۰۰ و نسبت آب به سیمان در دو نوع ۰٫۵ و ۰٫۶ می‌باشد. این طرح اختلاط در دسته‌ی چگالی مختص به بلوک‌های غیرباربر است. آزمون‌های انجام شده روی بلوک شامل: آزمون مقاومت فشاری، آزمایش زمان گیرش سیمان، آزمایش زمان گیرش فوم بتن، آزمون جمع‌شدگی، آزمون جذب آب، آزمون مقاومت کششی (برزیلی) و آزمون مقاومت خمشی می‌باشد.

طبق نتایج اخذ شده از آزمایشات، آب حاوی میکرونانونوحباب‌های هوا همانند دیگر نانو ذرات، تاثیر مثبتی روی خواص مکانیکی فوم بتن داشته به‌طوری‌که باعث افزایش مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب به میزان ۱۸، ۱۳ و ۵ درصد شده است. آزمون‌های مقاومت خمشی و کششی (برزیلی) فقط در سن ۲۸ روزه انجام شد و میناب باعث افزایش مقاومت خمشی به میزان ۲۷ درصد و افزایش مقاومت کششی

به میزان ۲۲ درصد شد. کاهش زمان گیرش اولیه و ثانویه سیمان به میزان ۲۸ دقیقه و ۳۰ دقیقه، کاهش زمان گیرش اولیه و ثانویه فوم بتن به مقدار ۲۰ دقیقه و ۵۸ دقیقه، کاهش جزئی و قابل اغماض جذب آب و جمع شدگی به میزان ۱ درصد از جمله دیگر نتایج این پژوهش است.

**واژه‌های کلیدی:** فوم‌بتن، میکرونانوحباب، مقاومت فشاری، زمان گیرش، خواص مکانیکی.

## فهرست مطالب

فصل اول.....	۱
۱-۱-مقدمه.....	۲
۲-۱-ضرورت تحقیق.....	۵
۳-۱-زمینه نوآوری.....	۶
فصل دوم.....	۷
۱-۲-پیشینه تحقیق.....	۸
۱-۱-۲-میکرونانوحباب در بتن.....	۸
۲-۱-۲-نانواکسید سیلیس در بتن.....	۸
۳-۱-۲-نانولوله‌های کربنی در بتن.....	۹
۴-۱-۲-نانواکسید آلومینیوم در بتن.....	۱۰
۵-۱-۲-نانواکسید آهن در بتن.....	۱۰
۶-۱-۲-نانواکسید تیتانیوم در بتن.....	۱۱
۷-۱-۲-نانواکسید سیلیس در فوم بتن.....	۱۲
۸-۱-۲-نانولوله‌های کربنی در فوم بتن.....	۱۲
۹-۱-۲-تاثیرات افزودنی‌ها به فوم بتن.....	۱۳



- ۱۴.....۱۰-۱-۲-مقایسه آجر و بلوک CLC.....
- ۱۵.....۱۱-۱-۲-نسبت مقاومت خمشی و کششی به فشاری.....
- ۱۵.....۱۲-۱-۲-خواص فوم بتن.....
- ۱۶.....۲-۲-میکرونانوحباب های هوا.....
- ۱۶.....۱-۲-۲-کلیاتی درباره ی میکرونانوحباب ها.....
- ۱۸.....۲-۲-۲-دستگاه تولید میکرونانوحباب.....
- ۲۰.....۳-۲-۲-اصول کاویتاسیون هیدرودینامیکی.....
- ۲۱.....۴-۲-۲-تئوری پتانسیل سطحی از میکرونانوحباب ها.....
- ۲۴.....۵-۲-۲-اثر برخورد ذره با حباب.....
- ۲۵.....فصل سوم.....
- ۲۶.....۱-۳-طرح اختلاط مصرفی.....
- ۲۶.....۳-۱-۱-سیمان.....
- ۲۷.....۳-۱-۲-نسبت ماسه به سیمان.....
- ۲۷.....۳-۱-۳-آب.....
- ۲۸.....۳-۱-۴-کف مورد نیاز فوم بتن.....
- ۳۰.....۲-۳-سیستم تولید فوم بتن.....

- ۳۱-۲-۳-مخلوط کننده.....
- ۳۳-۲-۲-کمپرسور هوا.....
- ۳۳-۲-۳-فوم ژنراتور.....
- ۳۴-۱-۳-۲-۳-فوم ژنراتور آزمایشگاهی.....
- ۳۶-۳-تجهیزات استفاده شده در آزمایشات.....
- ۳۶-۱-۳-۳-آزمایش مقاومت فشاری.....
- ۳۶-۲-۳-۳-آزمایش زمان گیرش اولیه و نهایی سیمان.....
- ۳۷-۳-۳-۳-آزمایش زمان گیرش اصلاح شده برای فوم بتن.....
- ۳۷-۴-۳-۳-آزمایش جمع شدگی.....
- ۳۷-۵-۳-۳-آزمایش جذب آب.....
- ۳۷-۶-۳-۳-آزمایش مقاومت خمشی.....
- ۳۸-۷-۳-۳-آزمایش مقاومت کششی.....
- ۳۸-۴-۳-نحوه اختلاط و قالب گیری.....
- ۴۱-۵-۳-شرح انجام آزمایشات.....
- ۴۱-۱-۵-۳-آزمایش مقاومت فشاری.....
- ۴۷-۲-۵-۳-آزمایش زمان گیرش اولیه و نهایی سیمان و فوم بتن.....

- ۴۷.....آزمون زمان گیرش خمیر سیمان.....۱-۲-۵-۳
- ۴۹.....آزمون زمان گیرش توسعه یافته (ویژه فوم بتن) .....۲-۲-۵-۳
- ۵۱.....آزمایش جمع شدگی.....۳-۵-۳
- ۵۳.....آزمایش جذب آب.....۴-۵-۳
- ۵۴.....آزمایش مقاومت خمشی و مقاومت کششی.....۵-۵-۳
- ۵۵.....آزمایش مقاومت خمشی.....۱-۵-۵-۳
- ۵۶.....آزمایش مقاومت کششی.....۲-۵-۵-۳
- ۵۸.....آزمایشات انجام شده رو آب معمولی و آب حاوی میکرونانوحباب های هوا.....۶-۳
- ۵۸.....مشخصات اولیه.....۱-۶-۳
- ۵۸.....pH متر.....۱-۱-۶-۳
- ۵۸.....کنداکتومتر.....۲-۱-۶-۳
- ۵۹.....کدورت سنج.....۳-۱-۶-۳
- ۶۰.....اندازه گیری ابعاد میکرونانوحباب ها.....۲-۶-۳
- ۶۳.....بررسی پایداری میکرونانوحباب ها.....۳-۶-۳
- ۶۵.....فصل چهارم.....
- ۶۶.....نتایج حاصل از انجام آزمایشات روی آب حاوی میکرونانو حباب و آب معمولی.....۱-۴

۶۷	۱-۱-۴- مشخصات اولیه.....
۶۷	۲-۱-۴- ابعاد میکرونانو حباب های هوا در آب.....
۶۸	۳-۱-۴- پایداری میکرونانو حباب های هوا.....
۶۹	۲-۴- آزمایشات فوم بتن.....
۷۲	۱-۲-۴- آزمایش مقاومت فشاری.....
۹۱	۲-۲-۴- آزمایش گیرش سیمان.....
۹۵	۳-۲-۴- آزمایش گیرش فوم بتن با دستگاه سوزن ویکات توسعه یافته.....
۹۷	۴-۲-۴- آزمایش جمع شدگی.....
۱۰۲	۵-۲-۴- آزمایش جذب آب.....
۱۰۵	۶-۲-۴- آزمایش مقاومت خمشی.....
۱۰۹	۷-۲-۴- آزمایش مقاومت کششی.....
۱۱۱	فصل پنجم.....
۱۱۲	۱-۵- نتیجه گیری.....
۱۱۳	۲-۵- پیشنهادات برای انجام مطالعات بعدی.....
۱۱۴	منابع و مراجع.....
۱۱۹	پیوست.....

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲- مقایسه آجر رسی و بلوک فوم بتن..... ۱۴
- جدول ۲-۲- رفتار پایداری ذرات در بازه های پتانسیل زتای آن‌ها..... ۲۲
- جدول ۱-۳- نسبت وزنی مواد بکاررفته در طرح اختلاط..... ۲۶
- جدول ۲-۳- مشخصات شیمیایی سیمان تیپ ۳۲۵-۱ بجنورد..... ۲۶
- جدول ۳-۳- کاربرد چگالی‌های مختلف بلوک‌های بتن سبک..... ۲۷
- جدول ۴-۳- مقایسه فوم شیمیایی و پروتئینی..... ۲۹
- جدول ۵-۳- مشخصات مایع فوم آترین شیمی آذرباد..... ۳۰
- جدول ۱-۴- مشخصات اولیه آب میکرونانوحباب..... ۶۶
- جدول ۲-۴- مشخصات اولیه آب معمولی..... ۶۶
- جدول ۳-۴- مشخصات نمونه میکرونانوحباب تحت آزمون ابعاد..... ۶۷
- جدول ۴-۴- طرح اختلاط تکرارها..... ۷۱
- جدول ۵-۴- تعداد نمونه‌های هر اختلاط..... ۷۳
- جدول ۶-۴- مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه..... ۷۴
- جدول ۷-۴- مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه..... ۷۶
- جدول ۸-۴- میانگین نتایج طرح اختلاط‌های M1 و M2..... ۸۰

- جدول ۴-۹- میانگین مقاومت فشاری و چگالی نمونه‌های اختلاط‌های M3 تا M5..... ۸۱
- جدول ۴-۱۰- میانگین مقاومت فشاری و چگالی نمونه‌های اختلاط‌های M6 تا M8..... ۸۱
- جدول ۴-۱۱- درصد رشد مقاومت فشاری با مقایسه اختلاط‌های M3 تا M8..... ۸۲
- جدول ۴-۱۲- نتایج آزمون مقاومت فشاری اختلاط‌های M9 الی M11..... ۸۴
- جدول ۴-۱۳- درصد رشد مقاومت فشاری با مقایسه تکرارهای M12 تا M13..... ۸۵
- جدول ۴-۱۴- نتایج نمونه‌های خشک شده در آون، اختلاط M12 و M13، و محاسبه رشد مقاومت فشاری..... ۸۶
- جدول ۴-۱۵- محاسبه رشد مقاومت فشاری تکرارهای M12 و M13..... ۸۷
- جدول ۴-۱۶- درصد رشد مقاومت فشاری با مقایسه نتایج اختلاط‌های M14 و M15..... ۸۹
- جدول ۴-۱۷- درصد رشد مقاومت فشاری با مقایسه میانگین کل نتایج..... ۹۰
- جدول ۴-۱۸- نتایج دانشمندان در حوزه‌ی نانوذرات و مقاومت فشاری بتن..... ۹۱
- جدول ۴-۱۹- نتایج آزمون سوزن و یکات به‌روی خمیر سیمان-آب معمولی و میناب..... ۹۲
- جدول ۴-۲۰- میانگین نتایج آزمون سوزن و یکات به‌روی خمیر سیمان..... ۹۳
- جدول ۴-۲۱- زمان گیرش اولیه و نهایی..... ۹۴
- جدول ۴-۲۲- مقایسه نتایج دانشمندان در زمینه استفاده از نانوذرات برای تغییر زمان گیرش..... ۹۵
- جدول ۴-۲۳- میانگین نتایج آزمون سوزن و یکات توسعه یافته به‌روی نمونه‌های فوم بتن..... ۹۶
- جدول ۴-۲۴- زمان گیرش اولیه و ثانویه با توجه به میانگین نتایج کل نمونه‌های فوم بتن..... ۹۶

- جدول ۴-۲۵- نتایج جذب آب نمونه‌های جمع‌شدگی..... ۹۸
- جدول ۴-۲۶- میانگین کل نتایج آزمون جمع‌شدگی..... ۱۰۰
- جدول ۴-۲۷- نتایج آزمون جمع‌شدگی و میانگین آن‌ها..... ۱۰۲
- جدول ۴-۲۸- نتایج جذب آب وزنی نمونه‌های فوم بتن و میانگین کل نتایج..... ۱۰۳
- جدول ۴-۲۹- نتایج جذب آب حجمی نمونه‌های فوم بتن و میانگین کل نتایج..... ۱۰۴
- جدول ۴-۳۰- محاسبه‌ی تغییرات مقاومت خمشی بین نمونه‌های میناب و معمولی..... ۱۰۸
- جدول ۴-۳۱- نتایج دانشمندان با استفاده از نانوذرات در بتن برای بهبود مقاومت خمشی..... ۱۰۸
- جدول ۴-۳۲- محاسبه‌ی تغییرات مقاومت کششی بین نمونه‌های میناب و معمولی..... ۱۱۰
- جدول ۴-۳۳- مقایسه نتایج دانشمندان در استفاده از نانوذرات برای بهبود مقاومت کششی..... ۱۱۰
- جدول ۵-۱- نتایج آزمون‌های فشاری، کششی و خمشی فوم بتن در پژوهش..... ۱۱۲

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- تغییرات چگالی مقاومت فوم بتن..... ۱۴
- شکل ۲-۲- هدایت حرارتی فوم بتن در برابر چگالی..... ۱۵
- شکل ۳-۲- مقاومت فوم بتن با چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و بتن معمولی در مقابل آتش..... ۱۶
- شکل ۴-۲: مقایسه اندازه‌ی میکرو و نانو حباب..... ۱۷
- شکل ۵-۲: نمایش شماتیک نحوه‌ی پایداری میکرو و نانو حباب..... ۱۷
- شکل ۶-۲- دستگاه تولید نانو حباب..... ۱۸
- شکل ۷-۲: شماتیک از دستگاه میکرونانو حباب..... ۲۰
- شکل ۸-۲: شماتیک حضور یک ذره خنثی در الکترولیت..... ۲۱
- شکل ۱-۳- کف خامه‌ای شکل حاصل از مایع فوم..... ۲۹
- شکل ۲-۳- نمایش شماتیک چگونگی تولید فوم بتن..... ۳۱
- شکل ۳-۳- محل میکسر در سیستم فوم بتن ساز..... ۳۲
- شکل ۴-۳- فوم بتن ریزی در کف طبقات برای تسطیح..... ۳۳
- شکل ۵-۳- بلوک فوم بتن..... ۳۳
- شکل ۶-۳- کمپرسور هوا..... ۳۳
- شکل ۷-۳- فوم ژنراتور آزمایشگاهی..... ۳۴



- شکل ۳-۸- مخلوط کن ۲۰ لیتری و پره‌های چرخنده..... ۴۰
- شکل ۳-۹- مخلوط کن ۲۰۰ لیتری ..... ۴۱
- شکل ۳-۱۰- جک هیدرولیکی روغنی مکانیکی..... ۴۲
- شکل ۳-۱۱- جک هیدرولیکی Toni Technic..... ۴۴
- شکل ۳-۱۲- عمل‌آوری نمونه‌ها زیر پوشش پلاستیکی..... ۴۶
- شکل ۳-۱۳- تاثیر مخرب روغن موتور بر کف فوم..... ۴۷
- شکل ۳-۱۴- دستگاه سوزن ویکات و همزن برقی..... ۴۸
- شکل ۳-۱۵- دستگاه سوزن ویکات به همراه سوزن ۵ میلی‌متری..... ۵۰
- شکل ۳-۱۶- قالب نمونه‌ی جمع‌شدگی..... ۵۱
- شکل ۳-۱۷- نمونه زیر دستگاه جمع‌شدگی..... ۵۲
- شکل ۳-۱۸- نمونه‌های خمشی مستطیلی و نمونه‌های کششی استوانه‌ای..... ۵۵
- شکل ۳-۱۹- شماتیک جک آزمون خمشی..... ۵۶
- شکل ۳-۲۰- آزمون مقاومت خمشی نمونه‌ی فوم بتن..... ۵۶
- شکل ۳-۲۱- آزمون مقاومت کششی نمونه‌ی فوم بتن..... ۵۷
- شکل ۳-۲۲- دستگاه pH متر..... ۵۸
- شکل ۳-۲۳- دستگاه کنداکتومتر..... ۵۹

- شکل ۳-۲۴-دستگاه کدورت سنج..... ۶۰
- شکل ۴-۱-نمودار اندازه-تعداد میکرونونو حباب های هوا در آب..... ۶۷
- شکل ۴-۲-نمودار تغییرات زتاپتانسیل..... ۶۸
- شکل ۴-۳-نمونه فوم بتن زیر جک آزمون مقاومت فشاری..... ۷۲
- شکل ۴-۴-نمودار مقایسه مقاومت فشاری نمونه های ۷ روزه..... ۷۵
- شکل ۴-۵-نمودار مقایسه مقاومت فشاری نمونه های ۲۸ روزه..... ۷۸
- شکل ۴-۶-نمودار مقایسه مقاومت فشاری نمونه های ۷ روزه اختلاط های M1 و M2..... ۷۹
- شکل ۴-۷-نمودار مقایسه نمونه های ۲۸ روزه اختلاط های M1 و M2..... ۷۹
- شکل ۴-۸-نمودار مقایسه مقاومت فشاری ۷ روزه اختلاط های M3 تا M8..... ۸۰
- شکل ۴-۹-نمودار مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه اختلاط های M3 تا M8..... ۸۱
- شکل ۴-۱۰-نمودار مقایسه مقاومت فشاری ۷ روزه اختلاط های M9-M10-M11..... ۸۱
- شکل ۴-۱۱-نمودار مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه اختلاط های M9-M10-M11..... ۸۳
- شکل ۴-۱۲-نمودار مقایسه مقاومت فشاری ۷ روزه اختلاط های M12 و M13..... ۸۴
- شکل ۴-۱۳-نمودار مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه اختلاط های M12 و M13..... ۸۵
- شکل ۴-۱۴-نمودار مقایسه مقاومت فشاری نمونه های خشک ۲۸ روزه اختلاط های M12 و M13..... ۸۶
- شکل ۴-۱۵-نمودار مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه اختلاط های ۱۲ و ۱۳ با جک Toni Technic..... ۸۷

- شکل ۴-۱۶- نمودار مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه اختلاط‌های M14 و M15..... ۸۸
- شکل ۴-۱۷- نمودار مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه اختلاط‌های M14 و M15..... ۸۸
- شکل ۴-۱۸- نمودار مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های ۹۰ روزه اختلاط‌های M14 و M15..... ۸۹
- شکل ۴-۱۹- نمودار مقایسه ۴ نمونه از لحاظ زمان گیرش خمیر سیمان..... ۹۲
- شکل ۴-۲۰- نمودار مقایسه میانگین ۴ نمونه آزمون سوزن ویکات..... ۹۴
- شکل ۴-۲۱- نمودار مقایسه میانگین نتایج آزمون سوزن ویکات توسعه یافته نمونه‌های فوم بتن..... ۹۷
- شکل ۴-۲۲- نمودار مقایسه نتایج آزمون جمع‌شدگی تکرارهای M3 الی M8..... ۹۸
- شکل ۴-۲۳- نمودار مقایسه نتایج آزمون جمع‌شدگی اختلاط‌های M12 و M13..... ۹۹
- شکل ۴-۲۴- نمودار مقایسه نتایج آزمون جمع‌شدگی اختلاط‌های M14 و M15..... ۹۹
- شکل ۴-۲۵- نمودار مقایسه میانگین کل نتایج آزمون جمع‌شدگی..... ۱۰۱
- شکل ۴-۲۶- نمونه‌های گسیخته شده تحت آزمون مقاومت خمشی..... ۱۰۶
- شکل ۴-۲۷- گسیختگی نمونه فوم بتن زیر دستگاه مقاومت خمشی..... ۱۰۷
- شکل ۴-۲۸- نمودار مقایسه‌ی مقاومت خمشی بین نمونه‌های میناب و آب معمولی..... ۱۰۷
- شکل ۴-۲۹- نمودار مقایسه‌ی مقاومت کششی بین نمونه‌های میناب و آب معمولی..... ۱۰۹



فصل اول

# کلیات

جهان امروز بر خلاف دنیای دیروز که تمام توجه‌اش به صنایعی چون نفت و انرژی بود، به سمت فناوری اطلاعات، مواد جدید، بیوتکنولوژی، نانوتکنولوژی و الکترونیک گرایش پیدا کرده است. با توجه به اینکه عمر صنایعی چون نفت روزی به پایان می‌رسد سرمایه‌گذاری در بخش علم و فناوری توجیه‌کننده‌ای پیدا می‌کند. امروزه نانوتکنولوژی و درک قابلیت‌های عظیم این فناوری متحول‌کننده، موجب سازماندهی و تدوین برنامه‌های ملی فراوانی در بسیاری از کشورهای جهان شده است. تدوین این برنامه‌ها عمدتاً به منظور بهره‌گیری هر چه بیشتر از قابلیت‌های نانوتکنولوژی و عقب‌نماندن کشورها از مسیر تحولات سریع و دستاوردهای رو به رشد این فناوری صورت پذیرفته است. این علم با کنترل مواد در مقیاس مولکولی، گشایش اسرار طبیعت در تمام عرصه‌ها از مهندسی تا پزشکی را نوید می‌دهد امکان تهیه مصالح مناسب و با ویژگی‌های مورد نظر در بخش‌های مختلف ساختمان نقش بسزائی خواهد داشت. [مجاورپان، ۱۳۹۵]

موضوعات و مواد مختلفی درباره نانو وجود دارد از قبیل: نانولوله‌ها، شبیه‌سازی مولکولی، نانوداروها، سلول‌های سوختی، کاتالیزورها، نانوذرات و...

امکان سنتز بلوک‌های ساختمانی نانو با اندازه و ترکیب به دقت کنترل شده و سپس چیدن آنها در ساختارهای بزرگتر، که دارای خواص و کارکرد منحصر به فرد باشند، انقلابی در مواد و فرآیندهای تولید آنها ایجاد می‌کند. محققین قادر به ایجاد ساختارهایی از مواد خواهند شد که در طبیعت نبوده و شیمی مرسوم، نیز قادر به ایجادشان نبوده است. برخی از مزایای نانوساختارها عبارتست از: مواد سبک‌تر، سخت‌تر و قابل برنامه‌ریزی؛ کاهش هزینه عمر کاری از طریق کاهش دفعات نقص فنی؛ ابزارهایی نوین بر پایه اصول و معماری جدید؛ به‌کارگیری کارخانجات مولکولی یا خوشه‌ای که مزیت مونتاژ مواد در سطح نانو را دارند. [عباسی، ۱۳۹۵]

در این پژوهش از آب حاوی میکرو نانو حباب های هوا استفاده شده است؛ میکرو نانو حباب های هوا حفره های گازی بسیار ریز پایدار در آب هستند که امروزه به طرق مختلف قابل تولید و استفاده هستند. بهره گیری از روش کاویتاسیون هیدرودینامیکی ایده ای است که در این پژوهش به کارگیری شد. لازمه ای ایجاد کاویتاسیون، جریان با سرعت زیاد است که توسط پمپ ها می تواند ایجاد شود؛ پمپ ها سرعت مایعات را افزایش می دهند و وقتی سرعت یک جسم متحرک در آب افزایش یابد، طبق اصل برنولی، فشار کاهش می یابد به قدری که بصورت لحظه ای فشار در یک نقطه از مایع، به فشار زیر بخار مایع تنزل می کند.

دستگاه میکرو نانو حباب ساز از سه بخش عمده ورود هوا (گاز)، اعمال فشار بر مخلوط هوا و آب و منطقه کاهش یا افت فشار و آزادسازی بخشی از هوای حل شده تشکیل شده است. هدف از ورود هوا در این دستگاه، افزایش حلالیت میزان هوای حل شده در آب به منظور افزایش کارایی پدیده کاویتاسیون و تولید حباب می باشد. بنابراین، برخلاف سایر دستگاه ها، گاز یا هوا در این دستگاه قبل از پمپ، تزریق شده است. ویژگی طراحی و ساخت این دستگاه به نحوی است که به راحتی امکان استفاده از چندین مولد هیدرودینامیکی میکرو نانو حباب با قطر گلوگاه های مختلف بطور همزمان وجود دارد، که در این دستگاه از پنج مولد استفاده شده است، از ویژگی های منحصر به فرد میکرو نانو حباب ها می توان به پایداری آن ها تا چندین ماه در آب اشاره نمود. [مظفری نائینی، ۱۳۹۲]

دستگاه میکرو نانو حباب ساز بر پایه ی پدیده کاویتاسیون هیدرودینامیکی در شرکت نو فناوران میناب طوس طراحی و ساخته شده است. آب حاوی میکرو نانو حباب های هوا از محل این شرکت در مشهد تهیه گردید و آزمایشات این پژوهش در کارخانه ی شرکت بتن سبک آراتا صورت گرفت.

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، یکی از جنبه‌های اصلی نانو تکنولوژی ماهیت میان رشته‌ای آن است. تعامل این فناوری با دانش ساخت بتن می‌تواند نقطه عطفی در صنعت ساخت و ساز ایجاد کند. هدف نهایی از بررسی بتن در مقیاس نانو، یافتن نسلی جدید از مصالح ساختمانی با عملکردهای بالا و با خواصی جدید و متفاوت نسبت به خواص مصالح معمولی است. [مجاوریان، ۱۳۹۵]

بلوک فوم بتن عضوی از خانواده بتن سبک است که نام دیگر آن بتن سبک سلولی یا <sup>۱</sup>CLC است. مطابق تعریف استاندارد ملی ایران به شماره ۱۴۷۴۸، بتن سلولی عبارتست از بتن دارای سلول‌های پایدار هوا که به‌طور یکنواخت در مخلوط بتن توزیع شده‌اند. برای تولید این بتن از ملات ماسه، سیمان و کف فوم پایدار (از نوع پروتئین حیوانی و شیمیایی) و افزودنی‌های مجاز استفاده می‌گردد.

به صورت کلی محصولات بتنی از سه نوع مصالح سنگدانه، آب و سیمان تشکیل شده است که میزان استفاده از هر یک از این مصالح با توجه به نوع بتن مورد نیاز مشخص می‌شود. سیمان در بتن تر نقش چسبانندگی را دارد و در بتن سخت حدود نیمی از مقاومت فشاری بتن را با در کنار هم‌نگه‌داشتن سنگدانه‌ها تأمین می‌کند. سنگدانه‌ها نیز در بتن تر نقش حجم‌دهنده را دارند و در بتن سخت وظیفه‌ی تأمین نیمی از مقاومت فشاری را بر عهده دارند. آب در مراحل ساخت بتن وظیفه‌ی ایجاد روانی را بر عهده دارد و در طول فرآیند هیدراتاسیون بتن با یک واکنش شیمیایی سیمان را به ماده‌ای سخت تبدیل کرده تا سنگدانه‌ها به وسیله‌ی ماتریس سیمانی در کنار هم قرار گیرند. امروزه با استفاده از مواد پوزولانی و افزودنی‌های بتن این تعاریف کمی دچار تغییر شده‌اند، لیکن مفاهیم اصلی ذکر شده همچنان صحت دارند. [زند، ۱۳۹۲]

فوم بتن، که پیش‌تر درباره‌ی آن گفته شد، نوعی از بتن است که در آن نقش سنگدانه‌ها به یک کف پایدار سپرده شده است. در فناوری امروزه این کف پس از پژوهش‌های زیاد توسط محققین به کف پایداری

---

<sup>۱</sup> Cellular Light Weight Concrete



تبدیل شده است؛ با توجه به این که ماهیت این ماده فاقد هرگونه مقاومت برشی است، نمی‌تواند هم‌چون سنگدانه نقشی مقاومتی را در بتن سخت بازی کند. بنابراین مقاومت فشاری فوم بتن تنها توسط ماتریس سیمانی که در میان حفرات کف ایجاد شده تأمین می‌شود. لذا فوم بتن را نمی‌توان به‌عنوان یک مصالح سازه‌ای (باربر) شناخت و از این روست که بیشتر خاصیت پرکنندگی آن مورد توجه قرار گرفته است. [زند، ۱۳۹۲]

فوم بتن، بتنی است با کاربری بالا در صنعت ساختمان‌سازی که می‌توان با رعایت اصول تولیدی و به‌کارگیری مناسب، از آن در انواع پروژه‌های ساختمانی استفاده نمود. این بتن برای اولین بار در کشور سوئد، ابداع و اختراع شد و امروزه در بیشتر کشورها مورد استفاده قرار می‌گیرد. که علاوه بر داشتن خواص بتن معمولی در حد مطلوب، دارای ویژگی‌های دیگری نظیر وزن مخصوص کم و مقاومت فشاری مطلوب نیز می‌باشد. [قربانی، ۱۳۹۴]

عموماً از فوم بتن با چگالی‌های پایین در کف‌ریزی طبقات ساختمان‌ها بهره گرفته می‌شود که روش نوینی است که اخیراً به‌جای پوک‌ریزی استفاده می‌شود و به‌علت اقتصادی بودن نسبت به روش قدیمی و هم‌چنین استحکام بهتر و عایق بودن نسبت به پوک‌ریزی، روند رو به رشدی را در بازار پیش رو دارد. اما چگالی‌های بالاتر به علت بهتر بودن مکانیزم عملکردی، در ساخت بلوک تیغه‌بندی کاربرد دارد. تمرکز پژوهش حال حاضر روی بلوک تیغه‌بندی به علت اهمیت بیشتر آن است.

## ۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

این محصول نتوانسته آن‌چنان که شاید، تقاضای کارفرمایان چه از لحاظ اقتصادی و چه از لحاظ ویژگی‌های مکانیکی را پاسخ‌گو باشد؛ مهم‌ترین دلیل ضعف صرفه اقتصادی برای پیمانکاران می‌تواند به مصرف بالای سیمان در این محصول اشاره کرد زیرا به علت نبود سنگدانه در فوم بتن و از طرفی بیشتر بودن سطح

ویژه و تعداد حباب‌های کف فوم نسبت به سنگدانه، سیمان بیشتری مصرف می‌شود و از جمله دلایل کافی نبودن خصوصیات مکانیکی می‌توان به عواملی از جمله:

الف) زمان فرآوری طولانی که باعث عقب ماندن پروژه می‌شود.

ب) جمع‌شدگی، که باعث افت سطح بتن در بخش کف‌ریزی و ایجاد ترک در دیوار در بخش بلوک می‌شود.

ج) پایین بودن مقاومت فشاری؛ چرا که نبود سنگدانه در این نوع بتن مقاومت را بسیار کم می‌کند.

لذا این پژوهش بر آن است که با جایگزین کردن فناوری آب میکرونانو حباب‌دار به جای آب معمولی، که تجربه‌ی موفق‌تری در بتن داشته است، به این سوال پاسخ دهد که آیا این گزینه می‌تواند هم از لحاظ اقتصادی باعث کاهش مصرف میزان سیمان و هم از لحاظ خصوصیات مکانیکی باعث کاهش زمان فرآوری، کاهش آبرفتگی و افزایش مقاومت‌های فشاری، خمشی و کششی در فوم بتن شود یا خیر؟

### ۱-۳-زمینه نوآوری

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد فوم بتن به نسبت دیگر مصالح ساختمانی جدیدتر است و با آن که ضعف‌هایی دارد اما از محبوبیت نسبی خوبی در بین کارفرمایانی که تجربه‌ی استفاده از این محصول را دارند برخوردار است. لذا برای ارتقای کیفیت این محصول تحقیقات بروی آن کماکان در حال انجام است و از طرفی میکرونانو حباب، یک فناوری نوپا و کمتر استفاده شده و در عین حال قابل دسترس و دارای هزینه تولید پایین است.

لذا امید است ترکیب فوم بتن و میکرونانو حباب محصولی نو را ارائه کند که بتواند انتظارات صنعتگران

ساختمانی را در این بخش تا حدودی برآورده نماید.

## فصل دوم

# مروری بر تحقیقات گذشته

در ابتدای این فصل مروری بر تحقیقات مشابه (استفاده از نانوذرات) که روی بتن و فوم بتن انجام شده را خواهیم داشت. سپس بصورت مفصل درباره‌ی میکرونانوحباب و شاخص‌های آن بحث خواهد شد.

## ۲-۱- پیشینه تحقیق

### ۲-۱-۱- میکرونانو حباب در بتن

عارفی و همکاران در این پژوهش تاثیر میکرو-نانو حباب‌های هوا بر ویژگی‌های مکانیکی بتن را مورد آزمایش قرار دادند. برای ساخت بتن از طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان ۰,۶ استفاده گردید. در کلیه آزمایشات از نمونه‌های سه تایی استفاده گردید و هر آزمایش حداقل دوبار انجام شد تا از تکرار پذیری آن اطمینان حاصل شود. طبق آزمایشات انجام شده، میکرونانوحباب‌های هوا در بتن باعث افزایش مقاومت فشاری به میزان ۱۹ درصد، مقاومت کششی به مقدار ۱۶ درصد در بتن می‌شود. دمای هیدراسیون و زمان گیرش اولیه و نهایی ترکیب سیمان با آب حاوی MNB<sup>۱</sup> نیز کاهش می‌یابد. از دیگر ویژگی‌های بتن حاوی MNB می‌توان به اسلامپ و روانی کمتر نسبت به بتن معمولی اشاره کرد. طبق نتایج بدست آمده از این پژوهش، رفتار بتن حاوی MNB مشابه بتن دارای دیگر نانو ذرات می‌باشد و شباهتی به بتن هوادار ساخته شده با مواد افزودنی حباب زا ندارد. [Arefi et al, 2016]

### ۲-۱-۲- نانو اکسید سیلیس<sup>۲</sup> در بتن

پژوهش‌گری به نام پرادش دریافت که با استفاده از نانوذرات سیلیس می‌توان میزان تراکم ذرات را در بتن افزایش داده که این امر به افزایش چگالی میکرو و نانو ساختارهای تشکیل دهنده بتن و در نتیجه بهبود ویژگی‌های مکانیکی می‌انجامد. [Pradesh, 2012]

---

<sup>۱</sup> Micro Nano Bubble

<sup>۲</sup> Nano-SiO<sub>2</sub>

سوبولف با انجام آزمایشات روی بتن حاوی نانو سیلیس، افزایش مقاومت فشاری و خمشی را نتیجه گرفته است. این آزمایشات نشان داد که مقاومت ملات حاوی نانو سیلیس از ملات حاوی گرد سیلیس نیز بیشتر است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی ( $SEM^1$ ) نشان داد که نانو ذرات اکسید سیلیس منافذ را پر می کنند و همچنین باعث کاهش مقدار کلسیم هیدروکسید<sup>۲</sup> در محصولات هیدراتاسیون می شوند. این اثرات باعث بهبود خواص مکانیکی ملات سیمان توسط نانو ماده می شود. [Sobolev,2008]

مطالعات انجام شده نشان می دهد که نانو اکسید سیلیس در بتن معمولی باعث افزایش مقاومت فشاری، مقاومت خمشی [Boshehrian and Hosseini,2013] و مقاومت کششی [Khanzadi,2010] خصوصاً در اولین روزهای عمر بتن می گردد و روانی بتن را کاهش می دهد. [Abd El-Bakey,2013]

## ۲-۱-۳- نانولوله های کربنی<sup>۳</sup> در بتن

نانو لوله های کربنی استوانه های تو خالی از تک ورقه های گرافیتی هستند که به شکل استوانه پیچیده شده اند این مواد دارای خواص ساختاری و مکانیکی و الکترونیکی فوق العاده ای هستند که ناشی از خواص ویژه پیوندهای کربن و تقارن استوانه ای آنهاست. خواص ویژه ای آنها طیف گسترده ای را در بر می گیرد از استحکام فوق العاده زیادشان تا رفتار غیر معمول الکتریکی، هدایت حرارتی بالا، قابلیت ذخیره و نگهداری ذرات نانویی تیوبها اشاره کرد. بتن حاوی نانولوله های کربنی در مقاوم سازی، بهسازی و ترمیم سازه های بتنی کاربرد دارد [کالوندی، ۱۳۸۷].

