انستیتو مصالح ساختمانی پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

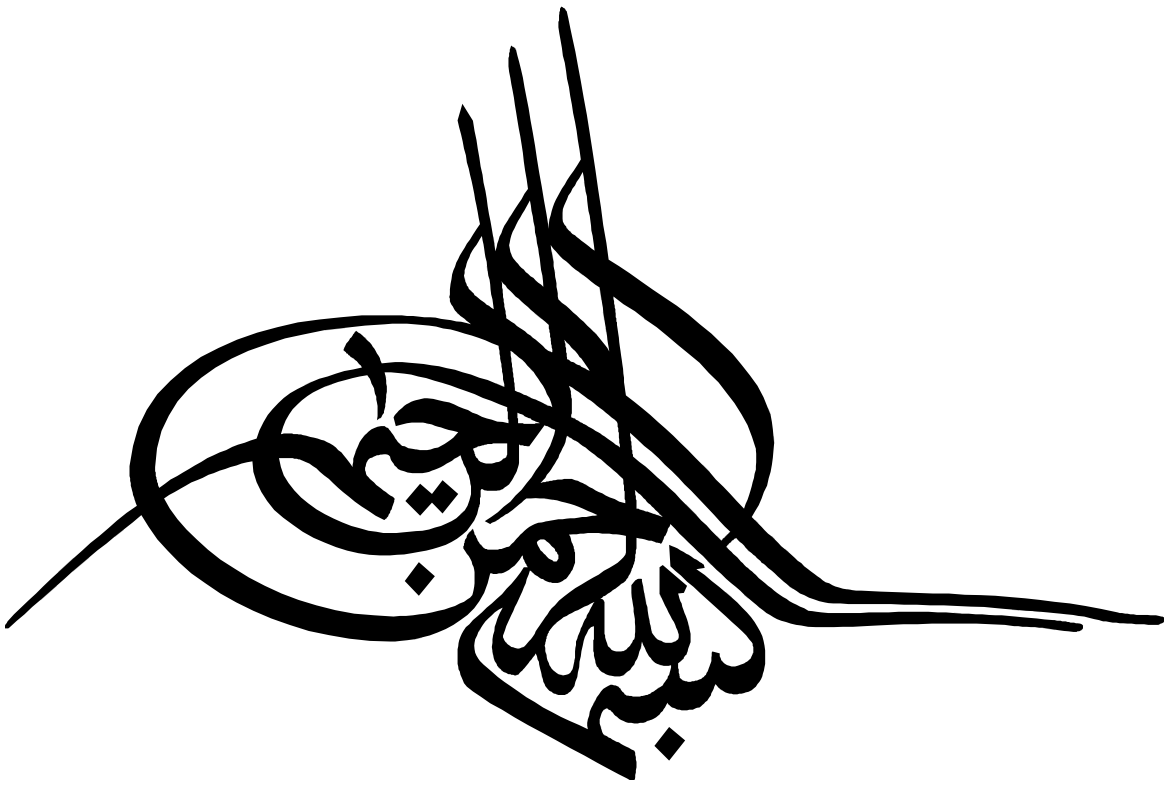
- شمـاره قرارداد : ۱۴۳/۱۲۴۴۴۳
- شمـاره گزارش : CMI – ۸۸۱۱۴۲۰
- تاریـخ گزارش : ۱۳۸۸/۰۴/۲۲

- عنـوان گزارش :

آنالیز حساسیت بـتن سـبکدانه نسـبت بـه اجزای تشکیل‌دهنده

- کارفـرما:

شرکت لیکا


بسم الله الرحمن الرحيم

بسمه تعالی

پیشگفتار

در گزارش حاضر نتایج بخش سوم مطالعات "سبکدانه سازه ای لیکا" ارایه شده است. مجموعه مطالعات سبکدانه سازه ای لیکا که اکنون به مرحله سوم رسیده است از سال ۱۳۸۵ با هدف تولید سبکدانه سازه ای با رسهای منبسط شده برای ساخت بتن سبک و نیز شناخت ویژگیهای بتن سبکدانه سازه ای ساخته شده با آن آغاز گردید و اکنون بعد از گذشت سه سال نتایج قابل توجهی به دست آمده است. هدف از ارایه این گزارشها آشنایی جامعه مهندسی کشور با نتایج تحقیقات انجام گرفته و گسترش دانش، فناوری و کاربرد بتن سبکدانه سازه ای در ساخت و سازهای مهندسی کشور است.

بخش اول نتایج تحقیقات انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران در خصوص سبکدانه سازه ای لیکا در مراسم روز بتن سال ۱۳۸۶ تحت *عنوان "تعیین ظرفیت مقاومتی سبکدانه سازه ای لیکا"* منتشر گردید و مورد استقبال قرار گرفت. در این گزارش مشخصات مقاومتی سبکدانه سازه ای لیکا که گام اول در تعیین محدوده بهینه کاربرد این سبکدانه ها است بررسی گردید. پس از آن در بخش دوم طرح مخلوط های بهینه کارگاهی برای دو رده متداول بتن سبکدانه سازه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بخش دوم این تحقیقات با عنوان *"راهنمای کاربردی بتن سبکدانه سازه ای لیکا"* در سال ۱۳۸۷ منتشر گردید. در بخش سوم تحقیقات که نتایج آن در این گزارش ارایه می گردد ویژگیهای سبکدانه ها و بتن سبکدانه ساخته شده با آنها مطابق استانداردهای معتبر بین المللی، روشهای ساخت و اجرای بتن سبکدانه و نیز کنترلهای کارگاهی آن ارایه شده است. همچنین، در بخش مطالعات آزمایشگاهی این تحقیق، حساسیت بتن سبکدانه حاوی لیکا و تأثیر خطای توزین مصالح تشکیل‌دهنده بتن سبکدانه بر مشخصات بتن تازه و سخت شده مورد بررسی قرار گرفته است.

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 خانم‌ها مارال جلیلی و سارا جاوید مهر و نیز آقای پورضرابی، کارشناسان انستیتو مصالح ساختمانی که در تهیه مطالب گزارش همکاری نمودند تشکر و قدردانی نمایند.

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

محمد شکرچی‌زاده

نیکلاس علی لیبر

احسان آشوری

راحیل خوش‌نظر

فهرست مطالب

بخش اول- بررسی ادبیات فنی

فصل اول – مشخصات بتن سبک ۱
۱-۱ ویژگی‌های بتن سبک ۱
۱-۲ رده‌بندی بتن سبک بر مبنای مقاومت ۳
۱-۳ رده‌بندی بتن سبک بر مبنای چگالی ۴
۱-۴ رده‌بندی بتن سبکدانه قابل استفاده در شرایط محیطی مختلف ۵

فصل دوم – مشخصات مصالح سبکدانه ۹
۲-۱ مقدمه ۹
۲-۲ دانه‌بندی ۹
۲-۳ چگالی توده‌ای غیرمتراکم ۱۱
۲-۴ چگالی دانه‌ای ۱۲
۲-۵ یکنواختی مقاومت دانه‌ها ۱۳
۲-۶ جذب آب ۱۵
۲-۷مقاومت در برابر چرخه ذوب و یخ ۱۸
۲-۸ دانه‌های شکسته در سنگدانه‌ها ۱۹
۲-۹ ریزدانه‌ها در سنگدانه ۱۹
۲-۱۰ ترکیبات تشکیل‌دهنده سبکدانه ۲۰
۲-۱۱ واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها ۲۱
۲-۱۲ جمع‌شدگی ۲۱

فصل سوم-ساخت بتن سبک ۲۲
۳-۱ مقدمه ۲۲
۳-۲ آب آزاد و آب جذب‌شده ۲۳
۳-۳ حجم ظاهری ۲۳
۳-۴ حجم مطلق ۲۴
۳-۵ وزن مخصوص دانه‌ای ۲۵
۳-۶ وزن مخصوص توده‌ای ۲۵
۳-۷ عوامل موثر بر تغییرات وزن مخصوص سبکدانه‌ها ۲۵
۳-۸ پیمانه‌گیری درشت‌دانه ۲۶
۳-۹ پیمانه‌گیری ریزدانه ۳۰
۳-۱۰ فرایند اختلاط ۳۱

۳-۱۰-۱ بارگیری مخلوط‌کن‌ها ۳۲
۳-۱۰-۲ مخلوط‌کن‌های ثابت ۳۳
۳-۱۰-۳ عملکرد مخلوط‌کن‌ها ۳۴
۳-۱۱ حمل و نقل ۳۴
۳-۱۱-۱ تراک‌میکسرها ۳۵
۳-۱۱-۲ حمل و نقل و زمان انتظار ۳۶
۳-۱۱-۳ تاثیرات دما ۳۷
۳-۱۱-۴ افزودن آب در کارگاه ساختمانی ۳۷

فصل چهارم-اجرای بتن سبک ۳۸
۴-۱ بتن‌ریزی ۳۸
۴-۲ تراکم ۳۹
۴-۳ پرداخت ۴۰
۴-۴ عمل‌آوری ۴۱
۴-۵ فرایند پمپ‌کردن بتن ۴۳
۴-۵-۱ ملاحظات کلی در فرایند پمپ‌کردن بتن سبکدانه ۴۳
۴-۵-۲ پیمانه‌گیری مخلوط پمپ ۴۴
۴-۵-۳ پمپ و سیستم پمپ‌کردن ۴۵

فصل پنجم-آزمایش‌های مرتبط با تولید بتن سبکدانه ۵۰
۵-۱ آزمایش‌های بتن سبک ۵۰
۵-۱-۱ چگالی ۵۰
۵-۱-۲ آزمایش مقاومت ۵۲
۵-۱-۳ کارپذیری ۵۲
۵-۱-۳-۱ آزمایش اسلامپ ۵۳
۵-۱-۳-۲ آزمایش جریان ۵۳
۵-۱-۴ آزمایش مقدار هوا ۵۴
۵-۱-۴-۱ روش فشاری ۵۴
۵-۱-۴-۲ روش حجمی ۵۵
۵-۱-۵ پمپ‌پذیری ۵۶
۵-۱-۵-۱ آزمایش آب‌اندختگی ۵۷
۵-۱-۵-۲ آزمایش فشار-حجم ۵۷
۵-۱-۶ پایداری ۵۸
۵-۱-۶-۱ آزمایش ستون جداشدگی ۵۸
۵-۲ آزمایش‌های درجا ۶۰

۵-۳ اصلاح طرح اختلاط ۶۱

پیوست ها ۶۳

پیوست الف ۶۳

پیوست ب ۶۸

پیوست پ ۷۲

بخش دوم- بررسی آزمایشگاهی

فصل اول- محدوده برنامه آزمایشگاهی ۷۶

فصل دوم- آزمایش‌های سبکدانه ۷۹

۲-۱ وزن مخصوص ۷۹

۲-۲ دانه‌بندی ۸۴

۲-۳ جذب آب ۸۵

۲-۴ مقایسه مشخصات سبکدانه‌ها با سبکدانه‌های مورد استفاده در فاز قبل ۸۷

فصل سوم- برنامه آزمایشگاهی ساخت بتن سبکدانه ۸۸

۳-۱ مشخصات مصالح مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها ۸۸

۳-۲ روش ساخت، قالب گیری و عمل آوری ۸۹

۳-۳ آزمایشهای انجام شده بر روی بتن سخت شده ۹۰

۳-۳-۱ مقاومت فشاری ۹۰

۳-۳-۲ وزن مخصوص بتن سخت شده ۹۰

فصل چهارم- نتایج آزمایش‌های بتن سبکدانه ۹۱

۴-۱ بررسی تغییرات در نمونه شاهد ۹۱

۴-۲ بررسی تاثیر خطای توزین آب ۹۳

۴-۳ بررسی تاثیر خطای توزین سیمان ۹۴

۴-۴ بررسی تاثیر خطای توزین سبکدانه ۹۵

۴-۵ بررسی تاثیر خطای توزین ماسه طبیعی ۹۶

۴-۶ بررسی تاثیر خطای تغییر نوع سبکدانه ۹۷

۴-۷ بررسی تاثیر خطای رطوبت اولیه سبکدانه ۹۸

۴-۸ مقایسه خطای پارامترهای مختلف ۹۸

۴-۹ بررسی رابطه بین وزن مخصوص و مقاومت فشاری بتن سبکدانه ۱۰۰

فصل پنجم- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۱۰۱

بخش اول

بررسی ادبیات فنی

فصل اول– مشخصات بتن سبک

۱–۱ ویژگیهای بتن سبک

بتن سبکدانه نوآوری جدیدی در فناوری بتن محسوب نمی‌شود و این مصالح از زمان‌های قدیم شناخته شده است. شواهدی از ساخت این نوع بتن از هزاره‌ی سوم قبل از میلاد وجود دارد که در آنها مواد آتشفشانی مثل پومیس و اسکریا به‌کار رفته است.

در عصر صنعتی شدن و هم‌زمان با توسعه‌ی فناوری، بتن سبکدانه در کشورهای مختلف خصوصاً در کشورهای پیشرفته گسترش بیشتری یافت و امروزه سازه‌های متعددی وجود دارد که با بتن سبکدانه ساخته شده است. به‌نحوی‌که در بعضی کشورها مصرف سرانه‌ی سبکدانه به حدود ۲۰۰ لیتر در سال می‌رسد.به‌خاطر مزایای عملی استفاده از بتن سبکدانه در سال‌های اخیر، این بتن به‌عنوان یکی از مصالح سازه‌ای مهم شناخته شده و تقاضا برای استفاده از آن در حال افزایش است. با کاهش وزن سازه‌های فوقانی، حجم فونداسیون و زمان ساخت آن کاهش پیدا می‌کند و صرفه‌جویی هزینه، در مراحل نصب و جابه‌جایی عناصر ساختمانی را در بر خواهد داشت، به‌-این ترتیب جرثقیل‌های کوچکتری می‌تواند به‌کار رود و یا عضوهای پیش‌ساخته بزرگتری را می‌توان جابه‌جا کرد.

راه‌های مختلفی برای تولید بتن سبک وجود دارد. از این میان، سه گروه اصلی قابل تشخیص است. نوع اول بتن سبکدانه‌ی با ساختار یکپارچه که در آن سبکدانه به‌جای سنگدانه‌ی معمولی در بتن استفاده می‌شود. این نوع بتن را می‌توان یا به‌عنوان بتن سازه‌ای و یا بتن غیرسازه‌ای، به‌عنوان عایق حرارتی استفاده کرد. روش دوم براساس داخل کردن حجم زیادی فضای خالی در بتن است و با عنوان بتن هوادمیده، بتن کفی یا بتن گازی نامیده می‌شود. مواردی نیز وجود دارد که سبکدانه نیز به چنین مخلوط‌هایی اضافه شده است. نوع سوم بتن‌های سبک، با حذف ریزدانه از بتن ساخته می‌شوند که سبب تشکیل تخلخل زیادی در بتن خواهد شد. در این بتن‌ها، اغلب از درشت‌دانه‌ی معمولی استفاده می‌شود، اما استفاده از سبکدانه می‌تواند وزن مخصوص بتن را تا حد زیادی کاهش دهد و خواص عایق گرمایی بهتری پدید آورد. این بتن با عنوان بتن بدون ریزدانه شناخته می‌شود. از آنجایی که

بخش عمده بتنهای سبکی که امکان به کارگیری به عنوان مصالح باربر سازه ای را دارند از نوع بتن سبکدانه است در این گزارش صرفا به بیان مشخصات بتن سبکدانه سازه ای پرداخته می شود.

برخلاف بتن‌های با وزن معمولی که عمدتا بر مبنای مقاومت فشاری طبقه بندی می شوند، طبقه‌بندی بتن‌های سبک را می‌توان بر مبنای چگالی آنها انجام داد. در حقیقت می‌توان رابطه‌ای تقریبی میان چگالی و مقاومت بتن سبک ساخته شده با نوع خاصی سبکدانه پیدا کرد. در حالت کلی بتن با چگالی کم، مقاومت کمتری دارد و بتن با چگالی زیاد، اغلب مقاومت بیشتری خواهد داشت. بتن‌های سبکدانه‌ی سازه‌ای مقاومت فشاری در محدوده‌ی حداقل ۱۵ تا حداکثر ۷۰ مگاپاسکال دارند. اگر چه گزارشهایی از ساخت بتن سبکدانه سازه ای با مقاومت بیش از ۷۰ مگاپاسکال نیز ارایه شده است.

