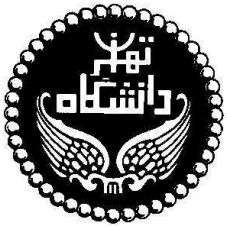
انستیتو مصالح ساختمانی
دانشکده فنی دانشگاه تهران

Leca®
شرکت لیکا
(سهامی خاص)

2

# سبکدانه سازه‌ای

گزارش شماره ۲ ، مهرماه ۱۳۸۷



انستیتو مصالح ساختمانی دانشکده فنی دانشگاه تهران

موضوع :

# راهنمای کاربردی

# بتن سبکدانه سازه ای لیکا

کارفرما :

**شرکت لیکا**

تالیف:

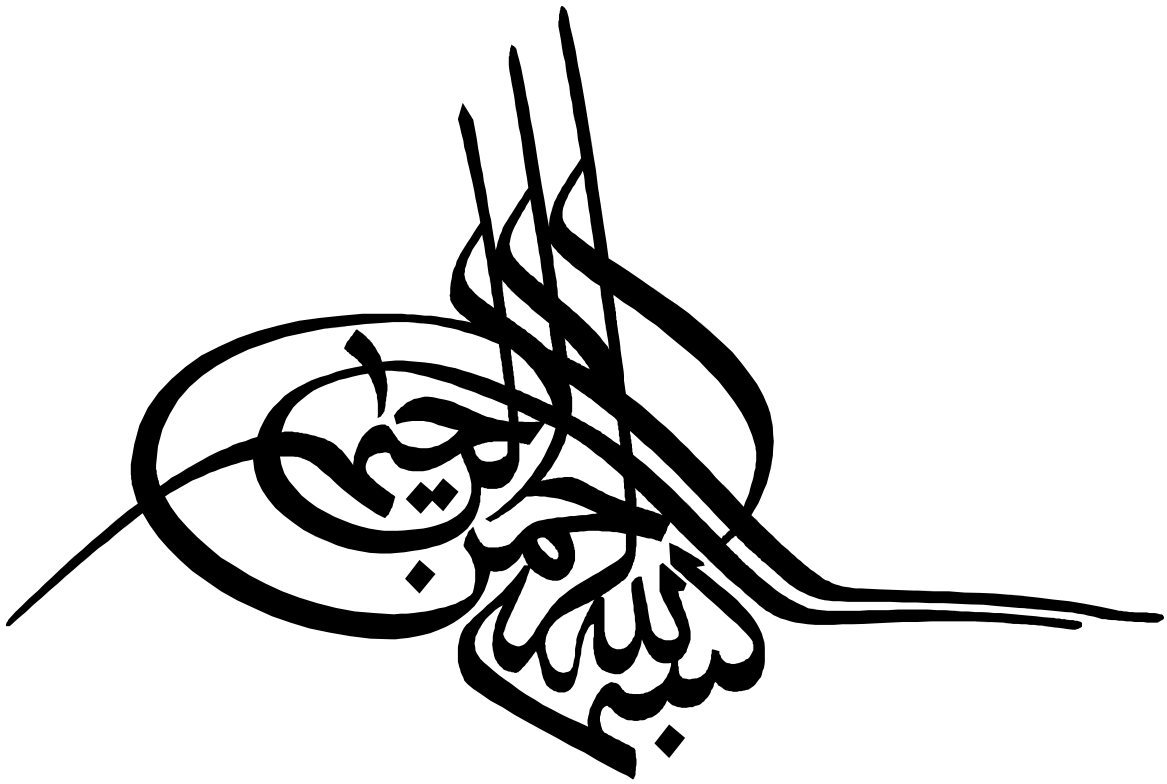
**محمد شکرچی زاده**

**نیکلاس علی لیبر**

**مهرداد ماهوتیان**

**احسان آشوری**

شماره گزارش : CMI-8707294


بسم الله الرحمن الرحيم

**پیشگفتار ..... یک**

**بخش اول- مطالعات کتابخانه ای**

**۱-تاریخچه کاربرد بتن سبکدانه ..... ۱**

۱-۱-پیش زمینه های تاریخی ..... ۱

۱-۲-تاریخچه بتن سبکدانه در عصر جدید ..... ۳

۱-۳-آغاز صنعت رس منبسط شده ..... ۵

۱-۴-کشتی های ساخته شده با بتن سبکدانه ..... ۶

۱-۵-ساختمان های ساخته شده با بتن سبکدانه ..... ۹

۱-۶-بتن سبکدانه در صنعت پیش ساخته ..... ۱۲

۱-۷-استفاده از بتن سبکدانه در ساخت پل ها ..... ۱۵

۱-۸-استفاده از بتن سبکدانه در ساخت ساختمان های بلند مرتبه ..... ۲۲

۱-۹-چشم اندازهای کاربرد بتن سبکدانه ..... ۲۳

**۲- مشخصات فیزیکی سبکدانه‌ها ..... ۲۵**

۲-۱-مقدمه ..... ۲۵

۲-۲-آب آزاد و آب جذب شده ..... ۲۶

۲-۳-حجم ظاهری ..... ۲۷

۲-۴-حجم مطلق ..... ۲۸

۲-۵-وزن مخصوص دانه ای سبکدانه ها ..... ۲۹

۲-۵-۱-روش تعیین وزن مخصوص دانه ای سبکدانه ..... ۲۹

۲-۶-وزن مخصوص توده ای سبکدانه ها ..... ۲۹

۲-۶-۱- وزن مخصوص توده ای غیر متراکم ..... ۳۰

۲-۶-۲- وزن مخصوص توده ای متراکم شده ..... ۳۱

۲-۷-عوامل موثر بر تغییرات وزن مخصوص سبکدانه ..... ۳۱

**۳- نکاتی در مورد اجزای تشکیل دهنده بتن سبکدانه ..... ۳۳**

۳-۱- درشت دانه های سبک ..... ۳۳

۳-۲- ریز دانه های سبک ..... ۳۴

۳-۳- افزودنی های حباب ساز ..... ۳۴

۳-۴- افزودنی های معدنی ..... ۳۸

۳-۵- الیاف ..... ۴۱

۳-۶- مخلوط آزمایشی ..... ۴۲

**۴-ساخت بتن سبکدانه و حمل آن ..... ۴۳**

۴-۱-درصد رطوبت سبکدانه ها ..... ۴۳

۴-۲-تاثیرات دما بر آب مورد نیاز ..... ۴۴

۴-۳-افزودن آب در محل کارگاه ..... ۴۴

۴-۴-نسبت های سنگدانه ..... ۴۴
۴-۵-فرایند اختلاط ..... ۴۵
۴-۶-حجم مخلوط ..... ۴۶
۴-۷-مخلوط کردن ..... ۴۸
۴-۸-پر کردن مخلوط کن ها ..... ۴۹
۴-۹-مخلوط کن (میکسر) ..... ۴۹
۴-۱۰- حمل و نقل بتن سبکدانه در محل ..... ۴۹
۴-۱۰-۱- کامیون های مخلوط کن ..... ۵۱
۴-۱۰-۲- زمان حمل و نقل و زمان انتظار ..... ۵۲

**۵- پمپ بتن سبکدانه ..... ۵۳**
۵-۱-شرایط رطوبتی سنگدانه ها ..... ۵۴
۵-۲-نگهداشت رطوبت ..... ۵۶
۵-۳-پمپ ها و سیستم های پمپ ..... ۵۷
۵-۴-نسبت های اختلاط ..... ۵۹
۵-۵-مصالح سبک درشت دانه ..... ۶۱
۵-۶- مصالح سبک ریزدانه ..... ۶۲
۵-۷-آب و اسلامپ ..... ۶۳
۵-۸-مصالح سیمانی ..... ۶۴
۵-۹- مواد افزودنی معدنی ..... ۶۵
۵-۱۰-مواد افزودنی ..... ۶۶

**۶- مروری بر روش‌های آزمایش پایداری و پمپ پذیری ..... ۶۹**
۶-۱-آزمایش‌های پایداری و کنترل جداشدگی ..... ۶۹
۶-۱-۱-آزمایش جایدهی بتن در ابعاد واقعی ..... ۶۹
۶-۱-۲-آزمایش پایداری SINTEF ..... ۷۰
۶-۱-۳- دیگر روش های آزمایش پایداری ..... ۷۱
۶-۲-آزمایش های پمپ پذیری بتن ..... ۷۱
۶-۲-۱- آزمایش حجم / فشار ..... ۷۳
۶-۲-۲-توسعه و گسترش آزمایش پمپ پذیری بتن سبک ..... ۷۴
۶-۲-۲-۱-معرفی ..... ۷۴
۶-۲-۲-۲-دستگاه آزمایش ..... ۷۵
۶-۲-۲-۳-مشاهدات اولیه از روند آزمایش ..... ۷۶
۶-۲-۲-۴-مراحل آزمایش پمپ پذیری بتن سبک ..... ۷۸
۶-۲-۳- مثالی از آزمایش های محلی برای آزمودن قدرت پمپاژ بتن سبک دانه :..... ۷۹
۶-۲-۴- بررسی قابلیت پمپ پذیری سبکدانه های متداول ..... ۸۰
۶-۲-۵- توجه های اصلی در خصوص پمپاژ ..... ۸۱

**۷-عملیات پس از بتن ریزی ..... ۸۳**
۷-۱-تراکم ..... ۸۳
۷-۱-۱-نحوه انجام آزمایش تراکم ..... ۸۵
۷-۱-۲-تجهیزات ..... ۸۵
۷-۱-۳-مراحل انجام کار ..... ۸۵
۷-۲-عمل آوری ..... ۸۷
۷-۳-پرداخت ..... ۸۸
۷-۴-زبرکردن سطوح ..... ۸۹

**۸- کنترل های کارگاهی بتن سبکدانه ..... ۹۱**
۸-۱- کنترل مخلوط ..... ۹۱
۸-۲- تنظیم میزان بتن تولید شده ..... ۸۲
۸-۳- موقعیت نمونه ..... ۹۳
۸-۴- اسلامپ و میز جریان ..... ۹۴
۸-۵- وزن مخصوص ..... ۹۵
۸-۶- درصد هوا ..... ۹۶
۸-۷- آزمایش مقاومت فشاری و آزمایش های در جا ..... ۹۷
۸-۸- شاخص جدا شدگی ..... ۹۷

**۹- اقتصاد بتن سبکدانه ..... ۹۹**
۹-۱- هزینه جابجایی ..... ۱۰۴

**۱۰- نتیجه گیری ..... ۱۰۷**

**بخش دوم-مطالعات آزمایشگاهی**


**۱- حدود خدمات ..... ۱۰۹**

**۱- آزمایش های سبکدانه ..... ۱۱۱**

۲-۱-آزمایش های انجام گرفته بر روی سبکدانه ..... ۱۱۱

۲-۱-۱- وزن مخصوص..... ۱۱۱

۲-۱-۲- دانه بندی..... ۱۱۳

۲-۱-۳- تعیین مقاومت نسبی سبکدانه ها با استفاده از دستگاه سایش لس آنجلس..... ۱۱۴

۲-۱-۴- جذب آب ..... ۱۱۵

**۳-روش آزمایش ..... ۱۱۹**

۳-۱- مشخصات مصالح مورد استفاده در ساخت نمونه ها..... ۱۱۹

۳-۲- روش ساخت، قالب گیری و عمل آوری..... ۱۲۰

۳-۳- آزمایش های انجام شده بر روی بتن سخت شده..... ۱۲۰

الف- مقاومت فشاری..... ۱۲۰

ب- مقاومت کششی ..... ۱۲۱

ج-مقاومت خمشی..... ۱۲۲

د-وزن مخصوص بتن سخت شده..... ۱۲۲

ه-جذب آب بتن سخت شده..... ۱۲۲

و-آزمایش تنش-کرنش فشاری و تعیین مدول الاستیسیته استاتیکی..... ۱۲۳

**۴- آزمایشهای مقدماتی برای تعیین حدود مقادیر بهینه..... ۱۲۵**

۴-۱- دسته اول: آزمایش های مقدماتی ..... ۱۲۵

۴-۲-دسته دوم: آزمایش های پارامتری..... ۱۲۶

۴-۲-۱-بررسی پارامتر مقدار سبکدانه ..... ۱۲۶

۴-۲-۲- بررسی پارامتر نوع سبکدانه..... ۱۲۹

۴-۲-۳- بررسی پارامتر عیار سیمان و نسبت آب به سیمان..... ۱۳۱

**۵- طرح اختلاط های پیشنهادی ..... ۱۳۵**

۵-۱- طرح اختلاط نهایی لیکا ۷۰۰ ..... ۱۳۵

۵-۲- طرح اختلاط نهایی لیکا ۵۰۰ ..... ۱۳۶

۵-۳- توصیه های اجرایی..... ۱۳۸

**بسمه تعالی**

## پیشگفتار

بخش اول نتایج تحقیقات انستیتو مصالح ساختمانی در خصوص سبکدانه سازه ای لیکا در مراسم روز بتن سال ۱۳۸۶ تحت عنوان ***"سبکدانه سازه ای"*** منتشر گردید و مورد استقبال قرار گرفت. در آن گزارش عمدتا به ظرفیت مقاومتی سبکدانه سازه ای لیکا، به عنوان مبنایی برای شناخت محدوده کاربرد سبکدانه های لیکا برای ساخت بتن سبک سازه ای پرداخته شده بود. به این دلیل طرحهای ارایه شده در بخش اول نتایج الزاما شرایط کارپذیری مناسب برای کاربرد در کارگاه را دارا نبودند. علاوه بر آن طرحهای بررسی شده از دیدگاه ملاحظات اقتصادی بهینه نشده بودند. این در حالی است که در ادامه تحقیقات که از سال گذشته آغاز گردید، بهینه کردن طرح های اختلاط بتن سبک سازه ای و قابل اجرا بودن آن ها در کارگاه های ایران مورد توجه قرار گرفته و گزارش حاضر نتیجه مطالعات انجام یافته است.

در گزارش حاضر ابتدا مطالعات کتابخانه ای در خصوص مسائل اجرائی بتن سبک سازه ای با استفاده از تجارب کشورهای مجرب در زمینه دانش بتن سبک سازه ای ارائه شده است. سپس در بخش دوم، نتایج تحقیقات انجام شده در آزمایشگاه انستیتو مصالح ساختمانی در زمینه طرح های اختلاط بهینه برای لیکای سازه ای ۵۰۰ و ۷۰۰ که دارای کارپذیری مناسب باشند عرضه گردیده است.

همانگونه که بارها مطرح شده است، استفاده از بتن سبک سازه ای در کشور ما به دلایل گوناگون یک ضرورت اجتناب ناپذیر است و مسیر تحقیق و توسعه در این راه باید ادامه یابد. از سال گذشته تا کنون اقداماتی در این زمینه انجام پذیرفته است که بخشی از آن عبارتند از:

۱- اجرای محدود بتن سبک سازه ای در چند پروژه خصوصا در سقف ها.

۲- ترجمه و انتشار کتاب ***"بتن سبکدانه، دانش، فناوری و کاربردها"*** در انتشارات دانشگاه تهران با همکاری شرکت لیکا. این کتاب حاوی تجارب ارزشمند کشورهای اروپای شمالی در زمینه بتن سبکدانه است.

۳- فراهم تر شدن زمینه آشنایی مهندسین با ویژگیهای بتن سبک سازه ای

مسیر تحقیق، مسیری طولانی ولی ضروری برای نیل به اولین مراحل توسعه است. به یاری خدا انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران با هماهنگی سایر مراکز تحقیقاتی و با پشتیبانی شرکت لیکا در نظر دارد در ادامه، تحقیقات جامعی را در زمینه تکمیل پژوهش پیرامون مشخصات مکانیکی و همچنین پایایی بتن های سبکدانه و توجه به ریز ساختار این نوع بتن به انجام رساند. اگرچه پشتیبانی فنی برای حل مشکلات اجرایی این نوع بتن در کارگاه ها از بدیهی ترین وظایف انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران خواهد بود.

شایان ذکر است که رهنمودها و تذکرات مهندس نمدمالیان، مهندس محمدی و مهندس علیدوستی از شرکت لیکا در بهبود کیفی این گزارش نقشی غیرقابل انکار داشته و بنابراین شایسته تقدیر و قدردانی است. مولفین در پایان بر خود لازم می دانند که از همکاری آقایان سجاد بهرادی یکتا، حبیب الله نازنینی و محمد فرشچیان دانشجویان دانشکده فنی که در تهیه مطالب گزارش همکاری نمودند و همچنین از کمک و یاری محمود ریحانی، داود ریحانی و محسن گلزاری تکنسینهای انستیتو مصالح ساختمانی که در انجام آزمایشها کوشش و سعی فراوان نموده اند تشکر و قدردانی نمایند.

بدیهی است تذکرات و رهنمودهای کلیه پژوهشگران و صاحب نظران ما را در ادامه این مسیر یاری خواهد کرد.

محمد شکرچی زاده

نیکلاس علی لیبر

مهرداد ماهوتیان

احسان آشوری

انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران

پائیز ۸۷

# بخش اول

# مطالعات کتابخانه ای

# ۱-تاریخچه کاربرد بتن سبکدانه

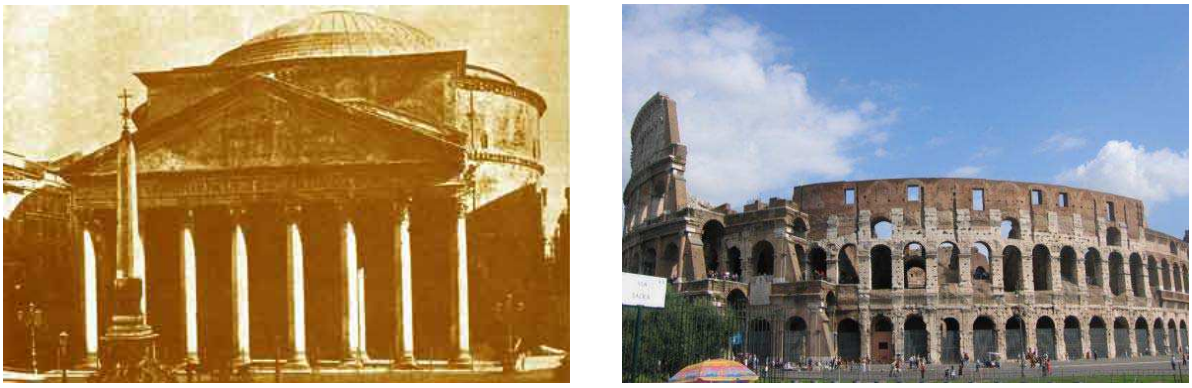
**مقدمه**: شناخت تاریخچه بتن سبکدانه و روند گسترش کاربرد آن در دنیا و همچنین موارد عمومی استفاده از بتن سبکدانه به شناخت پتانسیل کاربرد بتن سبکدانه در ایران کمک می کند. بنابراین در این فصل به شروع صنعت بتن سبک، مواردی از ساختمان هایی که با بتن سبکدانه ساخته شده اند، کشتی های سبکی که در جنگ جهانی مورد استفاده قرار گرفتند و همچنین نمونه هایی از پل هایی که در تمام و یا قسمتی از آن ها از بتن سبکدانه استفاده شده است، اشاره می شود. در ادامه توضیحی مختصر در خصوص المان های پیش ساخته سبک و همچنین چشم اندازی که برای بتن سبکدانه سازه ای می توان متصور شد، آورده شده است. قابل ذکر است که توضیحات کامل در خصوص انواع بتن سبک و مشخصات بتن سبکدانه در قسمت اول گزارش بتن سبک سازه ای (تعیین ظرفیت مقاومتی) آورده شده است. با توجه با موضوع گزارش که کاربرد بتن سبکدانه ساخته شده با سنگدانه های رس منبسط شده لیکا است روند شکل گیری این سبکدانه و کاربردهای آن با دقت بیشتری بررسی می گردد.

## ۱-۱-پیش زمینه های تاریخی

اولین زمان استفاده از بتن های سبک به بیش از ۲۰۰۰ سال پیش باز می گردد. چندین سازه بتن سبک در منطقه مدیترانه قرار دارند، اما مشهورترین آنها که عبارتند از بندر Cosa، معبد Pantheon و استادیوم Coliseum در زمان امپراطوری روم ساخته شده اند. در شکل ۱-۱ تصویر شماتیک بندر Cosa آورده شده است.

***شکل ۱-۱-تصویر شماتیک بندر Cosa***

شکل ۱-۲ استادیوم Coliseum و معبد Pantheon را که با بتن سبک ساخته شده اند را نشان می دهد.



*(ب)* *(الف)*

***شکل ۱-۲-(الف): استادیوم Coliseum (ب): معبد Pantheon***

در بندر Cosa که در حدود سال ۲۷۳ قبل میلاد ساخته شده است از بتن سبکی استفاده شده که از مواد طبیعی آتشفشانی ساخته شده بود. سازندگان اولیه آموختند که استفاده از ریزدانه های انبساط یافته برای ساخت سازه های دریایی که در محل آنها ساحل شنی و ماسه وجود دارند، مناسب ترند. آنها برای اینکه سنگدانه های آتشفشانی را از مجموعه مواد آتشفشانی استخراج کنند و در بندرگاه Cosa استفاده کنند، ۴۰ کیلومتر به سمت شمال شرقی حرکت کردند. این بندرگاه در سواحل جنوبی ایتالیا واقع شده است و شامل تعدادی از ستونهای چهارضلعی (مکعب های ۴ متری) است که به داخل دریا کشیده شده است. در طی مدت دوهزار سال نیروهای طبیعی تنها باعث ایجاد فرسایش در سطح این سازه شده اند. هم اکنون این بندر به دلیل رسوب زایی متروک شده است و مورد استفاده قرار نمی گیرد.

معبد Pantheon در سال ۲۷ قبل از میلاد مسیح به اتمام رسید. در این سازه بتن از نظر وزن مخصوص از پایین تا بالای گنبد تغییر می کند. مهندسان رومی اعتماد بنفس کافی داشته اند تا گنبدی با قطر ۴۳/۳ متر بسازند که تا بیش از ۲۰۰۰ سال بی رقیب باقی مانده است. سازه اکنون در وضعیتی خوبی قرار دارد و تا امروز از آن برای بجا آوردن اعمال مذهبی استفاده می شود. گنبد شامل دیواره ای تو در تو است که از چارچوبی از جنس چوب ساخته شده است که این امر برای کاهش بار مرده موثر می باشد. نقش و نگارهای

سطح چوب هنوز هم در این سازه دیده می شود. قالب کاری عالی سطح که کاملا نمایان اند به بیننده بروشنی نشان می‌دهند که سازندگان اولیه نیز بصورت بسیار عالی برهنر قالب بندی بتن سبک مسلط بوده-اند.

استادیوم Coliseum که در سال ۷۵ تا ۸۰ پس از میلاد ساخته شد یک آمفی تئاتر بسیار بزرگ است که ظرفیت آن ۵۰،۰۰۰ صندلی می باشد. فونداسیون بوسیله بتن سبک قالب گیری شده است؛ این بتن از تکه های خرد شده آتشفشانی بدست آمده بود. دیوارها متخلخل و سبک بودند که دلیل آن استفاده از دانه های آجری بود. همچنین طاق ضربی و فضای بین دیوارها با استفاده از توف متخلخل سبک ساخته شده بود.

### ۱-۲-تاریخچه بتن سبکدانه در عصر جدید

بسیار جالب است که صنعتی که با اجرای آسمان خراش ها و سایر سازه ها شناخته می‌شود، برای نخستین بار از طریق کاربرد آن در کشتی های اقیانوس پیما معرفی شد. اگرچه نخستین کار بر روی رس و اسلیت منبسط شده در ۱۹۰۸ انجام گرفت اما هنوز یک دهه از آن نگذشته بود ( در زمان جنگ جهانی اول) که این محصول با کاربردهایی با مقیاس وسیع روبرو شد. ساخت کشتی های سبک توسط ناوگان ایالات متحده یکی از مهمترین کاربرد استفاده از بتن سبک بود که بعنوان بازوهای دولت آمریکا شناخته می‌شد. یکی از قدیمی ترین استفاده ها از بتن سبک سازه ای در کشتی ها و کرجی ها در سال ۱۹۱۸ بود. مشکلات لجستیکی که با ورود ایالات متحده به جنگ جهانی اول در سال ۱۹۱۷ ایجاد شد به مشکل کمبود صفحات فلزی مرغوب برای ساختن کشتی افزود. ناوگان دریایی ایالات متحده مکلف شد که یک برنامه کشتی سازی با مصالحی جدید را طراحی کند. یکی از این مصالح بتن بود که قبلا در کشتی سازی کشورهای اسکاندیناوی از آن استفاده می شد.

اتحادیه ناوگان آمریکا دریافت که برای استفاده از بتن سبک در سازه کشتی، وزن مخصوص بتن نباید از ۱۷۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب بیشتر و مقاومت فشاری آن نیز باید تقریبا برابر با ۲۸ مگاپاسکال باشد. با

استفاده از سنگدانه های رسی منبسط شده در کوره های گردان بتن با مقاومت ۳۴ مگاپاسکال و وزن مخصوص ۱۷۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب بدست آمد.

انگیزه مهم برای بهبود بتن سبکدانه در سال ۱۹۴۰ ایجاد شد، در آن زمان آژانس ملی خانه سازی ایالات متحده متوجه پتانسیل بتن سبک برای ساخت سازه ها شد. با پشتیبانی برخی دیگر از نهادهای مرتبط آموزش های موازی و همزمان در آزمایشگاه های اداره ملی استاندارد برای تعیین ویژگی های بتن های ساخته شده با دامنه گسترده ای از انواع سبکدانه ها انجام شد. این آموخته ها و تحقیقات ابتدایی توجه خود را روی پتانسیل بتن سبک برای استفاده در سازه ها متمرکز کردند و علاقه مندی جدیدی را روی اعضای سبک سازه ای با قاب خمشی پدید آوردند. بر مبنای نتایج به دست آمده از این تحقیقات کاربرد بتن سبکدانه در سازه های ساختمانی نیز آغاز گردید. برای مثال در سقف های ساختمان ۴۲ طبقه Prudential life در شیکاگو از بتن سبک استفاده شد. نمونه ای دیگر قابها و دال تخت سازه ۱۶ طبقه هتل هیلتون در دالاس از بتن سبک ساخته شدند. این کاربردهای سازه ای بیش از پیش تحقیقات را به سوی شناخت ویژگی های بتن سبک هدایت کرد.

کاربرد دیگر بتن سبکدانه در ساخت سکوهای فراساحلی غوطه ور در آب است. کاهش ۲۵ درصدی وزن در بتن های مسلح معمولی به مقدار ۵۰ درصد بار را در هنگام شناور شدن در آب کاهش خواهد داد. به همین دلیل متخصصین صنایع گاز و نفت دریافتند که بتن سبک بدلیل مزایا و امتیازهای زیادی که دارد می تواند در سازه های غوطه ور در آب بکار رود و عملکردی مشابه با سازه هایی که در اسکله ساخته شده اند و برروی پی قرار می گیرند، داشته باشد. برای آماده کردن اطلاعات فنی لازم برای ساخت سازه های بتنی، یک کنسرسیوم شرکتهای نفتی برای ارزیابی سبکدانه های مناسب جهت تولید بتن های سبک پرمقاومت تشکیل شد. ارزیابی ها در حدود سال ۱۹۸۰ شروع شد و نتایج نیز در سال ۱۹۹۲ انتشار یافت. بعنوان نتیجه ای از این تحقیق، اطلاعات طراحی در دسترس عموم قرار گرفت و بتن سبک توانست برای کاربردهای جدیدی که در آنها به مقاومت و دوام زیاد احتیاج بود، بکار رود. هم اکنون در آیین نامه ACI318 تمهیداتی در خصوص

طراحی سازه به وسیله بتن سبکدانه آورده شده است. همچنین در نسخه های جدید نرم افزار SAP مصالح بتن سبکدانه، به مجموعه مصالح موجود در نرم افزار اضافه شده است.

### ۱-۳-آغاز صنعت رس منبسط شده

آغاز کاربرد بتن سبکدانه در عصر جدید با ساخت سبکدانه های مصنوعی از رس منبسط شده که علاوه بر سبکی، مقاومت خوبی داشته و امکان تولید یکنواخت آنها به صورت صنعتی میسر است آغاز گردید. استفان جی هایدی (Stephen J. Hayde، ۱۹۱۸)، یک سازنده آجر و مهندس سرامیک، فرایند کوره چرخان را ابداع کرد و کاربرد سنگدانه رس منبسط شده را توسعه بخشید. هایدی با داشتن تجربه قابل توجهی که در مورد ساخت و ساز و مشکلات آن داشت در پی یافتن راهی به منظور حل مشکلات آن بود. او دریافت که می توان از مواد سبک وزن منبسط شده که دور انداخته می شوند به عنوان سنگ دانه سبک استفاده کرد. این مواد از منافذ منفصلی تشکیل شده اند که در اثر تشکیل و انبساط گازهای داخل سنگ رس ایجاد می شوند. همچنین دارای سختی زیادی مانند شیشه هستند. در نتیجه این مواد الزامات سنگدانه ها یعنی سختی و نفوذناپذیری را دارا هستند و وزن مخصوص کمتری نسبت به سنگدانه های معمولی مانند شن و ماسه دارند. استدلال هایدی که بعدها توسط آزمایشهای تجربی اثبات شد، این بود که یک سنگدانه با ویژگی های ذکر شده می تواند بارهای مرده سازه های بتنی را کاهش دهد و در نتیجه مشکلات هزینه و طراحی را حل کند. این سبکدانه های تولید شده توسط هایدی بعنوان ماده ای ایده آل برای ساختن بتن های مخصوص محسوب شد. تقریبا بعد از یک دهه تجربه و آزمایش، هایدی فرآیند ساختن این سنگدانه ها توسط گرما دادن به ذرات کوچک رس و اسلیت در کوره گردنده را ثبت کرد. با این وجود او استفاده رایگان از حقوق امتیازش را برای فازهای اجرایی و آزمایش برنامه کشتی سازی، به دولت فدرال اهدا کرد. در نتیجه ساخت سبکدانه رسی به صورت گرم نمودن تدریجی رس به منظور فرصت یافتن گازهای محبوس برای ایجاد تخلخل به سرعت رایج شد. شواهد نشان می دهد که بتن ساخته شده با این مصالح رفتار مکانیکی مشابه با بتن های معمولی دارد. با گذشت زمان، محققان آزمایش های بیشتری را انجام دادند که یافته های هایدی را

تایید می کرد. آژانس ملی استاندارد موظف به تحقیق و آزمایش های تکمیلی در خصوص تولید عمده سنگدانه ها شد.

سبکدانه های مصنوعی با انواع دیگری از منابع طبیعی یا محصولات جانبی صنایع نیز تولید می شوند. امروزه ساخت سبکدانه های مقاوم با خاکستر بادی، روباره کوره آهنگدازی، شیل و دیگر منابع متداول است. برای مثال تولید تجاری روباره های منبسط شده در سال ۱۹۲۸ آغاز شد و در سال ۱۹۴۸ اولین بتن سبکدانه با کیفیت سازه ای در پنسیلوانیای شرقی تولید شد. در این گزارش تمرکز بر روی سبکدانه های تولید شده با رس منبسط شده و بتنهای سبک ساخته شده با آن می باشد. برای رعایت اختصار توضیحات مشروح در مورد دیگر سبکدانه های مصنوعی در این بخش ذکر نشده است.

### ۱-۴-کشتی های ساخته شده با بتن سبکدانه

سلما[1] کشتی سبکی بود که در ژوئن سال ۱۹۱۹ به آب انداخته شد. سلما اولین کشتی بتنی ساخته شده در آمریکا نبود، آتلانیتسین ۳۰۰۰ تنی در دسامبر ۱۹۱۸ به آب انداخته شد. بدنه کشتی که با بتن سبک مسلح و سنگدانه های رس منبسط شده ساخته شده بود دارای ضخامت ۵ اینچ در کف و ۴ اینچ در جداره اطراف بود. برای ساخت این کشتی ۲۶۶۰ یارد مکعب بتن مسلح با ۱۵۵۰ تن میلگرد و یا به عبارت دیگر ۱۶۵ تن فولاد مسلح کننده در هر یارد مکعب بتن مصرف گردید.شکل۱-۳ کشتی سبک سلما را نشان می دهد.

***شکل ۱-۳-کشتی سبک سلما***

[1] ***Selma***

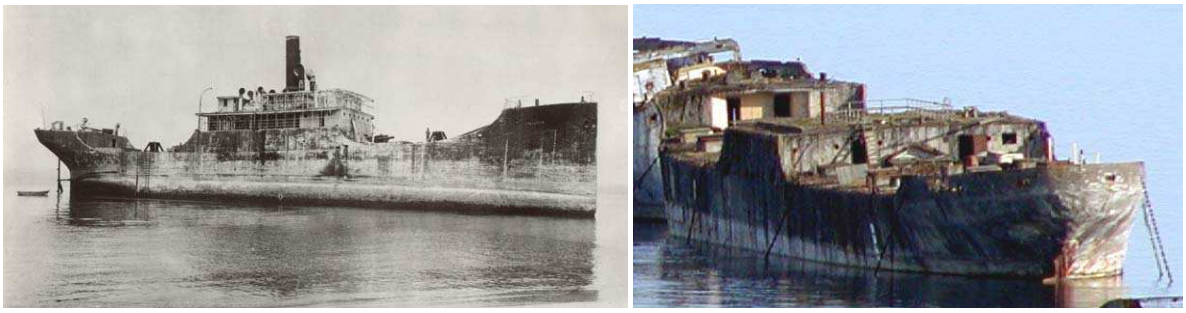
برای اینکه در مقاطع داخلی نازک بدنه کشتی و اطراف شبکه های میلگرد بتن ریزی خوبی انجام شود باید از بتن بسیار سیال و روان استفاده می شد. یکی از مهندسان دستگاهی ساخت که با استفاده از آن امکان تعیین روانی این نوع بتن بطور موفقیت آمیز وجود داشت. این دستگاه از یک قالب استوانه ای ۱۲×۶ اینچ و تعدادی مسیرهای عمود ثابت تشکیل شده که به کمک آنها می توان قالب را بالا برد. استوانه از بتن پر شده، سپس بالا برده می شود و مقدار افت اندازه گیری می گردد. نتیجه بعنوان افت روانی برحسب اینچ گزارش می گردید. پس از چند سال استفاده از کشتی سلما، تعمیرات اساسی برروی آن انجام شد و تجهیزات جدیدی به آن اضافه شد. پس از این اقدامات، بلافاصله وارد سرویس حمل ونقل نفت خام از بندر Tampico به تگزاس شد و یک دوره خدمت رسانی کوتاه ولی رضایت بخش داشت.

در جولای سال ۱۹۵۳، The Engineers Testing Inc. ,Texas اقدام به بررسی بدنه سلما واقع در خلیج Galveston نمود. هدف از این بازبینی، بررسی مقدماتی و انتشار گزارشی درباره بتن سبک کشتی که مدت ۳۴ سال در آب دریا بود، عنوان شده بود. نمونه هایی از بدنه و تیرهای داخلی تهیه شدند و شرایط فولاد و شرایط عمومی بتن در آنها مورد بررسی قرار گرفت. گزارش ارائه شده در تاریخ ۱۵ سپتامبر سال ۱۹۵۳ نشان داد که بتن سبک استفاده شده در کشتی در شرایط بسیار خوبی است و هیچگونه ترکی قابل رویت نیست. در ادامه کشتی هایی سبکی که در خلال جنگ جهانی دوم مورد استفاده قرار گرفتند، مورد بررسی قرار می گیرد.

تا زمان وقوع جنگ جهانی دوم، سنگدانه سنگ رس منبسط بعنوانی یکی از مصالحی مطرح بود که در ساخت کشتی ها استفاده می شد، ولی تفاوت مهم این بود که ۱۴ کشتی جنگ جهانی اول اکثرا آزمایشی بودند. با این وجود تمام ۱۰۴ کشتی ساخته شده در جنگ جهانی دوم دارای ظرفیت بار در بازه ۳۲۰۰ تا ۱۴۰۲۵۰ تن که اندازه قابل توجهی می باشد، بودند.

۲۴ فروند از این کشتی ها، کشتی های بزرگ دریاپیما بودند و ۸۰ فروند دیگر کشتی های دریاپیما با ابعاد بسیار بزرگ بودند. کل ظرفیت بار آنها ۴۸۸۰۰۰ تن یا معادل ظرفیت ۴۶ کشتی معمولی بودند. هزینه کل

ساخت این کشتی ها ۱۶۷ میلیون دلار بوده است. شکل ۱-۴ تعدادی از کشتی‌های ساخته شده با بتن سبک را نشان می دهد.



***شکل ۱-۴-نمونه‌هایی از کشتی های ساخته شده با بتن سبک***

گزارش های ارائه شده در خصوص این کشتی ها نشان می دهد که این کشتی ها مقاومت بی نظیری در برابر بمب ها دارند و قابلیت جابجایی بسیار مناسبی دارند. بر اساس این گزارش ها هنگامیکه یک بمب در پشت کشتی منفجر می شود رگباری از قطعات پوسته پوسته شده ایجاد می شود ولی هیچ صدمه ای به افراد وارد نمی شود.

همچنین کمیته گزارش داد که در طول عمر کشتی بدنه کشتی ها کاملا ضدآب می باشند و می توانند محموله های گندم و شکر را بدون هیچ گونه آسیب ناشی از تراوش و تعریق حمل کنند. این موضوع حتی برای کشتی هایی که در نزدیک بمب ها مورد آزمایش قرار گرفتند نیز صادق بود. همچنین در گزارش های ارائه شده، به این مطلب اشاره شده بود که بارهایی مثل سولفور که برای فولاد مخرب است را می توان با کشتی های ساخته شده با بتن سبک حمل کرد. کمیته اضافه نمود که تعمیرات کشتی در دوران خدمت کم هزینه تر است و به صورت کلی نیاز کمتری به تعمیر وجود داشت. این کمیته نتیجه گرفت که مدارک کافی وجود دارد که نشان می دهد که اگر کشتی ساخته شده با بتن سبک به خوبی طراحی و تجهیز شود مانند کشتی های فولادی عمل خواهد کرد.