تحقیقات گسترده ای در خصوص کاربردهای نانولوله های کربنی در حال انجام است و تاکنون خواص قابل ملاحظه ای از آنها کشف شده است؛ برای مثال باوجود اینکه چگالی آنها یک ششم چگالی فولاد است، مدول الاستیسیته آنها ۵ برابر و استحکام آنها تا ۸ برابر فولاد می رسد. در صورت افزودن نانو لوله های کربنی

<sup>۱</sup> Scanning electron microscope

<sup>۲</sup>  $Ca(OH)_2$

<sup>۳</sup> Carbon nano tubes

به میزان ۰,۵ الی ۱ درصد وزنی ملات بتن به آن خواص نمونه‌ها به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. نانولوله‌های کربنی به صورت‌های تک جداره و یا چندجداره مورد استفاده قرار می‌گیرند. [Pradesh,2012]

#### ۲-۱-۴- نانو اکسید آلومینیوم<sup>۱</sup> در بتن

اضافه کردن نانو اکسید آلومینیوم باعث بهبود مقاومت کششی و مقاومت خمشی بتن می‌گردد. آزمایشات با درصد‌های ۰,۵٪، ۱٪، ۱,۵٪، و ۲٪ نانو اکسید آلومینیوم و با اندازه متوسط ذرات حدود ۱۵ نانو متر انجام شد. بالاترین میزان مقاومت کششی در ۱ درصد و بالاترین مقاومت خمشی در ۲ درصد نانو اکسید آلومینیوم رخ داد [Nazari et al,2010].

#### ۲-۱-۵- نانو اکسید آهن<sup>۲</sup> در بتن

بتن دارای نانو ذرات آهن، مقاومت فشاری و کششی بیشتری نسبت به بتن معمولی دارد. طبق پژوهش‌های انجام شده توسط عبدلی یزدی و همکاران، درصد بهینه مصرف نانو ذرات آهن در بتن ۳٪ است، در صورتی که با افزایش درصد نانو آهن تا ۵٪، مقاومت بتن بصورت خفیف کاهش می‌یابد. با اضافه کردن نانو اکسید آهن میزان افزایش مقاومت فشاری نسبت به مقاومت کششی بیشتر است، دلیل این پدیده نیز وجود میکروترک‌هایی در بتن است که این ترک‌ها در مقاومت کششی تاثیر بیشتری دارند.

[ Abdoli Yazdi et al,2011]

طبق آزمایشات نظری و همکاران، به کارگیری حداکثر ۲ درصد نانو اکسید آهن در بتن باعث کاهش زمان گیرش اولیه و نهایی بتن و افزایش مقاومت کششی و خمشی آن می‌گردد. درصد بهینه برای افزایش مقاومت کششی ۱٪ است که بیشترین مقاومت را باعث می‌شود ولی مقاومت خمشی با افزایش درصد نانو اکسید

---

<sup>۱</sup> Nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

<sup>۲</sup> Nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

آهن، افزایش می‌یابد. افزایش مقاومت خمشی به دلیل مصرف سریع کلسیم هیدروکسید<sup>۱</sup> که در طی هیدراتاسیون سیمان پرتلند شکل گرفته است [Nazari et al, 2010].

## ۲-۱-۶- نانو اکسید تیتانیوم<sup>۲</sup> در بتن

از نانو اکسید تیتانیوم برای تولید بتن خود تمیز شونده استفاده می‌گردد که کمک زیادی به تمیزی و زیبایی محیط می‌کند. بتن خود تمیز شونده امروز برای استفاده در نمای ساختمان‌ها و سنگ‌فرش معابر در اروپا و ژاپن مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر این ویژگی، مطالعات اخیر نشان داده است که بتن دارای نانو اکسید تیتانیوم، مقاومت فشاری، خمشی و سایشی بیشتری نسبت به بتن معمولی برخوردار است و همچنین سرعت هیدراتاسیون سیمان را در سنین اولیه افزایش می‌دهد [Salemi et al, 2014]. طبق مطالعات انجام شده، استفاده از نانو اکسید تیتانیوم تا حداکثر ۲٪ باعث کاهش روانی بتن می‌گردد.

[Nazari et al, 2010]

درباره فوم بتن و نانو ذرات تحقیقاتی صورت پذیرفته است که در ذیل به آن می‌پردازیم:

## ۲-۱-۷- نانو اکسید سیلیس در فوم بتن

وقتی که مقداری از نانو ذرات سیلیس به صورت یکنواخت در ملات سیمان پخش شود نانو ذرات به عنوان یک هسته به طور محکم به سیمان هیدراته شده چسبیده و به علت فعالیت شدید، زمان هیدراتاسیون سیمان را سرعت می‌بخشند و این مساله برای مقاومت ملات سیمان مطلوب می‌باشد. استفاده از درصد کمی از نانو سیلیس در بتن سبک، موجب افزایش چشم‌گیری در مقاومت فشاری می‌گردد (حداقل ۲۴ درصد افزایش مقاومت فشاری)، در واقع استفاده از این ماده در بتن سبک، موجب بهبود ریزساختار آن و کاهش اندازه تخلخل‌ها می‌گردد که این مساله منجر به کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت در برابر مواد مهاجم

<sup>۱</sup> Ca(OH)<sub>2</sub>

<sup>۲</sup> Nano-TiO<sub>2</sub>

مانند یون کلر و خطر کربناسیون می‌شود و به نوبه خود به دوام بتن سبک نیز کمک می‌کند. آزمایشات در مکعب‌های  $10*10*10$  و در سنین ۷ و ۲۸ روزه و در چهار دسته بندی صفر، ۲،۵، ۵ و ۷ درصد نانو سلیس انجام شد. بیشترین افزایش مقاومت فشاری در ۷ درصد رخ داد. [زاهی، ۱۳۹۰]

## ۲-۱-۸- نانولوله‌های کربنی در فوم بتن

در یک نانولوله‌ی کربنی، اتم‌های کربن در ساختاری استوانه‌ای آرایش یافته‌اند. یعنی یک لوله‌ی توخالی که جنس دیواره‌اش از اتم‌های کربن است. آرایش اتم‌های کربن در دیواره‌ی این ساختار استوانه‌ای، دقیقاً مشابه آرایش کربن در صفحات گرافیت است. در گرافیت، شش ضلعی‌های منظم کربنی در کنار یکدیگر صفحات گرافیت را می‌سازند. این صفحات کربنی بر روی یکدیگر انباشته می‌شوند و هر لایه از طریق پیوندهای ضعیف واندروالس به لایه زیرین متصل می‌شود. هنگامی که صفحات گرافیت در هم پیچیده می‌شوند، نانولوله‌های کربنی را تشکیل می‌دهند. در واقع، نانولوله‌ی کربنی، گرافیتی است که به شکل لوله در آمده باشد.

معمولاً سه روش اصلی برای اضافه کردن یکنواخت نانولوله‌های کربنی به بتن وجود دارد:

اضافه کردن آن به سیمان، اضافه کردن به آب و اضافه کردن به مخلوط.

از نانولوله‌های کربنی در بتن استفاده‌هایی همچون ترمیم و بهسازی طرح اختلاط می‌شود. استفاده از این ماده در تولید سیمان باعث می‌شود تا مقاومت‌های کششی و فشاری بتن سبک تولیدی از سیمان جدید بهتر شود.

استفاده از این نانو ماده در سیمان مورد استفاده در بتن سبک غیر اتوکلاو، منتج به کاهش ضریب انتقال حرارتی به مقدار (۱۲-۲۰ درصد) و افزایش مقاومت فشاری به اندازه‌ی بیش از ۷۰ درصد شد. نانولوله‌های کربنی به عنوان یک تقویت کننده با استحکام بالا در مواد هیدراتی، ترکیبی برای بهبود خواص

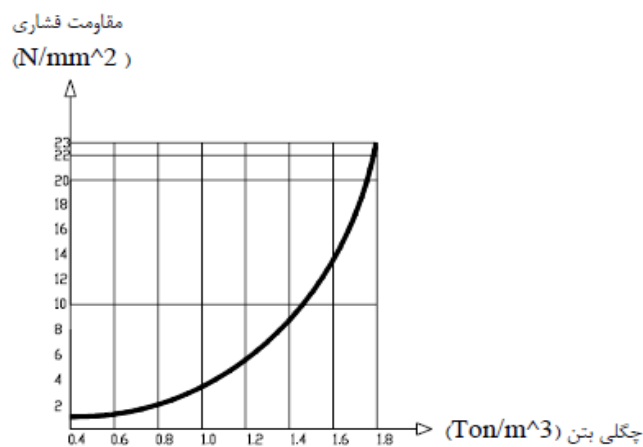


فیزیکی و مکانیکی بتن فوم سیمانی غیر اوتوکلاو مورد استفاده قرار گرفته است. اندازه نمونه‌ها مکعب ۱۰ سانتی‌متری و چگالی آن‌ها  $0,086 \text{ g/cm}^3$  بوده است [Yakovlev,2006].

## ۹-۱-۲- تاثیرات افزودنی‌ها به فوم بتن

طول مدت گیرش فوم‌بتن در قالب و در صورت استفاده از سیمان تیپ ۱ و بدون استفاده از زودگیرکننده‌ها در حدود ۸-۱۲ ساعت است که با استفاده از مواد افزودنی می‌توان طول مدت را کاهش داد. همچنین مقاومت فوم بتن را می‌توان با تغییر نوع سیمان از سیمان تیپ ۱ تا سیمان تیپ ۵ افزایش

داد، بطوری‌که تغییر مقاومت از سیمان نوع ۱ تا نوع ۴ در حدود  $8 \frac{N}{mm^2}$  می‌باشد که به مقاومت  $30,4 \frac{N}{mm^2}$  می‌رسد. همچنین با افزودن فوق‌روان‌کننده‌ها که با کاهش آب بتن همراه است می‌توان مقاومت بتن را با درصد مناسبی افزایش داد. همچنین می‌توان مقاومت بتن را با افزایش چگالی بالا برد و این در صورتی است که از فوم کمتری استفاده گردد (شکل ۲-۱). [قربانی، ۱۳۹۴]



شکل ۲-۱- تغییرات چگالی مقاومت فوم بتن

## ۲-۱-۱۰-مقایسه‌ی آجر و بلوک clc

کریشنا بهاوانی در سال ۲۰۱۲ مقایسه‌ای بین بلوک‌های بتن سبک و آجر معمولی را در جدول زیر ارائه داد. طرح اختلاط بلوک از استاندارد هند بهره گرفته شده و فوم از نوع پروتئینه می‌باشد.

[KrishnaBhavani, 2012]

جدول ۱-۲- مقایسه آجر رسی و بلوک فوم بتن- برگرفته از کریشنا بهاوانی

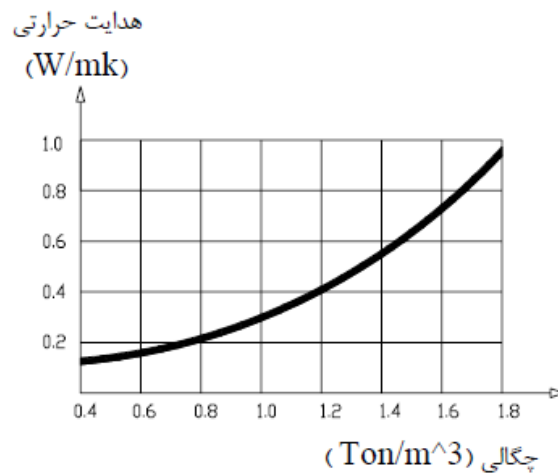
شماره	مشخصه	بلوک clc	آجر رسی
۱	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	۸۰۰	۱۹۰۰
۲	مقاومت فشاری ( $\text{kg/m}^2$ )	۳۵	۳۰
۳	هدایت حرارتی ( $\text{w/m.k}$ )	۰,۱۳۲-۰,۱۵۱ برای چگالی ۸۰۰	۰,۱۸۴
۴	جذب آب (%)	۱۲,۵ درصد برای چگالی ۸۰۰	۲۰ درصد
۵	انقباض خشک	هیچ	هیچ
۶	آلودگی	هیچ	ایجاد دود ناشی از فرآوری
۷	انرژی مورد نیاز	هیچ	نیاز به انرژی زیاد
۸	ضایعات قابل استفاده	۳۳ درصد، خاکستر بادی می‌تواند استفاده شود.	استفاده از ماسه زیاد و هیچ تلفات قابل استفاده دیگر ندارد

## ۲-۱-۱۱-نسبت مقاومت خمشی و کششی به مقاومت فشاری

به نقل از نارایانان و رامامورثی، پژوهش‌گری به نام والور نسبت مقاومت کششی به فشاری بلوک فوم بتن را بین ۰,۱۵ تا ۰,۳۵ اعلام کرده است و پژوهشگری به نام لگاتسکی این نسبت را بین ۰,۱ تا ۰,۱۵ و نسبت مقاومت خمشی به فشاری را بین ۰,۲۲ تا ۰,۲۷ نتیجه گرفته است. [Narayanan & Ramamurthy, 2000]

## ۲-۱-۱۲- خواص فوم بتن:

**الف: پائین بودن ضریب هدایت حرارتی:** مقاومت در برابر حرارت بتن متناسب با چگالی بتن مصرفی می‌باشد و هر مقدار چگالی بتن افزایش یابد متناسب با آن مقاومت حرارتی بتن کاهش خواهد یافت ولی در هر صورت مقاومت حرارتی آن ۴ تا ۶ برابر بیشتر از آجر معمولی است (شکل ۲-۲). [قربانی، ۱۳۹۴]

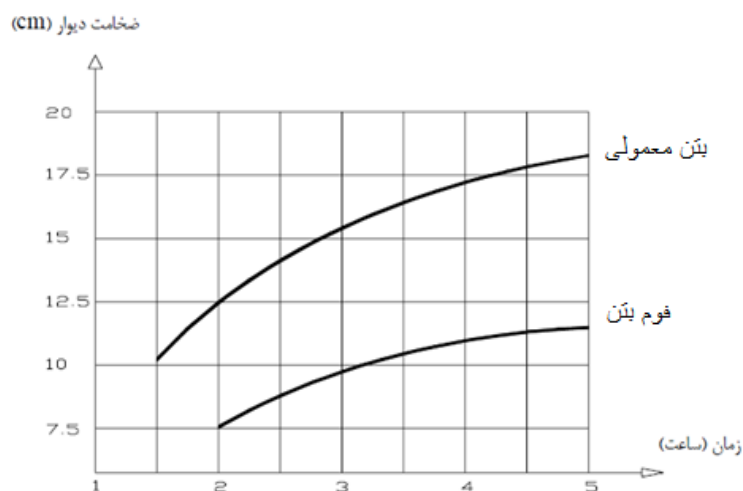


شکل ۲-۲- هدایت حرارتی فوم بتن در برابر چگالی

لازم به ذکر است فوم بتن به علت پائین بودن وزن مخصوص آن یک عایق موثر در مقابل گرما و سرما است. استفاده از این محصول به عنوان کف و هم جدارها، باعث صرفه‌جویی در استفاده از وسائل گرمایا و سرمازا می‌گردد.

## ب: مقاومت در برابر آتش

فوم بتن آتش‌گیر نمی‌باشد و با افزودن ضخامت قطعه می‌توان مقاومت آن را در برابر آتش تا حد زیادی افزایش داد. مقاومت فوم بتن در برابر آتش بیشتر از بتن معمولی بوده و دلیل آن خواص ویژه عایقی آن است (شکل ۲-۳). [قربانی، ۱۳۹۴]



شکل ۲-۳- مقاومت فوم بتن با چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و بتن معمولی در مقابل آتش در ارتباط با ضخامت (منحنی بالا نمایشگر عملکرد بتن معمولی و منحنی پایین نمایشگر عملکرد فوم بتن است).

**پ: جمع شدگی و تغییر حجم:** این خاصیت بتن نیز تابع چگالی بتن است و با افزایش چگالی مقدار کاهش حجم کمتر می شود که باید در طراحی و ساخت قطعات پیش ساخته این نکته مدنظر قرار گیرد.

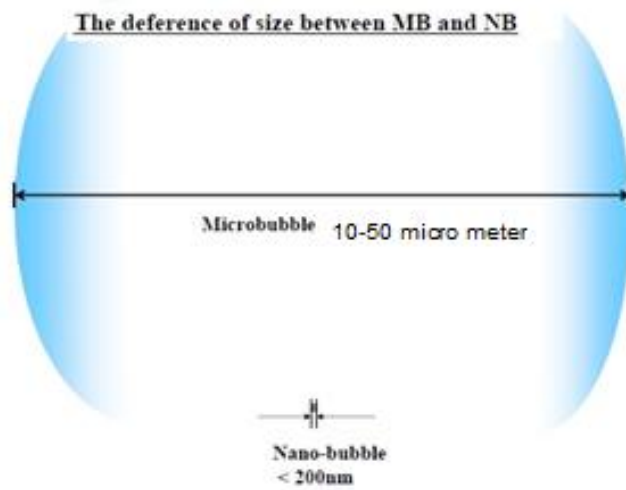
[قربانی، ۱۳۹۴]

## ۲-۲- میکرو-نانو حباب های هوا

### ۲-۲-۱- کلیاتی درباره میکرو-نانو حباب ها

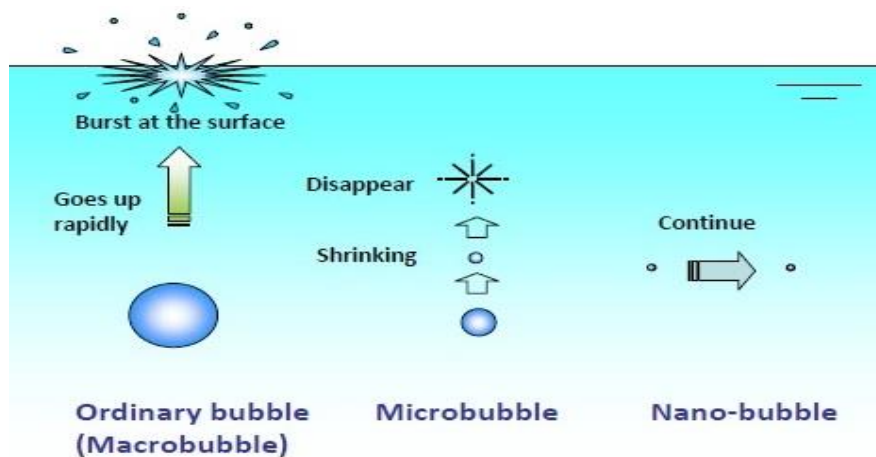
میکرو حباب ها و نانو حباب ها، حباب های بسیار کوچکی از هوا هستند که به وسیله آب احاطه شده اند و اندازه ی آن ها به ترتیب دارای ابعاد ۱۰ تا ۵۰ میکرومتر و کمتر از ۲۰۰ نانومتر می باشند (شکل ۲-۴).

میکرو حباب ها و نانو حباب ها هر یک رفتار منحصر به فردی از خود نشان می دهند؛ یک حباب معمولی (ماکرو حباب)، مسیری به سمت بالا را با سرعت زیاد طی می کند و پس از رسیدن به سطح آب متلاشی می شود (شکل ۲-۵).

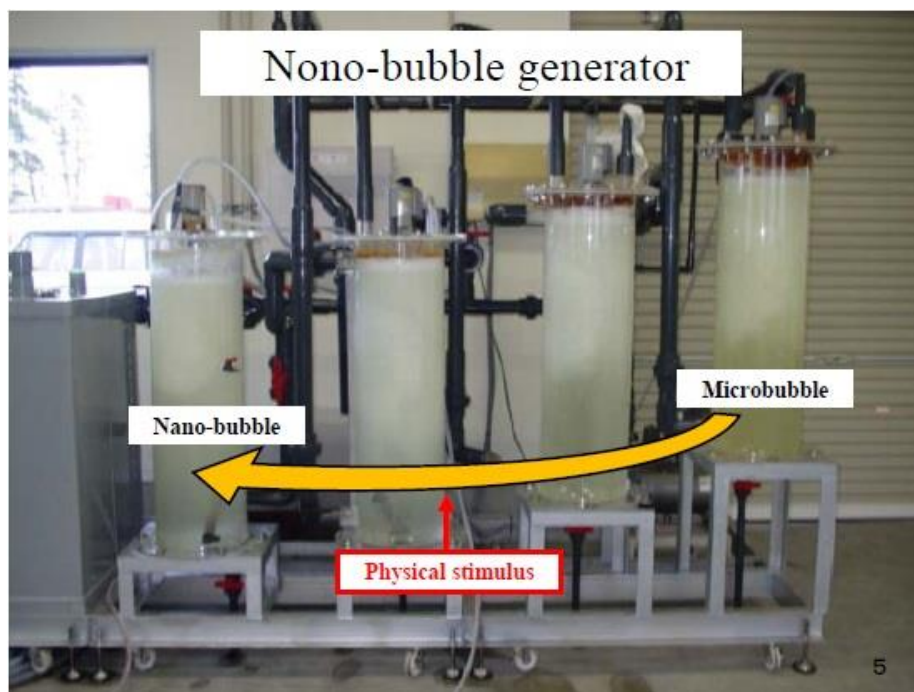


شکل ۲-۴: مقایسه اندازه‌ی میکرو و نانو حباب

در واقع میکرو-نانو حباب‌ها حفره‌های حاوی گاز در محلول آبی هستند. این نانو ذرات از طریق دستگاهی که اساس آن کاپیتاسیون هیدرودینامیکی است ساخته و تولید می‌شوند (شکل ۲-۶).



شکل ۲-۵: نمایش شماتیک نحوه‌ی پایداری میکرو و نانو حباب



شکل ۲-۶- دستگاه تولید نانوحباب

فرآیند هسته زایی در مایع سبب چرخش ذرات گاز در میدان داخلی هسته می‌شود که باعث ایجاد میدان الکترواستاتیکی به دور هسته می‌گردد و این میدان الکترواستاتیکی با ذرات باردار دور هسته که تشکیل لایه دوگانه را داده‌اند به طور مداوم در تبادل شار الکتریکی ثابتی هستند. این افزایش یا کاهش تبادل شار الکتریکی و همچنین افت پتانسیل شیمیایی هسته، باعث رشد یا انقباض هسته و به تبع آن بزرگتر یا کوچکتر شدن لایه‌ی دوگانه می‌گردد. بزرگ یا کوچک شدن لایه‌ی دوگانه باعث بزرگ یا کوچک شدن نیروی کشش سطحی می‌شود. به همین دلیل نانوحباب‌ها یا میکروحباب‌ها به کمک انتشار ذرات و متناسب با مقدار پتانسیل اطراف محلول و مقدار پتانسیلی که باعث فوق اشباع و یا زیر اشباع شدن شود، شروع به رشد کردن و یا کوچک شدن در طول زمان می‌کنند. [امظفری نائینی، ۱۳۹۲]

### ۲-۲-۲- دستگاه تولید میکرونانو حباب

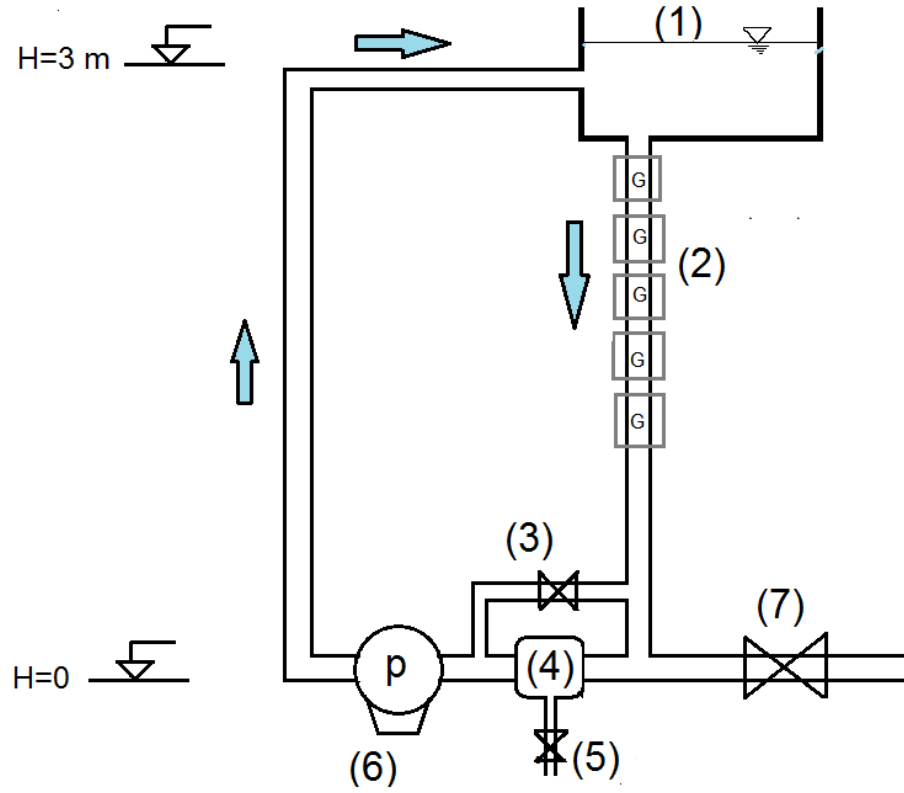
در این پژوهش، از دستگاه تولید میکرونانو حباب بر مبنای فرآیند کاویتاسیون هیدرودینامیکی استفاده شد. این دستگاه از سه بخش اصلی تشکیل یافته است:

الف) منطقه افت فشار و افزایش سرعت      ب) ورودی گاز      ج) اعمال فشار بر سیال توسط پمپ

مطابق شکل ۲-۷ که شمای کلی پلان سیستم را نشان می‌دهد، سیال پایه از بالا و در ارتفاعی حدود ۳ متری وارد مخزن می‌شود سپس سیال از حفره‌ی موجود در کف مخزن بصورت ثقلی وارد لوله‌ای می‌شود که ۵ عدد مولد هیدرودینامیکی در لوله کارگذاری شده تا بر سرعت سیال افزوده شود؛ در نتیجه فشار کاهش می‌یابد و در قسمتی از لوله فشار منفی می‌شود و با بیشتر شدن سرعت، فشار از فشار بخار کمتر می‌شود که این امر باعث مکش هوا به داخل لوله می‌شود. هوا در این دستگاه دقیقاً در محل فشار منفی وارد و باعث افزایش کارایی پدیده کاویتاسیون و تولید میکرونانو حباب می‌باشد. با تنظیم شیر مکش هوا، می‌توان هوای لازم برای تشکیل حباب را ایجاد کرد. پس از آن که سیال از مولد اصلی MNB عبور کرد از طریق یک پمپ به مخزن ورودی برگشت داده می‌شود. این چرخه باعث ایجاد ذرات نانوی هوا در آب می‌شود. در چرخش بعد، حباب‌ها همراه سیال به مخزن برگشته و سپس به لوله مولد برمی‌گردند، که کاویتاسیون منجر به کوچک‌تر شدن ابعاد حباب‌ها شده و با انجام مکرر میکرو-نانوحباب بیشتر و با قطر کمتری تولید می‌شود. حال هرچقدر زمان بیشتری برای انجام فرآیند اختصاص داده شود تجمع میکرونانو حباب‌های هوا در سیال بیشتر خواهد شد. در این پژوهش متوسط زمانی برای ایجاد هر بار تولید میناب، ۲۰ دقیقه در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است ظرفیت تولیدی سیستم در هر بار ۱۰ لیتر است که طبیعتاً با افزایش ظرفیت مخزن ورودی سیال و از طرفی افزایش زمان پروسه تولید، می‌توان ظرفیت تولید میناب را افزایش داد.

\*گاز اصلی مورد استفاده جهت تولید میکرونانو حباب‌ها، هوا است.

\*برای سیال پایه نیز از آب لوله کشی شهری مشهود استفاده گردید.



شکل ۲-۷: شماتیک از دستگاه میکرونانو حباب، (۱) مخزن آب، (۲) عدد مولد نسل دو، شیر (۳) byPass، (۴) مولد MNB، (۵) شیر ورودی هوا، (۶) پمپ آب، (۷) شیر خروجی میناب.

### ۲-۲-۳- اصول کاویتاسیون هیدرودینامیکی

میکرو-نانوحباب‌های هوا ذراتی با بار سطحی منفی هستند که به روش‌های مختلفی تولید می‌شوند که یکی از این روش‌ها کاویتاسیون هیدرودینامیکی است. کاویتاسیون هیدرودینامیکی زمانی روی می‌دهد که به علت سرعت بالای جریان، فشار در یک نقطه از مایع، به‌طور لحظه‌ای، به زیر فشار بخار، کاهش یابد. کاویتاسیون هیدرودینامیکی به خوبی از طریق معادله‌ی برنولی توصیف شده است:

$$P + \frac{\rho U^2}{2} = C \text{ (const)} \quad (1 - 2)$$

که  $C$  روی یک خط جریان مقدار ثابتی است. در این رابطه  $U$  سرعت جریان آب در یک نقطه،  $P$  فشار و  $\rho$  چگالی مایع هستند. بازنویسی معادله به صورت زیر است:



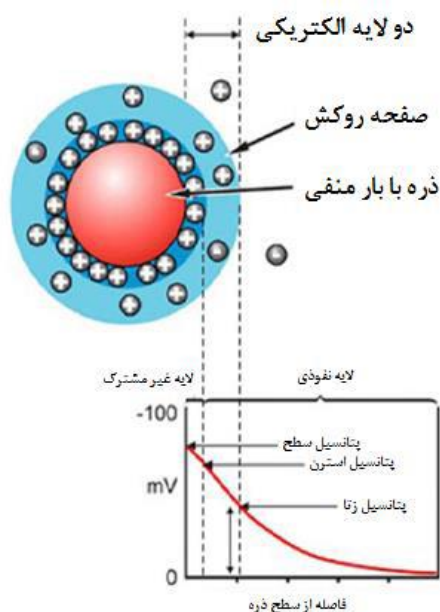
$$U^2 + \frac{2P}{\rho} = \frac{2C}{\rho} \quad (2-2)$$

این رابطه نشان می‌دهد هرگاه که سرعت جریان مایع بیش از  $\sqrt{\frac{2C}{\rho}}$  باشد فشار منفی خواهد بود.

برگرفته از: [مظفری نائینی، ۱۳۹۲]

## ۲-۲-۴- تئوری پتانسیل سطحی از نانو - میکرو حباب‌ها

پتانسیل زتا یک خاصیت فیزیکی ذرات خنثی است که در فصل مشترک با فاز جامد (جدایش فازی) با محلول‌های الکترولیتی بروز می‌کند. در شکل ۲-۸ یک ذره خنثی بطور شماتیک درون محلول نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود وجود این پدیده موجب ایجاد یک لایه دوگانه در اطراف ذره می‌گردد.



شکل ۲-۸: شماتیک حضور یک ذره خنثی در الکترولیت

پتانسیل الکتریکی حاصل از لایه دوگانه را پتانسیل الکتروسینتیکی یا پتانسیل زتا می‌گویند. این پتانسیل

تابع عواملی از قبیل اندازه و نوع ذرات، pH و سایر عوامل مؤثر بر دو لایه الکتریکی خواهد بود. عموماً

افزایش pH موجب کاهش پتانسیل زتا خواهد شد. نکته قابل تأمل اینکه هر ذره در pH های گوناگون رفتار منحصر به فردی از خود نشان می دهد. به طوری که نه تنها مقدار پتانسیل آن تغییر خواهد کرد، بلکه مثبت و منفی بودن آن نیز به راحتی قابل تغییر خواهد بود، به این ترتیب می توان با انتخاب درست pH رفتار و عکس العمل ذره را در محیط های گوناگون تحت کنترل قرار داد.

پتانسیل زتا به سطح هیدرودینامیکی نسبت داده می شود و بار سطحی برای سطح جامد-مایع تعریف می شود. هر چه پتانسیل زتا بیشتر باشد در نتیجه احتمال تشکیل دو لایه الکتریکی روی سطح ذره بیشتر می شود و تمایل برای لخته شدن و تجمع کم می شود و ذرات در شکل ریزتر باقی می ماند و تجمع نمی کنند. پتانسیل زتا، مقدار دافعه بین ذره مجاور را نشان می دهد. موقعی که زتا پایین می آید، جاذبه بر دافعه غلبه کرده و لخته تشکیل می شود، در حالی که ذرات با پتانسیل زتای بالا، از لحاظ الکتریکی پایدار هستند. طبق جدول ۲-۲ پتانسیل زتا، یکی از عوامل پیش بینی پایداری ذرات در حلال است.

جدول ۲-۲ - رفتار پایداری ذرات در بازه های پتانسیل زتای آن‌ها-برگرفته از مظفری نائینی

رفتار پایداری ذرات	پتانسیل زتا (mV)
سریع لخته می شوند	از ۰ تا $\pm 5$
ناپایدار	از $\pm 10$ تا $\pm 30$
پایداری متوسط	از $\pm 30$ تا $\pm 40$
پایداری خوب	از $\pm 40$ تا $\pm 60$
پایداری عالی	بیشتر از $\pm 61$

پتانسیل زتا به عنوان یک پتانسیل الکتریکی در پیرامون ذرات و همچنین سلول ها وجود دارد که تحقیقات زیادی در مورد این پتانسیل الکتریکی اطراف غشاء انجام شده است. سلول ها در محلول به علت وجود خاصیت های یونی، همچنین ترکیبات سازنده غشاء (مانند پروتئین ها، چربی ها و قندها) و پخش بار در سطح غشاء آن ها، دارای یک بار الکتریکی در سطح غشاء می باشند. گسترش بار در اطراف غشاء باعث تأثیر

برروی یون‌های مجاور شده که نتیجه‌ی آن افزایش غلظت تعداد یون‌ها (یون‌های با بار الکتریکی مخالف) در فاصله نزدیک غشاء می‌شود. بنابراین غشاء در محلول توسط یک لایه از یون‌های با بارمخالف محصور شده که آن را لایه ثابت می‌گویند. در قسمت بیرونی لایه ثابت، تعداد زیادی از یون‌ها با بارهای مختلف وجود دارد که باعث تشکیل یک لایه ابری شکل می‌شود. بنابر این دولایه الکتریکی در ناحیه ای که سطح غشاء در مجاورت محیط مایع اطراف آن وجود دارد، تشکیل می‌شود. این لایه دوگانه توسط دو قسمت شرح داده می‌شود:

۱. قسمت درونی: شامل یون‌هایی است که به صورت قوی با سطح خارجی غشاء اتصال پیدا کرده است.
  ۲. قسمت بیرونی یا ناحیه پراکنده که یون‌ها در آن قسمت در حالت تعادل یونی به سر می‌برند.
- پتانسیل موجود در این قسمت با افزایش فاصله از غشاء کاهش پیدا کرده، تا جایی که به صفر برسد. هنگامی که بر محیط مایع اطراف سلول میزان معینی ولتاژ اعمال شود سلول‌ها از طریق بار موجود در غشاء به سمت الکتروود با قطب مخالف بار غشاء حرکت می‌کنند. حرکت سلول‌ها به دلیل اثر ولتاژ خارجی بر روی لایه ثابت و همچنین به روی قسمتی از ناحیه پراکنده و قسمت بینابینی این دو ناحیه در سطح غشاء می‌باشد. این دو قسمت و قسمت بینابینی آن به shear plane معروف می‌باشد و بار الکتریکی موجود در این قسمت پتانسیل زتا نام دارد. پتانسیل زتا به عنوان قسمت کاربردی بار الکتریکی سطح غشاء عمل می‌کند. ماهیت محیطی که سلول در آن قرار دارد، میزان یون‌ها و pH محیط بر روی میزان پتانسیل زتا تأثیر می‌گذارد. بسیاری از مواد هنگام قرار گرفتن در مایعات و یا آب از خود درجات متفاوتی از پتانسیل زتا را نشان می‌دهند. همچنین مولکول‌های آبی که در مجاورت غشای سلولی وجود دارند تقریباً بی حرکت هستند و وجود آنها همراه با گروه‌های باردار در سطح غشاء باعث تأثیر در انتشار یون‌های متحرک می‌شود. سطح غشای سلول‌های ایزوله شده معمولاً دارای بار منفی است. بار موجود در دولایه الکتریکی آن با بار یون‌های مخالف محیط به تعادل می‌رسد. این پتانسیل ایجاد شده در چنین محیط استاتیکی به صورت

تصادفی با ایجاد فاصله از سطح غشاء کاهش می‌یابد. در صورتی که این سطح در طول محیط حرکت کند یک لایه نازکی از محیط همراه با مقداری از یون‌ها با این غشا حرکت می‌کنند. در نتیجه پتانسیلی در سطح غشاء به نام پتانسیل زتا ایجاد می‌شود که به وسیله روش‌های سینتیکی مثل الکتروفورز اندازه‌گیری می‌شود که مقدار آن چند میلی‌ولت کمتر از پتانسیل واقعی غشاء می‌باشد. در اغلب سلول‌ها این پتانسیل اندازه‌گیری شده بین ۱۰- تا ۲۰- میلی‌ولت است. در غشاهای سلولی، محیط‌های مایع خاص مجاور غشاء ممکن است بر روی فعالیت غشاء اثر بگذارند. در نتیجه غلظت یون‌های نزدیک در سطح غشاء ممکن است از کل یون‌های محیط متفاوت شوند.