هدایت حرارتی بتن‌های سبکدانه به ساختار متخلخل آنها یا سیستم حفره‌های هوا وابسته است. وجود هوا در بتن موجب ایجاد تخلخل بیشتر و چگالی کمتر می‌شود و به دلیل عایق بودن هوا، هدایت حرارتی بتن کاهش می-یابد. سیستم هوا و تخلخل در بتن سبکدانه، به مصالح چسباننده و افزودنی‌های شیمیایی به‌کار رفته بستگی دارد. با اضافه کردن دوده‌ی سیلیس و خاکستر بادی، هدایت حرارتی کاهش پیدا می‌کند. هنگامی‌که مقدار استفاده از دوده‌ی سیلیس و خاکستر بادی ۱۰ و ۲۰ درصد است. این کاهش در مورد خاکستر بادی آشکارتر از دوده سیلیس است، اما در کاربرد ۳۰ درصد، تقریباً مشابه یکدیگرند.

سنگدانه‌های متخلخل، بتن سبکدانه‌ای تولید می‌کنند که هدایت حرارتی آن کمتر است. اما فقط مقدار هوای کل نیست که موجب هدایت حرارتی می‌شود، هندسه‌ی حفرات و نحوه‌ی توزیع آنها نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در هدایت حرارتی بر عهده دارد. در واقع، با کاهش چگالی، خاصیت عایق حرارتی در ساختمان‌ها افزایش می‌یابد، به همین دلیل، در برخی موارد ضخامت سقف و دیوارها می‌تواند کم شود. همراه با کاهش وزن ساختمان، عایق‌سازی حرارتی مناسبی نیز ایجاد می‌شود.

بتن‌های سبکدانه با وجود مقاومت کم سنگدانه‌ها، می‌توانند مقاومتی در محدوده بتن‌های معمولی داشته باشند. این موضوع بستگی به ماتریس ملات سیمان دارد. بتن‌های سبکدانه‌ی پرمقاومت سازه‌ای، با استفاده از یک ماتریس سیمان پرمقاومت تولید می‌شوند. البته سبکدانه های لیکای سازه ای هم که امروزه موجودند، مقاومت بیشتری نسبت به سنگدانه‌های رس منبسط لیکای غیر سازه ای دارند. این سبکدان های سازه ای می‌توانند برای تولید بتن پرمقاومت به کار روند.

۱-۲ رده بندی بتن سبکدانه بر مبنای مقاومت

همانطور که ذکر شد بتنهای سبکدانه عمدتا بر مبنای مقاومت و چگالی طبقه بندی می گردند. در استاندارد اروپایی *EN 206-1* بتن‌های سبکدانه بر مبنای مقاومت فشاری بر مبنای اعداد نشان داده شده در جدول ۱-۱ طبقه بندی می شوند. همانطور که در جدول نشان داده شده مقاومت بتنهای سبکدانه طبق این استاندارد در محدوده ۸ تا ۸۰ مگاپاسکال قرار داشته و به ۱۴ رده مقاومتی تقسیم می شود. رده بندی مقاومت فشاری بر مبنای هر دو آزمونه مکعبی و استوانه ای امکان پذیر است. نکته ای که باید به آن توجه نمود این است که رابطه میان مقاومت فشاری آزمونه های مکعبی و آزمونه های استوانه ای در بتن سبک متفاوت از رابطه میان مقاومت فشاری آزمونه های مکعبی و آزمونه های استوانه ای در بتن با وزن معمولی است. با توجه به نتایج جدول به نظر می‌رسد تفاوت مقاومت آزمونه‌های استوانه‌ای و آزمونه‌های مکعبی در بین بتن سبکدانه در مقایسه با بتن معمولی کمتر است. علاوه بر آن، در بتن معمولی با افزایش مقاومت مشخصه اختلاف بین مقاومت آزمونه‌های استوانه‌ای و مکعبی کمتر می‌شود، حال آنکه برای بتن سبکدانه این موضوع برعکس است.

جدول ۱-۱ طبقه‌بندی بتن سبکدانه برحسب مقاومت فشاری در استاندارد *EN 206-1*

رده‌بندی مقاومت فشاری	$f_{ck,cyl}$ (نمونه‌ی استوانه‌ای) N/mm^2	$f_{ck,cube}$ (نمونه‌های‌مکعبی) N/mm^2
LC 8/9	*8*	*9*
LC 12/13	*12*	*13*
LC 16/18	*16*	*18*
LC 20/22	*20*	*22*
LC 25/28	*25*	*28*
LC 30/33	*30*	*33*
LC 35/38	*35*	*38*
LC 40/44	*40*	*44*
LC 45/50	*45*	*50*
LC 50/55	*50*	*55*
LC 55/60	*55*	*60*
LC 60/66	*60*	*66*
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

در آیین نامه بتن آمریکا *ACI 318* تمایزی میان رده های مقاومتی بتن سبک و بتن با وزن معمولی دیده نشده است اما در بند ۲۱-۲-۴-۲ این آیین نامه تصریح شده است که مقاومت فشاری مشخصه بتن سبکی که به عنوان مصالح باربر در اعضای سازه ای به کار می رود نباید بیشتر از ۳۴ مگاپاسکال در نظر گرفته شود مگر آنکه بوسیله

آزمایشهای سازه ای نشان داده شود که مقاومت و طاقت اعضای سازه ای ساخته شده با بتن سبک برابر یا بیشتر از مقاومت و طاقت اعضای سازه ای مشابه ساخته شده با بتن با وزن معمولی هستند. این محدودیت به دلیل وجود اطلاعات تجربی کافی در مورد رفتار اعضای سازه ای ساخته شده با بتن سبک پرمقاومت در برابر بارهای لرزه‌ای است.

۱-۳ رده بندی بتن سبکدانه بر مبنای چگالی

در استاندارد اروپایی *EN 206-1* شش رده مختلف چگالی برای بتن های سبک تعریف شده است. این رده بندی در جدول۱-۲ نشان داده شده است. همانطور که در جدول نشان داده شده حداکثر چگالی بتن برای آنکه در رده بتنهای سبک قرار گیرد ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. به عبارت دیگر بتنهای با چگالی بیش از ۲۰۰۰ و کمتر از ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب اگر چه چگالی کمتری نسبت به بتن با وزن معمولی دارند اما در رده بندی بتنهای سبک قرار نمی گیرند.

جدول ۱-۲ رده‌بندی بتن سبکدانه برحسب چگالی در استاندارد *EN 206-1*

رده‌بندی براساس چگالی	محدوده‌ی چگالی خشک شده در آون (Kg/m^3)
LC 1.0	بزرگتر یا مساوی ۸۰۰ و کوچکتر یا مساوی ۱۰۰۰
LC 1.2	بزرگتر از ۱۰۰۰ و کوچکتر یا مساوی ۱۲۰۰
LC 1.4	بزرگتر از ۱۲۰۰ و کوچکتر یا مساوی ۱۴۰۰
LC 1.6	بزرگتر از ۱۴۰۰ و کوچکتر یا مساوی ۱۶۰۰
LC 1.8	بزرگتر از ۱۶۰۰و کوچکتر یا مساوی ۱۸۰۰
LC 2.0	بزرگتر از ۱۸۰۰ و کوچکتر یا مساوی ۲۰۰۰

در آئین نامه *ACI 318* در تعریف بتن سبک ذکر شده است بتن سبک بتنی است که وزن مخصوص آن که مطابق با استاندارد *ASTM C576* تعیین شده است کمتر از *1840* کیلوگرم بر متر مکعب باشد. مطابق این آیین نامه در صورتی که کل سنگدانه های به کار رفته در ساخت بتن از نوع سبکدانه باشند بتن سبک به نام "*بتن تمام سبک*" نامیده می شود. در صورتی که تمام ریزدانه های بتن از سنگدانه های با چگالی معمولی باشند، بتن به دست آمده به نام "*بتن سبک ماسه ای*" نامیده می شود.

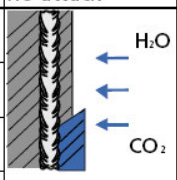
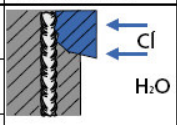
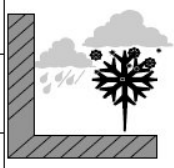
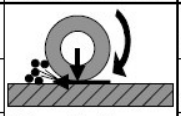
۱-۴ رده بتن سبکدانه قابل استفاده در شرایط محیطی مختلف

استاندارد اروپایی *EN 206*: در استاندارد اروپایی *EN 206-1* شرایط محیطی مختلفی تعریف شده است که بر مبنای میزان خورندگی محیط نوع بتنی که در آن شرایط محیطی قابل استفاده است محدود می باشد. معمولا هر چقدر شرایط محیطی خورندگی بیشتری داشته باشد و خطر آسیب دیدگی بیشتری متوجه سازه باشد حداقل مقاومت بتنی که در آن شرایط قابل استفاده است افزایش می یابد. حداقل رده مقاومتی توصیه شده برای بتن سبکدانه در شرایط محیطی مختلف مطابق استاندارد *EN 206-1* در جدول ۱-۳ نشان داده شده است.

جدول ۱-۳ حداقل رده مقاومتی بتن سبکدانه برحسب شرایط محیطی (توصیه شده در استاندارد *EN 206-1*)

رده‌بندی شرایط محیطی	حداقل رده‌ی مقاومت فشاری قابل قبول
X 0	*LC 8/9*
XC 1	*LC 20/22*
XC 2	*LC 25/28*
XC 4 - XC 3	*LC 30/33*
XF 1	*LC 30/33*
XF 2	*LC 25/28*
XF 3	LC 25/28
XF 4	LC 30/33

دسته بندی شرایط محیطی مختلف و نوع بتن سبک قابل استفاده در آن شرایط به صورت شماتیک در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. برای اطلاع از جزئیات نحوه‌ی دسته‌بندی شرایط محیطی می‌توان به *EN 206-1* رجوع کرد. مقادیر ذکر شده در این شکل بر مبنای عمر بهره برداری ۵۰ ساله و تعمیر و نگهداری متناسب سازه هستند. در صورتی که طول دوره بهره برداری از سازه کمتر یا بیشتر از ۵۰ سال باشد یا شرایط تعمیر و نگهداری ویژه‌ای برای سازه پیش بینی شده باشد مقادیرتوصیه شده در شکل ۱-۱ قابل اصلاح هستند. لازم به ذکر است که مقادیر نشان داده شده در شکل۱-۱ برای بتنهای با وزن معمولی است و استاندارد *EN 206-1* تبصره خاصی برای بتن‌های سبکدانه در این مورد ارایه نکرده است.

Exposure classes (environmental effects, "attacks")				Concrete technology measures ("resistances")		
class designation		effect and stress		max. w/c	min. c	f_{ck}, cube
XO		no attack	no concrete attack	no requirement	no requirement	C8/10 C8/10
XC	1	 carbonation	dry	0,75	240	C16/20
	2		constantly wet	0,75	240	C16/20
	3		moderately moist	0,65	260	C20/25
	4		wet / dry	0,60	280	C25/30
XD/ XS	1	 chloride	moderately moist	0,55	300	C30/37
	2		constantly wet	0,50	320	C35/45
	3		wet / dry	0,45	320	C35/45
XF	1	 Frost /+ Salz freeze-thaw /+ salt	moderate water saturation (o.T.)	0,60	280	C25/30
	2		moderate water saturation (m.T.)	0,55 + LP	300	C25/30
				0,50	320	C35/45
	3		hohe Wassers. o. T. high water saturation (o.T.)	0,55 + LP	300	C25/30
				0,50	320	C35/45
	4		high water saturation (m.T.)	0,50 + LP	320	C30/37
XA	1	Chem. Angriff chemical attack	weakly corrosive	0,60	280	C25/30
	2		moderately corrosive	0,50	320	C35/45
	3		strongly corrosive	0,45	320	C35/45
XM	1	 Verschleiß wear	moderate wear	0,55	300	C30/37
	2		severe wear	0,45	320	C35/45
	3		very severe wear	0,45	320	C35/45

شکل ۱-۱ رده بندی شرایط محیطی و نوع بتن سبک قابل استفاده در آن شرایط

آیین نامه بتن آمریکا: در آیین نامه بتن آمریکا *ACI 318* برای بتن های سبک قرار گرفته در شرایط محیطی خورنده معیارهایی متفاوت از استاندارد اروپایی *EN 206-1* به کار گرفته شده است. خلاصه این ضوابط در جدولهای ۱-۴ و ۱-۵ نشان داده شده است. همانطور که این جدول‌ها نشان می دهند برای بتن با وزن معمولی هر دو معیار حداکثر نسبت آب به سیمان و حداقل مقاومت ملاک قرار گرفته است در حالیکه برای بتن سبک معیار مورد استفاده تنها مقاومت فشاری بتن سبک است. دلیل این امر نیز به این نکته بر می گردد که محاسبه دقیق نسبت آب به سیمان و تنظیم آن در بتن سبک به دلیل جذب آب سریع سبکدانه ها مشکل است.

جدول ۱-۴ ملزومات بتن برای شرایط محیطی ویژه

شرایط در معرض بودن	حداکثر نسبت آب به مواد سیمانی در بتن با وزن مخصوص معمولی (٪)	حداقل f'_c برای بتن سبک و معمولی *(MPa)*
بتن با نفوذپذیری کم هنگامیکه در معرض آب است	۰/۵	۲۸
بتن در معرض ذوب و یخ در شرایط مرطوب یا ...	۰/۴۵	۳۰
برای حفاظت در برابر خوردگی آرماتورها در بتن در معرض کلریدهای بوجود آمده از ..،نمک، آب شور، آب دریا یا آب پاشیده شده از این منابع	۰/۴	۳۵

جدول ۱-۵ ملزومات بتن قرار گرفته در معرض محلولهای سولفاتی

در معرض سولفات	یون سولفات قابل حل در خاک (درصد نسبت به وزن)	سولفات(SO_4) موجود در آب(ppm)	نوع سیمان مصرفی	حداکثر نسبت آب به مواد سیمانی برای بتن معمولی(درصد برحسب وزن)	حداقل f'_cبرای بتن سبک و بتن معمولی *(MPa)*
ناچیز	*0.00≤SO4<0.10*	*0≤SO4<150*	–	–	–
متوسط[1]	*0.10≤SO4<0.20*	*150≤SO4<1500*	*II, IP(MS), IS(MS), P(MS), I(PM)(MS), I(SM)(MS)*	۰/۵	۲۸
شدید	*0.20≤SO4≤2.00*	*1500≤SO4<10,000*	*V*	۰/۴۵	۳۰
بسیار شدید	$2.00<SO_4$	$10,000<SO_4$	Vبعلاوه پوزولان[2]	۰/۴۵	۳۰

۱. آب دریا

۲. پوزولانی که بر اساس آزمایش یا سابقه استفاده به منظور بهبود مقاومت در برابر سولفات، انتخاب شده باشد و در جائیکه بتن حاوی سیمان نوع V است.

فصل دوم– مشخصات مصالح سبکدانه

۲–۱ مقدمه

مصالح سبکدانه برای استفاده در ساخت بتن باید الزاماتی را داشته باشند. استاندارد اروپایی *EN 13055-1* انواع مختلفی از سبکدانه‌های قابل استفاده در بتن، ملات و دوغاب را پوشش می‌دهد. در مورد سبکدانه‌های سازه‌ای محدودیت‌های بیشتری را باید به این استاندارد افزود. در *EN206-1* حداقل الزامات برای وزن مخصوص بتن و مقاومت آن داده شده است که یعنی همه سبکدانه‌های ذکر شده در *EN13055-1* برای استفاده دربتن‌های سازه‌ای مناسب نیستند. تجربیات در این زمینه برای سبکدانه‌هایی با وزن مخصوص بیش از ۲۵۰ *kg/m3* (رس منبسط، شیل و اسلیت، پومیس، اسکوریا) می‌باشد.

از سوی دیگر استاندارد آمریکایی *ASTM* مجموعه‌ای از استانداردها مانند *ASTM C330* برای سبکدانه‌های سازه‌ای، *ASTM C331* برای سبکدانه‌های مورد استفاده در بلوک‌های بنایی و *ASTM C332*برای سبکدانه‌های مورد استفاده در بتن عایق‌بندی را ارائه داده است. در این بخش برخی از مشخصات و ملزومات مصالح سبکدانه سازه‌ای بر اساس دو استاندارد متداول اروپایی و آمریکایی بررسی می گردد.