### ۱-۵-ساختمان های ساخته شده با بتن سبکدانه

یکی از کاربردهای مهم سبکدانه ها در ساختمان، کاربرد آن در ساخت بلوک های بنایی سبک است. مدت کوتاهی پس از جنگ جهانی اول اشتراوب[۲] یک المان بتنی ساخت که در آن از پوکه های زغال چوب بعنوان سنگدانه استفاده شده بود و بلوک پوکه نام گرفت. بعد از آن سروی[۳] از کانزاس نخستین بلوک بنایی که در آن سنگ رس منبسط شده سبک بعنوان سنگدانه بکار رفته بود را معرفی کرد و این سنگدانه سنگ رس منبسط به سرعت درمیان تولید کنندگان بلوک و مصرف کنندگان محصول محبوبیت پیدا کرد.

ویژگی های عمومی بلوکهای بنایی سبک عبارتند از: عایق بندی بسیار خوب، وزن کم، انقباض و جمع شدگی جزئی و مقاومت فشاری برابر بلوک سنگین وزن با مقدار سیمان برابر. تولید کنندگان بلوک دریافتند که اگر از سنگدانه سبک برای ساخت بلوک استفاده شود فروختن آن به معماران و مهندسان آسان تر است. از دیدگاه عملی وزن این بلوک ها کمی بیشتر از نصف وزن بلوک های معمولی بود بنابراین هزینه های حمل و نقل بطور اساسی کاهش یافت.

درجه بالای عایق بندی بلوک های رس منبسط شده در برابر گرما، آتش و صوت باعث شد این بلوک ها جذابیت زیادی بویژه برای مهندسان معماران داشته باشد. از سوی دیگر با توجه به اینکه سبک وزنی باعث افزایش بهره وری گروه های کاری می گردید، پیمانکاران آن ها را به استفاده از این بلوک ها تشویق می کردند. بناهای مستقل نیز دریافتند کار با این بلوک ها خستگی کمتری به همراه دارد و در صورت استفاده از این بلوک ها به طور متوسط در روز ۴۰۰۰ پوند کمتر بلند می کنند. از آن زمان تا کنون استفاده از این بلوک ها چندین برابر شده است و تخمین زده می شود نیاز به بلوک های سبک استاندارد سالانه به بیش از یک میلیارد عدد برسد.

المان های بتنی سبک را می توان در هر نوع ساختمان از ساختمان های روستایی و مزرعه تا خانه ها، سازه های صنعتی و تجاری، مدرسه ها، تئاترها، ساختمان های چندطبقه، نیروگاه ها و ساختمان های تفریحی به کار برد. پذیرش روز افزون سطوح منقوش بلوک ها باعث شده است از آن ها به عنوان یکی از المان های

[2] ***F.J.Straub***

[3] ***Dan F. survey***

طراحی داخلی برای پارتیشن بندی در ساختمان ها استفاده شود. این نوع کاربرد بویژه برای ساختمان های آموزشی مثل کلاس های مدرسه، واحدهای کتابخانه و مواردی نظایر آن مفید می باشد. مزیت اقتصادی استفاده از این بلوک ها بدلیل ویژگی های عایق صدا و عایق بندی قابل توجهی که دارند قابل توجه است. در شکل ۱-۵ دو ساختمانی را نشان می دهد که با استفاده از بتن سبک ساخته شده است.

***شکل ۱-۵-نمونه‌هایی از ساختمان‌های ساخته شده با بتن سبک***

یک موضوع فرعی بسیار جالب این است که بیشترین مصرف این بلوک ها در دو منطقه از آمریکا با شرایط آب و هوائی کاملا متضاد بوده است:

- در فلوریدا که آب و هوایی نسبتا گرم دارد ثابت شده است که بلوک بتن سبک راه حل موثر در برابر تندبادهای دریایی است.
- در آلاسکا که بسیار سردسیر است این بلوک ها به دلیل ویژگی های عایق بندی و مقاومت در برابر آتش و نفوذ باران های افقی که از اقیانوس آرام حرکت می کنند، بطور گسترده بکار می روند.

بلوک های سبک برای انواع دیوارهای داخلی و خارجی و باربر و غیرباربر ایده آل هستند. بدلیل اینکه تولید کنندگان طیف گسترده ای از انواع واحدهای ویژه مثل بلوک های تیرچه، تیرهای نعل درگاه، بلوکهای مربع شکل، واحدهای ستون چهارچوب و واحدهای شیاری ویژه برای پنجره های فولادی را تولید نمی کنند، استفاده از این بلوک ها در ساخت و ساز نیاز به افراد حرفه ای و ماهر را برای کارهای ویژه کاهش داده است و با به حداقل رساندن زمان انجام پروژه بهره وری را افزایش داده است. این موضوع به یکی از ملاحظات

اساسی و مهم در پروژه های بزرگ تبدیل شده است. در این پروژه ها از روش مسیر بحرانی و تکنیک های مشابه برای هماهنگ کردن و برنامه ریزی کارها به منظور رسیدن به بیشتر ین بهره وری استفاده می شود. در ادامه بطور خلاصه به مزایای بناهای ساخته شده با بتن سبک اشاره می گردد.

همانطور که اشاره گردید واحدهای بنایی سبک که در آن ها از سنگدانه های رس منبسط شده استفاده می شود به بخش بزرگی از عرصه ساخت و ساز تبدیل شده اند، که یکی از دلایل آن سهولت جابجا کردن و حرکت دادن آنهاست. برای به روز نگه داشتن اطلاعات فنی در همه کاربردها انستیتو تحقیقاتی شیل، رس و اسلیت منبسط شده[۴] (در کشور آمریکا) مطالعاتی درباره مقاومت در برابر آتش، عایق بندی حرارتی و سایر ویژگی های بتن ساخته شده با رس منبسط شده انجام داده است. در ادامه مروری اجمالی در خصوص مزیت های این المان ها انجام شده است.

وزن سبک تر و مقاومت بیشتر: کاهش بار مرده طبیعتا یکی از فوائد استفاده از سنگ رس منبسط شده در تمام ساخت و سازها می باشد. با استفاده از بلوک سبک، وزن دیوار کاهش می یابد.

مقاومت در برابر آتش: واحدهای بنایی سبک که از سنگدانه سنگ رس منبسط شده ساخته شدند هیچ ماده اشتعال زایی ندارند چون سنگدانه های رس، سنگ رس و سنگ لوح کاملا لعابدار هستند و بدلیل ساختارشان که خنثی هستند یک عایق حرارتی ایده آل محسوب می شوند. آزمایش استاندارد نشان می دهند که بلوک سبک سنگ رس منبسط شده، در مدت زمانی بیشتر از ۲ ساعت به دمای بحرانی می رسد.

عایق حرارتی و مقاومت در برابر نفوذ رطوبت: علاوه بر مقاومت در برابر آتش، عایق حرارتی نیز توسط بلوک های بنایی سنگدانه رس منبسط تامین می شود. در صورت استفاده از این المان ها، از دست دادن گرما از طریق دیوار به کمترین مقدار می رسد. تغییرات دمایی تاثیر اندکی برروی دیوارها دارد بگونه ای که امکان میعان رطوبت موجود در هوای گرم داخل تقریبا حذف می شود. بطور مشابه طبیعت سنگدانه موجود در بلوک ها باعث می شود مقاومت زیادی در برابر رطوبت ناشی از تراوش و رطوبت هوا داشته باشند.

[4] ***Expanded shale clay and slate Institute***

طبیعت سلولی منحصر به فرد سنگدانه سبک آن را بویژه برای اجرای دیوارهای بنایی که در آنها حذف انتقال صوت مهم است، مناسب ساخته است. همان طور که قبلا اشاره شد یکی از کاربردهای اصلی این المان در مدارس و کتابخانه هاست. در کتابخانه مرکزی دانشگاه Utah که اخیرا کامل شده است و استفاده گسترده ای از بتن سبک سازه ای در قاب ها و طبقات آن شده است، از واحدهای بنایی سبک برای اتاقک های ۱۱۰۰ دانشجو و برای تمام دیوارهای داخلی ساختمان بکار رفته است. کاربرد این بلوک های بنایی در ساختمان های اداری، آپارتمان و هتلها نیز دارای منافع اقتصادی است.

در آزمایش های انفجار اتمی Yucca Flats خانه های یک طبقه که با المان های بتنی سبک ساخته شدند، دوام آوردند و خسارت سازه ای ناچیزی به آن ها وارد شد. این در حالی است که ساختمان های قابی و آجری موجود در آن محل کاملا تخریب شدند. مهم است که به یاد داشته باشیم که این ساختمان های سبک برای آزمایش طراحی نشده بودند و تنها مطابق با آئین نامه ساختمانی نواحی لرزه خیز ساخته شده بودند.

### ۱-۶-بتن سبکدانه در صنعت پیش ساخته

استفاده از المان های پیش ساخته بتن سبک سازه ای، در مورد پل ها و سازه های مشابه که در آن ها شرایط فیزیکی و رفت و آمد باعث سخت و غیرممکن شدن روش های معمولی و متداول می شود، مفید است. شکل ۱-۶ نمونه هایی از المان های پیش ساخته را نشان می دهد.

***شکل ۱-۶-نمونه‌هایی از المان‌های پیش ساخته***

بعنوان مثال در اسکله ای در Venia کالیفرنیا از ۲۱۵ دال سبک پیش ساخته استفاده شده است که این المان ها در کارخانه تولید و سپس به این محل منتقل شده بودند.

یکی دیگر از موارد استفاده از بتن سبکدانه، استادیوم Chavez Ravine Ios Angeles Dodger بود که در آن تعداد زیادی اعضای سازه ای سبک بکار رفته بود. تیرها، ستون ها و پلکان اعضایی بودند که در محیطی نزدیک کارگاه بتن ریزی شده و به محل سازه منتقل شده بودند. تمام المان های بالایی این استادیوم نیز از بتن سبک می باشد.

در این پروژه فاصله از کارگاه مانعی برای استفاده از بتن سبک پیش ساخته نبود. به عنوان مثال در ساخت دانشگاهی در آمریکا از ۷۴ پانل بتن سبک پیش ساخته استفاده شده بود. این پانل ها توسط کامیون از کارخانه ساخت قطعات پیش ساخته در فاصله ۳۰۰ مایلی، به کارگاه منتقل می شدند. دلیل اصلی استفاده از سنگدانه سنگ رس منبسط شده در این پروژه کاهش وزن بوده است که کاهش هزینه های حمل و نقل و جابجایی را به همراه داشته است.

پیش ساختگی بتن همچنین می تواند در مواردی که طراحی ها و مدل های پیچیده و یا فرم های تکراری وجود دارند، مزیت اقتصادی داشته باشد. همچنین صرفه جویی در وزن که با استفاده از این سنگ دانه ها

حاصل می شود، صرفه جویی در استفاده از وسایل و ماشین آلات حمل و نقل را ممکن می سازد. در ساخت فرودگاه اوکلند بتن سبک سازه ای پیش ساخته نقش مهمی را در سودآوری این پروژه ایفا کرد. ۴۸ قطعه مخروطی هذلولی ۳۰ فوتی برای شکل سقف ترمینال، فقط شامل ۲ فرم پیش ساختگی بود. در ضمن بیش از ۲۰ المان مخروطی شکل برای ساختمان بلیط فروشی ترمینال به طور مشابه فقط شامل ۲ فرم پیش ساختگی بود. قرار دادن تمام قسمت های سقف تنها با یک جرثقیل صورت پذیرفت، در حالی که بعضی از قطعات مخروطی شکل ۷۱ فوت طول داشتند. باید به این نکته توجه داشت که در صورت استفاده از بتن معمولی، برای انجام این کار دو چرثقیل مورد نیاز بود. هزینه ساخت سقف با این روش به ازای هرفوت مربع ۱/۵۵ دلار بود که در مقایسه با ۲/۲۵ دلار برای هرفوت مربع با روش های دیگر بسیار اقتصادی تر می باشد. بدین ترتیب ۴۰٪ در هزینه ها صرفه جویی شد. شکل ۱-۷ نحوه جابجایی ونصب نمودن المان های پیش ساخته را نشان می دهد.

***شکل ۱-۷-جابجا نمودن المان های پیش ساخته***

### ۱-۷-استفاده از بتن سبکدانه در ساخت پل ها

علاوه بر کشتی و المان های بلوک، استفاده از سنگدانه رس منبسط شده در پل ها با استقبال چشمگیری روبرو گردید. یک مورد از پل هایی که در آن از بتن سبک استفاده شده است، پلی واقع برروی خلیج کوچک سباستین در ساحل شرقی فلوریدا می باشد. در زمان ساخت این پل سه شرط به طراحان تحمیل شده بود:۱- سازه نباید در اثر هوای حاوی یون کلر دچار خورندگی شود ۲-کانال عبور باید در طول اجرا باز نگه داشته شود و نباید بوسیله داربست های موقت تنگ شود. ۳-دهانه اصلی عبوری باید ۱۸۰ فوت طول داشته باشند.

این دهانه ۱۸۰ فوتی با استفاده از شاه تیرهای ۱۲۰ فوتی از بتن سبک سازه ای ساخته شده بود که توسط شاه تیرهای ساخته شده از بتن معمولی که ۳۰ فوت آن از طرف پایه های پل طره شده بود نگه داری می شد. شاه تیرهای به ارتفاع ۶ فوت و طول ۱۲۰ فوت از بتن سبک ۵۱ تن وزن داشت در حالی که شاه تیرهای مهار طره ای به طول ۶۵ فوت از بتن معمولی ۴۲ تن وزن داشتند.

طولانی ترین پل بتن سبک پیش ساخته تک دهانه آمریکا در ایالت واشنگتن قرار دارد و روی بخش جنوبی رودخانه Washington klicitat قرار دارد. دهانه ۱۳۱ فوتی آن از ۴ تیر تشکیل شده که کنار هم قرار گرفته اند و دارای ابعاد ۴ فوت عرض ۴ فوت و ۱۱ اینچ ارتفاع می باشد. هم چنین وزن آن ۱۰۵۰۰۰ پوند می باشد که وزن را به میزان ۳۷۰۰۰ پوند در هر تیر در مقایسه با بتنی حاوی شن و ماسه معمولی کاهش می دهد. برای اجتناب از هزینه های بتن ریزی و پیش کشیدگی در کارگاه، بتن ریزی تیرها و پیش کشیدگی در محوطه تامین سنگدانه ها انجام شده بود. تیرها سپس بوسیله ماشین ریلی تا فاصله ۵۰۰ فوتی کارگاه پل سازی منتقل شده بودند. این پل در سال ۱۹۶۵ کامل شد و بیانگر یک پیشرفت بسیار بزرگ بود که در مدتی بیش از یک دهه از ساخت پل پیاده رو در روستای Prairie در کانزاس در سال ۱۹۵۴ اتفاق افتاده بود. این پل پیاده رو به طول ۵۲ فوت، طولانی ترین تیر بتنی سبک پیش تنیده در آن زمان در ایالات متحده بود. پیشتر استفاده از رویه های بتنی سبک برای عرشه فوقانی پل سن فرانسیسکو روی خلیج کوچک Dakland منجر به صرفه جویی اقتصادی به میزان ۳ میلیون دلار شد.

کارشناسان تخمین زده اند که در بیش از ۴۰۰۰ پل در آمریکا از بتن سبکدانه استفاده شده است. قدیمی ترین پلی که در آن از بتن سبکدانه سازه ای استفاده شده است مربوط به پلی است که برروی خلیج سن فرانسیسکو-اوکلند، در سال ۱۹۲۷ احداث شده است. در سال ۱۹۳۶ پلی دیگر احداث گردید که در آن از بتن سبکدانه استفاده شده است. عرشه بالایی اصلی این عرشه توسط بتن سبکدانه بتن ریزی شده است. همچنین در سال ۱۹۶۰ عرشه پل با بتن سبکدانه بازسازی شد. شکل ۱-۸ پل خلیج سن فرانسیسکو را نمایش می دهد.

***شکل ۱-۸- پل خلیج سن فرانسیسکو-اوکلند***

پل سبک دیگری که با سیستم CIP PT Box در سال ۱۹۷۷ ساخته شد پل رودخانه Napa در ایالت کالیفرنیا می باشدکه در شکل ۱-۹ نشان داده شده است.

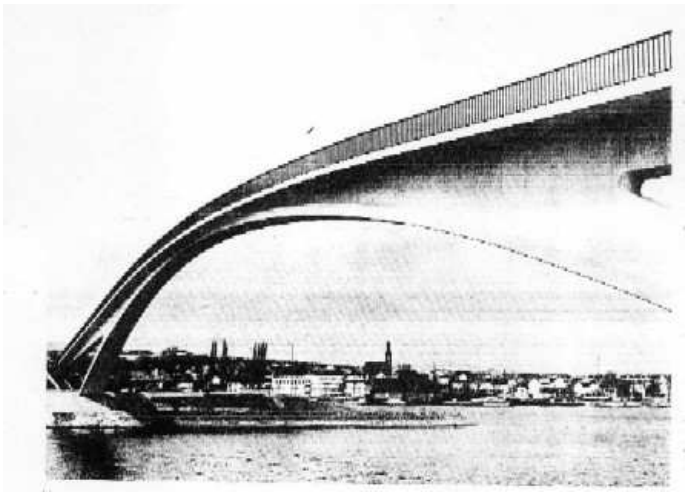
***شکل ۱-۹-پل رودخانه Napa***

یک پل سبک دیگر هم با سیستم Ltwt PS Griders در سال ۱۹۶۹ و در سن دیگو ایالت کالیفرنیا ساخته شد که در شکل ۱-۱۰ تصویر آن آورده شده است.

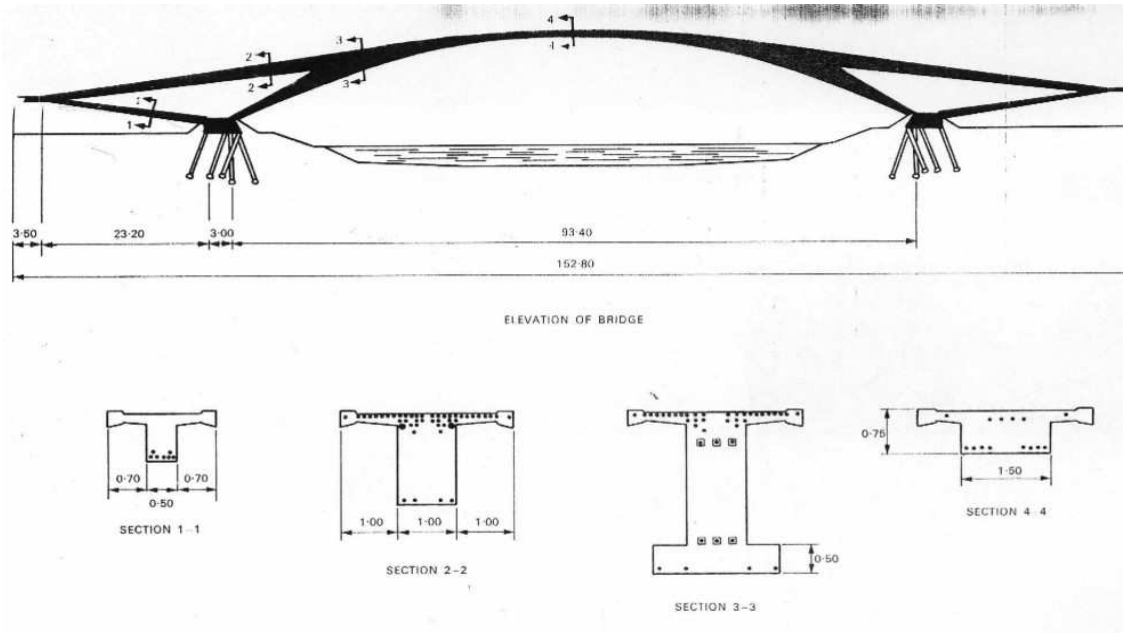
***شکل ۱-۱۰-پل سبک در سن دیگو ایالت کالیفرنیا***

علاوه بر آمریکا، کشورهای اروپایی نیز با توجه به مزایای گسترده ای که در بتن سبکدانه وجود داشت، اقدام به ساخت و ساز با این مصالح نمودند. نمونه ای از این سازه ها را می توان در کشور آلمان مشاهده نمود. پل

Dyckerhoff با دهانه ۱۵۳ m، پل عابر پیاده ای است که احتمالاً اولین سازه بتن سبکی است که به صورت طره ای اجرا شده است. این پل به مناسبت صدمین سالگرد تشکیل شرکت Dyckerhoff-zementwerke، در این شهر ساخته شده است. شکل‌های ۱-۱۱ و ۱-۱۲ به ترتیب پل عابر Dyckerhoff و پی آن را نشان می دهند.



***شکل ۱-۱۱- پل ویسبادن آلمان***

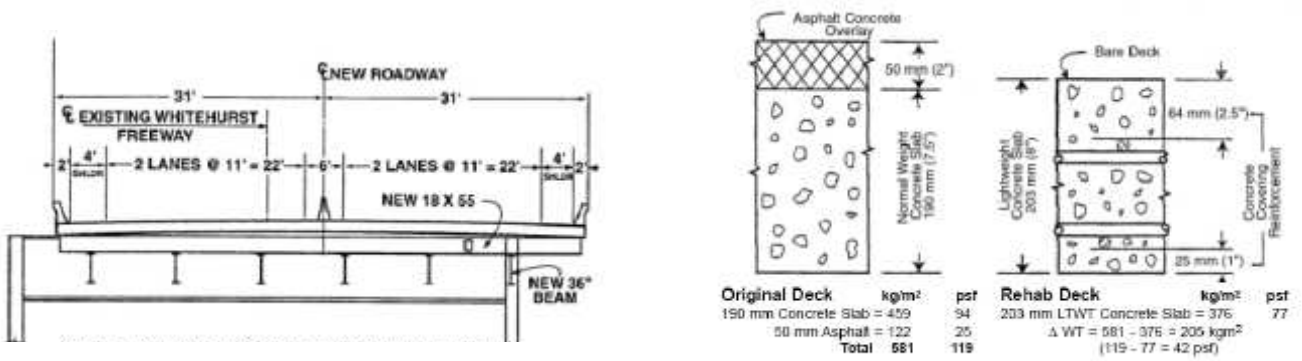



***شکل ۱-۱۲- پی ها و شمعهای پل ویسبادن***

در ساخت تمام اجزای پل، بجز پی و شمع ها، از بتن سبک با دانه های شیل منبسط شده استفاده شده است. متوسط مقاومت فشاری بتن استفاده شده در حدود ۳۹/۵ مگاپاسکال و وزن مخصوص بتن بین ۱۶۴۰

- ۱۵۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب بوده است. نکته جالب در طراحی این پل این بود که تغییر شکل بازوهای طره ای آن با استفاده از تئوری دقیق محاسبه شده بود. محاسبات نشان داد که بار ۱۴/۲ تنی مربوط به تجهیزات ساخت و قالب بندی که روی طره اعمال شد، باعث تغییر مکانی در حدود ۴۰ میلیمتر در هر طرف می شود که این مقدار با مقدار تئوری تنها در حدود ۳ میلیمتر تفاوت داشت. این بدین معنی است که فرضیات انجام شده در طراحی درباره مدول الاستیسیته بتن ساخته شده با شِیل منبسط شده تا حد زیادی با واقعیت (در محدوده رفتار خواسته شده) مطابقت داشته است.

مهندسان آمریکایی در سال ۱۹۹۹ در شهر New Bern و برروی رودخانه Neuse پل سبک دیگری را بهره برداری کردند که سیستم آن عرشه سبک CIP بود. پروژه بعدی که در آمریکا و با بتن سبکدانه مورد بهره برداری قرار گرفته است، یک راه اصلی در ایالت واشنگتن دی سی است. این اتوبان به عنوان شاهراه اصلی در واشنگتن مورد استفاده قرار می گیرد. با گذشت چند سال از دوران بهره برداری، عرشه پل این اتوبان بازسازی شد. بدین منظور، عرشه با وزن کم جایگزین عرشه با وزن معمولی شده است. این کار با استفاده از بتن سبکدانه صورت گرفته است. شکل ۱-۱۳ بازسازی عرشه پل را نشان می دهد.




***شکل ۱-۱۳-بازسازی عرشه پلی با استفاده از بتن سبکدانه***

پروژه دیگر پل رودخانه James در ایالت Virginia State است. این پل در حومه شهر ریچموند واقع شده است. در این پروژه عرشه پل جدید سبک، جایگزین عرشه قدیمی شد. در طول انجام عملیات ساختمانی این پل، تردد ترافیک مختل نگردید و تعویض عرشه پل بدون هیچگونه اخلالی در رفت و آمد صورت پذیرفت. عرشه کل دهانه پل به صورت یک عرشه پیش ساخته از جنس بتن سبکدانه ساخته شده بود که بصورت

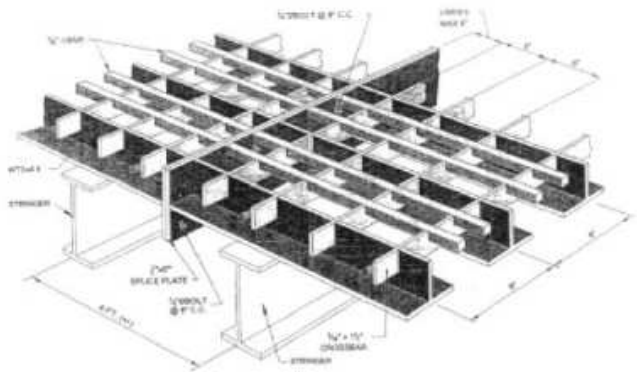
یکجا در محل نصب گردید. شکل ۱-۱۴ پل رودخانه James و شکل ۱-۱۵ تصاویر نحوه اجرای عرشه پل را نشان می دهد.

***شکل ۱-۱۴-پل رودخانه James***

***شکل ۱-۱۵-تصویر شماتیک و واقعی از نحوه اجرای عرشه پل رودخانه James***

پل سبک دیگر، پل بروکلین در شهر نیویورک در آمریکا می باشد. عرشه این پل به صورت اضطراری جایگزین عرشه قدیمی شد. سیستم این پل شامل یک شبکه فلزی می باشد که درون این شبکه با بتن سبکدانه پر شده است. تعریض این پل نیز با پانل های پیش ساخته ۷.۵x۳۰ فوت انجام شده است. شکل ۱-۱۶ نمای پل را نشان می دهد.

*(الف)*



*(ب)*

***شکل ۱-۱۶-(الف) پل بروکلین (ب) نمای شماتیک عرشه پل***

پل دیگری که در این گزارش به آن اشاره شده است، پل رودخانه Coleman در یورک تاون ایالات متحده می باشد. این پل دارای ۲ خط و عرض ۲۶ فوت می باشد و سازه اصلی آن در سال ۱۹۵۲ به اتمام رسیده است. اضافه کردن ظرفیت عبور این پل با استفاده از بتن سبکدانه در سال ۱۹۹۶ صورت پذیرفت. پل بازسازی شده شامل ۴ خط و شانه راه و ۷۴ فوت عرض می باشد. از بتن سبکدانه در عرشه این پل استفاده شده است. استفاده از بتن سبکدانه در این پروژه با توجه به تجربیات خوب قبلی صورت گرفته که در پروژه های قبلی بدست آمده بود و همچنین ملاحظات اقتصادی، مد نظر قرار گرفته است. به علت کاهش وزن عرشه، وزن فولاد مصرفی در خرپای زیر سازه کاهش یافت و از مقاطع کوچکتر در اجرای خرپاها استفاده گردید. در این پروژه یک راه انحرافی به طول ۷۰ مایل ایجاد شده بود تا در طول زمان عملیات ساختمانی، ترافیک ازآن قسمت عبور کند. تمام خرپاهای زیر عرشه در کمتر از ۲ هفته جایگزین شدند. تمام این خرپا به صورت پیش ساخته تهیه شده بودند و در محل نصب گردیدند. شکل ۱-۱۷ نحوه سوار کردن قسمت جایگزین را نشان می دهد.

***شکل ۱-۱۷-پل رودخانه Coleman***

پروژه دیگر مربوط به بازسازی یک پل در ایالت واشنگتن دی سی، برروی رودخانه Woodrow در کشور آمریکا می باشد. سازه اصلی این پل در سال ۱۹۶۲ تکمیل گردید. عرض کلی اولیه این پل ۸۹ فوت بود. عملیات جایگزینی در سال ۱۹۸۳ به پایان رسید. از بتن سبکدانه در عرشه پل استفاده گردید. این عمل باعث کاهش وزن و افزایش پایایی پل با توجه به شرایط محیطی سختی که پل در آن قرار داشت، گردید.

### ۱-۸-استفاده از بتن سبکدانه در ساخت ساختمان های بلند مرتبه

در سال های اخیر ساختمان های فراوانی ساخته شده اند که در ساخت آن ها از بتن سبک سازه ای استفاده شده است. از این رو تعیین دقیق بلندترین سازه ساخته شده با بتن سبک دشوار است. در بعض از موارد استفاده از بتن سبک اجازه اضافه کردن طبقات، علاوه بر آن چه را که در طراحی پیش بینی شده است را می دهد. به عنوان مثال یک برج اداری در اتاوا که طراحی اصلی آن (در صورت استفاده از بتن معمولی) بر مبنای ۲۲ طبقه بوده است، در نهایت با استفاده از بتن سبک به ۲۵ طبقه رسید. نمونه ای دیگر مربوط به ساختمانی در میسیسیپی می باشد که در ابتدا سازه ساختمان برای ۲ طبقه طراحی شده بود ولی با استفاده از بتن سبک تعداد طبقات این ساختمان به ۶ رسید.

### ۱-۹-چشم اندازهای کاربرد بتن سبکدانه

گام های بلند و سریعی در راه تکنولوژی بتن سبک سازه ای در سال های اخیر برداشته داده است. افزایش مقاومت سبکدانه ها از یک سو و از سوی دیگر کاهش وزن سبکدانه ها و قابلیت تولید انبوه آن ها از سوی دیگر باعث شده است تا ساخت سازه ها با بتن سبکدانه گسترش چشمگیری داشته باشد. از دیگر مزایایی که استفاده از این مصالح را با استقبال روبرو کرده است می توان به مزیت های اقتصادی (کاهش هزینه های حمل و نقل) و بر طرف نمودن محدودیت های وزنی بتن معمولی اشاره کرد.

بیش از یک دهه پیش، فرانک رایت[5] فردی که در به کارگیری از بتن سبک برای سازه ها نابغه بود، توصیفی درباره سال های آینده برای این نوع بتن بیان کرد. او گفت: «عصر ما برای ما بهترین ابزارها برروی زمین را فراهم آورده است. ما تقریبا می توانیم هرچیزی را بسازیم اما فقط باید درک کنیم که چگونه از قدرتمان برای ساخت آن ها استفاده کنیم». نقطه های تحول در معماری، مهندسی و ساخت و ساز که در سال های اخیر بدست آمده است نشان می دهد که چگونه این توصیف در حال برآورده شدن است.

[5] Frank L loyal wright

# ۲-مشخصات فیزیکی سبکدانه‌ها

## ۲-۱-مقدمه

پیمانه گیری، اختلاط، حمل و نقل و عملیات ساخت مربوط به بتن سبک شبیه به فرایند هایی متناظر در بتن معمولی است؛ هرچند که تفاوتهای خاصی نیز وجود دارد، خصوصاً در نحوه نسبت بندی و روش های پیمانه گیری که منجر به بدست آوردن محصول نهایی با کیفیت مناسب خواهد شد. وزن و ویژگی های جذب کنندگی دانه های سبک متفاوت با سنگدانه های متراکم معمولی هستند و باید به دقت مورد توجه قرار گیرند. این ویژگیها بر نحوه توزین مصالح متشکله بتن تاثیر می گذارد. بنابراین پیمانه گیری و توزین مصالح بتن سبک تا حدی متفاوت با توزین مصالح بتن معمولی است. اصول پایه روشهای پیمانه گیری بتن سبکدانه که در این بخش بیان می شود بر مبنای دستورالعمل های ذکر شده در ACI211.2 می باشد. روشهای متداول دیگری امروزه در نقاط مختلف بکار می روند که ممکن است مورد استفاده قرار گیرند. شکل ۲-۱ نمونه ای از دستگاه کنترل پیمانه گیری کامپیوتری را نشان می دهد.

***شکل ۲-۱- نمونه ای از دستگاه پیمانه گیری کامپیوتری***

کنترل کیفیت بتن خمیری پلاستیک سبکدانه مستلزم تاکید ویژه و توجه به اندازه گیری مصالح و روشهای پیمانه گیری به همراه کنترل آب در اسلامپ و جذب آب مصالح ریزدانه است. در ادامه به منظور آشنایی بیشتر با فاکتورهایی که بر پیمانه گیری موثر است، به صورت اجمالی به تعریف این پارامترها پرداخته

می شود. آب آزاد و جذب شده، حجم های مطلق، وزن مخصوص توده ای و وزن مخصوص دانه ای پارامترهایی هستند که به اختصار به آن ها اشاره می شود. سپس عواملی که بر وزن مخصوص تاثیر گذارند مرور می شود. در پایان فصل نیز مطالبی در خصوص پیمانه گیری درشت دانه و ریز دانه سبک و کنترل مخلوط آورده شده است.

## ۲-۲-آب آزاد و آب جذب شده

یکی از نکات مهم در پیمانه گیری مخلوط بتن سبک وزن داشتن شناخت درست از آب بکار رفته در مخلوط است. مجموع آبی که در تولید واحد حجم بتن مصرف شده است به دو بخش تقسیم می شود. یکی آب جذب شده توسط سنگدانه ها و دیگری مشابه آنچه که در دانه های بتن با وزن معمولی استفاده شده است وتحت عنوان آب آزاد طبقه بندی می شود. آب آزاد، اسلامپ را کنترل می کند و زمانی که با مقدار سیمان داده شده مخلوط می شود بر مقاومت خمیر سیمان تاثیر می گذارد. مقدار آب جذب شده تابعی از نوع مصالح سبکدانه، جذب رطوبت اولیه (پیش تر شدگی) و زمان اختلاط است. آب جذب شده حجم دانه ها یا بتن را تغییر نمی دهد چون درون مصالح جای می گیرد. از همه مهمتر اینست که آب جذب شده تاثیری برروی نسبت آب به سیمان و در نتیجه بر مقاومت بتن و یا بر اسلامپ بتن نخواهد گذاشت. تفاوت اصلی بتن سبکدانه با بتن معمولی در میزان جذب آب سبکدانه ها است. به دلیل متخلخل بودن سبکدانه ها میزان جذب آب سبکدانه چندین برابر سنگدانه های متراکم معمولی است و این امر بر کارایی مخلوط بتن تازه و مقاومت و پایایی بتن سخت شده تاثیر گذار است. در جدول ۲-۱ جذب آب ۱۵ دقیقه تا ۷ روزه سبکدانه های متداولی که در بتن استفاده می شوند آورده شده است. باید توجه نمود که تعیین دقیق میزان آب جذب شده در بتن تازه مشکل است زیرا نتایج به دست آمده از آزمایش جذب آب به وسیله مستغرق کردن سنگدانه ها در آب خالص اندازه گیری می شود در حالیکه در بتن تازه مخلوطی از آب و سیمان وجود داشته که طبیعتا غلیظتر از آب بوده و میزان جذب آن کمتر از آب خالص است. بعلاوه با گذشت زمان آب آزاد

مخلوط بتن کاهش یافته و در نتیجه جذب موثر کاهش می یابد. معمولا میزان آب جذب شده توسط سبکدانه ها در بتن سبکدانه را برابر میزان جذب آب ۳۰ دقیقه ای سبکدانه در آب خالص در نظر می گیرند.