برگرفته از: [مظفری نائینی، ۱۳۹۲]

## ۲-۲-۵- اثر برخورد ذره با حباب

یکی از دلایل شناوری پایین ذرات سیمان با آب، نرخ پایین فلوتاسیون ذرات به علت کم بازده بودن ذرات با برخورد به حباب‌های معمولی می‌باشد. برخورد یک ذره با حباب با توجه به شرایط هیدرودینامیکی محیط شناوری، در صورت نزدیک شدن به حد کافی اتفاق می‌افتد. آقای یون<sup>۱</sup> و همکار با استفاده از تابع جریان بدون بعد، معادله زیر را برای احتمال برخورد ذره حباب ارائه داده‌اند:

$$Pc = \left[ \frac{3}{2} + \frac{4Re^{0.72}}{15} \right] \left( \frac{Dp}{Db} \right)^2 \quad (۲ - ۳)$$

در این معادله که برای حباب‌های زیر ۱۰۰ میکرون کاربرد دارد،  $D_p$ ،  $D_b$  و  $Re$  به ترتیب قطر ذره، قطر حباب و عدد رینولدز می‌باشد. شایان ذکر است که استفاه از حباب‌های کوچک یا میکرو حباب‌ها به‌طور مستقل در فلوتاسیون دارای معایبی است که یکی از این معایب، نیروی بالابری کم آن‌ها است، که از انتخابی بودن فرآیند فلوتاسیون می‌کاهد [Yoon et al, 1989].

<sup>1</sup> Yoon

فصل سوم

# مواد و روش ها

### ۳-۱- طرح اختلاط و مصالح مصرفی

جدول ۳-۱، طرح اختلاط مورد استفاده را نشان می‌دهد. به علت مقایسه‌ای بودن نتایج فقط یک نوع عیار سیمان و ماسه در آزمایشات به کار گرفته شد. در ادامه به تفصیل هر بخش پرداخته می‌شود.

جدول ۳-۱- نسبت وزنی مواد بکاررفته در طرح اختلاط

مصالح	واحد	وزن در $1 \text{ m}^3$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
سیمان	kg	۳۵۰
پودرسنگ	kg	۳۰۰
آب به سیمان	kg	۰,۵ و ۰,۶

### ۳-۱-۱- سیمان

سیمان مورد استفاده، تیپ ۱ شماره ۳۲۵ بجنورد مطابق استاندارد ملی ایران به شماره ۳۸۹ که سیمان پرتلند معمولی و برای ساختن ملات و بتن بکار می‌رود. عیار سیمان  $350 \text{ kg}/\text{m}^3$  انتخاب شد. مشخصات سیمان مصرفی در جدول ۳-۲ آورده شده است:

جدول ۳-۲: مشخصات شیمیایی سیمان تیپ ۳۲۵-۱ بجنورد-برگرفته از تارنمای کارخانه سیمان بجنورد

Chemical Analysis	Result	Standard Limitation ISIRI 389
SiO <sub>2</sub> (%)	20.90	*
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4.16	*
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.72	*
CaO (%)	63.82	*
MgO (%)	1.94	Max 5
Na <sub>2</sub> O (%)	0.30	*
K <sub>2</sub> O (%)	0.60	*
SO <sub>2</sub> (%)	2.48	Max 3.00
Insoluble Residue (%)	0.52	Max 0.75
Loss on Ignition (%)	2.42	Max 3.00
Free Lime (F.CaO) (%)	1.2	*
Chloride (%)	0.023	*
Equivalent Alkalies (%) (0.65S*K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O)Optional	0.69	Max 0.60
Lime Saturation Factor (LSF)	94.29	*
Minerological Composition		
C <sub>3</sub> S , Tricalcium Silicate (%)	60.63	*
C <sub>2</sub> S , Dicalcium Silicate (%)	14.20	*
C <sub>3</sub> A , Tricalcium Aluminate (%)	4.73	*
2C <sub>3</sub> A + C <sub>4</sub> AF	20.78	*

### ۳-۱-۲- نسبت ماسه به سیمان

یکی از بزرگترین امتیازات فوم بتن قابلیت حصول چگالی‌های مختلف و به تبع آن تغییر در خواص و کاربردهای آن می‌باشد. این امر عمدتاً با کنترل نسبت ماسه به سیمان انجام می‌شود (جدول ۳-۳). معمولاً برای چگالی‌های پایین فوم بتن (در حد کمتر از ۶۰۰) از ماسه استفاده نمی‌شود. با افزایش چگالی مدنظر، ماسه نیز به مخلوط اضافه می‌شود و در چگالی‌های بالای ۹۰۰ معمولاً نسبت ماسه به سیمان بیشتر می‌شود. متناسب با چگالی فوم بتن، کاربردهای آن نیز تفاوت دارد. [صیامی، ۱۳۸۴]

جدول ۳-۳- کاربرد چگالی‌های مختلف بلوک‌های بتن سبک-برگرفته از صیامی

چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	مصالح	موارد مصرف
۶۰۰-۳۰۰	سیمان + کف	عایق حرارتی و صوتی در کفسازی طبقات
۹۰۰-۶۰۰	سیمان + کف + ماسه	بلوک‌ها و پنل‌های پیش‌ساخته، قطعات سقف کاذب، روکش‌های با خاصیت عایق صوتی و حرارتی، مناسب برای پرکردن‌های حجیم
۱۲۰۰-۹۰۰	سیمان + کف + ماسه	بلوک‌ها و پنل‌های در قسمت بیرونی ساختمان و قطعات نما
۱۶۰۰-۱۲۰۰	سیمان + کف + ماسه	مصارف سازه‌ای، پنل‌های پیش‌ساخته در مصارف صنعتی و تجاری، استفاده در انواع تیغه‌ها

در این پژوهش از پودرسنگ گوهر مشهد به عنوان ماسه استفاده شد و عیار آن در طرح اختلاط

$300 \text{ kg/m}^3$  انتخاب شد تا به صنعت بلوک‌سازی نزدیک باشد. اندازه ذرات پودر سنگ نیز ریز تر از ۱

میلی‌متر است.

### ۳-۱-۳- آب

به‌طور کلی هدف این پژوهش استفاده از دو نوع آب و مقایسه نتایج است. دو نوع آب عبارتست از:

الف: آب چاه‌های حومه شهر مشهد

ب: میکرونانو حباب که به اختصار میناب اطلاق می‌شود. (در ادامه بیشتر به آن پرداخته خواهد شد)

در فوم بتن از دو طریق آب به اختلاط اضافه می‌شود: اول، آب مستقیم که همان نسبت آب به سیمان است و مستقیماً به اختلاط اضافه می‌شود، دوم، آب موجود در کف فوم است که غیر مستقیم و از طریق افزودن کف به مخلوط سیمان، ماسه و آب اضافه می‌شود.

در صنعت، عموماً مقدار آب به سیمان حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد است؛ که مقدار آب جهت ساخت فوم (آب غیر مستقیم) این نسبت را افزایش می‌دهد. لازم به ذکر است چگالی نهایی پایین‌تر نیاز به افزایش فوم است که در این حالت می‌توان آب به سیمان را حتی از ۰,۴ نیز کمتر انتخاب کرد.

نکته مهم در این میان آن است که در صورت عدم استفاده از مقدار آب ناکافی، اختلاط میزان آب مورد نیاز برای افزایش کارایی از کف فوم جذب می‌کند که این امر موجب از بین رفتن کف و نامرغوب شدن محصول می‌شود.

در آزمایشات، دو نوع نسبت آب به سیمان ۰,۵ و ۰,۶ در نظر گرفته شد.

به‌علت آن که تمرکز آزمایشات بروی بلوک‌های ساختمانی است، هدف، رسیدن به چگالی خشک ۷۰۰

تا ۸۰۰ در نظر گرفته شد.

### ۳-۱-۴- کف مورد نیاز فوم بتن

برای تولید کف معمولاً از یک ماده کف‌زا استفاده می‌شود. این ماده ابتدا با آب رقیق شده و سپس

در محفظه‌ای به کمک فشار ناشی از کمپرس هوا یا در اثر هم زدن سریع، تبدیل به کفی می‌شود که در



آن حباب‌هایی با قطر در حد میلی‌متر و کمتر تولید شده‌اند. برای تولید کفی پایدار در ساختار داخلی ماده کف‌زا و یا به طور مستقل، یک ماده پایدار کننده کف استفاده می‌شود تا حباب‌های تولیدشده پایدار شوند. منظور از پایدار شدن حباب‌ها آن است که حباب‌ها در اثر جابه‌جایی و اختلاط، شکل خود را حفظ نمایند و اصطلاحاً کف ن خوابد. معمولاً کف پایدار حاصل، حالت خامه‌ای شکل دارد. (شکل ۳-۱) [صیامی، ۱۳۸۴]



شکل ۳-۱- کف خامه‌ای شکل حاصل از مایع فوم

طبق گزارش راهنمای بتن کفی مرکز تحقیقات، برای ایجاد کف، مواد عصاره کف را با نسبت‌های ۱ به

۵ تا ۱ به ۴۰ با آب رقیق می‌کنند. این مواد بطور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱. مواد بر پایه پروتئین حیوانی

۲. مواد بر پایه مواد آلی (سورفکتانتی)

حجم کف حاصل از مواد پروتئینی کمتر ولی پایدارتر از مواد شیمیایی است، جدول ۳-۴ چهار شاخصه و

میزان معمول هر کدام را نشان می‌دهد. [صیامی، ۱۳۸۴]

جدول ۳-۴- مقایسه فوم شیمیایی و پروتئینی-برگرفته از صیامی

چگالی بتن حاصل ( $\text{kg/m}^3$ )	پایداری	افزایش حجم کف	وزن مخصوص کف	نوع ماده فوم
بیشتر از ۱۰۰۰	کمتر از ۲ ساعت	۲۵ برابر حجم اولیه	۴۰ گرم در لیتر	شیمیایی
۵۰۰-۱۶۰۰	کمتر از ۴ ساعت	حدود ۱۳ برابر حجم اولیه	۸۰ گرم در لیتر	پروتئین حیوانی

علاوه بر این عمر نگهداری مواد پروتئینی کمتر از مواد شیمیایی است. لازم بر ذکر است که پایداری کف به اندازه‌ای باشد که بعد از فرآیند اختلاط کف با ملات ماسه سیمان تا زمان گیرش اولیه‌ی ترکیب، کف پایداری خود را حفظ کند چرا که غیر از این حالت، مقداری از حباب‌ها قبل از گیرش اولیه از هم می‌پاشد که نتیجه‌ی آن کاهش حجم نمونه و افزایش چگالی بتن می‌شود. [صیامی، ۱۳۸۴]

در آزمایشات از فوم شیمیایی آترین شیمی آذرداد استفاده شد و مایع فوم با نسبت ۴ درصد با آب رقیق شد و چگالی کف فوم روی عدد ۳۵-۴۰ gr/lit تنظیم شد. جدول زیر مشخصات مایع فوم مذکور را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۵- مشخصات مایع فوم آترین شیمی آذرداد

مشخصه	توضیحات
رنگ	زرد شفاف
چگالی در دمای ۲۰ °C	۱,۰۵ ± ۰,۰۱ gr/ml
pH	۶,۵-۸,۵
نقطه انجماد	-۱۰ °C
رسوب	۰
انبساط (V/V)	کمتر از ۰,۲ درصد
کشش سطحی	کمتر از ۱۷,۵ dynes/cm
ویسکوزیته	کمتر از ۲۰ mPas

### ۳-۲- سیستم تولید فوم بتن

همان‌طور که در شکل ۳-۲ نشان داده شده برای تولید فوم بتن به مراحل و تجهیزات مختلف نیاز است که در ادامه به سه مورد آن که در پژوهش هم استفاده شد می‌پردازیم. لازم به ذکر است که در کاربری فوم بتن برای کفریزی طبقات، تجهیزات دیگری نیز نیاز است که خارج از بحث پژوهش است.



شکل ۳-۲- نمایش شماتیک چگونگی تولید فوم بتن

### ۳-۲-۱- مخلوط کننده

در این محفظه مصالح با هم مخلوط شده و محصول نهایی فرآوری می‌شود. شکل ۳-۳ محل قرارگیری میکسر مشخص است. میکسرها در انواع مختلف و به شکل ایستاده و خوابیده (چرخشی در جهت افقی، عمودی) ساخته می‌شوند. میکس دوغاب نقشی اساسی در یکنواخت کردن مواد فوم بتن دارد. اندازه میکسر و سرعت آن دو عامل اصلی در کیفیت دوغاب هستند. متأسفانه در اغلب موارد تصور می‌شود که هرچه میکسر دستگاه بزرگتر باشد، سرعت اجرا هم بیشتر خواهد بود در حالی که این موضوع ممکن است باعث شکست حباب و کاهش کیفیت فوم بتن گردد. داشتن اینورتر<sup>۱</sup> در میکسر جهت تنظیم سرعت آن الزامی است. در میکسرهای خوابیده (افقی) به دلیل گردش در راستای جاذبه شاهد حباب

<sup>۱</sup> Inverter

شکنی و پرتاب مواد به اطراف هستیم که باعث دید کمتر اپراتور در حین ساخت و کشیف شدن دستگاه می‌شود. با این توضیح به نظر می‌رسد که میکسرهای ایستاده با حجم ۱ متر مکعب و کمتر از آن بهترین کیفیت و کارایی را در میکس فوم بتن دارند.

برای تولید فوم بتن ابتدا مصالح مورد نیاز را با در نظر گرفتن مقدار مشخص شده جهت چگالی مورد نظر، با هم در مخلوط کننده دستگاه ترکیب می‌شوند سپس ماده فوم در فوم ژنراتور دستگاه با آب مخلوط شده و توسط پمپ هوا از لوله مخصوص که دارای ساچمه‌های ریز می‌باشد با فشار عبور داده می‌شود این عمل باعث بدست آمدن کف می‌شود و کف حاصل در میکسر با ملات سیمان و آب مخلوط می‌شود که در حین اختلاط حباب‌های بسیار ریز در سر تا سر ملات بوجود می‌آید و بعد از عمل آمدن، توسط پمپ به طبقات پمپاژ و روی سطح ریخته می‌شود (شکل ۳-۴) و یا اگر هدف تولید بلوک باشد بتن در قالب‌های مخصوص قرار می‌گیرند (شکل ۳-۵).



شکل ۳-۳- محل میکسر در سیستم فوم بتن ساز



شکل ۳-۵- بلوک فوم بتن



شکل ۳-۴- فوم بتن ریزی در کف طبقات برای تسطیح

### ۳-۲-۲- کمپرسور هوا

از کمپرسور هوا برای ایجاد فشار هوای مورد نیاز برای تولید کف فوم توسط فوم ژنراتور، استفاده گردید. که هوای فشرده شده توسط یک شلنگ از کمپرسور به ورودی فوم ژنراتور انتقال می‌یابد. شکل ۳-۶ نمونه‌ی یک کمپرسور هوا را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶- کمپرسور هوا

### ۳-۲-۳- فوم ژنراتور

فوم ژنراتور یا واحد کف ساز بخشی از خط تولید است که وظیفه‌ی تهیه و تأمین کف مورد نظر (عامل سبک کننده در بتن) را بر عهده دارد. سیستم‌های جدید فوم ژنراتور بصورت اتوماتیک بوده و برداشت آب و فوم در آن‌ها بدون نیاز به کارگر انجام خواهد شد. فوم ژنراتورها انواع مختلفی در

کاربری‌های صنعتی، کارگاهی و آزمایشگاهی دارند. در این پژوهش از فوم ژنراتور آزمایشگاهی ساخت شرکت بتن سبک آراتا استفاده شد که در روش استفاده از آن شرح داده شده است.

### ۳-۲-۳-۱- فوم ژنراتور آزمایشگاهی

این فوم ژنراتور می‌تواند همراه با کمپرسور هوا و یا مجزای از آن ساخته شود و در هر بار شارژ قادر به تولید کف مورد نیاز برای تولید حداقل ۰,۴ متر مکعب بتن می‌باشد (شکل ۳-۷).



شکل ۳-۷- فوم ژنراتور آزمایشگاهی

\*شیوه‌ی استفاده از این دستگاه به شرح زیر است:

۱. این دستگاه همان‌گونه که در شکل مشخص است یک شیر تنظیم هوا در بالا (شیر شماره ۶) و یک شیر تنظیم دبی مواد (شیر شماره ۷) در پایین دارد. این پیچ‌ها در مرحله‌ای جداگانه که در ادامه شرح داده خواهد شد باید تنظیم شود.

۲. نسبت به پاکسازی محفظه‌ی داخلی فوم ژنراتور اقدام شود؛ کف‌یست با ریختن مقداری آب از منفذ ورودی که حالت مخروطی شکل و به رنگ سیاه (شیر شماره ۲) است و از طرف دیگر باز کردن شیر خروجی در زیر دستگاه، گردش آب برقرار شود تا مواد به جا مانده از قبل، از محفظه خارج شوند. لازم به ذکر است برای روان تر شدن و تسریع این کار حتما شیر هواگیری (شیر شماره ۱) باز شود.

۳. محفظه‌ی فوم ژنراتور ۱۰ لیتر است مخلوط آب و فوم که از قبل در ظرفی حاضر شده، از شیر ۲ به داخل محفظه‌ی فوم ژنراتور ریخته شود. یادآور می‌شود از بسته بودن شیر خروجی زیر فوم ژنراتور اطمینان حاصل شود. پس از پر شدن محفظه، هر دو شیر ورودی و هواگیر بسته شود.

۴. کمپرسور باد را شارژ کرده و شلنگ خروجی باد را به درگاه ورودی هوای فوم ژنراتور، تعبیه شده در بالاسر دستگاه (درگاه شماره ۴)، متصل شود. بهتر است از تلفات باد در بسته‌ها مطمئن بود و سپس شیر ورودی هوا (شیر شماره ۵) باز شود.

۵. حال می‌توان شیر اصلی لانس (شیر شماره ۳) را باز، تا کف فوم از شلنگ خارج شود. در این مرحله می‌توان با تنظیم شیر کنترل دبی مواد، تعبیه شده در زیر دستگاه، و شیر تنظیم هوا در بالاسر دستگاه به چگالی و کیفیت کف مدنظر رسید.

\*نکات مهم زیر درباره‌ی نگهداری دستگاه رعایت شود:

۱. تخلیه هوای موجود در مخزن فوم ژنراتور در مرحله شارژ مجدد اهمیت بالایی دارد. لازم است دقت

کافی بعمل آید تا ابتدا شیر تخلیه هوا به آرامی باز شود و سپس نسبت به شارژ مجدد اقدام گردد.

۲. اغلب مواد فوم از نظر شیمیایی خنثی و یا به مقدار کمی بازی هستند. در صورت تماس با پوست و

چشم می‌بایست به سرعت با آب فراوان شسته شود.

۳. در صورت عدم استفاده از دستگاه برای مدت طولانی می‌بایست مواد موجود در مخزن، خالی، شیرهای مربوط به شارژ، باز نگه داشته شوند تا رطوبت موجود در مخزن از بین برود و از ایجاد خوردگی در بدنه داخلی جلوگیری شود.

### ۳-۳- تجهیزات استفاده شده در آزمایشات

در بخش‌های زیر به تفکیک هر آزمون، تجهیزات مورد نیاز ذکر شده است. مطابق استاندارد ملی ایران به شماره ۱۴۵۰۴ مخلوط‌کن باید در ظرف استوانه‌ای دوران‌کننده باشد. قالب‌ها نیز با اندازه‌های مورد درخواست بلوک‌ها، می‌تواند با چوب، پلاستیک سخت، آلومینیوم، بتن یا سایر مواد مورد قبول ساخته شود. لازم به ذکر است به منظور اطمینان از دست‌یابی به بلوک با سطح نهایی مناسب، بهتر است سطوح قالب با یک عامل جداکننده قالب از قبل پوشش داده شود. [استاندارد ملی ایران ۱۴۵۰۴]

### ۳-۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

الف: جک هیدرولیکی روغنی مکانیکی

ب: جک هیدرولیکی کامپیوتری ساخت شرکت Toni Technic با سرعت بارگذاری  $0.2 \text{ N.s/mm}^2$

پ: مخلوط‌کن ۲۰۰ لیتری آراتا به علاوه مخلوط‌کن ۲۰ لیتری دست‌ساز

ت: قالب فلزی مکعبی آراتا به اندازه  $10 * 10 * 10$

ث: روغن قالب مخصوص فوم بتن

### ۳-۳-۲- آزمایش زمان گیرش اولیه و نهایی سیمان

الف: دستگاه سوزن و پیکات

ب: قالب مخروطی شکل و صفحه‌ی شیشه‌ای زیر آن



پ: دستگاه مخلوط‌کن جهت تهیه خمیر سیمان

### ۳-۳-۳- آزمایش زمان گیرش اصلاح شده برای فوم بتن

الف: دستگاه سوزن و یکات با سوزن به قطر ۵ میلیمتر

ب: قالب مخروطی شکل و صفحه ی شیشه ای زیر آن

### ۳-۳-۴- آزمایش جمع شدگی

الف: دستگاه اندازه گیری جمع شدگی آزمایشگاهی آراتا

ب: قالب استیل ۴\*۴\*۱۶ سانتی متری

ب: کرنومتر

ج: بطری آب منفذ دار

### ۳-۳-۵- آزمایش جذب آب

الف: آون

ب: قفس توزین در زیر آب برای غرقاب نمونه ها

### ۳-۳-۶- آزمایش مقاومت خمشی

الف: جک هیدرولیکی کامپیوتری ساخت شرکت Toni Technic با سرعت بارگذاری 0.1 kN/min

ب: مخلوط‌کن ۲۰۰ لیتری آراتا

ت: قالب مکعب مستطیلی چوبی ۳۳\*۱۰\*۱۰ سانتی متر

ث: روغن قالب مخصوص فوم بتن

### ۳-۳-۷-آزمایش مقاومت کششی(برزیلی)

الف: جک هیدرولیکی کامپیوتری ساخت شرکت Toni Technic با سرعت بارگذاری 1 kN/min

ب: مخلوط کن ۲۰۰ لیتری آراتا

ت: قالب چدنی استوانه‌ای به ارتفاع ۲۰ cm و قطر ۱۰ cm

ث: روغن قالب مخصوص فوم بتن

تذکره ۱: در همه ی آزمایشات فوق ترازو با ریزنگری ۱ گرم مورد نیاز است.

تذکره ۲: در همه ی آزمایشات فوق به جز آزمون‌های گیرش، اخذ چگالی خشک نمونه‌ها الزامی است.

مطابق استاندارد ملی ایران به شماره ۱۴۵۰۴ چگالی بلوک بتن کفی عبارتست از جرم بلوک به حجم بلوک.

جرم با ترازو اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری حجم نیز با استفاده از خط‌کش فلزی با ریزنگری ۱ mm

ابعاد بلوک را اخذ و حجم را محاسبه می‌کنیم.

### ۳-۴-نحوه اختلاط و قالب‌گیری

طبق استاندارد ملی ایران به شماره ی ۱۴۵۰۴ طرح اختلاط بتن که مشخص کننده ی نسبت‌های اجزای

تشکیل دهنده است طوری انتخاب شود که مشخصات نهایی بلوک‌های مورد نظر به‌دست آید. اجزا باید در

یک مخلوط‌کن استوانه‌ای شکل مخلوط شوند. اجزای خشک مثل سیمان و ماسه باید ابتدا به مخلوط‌کن

وارد شده و به‌طور کامل مخلوط شوند تا این‌که از پخش کامل سیمان نیز اطمینان حاصل شود. مقدار

مناسبی از آب را اضافه کرده و بعد از آن، عمل اختلاط را ادامه دهید.

برای تولید بتن سلولی کفی، کف آماده که با آمیخته کردن عصاره کف، آب و هوای فشرده در نسبت‌هایی که از قبل تعیین شده است در یک تولید کننده کف که تحت یک نرخ مشخص تخلیه تنظیم شده است باید در یک مقدار اندازه‌گیری شده به دوغابی از سیمان و ماسه و آب در پیمانانه مخلوط‌کن اضافه شود. به منظور رسیدن به قوام یکنواخت، مقداری مخلوط کردن تکمیلی انجام شده و دوغابی از بتن سلولی کفی با وزن واحد مرطوب مورد نظر، برای ریختن در قالب، آماده می‌شود. [استاندارد ملی ایران به شماره ۱۴۵۰۴].

در این پژوهش ابتدا یک مخلوط کن استوانه‌ای به حجم ۲۰ لیتر فراهم شد (شکل ۳-۸) اما برای سهولت اندازه‌گیری‌ها، اختلاط تا حجم ۱۰ لیتر فرآوری شد. نکته‌ی دیگر آن‌که از موتور برقی متحرک به‌عنوان هم‌زن استفاده شد، میله‌ای که سر آن دو پره، و هر پره به اندازه‌ی ۱۰\*۵ سانتیمتر جوش داده شده بود را به دریل وصل و عمل هم زدن انجام شد. ۵۶ تکرار بتن ریزی توسط این مخلوط‌کن انجام شد. لازم به ذکر است در هر بار تکرار، ۸ بلوک ۱۰\*۱۰\*۱۰ سانتی‌متر به‌منظور تست مقاومت فشاری، یک نمونه بلوک ۴\*۴\*۱۶ سانتیمتر برای تست جمع‌شدگی و و یک قالب ویکات برای تست زمان گیرش، از هر اختلاط کسب شد. زمان اختلاط در این مخلوط‌کن، برای هر تکرار ۶ دقیقه زمان نیاز بود شامل: ۴ دقیقه اختلاط دوغاب سیمان-ماسه و ۲ دقیقه اضافه کردن کف و کسب اختلاط نهایی.



شکل ۳-۸- مخلوط کن ۲۰ لیتری و پره‌های چرخنده

در مرحله‌ی دیگر از آزمایشات برای کاهش خطای آزمایشگاهی از مخلوط‌کن استوانه‌ای دوران‌کننده خودکار (بدون دخالت نیروی انسانی برای دوران) با حجم ۲۰۰ لیتر ساخت شرکت بتن سبک آراتا استفاده شد (شکل ۳-۹). جمعاً ۴ تکرار، ۲ مرتبه با آب معمولی و ۲ مرتبه با سیال میکرونانو حباب آزمون انجام شد و در هر مرتبه حداقل ۲۰ مکعب  $10 * 10 * 10$  و ۲ عدد نمونه جمع‌شدگی و ۲ قالب ویکات برای آزمون گیرش، از اختلاط استخراج شد. لازم به ذکر است در دو تکرار آخر و از هر تکرار ۳ نمونه مکعب مستطیل به اندازه  $33 * 10 * 10$  برای آزمون مقاومت خمشی و ۳ نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر برای آزمون مقاومت کششی اخذ گردید. در این مرحله، به‌علت حجم بالای مصالح و ایجاد اختلاط یک‌دست و قوام بالا، ۳۰ دقیقه زمان برای مخلوط کردن اختصاص داده شد.



شکل ۳-۹- مخلوط کن ۲۰۰ لیتری

تذکره: در نمونه گیری از بتن سبک، به دلیل عدم وجود سنگدانه و روانی بالا، نیازی به ویبره کردن اختلاط نیست.

### ۳-۵- شرح انجام آزمایشات

#### ۳-۵-۱- آزمایش مقاومت فشاری

استاندارد ملی ایران شرایطی برای اندازه نمونه‌ها و نحوه‌ی انجام آزمایش تعیین نکرده است. برای انجام تست مقاومت فشاری از مکعب‌های ۱۰\*۱۰\*۱۰ استفاده شد. طبق استاندارد ملی ایران به شماره ۱۴۵۰۴ بلوک‌ها پس از ۲۴ ساعت بعد از ریختن بتن از قالب‌ها جدا می‌شود، مگر آن که فرآیندهای عمل‌آوری تسریع

شده به کار برده شده باشد. در پژوهش، نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب بیرون آورده شد و همان‌طور که در ادامه شرح داده خواهد شد عمل‌آوری و آزمون در سنین ۷ روز، ۲۸ روز و ۹۰ روز انجام شد.

نکته حائز اهمیت آن است که در بتن معمولی نمی‌توان بصورت اختیاری از هر اندازه قالبی، استفاده کرد زیرا اندازه ذرات سنگدانه موثر است و هرچه اندازه قالب از استاندارد کوچکتر باشد دو راه وجود دارد: اول آن‌که باید به همان اندازه، از ذرات کوچکتر نسبت به استاندارد استفاده کنیم، دوم آن‌که با ضرابی مقاومت فشاری حاصل از مکعب ۱۰ سانتی‌متری را به مقاومت فشاری مکعب ۱۵ سانتی‌متری تبدیل کنیم؛ اما در بتن کفی به علت عدم وجود سنگدانه و تنها استفاده از سیمان و ماسه ریز (پودر سنگ) این اختیار را داریم که از قالب مکعب ۱۰ سانتی‌متری استفاده کنیم هرچند که استاندارد داخلی فوم بتن درباره‌ی اندازه قالب‌ها وجود ندارد.

نمونه‌ها در سنین ۷ روز و ۲۸ روز توسط جک هیدرولیکی روغنی مکانیکی شکسته شد (شکل ۳-۱۰) که طبیعتاً به علت خطای انسانی نمی‌توان سرعت بارگذاری را ثابت نگاه داشت.



شکل ۳-۱۰- جک هیدرولیکی روغنی مکانیکی

فرمول محاسبه‌ی مقاومت فشاری طبق این جک عبارتست از:

$$T = 0.1 * \frac{16 * p}{A} \quad (1-3)$$

T = مقاومت فشاری (MPa)

P = عددی که گیج نشان می‌دهد (kg). لازم به ذکر است عدد ۱۶ ضریب تبدیل بار نقطه‌ای (وارد شده توسط جک به نمونه) به بار سطحی است (سطح مقطع سیلندر هیدرولیکی ۱۶ سانتی‌متر مربع است).

A = سطح نمونه (cm<sup>2</sup>)

۰/۱ = ضریب تبدیل kg/cm<sup>۲</sup> به MPa

در دو مورد از تکرارها، و از هر تکرار ۴ نمونه توسط جک هیدرولیکی Toni Technic در آزمایشگاه صنعتی شاهرود شکسته شد، تا مقدار خطای موجود در جک مکانیکی تا حدودی مشخص شود. سرعت بارگذاری ۰,۰۲ N.s/mm<sup>2</sup> انتخاب شد (شکل ۳-۱۱). لازم به ذکر است نمونه‌های ۹۰ روزه از دو تکرار آخر انتخاب و با جک شکل ۳-۱۲ آزمایش شد. فرمول محاسبه‌ی مقاومت فشاری توسط این جک نیز به صورت زیر است:

$$T = \frac{P * 10^{-3}}{A} \quad (2-3)$$

T = مقاومت فشاری (MPa)

P = عددی که کامپیوتر نشان می‌دهد (KN)

10<sup>-3</sup> = ضریب تبدیل KN/cm<sup>2</sup> به MPa

A = سطح نمونه (cm<sup>2</sup>)



شکل ۳-۱۱- جک هیدرولیکی Toni Technic

عمل آوری فوم بتن متفاوت از بتن معمولی است و هرگز نباید آن را تا رسیدن به سن مدنظر غرقاب کرد. مطابق استاندارد ملی ایران به شماره ۱۴۵۰۴، بعد از بیرون آوردن بلوکها از قالبها، بلوکها باید به نحو مناسبی عمل آوری شوند. طبق استاندارد ACI 523-1996 نمونهها باید تا روز آزمون طوری عمل آوری شود که از فرار آب از آنها جلوگیری شود. مطابق استاندارد ASTM C495 پس از ۲۴ ساعت از خارج کردن نمونهها از قالب، آنها را در دمای  $21,1 \pm 5,5$  درجه سانتیگراد نگاه داشته و پس از ۲۴ ساعت در فضای مرطوب در دمای  $23 \pm 1,7$  سانتیگراد نگاه داشته شود (منظور از فضای مرطوب، فضایی است که آب روی سطح نمونهها باقی بماند؛ که می توان برای کنترل رطوبت از محلول کلسیم هیدروکسید استفاده شود) برای این کار می توان از پارچهی مرطوب برای جلوگیری از فرار رطوبت استفاده شود (توجه شود که منظور از فضای مرطوب حالت غرقاب نیست). این عمل تا ۷ روز ادامه یابد و پس از آن نمونه ها در دمای  $21,1 \pm 5,5$  درجه سانتیگراد تحت رطوبت  $50 \pm 30$  درصد برای ۱۸ روز قرار گیرد پس از ۲۵ روز از گذشت عمر نمونهها،



آن‌ها را در آون تحت دمای  $60 \pm 2,8$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ روز قرار دهید (توجه کنید که در طی این مدتی که نمونه‌ها در آون است رطوبت نمونه‌ها بیش از ۵ درصد کم نشود).