۲–۲ دانه‌بندی

دانه‌بندی طبق *EN 933-1* به وسیله الک کردن دانه‌های خشک و بر اساس محدوده‌های مشخص شده برای درصد سنگدانه‌های شکسته تعیین می‌شود. در این آیین نامه محدودیت خاصی برای حدود مجاز دانه‌بندی ذکر نشده است؛ اما تصریح شده است که حداکثر مقدار سنگدانه‌های بزرگتر از اندازه اسمی ۱۵ درصد کل اندازه سنگدانه‌ها و حداکثر مقدار سنگدانه‌های کوچکتر از ریزترین اندازه اسمی ۱۰ درصدکل سنگدانه‌هاست.

در استاندارد *ASTM C330* نیز الزاماتی برای دانه‌بندی سبکدانه‌ها ذکر شده که باید مطابق جدول۲-۱ باشد. برای اطمینان از یکنواختی دانه‌بندی سبکدانه‌ها، استاندارد *ASTM C330* مقرر می‌کند که مدول نرمی نمونه‌های سبکدانه تحویل داده شده تعیین گردد و در صورتی که مقادیر مدول نرمی اندازه‌گیری شده با مقادیر مدول نرمی نمونه‌های تحویل داده شده برای پذیرش بیش از ۷ درصد تفاوت داشته باشد سبکدانه‌ها مرجوع گردد.

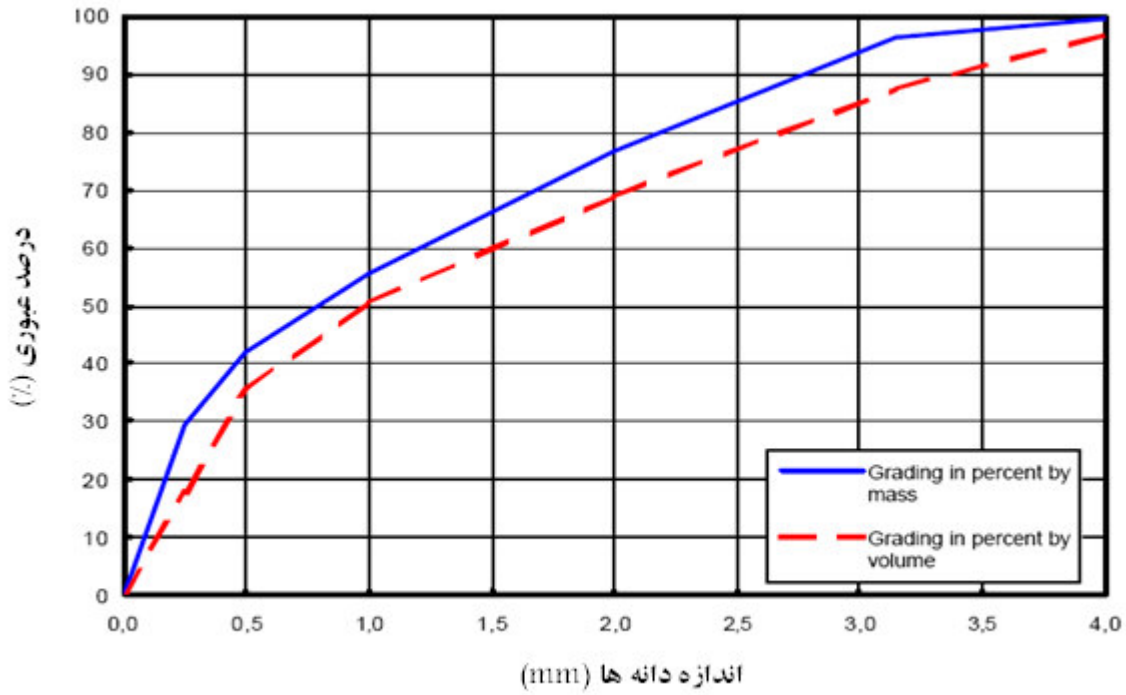
زمانی که مخلوطی از سنگدانه‌های معمولی و سبک در اختیار داریم، دانه‌بندی باید بر اساس روش حجمی صورت گیرد. دانه‌بندی بر اساس این روش، با ضرب کردن جرم هر بخش از سنگدانه‌ها در نسبت وزن مخصوص میانگین کل سنگدانه‌ها به وزن مخصوص آن بخش از سنگدانه محاسبه می‌شود. به این ترتیب، جرم کمی از سبکدانه‌های با وزن مخصوص کم نسبت حجمی بیشتری در کل سنگدانه‌ها خواهد داشت.

جدول ۲-۱- الزامات مربوط به دانه‌بندی سنگدانه‌های سبک در بتن‌های سازه‌ای

اندازه سنگدانه‌ها(mm)	درصد (وزنی) عبوری از الک با چشمه‌های مربع								
	۲۵mm	۱۹mm	۱۲/۵mm	۹/۵mm	۴/۷۵ mm	۲/۳۶µm	۱/۱۸µm	۳۰۰µm	۱۵۰µm
ریزدانه									
۰تا ۴/۷۵	....	....	....	۱۰۰	۱۰۰-۸۵	....	۸۰-۴۰	۳۵-۱۰	۲۵-۵
درشت‌دانه									
۴/۷۵ تا ۲۵	۱۰۰-۹۵	....	۶۰-۲۵	....	۱۰-۰	....	....	....	....
۴/۷۵ تا ۱۹	۱۰۰	۱۰۰-۹۰	....	۵۰-۱۰	۱۵-۰	....	....	....	....
۴/۷۵ تا ۱۲/۵	....	۱۰۰	۱۰۰-۹۰	۴۰-۳۰	۲۰-۰	۱۰-۰	....	....	....
۲/۳۶ تا ۹/۵	....	....	۱۰۰	۱۰۰-۸۰	۴۰-۵	۲۰-۰	۱۰-۰	....	....
ترکیبی از درشت‌دانه و ریزدانه									
۰تا ۱۲/۵	....	۱۰۰	۱۰۰-۹۵	....	۸۰-۵۰	....	....	۲۰-۵	۱۵-۲
۰ تا ۹/۵	....	....	۱۰۰	۱۰۰-۹۰	۹۰-۶۵	۶۵-۳۵	....	۲۰-۱۰	۱۵-۵

در صورت استفاده از ماسه‌های سبکدانه شکسته، دانه‌بندی سنگدانه‌ها اهمیت زیادی دارد و در این صورت کارپذیری بتن سبکدانه ساخته شده با این سنگدانه‌ها باید مورد بررسی دقیق‌تری قرار بگیرد. در مورد رس منبسط شکسته، وزن مخصوص دانه‌ای ریزدانه‌ها برای ماسه ۰-۴ میلیمتری می‌تواند بیش از ۲ برابر وزن مخصوص

سبکدانه‌های درشت باشد. به این ترتیب تفاوت بین دانه‌بندی بر پایه حجمی و جرمی به روشنی مشخص است.شکل ۲-۴ دو منحنی دانه‌بندی متفاوت را برای ریزدانه‌رس منبسط شده نشان می‌دهد. یکی از آن‌ها بر پایه جرمی است که به وسیله الک کردن به دست آمده و دیگری نشان دهنده دانه‌بندی بر اساس روش حجمی برای همان مصالح است. تفاوت بین دو نمودار قابل توجه است.



شکل۲-۱- مقایسه دانه‌بندی ماسه سبک‌دانه بر اساس روش‌های حجمی و جرمی

۲-۳ چگالی توده‌ای غیر متراکم

در استاندارد *EN 13055-1* حداکثر چگالی توده‌ای غیرمتراکم سبکدانه‌ها $1200 kg/m^3$ ذکر شده است. بر اساس این استاندارد چگالی توده‌ای غیر متراکم سبکدانه‌های تحویل داده شده برای ساخت بتن نباید بیش از ۱۵ درصد وزنی یا حداکثر $100 kg/m^3$ با مقادیر چگالی توده‌ای اسمی سبکدانه‌ها تفاوت داشته باشد. چگالی توده‌ای غیر متراکم سبکدانه‌ها بر اساس *ASTM C330*، باید الزامات ذکر شده در جدول ۲-۲ را دارا باشد.

جدول ۲-۲- وزن مخصوص غیر متراکم سنگدانه‌های سبک در بتن‌های سازه‌ای

اندازه سنگدانه	بیشترین چگالی توده‌ای غیرمتراکم خشک (kg/m^3)
ریزدانه	۱۱۲۰
درشت‌دانه	۸۸۰
مخلوطی از درشت‌دانه و ریزدانه	۱۰۴۰

بر اساس آیین‌نامه *ASTM C330* چگالی توده‌ای غیر متراکم سبکدانه‌های نمونه‌گیری و آزمایش شده نباید بیش از ۱۰ درصد با مقادیر وزن مخصوص‌های نمونه‌های تحویل داده شده برای آزمایش‌های پذیرش تفاوت داشته باشد، اما چگالی توده‌ای غیر متراکم خشک نباید از مقادیر جدول ۲-۲ بیشتر باشد.

۲-۴ چگالی دانه‌ای

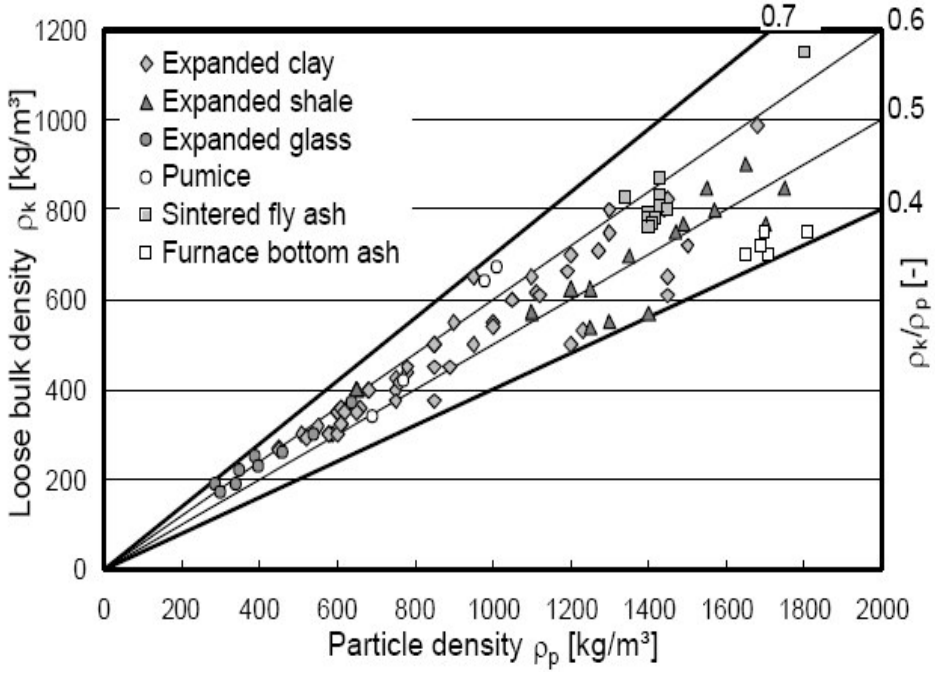
چگالی دانه‌های با قطر بیش از ۴ میلیمتر با استفاده از *EN 1097-6* تعیین و چگالی دانه‌های با قطر کمتر از ۴ میلیمتر توسط *DIN 4226-2:99* مشخص می‌شود. در استاندارد *EN 13055-1* حداکثر چگالی دانه‌ای مجاز سبکدانه‌ها ۲۰۰۰ kg/m^3 ذکر شده است.حداکثر میزان تفاوت چگالی دانه‌ای نمونه‌های تحویل داده شده با مقادیر اعلام شده توسط تولید کننده سبکدانه ۱۵ درصد یا ۱۵۰kg/m^3 است

داشتن اطلاعات در مورد چگالی دانه‌ای برای طرح اختلاط بتن‌های سبکدانه الزامی می‌باشد. در برخی محدوده‌های مجاز برای مقادیر اعلام شده در *EN 13055-1* یعنی ۱۵ درصد چگالی یا ۱۵۰kg/m^3 نیازهای واحدهای تولید بتن را که ملزم به تولید بتن‌های سبکدانه سازه‌ای با تغییراتی در محدوده‌های قابل قبول یعنی حداکثر ۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب بیش از چگالی اسمی و حداکثر ۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب کمتر از چگالی اسمی هستند را برآورده نمی‌کند. به جای استفاده از محدوده‌های ثابت ذکر شده در استاندارد *EN* محدوده‌هایی مطابق جدول ۲-۳ پیشنهاد می‌شود. مطابق این جدول سه رده رواداری برای محدوده مجاز سبکدانه ها تغییر در چگالی سبکدانه ها پیشنهاد می شود که محدوده قابل قبول برای تغییر چگالی دانه ای سبکدانه ها به ترتیب برابر ۵۰±، ۱۰۰± و ۱۵۰± کیلوگرم بر مترمکعب است. به این ترتیب تهیه کننده سبکدانه ها علاوه بر درج وزن مخصوص دانه ای سبکدانه ها بر روی بسته های سبکدانه موظف به درج محدوده رواداری تغییرات وزن مخصوص دانه ای سبکدانه ها مطابق جدول زیر است.

جدول۲-۳- تقسیم بندی های پیشنهاد شده برای چگالی توده ای غیرمتراکم

دسته	بیشترین محدوده مجاز برای چگالی دانه‌ها (kg/m^3)
ρ_{p50}	±50
ρ_{p100}	±100
ρ_{p150}	±150

در استاندارد *ASTM* در مورد چگالی دانه‌ای سبکدانه ها مطلبی عنوان نشده است. به طور کلی رابطه‌ای عمومی که بیانگر ارتباط بین چگالی توده‌ای غیر متراکم و چگالی دانه‌ای برای همه انواع سبکدانه‌ها باشد، وجود ندارد. نسبت چگالی توده‌ای غیر متراکم به چگالی دانه‌ای از ۰/۴ تا ۰/۷ متغیر است.(شکل۲-۲)



شکل۲-۲- ارتباط بین چگالی توده‌ای غیرمتراکم و چگالی دانه‌ای برای سبکدانه‌های مختلف

۲-۵ یکنواختی مقاومت دانه‌ها

هیچ روشی برای اندازه‌گیری مستقیم مقاومت دانه‌ها وجود ندارد و به جای آن مقاومت در برابر خردشدگی به عنوان معیاری برای سنجش مقاومت دانه‌ها استفاده می‌شود. مقاومت در برابر خردشدگی سبکدانه‌های با کوچکترین اندازه اسمی ۴ میلیمتر بر اساس *EN 13055-1* تعیین می‌شود. روش انجام این آزمایش در پیوست

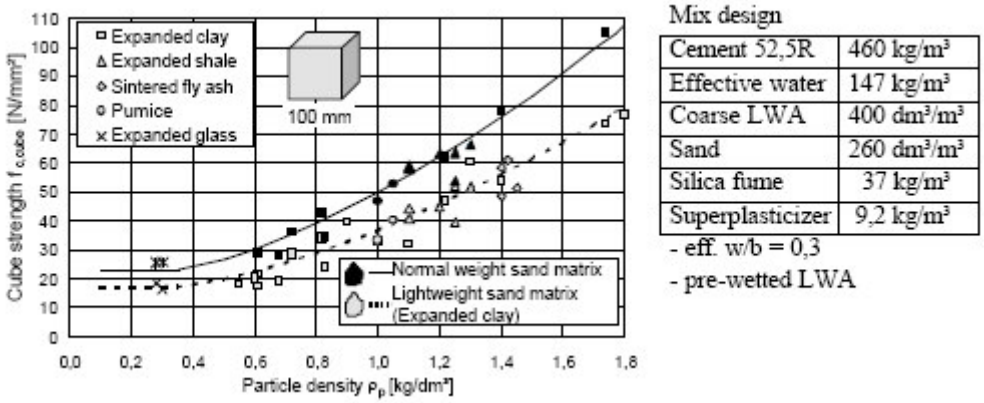
(الف) این گزارش شرح داده شده است. تعیین مقاومت در برابر خردشدگی فقط به منظور کنترل تولید استفاده می‌شود. این راه روش ساده‌ای برای کنترل یکنواختی محصول است. مقادیر به دست آمده لزوما پیش بینی عمومی قابل اعتمادی از مقاومت سبکدانه‌های آزمایش‌شده بتن را به دست نمی‌دهد. برای مصالح استفاده شده در آزمایش مقاومت در برابر خردشدگی بر اساس *EN-13055-1* قبل از انجام آزمایش به ویبره کردن مصالح نیاز است و در صورتی که برای انجام آزمایش بر اساس *DIN 4226-2:83* عمل کنیم به ویبره کردن مصالح احتیاجی نخواهد بود. مقاومت خردشدگی اندازه‌گیری شده بر اساس *EN 13055* از مقادیر اندازه‌گیری شده بدون ویبره کردن بر اساس *DIN 4226-2:83*، به طور قابل توجهی بیشتر است.