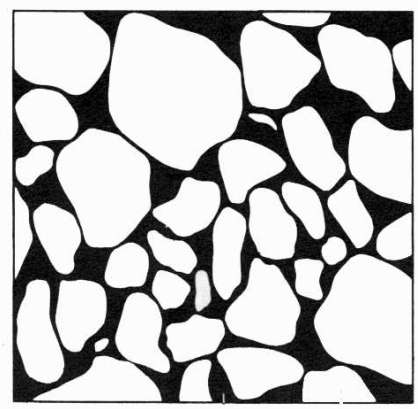
***جدول ۲-۱- جذب آب ۱۵ دقیقه تا ۷ روزه سبکدانه های متداول بتن***

| مصالح | اندازه دانه | جذب آب (٪) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱۵ دقیقه | ۳۰ دقیقه | ۶۰ دقیقه | ۲۴ ساعته | ۷ روزه |
| لیکا ۶۷۰ | mm ۸-۴ | ۸/۸ | *** | ۹/۷ | ۱۳/۹ | ۱۹/۶ |
| | mm ۱۲-۸ | ۷/۳ | *** | ۸/۶ | ۱۱/۱ | ۱۸/۰ |
| لیکا ۸۰۰ | mm ۸-۴ | ۶/۴ | ۶/۵ | ۱۳/۵ | *** | ۱۶/۹ |
| لیاپور ۳ | mm ۸-۴ | ۱۹/۰ | ۱۹/۳ | ۲۲/۱ | ۲۷/۵ | ۲۸/۰ |
| | mm ۱۲-۸ | ۱۸/۹ | *** | ۲۴/۸ | ۳۴/۱ | ۳۶/۴ |
| | mm ۱۶-۱۲ | ۲۲/۳ | *** | ۲۴/۵ | ۳۱/۰ | *** |
| لیاپور ۸ | mm ۸-۴ | ۷/۴ | *** | ۸/۴ | ۱۳/۱ | ۱۹/۴ |
| | mm ۱۲-۸ | ۵/۶ | *** | ۷/۶ | ۱۲/۳ | *** |
| | mm ۱۶-۱۲ | ۵/۶ | *** | ۷/۰ | ۱۱/۷ | *** |
| لیتاژ | mm ۸-۴ | *** | ۱۵/۰ | ۱۵/۵ | ۱۸/۰ | ۲۱/۰ |
| | mm ۱۲-۸ | *** | *** | *** | *** | *** |
| پومیس | mm ۸-۴ | *** | *** | *** | *** | *** |
| | mm ۱۲-۸ | ۳۶/۳ | ۳۶/۳ | ۶۶/۰ | *** | ۱۹۰/۰ |
| | mm ۱۶-۱۲ | ۳۹/۰ | ۳۹/۰ | *** | *** | ۷۶/۱ |

## ۲-۳-حجم ظاهری

حجم ظاهری مصالح حجمی است که جرم مشخصی از مصالح در حالت متراکم یا غیر متراکم اشغال می کند. این حجم شامل حجم بین ذرات مصالح نیز می باشد. در هنگام توزین و پیمانه گیری بتن در روش حجمی از حجم ظاهری مصالح استفاده می شود. به دلیل آنکه تراکم ذرات بر حجم ظاهری مصالح تاثیر گذار است حجم ظاهری در دو حالت متراکم نشده و متراکم شده میله خورده اندازه گیری می شود. شکل ۲-۲ حجم ظاهری سنگدانه هایی را نشان می دهد که در یک حجم مشخص قرار گرفته اند. به عبارت دیگر حجم ظاهری مجموع حجم سنگدانه و حجم حفرات هوای میان آنها است. حجم ظاهری معمولا برای پیمانه گیری حجمی سنگدانه ها استفاده می شود. هر چه قدر سنگدانه ها متراکم تر گردند حجم ظاهری جرم معینی از

آن کاهش می یابد. در صورتی که هدف اندازه گیری حجم خالص سنگدانه ها باشد از پارامتر حجم مطلق استفاده می شود.



***شکل ۲-۲- حجم ظاهری سنگدانه ها در یک حجم مشخص***

### ۲-۴-حجم مطلق

در بتن سبک از مصالح سبک به جای مصالح با وزن معمولی به منظور دستیابی به وزن مطلوب در هنگام سخت شدن بتن استفاده می شود. فضایی که مصالح در بتن اشغال می کنند حجم مطلق آن نامیده می شود. برای مثال در شکل ۲-۲ مساحت ناحیه سفید رنگ حجم مطلق سبکدانه ها را نشان می دهد. در هنگام طرح مخلوط بتن، مجموع حجم های مطلق تمام محتویات از جمله هوا باید برابر با حجم لازم برای اختلاط بتن باشد. حجم مطلق مصالح در هنگام طرح اختلاط بتن و در هنگام محاسبه حجم اشغال شده توسط سبکدانه ها در مخلوط مورد استفاده قرار می گیرد در حالیکه حجم ظاهری در هنگام توزین مصالح به کار می رود. طبق تعریف حجم مطلق مواد دانه ای متراکم نشده، حجم شبکه مواد جامد پس از حذف شدن خلل و فرج هوای بین ذرات است. حجم مطلق از فرمولهای زیر محاسبه میشود.

$$\text{حجم مطلق} = \frac{\text{وزن مصالح متراکم نشده در یک متر مکعب (Kg)}}{\text{وزن مخصوص دانه ای مصالح} \times ۱۰۰۰}$$

تعیین حجم مطلق عناصر تشکیل دهنده بتن مانند سنگدانه متراکم طبیعی، سیمان و آب به دلیل معلوم بودن وزن مخصوص دانه ای این عناصر کار آسانی است. از سوی دیگر حجم مطلق سبکدانه ها به دلیل

متغیر بودن وزن مخصوص دانه ای سبکدانه ها نسبتا مشکل تر است. تعریف وزن مخصوص دانه ای سبکدانه ها و نحوه تعیین آن در ادامه تشریح می شود.

### ۲-۵-وزن مخصوص دانه ای سبکدانه ها

اگر حجم مواد جامد به نحوی در نظر گرفته شود که شامل منافذ غیر قابل نفوذ، بجز لوله های موئینه نیز گردد، وزن مخصوص بدست آمده را وزن مخصوص دانه ای می گویند. در این صورت وزن مخصوص دانه ای برابر است با نسبت وزن سنگدانه های خشک شده در گرمخانه برای مدت ۲۴ ساعت به وزن آب هم حجم مواد جامدی که شامل منافذ غیر قابل نفوذ نیز باشد. وزن مخصوص دانه ای سنگدانه ها به وزن مخصوص کانی هایی که دانه های سنگی از آن ساخته شده اند و هم چنین به مقدار منافذ داخل آن ها بستگی دارد.

$$\text{وزن مخصوص دانه ای} = \frac{150}{V - 150}$$

### ۲-۵-۱-روش تعیین وزن مخصوص دانه ای سبکدانه ها

برای تعیین وزن مخصوص دانه ای سبکدانه به ترازو با دقت ۰/۵ گرم، استوانه شیشه ای با گنجایش ۱۰۰۰ میلی لیتر، استوانه شیشه ای با گنجایش ۵۰۰ میلی لیتر یا ۲۵۰ میلی لیتر برای ریزدانه ها و یک میله فلزی نازک نیاز است. این آزمایش بر اساس دانه های خشک انجام می شود. برای تعیین مقدار وزن مخصوص دانه ای، ۱۵۰ گرم از نمونه وزن شده و به آرامی بداخل یک استوانه اندازه گیری ۱۰۰۰ میلی لیتری ریخته می شود (A) در استوانه اندازه گیری جداگانه ای (B) مجموع حجم آب و میله فلزی تا خط نشانه ۴۰۰ میلی لیتری اندازه گیری می شود. میله فلزی را از استوانه B خارج کرده و بداخل استوانه A فرو می بریم که شامل دانه ها و آب می باشد. به آرامی میله را جهت خارج کردن حباب های هوا از داخل استوانه به حرکت در می آوریم. سپس میله را در وضعیت مشخص شده قرار می دهیم و حجم را قرائت می کنیم (V). این اندازه گیری باید حداکثر پس از ۳۰ ثانیه انجام شود. وزن مخصوص دانه ای با توجه به رابطه زیر بدست می آید (گرم بر میلی لیتر):

### ۲-۶-وزن مخصوص توده ای سبکدانه ها

وزن مخصوص توده ای وزن یک متر مکعب مصالح متراکم شده یا غیر متراکم تقسیم بر وزن یک متر مکعب آب است. تفاوت اصلی وزن مخصوص توده ای و وزن مخصوص دانه ای در این است که در هنگام محاسبه وزن مخصوص توده ای حجم سبکدانه ها به همراه فضای خالی داخل سبکدانه ها و فضای بین آنها در نظر گرفته می شود اما در محاسبه وزن مخصوص دانه ای صرفا حجم اشغال شده توسط ذرات جامد تشکیل دهنده سبکدانه ها و منافذ موئینه غیر مرتبط موجود در داخل سبکدانه ها ملاک محاسبات است. بنابراین وزن مخصوص دانه ای همیشه بیش از وزن مخصوص توده ای مصالح است. در محاسبه حجم مطلق مصالح از وزن مخصوص دانه ای و در هنگام محاسبه حجم ظاهری مصالح از وزن مخصوص توده ای استفاده می شود. روشهایی که در ضمیمه A و B از قسمت ACI211.2 در خصوص اندازه گیری ضریب وزن مخصوص (خشک) و درصدرطوبت آمده است، نتایج قابل اطمینانی را ارائه می دهد که می تواند مورد استفاده قرار گیرد. در ادامه به اختصار روش های اندازه گیری وزن مخصوص توده ای سبکدانه ها در دو حالت غیر متراکم و متراکم شده توضیح داده می شود.

### ۲-۶-۱-وزن مخصوص توده ای غیر متراکم

تجهیزات لازم برای بدست آوردن وزن مخصوص توده ای غیر متراکم عبارتند از ظرف مدرج با حجم ۱۰ لیتر و ارتفاع ۱ تا ۱/۵ برابر قطر آن، ترازو با دقت ۱ گرم و میله فلزی. در ابتدا وزن ظرف فلزی را بدست می آوریم. ($M_0$) حجم ظرف را بوسیله آب در درجه حرارت اتاق و وزن کردن آن بدست می آوریم. ($M_1$). سپس آب ظرف را خالی می کنیم و بعد از خشک شدن نسبی ظرف دانه های سبک وزن خشک شده را از بالا و کنار ظرف به صورت تدریجی به آن اضافه می کنیم. حداکثر ۲۰ سانتیمتر از ارتفاع ظرف را پر کرده و مقدار اضافی را بوسیله فرو بردن میله فلزی از ظرف خارج می کنیم. در نهایت ظرف و نمونه با هم وزن می شوند. ($M_2$). باید دقت گردد که ظرف در حین آزمایش نباید تکان محسوسی، به نحوی که دانه ها جابجا شوند، بخورد. با توجه به اعداد بدست آمده، مقدار وزن مخصوص از رابطه زیر بدست می آید.

$$P_0 = \frac{(m_2 - m_1)}{m_1 - m_0)} \times 100$$

### ۲-۶-۲-وزن مخصوص توده ای متراکم شده

از کمیت وزن مخصوص توده ای متراکم شده برای تبدیل مقادیر وزنی به مقادیر حجمی استفاده می شود. روشن است که وزن مخصوص توده ای به میزان تراکم سنگدانه ها بستگی دارد و نتیجه می شود که برای مصالح با وزن مخصوص دانه ای معین، وزن مخصوص توده ای به نحوه توزیع اندازه ذرات و شکل دانه ها بستگی خواهد داشت. به منظور اندازه گیری وزن مخصوص توده ای متراکم باید به صورت زیر عمل گردد.

تجهیزات لازم برای انجام آزمایش عبارت است از: ظرف مدرج با حجم ۱۰ لیتر و ارتفاع ۱ تا ۱/۵ برابر قطر آن، ترازو با دقت ۱ گرم و میله فلزی. ابتدا وزن ظرف خالی را بدست می آوریم ($M_0$). حجم ظرف را به وسیله پر کردن آب در درجه حرارت اتاق و وزن کردن آن بدست می آوریم ($M_1$). سبکدانه های خشک شده از بالا و حاشیه ظرف بتدریج در داخل آن ریخته می شود و مقدار اضافی به وسیله فروبردن میله فلزی در آن از ظرف خارج می گردد. همانند آزمایش قبلی، پر کردن ظرف و همچنین نداشتن حرکت در حین انجام آزمایشی از نکات مهم می باشد که باید دقت شود. وزن مخصوص توده ای متراکم شده (p1) زمانی بدست می آید که ظرف را از طریق دو دسته کناری آن بشدت تکان بدهیم. بعد از انجام عمل تکان دادن، ظرف را مجددا پر می کنیم و مقدار اضافی آن را خارج می کنیم و سپس نمونه و ظرف با هم وزن می شوند. ($M_2$). بر اساس اعداد بدست آمده وزن مخصوص توده ای متراکم شده با توجه به رابطه زیر بدست می آید:

$$P_1 = \frac{(m_2 - m_0)}{m_1 - m_0)} \times 100$$

### ۲-۷-عوامل موثر بر تغییرات وزن مخصوص سبکدانه

همانطور که اشاره شد وزن مخصوص های مختلفی را می توان برای سبکدانه تعریف نمود. این وزن مخصوص ها تاثیر مستقیمی بر پیمانه گیری و توزین بتن سبکدانه دارد. در این قسمت به بررسی عواملی که بروی وزن مخصوص سبکدانه تاثیر می گذارند پرداخته می شود.

وزن مخصوص مصالح سبکدانه وابسته به مواد خام بکار رفته و اندازه سنگدانه است. ذرات کوچکتر معمولاً وزن مخصوص بیشتری نسبت به ذرات بزرگتر دارند. وزن مخصوص نیز به واسطه تغییرات در میزان جذب و یا درصد رطوبت مختلف است. اگر مصالح سبکدانه بدون درنظر گرفتن این تغییر ات وزن مخصوص(حجم) مورد پیمانه گیری قرار گیرند ممکن است مشکلاتی در محاسبات حجم بتن تولید شده ایجاد شود. برای جلوگیری از بروز چنین مشکلاتی، گستره متنوعی از تنظیمات برای نسبت بندی استاندارد بتن سبک وزن در ACI 211.2 پیشنهاد شده است. برای حصول اطمینان از اینکه محصول بتن بدست آمده دارای حجم یا کیفیت مورد نظر می باشد، این تنظیمات شامل تنظیم اندازه وزنهای پیمانه ای مصالح سبک وزن ( درشت دانه و یا ریز دانه) است.

وزن مخصوص توده ای مصالح متراکم نشده خشک به دانه بندی، شکل و اندازه ذرات و به وزن مخصوص آن بستگی دارد. مصالح شکسته شده گوشه دار دارای خلل و فرج و فضاهای خالی بیشتری در میان ذرات مصالح هستند تا قطعاتی که شکل گرد یا کروی دارند. مصالح بد دانه بندی شده (تماماً یک اندازه) معمولاً دارای خلل و فرجهای بیشتری نسبت به موادی که دارای دانه بندی یکنواخت هستند، می باشند.

اگر تغییراتی درمنبع مواد خام یا در وسایل متراکم کردن یا غربال زنی و یا در روشهای تولید صورت گیرد، محصول بدست آمده حاوی فضاهای خالی متفاوت خواهد بود. ممکن است سبکدانه با اندازه متفاوت دارای فضای خالی نسبتا ثابتی باشند. هر ابزار تولیدی مقدار فضای خالی مشخصی برای هر اندازه ای ازمصالح تولید شده دارد که اطلاعات مربوط به آن را می توان از آن کارخانه بدست آورد.

بر خلاف وزن مخصوص توده ای که با تغییرات درصد رطوبت مصالح و میزان تراکم آن تغییر می کند وزن مخصوص دانه ای مصالح ثابت است. بنابراین حجم مطلق یا حجم جابه جا شده در بتن برای یک مصالح سبک وزن معین حتی اگر تراکم یا رطوبت جذب شده آن تغییر کند، یکسان خواهد بود. استفاده درست از این اصول اولیه، پیمانه گیری، تولید بتن و تحویل بتن سبک وزن را با اسلامپ مورد نظر و برای هر نوع کاربردی ممکن می سازد.

# ۳-نکاتی در مورد اجزای تشکیل دهنده بتن سبکدانه

با فرض اینکه سبکدانه ها مقاومت کمتری نسبت به خمیر سیمان سخت شده دارند، بتن های سبکدانه مقاومت فشاری کمتری در مقایسه با بتن های معمولی با نسبت آب به سیمان یکسان از خود نشان می دهند. همانطور که مطرح گردید، استفاده کردن از سبکدانه ها مزایای مختلفی دارد. این مزایا به دلیل پیوند آنها با خمیر سیمان و نزدیک بودن ضریب انبساط حرارتی و مدول الاستیسیته آنها با خمیر سیمان خشک شده است. آب جذب شده به وسیله دانه های سنگدانه، ممکن است کمکی به فرایند هیدراتاسیون باشد و تشکیل ترک های ناشی از خشک شدگی را به تعویق انداخته و یا کاهش دهد. مزیت دیگر این است که در طرح اختلاط لازم نیست سازگاری مدول الاستیسیته میان سنگدانه ها و خمیر سیمان بر خلاف بتن های معمولی در نظر گرفته شود. برتر از همه این موارد، کاهش ترک های ناشی از جمع شدگی و در نتیجه افزایش پایایی بتن سبکدانه است. در طرح اختلاط، ممکن است بخشی از سیمان با خاکستر بادی، روباره آسیاب شده کوره آهنگدازی و دوده سیلیس جایگزین شود. در تمامی این مواد مشخصات بتن سبکدانه تازه و سخت شده تحت تاثیر قرار می گیرد. در ادامه تاثیر برخی از مواد تشکیل دهنده بتن بر طرح مخلوط بتن سبک به صورت اجمالی بررسی می گردد.

## ۳-۱- درشت دانه های سبک

حداقل اندازه سبکدانه های درشت دانه به ۴/۷۵ میلیمتر محدود می شود. حداکثر اندازه سبکدانه های درشت را می توان تا ۳۷/۵ میلیمتر مد نظر قرار داد. با این حال، با توجه به مشکلات کار و بدست نیامدن بتنی با کارایی مناسب، در اکثر موارد حداکثر اندازه را به ۱۹ میلیمتر محدود می کنند. استفاده از درشت دانه های سبک و ریزدانه های معمولی متداولترین گزینه برای ساخت بتن سبکدانه می باشد. شکل ۳-۱ اندازه سبکدانه های درشت را نمایش می دهد.

***شکل ۳-۱- سبکدانه های درشت***

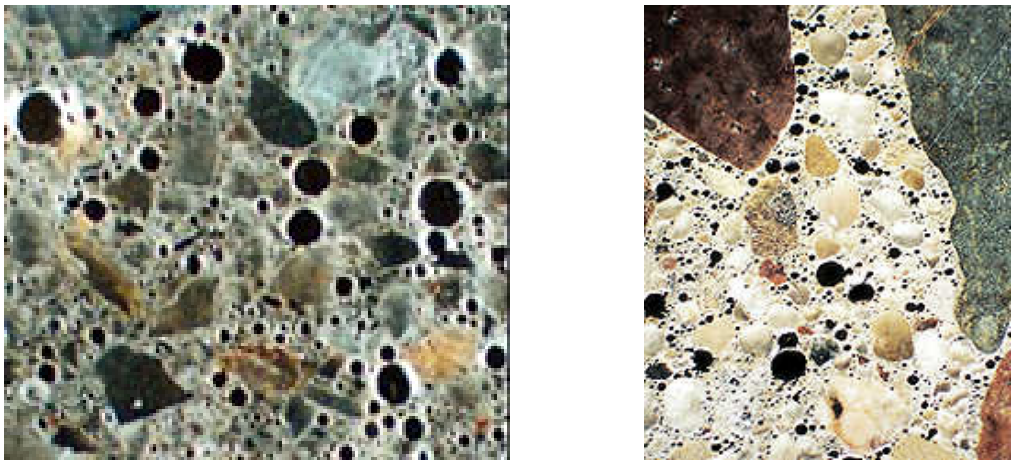
## ۳-۲- ریز دانه های سبک

اندازه اغلب ریزدانه های سبک به ۲ تا ۴ میلیمتر محدود می شوند. در برخی از موارد بتن های سبک تری مورد نیاز است که در این موارد استفاده کردن از ریز دانه سبک به جای ماسه طبیعی در ملات می تواند یک راه حل مناسب باشد. ریز دانه های سبک جاذب آب اند و نیازمند مقدار بیشتری آب برای یک کارآیی یکسان می باشند. ریز دانه های سبک به طور معمول منجر به یک مخلوط خشن می شوند که برای غلبه بر این اثر، مقدار عیار سیمان باید افزایش پیدا کند. همچنین باید توجه نمود که افزایش زمان اختلاط اثر مثبتی بر مشخصات رئولوژیک مخلوط بتن دارد.

## ۳-۳- افزودنی های حباب ساز

در بتن سبک، در بسیاری از موارد از مواد حباب ساز استفاده می شود. از این رو درصد هوای بتن، باید با دقت تحت کنترل باشد. علاوه بر تأمین مقاومت بیشتر در برابر یخ زدگی و آب شدن، وارد کردن حباب هوا در بتن باعث کاهش وزن مخلوط بتن هم می شود. علاوه بر موارد ذکر شده، حباب هوا موجب چسبندگی بیشتر اجزای اختلاط می گردد که این چسبندگی نه تنها روانی بتن را زیاد می کند بلکه جدا شدن ملات سنگین تر از دانه های سبک را به حداقل می رساند.

بطور خلاصه می توان گفت مواد افزودنی حباب ساز خصوصیات بتن تازه و سخت شده را تغییر می دهند به نحوی که بتن هوادار منسجم تر و دارای کارایی بهتری در مقایسه با بتن بدون هوای اضافی می باشد. از سوی دیگر پایایی آن در برابر سرما و یخبندان افزایش می یابد. شکل ۳-۲ بتن سبک دارای مواد حبابساز را نشان می دهد.



***شکل ۳-۲- بتن سبک دارای مواد حباب ساز***

مواد حباب ساز باید نیازهای ASTMC260 را تامین کند. ACI201.2R پیشنهاد می دهد که میزان درصد هوا بر اساس بیشترین اندازه اسمی سنگدانه ها و دوام مورد نیاز تعیین شود. برای همه بتن ها از جمله آن هایی که باید پمپاژ شوند این محدودیت ها باید با دقت بیشتری اعمال شوند. تاثیر مواد حباب ساز در پایه ریزی یک سیستم حباب هوایی خوب به عوامل زیادی بستگی دارد که مهمترین آن، عامل سازگاری مواد حباب ساز و سایر افزودنی هاست. تاثیر مواد حباب ساز و در نتیجه مقدار نهایی مواد حباب ساز به میزان ریزی سیمان، نوع سیمان، مقدار آب، خصوصیت شیمیایی سیمان و دیگر مواد افزودنی شیمیایی و معدنی داخل بتن بستگی دارد.

قابلیت حباب سازی بعضی از مواد حباب ساز از کربن تاثیر می پذیرد. کربن خاکستر بادی و یا مواد سیمانی دیگر می تواند به طور زیادی میزان مواد حباب ساز مورد نیاز برای دستیابی به حجم هوای مطلوب را زیاد کنند. کربن همچنین بر دوام هوا در داخل بتن نیز تاثیر می گذارد. تحقیقات صورت گرفته نشان می دهد که سنگدانه های در محدود الک شماره ۳۰ تا ۵۰ برای دوام حباب های هوا مهم هستند. تغییرات در میزان

و دانه بندی شن می تواند درصد هوای بتن را تغییر دهد. برای اطلاعات بیشتر در مورد مواد حباب ساز به بخش ۲ از ACI212.3R مراجعه کنید.

روش مندرج در ASTM C 173 دستورالعمل توصیه شده ای برای تعیین درصد هوا در بتن سبک می باشد. شکل ۳-۳ دستگاه اندازه گیری درصد هوا به روش ذکر شده در ASTM C 173 را نشان می دهد.

***شکل ۳-۳- دستگاه اندازه گیری درصد هوا به روش ASTM C 173***

نوع دیگر اندازه گیری درصد هوا در استاندارد ASTM C 231 شرح داده شده است. ASTM C 231 درصدی از هوا های موجود در خلل وفرج مصالح دانه ای سبک به اضافه هوای موجود در ملات را اندازه گیری می نماید. رواداری های معمول قابل قبول در خصوص میزان درصد هوای موجود در بتن، در بتن سبک نیز قابل استفاده می باشد. در شکل ۳-۴ دستگاه اندازه گیری درصد هوای بتن به روش ASTM C 231 نمایش داده شده است.

***شکل ۳-۴- دستگاه اندازه گیری درصد هوای بتن به روش ASTM C 231***

اما تغییرات میزان هوای موجود در بتن موجب تغییراتی در وزن مخصوص خمیری نیز می گردد. میزان هوای بیشتر از مقادیر مندرج در استاندارد ها، باعث کاهش چشمگیر مقاومت فشاری بتن می شود. این موضوع به ویژه در مخلوط های پر مقاومت و پر سیمان تاثیر بیشتری دارد. چنین افزایشی در میزان هوای محبوس باید موجب کاهش نسبتاً کمی در مقاومت بتن های کم سیمان مثلاً با عیار کمتر از ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب شود، اما می تواند باعث کاهش مقاومت ۱۰ درصدی در بتنهای با عیار سیمان زیاد، یعنی ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و یا عیارهای زیادتر شود. بنابراین بسیار مهم است که نظارت بسیار دقیقی بر میزان هوای محبوس در بتن سبکدانه اعمال شود. همچنین افزایش هوای محبوس به میزان ۲٪ می تواند باعث کاهش وزن مخصوص بتن به میزان ۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب شود

همانطور که پیشتر اشاره شد، مواد حباب ساز باعث ایجاد و به دام انداختن حباب های هوا در داخل بتن می شود. حباب های کوچک هوا در جلوگیری از خسارت زدن به بتن در هنگام سیکل های ذوب و یخ موثرند. حباب های بزرگ و درشت در طول عملیات تراکم و جایدهی بتن از بین می روند.

نتایج آزمایش های صورت گرفته بر روی بتن تازه بعد از پمپاژ، نشان می دهد که درصد هوای بتن بعد از پمپاژ نسبت به قبل از آن کاهش یافته است. بعد از پمپاژ حباب های هوای باقی مانده کوچکتر از میانگین اندازه حباب ها قبل از پمپاژ هستند. با این وجود پمپاژ بتن تاثیری برروی مقاومت در برابر سیکل ذوب و یخ ندارد. کاهش درصد هوای بتن در حین کار و یا در حین حمل به میزان ۱ تا ۱/۵ درصد پدیده جدیدی محسوب نمی شود. به عنوان مثال، پرتاب بتن به صورت قائم از یک سطل و یا در یک ترمی و یا خرطومی و یا پرتاب عمودی بتن در خط لوله می تواند باعث کاهش درصد هوا تا ۱/۵ درصد شود.به عنوان یک راهکار کلی می توان گفت که تاثیر منفی پمپاژ بر روی بتن هوادار را می توان به وسیله کم کردن فشار پمپاژ و کم کردن طول خط لوله کم نمود.

همانطور که در ASTM C172 مشخص شده است برای تغییرات درصد هوای بتن در پروژه های خاص، یک آزمایش همبستگی برای نمونه گیری بتن وارد شده به قیف و بتنی که در انتهای خط لوله تخلیه می شود انجام می گیرد. بر مبنای نتایج به دست آمده میزان افت درصد هوای بتن به صورت تجربی قابل تعیین است.

ذکر این مطلب مهم است که محتویات هوایی زیاد ضرورتا به معنای کیفیت بالای بتن در برابر سیکل ذوب و یخ نیست. مقاومت در برابر یخ زدن در هر بتنی بیشتر به مشخصات سیستم حفرات آن بستگی دارد. همچنین نفوذ پذیری، درجه اشباع و چگونگی عمل آوری بتن بر مقاومت در برابر سیکل ذوب ویخ تاثیر می گذارند.

### ۳-۴- افزودنی های معدنی

علاوه بر مواد اصلی تشکیل دهنده بتن سبک، از مواد افزودنی هم در ساخت بتن استفاده می شود.

افزودنی های معدنی می توانند در سه گروه تقسیم بندی شوند.

۱- مواد تقریبا خنثی از لحاظ شیمیایی: این نوع شامل موادی نظیر آهک خرد شده ،کوارتز خرد شده و آهک هیدراته است. در شکل ۳-۵ تصویری از پودر کوارتز آورده شده است.

***شکل ۳-۵- پودر کوارتز***

۲-مواد سیمانی: این نوع مواد شامل سیمان طبیعی، روباره کوره آهنگدازی آسیاب شده و آهک هیدرولیکی و سیمان روباره ای (ASTM C595) می باشد. این مواد دارای این خاصیت هستند که با آب واکنش داده و سخت می شوند. شکل ۳-۶ تصویری از سیمان روباره ای را نشان می دهد.

***شکل ۳-۶- سیمان روباره ای***

۳-پوزولان: شامل نمونه های مواد پوزولانی خاکستر آتشفشانی کلاسی F,C، مواد آتشفشانی شیشه ای، برخی از رس و شیل های عمل آوری شده توسط گرما(ASTM C 616) و دوده سیلیس (ASTM C 1240) است. در شکل ۳-۷ تصویری از میکروسیلیس نشان داده شده است. مواد پوزولانی معمولا به تنهایی

با آب واکنش نمی دهند ولی می توانند مواد حاصل از هیدراتاسیون را اصلاح نمایند به این ترتیب ساختار مواد هیدراته شد بهبود یافته و مشخصات مکانیکی بتن سخت شده بهبود می یابد.

***شکل ۳-۷- میکرو سیلیس***

بیشتر این مواد ذرات بسیار ریزی هستند که نرمی آن ها از سیمان پرتلند نیز بعضا بیشتر است. بعضی از این افزودنی ها تاثیر بسزایی برروی خواص مخلوط بتن دارند و می توانند برای افزایش قدرت پمپاژ به دلیل کروی بودن ذرات استفاده شوند. به عبارت دیگر، با توجه به کم بودن ذرات ریز داخل مخلوط بتن سبک، افزودن مقداری از افزودنی های معدنی ریز به طول کلی کارایی و قابلیت پمپاژ و مقاومت مخلوط را افزایش می دهد. تاثیر بر روی مقاومت به نوع ماده افزودنی معدنی، شرایطی که تحت آن بتن عمل آوری شده و به میزان افزودنی که استفاده می شود بستگی دارد.

### ۳-۵- الیاف

علاوه بر مواد افزودنی، الیاف نیز در بتن سبک استفاده می شود. بتن سبک مسلح شده با الیاف فولادی و پلیمری قابلیت پمپاژ شدن را دارد. اگر چه افزودن الیاف فولادی و یا الیاف مصنوعی بر روی خواص بتن تازه تاثیر می گذارد، تاثیر منفی بارزی بر روی خاصیت پمپاژ بتن ندارند البته به شرط آنکه مقدار این الیاف زیاد نباشد. الیاف مسلح کننده بتن باید از ضوابط و مستندات ASTM C1116 پیروی کند. در شکل ۳-۸ نمونه هایی از الیاف فولادی و الیاف پلیمری نشان داده شده اند.

*(الف)*

*(ب)*

***شکل ۳-۸-الیاف (الف) پلیمری (ب) فولادی***

برخی از محققین گزارش کرده اند که تاثیر دیگر الیاف بر بتن سبک افزایش همگنی و یکنواختی بتن تازه است. الیاف با تشکیل شبکه ای مانع از آن می شوند که سبکدانه ها که سبکتر از بقیه عناصر بتن هستند از ملات جدا گردند. به این ترتیب مخلوط همگن تری حاصل می شود. البته این امر در صورتی صحیح است که مقدار الیاف بسیار زیاد و بسیار کم نباشد. مقدار کم الیاف تاثیر زیادی بر همگنی ندارند در حالیکه مقدار زیاد الیاف در هم گیر کرده و خود باعث ناهمگنی بتن می شوند.

### ۳-۶- مخلوط آزمایشی

قبل از ساخت بتن به میزان زیاد، نسبت اختلاط باید در مقدار کم و در آزمایشگاه آزمایش شود. طرح اختلاط باید مشخصات مکانیکی و پایایی مورد نیاز را برآورده سازد و به صورت رضایت بخشی پمپاژ شود. تا کنون هیچ آزمایش قابل قبولی برای قابلیت پمپاژ بتن ارائه نشده است، بنابراین باید به راهنمایی های صورت گرفته در این خصوص مراجعه نمود. پیشنهاد می شود که کمترین مدول نرمی ممکن ریزدانه به جای مدول نرمی های متوسط، برای تضمین پمپاژ استفاده شود. اگر قابلیت پمپاژ بیشتری مورد نیاز است، ACI 211.1 مقدار ۱۰ درصد کاهش در سنگدانه های ریز را مجاز می داند. برای بتن سبک، پیشنهاد می شود که با سازنده سبکدانه نه تنها در مورد خصوصیات سنگدانه بلکه در مورد نسبت اجزا مشورت شود. همچنین منطقی است که با سازنده بتن آماده برای مشخص کردن نحوه ترکیب کردن و اشباع مصالح مشاوره شود. توضیحات بیشتر در مورد قابلیت پمپ کردن بتن سبکدانه در فصل بعد بررسی می شود.

# ۴-ساخت بتن سبکدانه و حمل آن

پس از بررسی مسائل مربوط به پیمانه گیری و توزین بتن، به نکاتی در خصوص نحوه ساخت بتن سبکدانه و حمل آن اشاره می شود. نسبت های اختلاط، فرایند اختلاط، مواد افزودنی شیمایی و معدنی به صورت کلی در این بخش بررسی می شوند.

## ۴-۱-درصد رطوبت سبکدانه ها

همانطور که می دانیم، جذب آب مصالح سبکدانه ها درهنگام تولید بتن قابل توجه است. در صورتی که جذب آب سبکدانه ها در مخلوط بتن زیاد باشد کارایی بتن کاهش یافته و اجرای بتن با مشکلاتی مواجه می شود. بنابراین مطلوب خواهد بود که از جذب آب زیاد در هنگام ساخت و بتن ریزی جلوگیری به عمل آید. یک روش برای کاهش جذب آب سبکدانه ها در مخلوط بتن آن است که سنگدانه ها پیش از اختلاط به طور کامل خیس شوند یا از شرکت تولید کننده سبکدانه درخواست شود که سنگدانه های خیس تحویل دهند. با این وجود، این امر همیشه یک راه حل مناسب برای تولید بتن نیست. در ساختمان سازی، مقدار زیاد آب موجود در سنگدانه ها سبب می شود که زمان خشک شدن اجزای بتنی طولانی شود و رطوبت داخل ساختمان افزایش یابد. که این مساله موجب ایجاد مشکلاتی برای دیگر مصالح ساختمانی و ساکنین می شود. با مقایسه بین خمیر سیمان نزدیک سطح دانه ها و حجم خمیر سیمان می توان متوجه شد که زیاد بودن آب موجود در سبکدانه ها سبب از دست رفتن یکنواختی خمیر سیمان در بتن می شود. وقتی سیمان خشک در تماس با ذرات سنگدانه بسیار خیس قرار می گیرد، لایه ای از خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان کم پدید می آید. این امر موجب ایجاد غیر یکنواختی در بتن شده که در نهایت ساختاری با نفوذپذیری بیشتر و مقاومت کمتر ایجاد می کند. بنابراین در صورت استفاده از روش پیش خیس کردن سبکدانه ها برای جلوگیری از جذب آب زیاد سبکدانه ها باید به تاثیرات جانبی آن نیز توجه نمود.

### ۴-۲-تاثیرات دما بر آب مورد نیاز

دمای تک تک مصالح به کار رفته و دمای مخلوط بتن بدست آمده، بر میزان آب مصرفی اثر می گذارد. دماهای بین ۱۰ تا ۳۰ درجه سانتیگراد اثر سوئی برروی مخلوط نخواهد داشت. دماهای بیش از این عموماً آب مورد نیاز در ترکیب را افزایش می دهد. وقتی عملیات ساختمانی در فصل گرم باشد، پیش رطوبت سازی مواد درشت دانه سبک قبل از اختلاط، کمک می کند که دمای بتن پایین آید. این کار همچنین میزان آب جذب شده از بتن توسط این مواد را کم می کند. ممکن است در هنگام اختلاط در دمای زیاد گیرش زودرس یا افت روانی اتفاق بیفتد که این موضوع به معنای کم بودن آب مخلوط نیست. در صورت اضافه کردن آب به مخلوط امکان افت شدید مقاومت فشاری و کاهش در سایر خواص مکانیکی و پایایی بتن وجود دارد.

### ۴-۳-افزودن آب در محل کارگاه

آبی که باید جایگزین آب از دست رفته در اثر جذب سبکدانه شود را می توان در محل کارگاه اضافه نمود تا روانی مورد نیاز به دست آید. این عمل باید به نحوی صورت پذیرد که مقاومت یا سایر خواص بتن به خطر نیفتد. علاوه بر این حجم بتن نیز نباید تغییر کند. تقریباً ۵ لیتر آب به ازای هر متر مکعب موجب افزایش اسلامپ به اندازه ۱ اینچ می شود. وقتی آب به مخلوط اضافه می شود، تراک میکسر قبل از آنکه بتن را تخلیه کند، باید حداقل ۳۰ دور با دور تند بچرخد. در غیر این صورت ممکن است آب به صورت یکنواخت مخلوط نشده و باعث ناهمگنی بتن شود.

### ۴-۴-نسبت های سنگدانه

نسبت های سنگدانه ها در طرح اختلاط، مشابه دیگر اجزای بتن به صورت حجمی است. معمولا بعد از اختلاط بتن، حاصل کار با آنچه که از محاسبه بدست آمده است، متفاوت است. این تغییرات به دلیل عدم قطعیت در عوامل زیر رخ می دهد:

- وزن مخصوص دانه ای واقعی سبکدانه و تفاوت آن با مقدار اندازه گیری شده در کارگاه
- جذب آب سبکدانه ها
- حجم هوا

وزن مخصوص توده ای سبکدانه ای تراکم نیافته باید بعد از تحویل مواد و حتی روزی یکبار در هنگام تولید، اندازه گیری شود. بر مبنای وزن مخصوص دانه ای و وزن مخصوص توده ای اندازه گیری شده، نسبت وزن مخصوص توده ای و وزن مخصوص دانه ای محاسبه می شود. این نسبت برای تبدیل وزن مخصوص توده ای اندازه گیری شده، به وزن مخصوص دانه ای محاسباتی که در محاسبه حجم مطلق سبکدانه ها در طرح اختلاط کاربرد دارد، استفاده می شود. مقدار این نسبت به دانه بندی و شکل دانه ها بستگی داشته و اغلب بین ۰/۵۲ تا ۰/۵۸ برای دانه های گرد گوشه است. این مقدار تقریبا برای مصالح مشابه یکسان است.