لذا در این پژوهش پس از آن‌که نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شد؛ به مدت ۲۴ ساعت دیگر در هوای آزاد قرار گرفت سپس به‌طور لحظه‌ای در آب فرو برده شد و خارج شد تا رطوبت به تمام سطح نمونه برسد و سپس زیر پوشش پلاستیکی ضخیم، در محیط آزمایشگاه قرار داده شد (شکل ۳-۱۲). عمل فرورودن در آب به‌صورت لحظه‌ای هر ۲ روز یک مرتبه، برای حفظ رطوبت نمونه، تا رسیدن به سن آزمون انجام شد. دمای محیط آزمایشگاه برابر با دمای اتاق است. یادآور می‌شود ۳ روز قبل از انجام تست نمونه‌ها مرطوب نشوند و روز انجام آزمایش حداقل ۲ ساعت قبل از انجام تست مقاومت، از زیر پوشش پلاستیکی بیرون آورده شود و برای خشک شدن سطح آن، در معرض هوای آزاد قرار گیرند. به این حالت، نمونه‌ی نیمه خشک اطلاق می‌شود. لازم به ذکر است که برای نیمه خشک کردن نمونه‌ها بهتر است طبق استاندارد ASTM C495 برای نمونه‌های ۲۸ روزه از آون استفاده شود اما به دلیل ظرفیت پایین آون مورد استفاده و زیاد بودن تکرارها و تعدا نمونه‌ها این عمل امکان پذیر نشد و از هوای آزاد و تابش نور خورشید استفاده شد. لازم به ذکر است طبق گزارش ۷۰۷ مرکز تحقیقات، مقاومت فشاری بتن کفی، طبق ضوابط، عمدتاً در حالت نیمه خشک اندازه‌گیری می‌شود. همچنین مطابق استاندارد ASTM 796 نمونه‌های مورد نیاز برای آزمون بارگذاری در آون خشک نشوند.



شکل ۳-۱۲- عمل‌آوری نمونه‌ها زیر پوشش پلاستیکی

در این پژوهش در سن ۲۸ روز، یک مرتبه نمونه طی مراحل گفته شده تست شد و هم‌زمان دو نمونه از دو مورد از تکرارها که در فصل چهار شرح داده خواهد شد، در روز قبل از تست در آون تحت دمای ۶۰ درجه خشک کرده و نتایج گرفته شد تا نتایج نمونه خشک و نیمه خشک مقایسه شود.

قالب‌ها، فلزی و مکعب ۱۰ سانتیمتری انتخاب شد سطح داخلی آن توسط روغن قالب مخصوص فوم بتن، چرب شد.

\*تذکر: یادآور می‌شود حتما در ساخت بلوک، از روغن قالب مخصوص فوم بتن استفاده شود چرا که در چند تکرار ابتدایی پس از مشاهده‌ی نتایج ضعیف مقاومتی نمونه‌ها، عیب‌یابی انجام شد و علت بی کیفیت شدن نمونه‌ها، استفاده از روغن موتور برای قالب‌ها (که در آزمایشگاه‌های بتن بسیار عرف است) بود و تاثیر

منفی آن بر مقاومت نمونه، حداقل ۵۰ درصد تخمین زده شد. برای بهتر نشان دادن اثر مخرب روغن موتور روی کف فوم، دو ظرف هم اندازه که یکی دیواره‌ی تمیز و دیگری دیواره‌ی آغشته به روغن موتور شده بود را در اختیار گرفته و تالبه از کف فوم پر شد. شکل ۳-۱۳ به وضوح خوردگی کف فوم را در ظرف شماره ۲ پس از گذشت زمان ۵ دقیقه نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۳-تاثیر مخرب روغن موتور بر کف فوم- الف: ظرف ۱، دیواره خشک و ظرف ۲، دیواره‌ی چرب شده، هر دو پر شده توسط کف فوم. ب: ظروف ۱ و ۲ پس از گذشت ۵ دقیقه.

### ۳-۵-۲-آزمایش زمان گیرش اولیه و نهایی سیمان و فوم بتن

#### ۳-۵-۲-۱-آزمون زمان گیرش خمیر سیمان

هدف از این آزمایش تعیین زمان گیرش سیمان است که طبق استاندارد ملی ایران ۳۹۲ انجام شد. این آزمایش زمان گیرش اولیه و نهایی سیمان را بوسیله دستگاه سوزن ویکات مشخص می‌کند. در این آزمایش برای تهیه خمیر سیمان، نسبت آب به سیمان ۲۵ درصد نظر گرفته شد (۶۵۰ گرم سیمان با ۱۶۲٫۵ml آب). این عدد با توجه به آزمایش غلظت نرمال سیمان هیدرولیکی مطابق با استاندارد ASTM C187 با سه مرتبه آزمون و خطا به دست آمده است. لازم به ذکر است که غلظت نرمال عبارتست از فرورفت سوزن ویکات در طی ۳۰ ثانیه به مقدار  $10 \pm 1$  میلی‌متر در خمیر سیمان. با باز کردن پیچ به

مدت ۳۰ ثانیه، میله در خمیر نفوذ می کند که باید موقعیت آن را قرائت و یادداشت نمود. هنگام آزمایش نباید هیچ لرزشی در دستگاه آزمایش ایجاد شود. در صورت عدم نفوذ سوزن به میزان  $1 \pm 10$  میلی متر در خمیر سوزن طی ۳۰ ثانیه، برای رسیدن به چنین مخلوطی لازم است خمیرهای جدید سیمان با درصدهای مختلف آب ساخته شوند تا این شرایط اثبات گردد.

شکل ۳-۱۴ دستگاه سوزن ویکات و همزن برقی را نشان می دهد. برای تهیه خمیر سیمان مقدار ۶۵۰ گرم سیمان را با ۱۶۲,۵ml آب را در دستگاه مخلوط کن ریخته و سپس به مدت دو دقیقه با سرعت پایین و سپس ۴ دقیقه دیگر با سرعت بالا مخلوط را هم می زنیم، حال مخزن دستگاه را از آن جدا کرده و به مدت یک دقیقه با دست و کاردک مخلوط را هم زده تا کاملا یکنواخت گردد.



شکل ۳-۱۴-دستگاه سوزن ویکات و همزن برقی

برای قالب گیری نمونه آزمایش، پس از پوشیدن دستکش به سرعت خمیر سیمان ساخته شده را تقریباً به شکل توپ در آورده و سپس آن را ۶ بار از فاصله آزاد ۶ اینچ (۱۵ سانتی متر) از یک دست به دست دیگر پرتاب می نماییم، طوری که گلوله نسبتاً کروی ایجاد شود که با کمترین دست خوردگی به سادگی وارد

حلقه ویکات شود. گلوله را در کف یک دست گرفته و آن را از انتهای قطر بزرگتر حلقه که در دست دیگر است فشار داده، طوری که حلقه کاملاً از خمیر پر شود. با یک حرکت کف دست خمیر اضافی از انتهای بزرگتر حلقه برداشته شود. سپس حلقه از طرف با قطر بزرگتر روی صفحه غیر متخلخل قرار داده می‌شود. به کمک ماله با لبه‌های تیز که با زاویه کمی نسبت به بالای حلقه نگه‌داشته شده، خمیر اضافی بالای حلقه را به یک حرکت برش داده و در صورت لزوم با چند حرکت آرام ماله، سطح آن صاف شود. لازم است توجه شود که طی عملیات بریدن و صاف کردن، خمیرسیمان فشرده نشود. بعد از ۳۰ دقیقه سوزن مماس شده بر سطح خمیر را رها کرده تا تحت تاثیر وزن خود در آن نفوذ کند بعد از ثابت شدن میزان نفوذ (مدت زمان حدود ۳۰ ثانیه) عدد مربوطه را یادداشت و سوزن را در مکان دیگری به فاصله‌ی حداقل، ۶ میلی‌متر تنظیم و همین عمل را بعد از این هر ۱۵ دقیقه تکرار می‌کنیم.

در هیچ موردی نباید فاصله محل نفوذ سوزن تا لبه داخلی قالب از ۶ میلی‌متر کمتر باشد. در نهایت به مرحله ای می‌رسیم که سوزن در خمیر سیمان نفوذ نمی‌کند.

نمودار نفوذ-زمان را رسم کرده و مدت زمان متناظر با نفوذ ۲۵mm بیان‌گر گیرش اولیه و مدت زمان مربوط به نفوذ صفر معادل گیرش نهایی خمیر سیمان است.

### ۳-۵-۲-۲-آزمون زمان گیرش توسعه یافته (ویژه مخلوط فوم بتن)

از آنجا که زمان گیرش فوم بتن یک پارامتر حساس و چالشی این صنعت است ضروری است تا روشی برای اندازه‌گیری زمان گیرش کامل این محصول یافته‌شود. در صنعت بلوک‌سازی مدرن ابتدا در قالب‌هایی با ظرفیت حداقل ۱ مترمکعب مخلوط فوم بتن را ریخته و پس از مدت زمانی که با تجربه توسط اپراتور به دست می‌آید قالب را جدا و اختلاط سفت شده توسط دستگاه برش به اندازه‌های مدنظر برش می‌یابد لذا نتیجه‌ی این آزمایش در پژوهش حال حاضر می‌تواند کمک شایانی به یافتن زمان دقیق برش‌کاری؛ بدون ایجاد ایراد در کیفیت فوم بتن؛ کند.

\*لازم به ذکر است برای تهیه‌ی نمونه‌های مورد نیاز این آزمایش از همان اختلاط فوم بتن که برای تست مقاومت فشاری ساخته شد، استفاده شد و فرآوری جداگانه‌ای انجام نگرفت.

ابتدا چندین تکرار با سوزن و یکات معمولی (قطر ۱ میلی‌متر) آزمایش انجام شد اما به علت ریز بودن قطر سوزن و از طرفی اسفنجی بودن نوع محصول، زمان زیادی صرف انجام این آزمایش شد که بصورت میانگین حداقل ۱۲ ساعت زمان نیاز بود تا نفوذ سوزن به صفر حدی برسد؛ مشکل دیگر آن بود که انجام تست باید پس از گذشت تقریباً ۳ ساعت از زمان تولید فوم بتن، که شروع گیرش فوم بتن است، انجام پذیرد.

بنابراین لازمی کاهش مدت زمان آزمایش، افزایش قطر سوزن خواهد بود؛ لذا قطر سوزن به ۵ میلی‌متر افزایش داده شد؛ در عین حال وزن میله‌ی سوزن و یکات طبق استاندارد ملی ایران، همچنان همان ۳۰۰ گرم باقی ماند (شکل ۳-۱۵).



شکل ۳-۱۵- دستگاه سوزن و یکات به همراه سوزن ۵ میلی‌متری

### ۳-۵-۳- آزمایش جمع شدگی

طبق استاندارد ۱۴۵۰۴، جمع شدگی ناشی از خشک شدن عبارتست از نسبت بین تغییر طول نمونه در حالت غوطه‌ور شده در آب و خشک شده در گرمخانه به طول خشک آن برحسب درصد. در هر تکرار یک الی دو قالب از نمونه جمع شدگی نیز جهت این تست از اختلاط گرفته شد. اندازه‌ی نمونه‌های جمع شدگی ۴\*۴\*۱۶ سانتی‌متر می‌باشد. شکل ۳-۱۶ قالب‌های جمع شدگی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۶- قالب نمونه‌ی جمع شدگی

طریقه‌ی انجام آزمایش بدین ترتیب است که نمونه ریخته شده در قالب را پس از ۲۴ ساعت از قالب درآورده و همانند نمونه‌های تست مقاومت فشاری هر دو روز یک‌بار به‌طور لحظه‌ای در آب فروبرده و خارج شود و تا ۲۸ روز زیر پوشش پلاستیکی عمل‌آوری می‌شود. پس از رسیدن نمونه به سن ۲۸ روزه، به‌مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۰۰ درجه‌سانتی‌گراد قرار داده شود. پس از آن برای اندازه‌گیری جمع شدگی، از دستگاه جمع شدگی ساخت شرکت بتن سبک آراتا استفاده شد. همان‌گونه که در شکل ۳-۱۷ مشخص است، نمونه را به‌صورت طولی زیر گیج دستگاه قرار داده و با چرخاندن گیج، عقربه روی عدد صفر کالیبره

می‌شود. دقت گیج  $0,01$  میلی‌متر است. همراه داشتن یک عدد کرنومتر ثانیه شمار الزامی است؛ و با آغاز زدن کلید کرنومتر، اقدام به مرطوب کردن نمونه به وسیله‌ی بطری آب کنید (برای سهولت در مرطوب کردن نمونه، یک بطری آب  $1,5$  لیتری تهیه شود، روی درب بطری با میله‌ای باریک و داغ منفذی ایجاد شود تا آب از طریق آن روی نمونه ریخته شود).



شکل ۳-۱۷- نمونه زیر دستگاه جمع‌شدگی

واضح است که با خیس کردن نمونه، نمونه شروع به انبساط در جهت طولی می‌کند که باعث حرکت کردن عقربه می‌شود. در انتهای هر دقیقه عددی که عقربه نشان می‌دهد یادداشت شود. این عمل را تا زمانی که تغییرات عقربه، صفر یا نزدیک به صفر شد ادامه دهید. در این پژوهش حداکثر زمان اندازه‌گیری  $20$  دقیقه بود. یادآور می‌شود حتماً وزن نمونه و حجم آن را قبل و بعد از انجام نمونه برای کسب نتیجه جذب آب یادداشت کنید (به بخش ۳-۵-۴ مراجعه شود). برای محاسبه‌ی میزان درصد تغییر طول نمونه و



محاسبه‌ی جمع‌شدگی، استاندارد ملی ایران به شماره ۱۴۵۰۴ فرمول زیر ارائه داده است. واحد طول آزمون بر حسب میلی‌متر است.

$$(۱-۳) \quad \text{جمع‌شدگی خشک شدن} = \frac{\text{طول آزمون خشک} - \text{طول آزمون مرطوب}}{\text{طول آزمون خشک}}$$

**تذکر مهم:** آزمایشی که شرح داده شد برعکس آزمایش جمع‌شدگی است در واقع استاندارد آزمایش این‌گونه است که در آن، نمونه را کاملاً خیس کرده و زیر گیج قرار می‌دهند و سپس آن را آرام آرام خشک کرده و اعداد را یادداشت می‌کنند. لذا آزمایش جمع‌شدگی نیاز به تجهیزات و زمان زیاد دارد اما در این پژوهش به علت جنبه‌ی مقایسه‌ای بودن و تسریع در انجام آزمایشات، با روش خیساندن نمونه، نتایج کسب شد. بنابراین خیساندن نمونه باعث انبساط آن می‌شود و حرکت گیج را نشان می‌دهد این عمل در واقع عکس عمل منقبض شدن و جمع‌شدگی نمونه است اما با تقریب خوبی می‌توان همان نتیجه آزمایش اصلی را اخذ نمود.

### ۳-۵-۴- آزمایش جذب آب

بلوک فوم بتن در این آزمایش در اندازه‌ی ۱۰\*۱۰\*۱۰ سانتی‌متر است و به علت آن که چگالی آن زیر  $1000 \text{ kg/m}^3$  است نمونه روی آب شناور می‌ماند لذا الزامی است تا یک ظرف آب با سقف توری فلزی آماده شود تا نمونه‌ها برای غرقاب در آن قرار گیرد. طبق استاندارد ملی ایران به شماره ۱۴۵۰۴، ابتدا آزمون را به مدت ۲۴ ساعت در آب با دمای ۱۶ تا ۲۷ درجه سانتی‌گراد غرقاب کنید تا اشباع شود. سپس آزمون را از آب خارج کنید و به مدت یک دقیقه بر روی شبکه فلزی قرار داده تا آب سطحی آزمون خارج شود، آب باقی‌مانده را با یک پارچه مرطوب جمع‌آوری کنید. جرم آزمون را اندازه‌گیری کنید ( $w1$ ). سپس آزمون را به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۱۱۵-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار دهید، پس از سرد شدن در هوا، جرم هر آزمون را اندازه بگیرید ( $m1$ ) سپس آزمون را دوباره به مدت ۲ ساعت در گرم‌خانه قرار دهید و پس از

سرد شدن آن در هوا، جرم آن را اندازه گیری کنید ( $m_2$ ) در صورتی که مقدار کاهش وزن نمونه خشک شده در دو اندازه گیری ( $m_2 - m_1$ ) نسبت به جرم ( $m_1$ ) کم تر از ۰,۲ درصد بود. نمونه به جرم ثابت خشک رسیده است و جرم ( $m_2$ ) را به عنوان جرم ثابت خشک ( $w_2$ ) نام گذاری کنید، در غیر این صورت فرآیند خشک شدن را تا رسیدن به جرم ثابت خشک ادامه دهید.

دو نوع نتیجه برای جذب آب گرفته می شود:

۱- جذب آب وزنی

$$\text{جذب آب وزنی نمونه} = \frac{W_1 - W_2}{W_2} * 100 \quad (2-3)$$

۲- جذب آب حجمی

در این آزمون حجم نمونه ( $V$ ) را با خط کش فلزی با ریزنگری 1mm اندازه گیری کنید.

$$\text{جذب آب حجمی نمونه} = \frac{W_1 - W_2}{V \text{ (cm}^3\text{)}} * 100 \quad (3-3)$$

### ۳-۵-۵- مقاومت خمشی و مقاومت کششی

فوم بتن همانند بتن معمولی برای کاربرد سازه‌ای مورد استفاده قرار نمی‌گیرد بنابراین مقاومت خمشی و کششی آن چنان حائز اهمیت نیست؛ به خصوص آن که چگالی و طرح اختلاط انتخابی در این پژوهش، جز چگالی‌های بالا و بلوک‌های باربر نیست و تمرکز آزمایشات بیشتر بروی مقاومت فشاری تنظیم شد. اما برای کامل تر شدن پژوهش، این دو آزمون نیز گرفته شد.

نمونه‌ها طی دو تکرار آخر، یک مرتبه با آب معمولی و یک مرتبه با میناب از میکسر ۲۰۰ لیتری اخذ شد. از هر تکرار سه نمونه خمشی و سه نمونه کششی و در مجموع ۱۲ نمونه تهیه شد. قالب‌های مورد نیاز از شاهرود به مشهد انتقال یافت، نمونه‌ها تهیه شد و نمونه‌ها را برای انجام تست در سن ۲۸ روز به آزمایشگاه

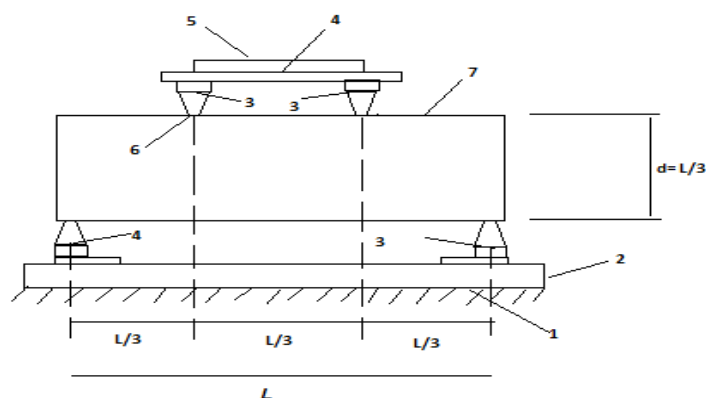
دانشگاه صنعتی شاهرود انتقال داده شد. به علت نزدیک به صفر بودن مقاومت کششی و خمشی نمونه‌ها در سن ۷ روز، این آزمون فقط در سن ۲۸ روزه انجام شد. لازم به ذکر است که آزمون فقط در نسبت آب به سیمان ۰٫۶ انجام شد. قالب نمونه‌های خمشی، مکعب مستطیلی چوبی به اندازه‌ی ۱۰\*۱۰\*۳۳ سانتی‌متر و قالب نمونه‌های کششی، استوانه‌ی چدنی به ارتفاع ۲۰ و قطر ۱۰ سانتی‌متر است. شکل ۳-۱۸ نمونه‌های کششی و خمشی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۸- نمونه‌های خمشی مستطیلی و نمونه‌های کششی استوانه‌ای

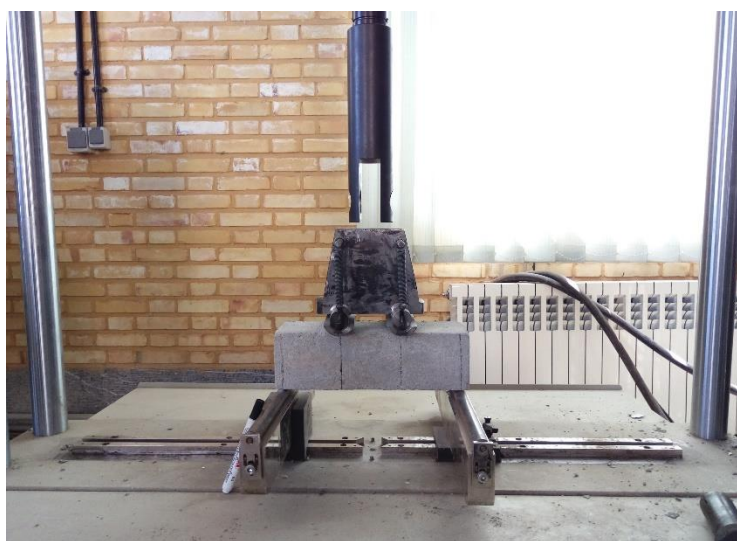
### ۳-۵-۵-۱- آزمون مقاومت خمشی

نمونه‌های مقاومت خمشی به شکل مکعب مستطیل و در اندازه‌های ۱۰\*۱۰\*۳۳ اخذ شد و عمل آوری آن‌ها همانند نمونه‌های مقاومت فشاری زیر پوشش پلاستیکی و تا عمر ۲۸ روزه انجام گرفت. آزمون مقاومت خمشی طبق استاندارد ۴۹۰ ایران به روش تست چهار نقطه‌ای انجام پذیرفت. شکل ۳-۱۹ جک بارگذاری نمونه مقاومت خمشی را نشان می‌دهد. سرعت بارگذاری 0.1 kN/min انتخاب شد.



شکل ۳-۱۹- شماتیک جک آزمون مقاومت خمشی - (۱) پایه‌ی ماشین آزمون، (۲) آهن ناودانی یا صفحه‌ی فولادی، (۳) گلوله‌ی فولادی، (۴) میله‌ی فولادی، (۵) سرماشین آزمون، (۶) خط توزیع بار در امتداد عرض نمونه، (۷) نمونه مورد آزمون

شکل ۳-۲۰ نیز تصویر نمونه‌ی خمشی مورد آزمایش در زیر جک بارگذاری را نمایش می‌دهد:



شکل ۳-۲۰- آزمون مقاومت خمشی نمونه‌ی فوم بتن

### ۳-۵-۵-۲- آزمون مقاومت کششی (برزیلی)

نمونه‌های آزمون مقاومت کششی به شکل استوانه و به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر اخذ شد. طبق استاندارد ASTM C496 عمل آوری نمونه‌ها بدین ترتیب است که پس از نگهداری ۷ روزه تحت شرایط مرطوب (استفاده از پارچه مرطوب یا یک پوشش ضخیم و غیرقابل نفوذ)، باید به مدت ۲۱ روزه تحت دمای  $23 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی  $50 \pm 5$  درصد قرار دارد. آزمون مقاومت کششی طبق

استاندارد ۶۰۴۷ ایران انجام شد. این آزمون با جک Toni Technic انجام شد. شکل ۳-۲۱ نشان دهنده‌ی نمونه زیر جک می‌باشد. سرعت بارگذاری 1 kN/min انتخاب شد. برای انجام آزمایش ابتدا خطوط قطری در دو سر نمونه و دو خط در امتداد خطوط قبلی روی بدنه جانبی نمونه‌ها رسم شود. سپس دو نوار پلاستیکی روی دو خط جانبی رسم شده روی نمونه قرار داده و آنرا داخل محفظه‌ای فولادی برای حفظ ثبات نمونه زیر جک، قرار می‌دهیم؛ به‌طوری‌که یکی از خطوط رسم‌شده زیر نمونه و دیگری بالای نمونه باشد تا جک بصورت عمودی به نمونه نیرو وارد کند. بین نمونه و فک بالایی جک یک میله‌ی مکعب مستطیلی قرار داده شود تا نیروی وارده از فک بالایی بصورت مستقیم به خط رسم شده در جانب نمونه وارد شود. در صورت تنظیم صحیح، گسیختگی دقیقاً از محل خط‌کشی شده انجام خواهد گرفت.



شکل ۳-۲۱- آزمون مقاومت کششی نمونه‌ی فوم بتن

### ۳-۶- آزمایشات انجام شده روی آب معمولی و آب حاوی میکرونانوحباب های هوا

#### ۳-۶-۱- مشخصات اولیه

اندازه گیری خصوصیات اولیه آب میکرونانوحباب و آب معمولی مورد استفاده در آزمایشات، از قبیل: دما، pH، کدورت و قابلیت هدایت الکتریکی در آزمایشگاه شرکت آب و فاضلاب خراسان رضوی انجام گردید. دستگاه های مورد استفاده به ترتیب زیر است:

#### ۳-۶-۱-۱- pH متر WTW 7110:

دستگاه pH متر رومیزی مدل pH 7110 ساخت کمپانی WTW آلمان یک Ph سنج بسیار ساده و پرتابل است. این دستگاه دقت بسیار زیادی دارد و میتواند با دقت  $\pm 0,005$  میزان pH را اندازه گیری کند (شکل ۳-۲۲).



شکل ۳-۲۲- دستگاه pH متر

#### ۳-۶-۱-۲- کندانکتومتر WTW 7110:

دستگاهی که توانایی یک محلول آبی برای حمل جریان الکتریکی را اندازه گیری می کند. که این توانایی به نوع یون، تحرک و ظرفیت یون و درجه حرارت محلول بستگی دارد. هدایت الکترولیتی را بر حسب  $\mu\text{S/cm}$  یا  $\text{mS/cm}$  (میکروموس بر سانتی متر) اندازه می گیرند. هدایت الکتریکی معیاری از توان آب برای

تعیین میزان رسانا بودن آن است. کالیبراسیون دستگاه بصورت هفته‌ای و با محلول استاندارد  $KCl\ 0.01m$  انجام می‌گیرد. (شکل ۳-۲۳)



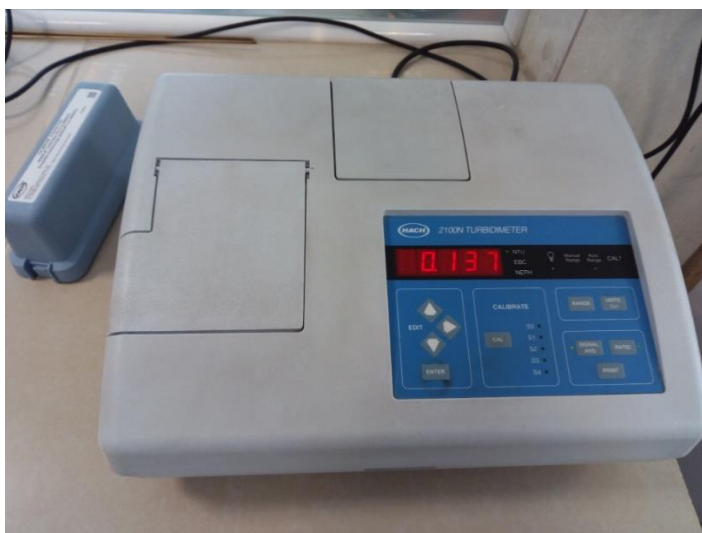
شکل ۳-۲۳-دستگاه کندانکتومتر

### ۳-۱-۶-۲- کدورت سنج Turbidimetr2100N:

دستگاهی است که با عبور نور از یک محلول، میزان پراکندگی جذب یا عبور طول موج‌های مشخصی از نور تابیده به یک محلول آنالیت را مشخص می‌کند. کدورت سنجی آنالیزی است که به مطالعه خواص اپتیکی بر پایه پخش نور<sup>۲</sup> می‌پردازد. علت پخش نور در آب وجود مواد معلق مثل مواد کلوئیدی، مواد آلی، میکرو ارگانیسم‌ها و حتی مولکول‌های درشت می‌باشد. دستگاه استفاده شده ساخت شرکت HACH آلمان و برپایه استاندارد USEPA 180.1 و بازه‌ی عملکردی ۰ تا ۴۰۰۰ NTU و رزولوشن ۰,۰۰۱ NTU می‌باشد هم‌چنین کالیبراسیون این دستگاه ۵ نقطه‌ای و توسط محلول فرمازین انجام می‌شود. (شکل ۳-۲۴)

کلرید پتاسیم<sup>۱</sup>

Scattering<sup>۲</sup>



شکل ۳-۲۴- دستگاه کدورت سنج

### ۳-۶-۲- اندازه گیری ابعاد میکرونانو حباب‌ها

روشی که در این تحقیق از آن استفاده شده است، روش پراش نور دینامیکی<sup>۱</sup> می‌باشد که برای اندازه-گیری اندازه ذرات در محیط مایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. در یک محلول، برخورد ذرات و مولکول‌های کوچک با مولکول‌های حلال، منجر به حرکت تصادفی مولکول‌ها می‌شود؛ به این حرکت ذرات کوچک در یک سیال، حرکت براونی می‌گویند. در عمل ذرات در مایع هیچ‌گاه ساکن نبوده و به وسیله‌ی حرکات براونی دائماً در حرکت هستند. یکی از ویژگی‌های حرکت براونی آن است که ذرات کوچک، سریع و ذرات بزرگ، آهسته حرکت می‌کنند و در یک دمای ثابت ذرات بزرگ‌تر در مقایسه با ذرات کوچک‌تر، حرکت بسیار آهسته‌تری دارند و زمانی که ذرات به طور ثابت در حرکت باشند، به نظر می‌رسد که الگوی ایجاد شده بوسیله‌ی آن‌ها نیز حرکت می‌کند.

تئوری مای وقتی اتفاق می‌افتد که ذرات هم اندازه یا کمی بزرگتر از طول موج نوری هستند که با آن‌ها برخورد می‌کند. برای استفاده از این تئوری، کاربر نیاز به دانستن ضریب شکست ذره و محیط یا همان ضریب شکست نسبی دارد. از این رو این تئوری برخلاف تقریب فرانیهوفر، برای ذرات شفاف در محدوده

---

<sup>۱</sup> Dynamic light scattering



اندازه ۱ تا ۵۰ میکرومتر نیز قابل استفاده است. می توان گفت که فرانهوفر نتایج خوبی برای ذرات بزرگتر از ۵۰ میکرومتر می دهد، ولی تئوری مای، بهترین راه حل عمومی برای ذرات کوچکتر از ۵۰ میکرومتر می باشد. شرایط استفاده از تئوری مای، بدین شرح است:

- نور استفاده شده در تعیین اندازه ذرات، باید دارای یک طول موج و فرکانس یکنواخت باشد.
- ذره باید کروی باشد، چون شکل ذره بر الگوی پراکندگی اثرگذار است.
- ذرات باید ایزوتروپ و همسان باشند، اگر ذرات غیرایزوتروپ یا غیرهمسان باشند، خصوصیات نوری آنها در جهات مختلف متفاوت خواهد بود.
- نور برخوردی باید به صورت امواج صفحه‌ای باشد یا توزیع سه بعدی نداشته باشد.
- هم پراکندگی و هم جذب باید در نظر گرفته شوند.
- ضریب شکست محیط و ذره باید شناخته شده باشد.
- و بالاخره مجموعه باید همگن باشد، زیرا ناهمگنی روی الگوی پراکندگی اثر دارد.

برخی از این شرایط، جزء شرایط اصلی تئوری مای هستند، ولی برخی دیگر برای ساده سازی مسئله و

تعیین اندازه به کار گرفته می شوند. روش تفرق نور دینامیکی مطابق با استاندارد ISO 22412 سال ۲۰۰۸ جهت تعیین ابعاد ذرات در محدوده ابعادی بین ۰,۶ تا ۸ میکرو قابل استفاده می باشد.

جهت اندازه گیری ابعاد حباب‌ها، از دو روش پاد-لاپلاس<sup>۱</sup> و کومولانت<sup>۲</sup> استفاده می کنند؛ که نتایج روش

کومولانت دقیق تر و قابل استنادتر می باشد. در روش کومولانت امکان اندازه گیری پارامتر ارزشمندی به نام

میانگین قطر هیدرودینامیکی<sup>۳</sup> فراهم می شود. که از طریق شدت نوسان نور پخش شده با استفاده از یک

---

<sup>۱</sup> Pade-Laplace

<sup>۲</sup> Cumulants

<sup>۳</sup> Zaverage

آشکارساز مناسب قابل اندازه‌گیری است. شدت نوسان نور پخش شده مستقیماً به سرعت نفوذ مولکول در حلال بستگی دارد و با دانستن ویسکوزیته محیط، شدت این نوسانات برای تعیین قطر نمونه مورد استفاده قرار می‌گیرد. قطری که در این روش اندازه‌گیری می‌شود، قطر هیدرودینامیکی نمونه نامیده شده و نشان دهنده‌ی چگونگی نفوذ ذرات در سیال است.

تعیین ابعاد نانو میکرو حباب‌ها، روی نمونه‌ی ۱ روزه و با استفاده از دستگاه Nano Particle Size Analyzer انجام شد که بر اساس تئوری مای طراحی شده است. دستگاه مزبور با روش پراش نور دینامیکی کار می‌کند و قادر به اندازه‌گیری ذرات در محدوده ابعادی ۱ نانومتر تا ۶ میکرون است. آزمایشات تعیین اندازه بر روی نمونه‌هایی با عمر تا یک ماه انجام شد و نتایج به روش کومولانت و بر اساس ۳ پارامتر حجم، تعداد و شدت نمونه‌ها به دست آمد. در این آزمایش فرض شده است که ضریب شکست نور برای نانومیکرو حباب‌ها ۱,۵۶ و برای آب ۱,۳۳ است. توزیع ذرات در مقیاس نانو به کمک نور لیزر با طول موج ۶۵۷nm و توان ۵۰٪ تعیین شد. آزمایشات مشخص نمود کوچکترین حباب‌ها دارای اندازه تقریبی ۸۱ nm می‌باشند.

برای کاهش و کنترل خطاها، هر اندازه‌گیری حداقل ۲ بار با فاصله زمانی کوتاهی انجام شد و میانگین دو اندازه‌گیری ملاک عمل قرار گرفت. اندازه‌گیری‌ها بصورت نمودار توزیع آماری قطر نانوحباب‌ها بیان می‌شوند. و ملاک، مقدار متوسط ابعاد نانو میکرو حباب‌ها<sup>۴</sup> است. و میانگین قطر هیدرودینامیکی یا متوسط قطر ذرات با  $D_b(50)$  که معرف اندازه‌ای است که ۵۰٪ حجمی نانو میکرو حباب‌ها دارای ابعادی کوچکتر از این اندازه و ۵۰٪ حجمی دارای ابعادی بزرگتر از آن می‌باشد، تفاوت دارد. (به پیوست بخش مراجعه شود) برگرفته از: [مظفری نائینی، ۱۳۹۲]

---

<sup>۴</sup> Dmean number

### ۳-۶-۳- بررسی پایداری میکرونانو حباب‌ها

پایداری میکرونانو حباب‌ها یکی از پارامترهای مهم می‌باشد، به خصوص که در مباحث عملی مانند ساخت بتن ممکن است به دلایلی (مثل نقص فنی در تجهیزات) وقفه‌ای در پروسه‌ی تولید رخ بدهد پایداری و حفظ خواص میکرونانو حباب‌های هوا در آب بسیار حائز اهمیت است. مقادیر پتانسیل زتای سطحی میکرونانو حباب‌ها با استفاده از یک زتا پتانسیل متر Zeta compact cad Instrument اندازه‌گیری شدند. اندازه‌گیری ویسکوزیته نیز با استفاده از همین دستگاه به صورت اتوماتیک از نمونه‌ها گرفته شد.