در شرایط خاص می‌توان رابطه‌ای بین مقاومت خردشدگی و مقاومت فشاری بتن‌های سبکدانه پایه‌گذاری کرد، اما این شرایط تنها در آزمایشگاه قابل ایجاد است به همین دلیل تا زمانی که رابطه‌ای بین این دو پایه‌گذاری نشده است نمی‌توان مقاومت خردشدگی را به عنوان مقاومت فشاری بتن در نظر گرفت. با وجود اینکه آزمایش مقاومت خردشدگی معمولا برای سنگدانه‌های سبک بین ۴ تا ۲۲ میلیمتر قابل استفاده است اما برای سنگدانه‌های شکسته نشده زیر ۴ میلیمتر هم نتایج قابل اعتمادی می‌دهد.

مقاومت سبکدانه‌ها در بتن در مقوله اجرا دارای اهمیت زیادی است. بر اساس*DIN4226-3: 83* ، مقاومت بتن ساخته شده از سبکدانه‌ها به عنوان معیاری برای مقایسه مقاومت خود سبکدانه‌ها استفاده می‌شود. این روش پیش‌بینی بهتری از مقاومت سبکدانه‌ها در اختیار قرار می‌دهد (نسبت به آزمایش مقاومت خردشدگی). طرح اختلاط ارائه شده در این استاندارد به این شرح است: $350\ kg/m^3$ سیمان تیپ۱ $42.5MPa$ ، $440\ lit/m^3$ درشت‌دانه سبک، نسبت موثر آب به سیمان ۰/۵ و ماسه طبیعی. این طرح اختلاط، برای ارزیابی مقاومت سبکدانه‌هایی با چگالی توده‌ای غیر متراکم کمتر از $600\ kg/m^3$ قابل استفاده است. برای سبکدانه‌های با مقاومت بیشتر (با وزن مخصوص بیشتر) مقاومت بتن تنها تحت تاثیر مقاومت سبکدانه‌ها نخواهد بود، و مقاومت بتن به مقاومت ملات آن محدود می‌شود.

آزمایشی مشابه با ماتریسی قویتر ($460\ kg/m^3$ سیمان تیپ یک با مقاومت اسمی $52.5MPa$ ، $37\ kg/m^3$ دوده سیلیس، $400\ lit/m^3$ سنگدانه سبک پیش خیس، $260\ lit/m^3$ ماسه یا ماسه طبیعی، آب موثر

$147\ kg/m^3$ ، فوق روان‌کننده ۲ درصد وزنی سیمان) در برخی مراجع پیشنهاد شده است. این طرح مقادیر دقیق‌تری را برای همه انواع سبکدانه‌های موجود به دست می‌دهد. (شکل ۲-۳)



شکل ۲-۳- مقاومت پتانسیل برای سبکدانه های مختلف با استفاده از دو ماتریس مختلف

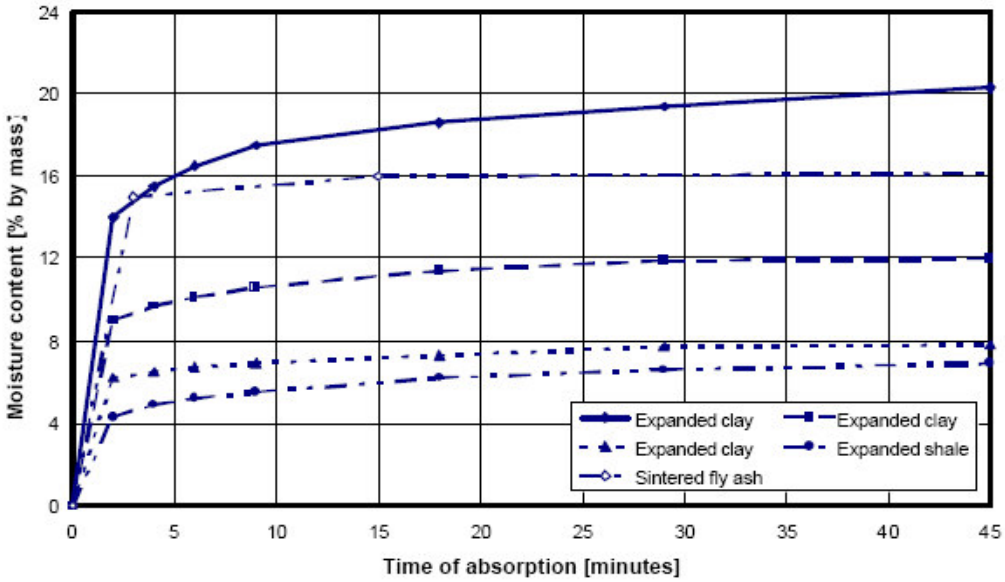
۲-۶ جذب آب

آزمایش جذب آب که در *EN 1097-6* شرح داده شده است برای سنگدانه‌های سبک در محدوده ۴ تا ۳۱/۵ میلیمتر و همچنین برای سنگدانه‌های سبک خرد نشده با اندازه کمتر از ۴ میلیمتر قابل استفاده است. روش انجام این آزمایش در پیوست (پ) این گزارش شرح داده شده است. استاندارد *DIN 4226-2:99* برای ماسه‌های سبکدانه شکسته با اندازه کمتر از ۴ میلیمتر قابل استفاده می‌باشد.

مقدار جذب آب سنگدانه‌های سبک باید به وسیله تولید کننده سنگدانه‌ها درج شود. آزمایش شرح داده شده در *EN 1097-6*، ۵ دقیقه جذب آب را برای سنگدانه‌های خشک شده در آون قبل از انجام آزمایش اجازه می‌دهد. این عمل باعث به دست آمدن نتایج غیر قابل اطمینان با انحراف معیار زیاد می‌شود. مقایسه بین سبکدانه‌های سبک با منابع آلی مختلف دشوار است زیرا که انواع زیادی از سبکدانه‌ها جذب آب زیادی در دقایق اولیه از خود نشان می‌دهند. این مسئله در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.

مقادیر به دست آمده برای جذب آب ماسه‌های سبکدانه شکسته از مقادیر معمول برای درشت‌دانه‌های سبک بیشتر است. این مقادیر معمولا بین ۲۰ تا ۴۵ درصد وزنی است که مقدار آب موجود در بتن را تقریبا $l/m3$ ۱۰۰ افزایش می‌دهد که برای طرح اختلاطی با کارپذیری مناسب مورد نیاز است. این میزان جذب آب نیازمند توجهی ویژه است که می‌تواند توسط روش

BVK که در DIN 4226-2:99 شرح داده شده است اندازه‌گیری شود.در استاندارد ASTM C330 که الزامات مربوط به سبکدانه‌ها سازه‌ای را ارائه می‌دهد، الزاماتی در مورد جذب آب ذکر نشده است.



شکل ۲-۴- مقایسه جذب آب برای انواع درشت‌دانه های سبک

در جدول۲-۴ مقادیر جذب آب ۱۵ دقیقه‌ای تا ۷ روزه برخی از سبکدانه‌های متداول مورد استفاده در ساخت بتن سبک ذکر شده است.

جدول۲-۴- جذب آب ۱۵ دقیقه تا ۷ روزه برخی از سبکدانه های متداول در ساخت بتن سبک

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

۲-۷ مقاومت در برابر چرخه ذوب و یخ

در بتن‌های سبکدانه که در معرض چرخه ذوب و یخ هستند (رده شرایط محیطی *XF1-XF4* مطابق شرایط تعریف شده در *EN 206-1*) باید از سبکدانه‌های مقاوم در برابر ذوب و یخ استفاده شود. مقاومت در برابر ذوب- یخ سبکدانه‌ها با انجام آزمایش روی بتن و با توجه به سبکدانه‌استفاده شده در آن ثبت می‌شود. روش آزمایش و ضوابط پذیرش باید در محل استفاده از سبکدانه‌ها مورد پذیرش باشد.

در رابطه با ذوب-یخ ملزومات خاصی برای سنگدانه‌های سبک در *EN 206-1* ذکر نشده است. مقاومت مناسب بتن‌های سبکدانه در برابر ذوب و یخ و آسیب ناشی از نمک‌های یخ‌زا در عمل به اثبات رسیده است. هیچ آزمایشی برای رده‌بندی مقاومت سبکدانه‌ها در *EN 13055-1* ذکر نشده است. به جای آزمایش مقاومت سبکدانه ها در برابر ذوب و یخ، بتن سبک ساخته شده با سبکدانه ها تحت شرایط ذوب و یخ بررسی می گردد. ضوابط لازم برای پذیرش سنگدانه‌ها از نظر مقاومت در برابر ذوب و یخ براساس *EN 206-1* را می‌توان به صورتی که در ادامه آمده است تبیین نمود. بتن سبکدانه در شرایط رطوبتی آزمایش می‌شود که معرف شرایط در محل برای سازه است. آزمایش انجام شده باید آزمایشی باشد که در محل استفاده از بتن سبکدانه در مورد آن اتفاق نظر وجود داشته باشد. عملکرد این بتن سبکدانه باید حداقل همانند عملکرد بتنی معمولی که الزامات مربوط به نسبت آب به سیمان، رده مقاومت، عیار سیمان و مقدار هوا را ارضا می‌کند، باشد. به صورت مشابه استاندارد *ASTM* بیان می‌کند که در صورت نیاز به انجام آزمایش ذوب یخ، تولید کننده سبکدانه‌ها باید با انجام آزمایش روی بتن ساخته شده از سبکدانه‌ها، مقاوم بودن در برابر ذوب یخ را نشان دهد.

مقاومت در برابر یخ زدن برای سنگدانه‌های با وزن معمولی، معمولا بر اساس یکی از روش‌های ذکر شده در *EN 1367-1*، *DIN 52104-1* یا *NT-Build 485* که در اروپا رایج است آزمایش می‌شود. اساس روش این آزمایش‌ها به صورت زیر است.

- روش ذکر شده در *EN* شامل ۱۰ چرخه ذوب و یخ در محدوده دمای ۱۷/۵- تا ۲۰ درجه سانتیگراد در آب/ یخ است. حد آن بسته به اینکه سازه نهایی چقدر در معرض ذوب و یخ قرار دارد، ۱ یا ۲ یا ۴ درصد شکست سنگدانه‌هاست.

- روش ذکر شده در *DIN* دارای ۲۰ چرخه ذوب و یخ در هوا (بعد از غوطه‌ور کردن سنگدانه‌ها در آب به مدت ۲۴ ساعت) در دمای بین ۱۵- تا ۲۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. محدوده تعیین شده برای شکست سنگدانه‌ها همانند محدوده تعیین شده در *EN* است.
- روش *NT-Build* همانند روش ذکر شده در EN است با این تفاوت که در این روش به جای اینکه سنگدانه‌ها در آب شرب آزمایش شوند در محلول ۱ درصد *NaCl* آزمایش می‌شوند. از آنجا که این آزمایش برای سنگدانه‌های استفاده شده در پروژه‌های راهسازی طراحی شده است محدوده‌های ذکر شده برای شکست سنگدانه‌ها بسته به میزان ترافیک عبوری از روی آن ۲، ۴، ۹، و بیش از ۱۴ درصد می‌باشد.

آزمایش‌های انجام شده بر روی انواع مختلفی از سبکدانه‌ها، بر اساس آزمایش‌های ذکر شده نشان می‌دهد که روش مطرح شده در استاندارد *DIN* سختگیرانه‌ترین و روش مطرح شده در *NT-Build* سهل‌گیرانه‌ترین ترین روش‌ها برای انجام این آزمایش هستند.

۲-۸ دانه‌های شکسته در سنگدانه‌ها

در هیچ یک از دو استاندارد *ASTM*، *EN* پیش‌بینی‌ای در مورد دانه‌های شکسته در سنگدانه‌ها صورت نگرفته است. اگر سنگدانه‌های تحویل گرفته شده شامل دانه‌های شکسته و غیرشکسته بود، مقدار دانه‌های شکسته باید ذکر شود. اقدمات لازم، باتوجه به محل استفاده بتن باید صورت گیرد.

در صورتی که سبکدانه‌های با ساختار تخلخل سطحی غیرمرتبط، شکسته شده باشند، وجود دانه‌های شکسته، ویژگی‌های مربوط به خاصیت جذب آب سنگدانه‌ها را به طور قابل توجهی تحت تاثیر قرار می‌دهد.

۲-۹ ریزدانه‌ها در سنگدانه

مقدار ریزدانه در سنگدانه‌های سبک بر اساس *EN 933-1* و به وسیله الک کردن در حالت خشک تعیین می‌شود. در بتن‌های معمولی مقدار ریزدانه‌ها، مقدار آب مورد نیاز و همچنین کارپذیری بتن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. برخلاف سنگدانه‌های معمولی، بیشتر ربزدانه‌های سبک دارای دانه‌های شکسته هستند. وقوع واکنش‌های پوزولانی برای برخی از این ربزدانه‌ها به اثبات رسیده است. مشخص کردن تاثیر تغییر مقدار ریزدانه‌های سبک بر جذب آب

بتن سبکدانه به ندرت قابل انجام است. برای جلوگیری از خرد شدن سنگدانه‌های ترد نیاز در حین حمل و نقل و استفاده آن‌ها، دقت بیشتری لازم است.

۲-۱۰ ترکیبات تشکیل‌دهنده سبکدانه

در سبکدانه‌ها نباید موادی وجود داشته باشد که با توجه به زمینه استفاده آن‌ها بر این مصالح تاثیرات منفی به جای بگذارد. در ادامه برخی از مواد مضری که ممکن است در سنگدانه ها وجود داشته باشد بررسی می گردد.

کلریدها: وجود کلرید در سبکدانه‌ها باعث خوردگی آرماتورهای موجود در بتن می‌شود. به همین دلیل باید برای مقدار کلرید مجاز محدوده‌هایی تعیین کرد.

مواد آلی: در استاندارد *ASTM* ذکر شده است که سبکدانه‌هایی که تحت آزمایش تعیین ناخالصی‌های آلی تغییر رنگ می‌دهند باید مرجوع گردند؛ مگر زمانی که مشخص شود این تغییر رنگ به دلیل وجود برخی مواد شیمیایی است که تاثیر منفی بر خواص بتن ندارند. بر اساس استاندارد *EN* دو آزمایش رایج برای بررسی وجود مواد آلی در سبکدانه‌ها انجام می‌شود. این آزمایش‌ها آزمایش هیدروکسید سدیم و آزمایش اسید *fulvo* هستند. اگر رنگ این مایعات در آزمایش، از مقادیر استاندارد روشن‌تر باشد می‌توان فرض کرد که مواد آلی در این سبکدانه‌ها وجود ندارد. در صورتی که مواد آلی موجود در سبکدانه‌ها باعث تغییر سرعت گیرش یا سخت شدن ملات یا بتن شوند، باید مقدار این مواد تعیین شده و تاثیرات آن‌ها روی مقاومت و زمان گیرش تعیین شود. افزایش زمان گیرش ملات یا بتن نباید بیش از ۱۲۰ دقیقه باشد. کاهش مقاومت فشاری ملات یا بتن برای نمونه‌ها نباید بیش از ۲۰ درصد باشد. وجود مواد قندی در سبکدانه‌ها تاثیری بر روی رنگ شناساگرهای ذکر شده نخواهند داشت. به همین دلیل در صورت احتمال وجود مواد قندی، سبکدانه‌ها باید بر اساس روش ذکر شده در *EN 1744-1:1998* آزمایش شده تا الزامات مربوط به مقاومت و زمان گیرش را داشته باشند.

لک شدگی: بر اساس *ASTM* در صورتی که بعد از تحلیل شیمیایی سبکدانه‌ها مشخص شود که لکه‌های ایجاد شده روی به دلیل وجود موادی است که دارای مقادیر *Fe2O3* بیش از ۱/۵ میلی گرم در نمونه ۲۰۰ گرمی است سبکدانه ها رد می‌شوند.