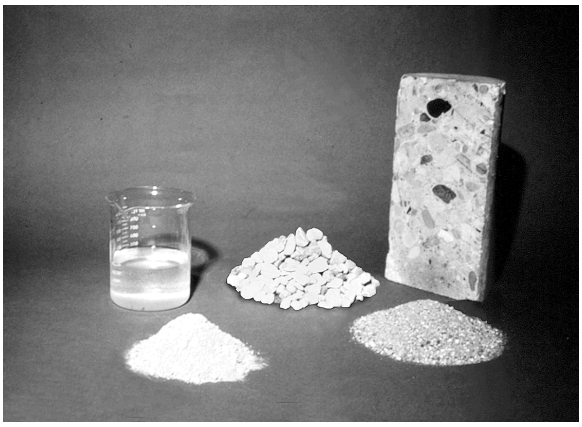
اشتباه در اندازه گیری وزن مخصوص توده ای و درصد رطوبت سبکدانه ها ممکن است بر وزن مخصوص، مقاومت، کارپذیری و حجم بتن مخلوط شده تاثیر بگذارد. درصد رطوبت در مقدار آب اختلاط و آب موثر بتن تاثیر می گذارد.

مقایسه نهایی برای تعیین ترکیب احتمالی بتن بر مبنای مقاومت فشاری بتن سبکدانه سخت شده و خشک شده انجام می شود. به این دلیل بعضی از نمونه ها در زمانهای مختلف برای آزمایش مقاومت فشاری در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد خشک می شوند.

### ۴-۵-فرایند اختلاط

دو فرایند برای اختلاط بتن سبکدانه در دنیا رایج است. در روش اول، فرایند اختلاط بتن سبکدانه مشابه با بتن معمولی است و تولید این بتن در دستگاه مخلوط کن مشابه با بتن معمولی می باشد. در فرایند دوم، بتن در دو مرحله جداگانه مخلوط می شود. بر اساس تجربیات فراوان سالیان گذشته، این روش به خصوص برای بتن های سبکدانه سازه ای با وزن مخصوص کم موفقیت آمیز است. در مرحله اول، ملات که شامل سیمان، ماسه، افزودنی و حدود دو سوم آب اختلاط است، تشکیل می شود. در مرحله دوم، درشت دانه ها به همراه

باقیمانده آب، به ملات اضافه می شود و در نهایت مجموعه مخلوط می شود. بتنی که با این روش ساخته می شود دارای خاصیت همگنی خوب وعملکردی مناسب است. شکل ۴-۱ اجزای اصلی تشکیل دهنده بتن را نشان می دهد که با توجه به دو فرایند متفاوت اختلاط، ترتیب اختلاط آن ها متفاوت می باشد.



***شکل ۴-۱- اجزای اصلی تشکیل دهنده بتن***

در برخی از موارد، ریزدانه های خشک سبک سبب می شوند که مخلوط به صورت گلوله ای در آید. در صورتی که در ابتدا آب کمتری اضافه شود و سپس بقیه آب مرحله به مرحله اضافه شود، می توان از بروز این پدیده نامناسب جلوگیری کرد.

نرخ جذب آب ریز دانه های سبک سریع است. برای برآورد زمان اختلاط می توان منحنی جذب آب مصالح واقعی را بررسی کرد. از این منحنی مشخص می شود که در عمل جذب آب سبکدانه های با قطر کمتر از ۸ یا ۱۰ میلیمتر پس از چند دقیقه کاهش پیدا می کند. در بعضی موارد مطلوبست که آب اضافی به بتن تازه اضافه شود، تا روانی مورد نظر حاصل شود. اما این امر باید با نظارتی دقیق انجام شود که نیازمند تصمیم گیری مستدل بر پایه اطلاعات موجود می باشد.

### ۴-۶-حجم مخلوط

همانطور که اشاره شد، مقدار مخلوط بتن حاصل شده یا تحویل داده شده ممکن است با حجم محاسبه شده یا مورد انتظار متفاوت باشد. این تغییرات ممکن است به دلیل اشتباه محاسباتی و یا عدم عملکرد درست

وسایل توزین باشد، اما بیشتر احتمال دارد که این اختلاف ناشی از تغییرات وزن مخصوص سبکدانه ها به دلیل تغییرات خود سبک دانه ها و درصد رطوبت آنها باشد. برای جلوگیری از خطا، وزن مخصوص توده ای و درصد رطوبت باید به طور منظم اندازه گیری شود و وزن بتن در حجم مورد نظر، به طور متناوب تنظیم شود.

در بعضی از طرح اختلاط های بتن، حباب های هوا بطور عمد وارد بتن می شوند تا پایایی در برابر سیکل های ذوب و یخ بتن سخت شده و کارپذیری بتن تازه را افزایش داده و همزمان وزن مخصوص بتن را نیز تا حدی کاهش دهند. حباب سازی در بتن سبک مشابه بتن معمولی با استفاده از مواد افزودنی حباب ساز انجام می شود. شکل ۴-۲ روش اندازه گیری وزن مخصوص بتن را نشان می دهد.

***شکل ۴-۲- اندازه گیری وزن مخصوص بتن***

اندازه گیری درصد هوای سبکدانه ها با استفاده از روش فشار ممکن است گمراه کننده باشد. حجم هوای موجود در فضای خالی سبکدانه ها نیز در درصد هوای بتن محاسبه می شود. از این رو درصد هوای اندازه گیری شده با روش فشار به ویژه در مقادیر درصد هوای زیاد (برای مثال تا ۱۰ درصد حجم بتن) چندان قابل اعتماد نیست. در این حالت باید از روش دیگری برای اندازه گیری حجم هوا استفاده شود.

## ۴-۷-مخلوط کردن

در این قسمت به صورت اجمالی به بررسی نحوه اختلاط بتن سبکدانه پرداخته می شود. در قسمت های قبلی به مصالحی که در بتن سبکدانه مورد استفاده قرار می گیرند، اشاره گردید. در این قسمت به بررسی نحوه اختلاط این اجزا و ماشین آلات اختلاط اشاره می شود. در شکل ۴-۳ چگونگی اختلاط بتن در میکسر نشان داده شده است.

***شکل ۴-۳- چگونگی اختلاط بتن در میکسر***

خاصیت جاذب رطوبت بودن مواد سنگدانه های سبک را باید در طی فرایند اختلاط مورد توجه قرارداد. باید اطمینان حاصل شود که میزان زیادی از آب به وسیله سبکدانه قبل از پیمانه گیری و اختلاط آنها جذب شده است. در غیر این صورت، قسمتی از مواد افزودنی ممکن است جذب سنگدانه شود که منجر به کاهش کارایی آن خواهد شد. ممکن است مقداری از آب اختلاط در طول آمیختن، انتقال و یا جا به جایی جذب شود که این امر باعث می شود که آب بیشتری برای ترکیب لازم شود. در صورت عدم تامین آب اضافه افت ناگهانی و سریع اسلامپ اجتناب ناپذیر است. میزان زمان جذب نیز همچون ماکزیمم رطوبت جذب شده باید به درستی در فرایند اختلاط لحاظ شود تا مقاومت طرح تضمین گردد.

### ۴-۸-پر کردن مخلوط کن ها

با توجه به دو روشی که در فرایند اختلاط به آن ها اشاره شد، ترتیب اجزای وارد شده برای تهیه بتن سبک وزن به درون یک مخلوط کن ممکن است در هر دستگاهی با دستگاه دیگر متفاوت باشد. هرگاه روند های قابل قبول پیمانه گیری و مرطوب کردن بتن انجام شود، این مراحل باید به طور دائم در فواصل زمانی کوتاه تکرار شوند تا یکنواختی بتن حاصل شود.

شرایط آب و هوایی مثل دمای پیرامونی، رطوبت، بارندگی و یا برف بر روی دپوی مصالح، تاثیرات مهمی در تولید بتن دارد که باید به درستی مورد توجه قرار گیرد.

### ۴-۹-مخلوط کن (میکسر)

ماشین آلات مخلوط کن های ثابت، عموماً در عملیات پیش ساختگی، بتن پیش تنیده و گاهی در کارگاه هایی که نمی توان بتن را به مسافت های دور جابجا کرد، استفاده می شوند. این مخلوط کن ها را همچنین می توان در کارخانه های تولید بتن آماده، برای اختلاط کامل اولیه یا برای اختلاط نسبی به کار برد، که در مورد اخیر بتن بعداً کاملاً مخلوط شده و با کامیون به محل استفاده حمل می شود..

همانطور که اشاره شد، در صورت استفاده از روش اول برای ساخت بتن، ابتدا باید کلیه مواد تشکیل دهنده بتن سبک را به درون مخلوط کن ریخت. بعد از اینکه تمام مواد تشکیل دهنده بتن سبک در دستگاه مخلوط کن ریخته شد، دستگاه را باید با سرعت لازم به کار انداخت تا مخلوط کاملی که منطبق با آزمایشهای شرح داده شده در استاندارد ASTM C 94 باشد، بدست آید. زمانیکه از مخلوط کن های ثابت برای اختلاط دو مرحله ای استفاده می شود، تنها لازم است که مواد در آنها هم زده شود زیرا عمل اختلاط بعداً در تراک میکسر کامل خواهد شد.

### ۴-۱۰- حمل و نقل بتن سبکدانه در محل

همانطور که ملاحظه گردید در بخش های پیشین به طور مفصل نحوه تولید و ساخت بتن سبکدانه مورد بررسی قرار گرفت. بتن سبکدانه ساخته شده را هم می توان در کارخانه در ساخت المان های پیش ساخته

مورد استفاده قرار داد، و هم می توان به محل احداث سازه انتقال داد و به صورت درجا بتن ریزی کرد. در این قسمت به الزاماتی که باید در خصوص حمل و نقل بتن سبکدانه رعایت شود، پرداخته می شود. کامیون های حمل و نقل و زمان حمل، مهمترین موضوعات بحث شده در این بخش می باشد.

بتن سبک را می توان با همان تجهیزات حمل بتن معمولی حمل و جابجا نمود. این تجهیزات شامل ماشین های میکسر، ماشین های روباز با مخلوط کننده و یا بدون مخلوط کننده، واگن های حمل مواد و نیز خطوط لوله و شیلنگ های منتقل کننده می باشند. روش مورد استفاده در حمل بتن سبک باید به گونه ای باشد که خصوصیات آن از جمله نسبت آب به سیمان، اسلامپ، درصد هوا، وزن مخصوص و همگنی آن را تغییر ندهد.

شکل ۴-۴ یک ماشین میکسر و یک دستگاه پمپ بتن را نمایش می دهد.

***شکل ۴-۴-یک ماشین میکسر و یک دستگاه پمپ بتن***

هریک از این روش های حمل و نقل ویژگی های مخصوص به خود در شرایط مشخصی را دارند، مانند نسبت های اختلاط نوع و دسترسی به محل، ظرفیت حمل مورد نیاز، محل اختلاط و شرایط آب و هوا. این گونه شرایط مختلف باید برای انتخاب روش حمل و جابجایی بتن در نظر گرفته شوند، تا بتوانیم به یک بتن

مناسب و اقتصادی در محل دست پیدا کنیم. در ACI 304 R سیستم های مختلف حمل بتن بیان شده است. Engineer Manual 1110-2-2000 (HQDA 2001) نیز پیش نیازهای مختلفی برای سیستم های گوناگون حمل بتن سبک را بیان نموده است که در صورت نیاز به اطلاعات بیشتر رجوع به این مرجع توصیه می شود.

### ۴-۱۰-۱-کامیون های مخلوط کن

پر کردن یا بارگیری یک ماشین مخلوط کن مشابه عملیاتی است که در مخلوط کن های ثابت انجام می شد. گاهی می توان احجام بیشتری از بتن سبک را توسط کامیون های مخلوط کن جابجا نمود، بدون آنکه از وزن قانونی و یا محدودیت های بار محوری عدول شود. اما حجم بتن موجود در دیگ نباید از میزان ظرفیت مجاز دیگ و یا ۶۳٪ حجم آن، در شرایطی که از آن به عنوان یک مخلوط کن استفاده می شود، یا ۸۰٪ حجم آن زمانی که به عنوان یک هم زن استفاده می شود بیشتر باشد،( مطابق ASTM C 94.)

***۴-۵- کامیون مخلوط کن***

چون بیشتر بتن ها، هم سبک وزن و هم عادی به وسیله کامیون های مخلوط کن، مخلوط می شوند، دانستن جنبه های مختلف به کاراندازی یک کامیون مخلوط کن مهم می باشد. زمان تحویل و دمای هوا نقش مهمی در کنترل روانی بتن ایفا می کند. این متغیرها ممکن است باعث ایجاد تغییراتی در میزان آب مورد نیاز برای رسیدن به روانی مطلوب باشند.

### ۴-۱۰-۲-زمان حمل و نقل و زمان انتظار

کارگاه‌های ساختمانی که در فواصل متفاوتی از ایستگاه مرکزی ساخت بتن قرار دارند، نیاز به زمان های کوتاه یا طولانی برای نگهداری بتن دارند و به این دلیل ممکن است تخلیه تراک میکسر دچار وقفه شود. این عوامل تعیین زمان کلی نگهداری مخلوط در دیگ را مشکل می سازد. ساختار بعضی از دانه های سبک بگونه ای است که حتی اگر پیش مرطوب نیز شده باشند، در مرور زمان به جذب آب ادامه می دهند. رطوبت اولیه سرعت جذب را کاهش می دهد، اما به طور کامل باعث توقف آن نمی شود. بعضی از سازنده های بتن، ۲ تا ۳ گالن آب به ازای فوت مکعب (یا ۱۰ تا ۱۵ لیتر آب به ازای متر مکعب) را نگه می دارند تا اطمینان حاصل کنند که مخلوطشان در زمان تحویل بیش از حد شل و آبکی نباشد. پیشنهاد می شود که به مخلوط بتن سبک در محل تحویل بتن (در کارگاه) آب اضافه شود تا جایگزین آبی شود که توسط سبکدانه جذب شده است، تا اینکه بتن به روانی مطلوب خود برسد.

کامیون های مخلوط کن با سرعت دورانی مشخص شده در دامنه چرخش مورد نیاز برای تهیه مخلوط کامل، که معمولاً ۷۰ تا ۱۰۰ چرخش می باشد، به گردش در می آیند. سپس سرعت آنها تا حد سرعت هم زدن (کمتر از سرعت اختلاط) کم می شود. بلافاصله قبل از تخلیه پیشنهاد می شود که تراک میکسر با سرعت اختلاط به مدت ۱ تا ۲ دقیقه به چرخش درآید. همچنین پیشنهاد می شود وقتی که حجم بتن درون تراک میکسر به نصف رسید آن را متوقف کرده، جهت دوران را معکوس نموده، و ۳ تا ۴ دور با سرعت اختلاط آن را به چرخش درآورد تا اطمینان حاصل آید که یکنواختی مواد مخلوط شده، در حین تخلیه باقی می ماند.

## ۵-پمپ بتن سبکدانه

پس از بررسی عوامل موثر در ساخت، اختلاط و حمل بتن سبکدانه، به چگونگی امکان پمپ بتن سبکدانه در محل کارگاه پرداخته می شود. اجرای بتن سبکدانه تفاوت زیادی با بتن سنتی ندارد و همان ضوابطی که برای اجرای بتن با وزن معمولی توصیه شده است در مورد بتن سبک نیز قابل اجرا است. مهمترین ویژگی که به طور خاص در اجرای بتنهای سبک باید مد نظر قرار گیرد قابلیت پمپ پذیری آن است. همانطور که می دانیم به دلیل متخلخل بودن سبکدانه ها، در اثر فشار زیاد پمپ، آب آزاد بتن به داخل منافذ سبکدانه نفوذ می کند. در اثر این پدیده، بتن کارپذیری خود را از دست می دهد و به عبارت دیگر کار کردن با آن بسیار مشکل می شود. از این رو باید تدابیر خاصی لحاظ شود تا بتوان بتن سبکدانه را به طور مناسب پمپ نمود. شرایط رطوبتی سنگدانه ها، پمپ ها، نسبت اختلاط، مصالح اصلی و مواد افزودنی بتن و در نهایت نکاتی که در خصوص بتن های سبکدانه ای با قابلیت پمپ شدن باید مد نظر قرار گیرد که در این فصل به آن ها پرداخته خواهد شد. یاد آوری می گردد که الزامات ارائه شده در این فصل تنها در مواردی که نیاز به پمپ بتن سبکدانه باشد، باید رعایت شود. به عبارت دیگر در صورتیکه بتن سبکدانه با روش های دیگری، مانند جام یا شوت، اجرا شود، ضرورتی به اعمال موارد این فصل نمی باشد. در شکل ۵-۱ نحوه بتن ریزی با استفاده از پمپ نمایش داده شده است.

***شکل ۵-۱-نحوه بتن ریزی با استفاده از پمپ***

بخش ۵-۱۰ از EM1110-2-2000 پیش نیازهای پمپ نمودن بتن سازه ای را توضیح داده است. برای پمپ بتن سبک، رعایت یک سری از الزامات ضروری است. در ادامه به مواردی که برروی پمپاژ بتن سبکدانه تاثیر می گذارند، اشاره می شود.

بافت سطحی بتن سبک به طور قابل ملاحظه با بتن معمولی متفاوت است. سنگدانه های سبک به طور کلی بافت سطحی دارند که می تواند بین حالات گرد گوشه و تیزگوشه متفاوت باشند. سنگدانه های سبک سازه ای به طور عمومی دارای ویژگی های زیر می باشند.

- از حفرات غیرپیوسته و غیرمتصل تشکیل شده اند.
- وزن مخصوص دانه ای در حدود ۱/۱۰ تا ۱/۶۰ می باشد.
- اندازه بزرگترین بعد سنگدانه ۱۹ میلی متر (۳/۴ اینچ) است.

این ویژگیها بر قابلیت پمپ پذیری بتن سبکدانه مستقیما تاثیر می گذارند. برای مثال متخلخل بودن سبکدانه ها باعث می شود که فشار پمپ آب را به داخل سبکدانه فرو ببرد و افت کارایی مشاهده شود.

## ۵-۱-شرایط رطوبتی سنگدانه ها

یکی از دلایل وجود مشکل در پمپ بتن را می توان خاصیت سنگدانه های سبک در جذب مقادیر زیاد آب در یک دوره ۲۴ ساعته دانست. در صورتی که این سنگدانه ها کاملا اشباع نباشند، پس از اختلاط و در زمان

اعمال فشار پمپ قسمتی از آب مخلوطی را جذب خواهند کرد که منجر به کاهش کارپذیری و نیز تغییرات محتمل در وزن مخصوص بتن تازه خواهند شد. مقدار کل آب جذب شده توسط سنگدانه های سبک که تحت فشار اتمسفر قرار گرفته اند با زمان افزایش می یابد. به هرحال برای برخی از سنگدانه های سبک نرخ جذب آب اولیه زیاد بوده و به تدریج کاهش می یابد. مهیا نمودن شرایط رطوبتی مناسب برای سبکدانه پیش از اختلاط و پمپ بتن می تواند از روش های مختلفی حاصل شود. در ادامه تعدادی از این روش ها بررسی می گردد.

- **غوطه وری کامل سنگدانه ها در آب:** با استفاده از این روش می توان اطمینان حاصل نمود که سنگدانه های سبک رطوبت بهینه را پیش از اختلاط دارند. پیش از استفاده از این روش باید امکانات موجود در کارگاه به دقت بازدید شود تا امکان استفاده از این روش با توجه به نیاز به تجهیزات اضافی بررسی شود.
- **روش آب پاشی:** در این روش از شیلنگ های مخصوص و یا سیستم آب پاش استفاده می شود. این روش می تواند در زمان تولید سنگدانه ها مورد استفاده قرار گیرد. در این روش میله های افشان محتوی آب از داخل سنگدانه ها که برروی تسمه نقاله در حال حرکت هستند عبور می کند. در نهایت سبکدانه ها در محل ساخت بتن دپو می گردند. حداقل ۴۸ ساعت حداکثر ۵ تا ۷ روز و درصورت امکان بیشتر نیاز به غوطه وری می باشد که وابسته به نرخ جذب سنگدانه ها و تاثیر مستقیم غوطه وری استفاده شده می باشد.
- **مکش:** در این روش، سنگدانه ها در لوله هایی قرار می گیرند که هوا می تواند از آن خارج گردد. این لوله ها با آب پر شده و تحت فشار اتمسفر و بیشتر قرار می گیرند. معمولا این روش فقط در محل تولید سنگدانه ها مورد استفاده قرار می گیرد.

موثرترین روش اشباع به وسیله مکش است. این فرایند سریع است و اشباع سنگدانه پس از مدت کوتاهی خاتمه می یابد. با این حال بدلیل گرانی روش، کمتر از آن استفاده می شود. وقتی سنگدانه های اشباع شده

به وسیله مکش انبار می شوند، باید به طور پیوسته آب پاشی شوند تا از خشک شدن آنها جلوگیری به عمل آید.

به طور معمول در کارگاه ها از غوطه وری کامل سنگدانه ها در آب استفاده می شود اگرچه در مقایسه با روش مکش از کارایی کمتری برخوردار است. با این وجود بدلیل سادگی نسبی آن، با استقبال گسترده ای مواجه شده است. این روش ممکن است موفقیت آمیز باشد، زیرا بخش اعظم جذب آب در دقایق اولیه خیس خوردن اتفاق می افتد.

پیش خیس کردن سنگدانه ها دارای اثرات جانبی نیز است. رطوبت اضافی افزوده شده به سنگدانه های سبک، درصد رطوبت آنها را افزایش داده که این عمل منجر به افزایش وزن مخصوص سنگدانه های سبک می شود و نهایتا وزن مخصوص بتن تازه را افزایش می دهد. این رطوبت اضافی همچنین برای عمل آوری داخلی مورد استفاده قرار می گیرد که باعث بهبود ویژگی های مکانیکی و پایایی بتن می گردد.

**۵-۲-نگهداشت رطوبت**

پس از دادن رطوبت به سنگدانه با یکی از روشهای فوق، نیاز به نگهداری این سطح بالای رطوبت هنگام دپو نمودن سنگدانه ها می باشد. سنگدانه های رطوبت دهی شده به روش آب پاشی باید سریعا پس از رسیدن به رطوبت موردنظر، مورد استفاده قرار گیرند اما سنگدانه هایی که به روش خلاء و یا غوطه وری کامل رطوبت دهی شده اند می توانند مدت زمان بیشتری رطوبت را در خود نگه دارند که این زمان با توجه به شرایط محلی می تواند تا ۶۰ روز، بدون کاهش چشمگیر رطوبت، ادامه داشته باشد. با این وجود، برای سازگاری بهتر شرایط، از سیستم های آب پاش یا شیلنگ های غوطه وری بدون توجه به روش رطوبت دهی سنگدانه ها استفاده می کنند تا مطمئن شوند هیچ گونه کاهش قابل ملاحظه در رطوبت موجود در سبکدانه ها صورت نگرفته است.

طبق ASTM C127 درصد رطوبت سنگدانه ها بعد از رطوبت دهی باید از متوسط جذب آب ۲۴ ساعته بیشتر باشد. برای رسیدن به اسلامپ مناسب، باید اجازه دهیم آب آزاد بتن، قبل از استفاده خشک شود. حداقل نیاز به دو دپوی سنگدانه می باشد که یکی آماده برای استفاده در بتن بوده و دیگری در حال رطوبت

دهی است. در هر مرحله باید سنگدانه های رطوبت دهی شده برای استفاده در بتن موجود باشد. نیاز به این سبکدانه ها خصوصا زمانی که به مرحله اوج ساخت بتن می رسیم، بشدت احساس می شود. سنگدانه ها باید در هر روز ۲ تا ۳ مرتبه مخلوط گردد تا مطمئن شویم شرایط رطوبتی تمام بخش های سنگدانه یکسان است.

عمل رطوبت دهی مستمر سنگدانه ها در زمستان در صورتی که برنامه ریزی مناسب صورت نگیرد با مشکل مواجه خواهد شد، چرا که اشباع شدن سنگدانه ها باعث مستعد نمودن آنها برای یخ زدگی داخل آن می شود. این مشکل را می توان با پیش گرم کردن سنگدانه ها قبل از دپو کردن برطرف نمود. روش های مختلفی برای گرم کردن سنگدانه ها موجود است. از جمله این روش ها می توان به قرار دادن لوله های مشبک آب گرم یا بخار زیر سنگدانه ها اشاره کرد. سپس از سنگدانه های زیرین که دچار یخ زدگی نشده اند استفاده می گردد و بدین ترتیب سنگدانه های فوقانی به قسمت زیرین نزدیکتر شده و یخ موجود در آنها آب می شود. در این میان باید توجه داشته باشیم که به این سنگدانه ها حرارت بیش از حد داده نشود، زیرا ممکن است باعث تبخیر رطوبت موجود سنگدانه ها و نهایتا کاهش اسلامپ بتن گردد.

### ۵-۳-پمپ ها و سیستم های پمپ

همانند سیستم های حمل، از تجهیزاتی مشابه آنچه در بتن معمولی استفاده می شود می توان برای پمپ نمودن بتن سبک استفاده نمود. دستگاه های پمپ بتن گونه های مختلفی دارند که انواع کوچک آنها فشاری معادل ۰/۷۵ تا ۱/۷ مگا پاسکال (۲۵۰ تا ۳۰۰ psi) اعمال می کنند و خروجی برابر با ۱۱ تا ۲۳ مترمکعب برساعت دارند و انواع بزرگ آنها فشار ۷ مگا پاسکال (۱۰۰۰ psi) اعمال کرده و خروجی بالغ بر ۱۹۰ مترمکعب برساعت خواهند داشت. شکل ۵-۲ یک دستگاه پمپ بتن را نشان می دهد.

***شکل ۵-۲-یک دستگاه پمپ بتن***

ظرفیت موثر پمپ ها تنها به خود پمپ وابسته نیست بلکه به کل سیستم بستگی دارد. پارامترهای مختلف از جمله طول لوله، خم های موجود در لوله، نوع لوله، قطر لوله، ارتفاع سقوط بتن و اختلاط بتن بر انتخاب ظرفیت پمپ موثرند.

واضح است فشارهای زیادتری برای پمپ عمودی و خطوط با لوله های طولانی موردنیاز است. جزئیات مربوط به سیستم های پمپ و پمپ ها را می تواند در ACI 304.2R یافت. برخی از مواردی که حتما باید در هنگام پمپ بتن سبک رعایت شود عبارتند از :

- از بزرگترین اندازه لوله موجود استفاده شود، ترجیحاً حداقل قطر ۱۲۵ میلی متر (۵ اینچ)
- تمام خطوط باید تمیز باشند، هم اندازه باشند و در شروع، بدنه داخلی آن با دوغاب شستشو داده شود.
- از تغییر اندازه ناگهانی لوله ها بپرهیزیم. به عنوان مثال تغییر قطر لوله از ۲۵۰ میلیمتر (۱۰ اینچ) به ۱۰۰ میلمتر (۴ اینچ) در طول ۱/۲ متر (۴ فوت) به خوبی تغییر قطر لوله از ۲۵۰ میلی متر (۱۰ اینچ) به ۱۵۰ میلی متر (۶ اینچ) در طول انتقال ۲/۴ متری (۸ فوت) و یا تغییر قطر لوله ۱۵۰ میلی متر به ۱۰۰ میلی متر در طول ۱/۲ متر به خوبی کار نخواهد کرد.

- در طول عملیات پمپ بتن سبک فشار پمپ باید کم باشد این عمل می تواند با کاهش نرخ جایگذاری، استفاده از لوله های فولادی با کمترین انعطاف پذیری ممکن، محدود کردن تعداد خم های موجود در طول لوله، و اطمینان از اتصال محکم لوله ها صورت پذیرد.

### ۵-۴-نسبت های اختلاط

در طرح اختلاطی که برای یک پروژه طراحی می گردد باید کاهش اسلامپ ناشی از انتقال و پمپ بتن مد نظر قرار گیرد. به طور کلی باید اسلامپ بتنی که می خواهد پمپاژ شود افزایش یافته و از سنگدانه های درشت کمتری استفاده گردد. در بعضی از موارد مشاهده شده است که کاهش اسلامپ به میزان یک سوم باعث پمپ نشدن بتن سبک می شود.

وقتی از سنگدانه سبک در بتن استفاده می گردد باید مراقبت های لازم را مورد توجه قرار دهیم تا بتن ویژگی های مورد انتظار ما را برآورده کند. همانطور که اشاره گردید، سازندگان بتن و همچنین تامین کنندگان مصالح باید با هم مشورت های لازم را برای رسیدن به بهترین طرح اختلاط برای دستیابی به بتن پمپ پذیر را داشته باشند. برخی دستورالعمل های عمومی برای نسبت های اختلاط به منظور انجام پمپاژ مناسب بتن به صورت زیر می باشد:

- رطوبت دهی مصالح سبک
- استفاده از حداقل ۳۳۵ کیلوگرم بر متر مکعب مواد سیمانی
- استفاده از افزودنی های زیر برای بهبود پمپاژ

- مواد حباب ساز کافی به منظور ایجاد حباب به میزان ۵ تا ۸ درصد
- استفاده از مواد فوق روان کننده برای افزایش روانی مخلوط
- استفاده از خاکستر بادی یا پوزولان طبیعی برای افزایش حجم خمیر مخلوط
- استفاده از مواد تسهیل کننده پمپاژ

- برای تسهیل پمپاژ، معمولا تاکید می شود، مقدار کمی کاهش در حجم سنگدانه درشت و افزایش همزمان حجم مصالح ریزدانه صورت گیرد.
- مصالح سیمانی باید به اندازه ای باشد که با اسلامپ ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی متر (۴ تا ۶ اینچ) سازگار باشد.
- اگر از ماسه با وزن مخصوص معمولی استفاده می شود، باید از دانه بندی خوب و مدول نرمی مناسب آن (حدود ۲/۲ تا ۲/۷) اطمینان حاصل شود. اگر این مدل نرمی قابل دستیابی نیست می توان از ماسه ریزدانه و یا افزودنی های معدنی در بتن استفاده نمود.
- از نسبت حجمی مناسب مصالح ریزدانه و درشت دانه استفاده کنیم تا مصالح سیمانی نتوانند از فضای نامطلوب ایجاد شده بین سنگدانه ها عبور کنند. بهتر است نسبت مصالح به جای وزنی، حجمی باشد تا وزن مخصوص دانه های مختلف مصالح تاثیر گذار باشد.

جداول ۵-۱ و ۵-۲ مجموعه ای از تجربیات اعضای کمیته ACI 304 می باشد و راهنمایی برای مقدار مصالح سبک درشت دانه که به صورت پیش خیس و غوطه وری کامل مرطوب شده اند، می باشند. این مقادیر تنها به عنوان پیشنهاد ارائه شده اند و می توانند تا ۱۰ درصد رواداری داشته باشند که این میزان به شرایط محلی و پمپ های مختلف بستگی دارد.

***جدول ۵-۱- مقادیر حجم پیشنهادی برای مصالح سبک رطوبت دهی شده به روش آب پاشی در متر مکعب بتن پمپاژ شده***

| نوع ریز دانه | محدوده اندازه ی درشت دانه های سبک | | |
|---|---|---|---|
| | ۳/۸ اینچ شماره ۴ | ۱/۲ اینچ شماره ۴ | ۳/۴ اینچ شماره ۴ |
| درشت F.M از ۲/۸ تا ۳ | ۷/۹ تا ۸/۴ | ۹/۳ تا ۱۰/۵ | ۱۱/۸ تا ۱۲/۶ |
| متوسط F.M از ۲/۶ تا ۲/۸ | ۸/۳ تا ۹/۱ | ۱۰/۲ تا ۱۱/۰ | ۱۲/۲ تا ۱۳/۰ |
| درشت F.M از ۲/۴ تا ۲/۶ | ۸/۷ تا ۹/۵ | ۱۰/۶ تا ۱۱/۴ | ۱۲/۵ تا ۱۳/۴ |

***جدول ۵-۲- مقادیر حجم پیشنهادی برای مصالح سبک رطوبت دهی شده به روش آب پاشی در متر مکعب بتن پمپاژ شده***

| نوع ریز دانه | محدوده اندازه ی درشت دانه های سبک | | |
|---|---|---|---|
| | ۳/۸ اینچ شماره ۴ | ۱/۲ اینچ شماره ۴ | ۳/۴ اینچ شماره ۴ |
| درشت F.M از ۲/۸ تا ۳ | ۱۰/۶ تا ۱۱/۵ | ۱۳/۰ تا ۱۴/۰ | ۱۵/۷ تا ۱۶/۷ |
| متوسط F.M از ۲/۶ تا۲/۸ | ۱۱/۱ تا ۱۲/۱ | ۱۳/۵ تا ۱۴/۵ | ۱۶/۲ تا ۱۷/۲ |
| درشت F.M از۲/۴ تا ۲/۶ | ۱۱/۶ تا ۱۲/۶ | ۱۴/۰ تا ۱۵/۰ | ۱۶/۷ تا ۱۷/۷ |

نکته: توصیه می شود این جدول فقط برای فشارهای کم در خطوط لوله با قطر ۱۰۰ میلیمتر استفاده گردد.

## ۵-۵-مصالح سبک درشت دانه

اندازه مصالح درشت دانه سبک تعریف شده در استاندارد ASTM C330 باید تا حد امکان کاهش یابد. در صورت استفاده از مصالح با حداکثر اندازه بزرگتر، ناهنگنی مصالح به شدت افزایش یافته و مشکلاتی را در اختلاط و کار کردن با بتن به وجود می آورد. جدول ۵-۳ حجم مصالح سبکدانه درشت را بر اساس حداکثر اندازه سبکدانه نشان می دهد.

***جدول ۶-۳- حجم مصالح سبکدانه درشت بر اساس حداکثر اندازه سبکدانه***

| حداکثر اندازه سبکدانه (اینچ) | حجم خشک کوره‌ی درشت دانه‌های شل به ازای واحد حجم بتن برای مدول نرمی ماسه‌های متفاوت | | | |
|---|---|---|---|---|
| | ۲/۴۰ | ۲/۶۰ | ۲/۸۰ | ۳/۰۰ |
| ۱/۴ | ۰/۵۸ | ۰/۵۶ | ۰/۵۴ | ۰/۵۲ |
| ۱/۲ | ۰/۶۷ | ۰/۶۵ | ۰/۶۳ | ۰/۶۱ |
| ۳/۴ | ۰/۴۷ | ۰/۷۲ | ۰/۷۰ | ۰/۶۸ |

نکته: مقادیر داده شده در جدول مربوطه به متر مکعب سنگدانه رطوبت دهی شده به روش غوطه وری کامل در متر مکعب بتن می باشد. این مقادیر می توانند هم برای سنگدانه های شکسته و هم مصالح اندود شده استفاده گردد. وزن مورد نیاز برابر است با ضرب این مقادیر در واحد وزن به کیلوگرم برمترمکعب آن مصالح.

لازم به تذکر است که وزن مخصوص مصالح سبکدانه ثابت نبوده و متغیر است، این تغییرات در قالب محدودیت هایی در ASTM C 330 مد نظر قرار داده شده اند. این تغییرات ممکن است ناشی از ویژگی های انبساطی مختلف مصالح خام در طول عمل آوری، تغییر در رطوبت، تغییر دانه بندی و یا ترکیبی از این سه باشند. کنترل وزن اجزای اختلاط برای جبران این تغییرات ضروری می باشد تا مصالحی با حجم مناسب و محصولی همسان داشته باشیم.

مصالح سبکدانه سازه ای ممکن است دارای سطح خارجی پوشیده و بسته و یا غیر پوشیده و باز باشد که وابسته به روش تولید محصول است. همان گونه اشاره شد، این مصالح می توانند کاملا گردگوشه، نیمه تیزگوشه یا کاملا تیزگوشه باشند. در هر صورت باید تصمیم مناسب برای تعیین شکل و بافت سطحی اخذ شود تا بتوان این مصالح را در عملیات پمپاژ استفاده نمود.

اغلب مصالح سبکدانه بزرگتر از ۴/۷۵ میلی متر (الک شماره ۴) در دو گروه مجزا ساخته می شوند. این دو اندازه مختلف باید با نسبتی که در ASTM C 330 بیان شده مخلوط شوند تا ترکیب مناسبی بدست دهد. تناسب دانه بندی باید برای تمام اختلاط ها رعایت شود، زیرا تغییر در این تناسب در قابلیت پمپ کردن بتن تاثیرگذار است.

### ۵-۶- مصالح سبک ریزدانه

دانه بندی مصالح سبک ریزدانه باید طبق ASTM C 330 باشد. به علاوه، باید به دانه های بسیار ریزتر توجه ویژه نمود چرا که این ذرات می توانند نقص مصالح ریزدانه را جبران کنند. ریزدانه های سبک باید بین ۲۰ تا ۳۵ درصد از الک شماره ۵۰ (۳۰۰ میکرومتر) و ۱۰ تا ۲۰ درصد از الک ۱۰۰ (۱۵۰ میکرومتر) عبور کنند. اگر کمبودی در درصدهای ذکر شده در مصالح ریزدانه وجود داشته باشد می توان از افزودنی های معدنی

مانند پوزولان، خاکستر بادی، یا پودر سنگ به اندازه ای که کمبود وجود دارد استفاده گردد که این امر منجر به بهبود قابلیت پمپ کردن بتن می گردد.

با افزودن ماسه طبیعی به مصالح سبک ریزدانه در عین بهبود دانه بندی کلی مصالح ریزدانه، وزن تمام شده بتن افزایش می یابد. هرچند قابلیت پمپ کردن مخلوط ممکن است با افزودن مصالح ریز افزایش یابد، ولی باید توجه داشت که این افزایش اندازه، نیازمند افزایش آب مصرفی بوده و لذا کاهش مقاومت و نیز انقباض بتن هنگام از دست دادن رطوبت را در پی خواهد داشت.

مخلوط های قابل پمپاژ شامل مصالح با وزن مخصوص معمولی معمولا زمانی بهترین پمپاژ را خواهند داشت که مدول نرمی ریز دانه آنها بین ۲/۴ تا ۳ باشد. برای یک اختلاط شامل مصالح سبکدانه این حدود بین ۲/۲ تا ۲/۸ می باشد.