فصل چهارم

تحلیل و بررسی نتایج

آزمایشات

#### ۱-۴- نتایج حاصل از انجام آزمایشات روی آب حاوی میکرونانو حباب و آب معمولی

##### ۱-۱-۴- مشخصات اولیه:

جدول ۱-۴ مقادیر مشخصات اولیه اندازه‌گیری شده از قبیل دما، pH، هدایت الکتریکی و کدورت برای

آب حاوی میکرونانو حباب را نشان می‌دهد:

جدول ۱-۴- مشخصات اولیه آب میکرونانو حباب

مقادیر	موارد اندازه‌گیری
۲۵,۳	دما (°C)
۸,۳۲	Ph
۱۱۷۰	قابلیت هدایت الکتریکی (μs/cm)
۲۸,۵	کدورت (ntu)

آب معمولی نیز دارای مشخصات اولیه‌ای همانند جدول ۲-۴ است:

جدول ۲-۴- مشخصات اولیه آب معمولی

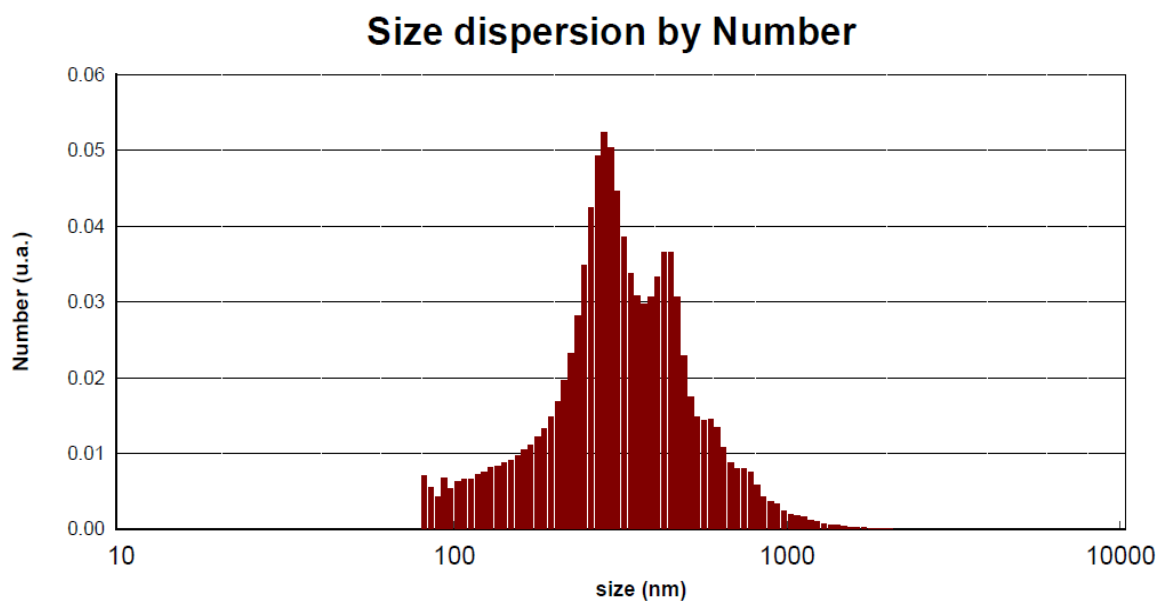
مقادیر	موارد اندازه‌گیری
۲۴,۹	دما (°C)
۸,۱۹	Ph
۵۴۴	قابلیت هدایت الکتریکی (μs/cm)
۱,۲۳	کدورت (ntu)

#### ۴-۱-۲- ابعاد میکرو نانو حباب‌های هوا در آب

آزمایش اندازه‌گیری ابعاد میکرونانوحباب‌های هوا روی نمونه‌ی ۱ روزه و توسط دستگاه Nano Particle Size Analyzer انجام پذیرفت. این آزمایش به روش کومولانت انجام شد. شکل ۴-۱ نمودار اندازه-تعداد به دست آمد. جدول ۴-۳ مشخصات بیشتر نتایج را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۳- مشخصات نمونه میکرونانوحباب

پارامتر	عدد
Zaverage <sup>۱</sup>	۵۹۲,۱۸ nm
Dmean Number <sup>۲</sup>	۳۴۹,۸۴ nm
Dv50 <sup>۳</sup>	۶۷۶,۲۶ nm



شکل ۴-۱- نمودار اندازه-تعداد میکرونانوحباب‌های هوا در آب

<sup>۱</sup> میانگین قطر هیدرودینامیکی

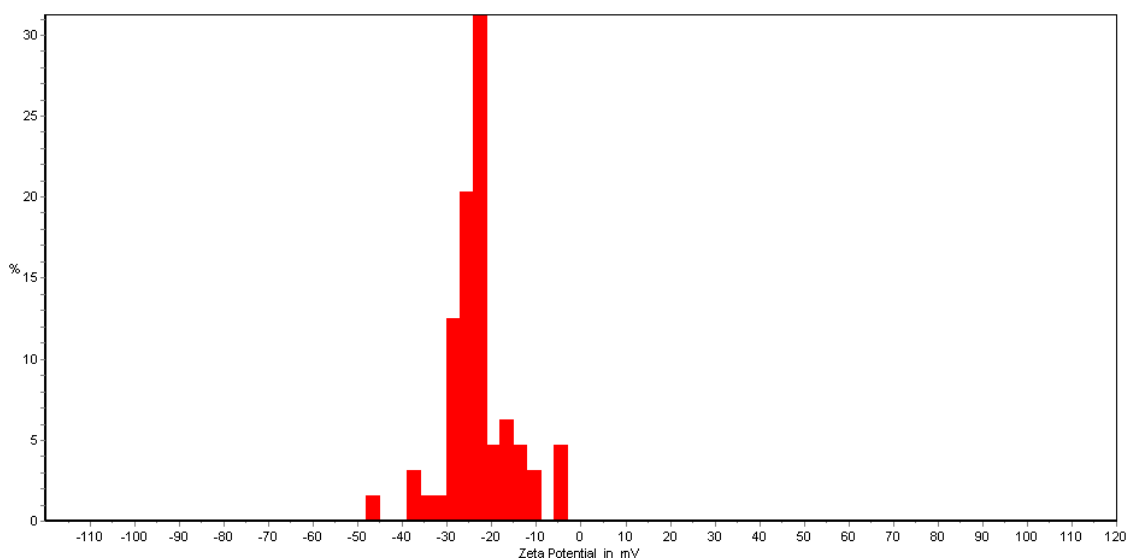
<sup>۲</sup> قطر متوسط نانومیکرو حباب‌ها

<sup>۳</sup> قطری که ۵۰ درصد ذرات از آن ریز تر است.

همان طور که نمودار نشان می دهد اندازه ی کوچک ترین حباب ها تقریبا به میزان ۸۰ nm و بزرگ ترین آن ها تقریبا ۱۱۰۰ nm می باشد. (شیت کامل آزمایش همراه نمودارهای مربوطه در پیوست موجود است)

#### ۴-۱-۳- پایداری میکرونانوحباب های هوا:

آزمایش زتا پتانسیل با دستگاه Zeta compact cad Instrument انجام شد. شکل زیر تغییرات زتا پتانسیل نمونه ۱ روزه آب حاوی میکرونانوحباب را نشان می دهد. (شیت کامل در پیوست موجود است)



شکل ۴-۲- نمودار تغییرات زتا پتانسیل

بازه ی زتا پتانسیل تقریبا بین ۱۵ تا ۳۰ میلی ولت است و میانگین زتا پتانسیل نمونه ۲۸,۳۵mV- می باشد که طبق جدول ۲-۲ اگرچه در بازه ناپایدار قرار دارد ولی طبق ذرات بزرگ تر از ۳۰- در نمودار، می توان گفت که میکرونانوحباب های موجود در آب پایداری چند روزه را تجربه می کنند و مادام العمر نیستند.



#### ۴-۲- آزمایشات فوم بتن

به علت مقایسه‌ای بودن پژوهش بین تاثیر آب معمولی و میکرونانونوحباب (که در ادامه از نام اختصاری آن یعنی "میناب" استفاده خواهیم کرد) فقط یک طرح اختلاط، همان گونه که در فصل سوم شرح داده شد، انتخاب گردید. شایان ذکر است که نمی‌توان به صورت قطع نتایج این بررسی را به دیگر طرح اختلاطها تعمیم داد.

در این پژوهش مجموعاً ۶۰ تکرار آزمایش انجام شد اما نتایج تکرارهای ابتدایی به دلیل آزمون و خطای اولیه آزمایشات و رسیدن به یک روند ثابت، گنجانده نشد. اما نتایج ۱۵ تکرار انتهایی قابل بررسی و بحث می‌باشد. از این تعداد، ۱۱ مورد ابتدایی با مخلوط‌کن آزمایشگاهی و در حجم ۱۰ لیتر ساخته شد و ۴ تکرار نهایی برای تثبیت نتایج و کسب نتایج قطعی در حجم بالا و نزدیک بودن به صنعت، با مخلوط‌کن ۲۰۰ لیتری انجام گرفت. جزئیات و چگونگی این تکرارها به قرار زیر است:

۱. ۲ تکرار ابتدایی با آب معمولی به منظور امکان‌سنجی انجام شد تا هم اطلاعات فنی کاملی از فوم بتن به دست آید و هم این که بتوان معیار خوبی برای ادامه‌ی آزمایشات و مقایسه‌ی دیگر نتایج در دست داشت.

۲. ۶ تکرار بعدی شامل ۳ تکرار با آب معمولی و ۳ تکرار با آب حاوی میکرونانونوحباب انجام شد.

۳. ۳ تکرار بعدی، یک مورد آن با آب معمولی و دو مورد دیگر با میناب انجام شد متذکر می‌شود دو تکرار فرآوری شده با میناب، این تفاوت را داشت که در یک تکرار، اختلاط آب و فوم با آب معمولی، و تکرار دیگر اختلاط آب و فوم با میناب انجام گرفت تا میزان تاثیر این عامل اندازه‌گیری شود.

۴. ۴ تکرار نهایی که ۲ تکرار با آب معمولی و ۲ تکرار با میناب است. برای کاهش خطای آزمایشگاهی و دقیق تر شدن نتایج و هم چنین نزدیک کردن پژوهش به صنعت، این تکرارها در حجم زیاد و در مخلوط کن ۲۰۰ لیتری انجام گرفت.

جدول ۴-۴ نمایان طرح اختلاط آزمایشات است. توضیح برخی اصطلاحات برای فهم بهتر جدول در زیر آمده است:

- چگالی تر عبارتست چگالی درجا پس از پایان فرآوری اختلاط (برحسب کیلوگرم بر لیتر)

- چگالی خشک عبارتست از میانگین چگالی نمونه‌های خشک ۷ روزه و ۲۸ روزه (برحسب کیلوگرم بر لیتر)، چگالی‌های خشک طبق استاندارد ملی ایران به شماره ۱۴۵۰۴ اندازه‌گیری شد.

- میزان فوم مصرفی نیز توسط شلنگ مدرج فوم ژنراتور اندازه‌گیری شد و سپس با استفاده از فرمول چگالی که به ترتیب زیر است اعتبارسنجی شد:

$$\text{چگالی فوم} = \frac{\text{چگالی تر (آب + ماسه + سیمان) - چگالی تر}}{\text{چگالی فوم}} \quad (۱-۴)$$

- در نام‌گذاری طرح اختلاطها M از ابتدای کلمه‌ی لاتین Mixture اخذ شده است.

جدول ۴-۴- طرح اختلاط تکرارها

اختلاط (تکرار)	نوع آب	سیمان	ماسه	آب به سیمان	فوم به آب	حجم فوم مصرفی	چگالی فوم	چگالی تر	چگالی خشک
M1	معمولی	۳۵۰	۳۰۰	۰,۵	۰,۰۴	۰,۸۳	۳۵	۸۵۴	۷۷۱,۵
M2	معمولی	۳۵۰	۳۰۰	۰,۵	۰,۰۴	۰,۴۳	۳۵	۸۴۰	۷۳۴,۶۷
M3	میناب	۳۵۰	۳۰۰	۰,۵	۰,۰۴	۰,۵۵	۴۰	۸۴۷	۸۳۴,۵
M4	میناب	۳۵۰	۳۰۰	۰,۵	۰,۰۴	۰,۵	۴۰	۸۴۵	۷۴۲,۸۳
M5	میناب	۳۵۰	۳۰۰	۰,۵	۰,۰۴	۰,۵	۴۰	۸۴۵	۷۲۷,۴۵
M6	معمولی	۳۵۰	۳۰۰	۰,۵	۰,۰۴	۰,۶۳	۴۰	۸۵۰	۷۸۴,۸۷
M7	معمولی	۳۵۰	۳۰۰	۰,۵	۰,۰۴	۰,۵۸	۴۰	۷۴۲	۸۴۸
M8	معمولی	۳۵۰	۳۰۰	۰,۵	۰,۰۴	۰,۴۳	۴۰	۷۳۹,۷۵	۸۴۲
M9	میناب	۳۵۰	۳۰۰	۰,۵	۰,۰۴	۰,۵۸	۴۰	۸۴۸	۷۵۶,۴۲
M10	میناب+ فوم آب	۳۵۰	۳۰۰	۰,۵	۰,۰۴	۰,۴۳	۳۵	۸۴۰	۷۵۳,۵
M11	معمولی	۳۵۰	۳۰۰	۰,۵	۰,۰۴	۰,۵۷	۳۵	۸۴۵	۷۵۱,۵
M12	معمولی	۳۵۰	۳۰۰	۰,۵	۰,۰۴	۰,۲۹	۳۵	۸۳۵	۷۵۰,۱۲
M13	میناب	۳۵۰	۳۰۰	۰,۵	۰,۰۴	۰,۷۱	۳۵	۸۵۰	۷۷۸,۲
M14	معمولی	۳۵۰	۳۰۰	۰,۶	۰,۰۴	۰,۲۹	۳۵	۸۷۰	۸۰۹,۵
M15	میناب	۳۵۰	۳۰۰	۰,۶	۰,۰۴	۰,۲۹	۳۵	۸۷۰	۷۹۱

مطابق جدول اخیر و استاندارد ملی ایران چگالی‌های مورد آزمون زیر ۱۰۰۰ و جز بلوک‌های غیربرابر دسته‌بندی می‌شوند.

#### ۴-۲-۱- آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت فشاری فوم بتن تحت تأثیر چندین عامل مثل چگالی بتن، سن بتن، رطوبت بتن، مشخصات شیمیایی و مکانیکی اجزای تشکیل دهنده بتن و نسبت‌های اختلاط آن‌ها قرار دارد.

نتایج مقاومت فشاری در سنین ۷ روزه، ۲۸ روزه و ۹۰ روزه گرفته شد در تکرارهای ابتدایی هر سن، حداقل سه نمونه بلوک زیر جک قرار گرفت لازم به ذکر است که مطابق بند ۴ بخش ۴-۲، در ۴ اختلاط آخر به علت بالا بودن حجم اختلاط، تعداد نمونه‌های بیشتری از اختلاط گرفته و در هر سن حداقل ۸ نمونه تحت تست قرار گرفت. هم‌چنین تعداد ۸ نمونه از ۲ تکرار آخر در آزمایشگاه دانشگاه صنعتی شاهرود و توسط جک هیدرولیکی کامپیوتری Toni Technik با سرعت بارگذاری  $0.02 \text{ N.s/mm}^2$  شکسته شد تا تاییدی بر جک هیدرولیکی مکانیکی استفاده شده باشد (شکل ۴-۳). هم‌چنین از دو تکرار آخر و از هر تکرار ۳ نمونه در عمر ۹۰ روز تحت آزمون قرار گرفت.



شکل ۴-۳- نمونه فوم بتن زیر جک آزمون مقاومت فشاری

تعداد نمونه‌های هر اختلاط به ترتیب زیر است که در کل ۱۶۴ نمونه مقاومت فشاری مورد آزمون قرار

گرفت:

جدول ۴-۵- تعداد نمونه‌های هر اختلاط

M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1	اختلاط	
							سن	روزه
۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۷ روزه
۴	۴	۴	۴	۴	۳	۳	۳	۲۸ روزه
-	-	-	-	-	-	-	-	۹۰ روزه

M15	M14	M13	M12	M11	M10	M9	M8	اختلاط	
								سن	روزه
۸	۸	۱۰	۱۰	۳	۳	۳	۳	۳	۷ روزه
۷	۵	۱۹	۱۹	۳	۳	۳	۴	۳	۲۸ روزه
۳	۳	-	-	-	-	-	-	-	۹۰ روزه

در ادامه تمامی نمونه‌ها و اطلاعات مربوط به مقاومت فشاری و چگالی موجود است. لازم به ذکر است

اختلاط M10 (طبق جدول ۴-۴) به دلیل آن که نه کاملاً با میناب و نه کاملاً با آب معمولی فرآوری شده

است در جدول ۴-۵ گنجانده نشده است.

جدول ۴-۶- مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه

آب معمولی-۷روزه		
شماره	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مقاومت فشاری (Mpa)
۱	۷۸۰	۰,۸۳۲
۲	۷۸۴	۰,۸
۳	۷۷۲	۰,۸۳۲
۴	۷۲۳	۰,۷۲
۵	۷۳۳	۰,۷۶۸
۶	۷۲۹	۰,۸
۷	۷۷۱	۰,۸۴۸
۸	۷۸۹	۰,۷۵۲
۹	۷۸۰	۰,۸
۱۰	۷۳۸	۰,۷۸۴
۱۱	۷۵۰	۰,۶۸۸
۱۲	۷۳۲	۰,۸۳۲
۱۳	۷۵۸	۰,۶۴
۱۴	۷۱۸	۰,۸
۱۵	۷۲۹	۰,۶۲۴
۱۶	۷۵۸	۰,۸۸
۱۷	۷۴۹	۰,۷۳۶
۱۸	۷۴۶	۰,۷۸۴
۱۹	۷۵۵	۰,۹۶
۲۰	۷۵۴	۰,۹۶
۲۱	۷۴۷	۰,۸۳۲
۲۲	۷۴۴	۰,۹۱۲
۲۳	۷۴۳	۰,۸
۲۴	۷۴۰	۰,۸
۲۵	۷۳۷	۰,۷۲
۲۶	۷۳۵	۰,۷۲
۲۷	۷۳۳	۰,۷۶۸
۲۸	۷۳۲	۰,۶۸۸

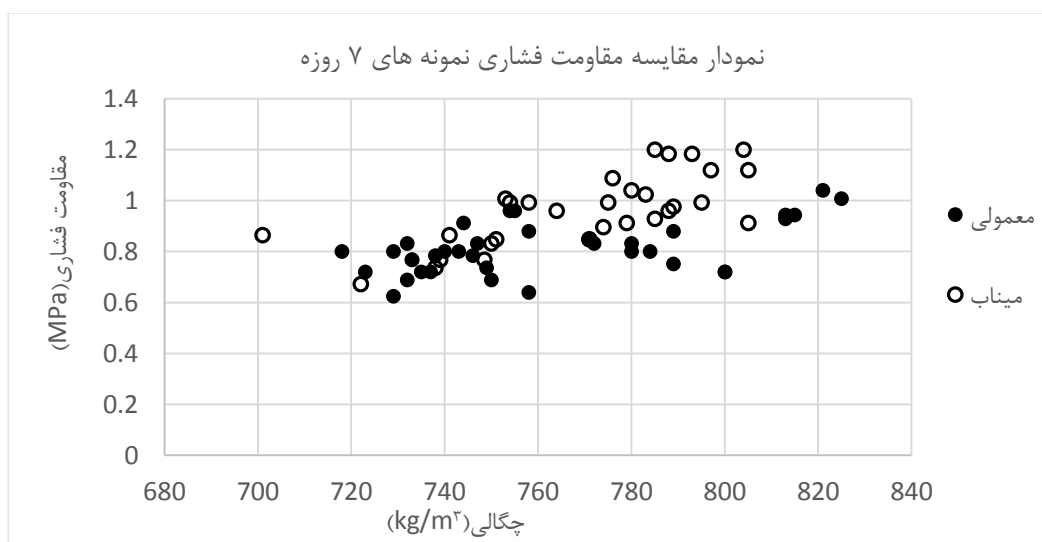
میناب-۷ روزه		
شماره	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مقاومت فشاری (Mpa)
۱	۸۰۵	۰,۹۱۲
۲	۷۸۹	۰,۹۷۶
۳	۷۷۶	۱,۰۸۸
۴	۷۷۹	۰,۹۱۲
۵	۷۵۳	۱,۰۰۸
۶	۷۳۸	۰,۷۳۶
۷	۷۳۹	۰,۷۶۸
۸	۷۲۲	۰,۶۷۲
۹	۷۰۱	۰,۸۶۴
۱۰	۷۵۸	۰,۹۹۲
۱۱	۷۵۴	۰,۹۹۲
۱۲	۷۴۸,۵	۰,۷۶۸
۱۳	۷۹۳	۱,۱۸۴
۱۴	۷۸۸	۱,۱۸۴
۱۵	۷۸۵	۱,۲
۱۶	۷۸۰	۱,۰۴
۱۷	۷۷۵	۰,۹۹۲
۱۸	۷۷۴	۰,۸۹۶
۱۹	۷۶۴	۰,۹۶
۲۰	۷۵۱	۰,۸۴۸
۲۱	۷۵۰	۰,۸۳۲
۲۲	۷۴۱	۰,۸۶۴
۲۳	۸۰۵	۱,۱۲
۲۴	۸۰۴	۱,۲
۲۵	۷۹۷	۱,۱۲
۲۶	۷۹۵	۰,۹۹۲
۲۷	۷۸۸	۰,۹۶
۲۸	۷۸۵	۰,۹۲۸

ادامه‌ی جدول ۴-۶- مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه

آب معمولی-۷ روزه		
شماره	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مقاومت فشاری (Mpa)
۲۹	۸۲۵	۱,۰۰۸
۳۰	۸۲۱	۱,۰۴
۳۱	۸۱۵	۰,۹۴۴
۳۲	۸۱۳	۰,۹۴۴
۳۳	۸۱۳	۰,۹۲۸
۳۴	۸۰۰	۰,۷۲
۳۵	۸۰۰	۰,۷۲
۳۶	۷۸۹	۰,۸۸
میانگین	۷۶۲,۰۸	۰,۸۱

میناب-۷ روزه		
شماره	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مقاومت فشاری (Mpa)
۲۹	۷۸۳	۱,۰۲۴
۳۰	۷۷۱	۰,۸۴۸
میانگین	۷۶۹,۷	۰,۹۶

در نمودار چگالی-مقاومت فشاری مربوط به جدول ۴-۶ که در زیر مشخص است تمرکز نمونه‌های معمولی روی چگالی‌های کمتر از نمونه‌های میناب است البته با توجه به سطر میانگین در جدول ۴-۶ اختلاف کل چگالی، عدد ناچیز ۶ گرم را نشان می‌دهد و نمونه‌های میناب حدود ۱۸ درصد افزایش مقاومت فشاری را در پی داشته است.



شکل ۴-۴- نمودار مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه

جدول ۴-۷- مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه

آب معمولی- ۲۸ روزه		
شماره	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مقاومت فشاری (Mpa)
۱	۷۷۰	۰,۸۹۶
۲	۷۶۳	۰,۹۹۲
۳	۷۶۰	۰,۹۷۶
۴	۷۴۰	۰,۸۹۶
۵	۷۳۲	۰,۹۹۲
۶	۷۵۱	۰,۹۴۴
۷	۸۰۸	۰,۹۶
۸	۷۹۰	۰,۹۲۸
۹	۷۸۹	۰,۸۸
۱۰	۷۷۲	۰,۹۲۸
۱۱	۷۶۰	۰,۹۶
۱۲	۷۵۰	۰,۸۸
۱۳	۷۴۶	۰,۸۴۸
۱۴	۷۲۰	۰,۸۸
۱۵	۸۶۲	۱,۰۴
۱۶	۷۴۲	۰,۸۹۶
۱۷	۷۱۱	۰,۷۸۴
۱۸	۶۶۳	۰,۷۲
۱۹	۷۵۶	۰,۹۷۶
۲۰	۷۵۲	۰,۸۴۸
۲۱	۷۴۸	۰,۷۵۲
۲۲	۷۹۲	۱,۲۸
۲۳	۷۹۲	۰,۹۶
۲۴	۷۸۲	۱,۱۶۸
۲۵	۷۸۰	۱,۱۲
۲۶	۷۷۲	۱,۰۸۸
۲۷	۷۶۳	۱,۰۴
۲۸	۷۵۸	۰,۸

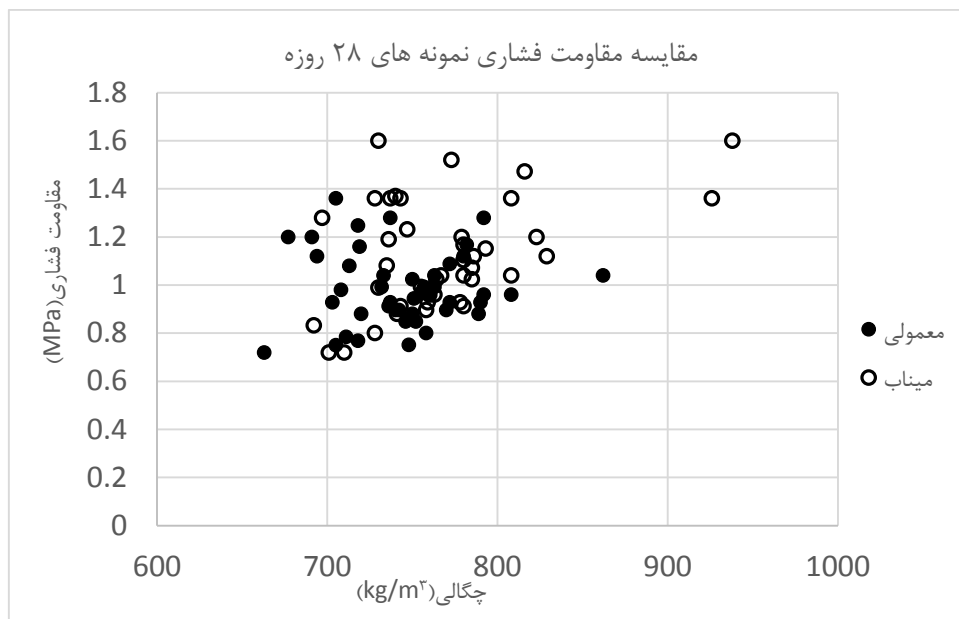
میناب- ۲۸ روزه		
شماره	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مقاومت فشاری (Mpa)
۱	۹۳۸	۱,۶
۲	۹۲۶	۱,۳۶
۳	۸۲۹	۱,۱۲
۴	۸۲۳	۱,۲
۵	۷۸۰	۰,۹۱۲
۶	۷۴۳	۰,۹۱۲
۷	۷۰۱	۰,۷۲
۸	۶۹۲	۰,۸۳۲
۹	۷۵۸	۰,۸۹۶
۱۰	۷۴۱	۰,۸۸
۱۱	۷۲۸	۰,۸
۱۲	۷۱۰	۰,۷۲
۱۳	۷۶۴	۱,۰۲۴
۱۴	۷۵۵	۰,۹۹۲
۱۵	۷۵۹	۰,۹۲۸
۱۶	۸۱۶	۱,۴۷۲
۱۷	۸۰۸	۱,۳۶
۱۸	۸۰۸	۱,۰۴
۱۹	۷۹۳	۱,۱۵۲
۲۰	۷۸۶	۱,۱۲
۲۱	۷۸۵	۱,۰۷۲
۲۲	۷۸۵	۱,۰۲۴
۲۳	۷۸۰	۱,۰۴
۲۴	۷۸۰	۱,۱۰۴
۲۵	۷۸۰	۱,۱۶۸
۲۶	۷۷۸	۰,۹۲۸
۲۷	۷۶۳	۰,۹۶
۲۸	۷۶۰	۰,۹۶



ادامه‌ی جدول ۷-۴- مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه

آب معمولی-۲۸ روزه			میناب-۲۸ روزه		
شماره	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مقاومت فشاری (Mpa)	شماره	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مقاومت فشاری (Mpa)
۲۹	۷۵۷	۰,۹۹۲	۲۹	۷۷۳	۱,۵۲
۳۰	۷۳۷	۱,۲۸	۳۰	۷۴۷	۱,۲۳۲
۳۱	۷۳۷	۰,۹۲۸	۳۱	۷۴۳	۱,۳۶
۳۲	۷۳۶	۰,۹۱۲	۳۲	۷۳۷	۱,۳۶
۳۳	۷۳۳	۱,۰۴	۳۳	۷۳۰	۱,۶
۳۴	۷۱۸	۰,۷۶۸	۳۴	۷۲۸	۱,۳۶
۳۵	۷۱۸	۱,۲۴۸	۳۵	۶۹۷	۱,۲۸
۳۶	۷۰۵	۱,۳۶	۳۶	۷۷۹	۱,۲
۳۷	۶۹۱	۱,۲	۳۷	۷۶۷	۱,۰۴
۳۸	۶۹۴	۱,۱۲	۳۸	۷۴۰	۱,۳۷
۳۹	۶۷۷	۱,۲	۳۹	۷۳۶	۱,۱۹
۴۰	۷۵۰	۱,۰۲۴	۴۰	۷۳۵	۱,۰۸۱
۴۱	۷۰۳	۰,۹۲۸	۴۱	۷۳۰	۰,۹۹
۴۲	۷۱۹	۱,۱۶	میانگین	۷۶۸,۵	۱,۱۲
۴۳	۷۱۳	۱,۰۸			
۴۴	۷۰۸	۰,۹۸			
۴۵	۷۰۵	۰,۷۵			
میانگین	۷۴۵	۰,۹۹			

نمودار شکل ۴-۵ مربوط به جدول ۷-۴ به خوبی پراکندگی داده‌ها را نشان می‌دهد، اختلاف چگالی نمونه‌های معمولی و میناب‌دار کمی بیشتر بوده و با توجه به جدول ۷-۴ عدد ۲۳ گرم را نشان می‌دهد و مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی میناب، افزایش ۱۳ درصدی را در پی داشته است.