۲-۱۱ واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها

برخی سنگدانه‌ها با مواد قلیایی موجود در بتن واکنش داده و در صورت وجود رطوبت، این واکنش‌ها باعث انبساط و ایجاد ترک در بتن یا ملات می‌شوند. معمول‌ترین این واکنش‌ها بین مواد قلیایی و سیلیکاتی و همچنین بین مواد قلیایی و کربناتی رخ می‌دهد. برای جلوگیری از این واکنش‌ها اقدامات زیر انجام می‌شود:

- محدود کردن مواد قلیایی موجود در مخلوط بتن
- استفاده سیمان با محتوای قلیایی کم
- استفاده از سنگدانه‌هایی که در واکنش‌ها شرکت نمی‌کنند
- کاهش درجه اشباع بتن با آب

۲-۱۲ جمع شدگی

در استاندارد *ASTM C330* تصریح شده است که که حداکثر جمع شدگی بتن ساخته شده از سبکدانه نباید بیش از ۰/۰۷ درصد باشد. در استاندار *EN 13055* ضابطه‌ای در این مورد ذکر نشده است.

فصل سوم– ساخت بتن سبک

۳–۱ مقدمه

پیمانه‌گیری، اختلاط، حمل‌ونقل و عملیات ساخت بتن سبکدانه شبیه به فرایندهای متناظر در بتن معمولی است، هرچند که تفاوت‌های خاصی نیز وجود دارد، خصوصاً در نحوه نسبت‌بندی و روش‌های پیمانه‌گیری که منجر به بدست آوردن محصول نهایی با کیفیت مناسب خواهد شد. وزن و ویژگی‌های جذب کنندگی دانه‌های سبک، متفاوت با سنگدانه‌های متراکم معمولی هستند و باید به دقت مورد توجه قرار گیرند. این ویژگی‌ها بر نحوه توزین مصالح تشکیل‌دهنده بتن تأثیر می‌گذارد. بنابراین پیمانه‌گیری و توزین مصالح بتن سبک تا حدی متفاوت با توزین مصالح بتن معمولی است. اصول پایه روش‌های پیمانه‌گیری بتن سبکدانه که در این بخش بیان می‌شود، بر مبنای دستورالعمل‌های ذکرشده در استانداردها و راهنماهای موجود مانند ASTM ، EN و نظایر آن می‌باشد. روش‌های متداول دیگری امروزه در نقاط مختلف به‌کار می‌روند که ممکن است مورد استفاده قرار گیرند. شکل ۳–۱ نمونه‌ای از دستگاه کنترل پیمانه‌گیری کامپیوتری را نشان می دهد.

شکل ۳–۱– نمونه ای از کارگاه پیمانه گیری و ساخت بتن

کنترل کیفیت بتن سبکدانه مستلزم تأکید ویژه و توجه به اندازه‌گیری مصالح و روش‌های پیمانه‌گیری به همراه کنترل مقدار آب اختلاط و جذب آب مصالح ریزدانه است. در ادامه به منظور آشنایی بیشتر با فاکتورهایی که بر

پیمانه‌گیری موثر است، به صورت اجمالی به تعریف این پارامترها پرداخته می‌شود. آب آزاد و جذب شده، حجم های مطلق، وزن مخصوص توده‌ای و وزن مخصوص دانه‌ای پارامترهایی هستند که به اختصار به آن‌ها اشاره می‌شود. سپس عواملی که بر وزن مخصوص تأثیر گذارند، مرور می‌شوند. در پایان فصل نیز مطالبی در خصوص پیمانه‌گیری درشت‌دانه و ریزدانه سبک و کنترل مخلوط ذکر شده است.

۳-۲ آب آزاد و آب جذب شده

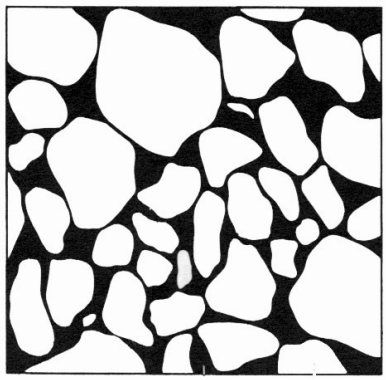
یکی از نکات مهم در پیمانه‌گیری مخلوط بتن سبک، داشتن شناخت درست از آب به‌کار رفته در مخلوط است. مجموع آبی که در تولید واحد حجم بتن مصرف شده است، به دو بخش تقسیم می‌شود. یکی آب جذب شده توسط سنگدانه‌ها و دیگری آب آزاد که اسلامپ را کنترل می‌کند و زمانی که با مقدار سیمان داده شده مخلوط می‌شود، بر مقاومت خمیر سیمان تأثیر می‌گذارد. مقدار آب جذب شده تابعی از نوع مصالح سبکدانه، جذب رطوبت اولیه (پیش‌خیس شدگی) و زمان اختلاط است. آب جذب شده، حجم دانه‌ها یا بتن را تغییر نمی‌دهد، چون درون مصالح جای می‌گیرد. از همه مهم‌تر این است که آب جذب شده تأثیری برروی نسبت آب به سیمان و در نتیجه بر مقاومت بتن و یا بر اسلامپ آن نخواهد گذاشت. تفاوت اصلی بتن سبکدانه با بتن معمولی در میزان جذب آب سبکدانه‌ها است. به دلیل متخلخل بودن سبکدانه‌ها، میزان جذب آب سبکدانه چندین برابر سنگدانه‌های متراکم معمولی است و این امر بر کارایی مخلوط بتن تازه و مقاومت و پایایی بتن سخت شده تأثیر گذار 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 سنگدانه‌ها در آب خالص اندازه گیری می‌شود، در حالی‌که در بتن تازه مخلوطی از آب و سیمان وجود داشته که طبیعتاً غلیظ‌تر از آب بوده و میزان جذب آن کمتر از آب خالص است. به‌علاوه با گذشت زمان، آب آزاد مخلوط بتن کاهش یافته و در نتیجه جذب موثر کاهش می‌یابد. معمولاً میزان آب جذب شده توسط سبکدانه‌ها در بتن سبکدانه را برابر میزان جذب آب ۳۰ دقیقه‌ای سبکدانه در آب خالص در نظر می‌گیرند.

۳-۳ حجم ظاهری[۱]

حجم ظاهری مصالح حجمی است که جرم مشخصی از مصالح در حالت متراکم یا غیرمتراکم اشغال می‌کند. این حجم شامل حجم بین ذرات مصالح نیز می باشد. در هنگام توزین و پیمانه‌گیری بتن در روش حجمی، از حجم

[۱] Apparent volume

ظاهری مصالح استفاده می‌شود. به دلیل آن‌که تراکم ذرات بر حجم ظاهری مصالح تأثیرگذار است، حجم ظاهری در دو حالت متراکم نشده و متراکم شده، اندازه‌گیری می‌شود. شکل۳-۲ حجم ظاهری سنگدانه‌هایی با جرم معین را نشان می‌دهد. به‌عبارت دیگر حجم ظاهری، مجموع حجم سنگدانه و حجم حفرات هوای میان آنها است. حجم ظاهری معمولاً برای پیمانه‌گیری حجمی سنگدانه‌ها استفاده می‌شود. هرقدر سنگدانه‌ها متراکم‌تر گردند، حجم ظاهری جرم معینی از آنها کاهش می‌یابد. در صورتی‌که هدف اندازه‌گیری، حجم خالص سنگدانه‌ها باشد، از پارامتر حجم مطلق استفاده می‌شود.



شکل۳-۲- حجم ظاهری سنگدانه ها در یک حجم مشخص

۳-۴ حجم مطلق[۲]

حجم اشغال شده توسط سنگدانه‌ها بدون در نظر گرفتن فضای خالی بین آنها، حجم مطلق نام دارد. برای مثال در شکل ۳-۲ مساحت ناحیه سفیدرنگ، حجم مطلق سبکدانه‌ها را نشان می‌دهد. در بتن سبک از مصالح سبک به‌جای مصالح با وزن معمولی به منظور دستیابی به وزن مطلوب در هنگام سخت شدن بتن استفاده می‌شود.. در هنگام طرح مخلوط بتن، مجموع حجم‌های 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 محاسبه نسبت‌های اختلاط مورد استفاده قرار می‌گیرد، درحالی‌که حجم ظاهری در هنگام توزین مصالح و ساخت بتن به کار می‌رود. طبق تعریف حجم مطلق مواد دانه‌ای متراکم نشده، حجم شبکه مواد جامد پس از حذف شدن خلل و فرج هوای بین ذرات است. حجم مطلق از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

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

[۲] Absolute volume

تعیین حجم مطلق عناصر تشکیل‌دهنده بتن مانند سنگدانه متراکم طبیعی، سیمان و آب به دلیل معلوم بودن وزن مخصوص دانه‌ای این عناصر کار آسانی است. از سوی دیگر تعیین حجم مطلق سبکدانه‌ها به دلیل متغیر بودن وزن مخصوص دانه‌ای سبکدانه‌ها نسبتاً مشکل است. تعریف وزن مخصوص دانه‌ای سبکدانه‌ها در ادامه آمده است.

۳-۵ وزن مخصوص دانه ای[۳]

اگر حجم مواد جامد به نحوی درنظر گرفته شود که شامل منافذ غیر قابل نفوذ، به‌جز لوله‌های موئینه نیز گردد، وزن مخصوص به‌دست آمده را وزن مخصوص دانه‌ای می‌گویند. در این صورت وزن مخصوص دانه‌ای برابر است با نسبت وزن سنگدانه‌های خشک شده در گرم‌خانه برای مدت ۲۴ ساعت، به وزن آب هم‌حجم مواد جامدی که شامل منافذ غیر قابل نفوذ نیز باشد. وزن مخصوص دانه‌ای سنگدانه‌ها به وزن مخصوص کانی‌هایی که دانه‌های سنگی از آن ساخته شده‌اند و هم‌چنین به مقدار منافذ داخل آن‌ها بستگی دارد.

۳-۶ وزن مخصوص توده‌ای[۴]

وزن مخصوص توده‌ای، وزن یک مترمکعب مصالح متراکم شده یا غیر متراکم، تقسیم بر وزن یک متر مکعب آب است. تفاوت اصلی وزن مخصوص توده‌ای و وزن مخصوص دانه‌ای در این است که در هنگام محاسبه وزن مخصوص توده‌ای حجم سبکدانه‌ها به همراه فضای خالی داخل سبکدانه‌ها و فضای بین آنها در نظر گرفته می‌شود، اما در محاسبه وزن مخصوص دانه‌ای صرفاً حجم اشغال شده توسط ذرات جامد تشکیل‌دهنده سبکدانه‌ها و منافذ موئینه غیر مرتبط موجود در داخل سبکدانه‌ها ملاک محاسبات است. بنابراین وزن مخصوص دانه‌ای همیشه بیش از وزن مخصوص توده‌ای مصالح است. در محاسبه حجم مطلق مصالح از وزن مخصوص دانه‌ای و در هنگام محاسبه حجم ظاهری مصالح از وزن مخصوص توده‌ای استفاده می‌شود.

۳-۷ عوامل موثر بر تغییرات وزن مخصوص سبکدانه

همان‌طور که اشاره شد، وزن مخصوص‌های مختلفی را می‌توان برای سبکدانه تعریف نمود. این وزن مخصوص‌ها، تأثیر مستقیمی بر پیمانه‌گیری و توزین بتن سبکدانه دارد. در این قسمت به بررسی عوامل موثر بر وزن مخصوص سبکدانه 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

---

[۳] Particle density
[۴] Bulk density

درصد رطوبت مختلف است. اگر مصالح سبکدانه بدون درنظرگرفتن تغییرات وزن مخصوص و متعاقباً تغییرات حجم، مورد پیمانه‌گیری قرار گیرند، ممکن است مشکلاتی در محاسبات حجم بتن تولید شده ایجاد شود. برای جلوگیری از بروز چنین مشکلاتی، تنظیمات مختلفی برای نسبت‌بندی استاندارد بتن سبک وزن در *ACI 211.2* پیشنهاد شده است. برای حصول اطمینان از این‌که محصول بتن به‌دست آمده، دارای حجم یا کیفیت موردنظر می‌باشد. این تنظیمات شامل تنظیم اندازه وزن‌های پیمانه‌ای مصالح سبک وزن (درشت دانه و یا ریز دانه) است.

وزن مخصوص توده‌ای مصالح متراکم نشده خشک به دانه بندی، شکل، اندازه و وزن مخصوص ذرات بستگی دارد. مصالح شکسته شده‌ی تیزگوشه، دارای خلل و فرج و فضاهای خالی بیشتری در میان ذرات مصالح هستند تا قطعاتی که شکل گرد یا کروی دارند. مصالح بددانه بندی شده(تماماً یک اندازه) معمولاً دارای خلل و فرج‌های بیشتری نسبت به موادی که دارای دانه بندی پیوسته هستند، می‌باشند.

اگر تغییراتی در منبع موادخام، وسایل متراکم کردن یا غربال‌گری و یا در روش‌های تولید صورت گیرد، محصول به‌دست آمده حاوی فضاهای خالی متفاوت خواهد بود. ممکن است سبکدانه با اندازه متفاوت دارای فضای خالی نسبتاً ثابتی باشند. هر ابزار تولیدی مقدار فضای خالی مشخصی برای هر اندازه ای از مصالح تولید شده دارد که اطلاعات مربوط به آن را می‌توان از آن کارخانه به‌دست آورد.

برخلاف وزن مخصوص توده‌ای که با تغییرات سبکدانه و میزان تراکم آن تغییر می‌کند، وزن مخصوص دانه‌ای مصالح ثابت است. بنابراین حجم مطلق یا حجم جابه‌جا شده در بتن برای یک مصالح سبک با وزن معین حتی اگر میزان متراکم شدن آن تغییر کند، یکسان خواهد بود. البته وزن مخصوص دانه‌ای با تغییر رطوبت سنگدانه تغییر می‌کند. هرچه رطوبت سنگدانه‌ها بیشتر باشد، وزن مخصوص دانه‌ای آن هم بیشتر خواهد بود. استفاده درست از این اصول اولیه، پیمانه گیری، تولید بتن و تحویل بتن سبک با اسلامپ مورد نظر و برای هر نوع کاربری را ممکن می‌سازد. در ادامه به ارائه روشی برای پیمانه‌گیری سبکدانه اشاره می‌شود.

۳-۸ پیمانه‌گیری درشت‌دانه

در پیمانه‌گیری بتن‌های سبکدانه به روش وزنی، به دلیل متغیر بودن وزن مخصوص سنگدانه‌ها، برای دستیابی به حجم مطلوبی از بتن، باید وزن مخصوص سبکدانه‌ها به طور پیوسته اندازه‌گیری شود و در صورت تغییر وزن مخصوص سبکدانه‌ها، وزن پیمانه باید به نحوی تنظیم شود که حجم کل سبکدانه در پیمانه‌گیری ثابت بماند. در یک واحد تولید بتن پرکار، این عمل بسیار وقت‌گیر خواهد بود. روشی که در ادامه ارائه می‌شود، جایگزینی بهتر و سریع‌تر برای این روش خواهد بود. با این وجود نتایج به دست آمده از هر دو روش موفقیت‌آمیز بوده است.

در این روش تنظیمات حجم برای هر پیمانه به طور خودکار انجام می‌شود. هم‌چنین از ظرف بزرگتری برای سنجش وزن مخصوص استفاده می‌کنیم که به قیف توزین معروف است. اساس روش به این صورت است که سبکدانه‌ها را در قیف توزین ریخته و با محاسبه وزن مخصوص غیرمتراکم چند نمونه و داشتن وزن مصالح درون قیف، حجم قیف را حساب می‌کنیم (v_0). حال در صورتی‌که حجم v_1 از سبکدانه‌ها را برای ساخت بتن احتیاج داشته باشیم، قیف را پر کرده و وزن می‌کنیم (m_1). با تقسیم این عدد بر حجم قیف که برابر حجم سبکدانه‌هاست، (v_0) وزن مخصوص غیرمتراکم مصالح درون آن تعیین می‌شود (m_1/v_0). برای تکمیل پیمانه‌گیری به حجمی برابر v_1-v_0 از سبکدانه‌ها احتیاج داریم که با ضرب کردن این حجم در وزن مخصوص غیرمتراکم که در مرحله قبل محاسبه شد، وزن آن حساب می‌شود. بدین‌ترتیب وزن موردنیاز برای تکمیل پیمانه‌گیری به دست می‌آید.