### ۵-۷-آب و اسلامپ

همانطور که بیان گردید، آب مورد نیاز در مصالح سبکدانه با مصالح معمولی متفاوت می باشد و این موضوع به دلیل ویژگی های متفاوت جذب آب مصالح می باشد. اگر کل آب موجود در مصالح سبکدانه را به دو دسته تقسیم نماییم، یک قسمت شامل آب آزاد و قسمت دیگر آب جذب شده می باشد و بدین ترتیب می توان بررسی راحت تری انجام داد. آب آزاد اسلامپ را تنظیم نموده و تاثیر مستقیم برروی نسبت مصالح سیمانی و آب دارد. آب جذب شده نیز در بین دانه های سبکدانه جای می گیرد و حجم آنها را تغییر نمی دهد. ضمناً آب جذب شده تاثیر مستقیمی در مصالح سیمانی ندارد. نیاز آب آزاد مصالح سبکدانه تقریباً برابر با مصالح معمولی است اما مقدار آب جذب شده با مصالح طبیعی تفاوت دارد. برای کمینه نمودن این مقدار، پیش رطوبت دهی مصالح ضروری می باشد.

تجربه نشان می دهد بهترین اسلامپ بتن سبک برای پمپاژ بین ۵۰ تا ۱۵۰ میلیمتر است (شکل ۵-۳). در صورت بیشتر شدن اسلامپ، سنگدانه ها از ملات سیمان جدا می شوند و باعث انسداد خطوط پمپاژ خواهد

شد. همچنین بتن های با اسلامپ زیاد دارای آب انداختگی زیاد، کاهش هوای محبوس و افزایش جمع شدگی می باشند.

***شکل ۵-۳-اسلامپ مناسب بتن سبک***

اما اسلامپ های بیشتر از ۱۵۰ میلیمتر که با استفاده از پوزولان بدست آمده اند بدون مشکل پمپاژ می شوند. اگر جذب آب در بتن سبکدانه هنگام اختلاط در مسیر حمل به محل رخ دهد، باید با افزایش آب به مخلوط را به منظور افزایش اسلامپ مد نظر قرار داد. این عمل معمولا تاثیری در کاهش مقاومت بتن ندارد زیرا نسبت های اختلاط اولیه برحسب رطوبت آزاد ( نه رطوبت جذب شده) طرح شده اند.

کاهش اسلامپ بتن در فاصله بین پمپ و سر انتهایی شیلنگ پمپاژ، ممکن است به علت جذب رطوبت اضافی تحت فشار ناشی از اشباع نامناسب مصالح سبکدانه، نسبت مصالح درشت دانه زیاد در یک اختلاط پمپی، فشار زیاد پمپاژ، و یا ترکیبی از عوامل فوق باشد. برای جبران کاهش اسلامپ در فاصله مذکور می توان از اسلامپ اولیه بیشتری هنگام عملیات پمپاژ استفاده نمود.

### ۵-۸-مصالح سیمانی

مقادیر مصالح سیمانی در بتن سبک پمپی در ACI 211.2 شرح داده شده است. توصیه می شود با سازندگان سنگدانه های سبک در مورد نیاز این مصالح برای رسیدن به مقاومت مطلوب مشورت گردد. ضمناً باید دقت

کنیم که در بتن های سبک پمپی که از نسبت ریزدانه به درشت دانه بیشتری استفاده شده اند و یا اسلامپ بیشتری دارند، باید مقدار مصالح سیمانی را افزایش دهیم.

در انتخاب درصد سیمان برای بتن سبک پمپی در آزمایشگاه باید دقت کنیم طرح اختلاط باید به گونه ای باشد که مقاومت بیشتری نسبت به آن چه در کارگاه مدنظر است را نتیجه دهد. باید به این نکته توجه نمود که استفاده از سیمان بیشتر به عنوان تنها روش برای حل مشکلات پمپاژ، غیراقتصادی و غیرمنطقی است. از این رو بهتر است شکل دانه بندی نامناسب سنگدانه ها، بخصوص در مصالح ریزدانه و نیز مشکل رطوبت اولیه مصالح سبک را حل نمود تا مشکل پمپاژ کاهش یابد.

### ۵-۹- مواد افزودنی معدنی

همان گونه که اشاره شد، انواع گوناگون مواد افزودنی معدنی که در بتن پمپاژی به کار می روند به سه گروه تقسیم می شوند:

- مصالح غیرفعال شیمیایی مانند سنگ آهک، کوارتز، آهک هیدراته
- مصالح سیمانی مانند سیمان طبیعی، روباره کوره آهن گدازی، آهک هیدرولیکی، (مطابق ASTM C 595)
- پوزولان ها مانند کلاس F,C از خاکستر زغال سنگ و خاکهای دیاتومه شده و شیشه آتشفشانی که موارد فوق در۶۱۸ ASTM C موجودند. و متاکائولین، خاکستر سبوس برنج و دوده سیلیس مطابق با ASTM C ۱۲۴۰.

بسیاری از این مصالح دارای سطح مخصوص زیادی هستند و اکثرا ریزتر از سیمان پرتلند می باشند. خاطر نشان می گردد که پوزولان ها علاوه بر آنکه به علت شکل کروی و صاف و بافت سطحی باعث بهبود پمپاژ می شوند تاثیر مثبتی بر مقاومت بتن دارند. در سبکدانه هایی که دانه بندی مناسبی ندارند، افزودن این مواد افزودنی معدنی معمولا قابلیت پمپ کردن و کارپذیری بتن را زیاد کرده، نرخ آب انداختگی را کم می کند و مقاومت بتن را افزایش می دهد. تاثیر این مواد برمقاومت به نوع مواد افزودنی استفاده شده شرایط عمل

آوری بتن و مقدار مواد افزودنی مورد استفاده بستگی دارد. شکل ۵-۴ بتنی را که دچار آب انداختگی شدید شده است، نشان می دهد.

***شکل ۵-۴- بتنی با آب انداختگی***

### ۵-۱۰-مواد افزودنی

هر نوع ماده افزودنی که کارپذیری بتن سبک را افزایش دهد، در افزایش قابلیت پمپ کردن آن نیز تاثیر دارد. نوع ماده مورد استفاده و فواید استفاده از آن به ویژگی های طرح اختلاط بستگی دارد. وقتی مواد افزودنی به منظور بهبود پمپاژ در بتن استفاده می گردند، ممکن است در کاهش جداشدگی و نیز کاهش آب افتادگی نیز موثر باشند.

مواد افزودنی مورد استفاده برای بهبود پمپاژ را می توان به صورت زیر دسته بندی نمود:

- مواد کاهنده آب و فوق روان کننده ASTM C ۴۹۴
- مواد افزودنی حباب ساز ASTM C ۲۶۰
- می توان مواد افزودنی معدنی که در بخش قبل توضیح داده شد. برای بررسی تمام انواع مواد افزودنی به کار رفته به ACI212.3R مراجعه نمود.

فوق روان کننده ها معمولا هنگام پمپاژ بتن سبک مورد استفاده قرار می گیرند. اما باید در نظر داشته باشیم که این مواد فقط برای زمان محدودی موثر می باشند. بتن سبکی که به فوق روان کننده برای قابلیت پمپ

کردن نیازمند است باید قبل از وقوع افت اسلامپ از لوله پمپ خارج شود تا بتن در لوله سفت نشود(شکل ۵-۵).

***شکل ۵-۵- بتن روان شده با استفاده از فوق روان کننده***

توصیه می شود قبل از استفاده از این مواد در کارگاه، ابتدا از ترکیبات مختلف آنها در نمونه های آزمایشگاهی استفاده نماییم. اسلامپ بتن قبل از افزودن فوق روان کننده باید ۷۵ میلی متر (۳ اینچ) باشد. سازگاری ترکیبات اختلاط باید به دقت (خصوصاً در ارتباط با کاهش درصد هوا براثر استفاده از فوق روان کننده) مورد بررسی قرار گیرد. پیشنهاد می شود که فوق روان کننده ها در محل پروژه به مخلوط بتن سبکدانه اضافه شوند تا بتوان از زمان عملکرد آنها بهتر استفاده نمود. در بعضی موارد، فوق روان کننده ها تاثیر معکوس برعملیات پرداخت دارند.

توصیه می شود که در بتنی سبکی که قرار است پمپاژ شود از مواد حباب ساز استفاده گردد. مواد حباب ساز بتن سبک را به طور قابل ملاحظه ای نسبت به بتن سبک بدون حباب ساز کارپذیرتر و منسجم ترخواهد کرد. در بتن های حاوی مواد حباب ساز، در اثر پمپاژ بتن، جداشدگی سنگدانه و آب افتادگی کمتری به وقوع می پیوندد. شواهد نشان داده است که شروع و پایان کار پمپاژ بتن معمولا در صورتی که از مواد حباب ساز در بتن استفاده شود راحت تر صورت می پذیرد. همچنین آب افتادگی گاهی اوقات منجر به از دست دادن روانی بتن می شود که باعث انسداد لوله های پمپاژ خواهد شد.

# ۶-مروری بر روش‌های آزمایش پایداری و پمپ پذیری

## ۶-۱-آزمایش‌های پایداری و کنترل جداشدگی

هم اکنون، پایداری بتن به ندرت اندازه گیری می شود و این قضاوت معمولاً به صورت عینی صورت می گیرد. با این وجود در سالیان اخیر به مشخصات رفتاری بتن تازه و مخصوصا پایداری آن توجه ویژه ای شده است. بتن سبک نیز از این قاعده مستثنا نیست.

بتن سبک، به طور خاص، آماده و مستعد جداشدگی و مشکلات پایداری می باشد زیرا بین ترکیبات آن تفاوت وزن مخصوص زیادی وجود دارد. علاوه بر آن، بسیاری از فاکتورهای مخصوص محل، مانند آرماتورهای متراکم، داکت های عمود بر جهت ریختن بتن، دسترسی محدود به محل که باعث تغییر مکان های اجباری بعدی بتن در محل خود می شود، ممکن است باعث گسترش جداشدگی در قالب شوند. آزمایش های ذیل برای اندازه گیری احتمالی جداشدگی بتن در محل ارائه شده اند.

### ۶-۱-۱-آزمایش جایدهی بتن در ابعاد واقعی

مرتبط ترین آزمایش در دسترس برای اندازه گیری پایداری یک مخلوط، همین آزمایش می باشد. این آزمایش شامل ساخت یک مقطع تیپ از محل با آرماتور، بازشوها و داکت های موجود می باشد که با بتن پر شده و سپس طبق وضعیت واقعی بتن ریزی سازه متراکم می شود. وقفه های زمانی متعارف هم بین ساخت و قرار دادن در محل برای شبیه سازی شرایط سخت توصیه می شود.

بسیاری از عواملی که در احتمال جداشدگی بتن مؤثرند مانند زمان لازم برای تخلیه بتن به داخل قالب و زمان متراکم کردن و مواردی نظایر آن در این آزمایش اندازه گیری می شود.

قالب پس از گیرش اولیه بتن باز می شود و سطح آن بریده می شود (به وسیله دستگاه های فیزیکی و یا فشار واتر جت) این در حالی است که بتن هنوز تازه است و توزیع سنگ دانه قابل مشاهده است. در صورت وقوع جداشدگی در بتن، آزمایش مقطع در سطح بتن می تواند این جداشدگی را نشان دهد. مشاهدات محلی

بیشتری در اطراف آرماتورها و داکت ها برای بررسی احتمال وقوع جداشدگی های موضعی در اطراف این محل ها الزامی می باشد.

این آزمایش فواید دیگری نیز دارد، از جمله اینکه می توان عوامل و کارکنان ریختن بتن را آموزش داد و آنها را از نکات این آزمایش آگاه ساخت. اغلب بهترین راه برای متقاعد کردن این کارکنان در مورد نیاز به انجام صحیح و یا غیر صحیح وظایف آنها، بیان پیامدهای عملکرد مناسب و نامناسب آنها است.

تنها ایرادی که به این روش وارد است، توجیه پذیر نبودن استفاده از این روش در پروژه های کوچک است. یافتن مشکل پایداری بتن طبق این آزمایش به معنی صرف زمان برای اصلاح طرح اختلاط و مراحل بتن ریزی است. از این رو برای پروژه های کوچک گران تمام می شود و اقتصادی نمی باشد.

### ۶-۱-۲-آزمایش پایداری SINTEF

این آزمایش که از قضاوت شخصی جلوگیری می کند، در حال حاضر در حال بررسی و توسعه در کشور نروژ می باشد. این روش، شامل ساخت یک استوانه به قطر ۲۰۰mm و ارتفاع ۲۰۰mm می باشد که به دو بخش فوقانی و تحتانی تقسیم شده است. نسبت وزن مخصوص بتن مرطوب تازه بین این دو بخش به عنوان نسبت پایداری در نظر گرفته می شود. سپس با در نظر گرفتن حدود مجاز می توان میزان جدا شدگی بتن و در نتیجه تعیین قابلیت بتن پذیری را تعیین نمود.

استفاده از این روش مزایایی دارد که عمده ترین آن ها به شرح زیر می باشد:

- یک روش ارزیابی غیر فردی و غیرچشمی ارائه می دهد.
- می تواند در کارگاه انجام شود تا نتایج مطلوب و مورد رضایتی چه در آزمایش و چه در بتن ریزی های واقعی را به دست دهد.
- نتیجه آزمایش به سرعت قابل محاسبه است.
- نتایج معمولا وابسته به ابعاد نمونه نیست.
- قابل حمل و آزمایش در آزمایشگاه و نیز در محل کارگاه است.

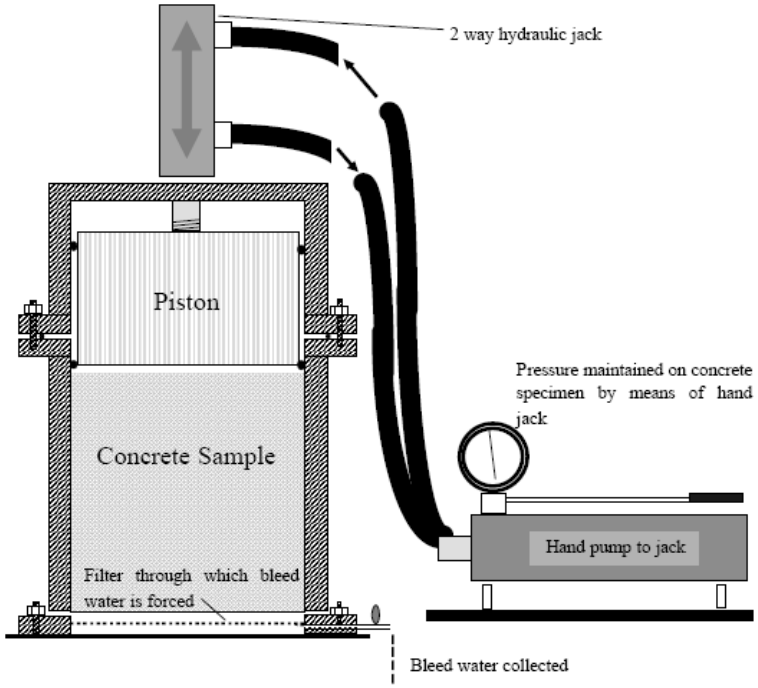
### ۶-۱-۳- دیگر روش های آزمایش پایداری

روش های دیگر در این زمینه موجودند که همگی بر پایه اختلاف در وزن/ وزن مخصوص بین بخش فوقانی و تحتانی نمونه می باشند (مانند اندازه گیری شیب مغز غوطه ور در آب و اندازه گیری مرکز ثقل مغزه). هیچ کدام از این روش ها به طور گسترده مورد قبول و استفاده نیستند. همچنین هیچ یک از این روش ها به انعطاف پذیری و آسانی کار آزمایش نروژی SINTEF نیستند.

گروهی دیگر از آزمایش ها موجود می باشد که می توانند نتایج دقیق تری از وضعیت پایداری بتن را ارزیابی کنند. این روش ها بر مبنای اسلامپ و آزمایش جاری شدن می باشد که نشانگر امکان جداشدگی مخلوط هستند. اما نمی توانند به صورت عمومی مورد استفاده قرار گیرند چرا که تمامی آنها نسبت به اپراتور حساس و نیازمند ارزیابی شخصی می باشند.

### ۶-۲-آزمایش های پمپ پذیری بتن

با وجود اینکه قوانین و راهنمایی هایی برای ساخت یک مخلوط سبک پمپ پذیر وجود دارد، باید توجه کنیم که تنها روش ارائه شده در این قسمت برای تعیین پمپ پذیری بتن موجود است. این روش در محل استفاده می شود و استفاده از آن از نظر اقتصادی گران است. یکی از روش های آزمایش پمپ پذیری برای ارزیابی پمپ پذیری بتن معمولی توسط Barnforth (1977) ارائه شد. این آزمایش مقدار آب بالا آمده از رگه های بتن تحت فشار را اندازه گیری می نماید، تا بتوان ارزیابی مناسبی از مفید بودن بتن برای پمپاژ انجام داد (شکل ۶-۱).



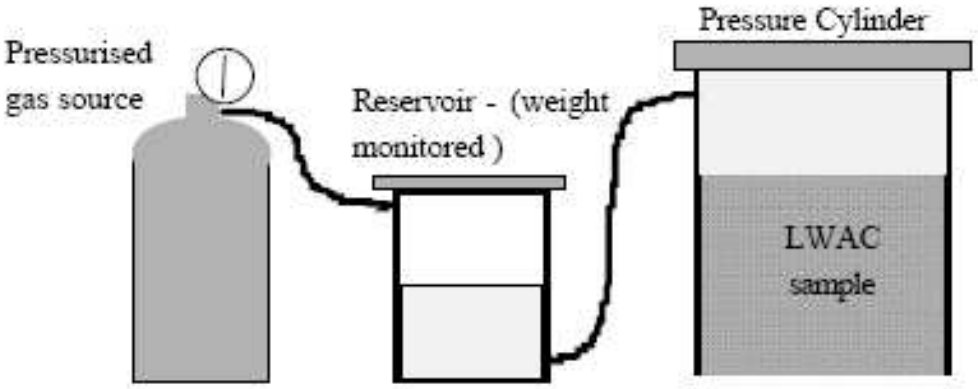

***شکل ۶-۱-آزمایش پمپ پذیری***

مقدار کاهش آب از بتن تحت فشار نمایانگر توانایی بتن برای باقی ماندن در شرایط اشباع می باشد. یک دلیل معمول برای انسداد خطوط پمپاژ وقتی از بتن معمولی استفاده می کنیم، آب انداختگی ناشی از فشار "Pressure Bleed" است. از فواید این روش می توان به علمی بودن آن برای ارزیابی دلایل اصلی غیر پمپ پذیری بتن معمولی اشاره کرد. از سوی دیگر این روش ایراداتی نیز دارد که عبارتند از:

- به صورت گسترده استفاده نمی شود.
- برای بتن سبک مناسب نیست (بخش سیمانی آب خود را از دست داده و به مصالح سبک دانه می دهد)
- دستگاه آزمایش نیازمند اپراتور ماهر است.
- استفاده از این دستگاه پیچیده است.

### ۶-۲-۱- آزمایش حجم / فشار

طبق مطالعات بیشتر در این زمینه در کشور نروژ، آزمایش نمونه بتن سبک تحت فشار قرار گرفته و تغییرات حجم ثبت می شود. بتن سبک تازه در یک مخزن تحت فشار قرار گرفته و به یک مخزن رزرو متصل و از آنجا به یک منبع گاز وصل می گردد و فشار مورد نیاز به بتن وارد می گردد. تغییرات حجم بتن تحت فشار، با اندازه گیری تغییر وزن مخزن رزرو که ناشی از خروج آب از آن به نمونه می باشد، اندازه گیری می گردد (شکل ۶-۲).




***شکل ۶-۲-آزمایش حجم / فشار***

- **فواید:** یک رابطه کلی بین تراکم پذیری و پمپ پذیری به صورت تجربی و آزمایشی برقرار است. این آزمایش بر خلاف آزمایش قبلی برای بتن سبک طراحی شده است. نمونه های نسبتاً بزرگ بتن سبک تازه جواب دقیق تری می دهند.
- **مضرات:** دستگاه جاگیر، بزرگ و غیرمناسب برای استفاده در کارگاه است. از سوی دیگر استفاده از این روش گسترش چشمگیری پیدا نکرده است و در نتیجه اطلاعات کمی از آن در دسترس می باشد.

- **پیشنهاد آزمایش پمپ پذیری:** برای بتن سبکی که بر پایه تراکم پذیری یک نمونه بتن سبک می باشد، یک آزمایش پمپ پذیری ساده مورد نیاز است. آزمایش پمپ SIMTEF قابلیت پیش بینی مناسب پمپ پذیری بتن سبک را دارد.

### ۶-۲-۲-توسعه و گسترش آزمایش پمپ پذیری بتن سبک

یافته های صورت گرفته بیانگر این موضوع است که آزمایش بررسی ویژگی های بتن سبک تازه متفاوت با بتن معمولی می باشد. همچنین، مطالعات نشان می دهد که هیچ یک از مشکلات مربوط به آزمایش بتن سبک تازه برطرف شدنی نیستند. از این رو روش های آزمایش جدید در حال بررسی است که این آزمایش ها دارای دقت بیشتری هستند.

### ۶-۲-۲-۱-معرفی

مبنای اصولی آزمایش پمپ بتن سبک اندازه گیری تراکم پذیری بتن می باشد. وقتی بتن سبکدانه در پمپ تحت فشار قرار می گیرد، آب آزاد داخل بخش سیمانی به داخل سنگ دانه های غیر اشباع وارد می شود. در حالی که این موضوع اثری جزئی در بتن معمولی دارد، در بتن های با سنگ دانهٔ غیراشباع، اثری واضح و آشکار دارد. بسیاری از سبک دانه ها توانایی جذب تا ۲۵٪ آب را دارند، و لذا در خطوط لوله تحت فشار، بخش سیمانی می تواند بخش زیادی از آب خود را از دست بدهد. و سپس از دست رفتن لغزندگی منجر به انسداد خطوط پمپاژ می شود. به علاوه پس از پمپاژ، برداشته شدن فشار به نظر می رسد موجب آزاد شدن رطوبت سنگ دانه ها می گردد که نهایتاً باعث تشکیل یک ناحیه انتقالی (transition zone) بین سیمان و سنگ دانه می شود. این وضعیت نیز به نظر می رسد باعث کاهش مقاومت فشاری بتن سبک پمپ شده می گردد.

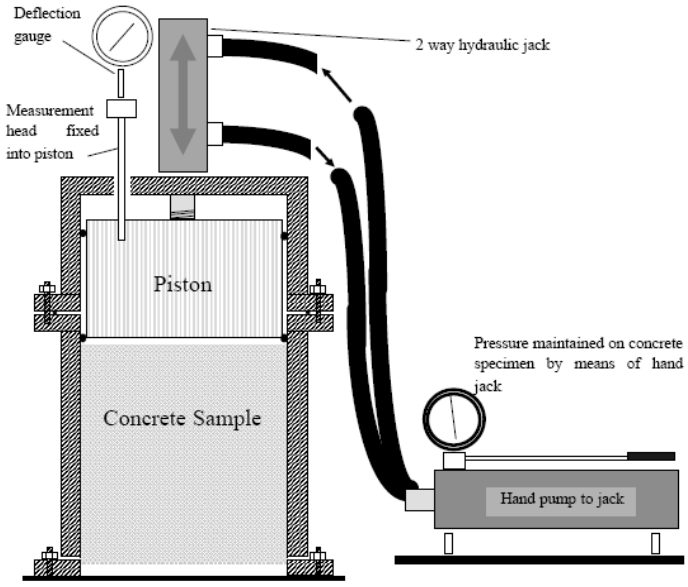
تراکم پذیری بتن ویژگی از بتن است که ممکن است منجر به غیر پمپ پذیری بتن سبک گردد. علاوه بر تراکم پذیری موارد دیگری نیز وجود دارد که پمپ پذیری بتن را با مشکل مواجه می کند که در زیر به آن ها اشاره شده است:

- تمایل به جداشدگی در خطوط پمپاژ
- فشار پمپ
- کمبود پوشش دوغابی خطوط پمپاژ

### ۶-۲-۲-۲-دستگاه آزمایش

دستگاه آزمایش مورد استفاده شبیه وسیلهٔ آزمایش آب انداختگی است که در بخش پیش بیان گردید. نمونه بتنی تحت آزمایش در یک استوانه به قطر داخلی ۱۲۵mm که این قطر با توجه به قطر خطوط پمپاژ معمول انتخاب شده، قرار داده می شود. یک پیستون داخل استوانه قرار داده شده و بخش فوقانی دستگاه کاملاً محکم می شود.

فشار توسط یک پمپ دستی به نمونه بتنی وارد می شود که در آن یک جک هیدرولیکی به پیستون متصل است. میزان انحراف پیستون توسط اندازه گیر انحراف، مانیتور شده و از آنجا می توان میزان تراکم نمونه آزمایش را تحت فشار اعمال شده محاسبه نمود. شکل ۶-۳ دستگاه آزمایش پمپ پذیری بتن سبک را نشان می دهد.




***شکل ۶-۳-دستگاه آزمایش پمپ پذیری بتن سبکدانه***

مبنای اصولی این آزمایش بر این پایه استوار است که بین تراکم پذیری بتن سبک دانه با پمپ پذیری آن رابطه وجود دارد. این موضوع مبنای اغلب مکانیسم های گسیختگی بتن سبک دانه در پمپاژ است. بنابراین آسیب پذیری یک بتن سبک دانهٔ مشخص در برابر کاهش آب از ماتریس تحت فشار را می توان با آزمایش تراکم پذیری یک نمونه بتن سبک آب بندی شده تحت همان فشار انجام داد.

تغییرات اصلی نسبت به دستگاه آزمایش آب انداختگی عبارتند از :

- حذف زهکش آب انداختگی و سیستم فیلتر از دستگاه
- آماده سازی سیستم اندازه گیری انحراف پیستون

### ۶-۲-۲-۳-مشاهدات اولیه از روند آزمایش

بتن با طرح اختلاط های متفاوتی ساخته شدند تا روند آزمایش مناسبی به دست آید و نشان دهد که دستگاه آزمایش خوب عمل می کند.

با توجه به آزمایش های صورت گرفته مشاهدات ذیل ثبت شدند :

- مقدار بتن مورد نیاز به اندازه ای است که پیستون بتواند بالای استوانه نمونه به عمق پایین ترین تسمه آب بندی قرار گیرد. این موضوع به این معنی است که بتن در سیلندر به ارتفاع ۲۰mm از بالای استوانه قرار گیرد. که این محدودیت به این علت اعمال شده است تا مطمئن شویم بتن در فشار و انحراف پایین آب بندی مناسب را داشته باشد.
- در بتن هایی که آب آزاد کمی داشته و مصالح سبک دانه خشک باشند (که آب آزاد کافی برای اشباع نمودن این مصالح وجود نداشته باشند) سنگ دانه های شکسته در اطراف پیستون مشاهده شدند و ماتریس در این ناحیه به صورت خشک و بافت پودری قرار داشت. به سمت قسمت های پایین که می رویم دیگر این سنگ دانه های شکسته وجود ندارند و بافت ها طبیعی تر می شوند. باید توجه داشت که چنین مخلوطی برای پمپاژ مناسب نیست و به عنوان "حالت نامطلوب" محسوب می شود.
- یک سری آزمایش ها صورت گرفتند تا تراکم پذیری بتن های ساخته شده اندازه گیری شوند. فشار اسمی اولیه ۳۰bar بود که میزان انحراف اولیه در این مرحله قرائت می شوند و پس از آن میزان انحراف در فشارهای ۱۰۰ و ۲۰۰ و ۳۰۰ و ۴۰۰ و ۵۰۰bar قرائت می شوند. نهایتاً انحراف ناشی از برگشتن پیستون نیز ۵ دقیقه پس از آزاد کردن فشار از سیستم اندازه گیری می شود (فشار سیستم پس از اعمال ۵۰۰bar آزاد می شود).
- اولین مقدار انحراف اندازه گیری شدهٔ پیستون نمی تواند همواره دقیق باشد. وقتی پیستون روی بتن قرار می گیرد، در این محل پتانسیلی وجود دارد که در آن سطح ناصاف بتن، فضای خالی ایجاد می نماید (که نماد خطوط پمپاژ شبیه سازی شده نمی باشد) که در فشارهای پایین این پدیده حذف می شود. برای جلوگیری از این پدیده، وزن مخصوص مرطوب تازهٔ اولیهٔ بتن به دست آمده و وزن نمونه (با دقت یک گرم) استفاده شده قبل از آزمایش، اندازه گیری شود. اولین فشار اسمی، ۳۰bar به عنوان قرائت پایه برای انحراف اتخاذ می شود.

پس از بارگذاری سیلندر تحت فشارهای پایین، گاهی اوقات این تمایل در پیستون به وجود می آید تا در یک دوره زمانی کوتاه به آرامی برگردد که این دوره زمانی معمولاً حداکثر ۲ تا ۳ دقیقه است. دلیل این پدیده

روشن نیست اما ممکن است به علت کاهش هوای محبوس در سیستم باشد. برای جلوگیری از این پدیده، یک فاصله زمانی ۶۰ ثانیه ای بین اعمال فشار مورد نظر و قرائت انحراف پیستون قرار می دهیم. اگر هر گونه تغییر انحرافی هنگام قرائت انحراف وجود داشته باشد، به علت این پدیده می باشد.

### ۶-۲-۲-۴-مراحل آزمایش پمپ پذیری بتن سبک

مراحل آزمایش عبارتند از :

۱. یک نمونه بتن گرفته شده و آزمایش اسلامپ طبق BS 1881: Part 102 انجام می شود.

۲. یک نمونه بتن گرفته شده و وزن مخصوص بتن مرطوب تازه طبق BS 1881: Part 107 اندازه گیری می شود.

۳. سیلندر نمونه وزن می شود و وزن اولیه خالی یادداشت می شود (Wi)

۴. سیلندر تا عمق ۲۰mm از بالای آن از بتن سبک تازه پر می شود. بتن در لایه های ۵۰ میلی متری با استفاده از میلهٔ مربوط طبق BS 1881: Part 107 FWD test کوبیده می شود. سپس سیلندر از بتن اضافی تمیز گشته و دوباره وزن می شود (Wf)

۵. وزن نمونه بتنی ( Ws) را اندازه می گیریم (Wf-Wi)

۶. حجم نمونه بتنی را اندازه می گیریم (Ws/FWD)

۷. سیستم پیستون را به نمونه محکم می کنیم. باید مراقب حلقه های دایره ای شکل روغن کاری شده بود و پیچ ها را به اندازه مناسب سفت نمود.

۸. پیستون را روی سطح بتن با استفاده از پمپ دستی قرار می دهیم و مطمئن می شویم هیچ فشاری به آن وارد نسازد.

۹. فشار اسمی ۳۰bar را با استفاده از پمپ دستی وارد می نماییم. و تعداد انحراف پیستون را پس از ۶۰ ثانیه قرائت می کنیم.

۱۰. فشار نمونه را تا ۵۰۰bar به تدریج (۱۰۰ و ۲۰۰ و ۳۰۰ و ۴۰۰bar) افزایش می دهیم و انحراف را در هر مرحله قرائت می کنیم( D۱۰۰ و D۲۰۰ و D۳۰۰ و D۴۰۰ و D۵۰۰ )و این قرائت در هر مرحله ۶۰ ثانیه پس از اعمال فشار باید صورت گیرد.

۱۱. پس از اعمال فشار ۵۰۰bar، فشار را آزاد کرده و اجازه می دهیم پیستون به جای اولیه خود باز گردد. ۵ دقیقه پس از آزاد سازی فشار مجدداً مقدار انحراف را قرائت می کنیم (Dr)

۱۲. مقدار سنگ دانه های شکسته شده را در نمونه تحت آزمایش اندازه می گیریم.

### ۶-۲-۳- مثالی از آزمایش های محلی برای آزمودن قدرت پمپاژ بتن سبک دانه

تحقیقات نشان داده است که مقاومت فشاری بتن سبکدانه قبل و بعد از پمپاژ با یکدیگر متفاوت است. از این رو و به منظور بررسی پمپ پذیری بتن سبکدانه و بررسی تفاوت در مقاومت قبل و بعد از پمپاژ، در یک تحقیق ۱۰ طرح اختلاط در محل ساخته شدند. وزن مخصوص و مقاومت فشاری بتن تازه و بتن سخت شده این ۱۰ طرح اختلاط در جدول ۶-۱ آورده شده است.

***جدول ۶-۱- وزن مخصوص و مقاومت فشاری بتن تازه و بتن سخت شده ۱۰ طرح اختلاط***

| شماره طرح | قبل از پمپ | | بعد از پمپ | |
|---|---|---|---|---|
| | متوسطِ وزن مخصوص سخت شده اشباع ($Kg/m^3$) | متوسطِ مقاومت فشاری مکعبی ۲۸ روزه (MPa) | متوسطِ وزن مخصوص سخت شده اشباع ($Kg/m^3$) | متوسط مقاومت فشاری مکعبی ۲۸ روزه (MPa) |
| ۱ | ۲۳۰۰ | ۶۷/۰ | ۲۲۸۰ | ۶۸/۰ |
| ۲ | ۲۲۰۰ | ۶۶/۰ | پمپ نشده | |
| ۳ | ۲۲۴۰ | ۶۳/۰ | ۲۲۲۰ | ۶۳/۰ |
| ۴ | ۲۲۱۷ | ۶۱/۰ | پمپ نشده | |
| ۵ | ۲۲۰۰ | ۵۰/۰ | ۲۲۱۰ | ۵۳/۰ |
| ۶ | ۲۱۴۰ | ۴۹/۰ | ۲۱۵۰ | ۵۲/۰ |
| ۷ | ۲۰۷۰ | ۴۷/۰ | پمپ نشده | |
| ۸ | ۲۱۱۰ | ۴۸/۰ | پمپ نشده | |
| ۹ | ۲۱۳۰ | ۴۸/۰ | ۲۱۴۰ | ۵۱/۰ |
| ۱۰ | ۲۲۳۰ | ۶۴/۰ | پمپ نشده | |

همانطور که از جدول بالا مشاهده می شود مقاومت فشاری بتن بعد از عملیات پمپاژ اندکی افزایش یافته است. با توجه به تفاوت در طرح اختلاط این ۱۰ بتن، تعدادی از آن ها قابلیت پمپاژ کمی دارند. مشاهدات عینی انجام شده به صورت خلاصه در جدول ۶-۲ آورده شده است.

***جدول ۶-۲- نکات آزمایش پمپاژ***

| شماره مخلوط | وضعیت پمپ پذیری | مشاهدات |
|---|---|---|
| ۱ | قابل پمپاژ | مخلوط چسبنده ی خوب بعد از پمپاژ |
| ۲ | غیر قابل پمپاژ | بلافاصله خارج از دستگاه نقاط گسیختگی مشاهده شد. فقط به وسیله آب مازاد اضافه شده پمپاژ شد |
| ۳ | قابل پمپاژ | بلافاصله خارج از دستگاه نقاط گسیختگی مشاهده شد. |
| ۴ | غیر قابل پمپاژ | مخلوط چسبنده، فقط با استفاده از آب مازاد اضافه شده پمپاژ شد. |
| ۵ | قابل پمپاژ | مخلوط چسبنده خوب بعد از پمپاژ |
| ۶ | قابل پمپاژ | بسیار پایدار، عدم تغییرات زیاد به وسیله پمپاژ کردن. بسیار قابل جایگذاری. |
| ۷ | غیر قابل پمپاژ | فقط بعد از اضافه شدن آب مازاد پمپاژ شد. |
| ۸ | غیر قابل پمپاژ | فقط بعد از اضافه شدن آب مازاد پمپاژ شد. |
| ۹ | قابل پمپاژ | قبل و بعد از پمپاژ به صورت غیرسخت یا نرم مشاهده شد. |
| ۱۰ | غیر قابل پمپاژ | عدم موفقیت در پمپاژ. خط پمپاژ به وسیله ی بسته ی خشک شده بتن بدون هیچ گونه رطوبت و در حالت غیر خمیری مسدود شد. بند آمد. |

### ۶-۲-۴-بررسی قابلیت پمپ پذیری سبکدانه های متداول

آزمایش های صورت گرفته برروی بتن سبک دانه برمبنای لیکا ۷۰۰ که در اروپا تولید شده است نشان می دهد که این بتن احتمالا قابل پمپاژ کردن نیست. پمپاژ بتن سبکدانه با لیکای ۷۰۰ نه در حالت خشک شدگی اولیه، نه در حالت پیش مربوط شده و نه در حالت سبک دانه اشباع شده امکان پذیر نمی باشد.

با این وجود، استفاده از سبک دانه لیکا ۸۰۰ تولید شده در اروپا، در بتن ممکن است بتن پمپاژ پذیری را نتیجه دهد. به عبارت دیگر در صورت استفاده از سبک دانه های پیش مرطوب شده می توان بتن ساخته شده با لیکای ۸۰۰ را پمپ نمود. همچنین آزمایش های تکمیلی نشان می دهد که استفاده از سبک دانه استالیت در بتن، اگر پیش مرطوب شود منجر به تولید بتن پمپاژ پذیری خواهد شد.

### ۶-۲-۵-توجه های اصلی در خصوص پمپاژ

پمپاژ در بیشتر مناطقی که تولید کننده های بتن آماده می توانند یک مخلوط بتنی را آماده کنند پایه گذاری شده است. در صورتیکه تولید کنندگان از ظرفیت حجم پمپ بتن و فواصل افقی و عمودی و قابلیت فشار و قطر خط لوله خبر داشته باشند پمپاژ با سرعت بیشتری انجام می گیرد.