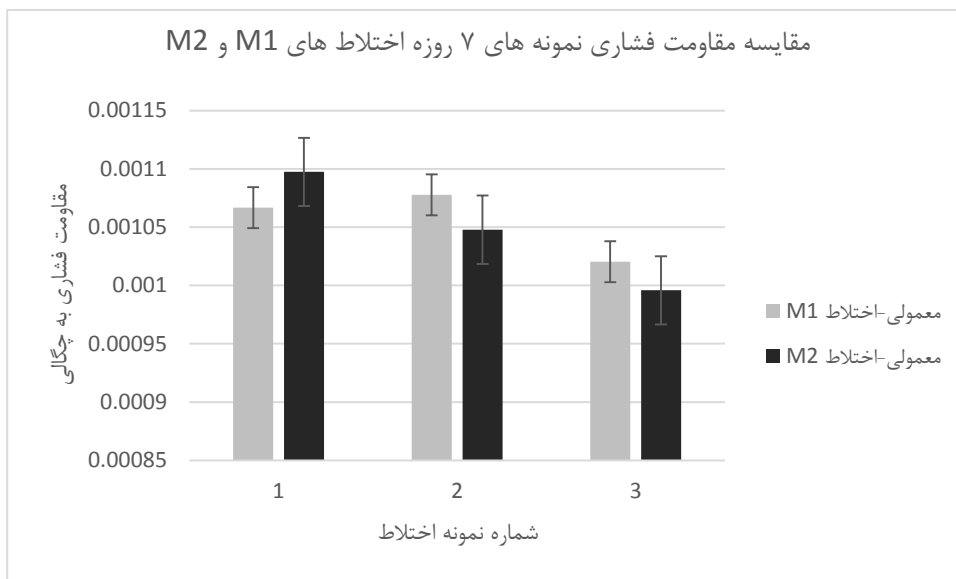
شکل ۴-۵- نمودار مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه

در ادامه بصورت مفصل روی نتایج اختلاطها بحث خواهد شد. لازم به ذکر است به علت این که در فوم بتن، چگالی از اهمیت بسیاری برخوردار است و عامل موثر در میزان مقاومت فشاری محسوب می‌شود لذا سنجش تاثیر میناب و آب معمولی باید با پارامتری معرفی شود که بتواند هر دو عامل مقاومت و چگالی را در خود داشته باشد (چرا که ممکن است بیشتر بودن چگالی یک نمونه باعث بیشتر شدن مقاومت شده باشد). لذا در نمودارهایی که در ادامه خواهیم دید، محور افقی معرف شماره نمونه هر اختلاط است و نمودار

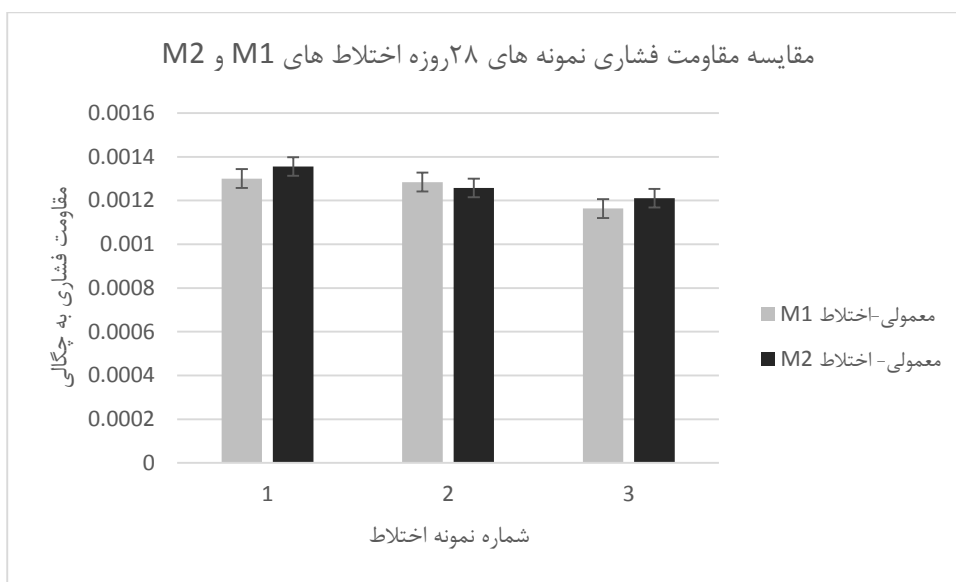
$$\text{عمودی نسبت} \frac{\text{مقاومت فشاری}}{\text{چگالی}} \text{ می‌باشد.}$$

✓ به منظور امکان سنجی و لمس حدودی اعداد و ارقام، اختلاطهای M1 و M2 با آب معمولی، در

یک روز و تحت شرایط یکسان، فرآوری شد. نمودارها و جدول در ادامه نتایج را نشان می‌دهد:



شکل ۴-۶- نمودار مقایسه مقاومت فشاری نمونه های ۷ روزه اختلاط های M1 و M2



شکل ۴-۷- نمودار مقایسه مقاومت فشاری نمونه های ۲۸ روزه اختلاط های M1 و M2

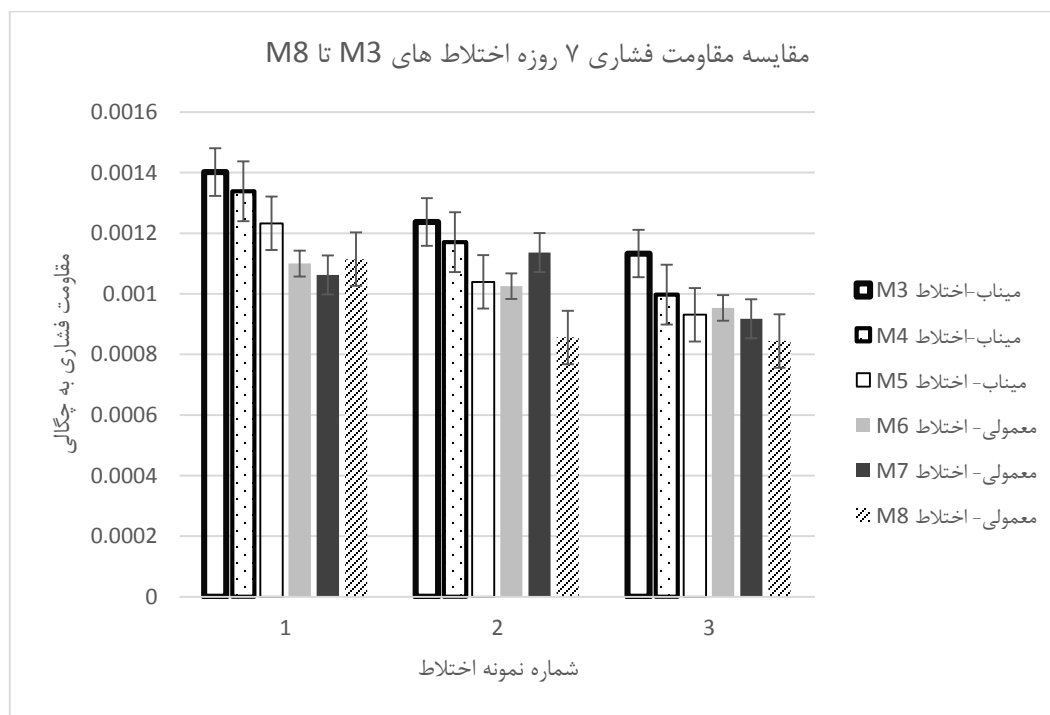
حد وسط نتایج دو اختلاط اخیر به صورت زیر است:

جدول ۴-۸- میانگین نتایج طرح اختلاط‌های M1 و M2

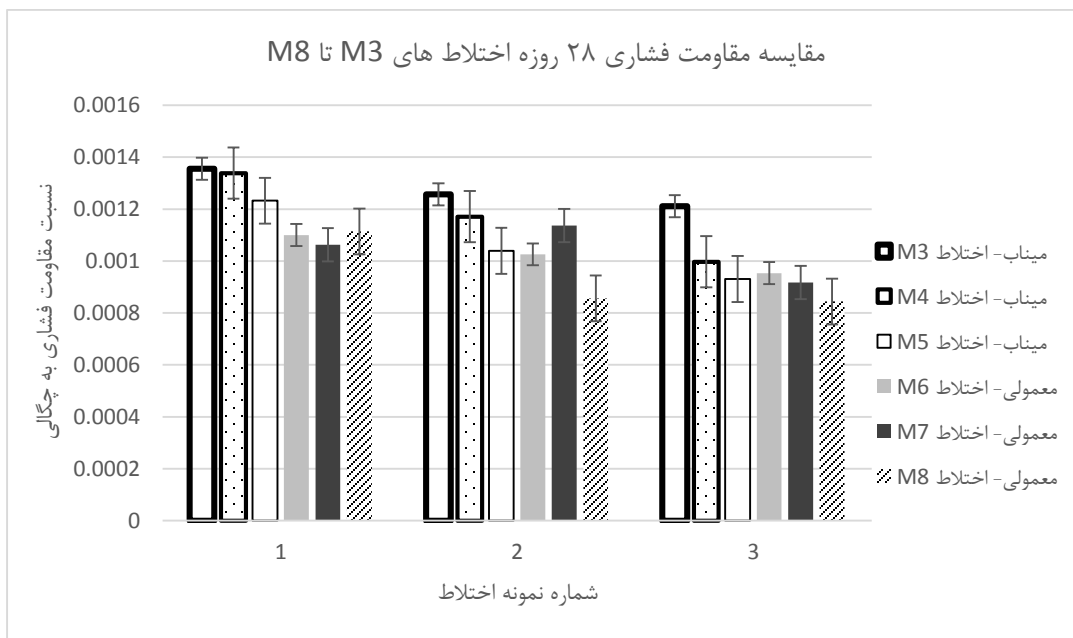
میانگین نتایج نمونه‌های اختلاط M1 و M2			
۷ روزه		۲۸ روزه	
چگالی	مقاومت	چگالی	مقاومت
۷۵۳,۵	۰,۷۹	۷۵۲,۶۷	۰,۹۵

✓ اختلاط‌های M3 تا M5 با میناب و M6 و M8 با آب معمولی، در یک روز و در شرایط یکسان فرآوری

شده تا اولین بررسی تاثیر میناب و آب معمولی باشد و نتایج به ترتیب زیر است:



شکل ۴-۸- نمودار مقایسه مقاومت فشاری ۷ روزه اختلاط‌های M3 تا M8



شکل ۹-۴- نمودار مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه اختلاط های M3 تا M8

میانگین اختلاط های M3 تا M5 و M6 تا M8 در دوجداول جداگانه آورده شده است:

جدول ۹-۴- میانگین مقاومت فشاری و چگالی نمونه های اختلاط های M3 تا M5

میانگین اختلاط های M3، M4 و M5			
روزه ۷		روزه ۲۸	
چگالی	مقاومت	چگالی	مقاومت
۷۵۵,۷۸	۰,۸۸	۷۸۰,۷۵	۱,۰۰

جدول ۱۰-۴- میانگین مقاومت فشاری و چگالی نمونه های اختلاط های M6 تا M8

میانگین اختلاط های M6، M7 و M8			
روزه ۷		روزه ۲۸	
چگالی	مقاومت	چگالی	مقاومت
۷۵۱,۶۷	۰,۷۵	۷۵۹,۴۲	۰,۸۹

جدول ۴-۱۱ نشان دهنده‌ی نتیجه اولیه و محاسبه‌ی درصد رشد مقاومت نمونه‌های ساخته شده با میناب، نسبت به نمونه‌های معمولی است. لازم به ذکر است که چون چگالی عامل موثر و تعیین کننده‌ای در میزان مقاومت فشاری است، اختلاف چگالی نیز محاسبه شده است. فرمول زیر نحوه‌ی محاسبه این دو پارامتر است:

$$\text{درصد رشد مقاومت} = \frac{\text{مقاومت نمونه معمولی} - \text{مقاومت نمونه میناب}}{\text{مقاومت نمونه معمولی}} \quad (۴-۲)$$

$$\text{اختلاف چگالی} = \frac{\text{چگالی نمونه معمولی} - \text{چگالی نمونه میناب}}{\text{چگالی نمونه معمولی}} \quad (۴-۳)$$

لازم به ذکر است عدد مثبت در ستون چگالی نشان دهنده‌ی بیشتر بودن چگالی میناب دار است:

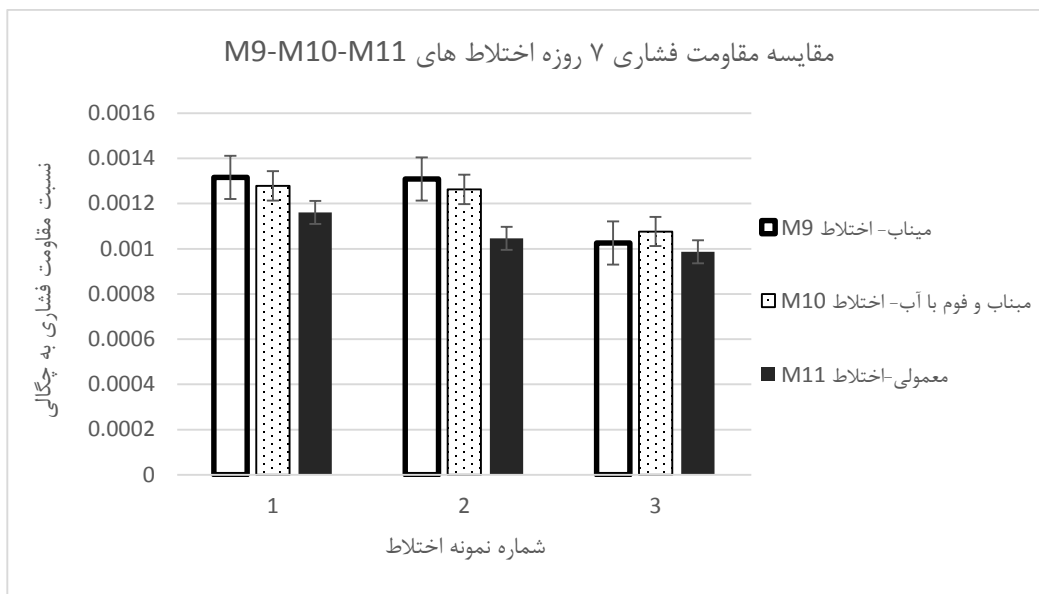
جدول ۴-۱۱- درصد رشد مقاومت فشاری با مقایسه اختلاط‌های M3 تا M8

درصد رشد مقاومت با مقایسه‌ی اختلاط‌های M3-M4-M5 و M6-M7-M8			
۷ روزه		۲۸ روزه	
چگالی	مقاومت	چگالی	مقاومت
٪۱	٪۱۷	٪۳	٪۱۲

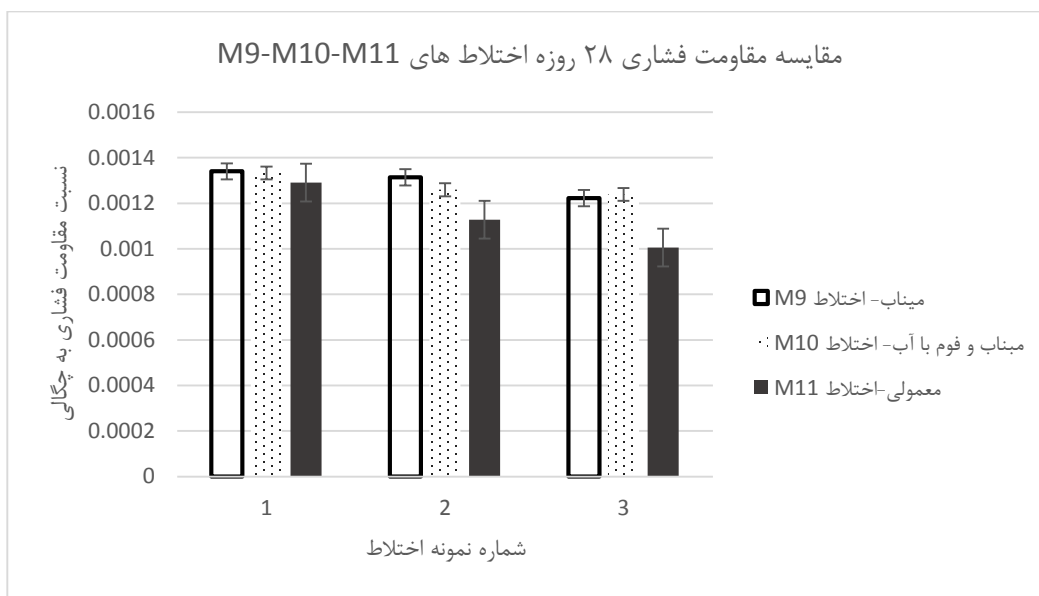
✓ برای فهم این مساله که تفاوت میزان تاثیر فوم فرآوری شده با میناب و فوم فرآوری شده با آب

معمولی، چه میزان به روی مقاومت فشاری تاثیر دارد اختلاط‌های M9 الی M11 انجام شد که

نتایج به شرح زیر است:



شکل ۴-۱۰- نمودار مقایسه مقاومت فشاری ۷ روزه اختلاط های M9 تا M11



شکل ۴-۱۱- نمودار مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه اختلاط های M9 الی M11

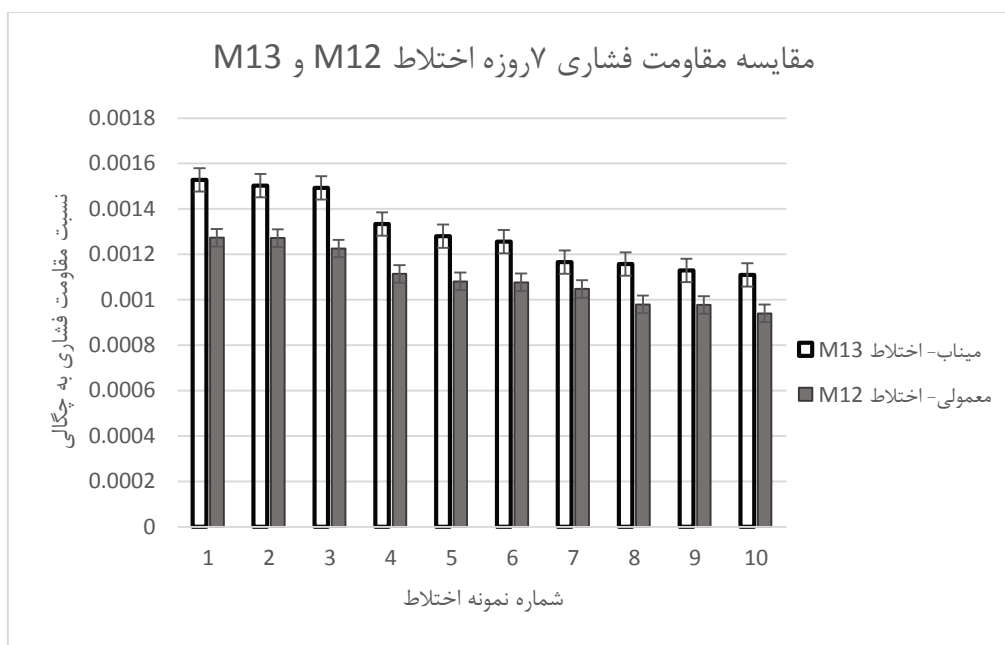
لذا با توجه به نتایج درصد رشد مقاومت فشاری با فوم فرآوری شده با میناب و فوم فرآوری شده با آب

معمولی مشخص گردید:

جدول ۴-۱۲- نتایج آزمون مقاومت فشاری تکرارهای M9 الی M11

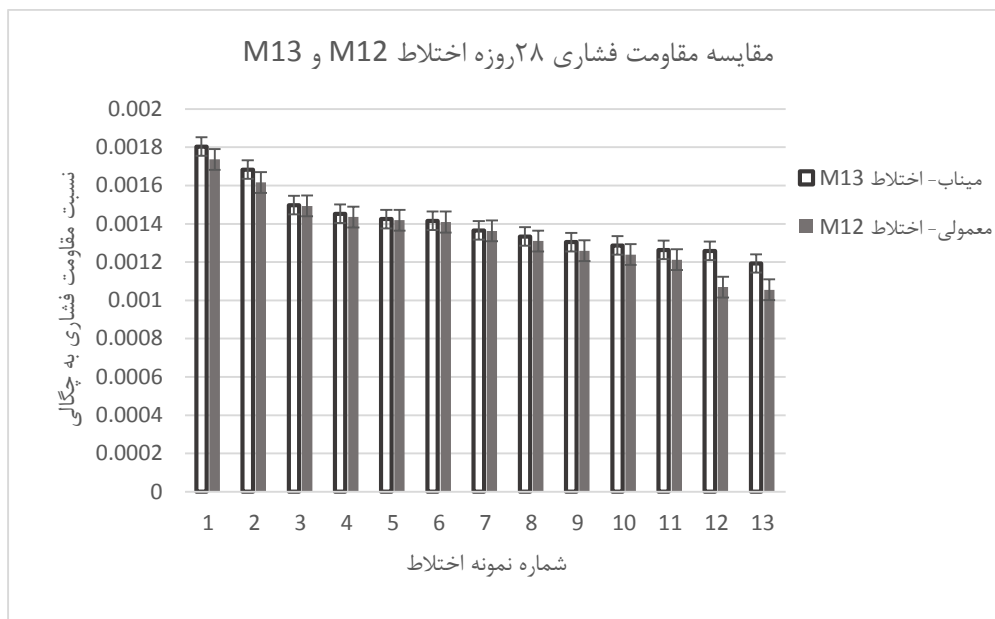
درصد رشد مقاومت با مقایسه ی "نمونه کامل با میناب" و نمونه "میناب و فوم با آب"			
۷ روزه		۲۸ روزه	
چگالی	مقاومت	چگالی	مقاومت
۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۲

✓ نتایج در اختلاط‌های M12 و M13 به ترتیب نمودارهای زیر است:



شکل ۴-۱۲- نمودار مقایسه مقاومت فشاری ۷ روزه اختلاط‌های M12 و M13





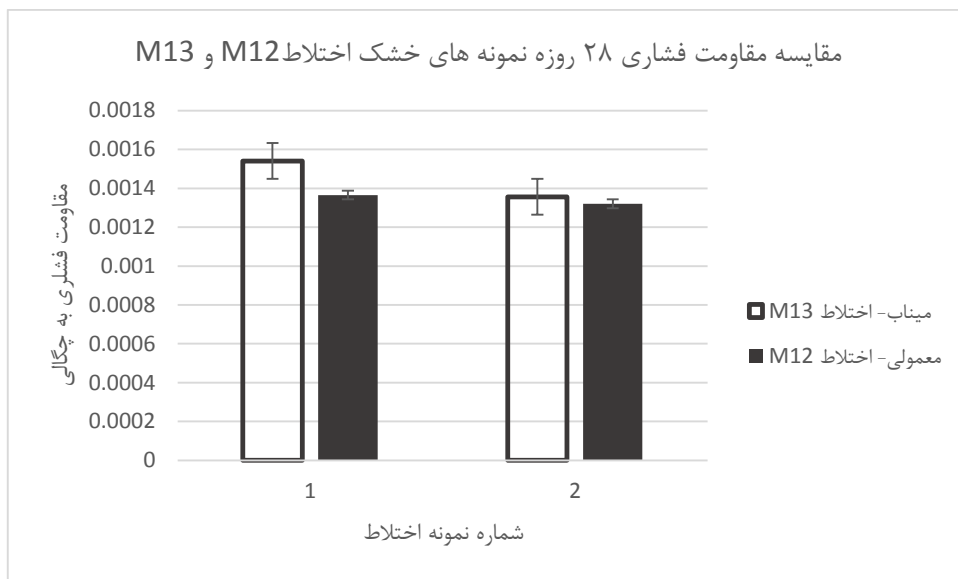
شکل ۴-۱۳- نمودار مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه اختلاطهای M13 و M12

با مقایسه دو تکرار اخیر، نتایج به صورت زیر به دست آمد:

جدول ۴-۱۳- درصد رشد مقاومت فشاری با مقایسه تکرارهای M13 و M12

درصد رشد مقاومت با مقایسه اختلاطهای M13 و M12			
۷ روزه		۲۸ روزه	
چگالی	مقاومت	چگالی	مقاومت
۰,۰۴	۰,۲۳	۰,۰۴	۰,۰۸

آزمون دیگری که در تکرارهای M13 و M12 گرفته شد، حالت خشک شده نمونه‌های ۲۸ روزه در آون بود تا میزان تغییر مقاومت نمونه‌های کاملاً خشک شده ۲۴ ساعته تحت دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد را اندازه‌گیری کنیم:



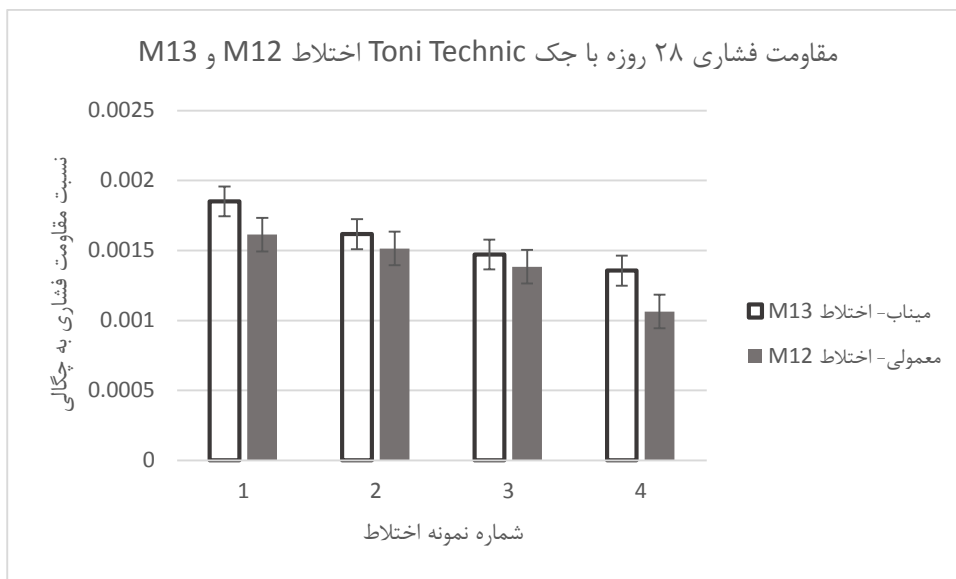
شکل ۴-۱۴- نمودار مقایسه مقاومت فشاری نمونه های خشک ۲۸ روزه اختلاط های M12 و M13

میزان افزایش مقاومت فشاری نیز در این حالت در جدول زیر آورده شده است:

جدول ۴-۱۴- نتایج نمونه های خشک شده در آون، اختلاط های M12 و M13، و محاسبه رشد مقاومت فشاری

درصد رشد مقاومت با مقایسه اختلاط های M12 و M13 - حالت نمونه ۲۸ روزه خشک	
چگالی	مقاومت
۰,۰۶	۰,۱۵

به منظور اعتبار سنجی نتایج اخذ شده توسط جک هیدرولیکی مکانیکی موجود در آزمایشگاه مشهد، تعداد ۸ نمونه از اختلاط های M12 و M13 به شاهرود انتقال داده شد و با جک هیدرولیکی کامپیوتری موجود در آزمایشگاه بتن دانشگاه صنعتی شاهرود، تحت سرعت بارگذاری ۰,۰۲ نیوتون ثانیه بر میلی متر مربع، مقاومت ها اندازه گرفته شد.



شکل ۴-۱۵- نمودار مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه اختلاطهای M13 و M12 با جک Toni Technic

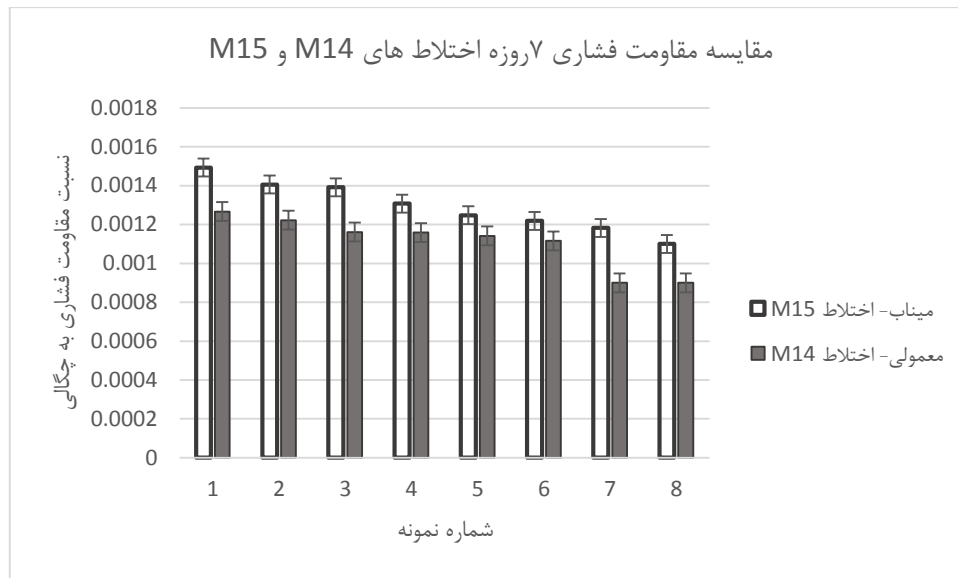
میزان رشد مقاومت فشاری نتایج نمونه‌های تست شده با جک دانشگاه صنعتی شاهرود اختلاطهای

M13 و M12 در جدول زیر آمده است:

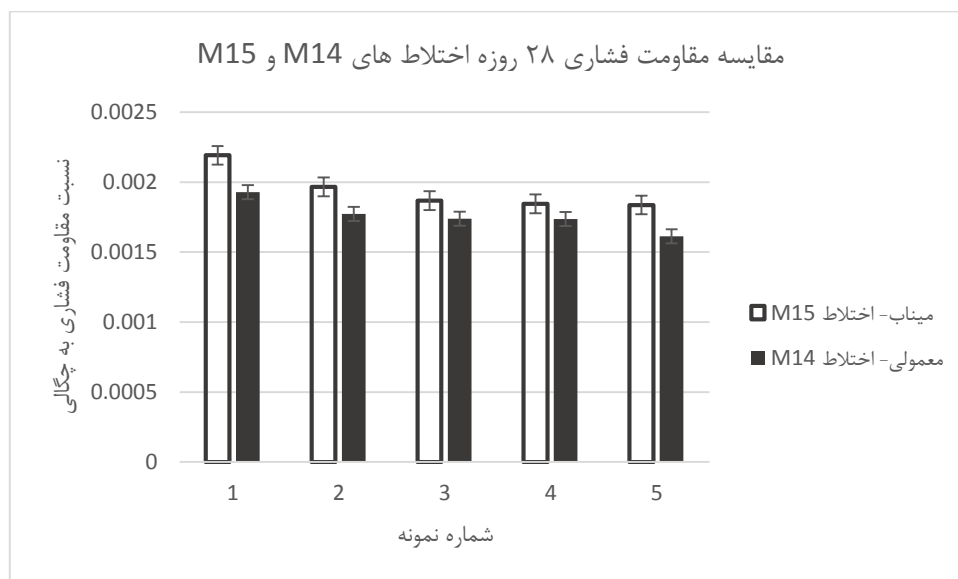
جدول ۴-۱۵- محاسبه رشد مقاومت فشاری اختلاطهای M13 و M12

درصد رشد مقاومت فشاری ۲۸ روزه با قیاس اختلاطهای M13 و M12 - جک آزمایشگاه شاهرود	
۲۸ روزه	
چگالی	مقاومت
۰,۰۳	۰,۱۷

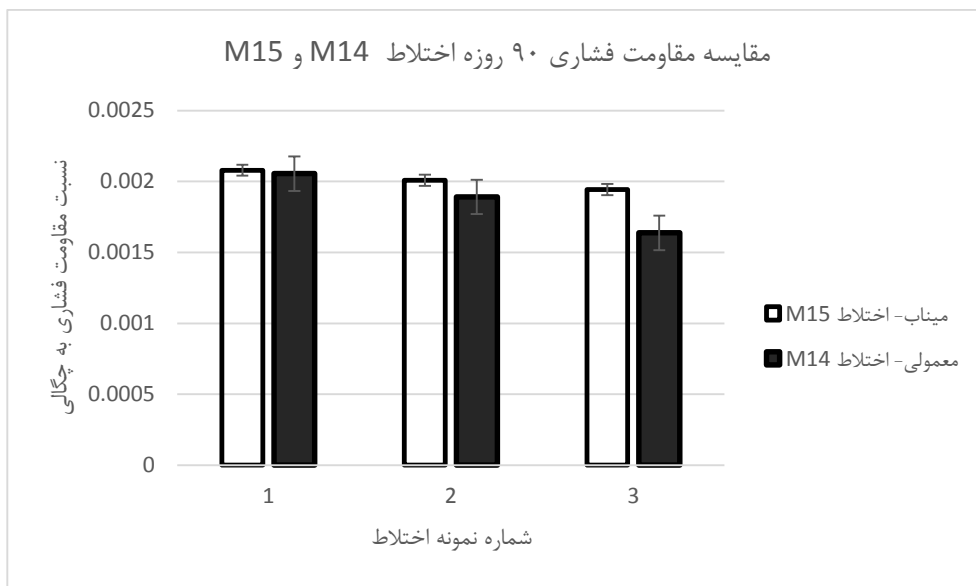
✓ در انتها، نتایج دو اختلاط آخر نیز به ترتیب زیر است:



شکل ۴-۱۶- نمودار مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه اختلاط‌های M15 و M14



شکل ۴-۱۷- نمودار مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه اختلاط‌های M15 و M14



شکل ۴-۱۸- نمودار مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های ۹۰ روزه اختلاط‌های M15 و M14

محاسبه‌ی تاثیر میناب بر مقاومت فشاری در اختلاط‌های M15 و M14 در جدول زیر:

جدول ۴-۱۶- درصد رشد مقاومت فشاری با مقایسه نتایج اختلاط‌های M15 و M14

درصد رشد مقاومت فشاری با مقایسه ی اختلاط‌های M15 و M14					
۷ روزه		۲۸ روزه		۹۰ روزه	
چگالی	مقاومت	چگالی	مقاومت	چگالی	مقاومت
-۰,۰۲	۰,۱۴	۰,۰۶	۰,۱۳	-۰,۰۳	۰,۰۵

❖ میانگین گیری از کل تکرارها و نتایج آن‌ها نیز گرفته شد (بجز اختلاط M10 که هدف از انجام آن مقایسه

کف فوم بود) که به ترتیب زیر است:

جدول ۴-۱۷- درصد رشد مقاومت فشاری با مقایسه میانگین کل نتایج

۷ روزه			
چگالی		مقاومت	
معمولی	میناب	معمولی	میناب
۷۶۲,۰۸	۷۶۹,۷۱	۰,۸۱	۰,۹۶
درصد رشد مقاومت			
چگالی		مقاومت	
۰,۰۱		۰,۱۸	

۲۸ روزه			
چگالی		مقاومت	
معمولی	میناب	معمولی	میناب
۷۴۵	۷۶۸,۵۶	۰,۹۹	۱,۱۲
درصد رشد مقاومت			
چگالی		مقاومت	
۰,۰۳		۰,۱۳	

همان‌گونه که از نتایج برمی‌آید در مقاومت ۷ روزه با چگالی یکسان، نمونه‌های میناب‌دار ۱۸ درصد افزایش مقاومت دارند.

در سن ۲۸ روزه نیز مقاومت نمونه‌های میناب‌دار ۱۳ درصد افزایش داشته است اگرچه نمونه‌های آب معمولی ۳ درصد چگالی کمتری نسبت به نمونه‌های میناب‌دار داشته است که عددی قابل اغماض است. در سن ۹۰ روز، فقط ۶ نمونه از دو اختلاط مورد آزمایش قرار گرفت، با توجه به جدول ۴-۱۶، علی‌رغم این‌که چگالی نمونه‌های میناب به میزان ۲ درصد کمتر از نمونه‌های معمولی است مقاومت فشاری به میزان ۵

درصد افزایش داشته است. در جدول ۴-۱۸ نتایج دیگر دانشمندان در حوزه نانوذرات و بتن جهت مقایسه با نتایج آزمایشات آورده شده است:

جدول ۴-۱۸- نتایج دانشمندان در حوزه‌ی نانوذرات و بتن

توضیحات	نانوذره مورد استفاده	دانشمند
افزایش مقاومت فشاری تا حداقل ۲۴٪	میکرو نانو سیلیس در بتن سبک	راهی (۱۳۹۰)
افزایش مقاومت فشاری تا ۲۰٪	نانوتیتانیوم تا ۱ درصد در بتن	Nazari et al(2010)
افزایش مقاومت فشاری	نانواکسید مس <sup>۱</sup> تا ۴ درصد در بتن	Nazari et al(2011)
افزایش مقاومت فشاری تا ۳۰٪	نانواکسیدسیلیس در بتن	Boshehrian et al(2011)
افزایش مقاومت فشاری تا ۷۰٪	نانواکسید آهن تا ۳ درصد در بتن	Abdoli yazdi(2011)
افزایش مقاومت فشاری تا ۷۰٪	نانولوله‌های کربنی در بتن سبک	Yakovlev(2006)
افزایش مقاومت فشاری تا ۱۹٪	میناب در بتن	Arefi(2016)

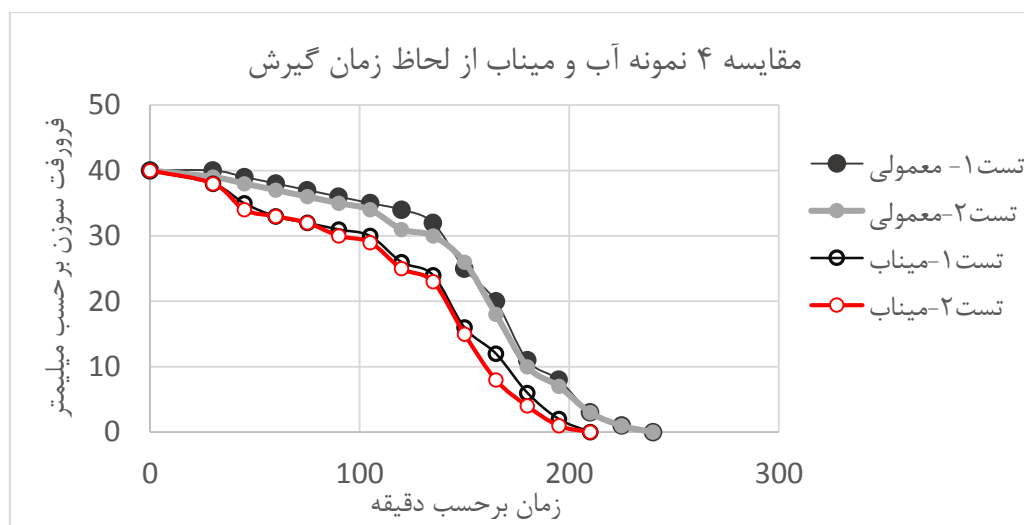
#### ۴-۲-۲- آزمایش گیرش سیمان

نتایج این آزمایش که در زیر آمده است نشان دهنده‌ی کاهش زمان گیرش خمیر سیمان میناب‌دار نسبت به نمونه‌ی ساخته شده با آب معمولی است. همانطور که در فصل قبل گفته شد طرح اختلاط این آزمایش طبق استاندارد ملی ایران و با توجه به غلظت نرمال، ۶۵۰ گرم سیمان و ۱۶۲,۵ گرم آب است.