با استفاده از این روش بر مبنای وزن سبکدانه‌ای که در مرتبه اول در قیف توزین داریم، می‌توان جدولی تهیه کرد که ستون‌های آن به ترتیب وزن اولین قیف پر، وزن مخصوص غیر متراکم، وزن دومین قیف و وزن کل سنگدانه‌هاست. به‌این ترتیب برای پیمانه‌گیری حجم مشخص $v1$ از سنگدانه، پس از پر کردن قیف و وزن کردن آن به ردیفی از جدول مراجعه می‌کنیم که عدد ستون اول آن نزدیک به وزن قیف پر می‌باشد. به این‌ترتیب وزن‌های مورد نیاز برای پیمانه‌گیری مشخص می‌شود. برای سایر نسبت‌های اختلاط نیز، در صورت تغییر نکردن نوع سبکدانه‌ها یا دانه‌بندی آن‌ها، می‌توان چنین جدولی را تشکیل داد، زیرا با تغییر نوع سبکدانه یا دانه‌بندی آن حجم ظرف پیمانه‌گیری تغییر می‌کند. علت تغییر حجم ظرف پیمانه‌گیری این است که مصالح متفاوت با شیب سطحی مختلفی در ظرف به حالت پایداری می‌رسند. به همین علت در صورت تعویض سبکدانه‌ها باید انتظار داشته باشیم که v_0 تغییر کند.

اگر بار بتنی کمتر از ظرفیت اسمی میکسر باشد، برای محاسبه وزن سبکدانه‌ها در این مخلوط می‌توان از وزن مخصوص ظاهری سبکدانه‌های پیمانه قبلی استفاده کرد و وزن مورد نیاز را از ضرب کردن این وزن مخصوص در حجم ظاهری سبکدانه در طرح اختلاط و سپس در حجم مورد نیاز بتن محاسبه نمود. حل مثالی عددی را برای روشن شدن این مطلب ارائه می‌کنیم. مشخصات لازم برای بتنی سبک به همراه ویژگی‌های درشت‌دانه و ریزدانه آن به صورت زیر است:

مشخصات بتن: مقاومت ۲۸ روزه MPa ۲۰، اسلامپ mm ۷۵-۱۰۰، هوای وارد شده ۱±۶ درصد، وزن خشک شده در هوا حداکثر kg/m^3 ۱۶۰۰، وزن مرطوب حداکثر kg/m^3 ۱۶۸۰، بزرگترین اندازه سنگدانه $19mm$

درشت‌دانه سبک: دانه‌بندی بر اساس $ASTM\ C330$، خشک شده در آون (OD)، وزن مخصوص غیر متراکم kg/m^3 ۷۳۰، ضریب وزن مخصوص(خشک) ۱/۴۰، جذب آب ۱۲/۶ درصد.

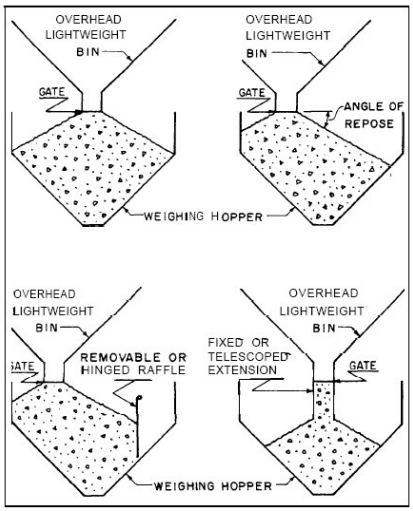
ریزدانه: دانه‌بندی مطابق *ASTM C 330*، خشک شده در کوره(*OD*)، وزن مخصوص غیر متراکم kg/m^3 ۹۵۶، ضریب وزن مخصوص (خشک) ۱/۷۴ ، جذب ۱۳/۴ درصد.

طرح این مخلوط با استفاده از روش وزنی ذکر شده در *ACI211-2* تهیه شده و در جدول ۳-۱ نشان داده شده است. برای ساخت این بتن از میکسری با حجم m^3 ۵ استفاده می‌شود.

جدول ۳-۱- نسبت‌های اختلاط آزمایشگاهی

مقدار برای هر متر مکعب (وزن مخصوص بتن تازه = ۱۶۷۴ کیلوگرم بر مترمکعب)			
عنوان	وزن پیمانه(kg)	حجم غیر متراکم(m^3)	حجم مطلق(m^3)
سیمان	۳۳۵	۰/۲۲۲	۰/۱۰۶
آب آزاد	۱۸۱	۰/۱۸۱	۰/۱۸۱
هوای داخل شده با مواد حبابساز	۰	۶ درصد	۰/۰۶۰
درشت دانه سبک (خشک)	۴۵۹	۰/۶۳۰	۰/۳۲۸
ریز دانه سبک (خشک)	۵۶۵	۰/۵۹۰	۰/۳۲۵
آب جذب شده	۱۳۴	۰/۱۳۴	–
جمع	۱۶۷۴		۱/۰۰۰

برای آغاز پیمانه‌گیری همانطور که ذکر شد اولین مرحله محاسبه حجم قیف توزین است. وقتی دریچه تخلیه مخزن حاوی درشت‌دانه‌های سبک باز می‌شود، این مصالح به درون قیف سرازیر شده و بالا می‌آیند تا به سطح دریچه برسند. برخی قیف‌ها ممکن است کمی متفاوت باشند که با اعمال اصلاحاتی مطابق شکل اصلاح می‌شوند.



شکل ۳-۳- ترتیب قرارگیری مخزن بالایی و قیف وزن‌کشی

ابتدا قیف توزین پر شده و وزن کل سبکدانه‌های درون قیف از روی ترازو خوانده می‌شود. سپس قیف تخلیه شده و وزن مخصوص سه یا چهار نمونه غیر متراکم تعیین می‌گردد. اگر وزن خالص قیف پر ۲۱۱۰ kg و متوسط وزن مخصوص مصالح درون آن ۷۷۲ kg باشد، حجم قیف پر به صورت زیر محاسبه می‌شود: ۲۱۱۰÷۷۷۲=۲/۷۳ v_0 = برای اطمینان، این عمل را چند بار تکرار می‌کنیم.

با فرض اینکه هر میکسر گنجایش ۵ m^3 از مخلوط بتن را دارا باشد، حجم کل درشت‌دانه سبک مورد نیاز در طرح اختلاط مورد بررسی ۵×۰/۶۳=۳/۱۵ خواهد بود. با توجه به اینکه حجم قیف ۲/۷۳ m^3 است، برای پیمانه‌گیری کل سبکدانه به دو مرتبه وزن‌کشی نیازمندیم. حجم مورد نیاز برای پیمانه‌گیری در مرحله دوم برابر ۳/۱۵-۲/۷۳ =۰/۴۲ خواهد بود. با توجه به موجود بودن وزن مخصوص غیر متراکم که در مرحله اول محاسبه شد، وزن مورد نیاز در مرحله دوم توزین ۰/۴۲×۷۷۲=۳۲۴ kg خواهد بود. برای سادگی کار می‌توان جدولی تشکیل داد و با استفاده از آن، با معلوم بودن وزن اولیه قیف پر وبا داشتن حجم آن، وزن مخصوص مصالح محاسبه شده با تفریق حجم کل سنگدانه‌های موردنیاز از حجم مصالح درون قیف، حجم موردنیاز برای توزین پیمانه دوم به دست می‌آید. از حاصل ضرب این حجم در وزن مخصوصی که در مرحله قبل محاسبه شد، وزن پیمانه دوم حساب می‌شود. یعنی می‌توان با پیدا کردن وزن اولین قیف پر روی جدول، وزن مورد نیاز برای پیمانه دوم را مشخص کرد. ستون آخر جدول در صورت نیاز به ثبت وزن کل درشت‌دانه‌های سبک در برگه تحویل، به جدول اضافه می‌شود.

جدول۳-۲- جدول پیمانه‌گیری برای ۵ m^3 بتن(حجم قیف پر=۲/۷۳ m^3)

(۱) وزن اولین قیف پر (Kg)	(۲) وزن مخصوص متراکم نشده (Kg/m^3)	(۳) وزن دومین قیف پر (Kg)	(۴) وزن کل سنگدانه (Kg)
۱۸۰۰	۶۵۹	۲۷۷	۲۰۷۷
۱۸۲۵	۶۶۸	۲۸۱	۲۱۰۶
۱۸۵۰	۶۷۸	۲۸۵	۲۱۳۵
۱۸۷۵	۶۸۷	۲۸۹	۲۱۶۴
۱۹۰۰	۶۹۶	۲۹۲	۲۱۹۲
۱۹۲۵	۷۰۵	۲۹۶	۲۲۲۱
۱۹۵۰	۷۱۴	۳۰۰	۲۲۵۰
۱۹۷۵	۷۲۳	۳۰۴	۲۲۷۹
۲۰۰۰	۷۳۳	۳۰۸	۲۳۰۸

۲۳۳۷	۳۱۲	۷۴۲	۲۰۲۵
۲۳۶۵	۳۱۵	۷۵۱	۲۰۵۰
۲۳۹۴	۳۱۹	۷۶۰	۲۰۷۵
۲۴۲۳	۳۲۳	۷۶۹	۲۱۰۰
۲۴۵۲	۳۲۷	۷۷۸	۲۱۲۵
۲۴۸۱	۳۳۱	۷۸۸	۲۱۵۰
۲۵۱۰	۳۳۵	۷۹۷	۲۱۷۵
۲۵۳۹	۳۳۹	۸۰۶	۲۲۰۰
۲۵۶۷	۳۴۲	۸۱۵	۲۲۲۵
۲۵۹۶	۳۴۶	۸۲۴	۲۲۵۰

۳-۹ پیمانه‌گیری ریزدانه

پیمانه‌گیری ریزدانه‌های سبک با استفاده از روش قبل امکان‌پذیر نمی‌باشد، زیرا تغییر مقدار آب سطحی باعث متورم شدن سنگدانه‌ها خواهد شد. به‌همین دلیل، ریزدانه‌های سبک با روشی بسیار مشابه ماسه طبیعی، با در نظر گرفتن مقدار کل رطوبت، بر اساس وزن پیمانه‌گیری می‌شوند. مشکل اصلی در توزین سبکدانه‌های ریز تعیین درصد رطوبت مصالح است. از آن‌جایی‌که رطوبت موجود در ریزدانه‌های سبک ممکن است به صورت آب جذب شده، آب سطحی یا آب آزاد وجود داشته باشد، رطوبت‌سنج‌های استفاده شده برای ماسه‌های طبیعی، نتایج رضایت‌بخشی را برای ریزدانه‌های سبک نمی‌دهد. نتایج به دست آمده از تعیین درصد رطوبت نمونه‌های کوچک(حدود ۵۰۰ گرم) خشک شده در آون در دمای ۱۰۰ تا ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد، رضایت‌بخش بوده است. مقدار کل رطوبت(رطوبت جذب شده به‌علاوه رطوبت سطحی) از مقایسه وزن نمونه مرطوب با وزن خشک آن به دست می‌آید. آزمایش اندازه‌گیری رطوبت باید حداقل یک‌بار در روز یا در هر زمانی که از مصالح جدیدی با مقدار رطوبت متفاوت استفاده می‌شود، انجام شود. به منظور اصلاح مقدار ریزدانه‌های سبک و استفاده از مقادیر وزن مخصوص خشک شده در آون این مصالح، بر اساس آنچه در بالا نشان داده شد، تعیین می‌شود. چنان‌چه وزن مخصوص خشک به دست آمده، با آنچه که در نسبت‌های اختلاط به‌کار رفته در آزمایشگاه داشتیم، متفاوت باشد، (طبق مثال ۹۵۶ کیلوگرم بر مترمکعب) آن‌گاه وزن مصالح خشک اصلاح شده، با ضرب کردن حجم غیرمتراکم(۰/۵۹ مترمکعب) در وزن مخصوص خشک جدید، به‌دست می‌آید این وزن خشک اندازه‌گیری شده با احتساب مقدار رطوبتی که قبلاً محاسبه شد، مقدار واقعی وزن را به‌دست می‌دهد.

۳-۱۰ فرایند اختلاط

فرایند اختلاط در یک بتن سبکدانه مشابه بتن معمولی است و این بتن در دستگاه مخلوط‌کن مشابه تولید می‌شود. یک فرایند اختلاط دیگر این است که بتن در دو مرحله‌ی جداگانه مخلوط شود. براساس تجربیات فراوان سالیان گذشته، این روش به‌خصوص برای بتن‌های سبکدانه‌ی سازه‌ای با چگالی کم موفقیت‌آمیز است. در مرحله‌ی اول، ملات که شامل سیمان، ماسه، مواد افزودنی و حدود دوسوم آب اختلاط است، تولید می‌شود. در مرحله‌ی دوم، درشت‌دانه‌ها به‌همراه باقیمانده‌ی آب اضافه شده و آخرین هم‌زدن‌ها انجام می‌شود. بتنی که با این روش مخلوط می‌شود دارای خاصیت یکنواختی خوب و عملکردی مناسب است.

برخی مواقع، استفاده از ریزدانه‌های خشک سبب می‌شوند که مخلوط ناهمگن شده و به‌صورت گلوله‌ای درآید. درصورتی که اگر در ابتدا آب کمتری اضافه شود و سپس بقیه‌ی آب به‌صورت مرحله به مرحله اضافه شود، می‌توان از وقوع این پدیده جلوگیری کرد. نرخ جذب آب ریزدانه‌های سبک به نسبت سریع است. نباید تفاوت چندانی میان مخلوط کردن ریزدانه‌های سبک و ماسه‌ی معمولی وجود داشته باشد. برای برآورد زمان اختلاط می‌توان منحنی جذب آب مصالح واقعی را بررسی کرد. از این منحنی مشخص است که در عمل، جذب آب سبکدانه‌هایی با قطر کمتر از ۸ یا ۱۰ میلیمتر پس از چند دقیقه افت پیدا می‌کند. در صورت لزوم، آبی که هنگام اختلاط اضافه می‌شود، باید شامل آب جذب شده در هنگام حمل‌ونقل و آبی باشد که ممکن است در هنگام تراکم بتن اضافه شود.

در بعضی موارد لازم است آب اضافی به بتن تازه اضافه شود تا افزایش سفتی را جبران کند، اما این امر باید با نظارتی دقیق انجام شود و البته لازم است که تصمیم برای چنین عملی مستدل باشد. افزایش سفتی نباید به هیچ دلیل دیگری چون کارایی کاهش‌یافته، روان‌کننده و یا هیدراتاسیون سیمان باشد.

در بعضی از طرح اختلاط‌های بتن، هوای اضافی وارد می‌شود تا پایایی در برابر یخ زدن و آب شدن و کارپذیری، افزایش یافته و چگالی بتن کاهش یابد. برای جلوگیری از ایجاد خطاهای احتمالی در مورد مقدار مخلوط بتن- که ممکن است به دلیل اشتباه محاسباتی، عدم عملکرد درست وسایل توزین و یا تغییرات خود سنگدانه‌ها و درصد رطوبت آنها باشد- لازم است که چگالی توده‌ای و درصد رطوبت به طور مرتب اندازه‌گیری شود و وزن بتن موردنظر، به طور متناوب تنظیم شود.

سنگدانه‌هایی با جذب آب نسبتاً کم و یا زیاد، باید طبق ضوابط درج شده توسط تولیدکنندگان آنها جابه‌جا شوند. ویژگی طبیعی جذب آب سنگدانه‌ها، بر لزوم پیش‌خیس کردن آنها تأکید می‌کند تا بدین وسیله همه‌ی سنگدانه‌ها تا قبل از افزودن مواد دیگر، تا حد ممکن دارای درصد رطوبت یکسانی شوند. بدین‌ترتیب، نسبت‌های حجمی بتن در هنگام ساخت ثابت می‌ماند و نیز افت اسلامپ بتن در هنگام حمل‌ونقل به حداقل می‌رسد.