جداولی ارائه شده است که بر اساس تجربه های میدانی تهیه شده اند. در این جداول وزن سنگدانه طبیعی و درشت خرد شده که می توان با ریزدانه با هر مدول نرمی استفاده کرد را پیشنهاد می دهد. در بیشتر موارد این راهنمایی ها تمام آن چیزی است که برای تهیه یک بتن پمپاژ پذیر موجود است. تهیه این جداول برای هر نوع سبکدانه خاص امکان پذیر است.

شکل سنگدانه های درشت چه تیز گوشه و چه گردگوشه باشد بر روی نسبت اختلاط تاثیر می گذارد. سبکدانه های تیز گوشه سطح مخصوص بیشتری در واحد حجم در مقایسه با دانه های گرد گوشه دارند و به این گونه ملات بیشتری را برای پوشاندن سطح پمپاژ لازم دارند. مشکل دیگر سنگدانه های تیز گوشه در پمپ پذیری بتن آن است که اصطکاک داخلی بتن ساخته شده با این سنگدانه ها افزایش یافته و کارپذیری بتن کاهش می یابد. بنابراین استفاده از سنگدانه های بسیار تیز گوشه برای ساخت بتن پمپ پذیر توصیه نمی شود.

به خاطر داشته باشیم که ظرفیت پمپ مورد نیاز باید بر اساس مشخصات ملات (سیمان، آب)، میزان و اندازه مصالح و ارتفاع و فاصله ای که بتن باید پمپاژ شود، انتخاب شود. از سوی دیگر، ظرفیت پمپاژ بتن از قابلیتهای لوازم پمپاژ و کنترل، مقاومت تمام مواد داخل مخلوط، عملیات مخلوط کردن و میزان اطلاعات و تجزیه پرسنلی که با کار درگیر هستند، تاثیر می پذیرد.

# ۷-عملیات پس از بتن ریزی

تا اینجا چگونگی ساخت بتن سبکدانه، حمل آن و نحوه پمپ کردن بتن سبکدانه مورد بررسی قرار گرفت. در این قسمت عملیاتی که پس از بتن ریزی مورد نیاز است، شامل تراکم، عمل آوری، پرداخت و زبر کردن سطوح، اشاره می گردد.

## ۷-۱-تراکم

تراکم، فرایند تحکیمی است که بتن را در میان قالب و اطراف قطعات بتن ریزی شده، جای می دهد تا توده های هوای محبوس شده را خارج نماید. این عمل را می توان به وسیله روش های گوناگونی انجام داد که اغلب روشهای مکانیکی مانند ویبراتور داخلی، ویبراتور قلمی (شکل ۷-۱)، و ویبراتور خارجی که به صورت محکم به قالب بسته می شوند را تشکیل می دهند. تراکم قطعات پیش ساخته بتنی در کارخانه اغلب به وسیله میز لرزه انجام می پذیرد. مشخصات ویبراتور از فرکانس بسیار کم با دامنه بزرگ تا فرکانس زیاد با دامنه کم تغییر می کند. ویبراتورهای قلمی دارای فرکانس زیاد( حداقل 200HZ ) و شتاب زیاد هستندکه در حقیقت تابعی از فرکانس و دامنه خواهد بود. در مقایسه با بتن معمولی، بتن های سبکدانه به تراکم کمتری نیاز دارند. تراکم بسیار شدید ممکن است منجر به کاهش همگنی و از دست رفتن پایداری بتن تازه شود. استفاده از قالب با سطح صاف و نفوذناپذیر، مانند بتن های معمولی، ایجاد حباب های هوا در سطح قالب را افزایش می دهد. احتمال ایجاد حباب های هوا در مورد بتن های دارای ریزدانه سبک بیشتر است. ممکن است استفاده از قالب های فلزی با سطح بسیار صاف پس از آماده کردن سطح با مواد شیمیایی، به نتایج بهتری منجر شود.

***شکل ۷-۱-تراکم بتن با استفاده از ویبراتور قلمی***

آب انداختگی بتن سبک اغلب کمتر از بتن معمولی است، زیرا بتن سبکدانه عیار سیمان بیشتری نسبت به بتن معمولی در سطح مقاومت یکسان دارد. آب موجود در سطح بتن، خطر ترکهای پلاستیک ایجاد شده به واسطه تبخیر آب و فشار آب منفی ایجاد شده در حفره های مویینگی بتن را کاهش می دهد. به طور منطقی آب انداختگی کمتر، ترک خوردگی های اولیه بیشتری را ایجاد می کند. از سوی دیگر آب جذب شده در سبکدانه ها چنین خطری را کاهش می دهد.

تراکم طولانی مدت بتن سبکدانه برخلاف بتن معمولی موجب تمرکز خمیر سیمان یا ملات سیمان در بالای سطح نمی شود. در مقابل، قطعات درشت دانه تمایل دارند که به بالا حرکت کنند و ممکن است از بتن خارج شوند و لایه ای ضعیف از سبکدانه ایجاد کنند. نیروی پیش راننده، تفاوت میان وزن مخصوص دانه ای سبکدانه ها و وزن مخصوص خمیر سیمان حاوی حباب های هوای اضافی وارد شده است. سرعت حرکت دانه ها به وسیله فرمول استوکس ( که برای اجسام کروی معتبر است) به دست می آید:

$$V=2r^2\Delta p\, g/9\mu \ (m/s)$$

که در آن:

r = شعاع دانه ها (m)

$\Delta p$= تفاوت میان وزن مخصوص دانه ها ومحیط پیرامونی یعنی خمیر سیمان یا ملات ($kg/m^3$)

g= شتاب ثقل ($Ns/m^2$)

و $\mu$ لزجت مایع (Pa·s) می باشد.

مشاهده می شود که در این فرمول، سرعت، با اندازه سنگدانه ها به توان دو رابطه دارد. دانه های درشت تر نسبت به دانه های ریزدانه سریع تر حرکت می کنند. این اثر تا وقتی که بتن به گیرش نهایی خود یا براساس این فرمول تا وقتی که لزجت به اندازه کافی زیاد شود ادامه پیدا می کند. دانه های قابل رویت سبکدانه در سطح بالایی، یکی از ویژگی های خاص این نوع بتن ها است که باید در هنگام پرداخت به آن توجه کرد. به منظور تعیین میزان تراکم پذیری بتن آزمایشی پیشنهاد شده است که بر اساس آن می توان قابلیت تراکم پذیری بتن را برآورد نمود. در ادامه نحوه انجام آزمایش و تجهیزات مورد نیاز برای انجام آن بررسی می شود.

### ۷-۱-۱-نحوه انجام آزمایش تراکم

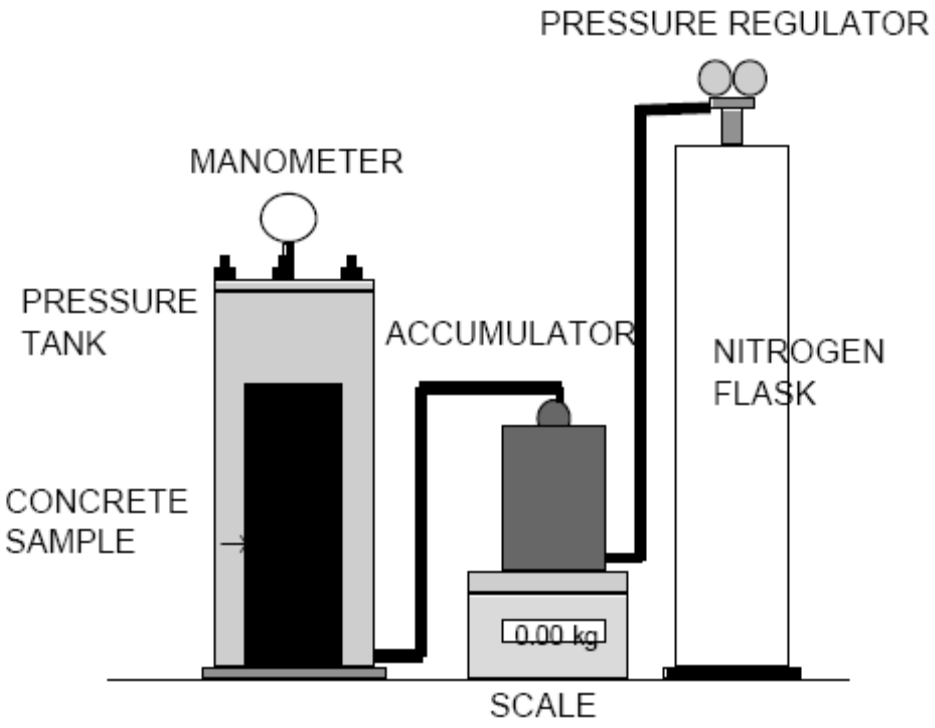
حجم مشخصی از بتن تازه که در یک ظرف انعطاف پذیر و آب بندی شده، تحت فشار قرار می گیرد. این ظرف در آب مستغرق شده است. هر گونه کاهش حجم بتن توسط آب آزاد در دسترس توسط انباره(Accumulator) فشار جبران می شود. تغییرات وزن در انباره، تغییرات حجم را نمایش می دهد. تراکم پذیری بتن به صورت درصد کاهش حجم بتن تعریف می شود.

### ۷-۱-۲-تجهیزات

تراکم پذیری بتن تازه در تانک فشار با حجم داخلی حدود ۳۰ لیتر محاسبه می شود. تانک فشار به یک مانومتر مجهز است که فشار موثر را نمایش می دهد. فشار هیدرو استاتیک توسط گاز فشرده ساز (مانند نیتروژن ) تامین می شود. انباره (Accumulator ) در حقیقت یک ظرف فولادی ۱۰ لیتری با بالن پلاستیکی داخلی است که با گاز پرشده است و به فلاسک گاز خارجی متصل است. بالن لاستیکی توسط آب احاطه شده است که در تماس مستقیم با آب داخل است. وقتی بالون لاستیکی تحت فشار قرار می گیرد، این فشار

بر آب داخل انباره اعمال می شود و از آنجا به تانک فشار منتقل می شود. چون آب تقریبا تراکم ناپذیر است، افزایش فشار به خودی خود منجر به تغییرات فشار در انباره نمی شود.

مبنای اندازه گیری بر پایه این واقعیت استوار است که تغییرات حجم رخ داده در تانک نهایتا باعث انبساط بالن لاستیکی خواهد شد. یک تنظیم کننده روی فلاسک گاز، ثابت ماندن فشار را در بالن لاستیکی تامین می نماید. در شکل ۷-۲ تجهیزات آزمایش تراکم نشان داده شده است.




***شکل ۷-۲-تجهیزات آزمایش تراکم***

### ۷-۱-۳-مراحل انجام کار

بتن تازه حداکثر ۵ دقیقه پس از اختلاط نمونه گیری می شود. مراحل زیر را برای آزمایش تراکم پذیری باید مد نظر قرار داد:

یک ظرف نرم پلاستیکی با حجم داخلی ۵ لیتر به صورت لایه به لایه توسط بتن تازه پر می شود. هر لایه توسط میز ویبره متراکم شده تا کمترین هوای محبوس را داشته باشد. نمونه بتنی تازه توسط یک درب پلاستیکی که در تماس با سطح بتن می باشد، بسته می شود. دور تا دور این درب توسط یک نوار ضد آب و کشسان آب بندی شده است، ظرف پلاستیکی نیز در تانک فشار قرار می گیرد.

## ۷-۲-عمل آوری

هدف عمل آوری این است که بتن به نحوی سخت شود که تمام ملزومات مورد نیاز را برآورده کند. شرایط آب و هوایی محیط پیرامونی، ترکیبات بتن و مشخصات اجزای تشکیل دهنده نقش مهمی در هیدراتاسیون اولیه و سخت شدن بتن ایفا می کند. به طور معمول عیار سیمان بیشتر، موجب شتاب بخشیدن به توسعه گرمازایی و افزایش دمای بتن می شود. در داخل یک سازه یکپارچه، دما می تواند به مقادیر بسیار بیشتری نسبت به بتن معمولی برسد. برای کاهش گسترش گرما و افزایش دما باید بخشی از سیمان پرتلند را با روباره کوره آهنگدازی دانه ای آسیاب شده، پوزولان یا خاکستر بادی جایگزین کرد.

در مورد وسایل عمل آوری باید یادآور شد که، ابزار آلات عمل آوری بتن سبک نسبت به بتن های معمولی متفاوت نیست. عمل آوری بتن سبکدانه زمانی که از عمل آوری مرطوب (شکل ۷-۳) استفاده شود، با موفقیت انجام می شود. نکته قابل توجه این است که رطوبت موجود در سنگدانه بتن سبک، با گذشت زمان بطور خود بخودی نقش عمل آوری را انجام می دهد.

***شکل ۷-۳- عمل آوری مرطوب بتن***

### ۷-۳-پرداخت

فرایند پرداخت بتن سبک (شکل ۷-۴) در مواردی نسبت به بتن های با وزن مخصوص معمولی متفاوت است. بدلیل اینکه وزن مخصوص سبکدانه ها در حالت کلی از شن و سیمان کمتر است، در هنگام کار، درشت دانه ها تمایل دارند که به سطح بیایند. این موضوع باید در فرآیند پرداخت مورد توجه قرار گیرد. ACI 302- IR چندین قانون ساده وضع کرده است که در صورت رعایت آن می توان پرداخت مناسبی را برای بتن انتظار داشت.

- برای آوردن ملات بیشتر به سطح مخلوط، مخلوط نباید دارای شن زیادی باشد.
- طرح اختلاط بتن سبک باید به گونه ای باشد که بتواند کارپذیری مطلوب، خاصیت پمپ پذیری، خصوصیات پرداخت و زمان گیرش مورد نیاز را تامین کند. توجه به نسبت های اختلاط برای حداقل کردن جداشدگی و یا تمایل درشت دانه ها برای بالا آمدن، بسیار موثر است.
- به منظور جلوگیری از جداشدگی و آب انداختگی میزان هوای موجود در بتن نباید کمتر از ۴ درصد باشد. توجه به این نکته ضروری است که برای برآورده کردن سایر الزامات بتن سبکدانه ( به عنوان نمونه، قابلیت پمپ پذیری) نیز محدودیت هایی ارائه شده است که در صورت نیاز باید به آن ها توجه کافی صورت گیرد. این محدودیت ها در فصل قبل بررسی گردید.
- از زیاد متراکم کردن بتن سبک باید اجتناب کرد. تراکم بیش از حد باعث آمدن سبکدانه ها به سطح می شود.
- پرداخت سطح تا زمانی که بتن حالت پلاستیکی دارد باید ادامه یابد. زمانی که مواد با خاصیت سیمانی برای چسبندگی در بتن بکار می رود، ممکن است شاهد رطوبت زیادی در سطح نباشیم. با پیش مرطوب کردن کامل سنگدانه ها، تبخیر رطوبت سطحی بتن ممکن است بزودی اتفاق نیفتد. یک راه ساده و قابل اطمینان برای حفظ رطوبت بتن، کشیدن لاستیک یا پارچه کیسه ای مرطوب برروی سطوح آن است.

***شکل ۷-۴-پرداخت بتن سبک***

## ۷-۴-زبرکردن سطوح

آماده کردن سطح قدیمی بتن سبکدانه برای قرار دادن بتن جدید باید با دقت زیادی انجام شود. درشت دانه های ضعیف و شکننده بتن سبکدانه به آسانی توسط فشار جت آب سائیده می شوند. در صورت ساییده شدن درشت دانه ها، زبری کافی برای اینکه سنگدانه ها درهم گیر کنند، بوجود نمی آید. قابل ذکر است که روش فشار جت آب بعنوان یکی از متداول ترین روش های زبرکردن سطوح مطرح است.

یک راه حل خوب برای زبر کردن سطوح افقی بکار بردن موادی است که سخت شدن ملات سیمان سطح بتن را متوقف می کند. تاثیرات این مواد بازدارنده باید در آزمایشگاه (قبل از استفاده) بررسی شود تا معلوم گردد که تاثیراتش مخالف و مغایر با اتصال بتن جدید و قدیم نباشد. برای سطوح قائم، استفاده از المان های قلابی شکل می توانند کمبود درگیری سنگدانه ها را جبران کند. در شکل ۷-۵ یک سطح زبر شده و آماده برای بتن ریزی جدید نشان داده شده است.

***شکل ۷-۵-سطح زبر شده بتن***

# ۸- کنترل های کارگاهی بتن سبکدانه

همانند بتن معمولی، پس از ساخت بتن سبکدانه کنترل های لازم باید بر روی بتن ساخته شده، انجام شود. با در نظر گرفتن این کنترل ها می توان به مشخصات ابتدایی بتن سبکدانه ساخته شده دست یافت. در مورد آزمایش های اسلامپ، وزن مخصوص ، درصد هوا، جداشدگی بتن تازه، مقاومت فشاری موقعیت نمونه ها و نحوه نمونه گیری، در این قسمت توضیحاتی ارائه خواهد شد.

## ۸-۱-کنترل مخلوط

آزمایش های کنترلی که در اینجا مورد بحث قرار گرفته، در مرحله اول مربوط است به بتن سبک بعد از تکمیل اختلاط، اما آزمایش های دیگری نیز وجود دارد که می توان آنها را بر روی تک تک مواد متشکله بتن انجام داد.

نمونه های بتن برای آزمایش های صحرایی یا کارگاهی باید همواره در فواصل دو در میان یا بیش از دو در میان در خلال تخلیه بتن ( بر طبق روشهای مندرج در ASTM C 172 ) برداشته شود. شکل ۸-۱ بتن ریزی توسط ماشین های حمل بتن را نشان می دهد.

***شکل ۸-۱-بتن ریزی توسط ماشین های حمل بتن***

نمونه ها را به هیچ وجه نباید قبل از آنکه همه آب به میکسر اضافه شود، برداشت و هرگز نباید نمونه ها را از قسمتهای اول یا آخر محموله تهیه کرد. تمام روش های آزمایش مانند آزمایش مقاومت فشاری، باید بر طبق روش های آزمایش رایج استاندارد ASTM انجام گیرد.

### ۸-۲-تنظیم میزان بتن تولید شده

در قسمت های پیشین به عواملی که باعث تغییر در وزن مخصوص سبکدانه ها می شود اشاره گردید. در این قسمت به بررسی حجم و وزن بتن سبکدانه ساخته شده اشاره می شود. تنظیم میزان بتن تولید شده برای پیمانکاران، کارفرما و شرکت های تولیدی بسیار حائز اهمیت می باشد.

کنترل حجم بتن سبک تولید شده بسیار اهمیت دارد. تولید زیاد به معنای آنست که حجم بتن بیش از مقدار مورد نظر است و تولید کم معنای برعکسی دارد. تقریباً تولید زیاد با کاهش مقاومت بتن همراه است زیرا با مقدار معینی سیمان حجم بیشتری بتن تولید شده است که این بدین معنی است که مقدار سیمان به کار رفته در واحد حجم مخلوط کاهش یافته است. از سوی دیگر تولید کم به تحویل حجم کمتری از بتن مورد درخواست یا سفارش داده شده می انجامد.

وزن مخصوص بتن تازه برای اندازه گیری میزان تولید طرح اختلاط به کار می رود. وزن همه مواد متشکله ای که در دیگ مخلوط کن ریخته می شود، بر طبق برگه تحویل جمع زده می شود، و یا تراک میکسر قبل و بعد از تخلیه بتن با استفاده از باسکول توزین می شود. وزن کل شامل همه سیمان، مصالح دانه ای ( تر یا خشک) و همه آب اضافه شده به آنها می باشد. از تقسیم وزن همه مواد متشکله بتن بر وزن مخصوص خمیر تازه بتن، حجم کل بتن موجود در دیگ میکسر به دست می آید (ASTM C 138). وقتی که حجم محاسبه شده بیش از ۲٪ نسبت به حجم نشان داده شده در قبض تحویل داده شده اختلاف داشته باشد، باید میزان بتن تولید شده تنظیم شود. اگر تغییرات حجم بتن تحویلی به علت مقدار هوای محبوس در آن باشد، آنگاه باید مقدار ماده حباب ساز به تناسب، تغییر یابد تا این ایراد برطرف گردد.

در شرایطی که تغییر قابل ملاحظه ای در وزنهای خود دانه های سبک اصلی مشاهده نشود، به احتمال زیاد، اختلاف در حجم بتن تحویلی را می توان ناشی از مقدار نادرست یا حجم مطلق نادرست مصالح دانه ای سبک دانست. در این حالت، باید در ایستگاه مرکزی بتن، گام هایی در جهت تصحیح حجم مطلق مصالح دانه ای سبک به کار رفته در بتن در زمان پیمانه کردن این مصالح برداشته شود.

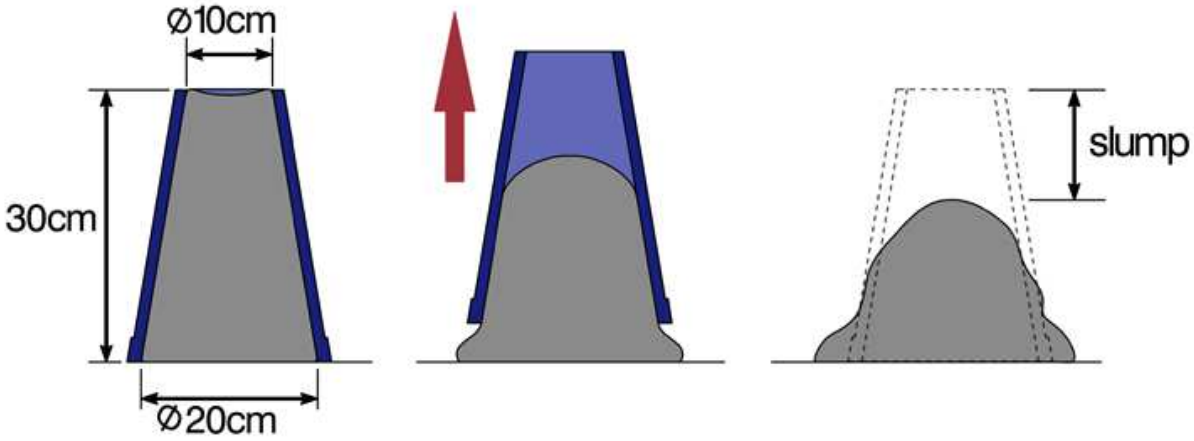
### ۸-۳-موقعیت نمونه

نمونه های بتن سبک باید همواره در دو یا چند مرحله با فاصله زمانی منظم برداشته شوند. همانطور که اشاره شد، نمونه ها نباید قبل از این که همه آب به مخلوط کن اضافه شود، برداشته شوند. در بتن های پمپ شونده اسلامپ در مرحله تخلیه، در نقطه پایانی لوله و هر جای مناسب دیگری که امکان اندازه گیری اسلامپ وجود دارد، باید انجام گیرد. با این عمل تغییرات اسلامپ را در طول پمپ می توان برآورد نمود. همه روش های آزمایش باید مطابق با روشهای استاندارد ASTM انجام شود. آزمایش اسلامپ، وزن مخصوص، درصد هوا، جداشدگی بتن تازه و مقاومت فشاری از متداولترین آزمایش هایی هستند که در کارگاه انجام می شوند. شکل ۸-۲ نمونه گیری برای آزمایش های بتن را نمایش می دهد.

***شکل ۸-۲- نمونه گیری بتن***

### ۸-۴-اسلامپ و میز جریان

آزمایش اسلامپ برای بتن سبک باید دقیقاً مانند بتن با وزن مخصوص معمولی و مطابق با استاندارد ASTM 143 انجام شود. عدد اسلامپ به دست آمده از بتن سبکدانه تقریبا نصف اسلامپ بتن با وزن مخصوص معمولی است. این امر به خاطر این موضوع است که وزن درشت دانه های سبک، کم است و در نتیجه اثر جاذبه را کاهش می دهد. اسلامپ بتن توسط آب آزاد موجود در مخلوط کنترل می شود و مستقل از آب جذب شده در سنگدانه است. اگر آن اسلامپ مشخص در زمان و در نقطه قرار دادن بدست آمده باشد. آب اضافی را به منظور دستیابی به اسلامپ مورد نظر می توان در محل اضافه نمود. در شکل ۸-۳ وسایل آزمایش اسلامپ و نحوه انجام آن به صورت شماتیک آمده است.




***شکل ۸-۳- وسیله آزمایش اسلامپ و نحوه انجام آن***

علاوه بر آزمایش اسلامپ از آزمایش میز جریان نیز برای تعیین کارایی بتن سبکدانه استفاده می شود (شکل ۸-۴). مقدار قطر بازشدگی بین ۴۰۰mm تا ۷۰۰mm مناسب است. در مورد بتنی که باید پمپ شود، این قطر باید حداقل ۶۰۰mm باشد. در ابتدای کار، تشخیص مشخصات اختلاط با قضاوت چشمی ممکن نیست، اما با داشتن تجربه و آموزش، می توان برآورد چشمی از کارپذیری بتن تازه داشت.

***شکل ۸-۴- آزمایش میز جریان***

## ۸-۵- وزن مخصوص

لازم است آزمایش وزن مخصوص بتن سبکدانه در هنگام تولید پیوسته بتن، به طور مرتب تکرار شود. آزمایش های وزن مخصوص بتن سخت شده به روشهای مختلفی انجام می شود :

- وزن مخصوص نمونه های بتنی نگهداری شده در قالب های استاندارد در هنگام انجام آزمایش مقاومت فشاری،
- وزن مخصوص در جای بتن خشک شده در هوا در تعادل با شرایط آب و هوایی پیرامونی،
- وزن مخصوص خشک شده در گرمخانه، دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد

وزن مخصوص بتن تازه خشک شده در اجاق به آسانی قابل تکرار و روشن است. وزن مخصوص بتن خشک شده در هوا با توجه به شرایط آب و هوایی تغییر می کند و ممکن است از محلی به محل دیگر متفاوت باشد. با این وجود، این وزن مخصوص مقداری است که طراح سازه برای محاسبه بار مرده سازه به آن نیاز دارد. وزن مخصوص خشک شده در هوا را می توان بر پایه عیار سیمان، نسبت آب به سیمان، مقدار سبکدانه، منحنی های شناخته شده خمیر سیمان و سبکدانه (در یک رطوبت نسبی ثابت هوای اطراف سازه مورد نظر)، تعیین نمود. تجربه نشان داده است که وزن مخصوص بتن خشک شده در هوا، با توجه به عیار سیمان برابر است با وزن مخصوص خشک شده در گرمخانه بعلاوه ۶۰-۹۰ کیلوگرم بر متر مکعب.

از آنجایی که وزن بتن خشک شده در هوا را نمی توان در زمان حمل اندازه گرفت، وزن مخصوص بتن تازه باید به عنوان یک معیار کنترل استفاده شود. در تعریف و بیان قابلیت پذیرش بتن تازه سبکدانه، وزن مخصوص باید مطابق ASTM C 138 اندازه گیری شود.

علاوه بر وزن مخصوص بتن تازه، پیشنهاد می شود که وزن سنگدانه های سبک (که در گرمخانه خشک شده اند) در واحد مرکزی تولید بتن نیز نمایش داده شوند. استاندارد ASTM C 330 بیان می کند که این سنگدانه ها نباید بیش از ۱۰ درصد با وزن سنگدانه استفاده شده در مخلوط متفاوت باشند. تغییری در حدود ۱۰ درصد وزن مخصوص سنگدانه های سبک می تواند تغییراتی در حدود ۳۲ تا ۴۸ کیلوگرم برمترمکعب در وزن مخصوص بتن تازه بوجود آورد. این مقدار تغییرات برای بتن سبکدانه ای که در سازه به کار

می رود مناسب نیست و نیاز به اصلاح دارد.

### ۸-۶-درصد هوا

همانطور که اشاره شد اضافه کردن حباب ساز به بتن به منظور افزایش قابلیت پمپ پذیری بتن امری اجتناب ناپذیر است. از این رو کنترل درصد هوا در محل کار برای رسیدن به کیفیت مطلوب و پمپ پذیری مناسب ضروری است. علاوه بر بهبود برخی از مشخصه های مقاومتی و پایایی بتن، وجود هوا به کم کردن وزن بتن کمک می کند، همچنین هوای محبوس شده در بتن باعث می شود که مخلوطی به هم پیوسته تر با کارپذیری بیشتر و جداشدگی حداقل بدست آید.

برای تعیین مقدار هوای بتن سبکدانه، استاندارد ASTM C173 روش آزمایشی را پیشنهاد داده است. همانطور که اشاره شد، استاندارد ASTM C231 مقدار هوای داخل منافذ بتن سبکدانه را علاوه بر هوای داخل ملات اندازه گیری می کند. بنابراین برای تعیین درصد هوا در بتن سبکدانه مناسب نیست. تغییرات در مقدار هوای موجود در بتن سبکدانه موجب بروز تغییرات در وزن مخصوص بتن سخت نشده می شود. در صورتیکه درصد هوای بتن بیش از مقداری باشد که در طرح اختلاط تعیین شده، کاهش محسوسی در

مقاومت بتن بوجود می آید. این مقدار کاهش معمولا بیش از ۵ درصد به ازای یک درصد هوای اضافی وارده شده است. بطور ویژه درمخلوط بتن های پرمقاومت وجود حباب های هوا باید به شدت کنترل شود.

## ۸-۷- آزمایش مقاومت فشاری و آزمایش های در جا

آزمایش های متداول بتن معمولی برای بتن های سبکدانه نیز انجام می شود. نمونه های مکعبی و استوانه ای برای انجام آزمایش مقاومت فشاری و کششی در سنین اولیه و ۲۸ روزه مناسب اند.

مقاومت اولیه (برای مثال یک روزه) نسبت به مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن های سبکدانه به طور مشخص از بتن های معمولی بیشتر است. دلیل این پدیده تاثیر مقاومت کمتر سبکدانه ها بر افزایش مقاومت بتن است. رده مقاومتی بتن های سبکدانه بر پایه مقاومت ۲۸ روزه تعیین می شود. با توجه به اینکه بتن سبکدانه در سنین اولیه به مقاومت فشاری کافی می رسد، قالب ها را نسبت به بتن های معمولی می توان زودتر از معمول باز کرد. این موضوع ممکن است تاثیر مثبتی بر هزینه ساخت و ساز داشته باشد.

قابل اعتمادترین روش آزمایش مقاومت فشاری، آزمایش برروی نمونه های مغزه گیری شده از بتن سازه ای ساخته شده است. آزمایش های غیر مخربی هم چون چکش اشمیت، آزمایش ضربه و آزمایش اولتراسونیک نیز وجود دارند، که به تنهایی و یا توام می توانند به کار برده شوند. به دلیل آنکه دانه های سبکدانه به راحتی با یک آزمایش ضربه خرد می شوند، آزمایش هایی چون آزمایش ضربه یا آزمایش چکش اشمیت باید با دقت زیادی انجام شود.

## ۸-۸- شاخص جدا شدگی

شاخص جدا شدگی SI به این صورت تعریف می شود : نسبت وزن مخصوص بتن فوقانی به وزن مخصوص بتن لایه تحتانی.

این شاخص می تواند هم از بتن تازه و هم بتن سخت شده محاسبه شود. این شاخص همواره مساوی وکمتر از یک است. هر چقدر این شاخص کمتر از یک باشد نشانه تمایل بتن به جدا شدگی است.

## ۹- اقتصاد بتن سبکدانه

شن و ماسه با وزن مخصوص معمولی، سنگدانه های طبیعی هستند که در طبیعت فراوان یافت می شوند. با این حال نقطه ضعف اصلی آن ها وزن مخصوص زیاد آن ها می باشد. بتن معمولی ساخته شده با این سنگدانه ها دارای وزن مخصوص تقریبی ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد. در حالی که در صورت استفاده از سنگدانه سنگ رس منبسط شد وزن مخصوص بتن به میزان سی درصد، یعنی به مقدار ۱۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب کاهش می یابد.

قابل درک است که بتن ساخته شده با سنگدانه سبک باید گران تر از بتن ساخته شده با سنگدانه های طبیعی باشد. زیرا سنگدانه های طبیعی بر خلاف سبکدانه ها تحت پردازش و عملیات نسبتا کمی قرار می گیرند. فرض می کنیم غیر از وزن هیچ تفاوت اساسی میان بتن معمولی و بتن سبکدانه وجود نداشته باشد، در این صورت چه دلیل اقتصادی وجود دارد که استفاده از بتن سبک را توجیه می کند؟

در زمان های گذشته، اگرچه تکنولوژی پیشرفته امروزه برای ساخت بتن سبکدانه یکنواخت در دسترس نبود و بتن در کارگاه و با همان تجهیزات اختلاط نسبتا ابتدایی تهیه می گردید، از همان زمان مزایای اقتصادی استفاده از بتن سبکدانه همواره مد نظر قرار داشت.

توجیه عوامل اقتصادی را می توان در تاریخ این صنعت در سال ۱۹۲۲ زمانی که استادیوم ورزشی دبیرستان Westport در کانزاس سیتی میسوری (شکل ۹-۱) به نخستین ساختمان بتن سبک در تاریخ تبدیل شد، یافت. قیمت سنگدانه سنگ رس منبسط در آن زمان ۶ دلار در هر یارد مکعب بود. در همان زمان قیمت شن و ماسه ۲/۵ دلار در هر یارد مکعب بود. اما بدلیل پایین بودن مقدار ظرفیت باربری خاک، استفاده از سنگدانه سنگ رس منبسط شده علی رغم هزینه بیشتر آن موجه بود.

***شکل ۹-۱- دبیرستان Wwestport در کانزاس سیتی میسوری***

یکی دیگر از سازه های ساخته شده با بتن سبک که اقتصادی بودن استفاده از آن را توجیه کرد، در سال ۱۹۲۹ بنا شد. دلیل این توجیه اقتصادی، دو برابر شدن تعداد طبقات از ۱۴ طبقه موجود به ۲۸ طبقه بود. مطالعات مهندسی نشان داده بود که پی های سازه موجود اجازه اضافه کردن ۸ طبقه را با استفاده از بتن معمولی می دهند. اما مطالعات بیشتر در این خصوص نشان داد که با جایگزینی سنگدانه سنگ رس منبسط می توان وزن مرده را کاهش داد و ۱۴طبقه را به ساختمان اضافه کرد.

آمارها در آن زمان نشان داد که استفاده از آجر سبک به جای واحد های سفال سازه ای منجر به کاهش بار مرده به میزان بیش از ۱۳۶۰ تن شده بود. همچنین استفاده از بتن سبک سازه ای نیز باعث کاهش ۲۷۲۰ تن در وزن ساخت و ساز شده بود که در مجموع نسبت به بتن معمولی ۴۰۸۰ تن بار مرده را کاهش داد.

مثال دیگر را می توان در کشور آمریکا جستجو کرد. در شمال کانزاس سیتی میسوری سازه ای با مساحت بیش از ۴۴۵۰ متر مربع، باید بر روی لجن های رودخانه که ظرفیت بار بری کمی داشت، قرار می گرفت. بدین منظور لازم بود تا بارهای مرده به حداقل مقدار خود برسد. این کار از طریق سیستم پانل های tilt up بتنی سبک مسیر شد. ( پانل های tilt up یعنی پانل هایی که ساخت آن افقی بوده ولی بر پا داشتن آن به

صورت قائم است.) ساخت به صورت tilt up یکی از تکنیک های کاهش هزینه اجراست که با استفاده از سنگدانه سبک سنگ رس منبسط شده ممکن می شود. انواع متنوع کاربردهای پیش ساخته چه بتن پیش ساخته شده در کارگاه و چه در محلی دور، باعث اجتناب از هزینه های سنگین عملیات داربست زنی و جابجا کردن مصالح می شود که در اجرای پروژه های بزرگ مرسوم است. سبک وزنی اعضای پیش ساخته باعث می شود که بتوان از تجهیزات ارزانتر( که ظرفیت کافی برای بتن معمولی ندارند) برای جابجا کردن آنها استفاده کرد. به ویژه در مورد پل ها و اسکلت ها و سازه های مشابه که در آن ها شرایط کاری سخت است، پیش ساختگی امکان قرار گرفتن کارگران در معرض شرایط خطرناک را به حداقل می رساند.

یک نمونه شگرف در زمینه کاهش هزینه اجرا در پل سازی با استفاده از بتن سبکدانه، پل معلق چهار خطه Tocoma بود که جایگزین پل دو خطه مشهور به Galloping Gerti که در اوایل دهه ۱۹۴۰ فرو ریخته بود، شد. استفاده از بتن ساخته شده با سنگ رس منبسط شده برای عرشه پل باعث کاهش ۳۶۸ تنی در فولاد، ۳۶۳ تن در کابل های معلق، ۲۰۶۰ تن در وزن عرشه پل و در نتیجه کاهش هزینه پروژه به میزان ۳۲۰،۰۰۰ دلار شد.

پل مرتبط کننده سانفرانسیسکو و اوکلند اقتصادی بودن استفاده از بتن سبک ساخته شده با سنگ رس منبسط شده را نشان داد. وودراف[1]، مهندس طراح این سازه برآورد نمود که استفاده از این مصالح در عرشه بالایی پل باعث کاهش هزینه سازه به میزان ۳ میلیون دلار می شود. پل روگذر Heatley Avenue در شهر ونکوور کانادا که قسمت هایی از آن با بتن سبکدانه ساخته شده است، کاهش ۵۰،۰۰۰ دلاری در هزینه را نشان می دهد.

همانطور که اشاره شد، ۳۰ درصد کاهش بار مرده که معمولا از طریق استفاده از بتن سبک حاصل می شود باعث کاهش در میزان فولاد مصرفی و ابعاد ستون و پی مورد نیاز می شود. یکی از محل های اجرای بتن سبکدانه، توقفگاه های سرپوشیده، آپارتمان ها و ساختمان های اداری و رمپ پارکینگ می باشد. در این سازه ها کاهش در ابعاد ستون همراه با افزایش تعداد دهانه ها، ظرفیت و به طور همزمان بهره وری را

[1] Glenn B. Woodruff

افزایش می دهد. ملاحظات مشابهی در مورد نیروگاهها نیز وجود دارند که نشان می دهد استفاده از بتن سبکدانه تاثیر قابل توجهی برروی هزینه نگه داری و بازده بهره برداری دارد.