<sup>۱</sup> Nano-CuO

جدول ۴-۱۹- نتایج آزمون سوزن ویکتات به‌روی خمیر سیمان -آب معمولی و میناب

آب معمولی				میناب			
تست ۱		تست ۲		تست ۱		تست ۲	
زمان(دقیقه)	فرورفت	زمان(دقیقه)	فرورفت	زمان(دقیقه)	فرورفت	زمان(دقیقه)	فرورفت
۰	۴۰	۰	۴۰	۰	۴۰	۰	۴۰
۳۰	۴۰	۳۰	۳۹	۳۰	۳۸	۳۰	۳۸
۴۵	۳۹	۴۵	۳۸	۴۵	۳۵	۴۵	۳۴
۶۰	۳۸	۶۰	۳۷	۶۰	۳۳	۶۰	۳۳
۷۵	۳۷	۷۵	۳۶	۷۵	۳۲	۷۵	۳۲
۹۰	۳۶	۹۰	۳۵	۹۰	۳۱	۹۰	۳۰
۱۰۵	۳۵	۱۰۵	۳۴	۱۰۵	۳۰	۱۰۵	۲۹
۱۲۰	۳۴	۱۲۰	۳۱	۱۲۰	۲۶	۱۲۰	۲۵
۱۳۵	۳۲	۱۳۵	۳۰	۱۳۵	۲۴	۱۳۵	۲۳
۱۵۰	۲۵	۱۵۰	۲۶	۱۵۰	۱۶	۱۵۰	۱۵
۱۶۵	۲۰	۱۶۵	۱۸	۱۶۵	۱۲	۱۶۵	۸
۱۸۰	۱۱	۱۸۰	۱۰	۱۸۰	۶	۱۸۰	۴
۱۹۵	۸	۱۹۵	۷	۱۹۵	۲	۱۹۵	۱
۲۱۰	۳	۲۱۰	۳	۲۱۰	۰	۲۱۰	۰
۲۲۵	۱	۲۲۵	۱	-	-	-	-
۲۴۰	۰	۲۴۰	۰	-	-	-	-



شکل ۴-۱۹- نمودار مقایسه ۴ نمونه از لحاظ زمان گیرش خمیر سیمان

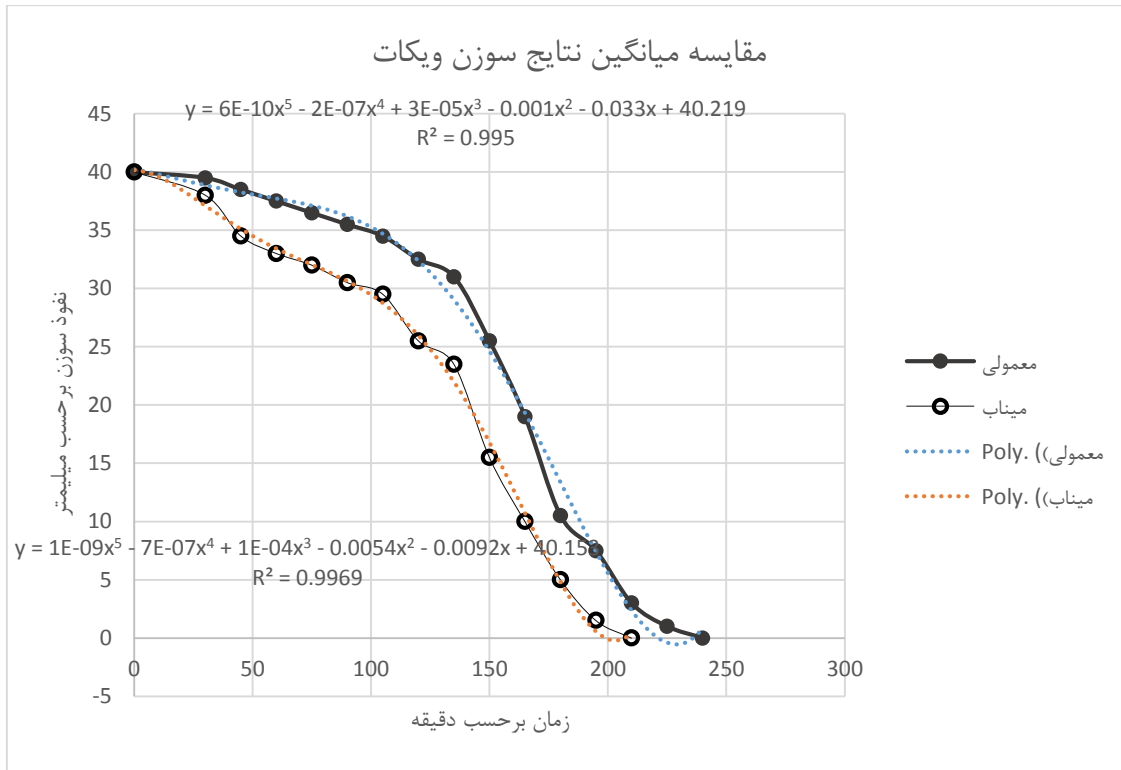


میانگین گیری از نتایج جدول ۴-۱۹:

جدول ۴-۲۰- میانگین نتایج آزمون سوزن ویکتات به روی خمیر سیمان

آب معمولی		میناب	
فرورفت	زمان(دقیقه)	فرورفت	زمان(دقیقه)
۴۰	۰	۴۰	۰
۳۹,۵	۳۰	۳۸	۳۰
۳۸,۵	۴۵	۳۴,۵	۴۵
۳۷,۵	۶۰	۳۳	۶۰
۳۶,۵	۷۵	۳۲	۷۵
۳۵,۵	۹۰	۳۰,۵	۹۰
۳۴,۵	۱۰۵	۲۹,۵	۱۰۵
۳۲,۵	۱۲۰	۲۵,۵	۱۲۰
۳۱	۱۳۵	۲۳,۵	۱۳۵
۲۵,۵	۱۵۰	۱۵,۵	۱۵۰
۱۹	۱۶۵	۱۰	۱۶۵
۱۰,۵	۱۸۰	۵	۱۸۰
۷,۵	۱۹۵	۱,۵	۱۹۵
۳	۲۱۰	۰	۲۱۰
۱	۲۲۵	-	-
۰	۲۴۰	-	-

نمودار میانگین نتایج، برای مقایسه‌ی بهتر:



شکل ۴-۲۰- نمودار مقایسه میانگین ۴ نمونه آزمون سوزن ویکات

آن چنان که از نتایج برمی‌آید میزان نفوذ اولیه که برابر ۲۵ میلیمتر است و میزان نفوذ ثانویه که برابر با صفر میلی‌متر یا به عبارتی گیرش نهایی سیمان است در دو مدل آب به قرار زیر است:

جدول ۴-۲۱- زمان گیرش اولیه و نهایی

نوع آب	گیرش اولیه	گیرش نهایی
میناب	۱۱۹	۲۱۰
معمولی	۱۴۷	۲۴۰

مطالعات اخیر در زمینه کاربرد نانو مواد و زمان گیرش در جدول ۴-۲۲:

جدول ۴-۲۲- مقایسه نتایج دانشمندان در زمینه استفاده از نانوذرات برای تغییر زمان گیرش

توضیحات	نانوذره مورد استفاده	دانشمند
به تاخیر انداختن زمان گیرش بتن	نانواکسید روی <sup>۱</sup> در بتن	Behfarnia et al,2013
افزایش زمان گیرش اولیه و نهایی	نانواکسید سیلیسیم <sup>۲</sup> به مقدار حداکثر ۴٪ در بتن	Reddy Babu, 2013
کاهش زمان گیرش اولیه و نهایی بتن	نانو اکسید آهن <sup>۳</sup> در بتن	Nazari et al,2010

نتیجه‌ی پژوهش انجام شده نیز حاکی از شباهت عملکرد میکرو-نانو حباب‌های هوا و نانو اکسید آهن در بتن دارد.

#### ۴-۲-۳- آزمایش گیرش فوم بتن با دستگاه سوزن و یکات توسعه یافته:

این آزمایش به‌روی نمونه‌های تکرارهای مختلف انجام شد و تفاوت آن با آزمایش زمان گیرش بخش قبل، قطر سوزن است. با توجه به این که نمونه تحت آزمایش خمیر سیمان نیست و نمونه فوم بتن است لذا زمان بیشتری برای اتمام آزمایش نیاز است. هدف، مقایسه زمان گیرش نمونه‌های میناب دار و نمونه‌های ساخته شده با آب معمولی است. این آزمون در همه‌ی تکرارها انجام شد (به جز تکرارهای M9 الی M11). برای بهتر شدن مقایسه از همه نتایج میانگین‌گیری انجام شد که به شرح جدول ۴-۲۳ است:

<sup>۱</sup> Nano-ZnO

<sup>۲</sup> SiO<sub>2</sub>

<sup>۳</sup> Nano-Fe<sup>2</sup>O<sup>3</sup>

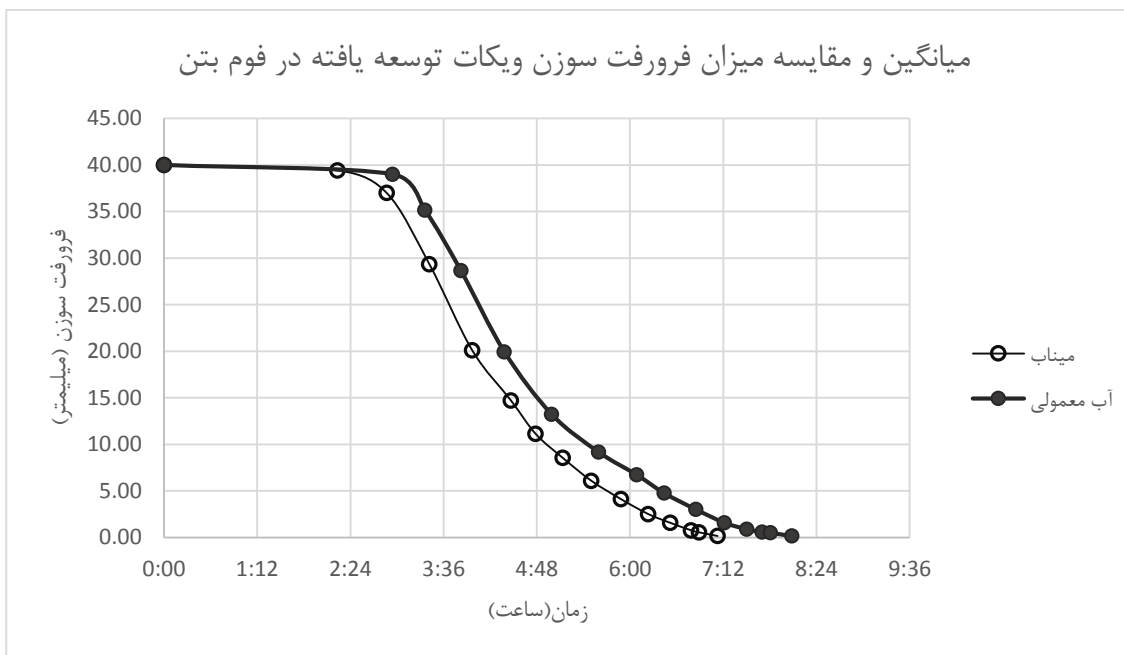
جدول ۴-۲۳- میانگین نتایج آزمون سوزن و یکات توسعه یافته به روی نمونه‌های فوم بتن

میانگین			
آب معمولی		میناب	
اختلاط‌های M1، M2، M6، M7، M8 و M12		اختلاط‌های M3، M4، M5، M13 و M15	
زمان (ساعت)	فرورفت (میلیمتر)	زمان (ساعت)	فرورفت (میلیمتر)
۰:۰۰	۴۰	۰:۰۰	۴۰
۲:۵۶	۳۹	۲:۱۴	۳۹،۴۲
۳:۲۱	۳۵،۱۴	۲:۵۲	۳۷
۳:۴۹	۲۸،۶۴	۳:۲۵	۲۹،۳۳
۴:۲۲	۱۹،۹۴	۳:۵۸	۲۰،۱
۴:۵۹	۱۳،۲۴	۴:۲۸	۱۴،۷
۵:۳۵	۹،۱۷	۴:۴۷	۱۱،۱۲
۶:۰۵	۶،۷۴	۵:۰۸	۸،۵۳
۶:۲۶	۴،۷۶	۵:۳۰	۶،۰۸
۶:۵۰	۳،۰۱	۵:۵۳	۴،۱
۷:۱۲	۱،۵۹	۶:۱۴	۲،۵
۷:۳۰	۰،۸۹	۶:۳۱	۱،۵۶
۷:۴۲	۰،۵۸	۶:۴۷	۰،۷۶
۷:۴۸	۰،۵	۶:۵۳	۰،۵۳
۸:۰۵	۰	۷:۰۷	۰

از جدول استنتاج می‌شود که زمان گیرش نهایی در نمونه‌های حاوی میناب حدود یک ساعت، کاهش یافته است که از بهترین و مهم‌ترین نتایج این پژوهش است. برای یافتن زمان گیرش اولیه (فرورفت ۲۵ میلیمتری سوزن و یکات توسعه یافته) معادله‌ی خطی سه نقطه‌ی پیرنگ شده در جدول ۴-۲۳ از هر ستون را بدست آورده که نتیجه بصورت زیر است:

جدول ۴-۲۴- زمان گیرش اولیه و ثانویه با توجه به میانگین نتایج کل نمونه‌های فوم بتن

نوع آب	گیرش اولیه (ساعت)	گیرش ثانویه (ساعت)
آب معمولی	۴:۰۲	۸:۰۵
میناب	۳:۴۰	۷،۰۷



شکل ۴-۲۱- نمودار مقایسه میانگین نتایج آزمون سوزن ویکات توسعه یافته نمونه‌های فوم بتن

قربانی در سال ۱۳۹۴ طول مدت گیرش فوم بتن با استفاده از تیپ ۱ سیمان و بدون مواد افزودنی، ۸ الی ۱۲ ساعت اعلام نموده است.

#### ۴-۲-۴- آزمایش جمع‌شدگی

این آزمایش نیز با اخذ نمونه‌های ۴\*۴\*۱۶ سانتیمتری از هر تکرار انجام پذیرفت. همان‌گونه که در فصل سوم شرح داده شد آزمایش به دلایل ذکر شده برعکس روال معمول انجام پذیرفت بدین ترتیب که نمونه‌ها را به مدت یک روز و تحت دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد کاملاً خشک کرده و زیر گیج دستگاه جمع‌شدگی قرار داده و با خیساندن آن میزان انبساط نمونه در انتهای هر دقیقه یادداشت شد. این روال تا ثابت شدن میزان انبساط ادامه داده شد. جذب آب نمونه‌های جمع‌شدگی نیز محاسبه شد. اندازه‌گیری نتایج و نمودارهای مربوطه در زیر موجود است.

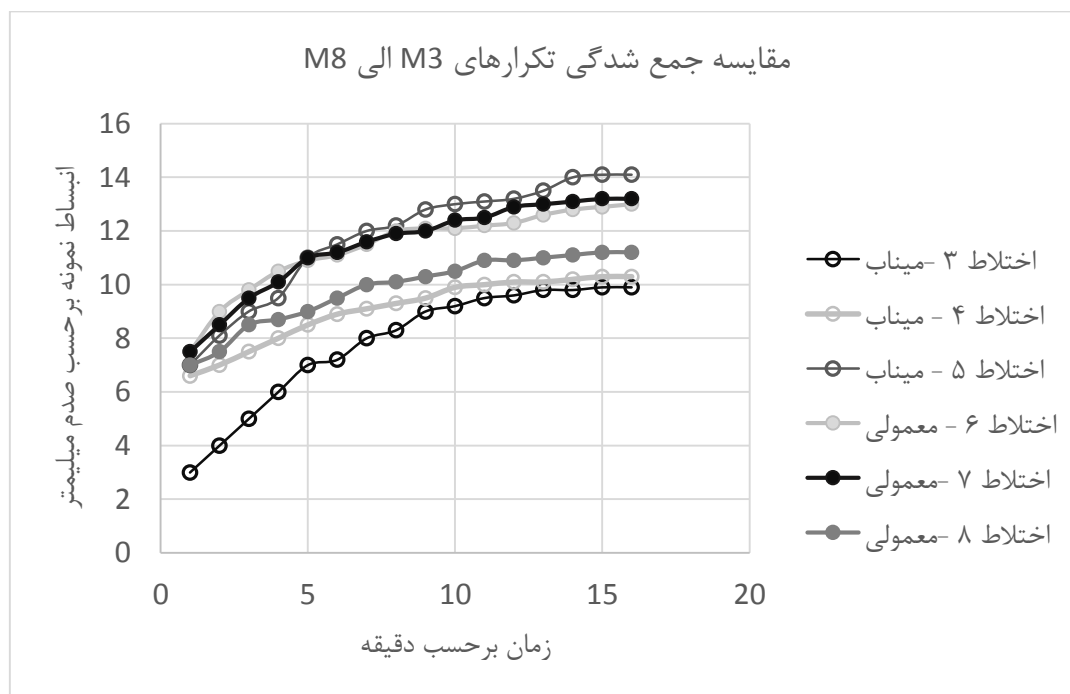
$W1$  = وزن نمونه پس از ۲۴ ساعت خشک شدن در آون

$W2$  = وزن نمونه پس از انجام آزمایش (پس از خیساندن)

جدول ۴-۲۵- نتایج جذب آب نمونه‌های جمع‌شدگی

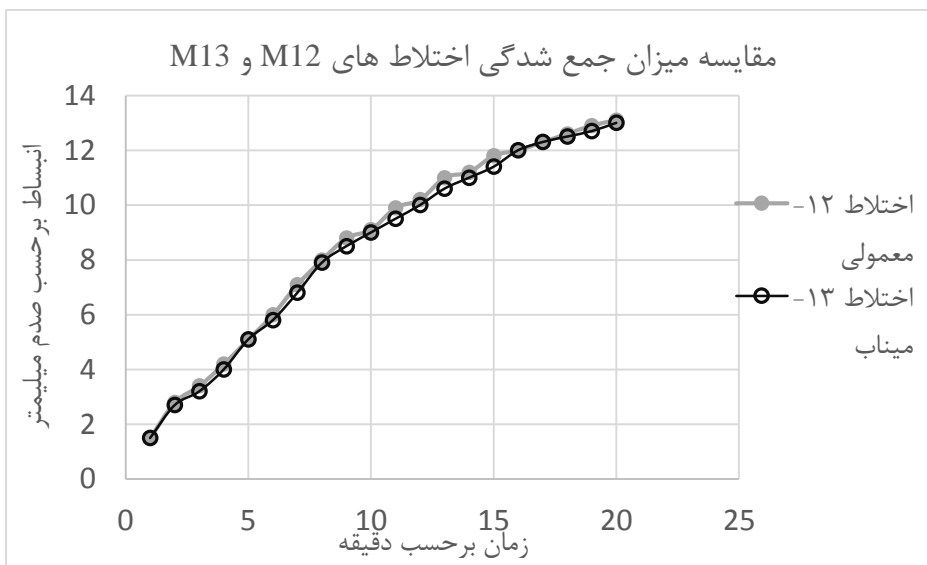
جذب آب	وزن مرطوب (W2)	وزن خشک (W1)	نوع آب	اختلاط
۰,۲	۲۷۱	۲۲۵	میناب	M3
۰,۲۵	۲۸۶	۲۲۹	میناب	M4
۰,۲۷	۲۷۸	۲۱۹	میناب	M5
۰,۲۸	۲۷۸	۲۱۷	معمولی	M6
۰,۲۶	۲۸۲	۲۲۳	معمولی	M7
۰,۲۶	۲۷۹	۲۲۲	معمولی	M8
۰,۱۹	۲۶۵	۲۲۳	معمولی	M12
۰,۱۸	۲۵۷	۲۱۸	میناب	M13
۰,۲۴	۲۵۵	۲۰۵	معمولی	M14
۰,۲۳	۲۲۴	۱۸۲	میناب	M15

نمودار زمان-افزایش طول برای تکرارهای M3 الی M8 در شکل زیر رسم شده است:



شکل ۴-۲۲- نمودار مقایسه نتایج آزمون جمع‌شدگی اختلاط‌های M3 الی M8

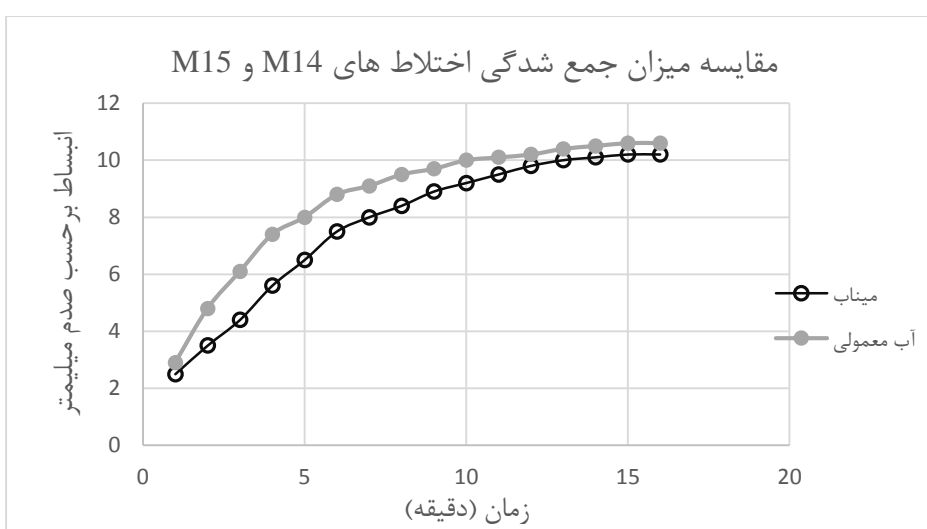
نمودار مربوط به تکرارهای M12 و M13:



شکل ۴-۲۳- نمودار مقایسه نتایج آزمون جمع شدگی اختلاط های M12 و M13

این دو تکرار و دو تکرار بعدی با مخلوط کن ۲۰۰ لیتری انجام شد و خطاها به کمترین میزان خود رسید. و همان طور که مشاهده می شود که جمع شدگی دو نمونه بسیار نزدیک به هم و با اختلاف جزئی پیش می رود.

نمودار مربوط به اختلاط های M14 و M15 :



شکل ۴-۲۴- نمودار مقایسه نتایج آزمون جمع شدگی تکرارهای M14 و M15

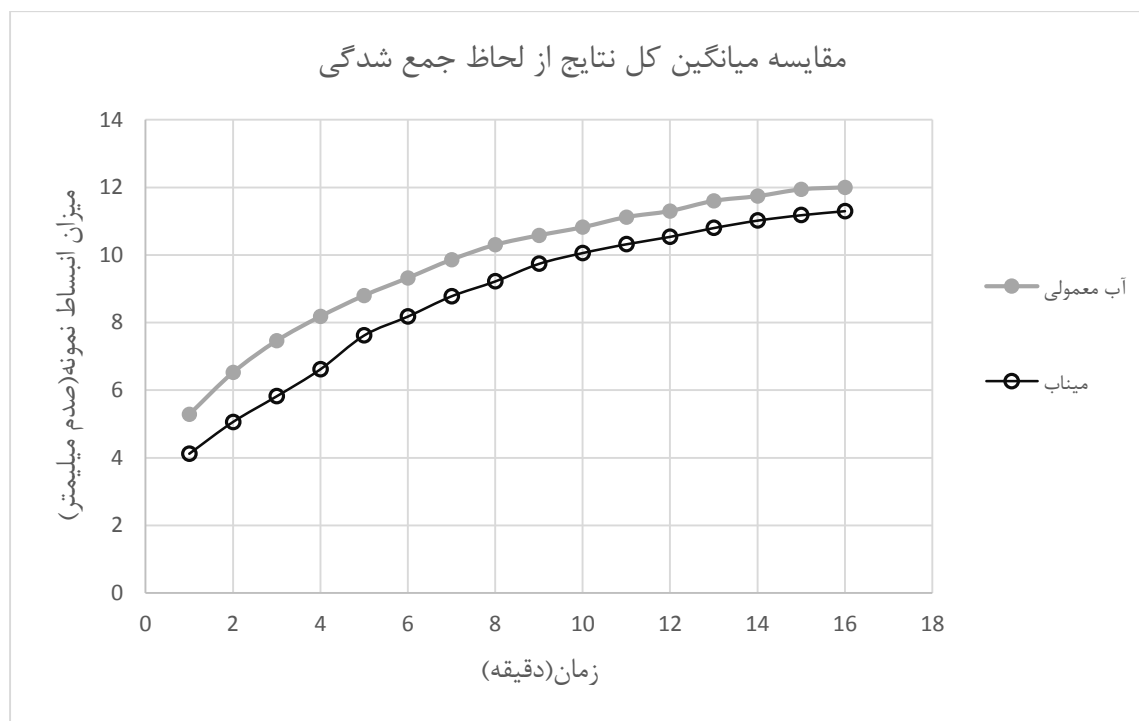
جدول ۴-۲۶، میانگین از کل نتایج آزمایش جمع‌شدگی نمونه‌ها است تا بتوان ارزیابی مناسبی را داشت:

جدول ۴-۲۶- میانگین کل نتایج آزمون جمع‌شدگی

میانگین کل نمونه‌ها آب معمولی		میانگین کل نمونه‌های میناب‌دار	
جذب آب	۲۴,۴ درصد	جذب آب	۲۲,۵ درصد
زمان (دقیقه)	تغییر طول (mm ۰,۰۱)	زمان (دقیقه)	تغییر طول (mm ۰,۰۱)
۱	۵,۲۸	۱	۴,۱۲
۲	۶,۵۲	۲	۵,۰۶
۳	۷,۴۶	۳	۵,۸۲
۴	۸,۱۸	۴	۶,۶۲
۵	۸,۸	۵	۷,۶۲
۶	۹,۳۲	۶	۸,۱۸
۷	۹,۸۶	۷	۸,۷۸
۸	۱۰,۳	۸	۹,۲۲
۹	۱۰,۵۸	۹	۹,۷۴
۱۰	۱۰,۸۲	۱۰	۱۰,۰۶
۱۱	۱۱,۱۲	۱۱	۱۰,۳۲
۱۲	۱۱,۳	۱۲	۱۰,۵۴
۱۳	۱۱,۶	۱۳	۱۰,۸
۱۴	۱۱,۷۴	۱۴	۱۱,۰۲
۱۵	۱۱,۹۴	۱۵	۱۱,۱۸
۱۶	۱۲	۱۶	۱۱,۳



نمودار جدول ۴-۲۶ به شکل زیر است:



شکل ۴-۲۵- نمودار مقایسه میانگین کل نتایج آزمون جمع شدگی

نتایج، نشان دهنده کاهش جمع شدگی نمونه‌های میناب دار است اما به قدری نیست که بتوان بر آن تکیه کرد. به ویژه که تکرارهای M12 تا M15 که در حجم زیاد تولید شد و به صنعت نزدیک‌تر است حداقل نشان‌دهنده‌ی آن است که میکرونانو حباب قادر به کاهش جمع شدگی فوم بتن نیست. چنانچه مشکل جمع شدگی از چالش‌های مهم این صنعت است و پژوهش‌گران هنوز راهکاری برای کاهش آن نیافته‌اند. لازم به ذکر است که طبق استاندارد ۱۴۵۰۴ ملی ایران، حداکثر جمع شدگی آزمون‌ها باید ۰,۰۸ درصد باشد. در جدول ۴-۲۷ میزان جمع شدگی خشک شدن آزمون طبق فرمول ۳-۱ محاسبه شده است.

جدول ۴-۲۷- نتایج آزمون جمع‌شدگی و میانگین آن‌ها

اختلاط	نوع آب	طول اولیه (mm)	تغییر طول (mm)	طول ثانویه (mm)	جمع شدگی خشک شدن (%)
M3	میناب	۱۶۰	۰,۰۹۹	۱۶۰,۰۹۹	۰,۰۶%
M4	میناب	۱۶۰	۰,۱۰۳	۱۶۰,۱۰۳	۰,۰۶%
M5	میناب	۱۶۰	۰,۱۴۱	۱۶۰,۱۴۱	۰,۰۹%
M6	معمولی	۱۶۰	۰,۱۳	۱۶۰,۱۳	۰,۰۸%
M7	معمولی	۱۶۰	۰,۱۳۲	۱۶۰,۱۳۲	۰,۰۸%
M8	معمولی	۱۶۰	۰,۱۱۲	۱۶۰,۱۱۲	۰,۰۷%
M12	معمولی	۱۶۰	۰,۱۳۱	۱۶۰,۱۳۱	۰,۰۸%
M13	میناب	۱۶۰	۰,۱۳	۱۶۰,۱۳	۰,۰۸%
M14	معمولی	۱۶۰	۰,۱۰۶	۱۶۰,۱۰۶	۰,۰۷%
M15	میناب	۱۶۰	۰,۱۰۲	۱۶۰,۱۰۲	۰,۰۶%

میانگین جمع شدگی خشک شدن (%)	
میناب	معمولی
۰,۰۷%	۰,۰۸%

در آزمایشات پژوهش، بیشترین تغییر طول مربوط به اختلاط M5 و به میزان ۱۴,۱ صدم میلی‌متر بود که نسبت به طول نمونه که برابر ۱۶۰ میلی‌متر است میزان ۰,۰۸۷ درصد تغییر طول را نتیجه می‌دهد.

#### ۴-۲-۵- آزمایش جذب آب

از هر اختلاط یک نمونه از نمونه‌های مقاومت فشاری، برای تخمین میزان جذب آب تحت آزمایش قرار داده شد. روش آزمون در فصل سوم شرح داده شد W1 وزن غرقاب نمونه و W2 وزن نمونه خشک شده در آن تحت دمای ۱۱۵-۱۰۰ درجه‌سانتی‌گراد است نتایج جذب آب وزنی و حجمی به ترتیب جدول ۴-۲۸ و ۴-۲۷ است:

جدول ۴-۲۸- نتایج جذب آب وزنی نمونه‌های فوم بتن و میانگین کل نتایج

جذب آب وزنی				
نوع آب	اختلاط	W1	W2	جذب آب
معمولی	M1	۹۵۰	۷۴۰	۰,۲۸
معمولی	M2	۸۸۰	۶۹۵	۰,۲۷
میناب	M3	۱۰۰۳	۷۹۵	۰,۲۶
میناب	M4	۸۹۳	۶۹۵	۰,۲۸
میناب	M5	۸۹۰	۶۹۸	۰,۲۸
معمولی	M6	۹۶۸	۷۵۲	۰,۲۹
معمولی	M7	۹۱۵	۷۱۰	۰,۲۹
معمولی	M8	۹۰۹	۷۰۸	۰,۲۸
معمولی	M12	۸۷۸	۷۱۲	۰,۲۳
میناب	M13	۹۰۵	۷۴۰	۰,۲۲
معمولی	M14	۹۲۷	۷۱۲	۰,۳۰
میناب	M15	۸۹۴	۶۹۵	۰,۲۹

میانگین	آب معمولی	۰,۲۸
	میناب	۰,۲۷

جدول ۴-۲۹- نتایج جذب آب حجمی نمونه‌های فوم بتن و میانگین کل نتایج

جذب آب حجمی					
نوع آب	اختلاط	W1	W2	V	جذب آب
معمولی	M1	۹۵۰	۷۴۰	۹۶۰,۴۹۸	۰,۲۲
معمولی	M2	۸۸۰	۶۹۵	۹۶۰,۴۹۸	۰,۱۹
میناب	M3	۱۰۰۳	۷۹۵	۹۸۰,۱	۰,۲۱
میناب	M4	۸۹۳	۶۹۵	۹۷۰,۲	۰,۲۰
میناب	M5	۸۹۰	۶۹۸	۹۷۰,۲۹۹	۰,۲۰
معمولی	M6	۹۶۸	۷۵۲	۹۷۰,۲	۰,۲۲
معمولی	M7	۹۱۵	۷۱۰	۹۵۰,۷۹۶	۰,۲۲
معمولی	M8	۹۰۹	۷۰۸	۹۸۰,۱	۰,۲۱
معمولی	M12	۸۷۸	۷۱۲	۹۶۰,۴۹۸	۰,۱۷
میناب	M13	۹۰۵	۷۴۰	۹۸۰,۱	۰,۱۷
معمولی	M14	۹۲۷	۷۱۲	۹۸۰,۱	۰,۲۲
میناب	M15	۸۹۴	۶۹۵	۹۸۰,۱	۰,۲۰

میانگین	آب معمولی	۰,۲۱
	میناب	۰,۲۰

کریشنا بهاونی (۲۰۱۲) جذب آب بلوک CLC را ۱۲,۵ درصد برای چگالی ۸۰۰ معرفی کرد و البته طرح اختلاط استفاده شده استاندارد داخلی هند بوده و فوم استفاده شده توسط وی از نوع پروتئینی بوده است [Krishna Bhavani,2012]. استاندارد ملی ایران به شماره ۱۴۵۰۴ جذب آب برای چگالی ۸۰۰ را ۱۲,۵ درصد اعلام کرده است. هدف پژوهش مقایسه بین دو نوع آب است و همان‌گونه که نتایج مشخص می‌کند نمونه‌های میناب‌دار توانسته‌اند جذب آب را به میزان ۱ درصد کاهش دهند.

#### ۴-۲-۶- آزمایش مقاومت خمشی

طبق استاندارد ملی ایران به شماره ۴۹۰ :

الف) چنانچه ترک تازه به وجود آمده در سطح تنش درون یک سوم طول دهانه وسط قرار بگیرد،

محاسبه‌ی شکستگی از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$R = \frac{P.L}{b.d^2} \quad (۴-۴)$$

که در آن

R: مدول شکستگی (MPa)

P: حداکثر بار اعمال شده توسط دستگاه آزمون (N)

L: طول دهانه (mm)

b: میانگین عرض آزمون در نقطه شکست (mm)

d: میانگین عمق آزمون در نقطه شکست (mm)

یادآوری: وزن میله نباید در محاسبات اعمال شود.

ب) چنانچه ترک به وجود آمده در سطح تنش، خارج از یک سوم طول دهانه وسط بیشتر از ۵ درصد

طول دهانه نباشد، مدول شکستگی از معادله ۴ تعیین می‌شود:

$$R = \frac{3P.a}{b.d^2} \quad (۵-۴)$$

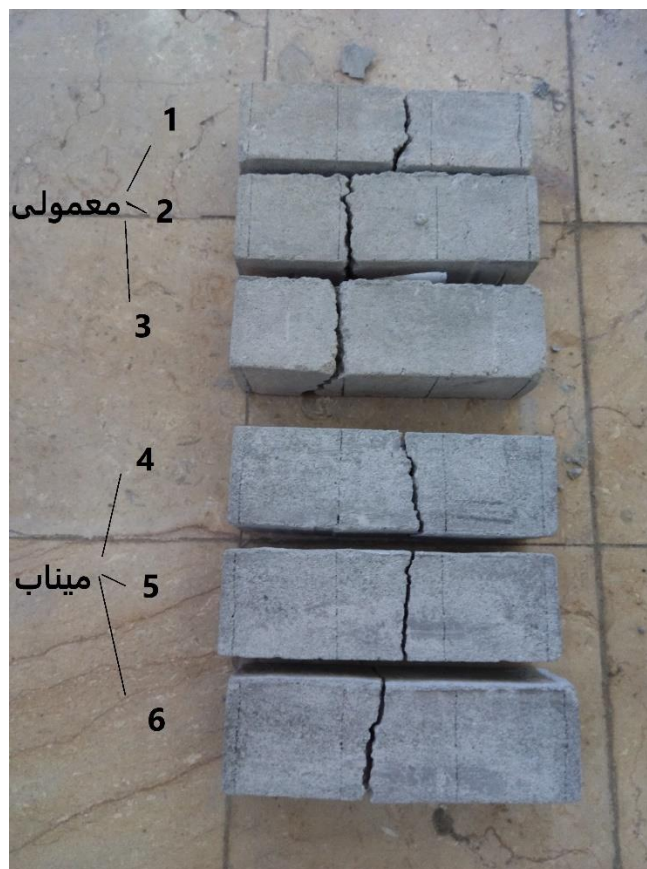
که در آن، a عبارتست از میانگین فاصله بین مقطع ترک خورده با نزدیک‌ترین تکیه‌گاه (mm)

دیگر پارامترها همانند قسمت الف تعریف شده است.