زمان اختلاط بتن سبک نسبت به بتن معمولی تاحدی بیشتر است. به‌همین دلیل باید اثر بیشتر بودن زمان اختلاط برروی مقاومت فشاری بتن سبک درنظر گرفته شود. اگر از سنگدانه‌های جاذب آب (غیر اشباع) استفاده می‌شود، باید توجه شود که جذب آب در طول فرایند اختلاط و به سبب آن خروج حباب‌های هوا از درون بتن سبک تازه، هیچ اثرات منفی قابل‌توجهی بر مقاومت فشاری بتن و پایایی طولانی مدت آن، نداشته باشد. آزمایش-های اولیه‌ی مقاومت فشاری و چگالی برروی نمونه‌ها توصیه می‌شود. بدین‌ترتیب که ابتدا مقاومت فشاری نمونه-های اخذ شده از بتن تولید شده بدون مخلوط کردن مجدد را اندازه می‌گیریم و با مقاومت فشاری بتن تولید شده، بعد از ۱ دقیقه اختلاط دوباره پس از گذشت ۶۰ دقیقه از اختلاط اولیه، مقایسه می‌کنیم که این دو مقدار نباید به طور محسوسی با یکدیگر فرق داشته باشند. تمام نمونه‌گیری‌ها و روش‌های ارزیابی باید مطابق آیین‌نامه‌های پیشنهاد شده برای بتن معمولی، مانند*EN12390-2* , *EN12350-1* و *EN12390-3* انجام گیرند. اگر آزمایش‌ها بیانگر این موضوع بودند که مقاومت فشاری مطلوب بدون اختلاط مجدد به دست نخواهد آمد، مخلوط کردن مجدد نیز لازم خواهد بود.

خواص جذب رطوبت سبکدانه‌ها لازم است همواره در طی فرایند اختلاط مورد توجه قرارگیرد. باید اطمینان حاصل شود که مقدار قابل توجهی از آب قبل از پیمانه گیری و اختلاط، جذب سبکدانه‌ها شده است. در غیر این-صورت، قسمتی از مخلوط رقیق اولیه ممکن است توسط سنگدانه‌ها جذب شود که منجر به کاهش کارایی بتن خواهد شد. ممکن است مقداری از آب مخلوط نیز در طول اختلاط و یا حمل‌ونقل جذب شود. این امر باعث می-شود که آب بیشتری برای ترکیب لازم شود و شرایط افت اسلامپ، سریعتر ایجاد شود. سرعت و زمان جذب آب نیز همچون حداکثر رطوبت جذب شده می‌بایست به درستی در چرخه‌ی اختلاط گنجانده شود تا استحکام و ثبات بتن به خوبی کنترل گردد.

۳-۱۰-۱ بارگیری مخلوط‌کن‌ها

ترتیب وارد کردن عناصر به درون میکسر برای بتن سبک از یک کارگاه به کارگاه دیگر متفاوت است. هنگامی که یک روش قابل قبول برای بتن‌سازی و مرطوب کردن سنگدانه‌ها به دست آمد، بسیار مهم است که تا حد امکان مراحل را نزدیک به این شرایط تکرار کنیم تا یکنواختی تولید بتن حفظ شود. شرایط آب و هوایی مثل دمای محیط، رطوبت و باران و برف نیز می‌تواند روی مصالح انبار شده تأثیر داشته باشد و باید به طور مناسب مد-نظر قرار گیرد. تصویری از بارگیری کامیونهای مخلوط کن در شکل۳-۴ نشان داده شده است.

شکل ۳-۴- بارگیری بتن در کامیون مخلوط کن

۳-۱۰-۲ مخلوط‌کن‌های ثابت

ماشین آلات ثابت مخلوط‌کن غالباً در عملیات تهیه بتن پیش‌ساخته و بتن پیش‌تنیده و بعضاً در محل پروژه-هایی که مسافت حمل بتن زیاد نباشد و یا برای اختلاط‌های جزیی، استفاده می‌شود. در این موارد، ابتدا باید سبکدانه‌ها را به درون مخلوط‌کن ریخت و سپس آب، سیمان و مواد افزودنی موردنیاز را به آن اضافه کرد. هنگامی که سبکدانه‌های ریز در بتن مورد استفاده قرار می‌گیرند، باید بعد از سنگدانه‌های درشت اضافه شوند.

پس از آنکه تمامی عناصر در مخلوط‌کن ریخته شدند، سرعت مخلوط کردن باید به‌گونه‌ای باشد که مخلوط همگن تولید شده، بتواند معیارهای ذکرشده در *ASTM C94* را ارضا کند. هنگامی‌که از مخلوط‌کن‌های ثابت برای اهدافی چون اختلاط جزیی استفاده می‌شود، باید توجه داشت که آنها صرفاً برای جلوگیری از گیرش بتن مورد استفاده قرار می‌گیرند، زیرا فرایند اختلاط در تراک میکسرها کامل شده است. تصویری از مخلوط کن های ثابت در شکل۳-۵ نشان داده شده است.

شکل ۳-۵- نمونه ای از یک مخلوط کن ثابت

۳-۱۰-۳ عملکرد مخلوط‌کن‌ها

از آنجایی‌که بیشتر بتن‌ها، چه معمولی و چه سبک، به وسیله تراک میکسرها حمل می‌شوند، دانستن جنبه‌های مختلف عملکرد یک کامیون بسیار مهم می‌باشد. زمان تحویل و تأثیرات آب و هوایی نقش مهمی در کنترل اسلامپ ایفا می‌کنند. این موارد ممکن است باعث ایجاد تغییراتی در میزان آب مورد نیاز برای رسیدن به اسلامپ مطلوب شوند.

۳-۱۱ حمل‌ونقل

حمل‌ونقل بتن سبکدانه‌ی تولید کارخانه و بتن سبکدانه‌ی آماده، به محل بتن‌ریزی، تقریباً مشابه حمل‌ونقل بتن معمولی است. همان‌طور که پیش‌تر نیز ذکر شد، کاهش کارایی بتن از هنگام اختلاط تا بتن‌ریزی، به دلیل جذب آب دانه‌های متخلخل بیشتر می‌شود. وسایل حمل‌ونقل ممکن است منجر به جداشدگی دانه‌ها و از دست رفتن همگنی بتن بشوند. می‌توان با تغییر اجزای اختلاط، نگه‌داشتن بتن در حالت آرام و یا اختلاط متناوب آن برای مثال با استفاده از یک تراک میکسر یا به صورت اساسی‌تر، استفاده از دیگر وسایل حمل‌ونقل، بر این مشکل فایق آمد.

همیشه باید به تأخیرهای احتمالی- مثلاً به‌دلیل وجود ترافیک سنگین، در حمل‌ونقل بتن تحت شرایط گرم و خشک توجه کرد. در شرایط آب‌وهوایی سرد، معمول است که دمای بتن تازه در حین اختلاط، حتی درصورت لزوم حتی تا ۳۰ درجه‌ی سانتیگراد نیز افزایش یابد. البته لازم است بر این نکته تأکید شود که چگالی کمتر بتن سبکدانه موجب کاهش گرمای مخصوص بتن نسبت به بتن معمولی و افزایش از دست رفتن دما با گذشت زمان می‌شود.

امروزه مقادیر زیادی از بتن را می‌توان به وسیله‌ی پمپ کردن از راه خطوط لوله در فواصل طولانی به‌خصوص به محل‌هایی که توسط دیگر وسایل به‌آسانی قابل دسترس نیستند، منتقل کرد. پمپ کردن نمونه‌ای از آخرین مرحله‌ی یک نوع سیستم حمل‌ونقل است و شامل ریختن بتن نیز می‌شود. فرایند پمپ کردن بتن سبکدانه با استفاده از روش‌های مناسب و اطمینان از اینکه ترکیبات مخلوط و خواص بتن تازه به‌نحوی تنظیم شده‌اند که ملزومات مصالح مورداستفاده را رعایت می‌کنند، به راحتی قابل انجام است. پمپ کردن بتن تازه‌ای که شامل هوای وارد شده‌ی زیاد و چگالی حدود نصف بتن معمولی است، هنوز با موفقیت همراه نبوده است.

در مراحل پیش از ساخت بتن نیز باید در هنگام حمل‌ونقل سبکدانه‌ها نهایت دقت به کار بسته شود، به‌طوری که سبکدانه‌ها با کمترین ریسک خردشدگی جابه‌جا شوند و در مکانی خشک، انبار و نگهداری شوند. خردشدگی احتمالی سنگدانه‌ها در هنگام جابه‌جایی می‌تواند باعث ناهمگونی کارپذیری در نقاط مختلف بتن شود، هم به دلیل تفاوت در اندازه‌ی ذرات و هم به‌خاطر جذب آب اختلاط پیش‌بینی نشده. جداشدگی قابل‌توجه نیز ممکن است در درشت‌دانه‌های سبکی که دارای محدوده‌ی دانه‌بندی وسیع و غیریکنواخت هستند، رخ دهد.

۳-۱۱-۱ تراک میکسرها

تخلیه و بارگیری یک تراک‌میکسر مشابه عملیاتی است که در مخلوط‌کن‌های ثابت انجام می‌شود. گاهی حجم بیشتری از بتن سبک می‌تواند توسط تراک‌میکسرها بدون تجاوز از وزن قانونی و یا محدودیت‌های باری حمل شود. هرچند طبق *ASTM C94* حجم بتن موجود درمخزن میکسر نباید از میزان ظرفیت اسمی آن و یا ۶۳ درصد حجم آن، هنگامی‌که برای ساخت بتن و از ۸۰ درصد حجم آن هنگامی‌که برای حمل بتن استفاده می شود، بیشتر باشد.

شکل۳-۶- تخلیه بتن از تراک‌میکسر

۳-۱۱-۲ حمل و نقل و زمان انتظار

کارهای ساختمانی بر حسب فاصله‌های مختلفی که از محل پیمانه‌گیری دارند، نیازمند زمان حمل‌ونقل بیشتر یا کمتری می‌باشد و بنابراین تأخیر در تخلیه بار امری غیرعادی نیست. این فاکتورها تعیین کل زمانی که بتن در هر بارگیری در داخل مخزن مخلوط‌کن خواهد بود را مشکل می سازد. ممکن است بعضی از سبکدانه‌ها در این مدت- با وجود پیش‌خیس شدن- به جذب آب ادامه دهند، زیرا پیش‌خیس کردن سرعت جذب آب را کاهش می دهد اما لزوماً باعث توقف آن نمی شود.

در برخی موارد برای حصول اطمینان از اینکه مقدار رطوبت در هنگام رسیدن بتن به کارگاه زیاد نیست، بخشی از آب اختلاط، در حدود ۱۰ تا ۱۵ لیتر در متر مکعب کنار گذاشته می‌شود تا بعداً به مخلوط اضافه گردد اغلب لازم است که به بتن سبک، پیش از اجرای آن در محل کارگاه، آب افزوده شود تا جایگزین آن بخشی از آب اختلاط گردد که توسط سنگدانه‌ها جذب شده است. اگرچه اضافه کردن آب در محل کارگاه در بتن معمولی مجاز نیست، اما در بتن سبک حداکثر در محدوده‌ی مقادیر ذکرشده، برای جلوگیری از افت اسلامپ می‌توان آب اضافه کرد.

تراک‌میکسرها باید با سرعت اختلاط توصیه شده، به منظور دست‌یابی به چرخش مورد نیاز جهت انجام کامل اختلاط (به طور معمول بین ۷۰ تا ۱۰۰ چرخش مخلوط‌کن) عمل کنند و پس از آن، تا رسیدن به سرعت همزن، سرعت چرخش خود را کاهش دهند. پیشنهاد می‌شود درست پیش از تخلیه، مخلوط‌کن یک تا دو دقیقه با سرعت

اختلاط بچرخد. همچنین وقتی که مخزن تقریباً تا نصفه خالی شد، بهتر است که عمل تخلیه متوقف شود و مخلوط-کن برای سه یا چهار بار به‌صورت معکوس بچرخد تا از یکنواختی مخلوط اطمینان حاصل شود.

۳-۱۱-۳ تأثیرات دما

دمای تک‌تک عناصر موجود در بتن و دمای بدست آمده از اختلاط آنها، بر میزان نیاز آبی کل اثر می‌گذارد. معمولاً دمای بین ۱۰ تا ۳۰ درجه سانتی گراد، اثر منفی قابل‌توجهی روی مخلوط بتن نخواهد داشت. در شرایط گرم آب‌وهوایی، پیش‌خیس کردن درشت‌دانه‌ها به کاهش دمای بتن کمک خواهد کرد و همچنین مقدار آب جذب شده از مخلوط توسط این مواد را کاهش خواهد داد. سخت شدن زودهنگام یا افت اسلامپ ممکن است به دلیل دمای زیاد مخلوط باشد که در این صورت اصلاً به کمبود آب در مخلوط بتن ربطی ندارد. آبی که تحت این شرایط به مخلوط اضافه می‌شود می‌تواند زیان‌های بسیاری به مقاومت و دیگر خواص بتن وارد آورد.

۳-۱۱-۴ افزودن آب در کارگاه ساختمانی

ممکن است برای جبران آب جذب شده و دست‌یابی به اسلامپ موردنظر، مقداری آب در محل اجرای بتن به مخلوط اضافه شود، البته این اقدام باید بدون به خطر انداختن مقاومت و دیگر خواص بتن و نیز بدون ایجاد تغییر در حجم بتن صورت گیرد. ۵ تا ۶ لیتر در هر متر مکعب، اسلامپ را تا حدود ۲ تا ۳ سانتیمتر افزایش خواهد داد. وقتی که آب اضافه شد، مخلوط‌کن پیش از اینکه تخلیه شود، می‌بایست حداقل ۳۰ چرخش با سرعت اختلاط داشته باشد. البته بهتر آن است که به‌جای آب از مواد فوق‌روان‌کننده استفاده شود.

فصل چهارم– اجرای بتن سبک

۴–۱ بتن‌ریزی

تفاوت بسیار کم یا ناچیزی بین تکنیک‌های لازم برای اجرای صحیح بتن سبکدانه و بتن معمولی وجود دارد. مهم‌ترین نکته در مورد حمل‌ونقل و اجرای بتن، اجتناب از جداشدگی سنگدانه‌ها از ملات سیمانی است. اصول اولیه لازم برای اجرای خوب بتن سبکدانه عبارتند از:

- مخلوطی کارپذیر که با حداقل مقدار آب تهیه شده است.
- تجهیزاتی که قابلیت جابه‌جایی و اجرای سریع بتن را داشته باشند..
- اختلاط مناسب بتن
- داشتن مهارت کافی

یک مخلوط بتن سبک با طرح اختلاط مناسب، عموماً می‌تواند با صرف انرژی کم‌تر نسبت به آنچه برای اجرای بتن‌های معمولی لازم است، اجرا و ماله‌کشی شود. به دلیل جذب آب توسط سنگدانه‌ها، بتن سبک ساخته شده توسط سنگدانه‌هایی که جذب آب زیادی دارند، مثل لیکا (*Leca*) و لیاپور (*Liapor*) ، در وضعیت تازه، ثبات حجم نخواهند داشت و این موضوع ممکن است باعث ایجاد مشکلات زیر در زمینه‌ی اجرا و تراکم گردد:

- کاهش حجم باعث افزایش ریسک گیرش‌های کنترل نشده می‌شود؛
- هوای خارج شده از سنگدانه‌ها در طول مدت جذب آب ممکن است باعث کاهش مقاومت بتن شود.

هوای خارج شده ممکن است روی سطح سنگدانه‌ها متراکم شده و باعث به وجودآمدن پیوندی ضعیف بین سنگدانه‌ها و خمیرسیمان شود. این پدیده علاوه بر تأثیرات منفی روی مقاومت بتن، روی پایایی آن نیز تأثیرگذار خواهد بود. شدت و ضعف این پدیده به نوع مخلوط‌کن ، افزودنی‌ها و سنگدانه‌های به کار برده شده، بستگی دارد. اختلاط مجدد بتن، وقتی جذب آب آن متوقف شده است، باعث حل این مشکل می‌شود، البته اثرات تأخیر در گیرش و اختلاط دوباره روی مقاومت فشاری بتن، باید حتماً مد نظر قرار گیرد. استفاده از بقیه انواع سبکدانه مثل لیتاژ (*Lytag*) که جذب آب بسیار سریعی دارد و یا استالیت (*Stalite*) که جذب آب کمی دارد، باعث کاهش مشکلات ذکرشده خواهد شد.