مرکز آموزش دانشگاه Utah فهرستی از صرفه جویی های که ممکن است از طریق استفاده از بتن سبک ایجاد شود را تهیه کرده است. با توجه به نتایج این تحقیق، استفاده از بتن سبک، کاهش ۳۰ درصدی در شالوده ستون ها، کاهش ۳۰ درصدی در وزن دال ها و کاهش ۱۲ درصدی در فولاد مسلح را سبب می شود. علاوه بر صرفه جویی در سازه، استفاده از سبک دانه های خاک رس منبسط شده در بتن مزایای اقتصادی دیگری نیز دارد. مقاومت در برابر شعله، عایق بودن در برابر حرارت و هدایت گرمایی، مقاومت در برابر رطوبت، هوای حاوی یون کلر خورنده و حشرات نیز از خصوصیاتی است که بتن سبکدانه دارد و در نتیجه باعث می شود از هزینه های اضافی کاسته شود.

اما تن ها و پوند ها، دلارها و سنت ها در مقایسه با بتن عادی، نه تنها توانایی بیان کردن کل داستان سود اقتصادی این نوع بتن ها را ندارد، بلکه توانایی بیان کاربردها و استفاده های مختلف آن را هم ندارد. و این یک واقعیت است که بتن سبک سازه ای ساختن سازه هایی را که امکان ساختن آن ها با بتن معمولی وجود ندارد را ممکن می سازد.

همانطور که اشاره شد، استفاده از بتن سبک معمولا برای کاهش هزینه های پروژه، بهبود عملکرد و یا ترکیبی از هر دوی این حالات است. به عنوان مثال مجموع هزینه های یک پل با دهانه های کوتاه ممکن است $۵۴۰-۲۱۵۰ \$/m^2$ باشد. اگر میانگین ضخامت عرشه ۲۰۰ میلی متر باشد، یک متر مکعب بتن تقریباً ۵ متر مکعب را می پوشاند. افزایش قیمت ناشی از استفاده از بتن سبک با قیمت $۲۶ \$/m^2$ نسبت به بتن معمولی در حالت عمومی کمتر از یک درصد است. این ۱ درصد افزایش قیمت براحتی توسط یکی از موارد اقتصادی زیر یا مهمتر از آن، توسط افزایش کارآیی سازه جبران می شود.

- کاهش بارهای وارد بر پی، ممکن است در کوچکتر شدن پی ها، کم شدن تعداد ستونها و کاهش مقدار آرماتور موثر باشد.

- کاهش بارهای مرده ممکن است در کوچکتر کردن اعضای تکیه گاهی موثر باشد و در نتیجه به مقدار زیادی در هزینه ها کاهش ایجاد کند.
- کاهش بار مرده در واقع به معنای کاهش نیروی اینرسی زلزله است.
- در تعمیر پل، عرشه جدید می تواند عریض تر باشد یا یک خط جدید برای عبور وسایل نقلیه اضافه شود، بدون اینکه سازه یا پی تغییر کند.
- با توجه به خاصیت زهکشی مناسب، عرشه پل می تواند بدون اینکه به سازه، بار مرده جدیدی اضافه شود، نازکتر شود.
- با پیش تنیدگی می توان اعضای بزرگتر و بلندتری ساخت، بدون اینکه وزن کلی افزایش یابد. در این صورت کاهش در ستونها یا اعضای تیر امکان پذیر است. این امر موجب حمل و نقل آسانتر آنها می شود.

چندین نمونه و سند موجود است که میزان صرفه جویی در هزینه های حمل و نقل به واسطه استفاده از بتن سبک را نشان می دهد. در برخی موارد، هزینه های حمل و نقل توسط رایانه ارزیابی شده تا مقدار وزن مخصوص بهینه برای بتن بدست آید. به عنوان مثال در استفاده های دریایی، افزایش بارهای مجاز روی عرشه پل و کاهش نیروی بالاران[۲] در نتیجه استفاده از بتن سبک موجب حرکت و جابجایی آسانتر بارانداز و نیز حرکت در کانالهای با عمق کمتر می شود (شکل ۹-۲).

[2] uplift

***شکل ۹-۲- کاربرد بتن سبک در حمل و نقل دریایی***

## ۹-۱- هزینه جابجایی

در وضعیتی که هزینه های حمل و نقل ارتباط مستقیمی با وزن تولیدات بتنی دارند، استفاده از بتن سبک می تواند کاملا اقتصادی باشد. دامنه محصولات شامل اعضای بلند سازه ای (تیرها و دیوارها و تیرهای حمال و...) تا اعضای کوچکتر می باشد (شکل ۹-۳).

***شکل ۹-۳- کاهش هزینه حمل و نقل زمینی بتن سبکدانه***

دو تحقیق صورت پذیرفته در باره حمل و نقل بتن توسط کامیون در جدول ۹-۱ نمایش داده شده است. این تحقیقات اثبات می کنند که صرفه جویی صورت گرفته در صورت استفاده از بتن سبکدانه ۷ برابر بیشتر از حالتی است که از سنگدانه های معمولی استفاده شود. میزان صرفه جویی با توجه به جرم و اندازه محصول متفاوت است و این امر برای تولیدات کوچکتر بسیار با اهمیت است.

تعداد کامیون کمتر در شهرهای شلوغ نه تنها از نظر محیط زیست بسیار حائز اهمیت است، بلکه از میزان افراد حقوق بگیر می کاهد. هزینه کمتر زمانی امکان پذیر است که حمل و نقل توسط راه آهن یا کشتی (قایق) صورت گیرد، اما اغلب، جابجایی بتن توسط کامیونهایی که در بزرگراهها تردد می کنند انجام می گیرد. مثال داده شده در جدول ۹-۱ یک آنالیز خاص از هزینه حمل و نقل اعضای پیش تنیده، مربوط به پروژه ای عمرانی در سال ۱۹۹۰ می باشد.

***جدول ۹-۱ – مقایسه هزینه بتن سبکدانه و بتن معمولی***

| پروژه نمونه ۲ | پروژه نمونه ۱ | |
|---|---|---|
| $ ۱۳۳۹ | $ ۱۱۰۰ | هزینه حمل و نقل هرکامیون برای یک نوبت |
| تعداد کامیون مورد نیاز | | |
| ۸۷ | ۴۳۱ | بتن معمولی |
| ۶۶ | ۲۸۷ | بتن سبکدانه |
| ۲۱ | ۱۴۴ | کاهش در تعداد کامیون |
| صرفه جویی در حمل و نقل | | |
| ۲۱ × | ×۱۴۴ | کاهش در تعداد کامیون ها |
| ۲۸۱۱۹ | ۱۵۸۴۰۰ | صرفه جویی (دلار) |
| سود خالص (مستقیم) | | |
| ۲۸۱۱۹ | ۱۵۸۴۰۰ | صرفه جویی در حمل و نقل |
| ۳۷۹۹ | ۱۷۲۴۵ | مبلغ اضافی برای بتن سبک |
| ۲۴۳۲۰ | ۱۴۱۱۵۵ | صرفه جویی در هزینه حمل و نقل با استفاده از بتن سبک |

با توجه به جدول ۹-۱ می توان نتیجه گرفت که در صورت استفاده از بتن سبکدانه، می توان هزینه حمل و نقل را به میزان قابل توجهی کاهش داد. این صرفه جویی در مواردی که هزینه حمل و نقل بتن بخشی قابل توجهی از هزینه ها را شامل شود می تواند بسیار مفید باشد. قابل ذکر است که مثال بالا تنها نمونه ای از صرفه جویی صورت گرفته در هزینه حمل و نقل در صورت استفاده از بتن سبک می باشد. مواردی مشابهی زیادی نیز گزارش شده است که صرفه جویی هزینه حمل و نقل در صورت استفاده از بتن سبکدانه را تایید می کند.

## ۱۰- خلاصه بررسی ادبیات فنی

مصالح سبک بتن سبک، مصالح نوپایی در عرصه مهندسی عمران به حساب نمی آیند. بتن سبک از اوایل دوران امپراطور روم شناخته شده بود. بخشی از استادیوم و نیز زیارتگاهی در روم از مصالحی ساخته شده اند که می توان از آنها به عنوان بتن سبک نام برد در این سازه ها ذرات خرد شده آتشفشانی ،پومیس و آجر شکسته استفاده شده است. در آمریکا حدود ۱۰۰ ناو جنگی در جنگ جهانی دوم از بتن سبک با ظرفیت های ۳۰۰۰ تا ۱۴۰۰۰۰ تن ساخته شدند و تجربه موفق ساخت آنها در آن زمان منجر به استفاده گسترده از بتن سبک در ساختمان سازی و پل سازی گردید.

وزن مخصوص کمتر و نیز عایق حرارتی بودن بیشتر بتن سبک از ویژگی های مهم آن محسوب می شودکه بتن سبک را از بتن معمولی متمایز ساخته است. این در حالی است که این ویژگی ها تنها خصوصیاتی که موجب توجه فراگیر به این مصالح ساختمانی شده اند، نمی باشد.

تفاوت مهم میان بتن سبکدانه و بتن معمولی در نوع سنگدانه ها است. سنگدانه های طبیعی معدنی در بتن معمولی با سنگدانه های متخلخل با منشاء و اندازه متفاوت جایگزین می شوند. با این جایگزینی، بسیاری از ویژگی های بتن تغییر می کند، که این تغییرات مثبت دلیل استفاده گسترده از این مصالح است.

برای تولید و استفاده از بتن سبکدانه اطلاعات پایه ای در مورد خواص سبکدانه و استفاده از روشهای آزمایش مناسب برای سبکدانه و بتن مهم هستند. همچنین برای انتخاب نسبت های اختلاط بهینه برای یک هدف معین، شناخت رفتار بتن تازه و سخت شده، لازم است.

از سوی دیگر پمپ کردن بتن سبکدانه نیازمند بکار گیری تمهیدات خاصی است که باید مد نظر قرار گیرد. در حالت کلی توصیه می شود که در صورتیکه الزامی به پمپ کردن بتن سبکدانه نباشد، از روش های دیگر بتن ریزی استفاده شود.

# بخش دوم

# مطالعات آزمایشگاهی

## ۱- حدود خدمات

در بخش دوم گزارش حاضر راهنمای کاربردی بتن سبک سازه ای لیکا و طرح اختلاط بهینه برای کاربرد در کارگاه بررسی می گردد. دراین بخش برای ساخت بتن سبک سازه ای، از مصالح ارسالی شرکت لیکا استفاده شده و نتایج ارایه شده در این گزارش و طرح اختلاط بهینه شده پیشنهادی در محدوده مصالح ارسالی از سوی شرکت لیکا معتبر می باشد.

این گزارش شامل انجام آزمایش های لازم برای ارائه طرح های اختلاط بهینه بتن سبکدانه برای استفاده در کارگاه است به نحوی که از دیدگاه کارپذیری و مقاومتی طرح اختلاط های ارایه شده قابل استفاده در کارگاه های ساختمانی باشد. به صورت مشخص دو رده بتن با مقاومت فشاری هدف ۲۵ و ۳۵ مگاپاسکال با استفاده از دو نوع مصالح ارسالی کارفرما (لیکا ۵۰۰ و ۷۰۰ ) تعریف گردید. علاوه بر آن پژوهشگر موظف است که مشخصات مکانیکی بتن سخت شده را برای برای دو رده بتن بهینه سازی شده تعیین نماید. بنابراین، این گزارش حاوی نتایج آزمایشگاهی و تفسیر آنها برای دستیابی به موارد ذیل است:

۱- تعیین طرح اختلاط بهینه برای بتن ساخته شده با سبکدانه لیکا ۵۰۰، با مقاومت فشاری میانگین ۲۵ مگاپاسکال و حداکثر وزن مخصوص ۱۸۵۰ کیلو گرم در هر متر مکعب.

۲- تعیین طرح اختلاط بهینه برای بتن ساخته شده با سبکدانه لیکا ۷۰۰، با مقاومت فشاری میانگین ۳۵-۴۰ مگاپاسکال و حداکثر وزن مخصوص ۱۹۵۰ کیلو گرم در هر متر مکعب.

۳- تعیین مشخصات مکانیکی برای دو رده بتن بهینه سازی شده

به این منظور آزمایش های لازم برای تعیین خواص بتن سبکدانه در حالت های تازه و سخت شده انجام گردید. در این تحقیق تلاش بر این بوده تا آزمایش ها با توجه به شرایط موجود در اغلب کارگاه های کشور طراحی شوند. این گزارش علاوه بر ارائه نتایج به دست آمده از آزمایش ها به مرور اجمالی در مورد تحقیقات قبلی انجام شده درباره بتن سبکدانه ساخته شده با سنگدانه لیکا می پردازد.

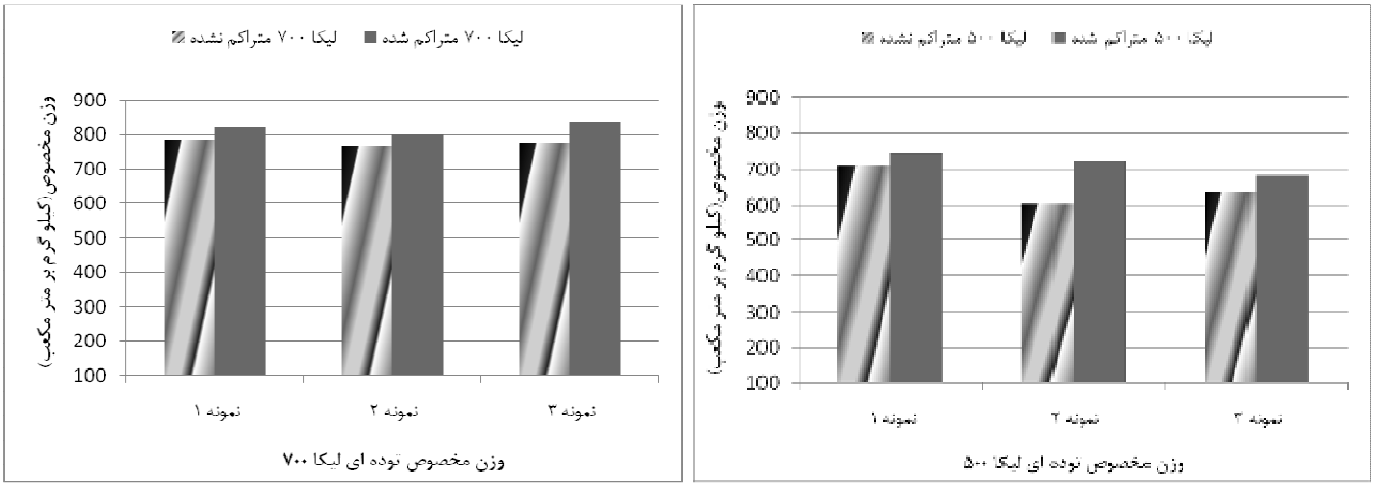
## ۲- آزمایش های سبکدانه

آزمایش های ارائه شده در این گزارش در دو قسمت کلی بر روی سبکدانه ها و بر روی بتن سبک انجام گرفته است. آزمایشهای سبکدانه در فصل دوم و آزمایشهای بتن سبک در فصل سوم ارایه شده اند. در این گزارش منظور از لیکای سازه ای ۵۰۰ و لیکای سازه ای ۷۰۰، لیکای با وزن مخصوص توده ای تقریبی ۵۰۰ و ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می باشد.

### ۲- ۱-آزمایش های انجام گرفته برروی سبکدانه

به منظور بررسی خواص مکانیکی سبکدانه ها، آزمایش های متفاوتی شامل تعیین وزن مخصوص، دانه بندی، سایش لس آنجلس و جذب آب انجام پذیرفته و نتایج این آزمایش ها برای تعیین مشخصات سبکدانه و مقایسه خواص آنها با یکدیگر مورد استفاده قرار گرفته است.

**۲-۱-۱- وزن مخصوص:** تعیین وزن مخصوص توده ای لیکا بر اساس استاندارد ASTM C29 انجام گرفته است. نتایج وزن مخصوص توده ای رده های مختلف سبکدانه های لیکا در دوحالت متراکم نشده[1] و میله خورده متراکم شده[2] در شکل ۲-۱ نشان داده شده است.




***الف- لیکا ۵۰۰*** ***ب- لیکا ۷۰۰***

***شکل ۲-۱: وزن مخصوص توده ای انواع لیکا (کیلوگرم بر متر مکعب)***

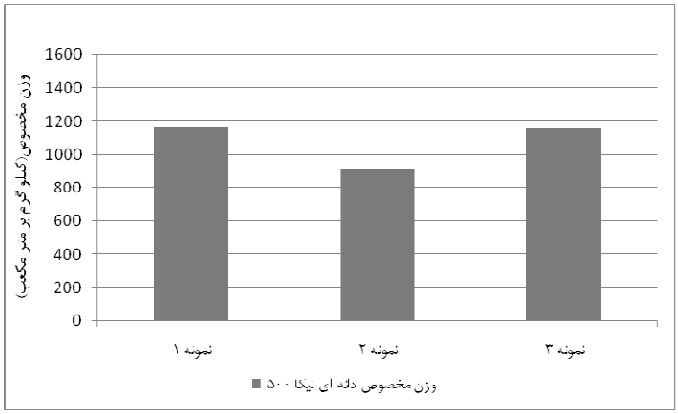
[1] loose density
[2] rodded density

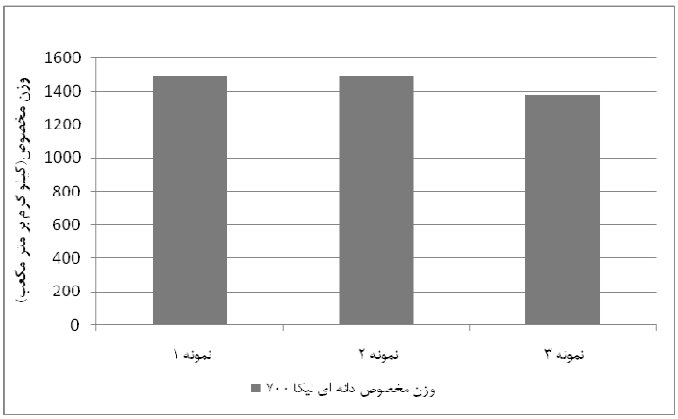
با توجه به نتایج بدست آمده وزن مخصوص لیکای سازه ای نوع اول ۶۰۰ تا ۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد. همانطور که در نمودار شکل شماره( ۲-۱- ب) نشان داده شده است، وزن مخصوص لیکای سازه ای نوع دوم(لیکا ۷۰۰) مورد بررسی، در حدود ۸۰۰ تا ۸۳۰ کیلوگرم برمترمکعب می باشد از این رو علیرغم اینکه نام این سبکدانه، لیکای سازه ای۷۰۰ انتخاب گردیده است اما نسبت به وزن اسمی خود از وزن بیشتری برخوردار است. با توجه به وزن مخصوص های اندازه گیری شده در این فاز از پروژه مشاهده می گردد که وزن مخصوص سبکدانه لیکای سازه ای۷۰۰ حدودا ۱۴ درصد از وزن مخصوص لیکای سازه ای ۵۰۰ بیشتر می باشد. خلاصه نتایج آزمایش وزن مخصوص توده ای سنگدانه ها در جدول ۲-۱ نشان داده شده است.

***جدول ۲-۱: خلاصه نتایج آزمایش وزن مخصوص توده ای سبکدانه ها***

| نوع سبکدانه لیکا | | وزن مخصوص متراکم نشده Kg/m$^3$ | وزن مخصوص متراکم شده Kg/m$^3$ | میانگین وزن مخصوص متراکم نشده Kg/m$^3$ | میانگین وزن مخصوص متراکم شده Kg/m$^3$ |
|---|---|---|---|---|---|
| ۷۰۰ | نمونه یک | ۷۸۵ | ۸۲۱ | ۷۷۶ | ۸۱۹ |
| | نمونه دو | ۷۶۶ | ۸۰۰ | | |
| | نمونه سه | ۷۷۷ | ۸۳۶ | | |
| ۵۰۰ | نمونه یک | ۷۱۲ | ۷۴۵ | ۶۵۱ | ۷۱۸ |
| | نمونه دو | ۶۰۵ | ۷۲۶ | | |
| | نمونه سه | ۶۳۶ | ۶۸۲ | | |

در ادامه، آزمایش تعیین وزن مخصوص دانه ای لیکا با توجه به قانون ارشمیدس و بر اساس روش توصیه شده در جزوه روش های استاندارد آزمایش های مربوط به دانه لیکا که بوسیله شرکت لیکا تهیه شده است؛ اندازه گیری شد. وزن سبکدانه در این آزمایش برای لیکا ۷۰۰ برابر با ۵۰۰ گرم و برای لیکا ۵۰۰ برابر با ۱۵۰ گرم می باشد. استوانه مدرج در حالتی که با لیکا ۷۰۰ پر شده باشد، با ۵۰۰ میلی لیتر و در حالتی که با لیکا ۵۰۰ پر شده باشد، با ۴۰۰ میلی لیتر آب باید پر شود. نتایج این آزمایش در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.



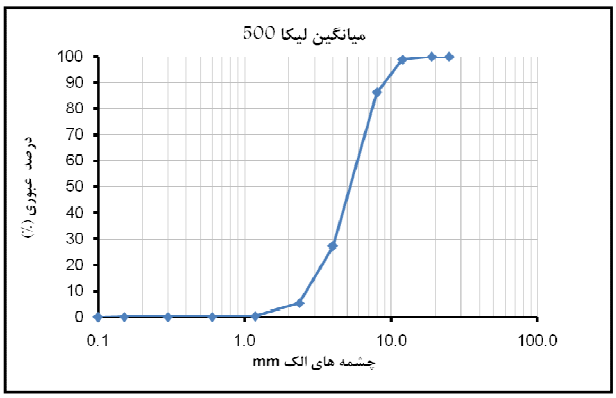



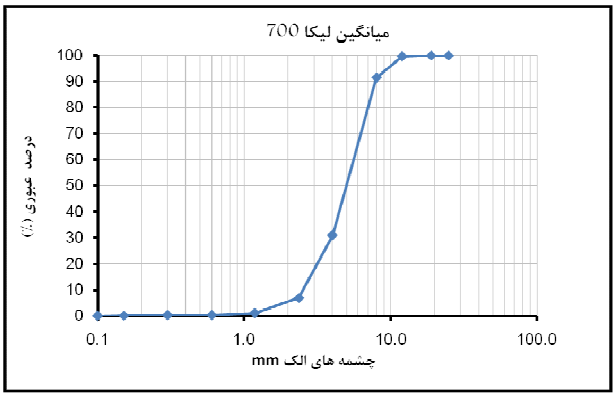

***الف- لیکا ۵۰۰*** ***ب- لیکا ۷۰۰***

***شکل ۲-۲: وزن مخصوص دانه ای انواع لیکا (کیلوگرم بر متر مکعب)***

براساس این نتایج وزن مخصوص دانه ای لیکا ۵۰۰ و ۷۰۰ بترتیب بین (۹۰۰ تا ۱۱۶۰) و (۱۳۸۰ تا ۱۴۹۰) کیلوگرم در هر متر مکعب متغیر است.

**۲-۱-۲- دانه بندی:** آزمایش دانه بندی لیکا طبق استاندارد شماره ASTMC 330 و بصورت مکانیکی انجام گرفته است. نمودار دانه بندی لیکای سازه ای ۵۰۰ و لیکای سازه ای ۷۰۰ تولید شده در کارخانه در شکل شماره ۲-۳ ارائه شده است.



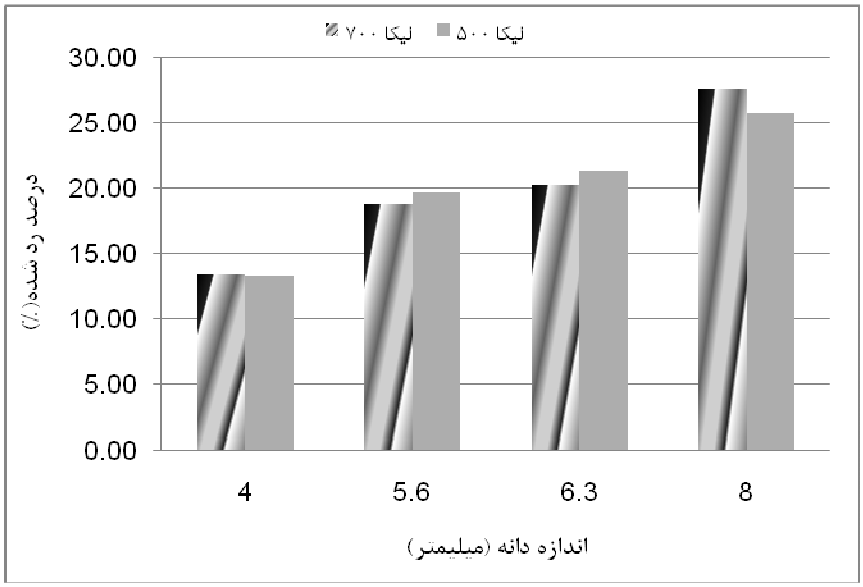

***الف- لیکا سازه ای ۵۰۰*** ***ب- لیکا سازه ای ۷۰۰***

***شکل ۲-۳: نمودار دانه بندی لیکا سازه ای***

این آزمایش صرفا برای اطلاع از دانه بندی سبکدانه ها انجام گرفت و در تعیین طرح اختلاط ها از مصالح ارسال شده بدون تغییر در دانه بندی استفاده شده است. به این ترتیب شرایط کارگاهی که در آن مصالح بدون اصلاح دانه بندی مورد استفاده قرار می گیرند لحاظ شده است.

**۲-۱-۳- تعیین مقاومت نسبی سبکدانه ها با استفاده از دستگاه سایش لس آنجلس:** از دستگاهی که در آزمایش سایش لس آنجلس مورد استفاده قرار می گیرد می توان به منظور اندازه گیری غیر مستقیم مقاومت سبکدانه های لیکا استفاده نمود. نتایج به دست آمده از این آزمایش اگر چه نشان دهند مقاومت مطلق سبکدانه ها نیست اما می تواند به عنوان معیاری نسبی برای مقایسه مقاومت سبکدانه ها با یکدیگر باشد.

در آزمایش متداول سایش لس آنجلس ذکر شده در استاندارد ASTM C131، پنج کیلوگرم سنگدانه به همراه ۱۲ گلوله فلزی در داخل یک استوانه دوار ۵۰۰ دور چرخانده می شود. بدلیل آنکه سبکدانه ها از مقاومت سایشی به مراتب کمتری نسبت به سنگدانه های طبیعی برخوردارند. در آزمایش تعیین مقاومت نسبی سبکدانه ها تعداد از ۱۲ گلوله و ۵۰ دور گردش استفاده شده است. علاوه بر آن از آنجا که چگالی سبکدانه های سازه ای با هم تفاوت محسوسی دارند، بجای آزمایش برروی جرم ثابتی از سبکدانه ها آزمایش برروی حجم ثابتی از مصالح (۱۰ لیتر) انجام گردیده است. نتایج آزمایش مقاومت نسبی هر دو نوع لیکای سازه ای۵۰۰ و۷۰۰ در شکل ۲-۴ آورده شده است.




***شکل ۲-۴ : نتایج آزمایش مقاومت نسبی لیکا با استفاده از دستگاه سایش لس آنجلس***

نتایج رسم شده در نمودار فوق نشان می دهد میزان خرد شدگی لیکای ۵۰۰ و لیکای ۷۰۰ برای اندازه های مختلف الک تفاوت زیادی با یکدیگر ندارند. در آزمایشهای انجام شده در این فاز تفاوت چندانی بین مقاومت نسبی دو نوع سبکدانه لیکا ۵۰۰ و لیکا ۷۰۰ مشاهده نگردید.

نکته قابل توجه در این میان وابستگی زیاد مقاومت سبکدانه به اندازه دانه ها است. بر این مبنا می توان نتیجه گیری نمود که با افزایش اندازه حداکثر دانه مقاومت بتن سبکدانه کاهش می یابد. قابل ذکر است که اعداد به دست آمده از این آزمایش به تنهایی نمی تواند معیاری برای اندازه گیری مقاومت سبکدانه باشد و تنها می تواند معیار مناسبی برای مقایسه مقاومت آنها باشد.

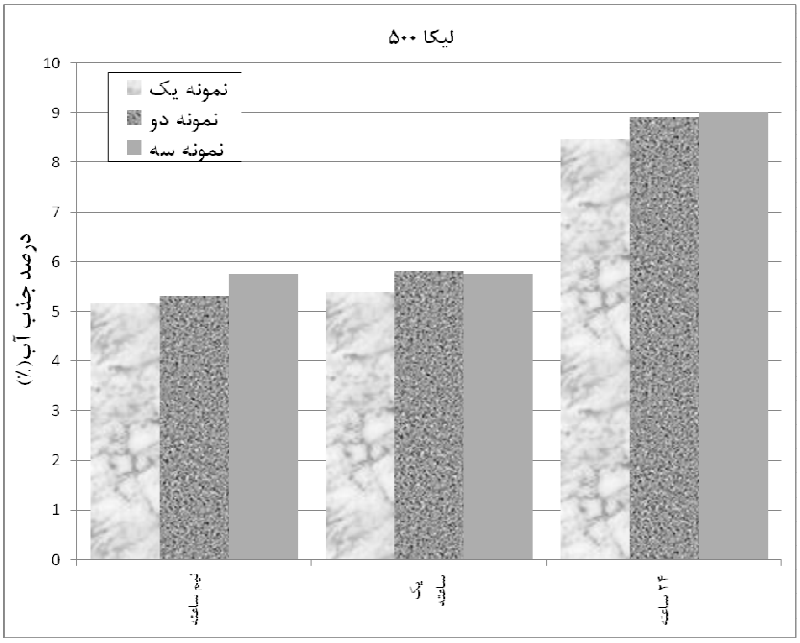
بر مبنای نتایج به دست آمده انتظار می رود که مقاومت بتن ساخته شده از لیکای ۷۰۰ تا حدودی بیش از بتن ساخته شده با لیکای ۵۰۰ باشد. تاثیر افزایش مقاومت سبکدانه ها در مقاومت بتن ساخته شده با آن در بخش های ۵ و ۶ بررسی می گردد.

**۲-۱-۴- جذب آب** : تعیین جذب آب لیکا بر اساس استاندارد ASTM C127 انجام گرفته است. با توجه به اینکه جذب آب سبکدانه به شدت به زمان وابسته است، جذب آب نیم، یک و ۲۴ ساعته سبکدانه های مختلف لیکا اندازه گیری و میانگین نتایج بعنوان جذب آب سبکدانه در گرفته شده است. برخلاف بتن معمولی که میزان جذب آب سنگدانه ها در ۲۴ ساعت، ملاک شرایط اشباع با سطح خشک (SSD) قرار می گیرد در بتن سبکدانه برای محاسبه میزان آب موثر بتن سبکدانه معمولا جذب آب نیم تا یک ساعته، ملاک شرایط محاسبه رطوبت اشباع با سطح خشک[3] می باشد. دلیل این امر آن است که معمولا آب آزاد موجود در بتن تازه پس از گذشت نیم تا یک ساعت تا حدی با سیمان واکنش داده و مقدار نفوذ آن به داخل سبکدانه به مقدار قابل توجهی کاهش می یابد.

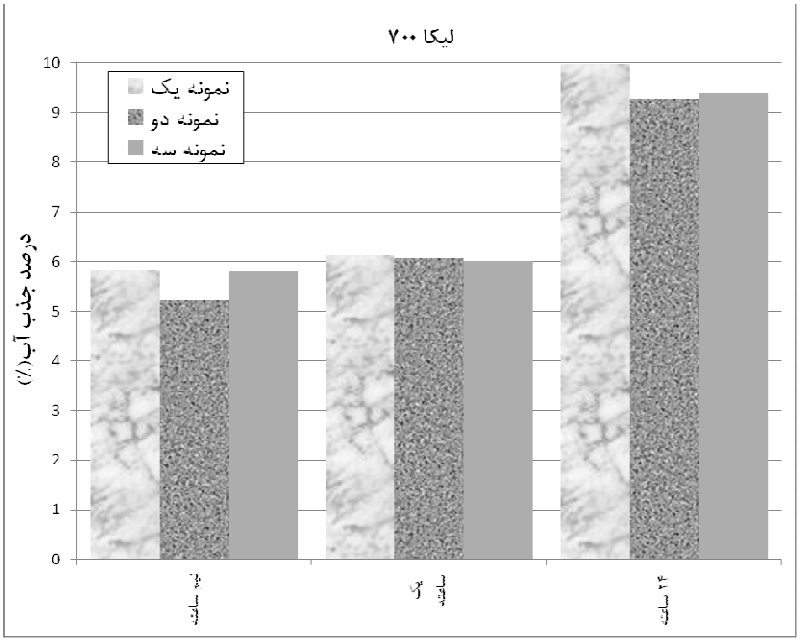
جذب آب کوتاه مدت نیم و یک ساعته نشان دهنده میزان تخلخل هایی است که امکان اشباع سریع آنها توسط آب وجود دارد. ویژگی این تخلخلها به هم پیوسته بودن آنها توسط مجراهای نسبتا باز است. از سوی دیگر جذب آب

[3] Saturated Surface Dry (SSD)

۲۴ ساعته سبکدانه عمدتا برای تعیین میزان کلی تخلخل ظاهری یا به عبارت بهتر تعیین میزان تخلخلهای به هم پیوسته آن به کار می رود. این تخلخلها ممکن است توسط مجراهای باز یا مجاری موئینه به یکدیگر متصل شده باشند به نحوی که در مدت زمان ۲۴ ساعت، آب فرصت کافی برای نفوذ به داخل آنها را داشته باشد. با این وجود جذب آب ۲۴ ساعته نمی تواند به عنوان ملاک اندازه گیری کل تخلخل موجود در سبکدانه مورد استفاده قرار گیرد. برای تعیین تخلخل کلی سبکدانه ها که شامل تخلخلهای به هم پیوسته و تخلخلهای ناپیوسته است انجام آزمایش جذب آب تحت فشار ضروری است. نتایج جذب آب سبکدانه های مختلف در زمانهای نیم، یک و ۲۴ ساعته در شکل ۲-۵ نشان داده شده است.




***الف- لیکای سازه ای ۵۰۰***




***ب- لیکای سازه ای ۷۰۰***

***شکل ۲-۵: جذب آب در سه دوره زمانی مشخص***

بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل (۲-۵-الف) جذب آب نیم و یک ساعته لیکا ۵۰۰ در حدود ۵/۵٪ و جذب آب ۲۴ ساعته در حدود ۸/۹٪ می باشد. از سوی دیگر مطابق شکل (۲-۵-ب) مشاهده می شود که جذب آب نیم و یک ساعته لیکا ۷۰۰ در حدود ۵/۶ تا ۶ درصد و جذب آب ۲۴ ساعته در حدود ۹/۵ ٪ درصد است.

# ۳- روش آزمایش

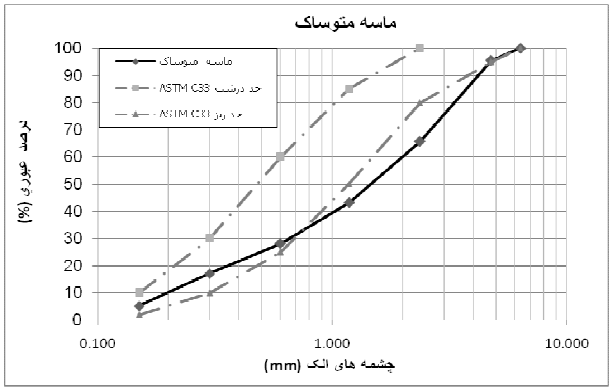
پس از انجام آزمایش های اولیه برروی سبکدانه، و برای دستیابی به طرح اختلاط بهینه طرح اختلاط های مختلفی ساخته شد. مشخصات مصالح مورد استفاده و همچنین روش ساخت، قالبگیری و عمل آوری، همچنین آزمایشهای انجام شده بر روی نمونه های بتن تازه و سخت شده در این فصل بررسی شده است.

## ۳-۱- مشخصات مصالح مورد استفاده در ساخت نمونه ها

نوع سیمان مصرفی در این طرح از نوع ۱-۴۲۵ تهران می باشد. عیار سیمان به کار رفته در طرح ها با توجه به مشخصات مکانیکی مورد نظر برای هر رده از سبکدانه با یکدیگر متفاوت می باشند، همچنین در ساخت نمونه ها از آب شرب تهران استفاده گردیده است.

برای افزایش کارپذیری و کاهش نسبت آب به سیمان در اغلب طرح ها از روان کننده ای با نام تجاری Pozzolith LD10 که یک افزودنی بصورت مایع بر پایه لیگنو سولفونات، می باشد و باعث کاهش مصرف آب و در نتیجه کاهش نسبت آب به سیمان می گردد، استفاده شده است. در برخی از طرح های ساخته شده با لیکا ۷۰۰ که از سایر طرح ها متمایز شده از فوق روان کننده نسل سوم پایه پلی کربکسیلات با نام تجاری Glenium 110P استفاده گردیده است. این افزودنی ها بر اساس میزان وزن سیمان به طرح اضافه می گردد.

سنگدانه طبیعی مورد استفاده در طرح اختلاط ها از نوع ماسه گردگوشه است که از شرکت متوساک تهیه شده است. جذب آب این سنگدانه ۲/۸۶ درصد و مدول نرمی آن برابر ۳/۴۵ می باشد.