ج) چنانچه ترک به وجود آمده در سطح تنش خارج از یک سوم طول دهانه وسط بیشتر از ۱ درصد از طول دهانه باشد، نتایج آزمون غیرقابل قبول می باشد.

[استاندارد ملی ایران به شماره ۴۹۰]

مطابق شکل ۴-۲۶ تمامی نمونه‌ها به جز نمونه ۳، از بند الف محاسبه می شود و مقاومت خمشی نمونه ۳ به علت آن که مطابق بند ب ترک خورده است از فرمول بند ب محاسبه می شود. لازم به ذکر است نمونه‌ها مطابق اختلاط M14 و M15 ساخته و عمل آوری شد و در سن ۲۸ روز مورد آزمون قرار گرفت.



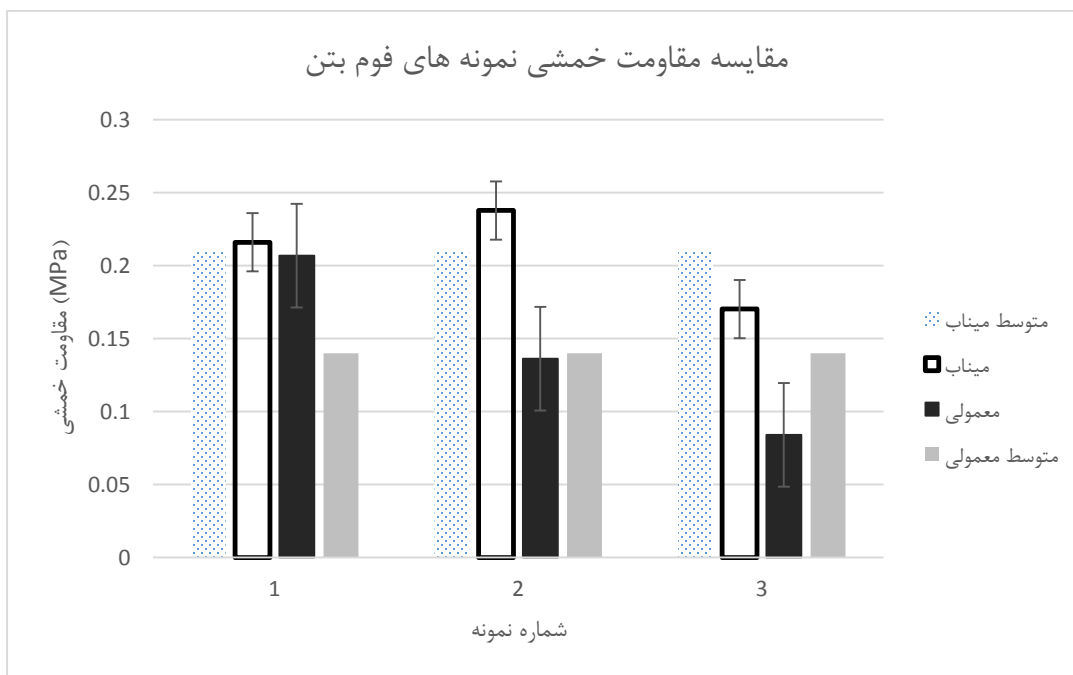
شکل ۴-۲۶- نمونه‌های گسیخته شده تحت آزمون مقاومت خمشی

شکل ۴-۲۷ تیر فوم بتن پس از گسیختگی زیر دستگاه تست مقاومت خمشی را نشان می‌دهد:



شکل ۴-۲۷- گسیختگی نمونه فوم بتن زیر دستگاه مقاومت خمشی

نتایج آزمون‌ها به ترتیب گراف زیر است:



شکل ۴-۲۸- نمودار مقایسه‌ی مقاومت خمشی بین نمونه‌های میناب و آب معمولی

مطابق شکل ۴-۲۶ واضح است نمونه‌ای که از دهانه‌ی وسطی گسیخته نشده است مقاومت کمتری نسبت به بقیه نمونه‌ها دارد. نسبت مقاومت خمشی به مقاومت فشاری ۲۸ روزه در میناب ۱۸ درصد و در آب معمولی ۱۴ درصد است.

طبق نتایج لگاتسکی این نسبت برابر است با ۲۲ تا ۲۷ درصد [Narayanan & Ramamurthy,2000].

با میانگین‌گیری از نتایج و محاسبه چگالی طبق استاندارد ملی ایران به شماره ۱۴۵۰۴، جدول زیر گویای رشد مقاومت خمشی نمونه‌های میناب نسبت به آب معمولی می‌باشد:

جدول ۴-۳۰- محاسبه‌ی تغییرات مقاومت خمشی بین نمونه‌های میناب و معمولی

درصد رشد مقاومت خمشی نمونه‌های میناب دار	
۲۸ روزه	
چگالی	مقاومت خمشی
۰,۰۱	۰,۲۷

استفاده از میناب در نمونه‌ی فوم بتن، افزایش مقاومت خمشی به میزان ۲۷ درصد را در پی داشته است.

جدول ۴-۳۱- نتایج دانشمندان با استفاده از نانوذرات در بتن برای بهبود مقاومت خمشی

توضیحات	نانوذره مورد استفاده	دانشمند
بهبود مقاومت خمشی	استفاده حداکثر ۲ درصد از نانوآکسید سیلیس و حداکثر ۴ درصد از نانوآکسید تیتانیوم در بتن	Rathi V.R and Mothera, 2014
افزایش مقاومت خمشی ۲۸ روزه	استفاده ۱ درصدی از نانوکلسیم-کربنات در بتن	Liu X et al,2012
افزایش مقاومت خمشی	نانوآکسید آهن در بتن	Nazari er al,2010
افزایش مقاومت خمشی	نانوآکسید آلومینیوم در بتن	Olar, 2011



#### ۴-۲-۷- آزمایش مقاومت کششی (برزیلی)

طبق استاندارد ۶۰۴۷ ایران، فرمول زیر برای محاسبه‌ی مقاومت کششی نمونه استوانه‌ای بتنی

استفاده می‌شود:

$$T = \frac{2.P}{\pi.L.D} \quad (۴-۶)$$

که در آن:

T: مقاومت کششی دو نیم شدن ( $\text{KN/m}^2$ )

P: حداکثر بار عمودی اعمال شده به نمونه (KN)

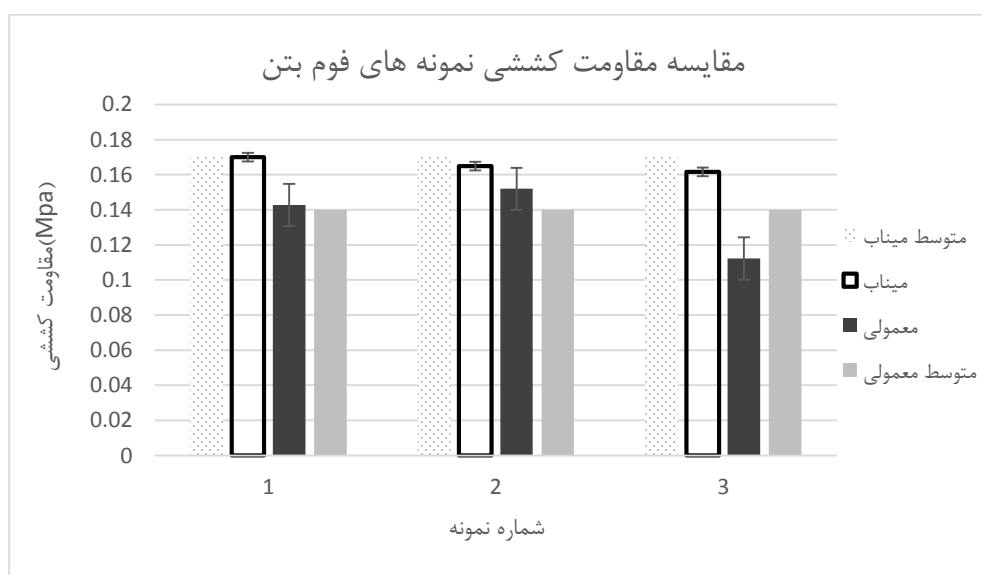
L: طول نمونه (m)

D: قطر نمونه (m)

نمونه‌ها مطابق اختلاط M14 و M15 ساخته و عمل آوری شد و در سن ۲۸ روز مورد آزمون قرار گرفت.

طبق نتایج حاصل از تست‌ها نمونه‌ها میناب‌دار باعث افزایش مقاومت کششی نمونه فوم بتن شده

است:



شکل ۴-۲۹- نمودار مقایسه‌ی مقاومت کششی بین نمونه‌های میناب و آب معمولی

نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری ۲۸ روزه در میناب ۱۵ درصد و در آب معمولی ۱۳ درصد است. به نقل از نارایانان و همکار، طبق نتایج لگاتسکی این نسبت برابر با ۱۰ تا ۱۵ درصد و طبق پژوهش‌های والور این نسبت برابر با ۱۵ تا ۳۵ درصد است. [Narayanan & Ramamurthy,2000].

با توجه به میانگین نتایج مقاومت کششی و محاسبه‌ی چگالی نمونه‌ها مطابق استاندارد ۱۴۵۰۴، نتایج طبق جدول ۴-۳۲ است:

جدول ۴-۳۲-محاسبه‌ی تغییرات مقاومت کششی بین نمونه‌های میناب و معمولی

درصد رشد مقاومت کششی نمونه‌های میناب دار	
۲۸ روزه	
چگالی	مقاومت کششی
۰,۰۲	۰,۲۲

میزان چگالی نمونه‌های میناب ۲ درصد بیشتر از نمونه‌های معمولی است و مقاومت کششی ۲۲ درصد افزایش داشته است. در جدول زیر نتایج دانشمندان قبلی در زمینه مشابه موجود است:

جدول ۴-۳۳-مقایسه نتایج دانشمندان در استفاده از نانوذرات برای بهبود مقاومت کششی

توضیحات	نانوذره مورد استفاده	دانشمند
افزایش مقاومت کششی	استفاده از حداکثر ۴ درصد نانوتیتانیوم و حداکثر ۳ درصد نانوآکسید سیلیس در ترکیب بتن	Rathi and modhera,2014
افزایش مقاومت کششی	استفاده‌ی حداکثر ۲ درصد از نانوآکسید آهن در بتن	Nazari et al,2010
افزایش مقاومت کششی	نانوآکسید آلومینیوم در بتن	Nazari et al,2009

## فصل پنجم

# نتیجه گیری و پیشنهادات

## ۵-۱- نتیجه گیری

- ✓ زمان گیرش اولیه و ثانویه خمیر سیمان با استفاده از میناب کاهش یافته است. ذرات ریز و پایدار هوا در میناب باعث سریع تر شدن واکنش بین سیمان و آب می شود.
- ✓ زمان گیرش اولیه و ثانویه فوم بتن از مهم ترین پارامترهای مهم این صنعت است که کاهش زمان گیرش ثانویه آن به میزان تقریباً ۱ ساعت و زمان گیرش اولیه آن به میزان ۲۰ دقیقه از نتیجه‌ی این پژوهش است.
- ✓ جذب آب فوم بتن فرآوری شده با میناب اندکی (به میزان ۱ درصد) نسبت به آب معمولی کمتر است.
- ✓ جمع شدگی یکی از مشکلات فوم بتن است که تحقیقات پاسخ مناسبی برای آن پیدا نکرده است در این پژوهش میناب توانست به میزان یک درصد جمع شدگی را کاهش دهد.

❖ جدول ۵-۱ نشان دهنده‌ی خلاصه نتایج مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی است:

جدول ۵-۱- نتایج آزمون‌های فشاری، کششی و خمشی فوم بتن در پژوهش

	درصد رشد مقاومت نمونه های فوم بتن حاوی میناب نسبت به معمولی		
پارامتر	۷ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه
مقاومت فشاری	۱۸ درصد	۱۳ درصد	۵ درصد
مقاومت کششی	-	۲۲ درصد	-
مقاومت خمشی	-	۲۷ درصد	-

- ✓ استفاده از میناب در فوم بتن باعث افزایش مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ و ۹۰ روزه با میانگین گیری از کل آزمون‌ها، به میزان ۵ الی ۱۸ درصد می شود. مطابق پژوهش‌های قبل استفاده از میناب در بتن و استفاده از دیگر نانوذرات در فوم بتن میزان مقاومت فشاری روند افزایشی داشته است.

- ✓ مقاومت کششی فوم بتن با استفاده از آب حاوی میکرونانونو حباب به میزان ۲۲ درصد افزایش یافت.
- ✓ مقاومت خمشی فوم بتن افزایش ۲۷ درصدی را با استفاده از میناب تجربه کرد. که در پژوهش‌های نانو ذرات و فوم بتن بی سابقه است.

## ۵-۲- پیشنهادات برای انجام مطالعات بعدی

۱. تعیین خواص مکانیکی بهینه فوم بتن با انجام آزمایشات بوسیله‌ی تیپ‌ها و برندهای مختلف سیمان.
۲. بررسی ضریب انتقال حرارت و رفتار خزشی فوم بتن با آب حاوی میکرونانونو حباب.
۳. بررسی خواص مکانیکی انواع دیگر بتن سبک اعم از گاز بتن اتوکلاوی و غیر اتوکلاوی با میناب.
۴. تعیین خواص مکانیکی بهینه فوم بتن با انجام آزمایشات بوسیله‌ی چگالی‌ها و برندهای مختلف مایع فوم.
۵. تعیین خواص مکانیکی بهینه فوم بتن با آزمودن طرح اختلاط‌ها و چگالی‌های خیس متفاوت.
۶. بررسی تاثیر آب حاوی میکرونانونو حباب‌های اکسیژن بر خواص مکانیکی بهینه فوم بتن.

## منابع و مراجع

### • منابع داخلی

- استاندارد ملی ایران به شماره ۳۹۲، تعیین زمان گیرش سیمان هیدرولیکی با سوزن ویکات-روش آزمون.
- استاندارد ملی ایران به شماره ۴۹۰، بتن-مقاومت خمشی بتن (با استفاده از میله سه شاخه‌ای)-روش آزمون.
- استاندارد ملی ایران به شماره ۶۰۴۷، بتن-مقاومت کششی دو نیم نمودن آزمون‌های استوانه‌ای-روش آزمون.
- استاندارد ملی ایران به شماره ۱۴۵۰۴، بلوک بتنی سلولی با کف آماده-ویژگی‌ها و روش‌های آزمون.
- راهی و، مظفری ع، فلاح شیروانی م، (۱۳۹۰)، بررسی تاثیر نانو ذرات سیلیسی بر بتن سبک، اولین کنفرانس ملی بتن سبک، ص ۴.
- باقری ع، پرهیزکار ط، پورخورشیدی ع، رئیس قاسمی ا، سبحانی ج، (۱۳۹۳)، گزارش تحقیقاتی راهنمای تولید، اجرا، کاربرد و ضوابط بتن کفی (بتن هوادار/توکلاو نشده)، چاپ اول، انتشارات مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ص ۸ و ۲۷.
- زند م، میرزائی ع، (۱۳۹۲)، همه چیز درباره فوم بتن، مجله علمی دانشجویان دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف تهران.
- صیامی م، (۱۳۸۴)، معرفی بتن سبک اسفنجی از نوع کفی یا فوم بتن بعنوان مصالحی با قابلیت‌های بالا، مقاله مرکز تحقیقات جهاد آذربایجان شرقی، از ص ۲ الی ۶.

- عباسی س، قوتی م، فیروزی ح، نوری ب، خالقی فر م، (۱۳۹۵)، علم نانو یک تحول بزرگ در مقیاس بسیار کوچک (کاربردهای فناوری نانو در علوم مهندسی)، سومین کنفرانس سراسری توسعه محوری مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک ایران، گرگان، ص ۱.
- قربانی م، افسر دلیر ع، (۱۳۹۴)، بتن سبک وزن با ساختمان سلولی (فوم)، دومین همایش ملی معماری، عمران و توسعه نوین شهری، از ص ۱ الی ۸.
- کالوندی محسن، (۱۳۸۷)، کاربرد ذرات نانو در بهسازی و ترمیم سازه‌های بتنی، اولین کنفرانس بین المللی مقاوم سازی لرزه‌ای ایران، تبریز، ص ۲ و ۶.
- مجاوریان ن، حسینی م، (۱۳۹۵)، کاربرد نانو تکنولوژی در صنعت ساختمان (بتن)، سومین کنفرانس سراسری توسعه محوری مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک ایران، ص ۱، گرگان.
- مظفری نائینی ر، (۱۳۹۲)، بررسی الگوهای هیدرودینامیکی استاندارد جریان به کمک نانو-میکرو حباب هوا، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- تارنمای کارخانه سیمان بجنورد به نشانی: [www.bojnourdceement.com](http://www.bojnourdceement.com)
- تارنمای انجمن بتن سبک ایران به نشانی: [www.clcir.com](http://www.clcir.com)

## • International Sources

- ACI 523, "Guide for Precast Cellular Concrete Floor, Roof, and Wall Units", 1996.
- ASTM C187, "Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement", 1999.
- ASTM C495, "Standard Test Method for Compressive Strength of Lightweight Insulating Concrete", 1999.

- ASTM C496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical concrete Specimens”,2004.
- ASTM C796, “Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam”1997.
- ASTM C869/C869M, “Standard Specification for Foaming Agents Used in Making Preformed Foam for Cellular Concrete”, 2012.
- Abd el-baky s, yehia s, s. khalil i, (2013), “influence of nano-silica addition on properties of fresh and hardened cement mortar”, 5th International Conference October 16th - 18th 2013.
- Abdoli Yazdi N , Arefi M. R , Mollaahmadi E , Abdollahi Nejang B,(2011) , “To study the effect of adding Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on the morphology properties and microstructure of cement mortar, *Life Science Journal* ”, 8, 4, pp550.
- Arefi A, Saghravani S, Mozaffari R,(2016), “Mechanical Behavior of Concrete, Made with Micro-Nano Air Bubbles”,*Civil Engineering Infrastructure Journal(CEIJ)*, 49, 1, pp139.
- Behfarnia K, Keivan A, Keivan A,(2013), “the effects of TiO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles on physical and mechanical properties of normal concrete”, *Asian Journal of Civil Engineering*, (BHRC), 14, 4, pp517.
- Boshehrian A, Hosseini P,(2011), “Effect of nano-SiO<sub>2</sub> particles on properties of cement mortar applicable for ferrocement elements”, 2, 1.
- Khanzadi M, Tadayon M, Sepehri H and Sepehri M, (2010), “Influence of Nano-Silica Particles on Mechanical Properties and Permeability of Concrete”,



*international conference on sustainable construction material and technologies*, ISBN:978-1-4507-1490-7.

- Krishna Bhavani Siram K, (2012), “Cellular Light Weight Concrete Blocks as a replacement of burnt clay bricks”, *intentional journal of Engineering and advanced technology*, 2, 2, pp149.
- Liu X ,Chen L ,Liu A ,Wang X ,(2012), “Effect of Nano-CaCO<sub>3</sub> on Properties of Cement Paste”, *International Conference on Future Energy, Environment, and Materials*, energy Procedia, doi:10.1016/j.egypro.2012.01.158, pp.991– 996.
- Narayanan.N, Ramamurthy.K, (2000), “Structure and properties of aerated concrete : a review”, *Jounal of Cement and Concrete Composites*, 22, 5, PP 321.
- Nazari A, Riahi Sh, Riahi Sh, Shamekhi S.F, Khademno A,(2010), “The effects of incorporation Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on tensile and flexural strength of concrete”, *Journal of American Science*, 6, 4, pp 90.
- Nazari A, Riahi Sh,(2011), “Effects of CuO nanoparticles on compressive strength of self-compacting concrete”, *Indian Academy of Sciences*, 36, 3, pp 371.
- 17-Nazari A, Riahi Sh, Riahi Sh, Shamekhi S.F, Khademno A,(2010), “Assessment of the effects of the cement paste composite in presence TiO<sub>2</sub> Nanoparticles”, *Journal of American Science*, 6, 4, pp43.
- Nazari A, Riahi Sh, Riahi Sh, Shamekhi S.F, Khademno A,(2009), “Mechanical properties of cement mortar with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles”, *Journal of American Science*, 6, 4, pp94.

- Olar R, (2011), “nanomaterials and nanotechnologies for civil engineering”, *Bulletin of the Polytechnic Institute from Iasi Published by "Gheorghe Asachi" Technical University*.
- Pradesh H,(2012), “Application Of Nanotechnology In Building Materials”, *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2, 5, pp1077.
- Rathi V.R, Modhera C.D, (2014), “An overview on the Influence of Nano Material on Properties of Concrete”, *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*, 3, 2.
- Reddy Babu G,(2013), “Effect of nano-silica on properties of blended cement”, *International Journal of Computational Engineering Research*, 3, 5.
- Salemi N, Behfarnia K , Zaree S.A,(2014), “effect of nanoparticles on frost durability of concrete”, *asian journal of civil engineering (bhrc)*, 15, 3, pp 411.
- Sobolev K, Flores I, Hermosillo R, and Torres-Martinez L.M, (2008), “Nanotechnology of Concrete: Recent Developments and Future Perspectives”, *American concrete institute, Library of Congress catalog*, card number: 2008936318, ISBN: 978-0-87031-299-1, pp100.
- Yakovlev G, Kriene j , Gailius a, Girniene I, (2006), “cement based foam concrete reinforced by carbon nanotubes”, *materials science journal*, 12, 2.
- Yoon R H, Luttrell G H.,(1989) “The effect of bubble size on fine particle flotation. Mineral Processing Extractive Metallurgy Review”, *Intenationa Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 5, (1-4), pp 101.

# پیوست

پیوست الف: جدول مربوط به اندازه گیری ابعاد حباب های موجود در آب بر طبق نمونه ی ۱ روزه ضمیمه شده است.



## NanoQ Report

### Sample

Name : MNB-A  
Measured on : 1/7/2017 10:37:43 Mode: Acquisition  
by : admin Profil: Admin

Comments from user:

### SOP

Name Mr.Mozaffarei Operating mode Continuous

#### Dispersant / solvent properties

Refractive Index (nd) : 1.33  
Viscosity : 0.891

#### Particles refractive Index

Real Part : 1.560  
Imaginary Part : 0.01

#### Device settings

Time interval : 10.000µs  
Number of channels : 400

SOP comment :  
Default Procedure

#### Analysis mode

Cumulants

#### Results

Intensity  
 Volume  
 Number

#### Measure conditions

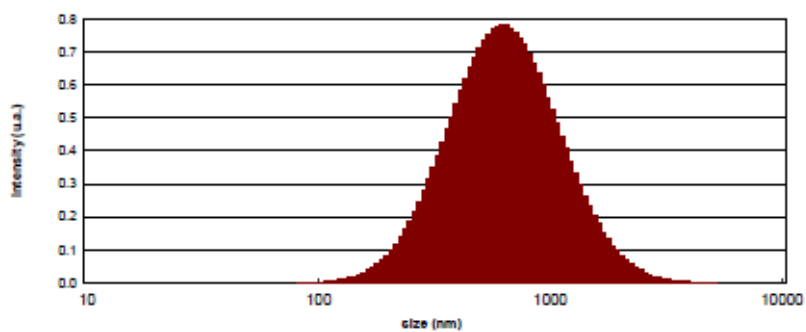
Temperature : 25.0°C  
Acquisitions : 0  
Average count rate : 175.00 kcps

Duration : 0h 0min 19s  
Laser power : 50%  
DTC position : UP  
Wavelength : 657.00

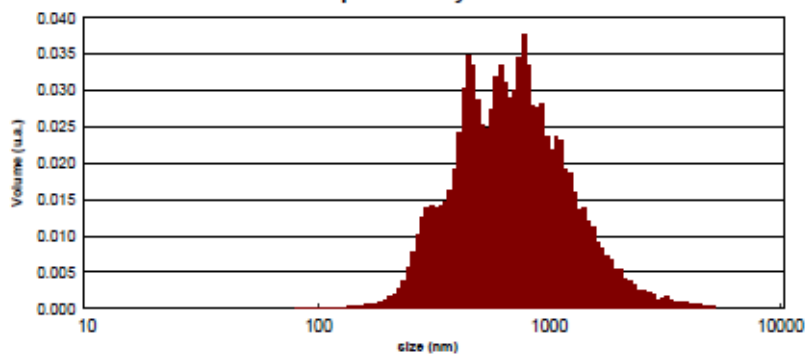
*Cumulants method*

			Zaverage (nm):	592.18			
Dv10:	338.93	Dv50:	676.26	Dv90:	1 412.91	PDI:	0.3220
Dmean Intensity:	730.58	Dmean volume:	812.58	Dmean number:	349.84		

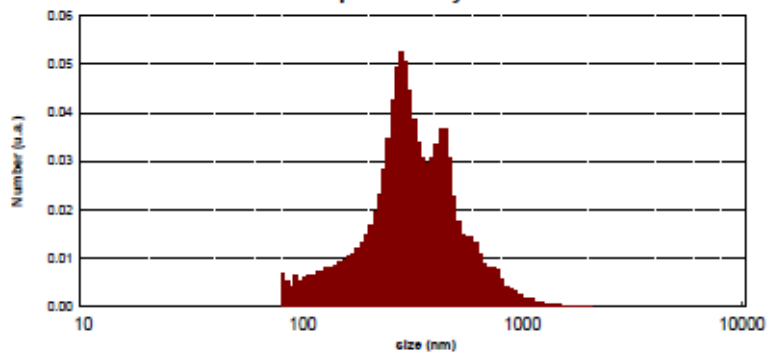
Size dispersion by Intensity



Size dispersion by Volume



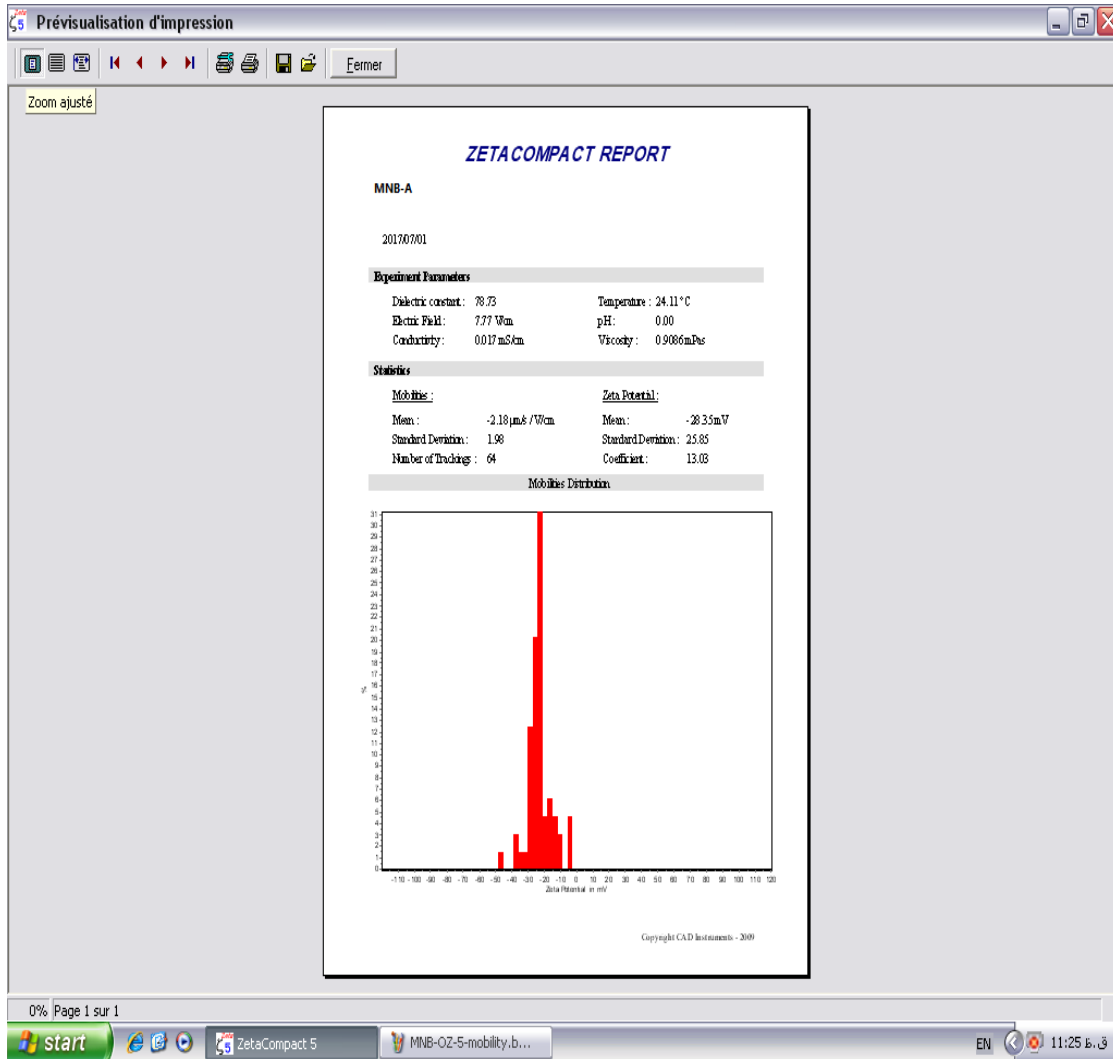
Size dispersion by Number



Size (nm)	Intensity	Number	Volume
81.30	0.00	0.01	0.00
85.14	0.00	0.01	0.00
89.15	0.00	0.00	0.00
93.35	0.00	0.01	0.00
97.75	0.00	0.01	0.00
102.36	0.00	0.01	0.00
107.18	0.00	0.01	0.00
112.23	0.01	0.01	0.00
117.52	0.01	0.01	0.00
123.06	0.01	0.01	0.00
128.86	0.01	0.01	0.00
134.93	0.02	0.01	0.00
141.29	0.02	0.01	0.00
147.95	0.02	0.01	0.00
154.92	0.03	0.01	0.00
162.22	0.04	0.01	0.00
169.87	0.05	0.01	0.00
177.88	0.06	0.01	0.00
186.26	0.07	0.01	0.00
195.04	0.08	0.01	0.00
204.23	0.10	0.02	0.00
213.85	0.12	0.02	0.00
223.93	0.14	0.02	0.00
234.49	0.16	0.03	0.00
245.54	0.19	0.03	0.01
257.11	0.21	0.04	0.01
269.22	0.24	0.05	0.01
281.91	0.28	0.05	0.01
295.20	0.31	0.05	0.01
309.11	0.35	0.04	0.01
323.68	0.39	0.04	0.01
338.93	0.43	0.03	0.01
354.91	0.47	0.03	0.01
371.63	0.50	0.03	0.02
389.15	0.54	0.03	0.02
407.49	0.58	0.03	0.02
426.69	0.62	0.04	0.03
446.80	0.65	0.04	0.03
467.86	0.68	0.03	0.03
489.91	0.71	0.02	0.03
513.00	0.73	0.02	0.03
537.17	0.75	0.01	0.02
562.49	0.77	0.01	0.03
589.00	0.78	0.01	0.03
616.76	0.78	0.01	0.03
645.83	0.78	0.01	0.03
676.28	0.77	0.01	0.03
708.13	0.76	0.01	0.03
741.51	0.74	0.01	0.03
776.45	0.72	0.01	0.04
813.05	0.70	0.01	0.03
851.38	0.67	0.00	0.03
891.49	0.63	0.00	0.03
933.50	0.60	0.00	0.03
977.50	0.56	0.00	0.02
1,023.56	0.52	0.00	0.02
1,071.80	0.48	0.00	0.02
1,122.32	0.45	0.00	0.02
1,175.21	0.41	0.00	0.02
1,230.59	0.37	0.00	0.02
1,288.59	0.33	0.00	0.02

1,349.32	0.30	0.00	0.01
1,412.91	0.26	0.00	0.01
1,479.50	0.23	0.00	0.01
1,549.23	0.20	0.00	0.01
1,622.24	0.18	0.00	0.01
1,698.69	0.15	0.00	0.01
1,778.75	0.13	0.00	0.01
1,862.58	0.11	0.00	0.01
1,950.36	0.10	0.00	0.01
2,042.28	0.08	0.00	0.01
2,138.53	0.07	0.00	0.00
2,239.31	0.06	0.00	0.00
2,344.85	0.05	0.00	0.00
2,455.36	0.04	0.00	0.00
2,571.08	0.03	0.00	0.00
2,692.25	0.03	0.00	0.00
2,819.13	0.02	0.00	0.00
2,951.99	0.02	0.00	0.00
3,091.11	0.01	0.00	0.00
3,236.79	0.01	0.00	0.00
3,389.34	0.01	0.00	0.00
3,549.07	0.01	0.00	0.00
3,716.34	0.01	0.00	0.00
3,891.48	0.00	0.00	0.00
4,074.88	0.00	0.00	0.00
4,266.93	0.00	0.00	0.00
4,468.02	0.00	0.00	0.00
4,678.59	0.00	0.00	0.00
4,899.09	0.00	0.00	0.00
5,129.97	0.00	0.00	0.00

پیوست ب: شیت آزمایش زتا پتانسیل :



the 20 minutes and 58 minutes, respectively. A negligible decrement on water absorption and shrinkage, 1%, was also detected in this research.

Keywords: foam concrete, Micro-NanoBubble, mechanical properties, compressive, setting time.



## **Abstract**

Micro-Nanobubbles are very tiny air bubbles, the diameter ranges from 10 to 50  $\mu\text{m}$  and less than 200 nm respectively, surrounded by a liquid usually water. Stable and tiny air particles in MNB (water containing micro-nanobubbles) cause faster reaction between cement and water.

Cellular light weight concrete is a concrete with stable air cells that are uniformly distributed in concrete mixture. Required materials to produce foam concrete are cement, sand, water, foam and allowable additives. In foam concrete, any density in the range of 300  $\text{kg}/\text{m}^3$  to 1600  $\text{kg}/\text{m}^3$  has its own application, including, filler roles, carrier or non-carrier blocks and structural.

In this study, a comparison between tap water and MNB used in foam concrete were performed. Experiments were conducted based on a single mixture but in numerous repetitions. The mixture including 350  $\text{kg}/\text{m}^3$  cement, 300  $\text{kg}/\text{m}^3$  stone powder and 0.5 and 0.6 water-cement ratio's was selected after some trial and error procedure. Compressive strength, cement setting time, foam concrete setting, shrinkage, water absorption, tensile (indirect) strength and flexural strength tests were conducted on specimens.

According to the results, MNB has a positive effect on the mechanical properties of foam concrete. For instance, compressive strength at the age of 7, 28 and 90 days increased up to 18%, 13% and 5%, respectively. Tensile and flexural strength tests showed that for 28-day aged foam concrete made with MNB improved 27% and 22% in average, respectively. The primary and secondary setting times of cement decreased to 28 and 30 minutes, respectively while the primary and secondary setting times of foam concrete went down to



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Civil Engineering**

**MSc Thesis in Water Engineering and Hydraulic Structures**

***Experimental study of the effects of Micro Nano Bubble on foam concrete***

By: Hossein Soltani

Supervisor:

Dr. S. F. Saghravani

Adviser:

Dr. S. R. Zare

September 2017