***شکل ۳-۱- نمودار دانه بندی ماسه طبیعی شرکت متوساک***

به منظور دستیابی به طرح اختلاط بهینه که مشخصات مکانیکی مورد نظر و وزن مخصوص مناسب را تامین کند، مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان و نسبت سبکدانه به سنگدانه طبیعی در طرحهای بتنی تغییر داده شده است.

### ۳-۲- روش ساخت، قالب گیری و عمل آوری

مراحل ساخت بتن شامل توزین مصالح و مخلوط کردن آنها می باشد. به منظور کاهش تاثیر منفی جذب آب موثر در مخلوط بتن توسط سبکدانه ها و جلوگیری از کاهش کارایی سریع بتن سبک تازه، قبل از مخلوط کردن مصالح، مقدار مشخصی آب (معادل اختلاف جذب آب نیم ساعته و درصد رطوبت سبکدانه به هنگام ساخت طرح اختلاط ضربدر وزن سبکدانه) به لیکا اضافه می شود. این آب در محاسبه نسبت آب به سیمان موثر لحاظ شده است. پیمانه گیری و توزین سبکدانه، همچنین عملیات مخلوط کردن، قالب گیری، تراکم و عمل آوری همانند بتن معمولی انجام گرفته است.

به منظور بدست آوردن مقاومت فشاری بتن سبک از قالب های مکعبی به ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی متر استفاده شده است. از قالب های ۳۰×۱۵ سانتی متری استوانه ای برای تعیین مقاومت کششی نمونه ها در سن ۲۸ روزه استفاده شده است. در طرح های نهایی از قالبهای استوانه ای ۳۰×۱۵ برای آزمایش تنش-کرنش فشاری، از قالب های ۱۰×۱۰×۱۰سانتی متر برای تعیین میزان جذب آب بتن و مقاومت الکتریکی و از قالب های ۱۰×۱۰×۵۰ سانتی متر برای تعیین مقاومت خمشی استفاده شده است.

### ۳-۳- آزمایشهای انجام شده بر روی بتن سخت شده

#### الف - مقاومت فشاری:

آزمایش مقاومت فشاری بتن مطابق استاندارد ASTM C39 اما بر روی آزمونه های مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی متر انجام گرفته است. این آزمایش برروی بتن سخت شده در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزه انجام گرفته است. دستگاه آزمایش تعیین مقاومت فشاری با ظرفیت ۲۰۰ تن که برای انجام این آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است در شکل شماره ۳-۲ نشان داده شده است.

***شکل ۳-۲- دستگاه آزمایش تعیین مقاومت فشاری***

**ب- مقاومت کششی:**

آزمایش مقاومت کششی برزیلی بتن مطابق استاندارد ASTM C496-71 و بر روی آزمونه های استوانه ۱۵×۳۰ سانتی متر و در سن ۲۸ روزه انجام گرفته است. نتایج مقاومت کششی معمولا مرتبط با نتایج مقاومت فشاری است به گونه ای که با افزایش مقاومت فشاری بتن، مقاومت کششی آن نیز افزایش می یابد. نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری بتن های معمولی در حدود ۱۰ درصد است. این نسبت در بتنهای سبک و پرمقاومت ممکن است متفاوت باشد. دستگاه آزمایش تعیین مقاومت کششی با ظرفیت ۵۰۰ تن در شکل شماره ۳-۳ آورده شده است.

***شکل ۳-۳- دستگاه آزمایش تعیین مقاومت کششی***

**ج- مقاومت خمشی:**

آزمایش تعیین مقاومت خمشی بتن مطابق استاندارد ASTM C 293 برروی آزمونه های منشوری به ابعاد ۱۰×۱۰×۵۰ سانتیمتری برای نمونه های ۲۸ روزه انجام گرفته است. دستگاه آزمایش تعیین مقاومت خمشی در شکل شماره ۳-۴ نشان داده شده است.

***شکل ۳-۴- دستگاه آزمایش تعیین مقاومت خمشی***

**د- وزن مخصوص بتن سخت شده :**

وزن مخصوص بتن سخت شده که پس از ۲۸ روز از ظروف عمل آوری خارج شده و در معرض هوا قرار گرفته و خشک شده اند قبل از انجام آزمایش های مکانیکی اندازه گیری شده است. این آزمایش مطابق استاندارد ASTM C 642 بر روی بتن سخت شده انجام گرفته است.

**ه- جذب آب بتن سخت شده:**

آزمایش تعیین جذب آب بتن مطابق استاندارد ASTM C 642 بر روی آزمونه های ۲۸ روزه و بر روی مغزه با قطر ۷/۵ سانتیمتر گرفته شده از نمونه های بتن سبکدانه انجام گرفته است. . نمونه مغزه گرفته شده برای آزمایش جذب آب در شکل ۳-۵ دیده می شود.

***شکل ۳-۵- نمونه مغزه گرفته شده برای آزمایش جذب آب و مقاومت الکتریکی***

### ز- آزمایش تنش-کرنش فشاری و تعیین مدول الاستیسته استاتیکی:

آزمایش تعیین تنش- کرنش فشاری مطابق استاندارد ASTM C 469 بر روی آزمونه های استوانه ای ۱۵×۳۰ سانتی متر بر روی بتن سخت شده در سن ۲۸روزه انجام گرفته است. پیش از انجام آزمایش سطوح فوقانی و تحتانی نمونه ها با گوگرد کلاهک گذاری شده است. از نتایج به دست آمده از این آزمایش برای تعیین مدول الاستیسیته استاتیکی بتن سخت شده استفاده شده است.

# ۴ – آزمایشهای مقدماتی برای تعیین حدود مقادیر بهینه

برای تعیین طرح اختلاط بهینه با سبکدانه لیکا۵۰۰ و۷۰۰ به نحوی که مقاومت فشاری بتن سبک ساخته شده با آن ملزومات مقاومتی و وزن مخصوص ذکر شده در فصل اول را دارا باشند آزمایش های مختلفی انجام شده است که می توان آنها را به سه دسته کلی تقسیم کرد.

*دسته اول:* آزمایش های مقدماتی که برای شناخت مشخصات کلی بتن سبکدانه ساخته شده با لیکای سازه ای انجام شده است.

*دسته دوم:* آزمایش های پارامتری می باشند که در آن برخی از پارامترهای اصلی که در مقاومت و وزن مخصوص بتن سبک موثر می باشند تغییر داده شده است در حالیکه بقیه پارامترها ثابت نگه داشته شده اند. به این ترتیب حدود مقدار بهینه هر کدام از این پارامترها تعیین شده است.

*دسته سوم:* آزمایش های نهایی که در آن طرح اختلاط ها بر مبنای نتایج به دست آمده از دسته اول آزمایش ها و با پارامترهای بهینه شده در دسته دوم نسبت بندی می شوند تا طرح اختلاط بهینه برای رسیدن به هدف مورد نظر تعیین گردد.

در این فصل شرح مختصری از آزمایش های دسته اول و شرح کامل آزمایش های پارامتری مورد بررسی قرار گرفته اند. آزمایشهای نهایی در فصل ششم ذکر شده اند.

## ۴-۱- دسته اول: آزمایش های مقدماتی

برای شناخت اولیه مشخصات بتن سبک ساخته شده با سبکدانه های لیکا سازه ای حدود ۱۵ طرح اختلاط ساخته شد که خلاصه نتایج به دست آمده از آن در ادامه آمده است.

- مقاومت بتن سبک تابعی از نسبت آب به سیمان، عیار سیمان، روانی بتن تازه و چگالی بتن است. به نحوی که با افزایش چگالی بتن و عیار سیمان مقاومت بتن افزایش می یابد. از سوی دیگر با افزایش روانی بتن و نسبت آب به سیمان مقاومت بتن کاهش می یابد.

- وزن مخصوص اکثر بتن های ساخته شده کمتر از حد بیشینه تعیین شده ابتدا می باشد. بنابراین این قید در تعیین طرح اختلاط بهینه چندان بحرانی نیست.
- برای تامین روانی بتن تازه برای رده مقاومتی مورد نظر استفاده از مواد روان کننده ضروری است. با این وجود کاربرد مواد افزودنی فوق روان کننده بر پایه پلی کربکسیلاتی ضرورتی ندارد و می توان با استفاده از مواد روان کننده بر پایه لیگنو سولفونات کارایی مورد نظر را تامین نمود.

### ۴-۲- دسته دوم: آزمایش های پارامتری

بر مبنای مشاهدات به دست آمده از دسته اول آزمایش ها، پارامترهای عیار سیمان، نسبت آب به سیمان، مقدار سبکدانه و نوع سبکدانه پارامترهای اساسی در تعیین طرح اختلاط بهینه بتن سبک می باشند. منظور از نوع سبکدانه نمونه های مختلف از یک رده سبکدانه لیکا (بطور مثال لیکا ۵۰۰ یا ۷۰۰) می باشد.

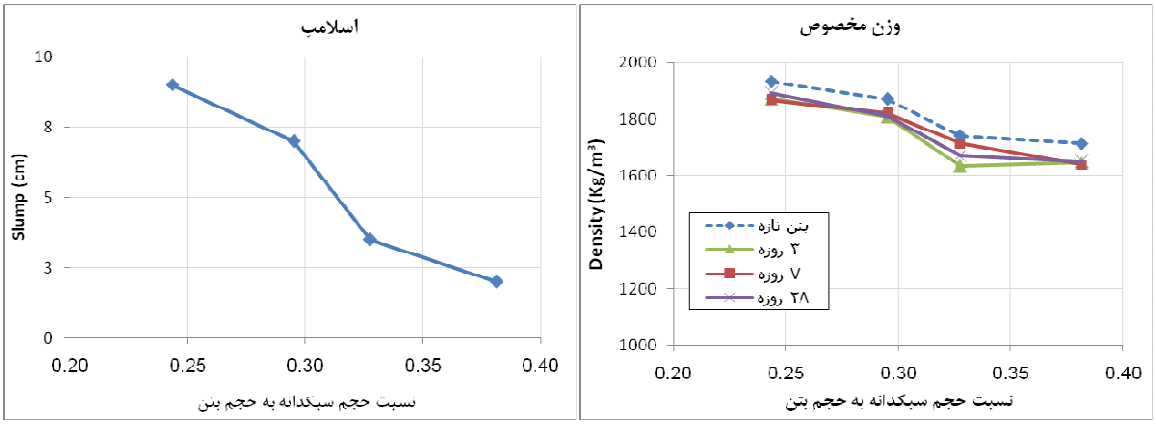
#### ۴-۲-۱- بررسی پارامتر مقدار سبکدانه

مقدار سبکدانه استفاده شده در واحد حجم بتن یکی از پارامترهای مهمی است که بر کارپذیری بتن تازه و همچنین مشخصات مکانیکی بتن سخت شده تاثیر می گذارد. برای بررسی این پارامتر مقدار سبکدانه در واحد حجم بتن از ۰/۲۴ متر مکعب تا ۰/۳۸ متر مکعب تغییر داده شد. برای آنکه مقایسه نتایج با یکدیگر امکان پذیر باشد عیار سیمان در همه طرح ها ثابت و در محدوده ۴۲۰ تا ۴۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت آب به سیمان نیز برابر ۰/۴۳ انتخاب شده است. بنابراین نسبت خمیر سیمان به کل سنگدانه در مخلوط ثابت می باشد و صرفا پارامتر مقدار سبکدانه و نسبت سبکدانه به سنگدانه طبیعی تغییر کرده است. جزئیات طرح های ساخته شده و نتایج به دست آمده از آزمایش ها در جدول ۴-۱ نشان داده شده است.

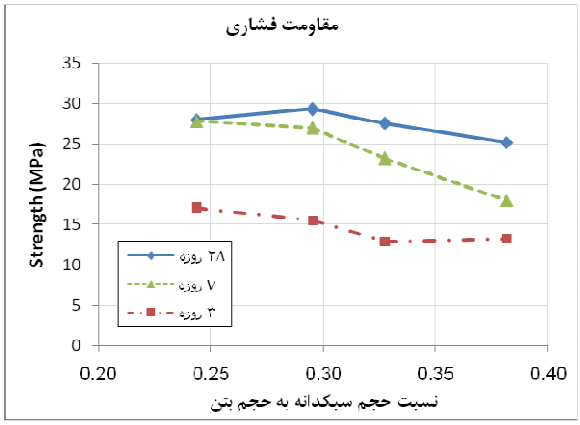
***جدول ۴-۱- مشخصات و نتایج طرح اختلاط های بررسی پارامتر مقدار سبکدانه***

| طرح اختلاط | حجم لیکا ($m^3/m^3$) | لیکا ($kg/m^3$) | عیار سیمان ($kg/m^3$) | ماسه طبیعی (kg) | W/C | افزودنی (٪) | اسلامپ (cm) | وزن مخصوص بتن تازه ($kg/m^3$) | وزن مخصوص بتن سخت شده (SSD) ($kg/m^3$) | مقاومت فشاری (MPa) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | ۳روزه | ۷روزه | ۲۸روزه |
| A1 | ۰/۲۴ | ۳۵۳ | ۴۳۹ | ۹۵۱ | ۰/۴۳ | ۱ | ۹ | ۱۹۳۰ | ۱۸۹۰ | ۱۷/۱ | ۲۷/۸ | ۲۸ |
| A2 | ۰/۳۰ | ۴۲۸ | ۴۴۳ | ۸۰۸ | ۰/۴۳ | ۱ | ۷ | ۱۸۷۰ | ۱۸۱۰ | ۱۵/۵ | ۲۷ | ۲۹/۳ |
| A3 | ۰/۳۲ | ۴۷۱ | ۴۱۸ | ۶۵۴ | ۰/۴۳ | ۱ | ۳/۵ | ۱۷۲۰ | ۱۶۷۰ | ۱۲/۹ | ۲۳/۲ | ۲۷/۵ |
| A4 | ۰/۳۸ | ۵۵۳ | ۴۲۹ | ۵۴۸ | ۰/۴۳ | ۱ | ۲ | ۱۷۱۰ | ۱۶۵۰ | ۱۳/۲ | ۱۸ | ۲۵/۲ |

تاثیر پارامتر مقدار سبکدانه بر وزن مخصوص، اسلامپ و مقاومت فشاری در شکل ۴-۱ نشان داده شده است.




الف)وزن مخصوص ب) اسلامپ




ج) مقاومت فشاری

***شکل ۴-۱- تاثیر پارامتر مقدار سبکدانه بر وزن مخصوص، اسلامپ و مقاومت فشاری***

خلاصه نتایج به دست آمده از این آزمایش ها نشان دهنده آن است که :

- وزن مخصوص فرض شده و به دست آمده در طرح ها همخوانی مناسبی با یکدیگر دارد اگرچه در طرح A3 و A4 این همخوانی تا حدی کمتر می شود. دلیل این پدیده ممکن است عدم امکان تراکم کافی در طرح های با مقدار زیاد سبکدانه باشد.
- نتایج به دست آمده از تاثیر سبکدانه بر اسلامپ نشان دهنده تاثیر زیاد حجم سبکدانه بر کارپذیری بتن تازه است به نحوی که در عین ثابت ماندن حجم خمیر و نسبت آب به سیمان با افزایش مقدار سبکدانه

اسلامپ تا حد زیادی کاهش می یابد. به نحوی که اسلامپ از ۹ سانتیمتر به ۲ سانتیمتر کاهش یافته است.

- افزایش مقدار سبکدانه باعث کاهش همزمان چگالی و مقاومت فشاری بتن سبک می گردد. مقدار کاهش چگالی تقریبا متناسب با مقدار کاهش مقاومت بتن سبک است. افزایش حجم سبکدانه از ۰/۲۴ به ۰/۳۸ متر مکعب باعث کاهش چگالی بتن تازه از ۱۹۳۰ به ۱۷۱۰ کیلو گرم بر مترمکعب شده است. مقاومت فشاری متناظر نمونه ها در سن ۳ روزه نیز از ۱۷/۱ به ۱۳/۲ مگاپاسکال کاهش یافته است.
- به نظر می رسد مهمترین محدودیت ایجاد شده در اثر افزایش حجم سبکدانه کاهش کارپذیری بتن تازه و کاهش مقاومت فشاری بتن باشد. بر مبنای نتایج به دست آمده به نظر می رسد مقدار بهینه مصرف سبکدانه در حدود ۰/۲۸ تا ۰/۳۳ متر مکعب در هر مترمکعب باشد. استفاده از سبکدانه بیش از ۰/۳۳ متر مکعب باعث کاهش زیاد کارپذیری و مقاومت بتن می شود. از سوی دیگر استفاده از سبکدانه کمتر از ۰/۲۸ متر مکعب منجر به تولید بتن سبکی می گردد که چگالی آن نسبتا زیاد است. در آزمایش های انجام گرفته تفاوت بین مقاومت ۷ و ۲۸ روزه کمتر از بتن معمولی است. دلیل این موضوع با توجه به تئوری ظرفیت مقاومتی، به دلیل مقاومت کمتر سبکدانه در مقایسه با خمیر سیمان است.

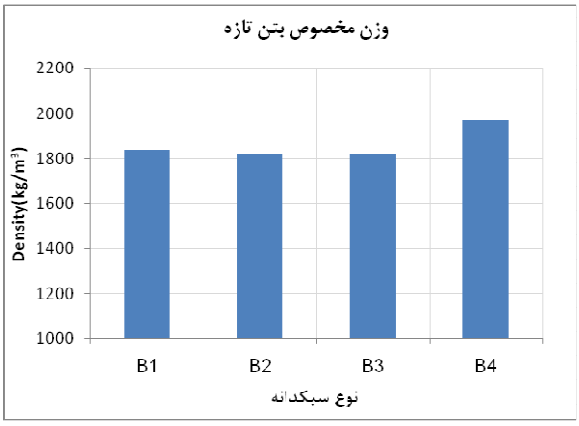
### ۴-۲-۲- بررسی پارامتر نوع سبکدانه

نتایج آزمایش های مقدماتی نشان دهنده آن می باشد که تغییر محل نمونه گیری سبکدانه ها باعث تغییر مشخصات سبکدانه، تغییر چگالی بتن و در نتیجه حجم تولیدی بتن می گردد. به این ترتیب عیار سیمان و دیگر نسبتهای اختلاط تغییر می کند. در این بخش تاثیر نوع سبکدانه بر مشخصات بتن سبک بررسی می گردد. منظور از نوع سبکدانه نمونه های مختلف از یک رده سبکدانه لیکا می باشد. به این منظور چهار نمونه سبکدانه از بسته های مختلف لیکای مورد نظر نمونه گیری شد و برای ساخت بتن مورد استفاده قرار گرفت. تمامی نسبتهای اختلاط در طرح های مختلف ثابت می باشد و فقط نوع سبکدانه متفاوت می باشد. مقدار سیمان در همه طرح ها حدود ۴۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، نسبت آب به سیمان برابر ۰/۴۰، مقدار سبکدانه برابر ۴۲۰ کیلو گرم بر مترمکعب و

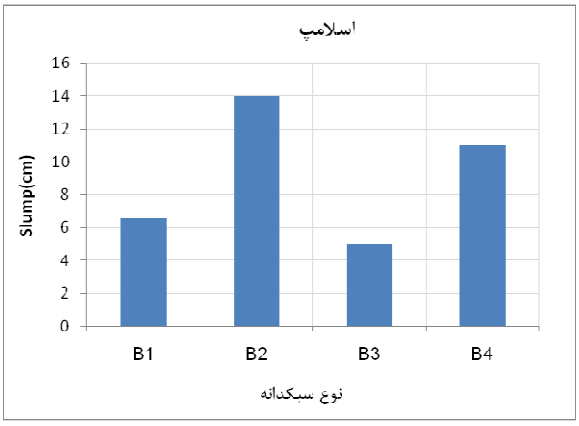
مقدار سنگدانه طبیعی ۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد. در ساخت همه طرح ها از روان کننده LD10 به میزان یک درصد وزن سیمان استفاده شده است. نتایج به دست آمده از آزمایش ها در جدول ۴-۲ درج شده است. شکل ۴-۲ نشان دهنده تاثیر این دو پارامتر بر وزن مخصوص، روانی بتن تازه و مقاومت فشاری است.

***جدول ۴-۲- مشخصات و نتایج طرح اختلاط های بررسی پارامتر نوع سبکدانه***

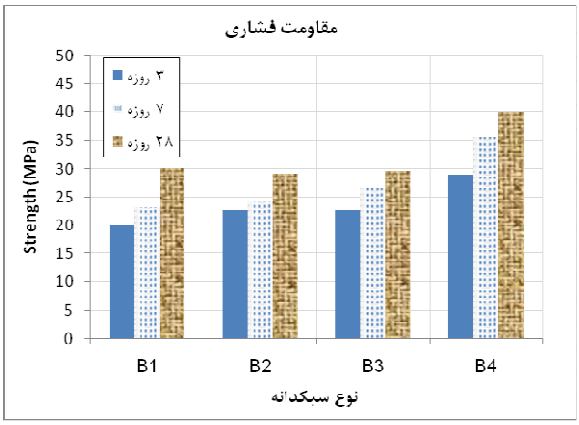
| طرح اختلاط | اسلامپ (cm) | وزن مخصوص بتن تازه (kg/m3) | وزن مخصوص بتن سخت شده (kg/m3) | مقاومت فشاری (MPa) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | ۳روزه | ۷روزه | ۲۸روزه |
| **B1** | ۶/۵ | ۱۸۴۰ | ۱۸۰۰ | ۱۹/۹ | ۲۳/۲ | ۳۰ |
| **B2** | ۱۴ | ۱۸۲۰ | ۱۷۸۰ | ۲۲/۶ | ۲۴/۱ | ۲۹/۲ |
| **B3** | ۵ | ۱۸۲۰ | ۱۷۷۰ | ۲۲/۶ | ۲۶/۵ | ۲۹/۶ |
| **B4** | ۱۱ | ۱۹۷۰ | ۱۹۲۰ | ۲۹ | ۳۵/۵ | ۴۰ |




الف)وزن مخصوص




ب) اسلامپ



ج) مقاومت فشاری

***شکل ۴-۲- تاثیر پارامتر نوع سبکدانه بر وزن مخصوص، اسلامپ و مقاومت فشاری***

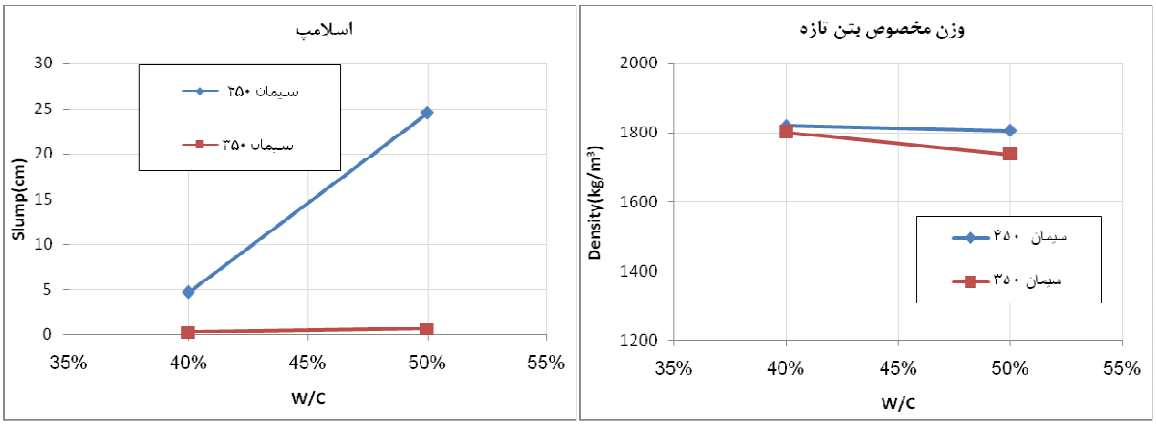
نتایج به دست آمده مجددا مؤید آن است که نمونه های مختلف سبکدانه ارسالی با یکدیگر تفاوت داشته به نحوی که با تغییر نمونه سبکدانه و ثابت نگه داشتن بقیه پارامترها تغییرات قابل توجهی در مشخصات بتن تازه و سخت شده ایجاد می شود. بنابراین باید تمهیداتی اندیشیده شود تا در هنگام اجرای بتن سبک در کارگاه سبکدانه های مورد استفاده یکنواخت باشند در غیر اینصورت مشخصات بتن تازه و سخت شده متغیر خواهد بود.

### ۴-۲-۳- بررسی پارامتر عیار سیمان و نسبت آب به سیمان

عیار سیمان و نسبت آب به سیمان در مقاومت بتن سخت شده و کارپذیری بتن تازه تاثیر مهمی دارند. برای تعیین محدوده بهینه این پارامترها چهار طرح اختلاط با دو نسبت آب به سیمان و دو عیار مختلف ساخته شد. جزئیات طرح های ساخته شده و نتایج به دست آمده در جدول ۴-۳ ذکر شده است. شکل ۴-۳ نشان دهنده تاثیر این دو پارامتر بر وزن مخصوص و روانی بتن تازه است.

***جدول ۴-۳- مشخصات و نتایج طرح اختلاط های بررسی پارامتر عیار سیمان و نسبت آب به سیمان***

| طرح اختلاط | لیکا (kg/m3) | عیار سیمان (kg/m3) | ماسه طبیعی (kg) | W/C | افزودنی (٪) | نسبت حجمی | | | اسلامپ (cm) | وزن مخصوص بتن تازه (kg/m3) | وزن مخصوص بتن سخت شده (kg/m3) | مقاومت فشاری (MPa) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | سیمان m3 | سبکدانه m3 | ماسه طبیعی m3 | | | | ۳روزه | ۷روزه | ۲۸روزه |
| C1 | ۴۲۱ | ۴۳۱ | ۷۹۹ | ۰/۴۰ | ۱ | ۰/۱۴ | ۰/۲۹ | ۰/۳۲ | ۴/۷ | ۱۸۲۰ | ۱۷۶۰ | ۲۰/۵ | ۲۶/۹ | ۳۳ |
| C2 | ۴۰۸ | ۴۱۸ | ۷۹۱ | ۰/۵۰ | ۱ | ۰/۱۳ | ۰/۲۸ | ۰/۳۱ | ۲۴/۵ | ۱۸۱۰ | ۱۷۴۰ | ۱۱/۳ | ۱۷/۸ | ۲۴/۳ |
| C3 | ۴۶۲ | ۳۳۷ | ۷۹۰ | ۰/۴۰ | ۱ | ۰/۱۱ | ۰/۳۲ | ۰/۳۵ | ۰/۳ | ۱۸۰۰ | ۱۸۱۰ | ۱۷/۷ | ۲۶/۵ | ۲۹/۲ |
| C4 | ۴۳۸ | ۳۱۹ | ۸۵۷ | ۰/۵۰ | ۱ | ۰/۱۰ | ۰/۳۰ | ۰/۳۳ | ۰/۷ | ۱۷۴۰ | ۱۷۰۰ | ۱۰/۵ | ۱۶/۵ | ۲۷/۵ |




الف)وزن مخصوص ب) اسلامپ

***شکل ۴-۳- تاثیر عیار سیمان و نسبت آب به سیمان بر وزن مخصوص و اسلامپ***

خلاصه نتایج به دست آمده از این آزمایش ها در ادامه ذکر شده است.

- کارپذیری بتن تازه تا حد زیادی تابعی از مقدار سیمان و نسبت آب به سیمان است. به نحوی که با افزایش نسبت آب به سیمان و عیار سیمان کارپذیری بتن تازه افزایش می یابد.
- در بتن های با عیار سیمان کم با اضافه کردن نسبت آب به سیمان کارپذیری بتن بهبود نمی یابد و فقط بتن دچار آب انداختگی می گردد. به عبارت دیگر در بتن های با عیار سیمان کم نسبت آب به سیمان تاثیر زیادی بر افزایش کارپذیری بتن سبک ندارد. این پدیده به این دلیل است که در مخلوط های کم سیمان خمیر سیمان کافی برای آنکه سنگدانه ها در مخلوط معلق باشند وجود ندارد بنابراین کارپذیری بتن بیشتر تابعی از تماس سنگدانه ها با یکدیگر است و افزایش آب تاثیر زیادی بر کارپذیری بتن ندارد. از سوی دیگر در مخلوطهای پرسیمان سنگدانه ها در مخلوط سیمان شناور بوده و تماس سنگدانه ها با یکدیگر کاهش می یابد. به این ترتیب کارپذیری بتن تابعی از روانی خمیر سیمان بوده که آن هم به نوبه خود با افزایش نسبت آب به سیمان افزایش می یابد.
- در بتن های سبکدانه بررسی شده در این بخش مقدار عیار سیمان باید حداقل برابر ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب انتخاب شود تا امکان تامین کارپذیری مناسب بتن وجود داشته باشد. به نظر می رسد در صورتی

که از دیدگاه مقاومتی نیازی به این مقدار عیار سیمان نباشد می توان بخشی از سیمان را با مواد پودری پوزولانی مانند خاکستر بادی و پوزولانهای طبیعی یا مواد پودری خنثی مانند پودر سنگ آهک جایگزین نمود. اظهار نظر قطعی در مورد تاثیر این مواد بر مشخصات رفتاری بتن تازه و مشخصات مکانیکی بتن سخت شده منوط به انجام آزمایشهای تکمیلی است. در هر حالت وزن کل مواد پودری نباید کمتر از ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شود.

- در مقایسه با طرح های قسمت قبل اختلاف بین مقاومت ۷ و ۲۸ روزه بیشتر است و دلیل آن افزایش نسبت های آب به سیمان و ضعیف تر شدن مقاومت خمیر سیمان است. این موضوع با تئوری ظرفیت مقاومتی قابل تفسیر است.

# ۵ –طرح اختلاط های پیشنهادی

## ۵-۱- طرح اختلاط نهایی لیکا ۷۰۰

بر مبنای نتایج به دست آمده از دسته اول آزمایش ها(آزمایش های مقدماتی) و با پارامترهای بهینه شده در دسته دوم، طرح اختلاط نهایی ساخته و بررسی گردید. همانطور که پیش از این ذکر گردید هدف از این طرح ساخت بتن سبکی با کارپذیری مناسب، وزن مخصوص کمتر از ۱۹۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و مقاومت فشاری با میانگینی بیش از ۳۵ مگاپاسکال است. جزئیات طرح نهایی ساخته شده برای رده بتن لیکا ۷۰۰ و مشخصات بتن تازه در جدول ۵-۱ نشان داده شده است. برای کنترل بهتر نسبتهای اختلاط، علاوه بر نسبتهای وزنی که عمدتا در کارگاه ها مورد استفاده قرار می گیرند نسبتهای اختلاط حجمی نیز نشان داده شده است. در حالت کلی ساخت بتن سبک به روش پیمانه گیری حجمی نسبت به روش پیمانه گیری وزنی ارجح است. اسلامپ و وزن مخصوص بتن تازه در جدول ۵-۲ و مشخصات مکانیکی بتن سخت شده نیز در جدول ۵-۳ نشان داده شده است.

***جدول ۵-۱- طرح اختلاط نهایی لیکا ۷۰۰***

| نسبتهای اختلاط (حجمی) | | | | نسبتهای اختلاط (وزنی) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| آب | ماسه | سبکدانه | سیمان | روان کننده | | w/c | ماسه | سبکدانه | سیمان |
| lit /$m^3$ | lit /$m^3$ | lit /$m^3$ | lit/$m^3$ | نوع | % | % | Kg/$m^3$ | Kg/$m^3$ | Kg/$m^3$ |
| ۱۵۷ | ۳۴۰ | ۳۱۰ | ۱۵۳ | LD10 | ۱/۰ | ۳۳ | ۸۴۰ | ۴۱۰ | ۴۷۵ |

***جدول ۵-۲- مشخصات بتن تازه طرح نهایی لیکا ۷۰۰***

| آزمایشهای بتن تازه | |
|---|---|
| اسلامپ (cm) | وزن مخصوص بتن تازه (Kg/$m^3$) |
| ۱۵ | ۱۸۸۰ |

***جدول ۵-۳-مشخصات مکانیکی بتن سخت شده طرح نهایی لیکا ۷۰۰***

| مقاومت فشاری(MPa) | | | جذب آب (٪) | مقاومت خمشی (MPa) | مقاومت کششی(MPa) | **نوع آزمایش** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۲۸ روزه | ۷ روزه | ۳ روزه | | | | |
| **۳۸** | **۲۹** | **۲۵/۴** | **۴/۰** | **۴/۳۰** | **۳/۳۰** | طرح اختلاط نهایی لیکا ۷۰۰ |

از نتایج جدول ۵-۲ می توان دریافت که مشخصات مکانیکی بتن سخت شده در محدوده قابل قبولی قرار دارد و انتظارات سازه ای را برآورده خواهد کرد. در عین حال بتن از روانی و کارپذیری مناسب هم برخوردار است.

## ۵-۲- طرح اختلاط نهایی لیکا ۵۰۰

بر مبنای نتایج به دست آمده از دسته اول آزمایش ها و با پارامترهای بهینه شده در دسته دوم، طرح اختلاط نهایی لیکا ۵۰۰ ساخته و مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در مقدمه نیز ذکر گردید هدف تعیین طرح اختلاط بهینه برای بتن با مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال و حداکثر وزن مخصوص ۱۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. جزئیات طرح نهایی ساخته شده برای رده بتن لیکا ۵۰۰ در جدول ۵-۴ نشان داده شده است. مشخصات بتن تازه و مشخصات مکانیکی بتن سخت شده نیز به ترتیب در جدولهای ۵-۴و ۵-۵ نشان داده شده است.

***جدول ۵-۴- طرح اختلاط نهایی لیکا ۵۰۰***

| نسبتهای اختلاط (حجمی) | | | | نسبتهای اختلاط (وزنی) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| آب | ماسه | سبکدانه | سیمان | روان کننده | | w/c | ماسه | سبکدانه | سیمان |
| lit /$m^3$ | lit /$m^3$ | lit /$m^3$ | lit/$m^3$ | نوع | % | % | Kg/$m^3$ | Kg/$m^3$ | Kg/$m^3$ |
| ۱۵۶ | ۳۶۰ | ۳۱۰ | ۱۳۲ | LD10 | ۱/۰ | ٪۳۹ | ۹۰۰ | ۳۰۰ | ۴۱۰ |

***جدول ۵-۵- مشخصات بتن تازه طرح نهایی لیکا ۵۰۰***

| آزمایشهای بتن تازه | |
|---|---|
| اسلامپ (cm) | وزن مخصوص بتن تازه (Kg/$m^3$) |
| ۷ | ۱۷۷۰ |

***جدول ۵-۶- مشخصات مکانیکی بتن سخت شده طرح نهایی لیکا ۵۰۰***

| مقاومت فشاری(MPa) | | | جذب آب (٪) | مدول الاستیسیته (GPa) | مقاومت خمشی (MPa) | مقاومت کششی (MPa) | **نوع آزمایش** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۲۸ روزه | ۷ روزه | ۳ روزه | | | | | |
| **۲۵** | **۱۸/۵** | **۱۶** | **۳/۴** | **۲۳/۲** | **۳/۴** | **۲/۲۴** | طرح اختلاط نهایی لیکا ۵۰۰ |

بر اساس استاندارد ACI 318-83، مدول الاستیسیته بتن سبک بر حسب وزن مخصوص و مقاومت فشاری آن از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$E=43(\rho^{1.5})(f^{0.5})*10^{-6}$$

که درآن (ρ) وزن مخصوص (بر حسب $kg/m^3$) و (f) مقاومت فشاری نمونه استوانه ای(بر حسب MPa) می باشد. با توجه به این رابطه می توان دریافت که بتن سبک ساخته شده دارای مدول الاستیسیته بیش از حد پیش بینی شده در استاندارد که حدود GPa ۱۶ است می باشد.

با توجه به آزمایش مدول الاستیسیته و نتایج جدول ۵-۵ می توان دربافت که مشخصات بتن سخت شده علیرغم وزن مخصوص کمتر در مقایسه با بتن با وزن معمولی، در محدوده مناسبی قراردارد و نسبت مقاومت های فشاری به مقاومت کششی و مقاومت خمشی آن در حدود بتن معمولی می باشد. مدول الاستیسیته اندازه گیری شده در این آزمونه (GPa ۲۳) بیش از مقداری است که رابطه ذکر شده در آیین نامه ACI 318-05 برای مدول الاستیسیته بتن سبک با مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال پیشنهاد می دهد و تقریبا برابر مدول الاستیسیته بتن با وزن معمولی با مقاومت فشاری متناظر آن است (GPa ۲۵).

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش های متعددی که بر روی بتن تازه و سخت شده انجام گرفته، می توان از بتن سبکدانه با طرح اختلاط بهینه شده در جزوه حاضر در ساخت عناصر سازه ای با رعایت نکات اجرائی استفاده نمود و به این ترتیب کاهش بار مرده بدون افت مشخصات مکانیکی نسبت به بتن معمولی را شاهد خواهیم بود.

## ۵-۳- توصیه های اجرایی

با توجه به تجربیات به دست آمده در آزمایشگاه در هنگام کاربرد طرح اختلاط نهایی در کارگاه توجه به نکات زیر ضروری است.

- با توجه به تاثیر زیاد وزن مخصوص بتن تازه بر نتایج به دست آمده باید در اندازه گیری این پارامتر دقت زیادی بعمل آید.
- پیش از کاربرد بتن سبک در کارگاه باید آزمایش های کنترل کیفیت لازم برای اطمینان از یکنواختی سبکدانه های مصرفی انجام پذیرد.
- با توجه به جذب آب سبکدانه ها در مخلوط بتن تازه، تعیین نسبت آب به سیمان در بتن سبک خیلی دقیق نخواهد بود. بنابراین رابطه میان نسبت آب به سیمان و مقاومت در بعضی موارد ممکن است غیر منتظره باشد. با این وجود در بتن سبکدانه رابطه میان روانی و مقاومت واضحتر است بنابراین در هنگام ساخت بتن، اندازه گیری روانی و کنترل آن بسیار با اهمیت می باشد.