۴-۲ تراکم

تراکم، فرایند تحکیمی است که بتن را در میان قالب و اطراف آرماتورها، جای می‌دهد تا توده‌های هوای محبوس شده را خارج نماید. این عمل را می‌توان به روش‌های زیادی انجام داد که اغلب آنها را روش‌های مکانیکی چون لرزاننده‌ی داخلی، لرزاننده‌ی قلمی و لرزاننده‌ی خارجی که به صورت محکم به قالب بسته می‌شود، تشکیل می‌دهند. تراکم قطعات پیش‌ساخته‌ی بتنی در کارخانه، اغلب به وسیله‌ی میز لرزه انجام می‌پذیرد. مشخصات لرزاندن از فرکانس بسیار کم با دامنه‌ی بزرگ تا فرکانس زیاد با دامنه‌ی کم تغییر می‌کند. لرزاننده‌های قلمی دارای فرکانس زیاد، حداقل ۲۰۰ هرتز و شتاب زیاد هستند که تابعی از فرکانس و دامنه‌ی آن است. در مقایسه با بتن معمولی، بتن‌های سبکدانه به تراکم کمتری نیاز دارند. تراکم بسیار شدید ممکن است منجر به کاهش همگنی و از دست رفتن پایداری بتن تازه شود. بنابراین باید از لرزاندن و ورز دادن بیش از حد بتن سبکدانه اجتناب شود و فاصله‌ی بین نقاط تراکم باید به مقدار نسبت چگالی بتن سبک به بتن معمولی، نسبت به فاصله‌ی تراکم در بتن معمولی کاهش داده شود. برای نمونه، درصورتی‌که فاصله‌ی بین نقاط تراکم در بتن معمولی باتوجه به کارپذیری موجود، درحدود ۷۵ سانتیمتر مناسب باشد، در بتن سبکدانه‌ی با چگالی ۱۸ کیلوگرم بر مترمکعب و همان میزان کارپذیری، فاصله‌ی بین نقاط تراکم باید تاحدود ۱ متر افزایش یابد.

آب‌انداختگی در بتن سبکدانه، اغلب کمتر از بتن معمولی است، زیرا بتن سبکدانه عیار سیمان بیشتری نسبت به بتن معمولی با سطح مقاومت یکسان دارد. آب موجود در سطح بالایی، خطر ترک‌های پلاستیک ایجاد شده به واسطه‌ی تبخیر آب و فشار آب ایجاد شده در حفره‌های مویینه‌ی بتن را کاهش می‌دهد. آب‌انداختگی کمتر، به‌طور منطقی ترک‌خوردگی‌های اولیه بیشتری را ایجاد می‌کند ولی از سوی دیگر آب جذب شده در سبکدانه‌ها، چنین خطری را کاهش می‌دهد.

تراکم طولانی‌مدت بتن سبکدانه برخلاف بتن معمولی، موجب تمرکز خمیر یا ملات سیمان در بالای سطح نمی‌شود. در مقابل، قطعات درشت‌دانه تمایل دارند که به بالا حرکت کرده و ممکن است از بتن خارج شوند و لایه‌ای ضعیف از سبکدانه ایجاد کنند. نیروی پیش‌راننده، تفاوت میان چگالی دانه‌ای و چگالی خمیر سیمان حاوی هوای اضافی وارد شده است. طبق فرمول استوکس، دانه‌های درشت‌تر نسبت به دانه‌های ریزتر سریع‌تر حرکت می‌کنند. این اثر تا وقتی که بتن به گیرش نهایی خود یا تا وقتی که لزجت به اندازه‌ی کافی زیاد شود، ادامه پیدا می‌کند. دانه‌های قابل رویت سبکدانه در سطح بالایی، ویژگی خاص این نوع بتن‌ها است که در هنگام پرداخت باید به آن توجه کرد. نیروی شناوری تنظیم شده در زمان مناسب با گیرش بتن، می‌تواند سطح پرداخت صاف و باکیفیتی را پدید آورد.

۴-۳ پرداخت

پرداخت بتن سبک تقریباً مانند بتن معمولی است، با این تفاوت که به دلیل سبک‌تر بودن درشت‌دانه‌ها، معمولاً سطح بالایی بتن سبکدانه، دارای سبکدانه‌ی بیشتری است. به‌همین دلیل، پرداخت سطح بتن سبک باید با دقت بیشتری انجام شود تا از حصول یک سطح یکنواخت و با کیفیت مناسب اطمینان حاصل شود. استفاده از قالب‌هایی با سطح صاف و نفوذناپذیر، مانند بتن‌های معمولی مشابه، امکان ایجاد حباب‌های هوا در سطح قالب را افزایش می-دهد. این امر در مورد بتن‌های دارای ریزدانه‌ی سبک بیشتر محتمل است. ممکن است استفاده از قالب‌های فلزی با سطح بسیار صاف، پس از آماده کردن سطح با مواد شیمیایی، به نتایج بهتری منجر شود. نمونه ای از پرداخت سطوح بتنی در شکل ۴-۱ نشان داده شده است.

شکل ۴-۱- پرداخت سطوح بتنی

پرداخت رضایت‌بخش دال‌های بتنی با استفاده از مواد باکیفیت، نظارت خوب و مهارت کافی افراد به دست خواهد آمد. اسلامپ بتن عامل مهمی در پرداخت آن محسوب می‌شود و عموماً باید به حدود ۱۲۵ میلیمتر محدود شود. اسلامپ کمتر، در حد ۷۵ میلیمتر، کارپذیری و چسبندگی کافی را فراهم می‌کند و مانع از ورود ذرات درشت کم‌چگال‌تر به سطح می‌شود. اسلامپ بیشتر از ۱۲۵ میلیمتر، ممکن است باعث روانی بیش از حد بتن تازه شود، به‌گونه‌ای که امکان شروع عملیات پرداخت را با تأخیرات زیادی روبه‌رو می‌سازد.

آماده‌سازی سطوح قبل از ماله‌کشی، توسط نوارهای منیزیمی و آلومینیومی انجام می‌گیرد که آلودگی و گسیختگی سطح را به حداقل می‌رساند. نکات زیر را نیز باید برای پرداخت مطلوب دال‌های بتنی به خاطر داشت:

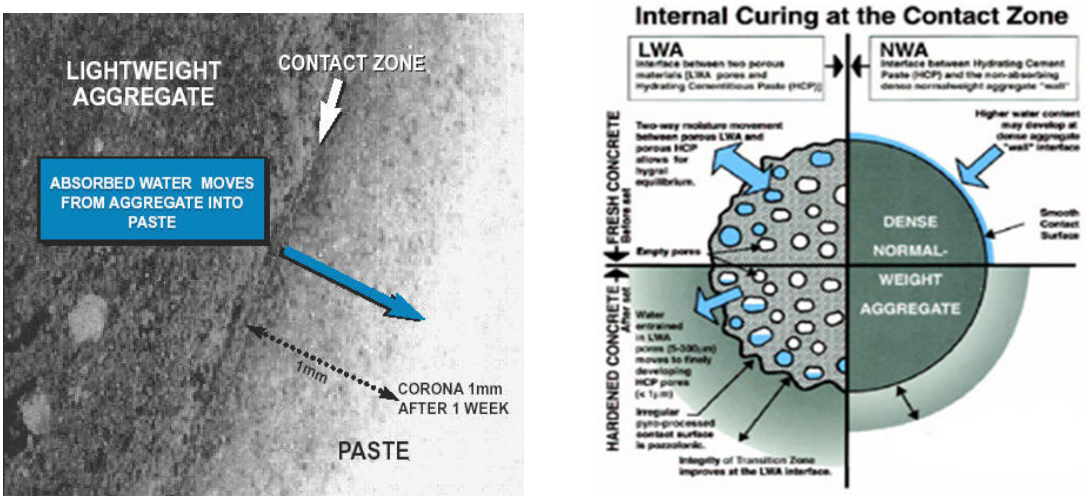
۱. جلوگیری از جداشدگی با استفاده از یک مخلوط متناسب و چسبنده، اسلامپی در حد امکان کم و اجتناب از تراکم بیش از حد بتن
۲. انتخاب زمان مناسب برای اجرای بتن
۳. استفاده از ابزارهای منیزیمی، آلومینیومی و دیگر ابزارهای مناسب برای پرداخت رضایت‌بخش سطح
۴. انجام تمام عملیات مربوط به پرداخت بتن بعد از تبخیر آب ناشی از آب‌انداختگی بتن
۵. عمل آوری مناسب بتن

۴-۴ عمل‌آوری

هدف عمل‌آوری این است که بتن به‌نحوی سخت شود که تمام ملزومات موردنیاز را برآورده کند. شرایط آب‌وهوایی بیرونی، ترکیبات بتن و مشخصات اجزای تشکیل‌دهنده آن، بر افزایش مقاومت و دیگر خواص مهم از جمله پایایی تأثیر می‌گذارد. دمای اطراف و شرایط رطوبتی، همچنین مقدار عایق بودن قالب‌بندی، نقش مهمی در هیدراتاسیون اولیه و سخت شدن بتن ایفا می‌کند. به‌طور معمول، عیار سیمان بیشتر، گرمای ویژه‌ی کمتر و ضریب هدایت گرمایی کمتر بتن سبک در مقایسه با بتن معمولی، موجب شتاب بخشیدن به توسعه‌ی گرمازایی و افزایش دمای بتن می‌شود. درون یک سازه‌ی یکپارچه‌ی ساخته شده با بتن سبک، دما به دلیل چگالی کم، می‌تواند به مقادیر بسیار بیشتری نسبت به بتن معمولی برسد. از دست رفتن رطوبت بتن می‌تواند آن را به شرایط بحرانی برساند و باعث ایجاد ترک‌های ریزی درون ساختار بتن شود. می‌توان برای جلوگیری از خشک شدن سریع، سطوح بتنی را با پارچه‌های مرطوب پوشاند و برای کاهش گسترش گرما و افزایش دما باید بخشی از سیمان پرتلند را با روباره‌ی کوره‌ی آهنگدازی دانه‌ای آسیاب شده، پوزولان یا خاکستر بادی جایگزین کرد. به‌این‌ترتیب، سرعت فرایند هیدراتاسیون، گرمای حاصل از آن و درنتیجه سرعت آزادشدن این گرما نیز کاهش می‌یابد. بعد از اتمام عملیات پرداخت، عمل‌آوری بتن باید هرچه سریع‌تر انجام پذیرد، زیرا کارکرد نهایی بتن کاملاً تحت تأثیر حدود اعمال شده درهنگام عمل‌آوری می‌باشد. برخلاف روش‌های عمل‌آوری گذشته که رطوبت فقط بر سطح بتن اعمال می‌شد، در بتن سبکدانه عمل‌آوری داخلی نیز توسط آزادسازی آب جذب شده توسط سنگدانه‌ها، انجام می‌پذیرد. البته این آب جذب شده، در نسبت آب به سیمان محسوب نمی‌شود. هرچقدر که سیستم حفره‌ها به‌خاطر هیدراته شدن سیمان کوچکتر می‌شود، آب موجود در داخل این حفره‌ها بیشتر به درون خمیر سیمان تزریق می‌شود

و در نتیجه دوره‌ی عمل‌آوری طولانی‌تر خواهد شد. عمل‌آوری داخلی برای بتن‌های توانمند (HPC)، به‌خصوص هنگامی که از مواد تکمیل‌کننده‌ی سیمان استفاده می‌شود و نسبت آب به سیمان کمتر از ۰/۴۵ است، بسیار سودمند است. نمونه‌هایی از اجرای بتن در شکل ۴-۲ و نمونه‌هایی از عمل‌آوری داخلی بتن سبکدانه در شکل ۴-۳ نشان داده شده است.

شکل ۴-۲ تصاویری از اجرای بتن



شکل ۴-۳ عمل‌آوری داخلی بتن سبکدانه

۴-۵ فرایند پمپ کردن بتن

پمپ کردن بتن تازه کاملاً متداول است. فشار زیاد در هنگام پمپ کردن، آب را به حفره‌های سبکدانه می-فشرد. این آب می‌تواند وارد خلل‌وفرج سنگدانه‌ها شده و باعث محبوس شدن هوا داخل سنگدانه‌ها شود که بعد از برداشتن فشار خارجی پمپ، این آب اضافه به دلیل فشار ایجادشده توسط هوای محبوس، از سنگدانه خارج می‌شود و یک لایه آب را در اطراف سنگدانه‌ها شکل می‌دهد که می‌تواند باعث کاهش پیوند بین سنگدانه و خمیر سیمان شود. درنتیجه، پمپ کردن بتن سبک، دارای اثرات منفی- هم روی خواص مکانیکی و هم روی پایایی بتن- خواهد بود. با این‌همه اگر نمونه‌های آزموده شده نشان دهند که خواص بتن سخت شده همچنان مطلوب است و تحت تأثیر فرایند پمپ کردن چندان دچار تغییر نمی‌شود، پمپ کردن بتن سبکدانه مجاز است، به‌شرط آنکه مقاومت فشاری بتن پمپ شده بیشتر از ۱۰ درصد مقاومت فشاری نمونه‌های گرفته شده از بتن قبل از پمپ کردن، کمتر نباشد. البته نوع سبکدانه نیز در قابلیت پمپ‌پذیری مهم است، برای مثال برخی از سبکدانه‌ها مثل لیتاژ (*Lytag*) و استالیت (*Stalite*) در فرایند پمپ کردن عملکرد خوبی از خود نشان می‌دهند. پمپ کردن به‌طور کلی زمانی قابل قبول است که مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی بتن پمپ شده کمتر از ۹۰ درصد نمونه‌ی مشابه پمپ نشده نباشد. اغلب لازم است که مقداری ماده‌ی قوام‌آور برای کاهش ورود آب به داخل سبکدانه اضافه شود. سپس با اضافه کردن یک روان‌کننده‌ی مناسب، کارایی بتن دوباره به دست آید. نوع سبکدانه، ماسه و افزودنی معدنی بر تغییرات خواص رئولوژیک، تحت فشار زیاد در لوله‌ی پمپ تأثیر می‌گذارد. افزودنی‌های معدنی برای مثال روباره-ی کوره‌ی آهنگدازی یا خاکستر بادی به عنوان افزودنی‌های ریزدانه، بر کارپذیری و قیمت آن تأثیر می‌گذارد. به این دلیل وقتی که از ریزدانه‌ی سبک استفاده می‌شود، استفاده کردن از ماده‌ی قوام‌آور لازم نیست. بتن باید قابلیت پمپ‌پذیری خوبی داشته باشد: حداقل ۶۵۰ میلیمتر در آزمایش میز جریان، و عیار سیمان نیز تا ۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب افزایش یابد. بعد از ارایه‌ی طرح اختلاط، ساخت نمونه‌های آزمایشی برای اطمینان از عملکرد مناسب بتن توصیه می‌شود.

۴-۵-۱ ملاحظات کلی در فرایند پمپ کردن بتن سبکدانه

تا وقتی‌که سبکدانه‌ها کاملاً پیش‌خیس نشده‌اند، ممکن است آب اختلاط را جذب کنند و درنتیجه مشکلاتی در فرایند پمپ کردن بتن ایجاد شود. بنابراین لازم است که سنگدانه‌ها قبل از پیمانه‌گیری حتماً پیش‌خیس شده باشند. این کار توسط یکی از روش‌های زیر انجام می‌گیرد:

- روش آب‌پاشی: طول مدت لازم برای پیش‌خیس کردن کامل سنگدانه‌ها به خصوصیات جذب آب آنها بستگی دارد. تولیدکننده‌ی سبکدانه‌ها می‌تواند اطلاعات موردنظر را در اختیار سازنده‌ی بتن قرار دهد. پیش‌خیس کردن یکنواخت سبکدانه‌ها از روش‌های متعددی می‌تواند انجام گیرد که شامل آب‌پاشی کردن با شلنگ و یا ریختن آب برروی توده‌ی سبکدانه‌ها می‌باشد که هم در محل ساخت بتن و هم در محل نگهداری سنگدانه‌ها قابل انجام است.
- روش غوطه‌وری: توسط غوطه‌ور کردن سنگدانه‌های تقریباً سرد شده در آب انجام می‌پذیرد که باید کاملاً نظارت شده باشد و انجام آن تنها در محل نگهداری سنگدانه‌ها میسر می‌باشد.
- مکش: با وارد کردن سنگدانه‌های خشک به داخل مخزنی که هوا از آن مکیده می‌شود، انجام می‌گیرد. سپس مخزن با آب پر شده و به فشار اتمسفر بازگردانده می‌شود. این روش فقط در محل نگهداری سنگدانه‌ها قابل انجام است.

پیش‌خیس کردن سنگدانه‌ها، جذب آب توسط آنها را به حداقل می‌رساند و به همین دلیل افت اسلامپ در زمان پمپاژ نیز به حداقل می‌رسد. این رطوبت اضافه همچنین باعث افزایش چگالی سبکدانه‌ها می‌شود که در نتیجه چگالی بتن تازه را افزایش می‌دهد. البته این اضافه چگالی ایجاد شده، درنهایت به‌خاطر خشک شدن بتن در هوا از دست می‌رود و باعث ادامه پیدا کردن عمل‌آوری داخلی بتن می‌شود.

۴-۵-۲ پیمانه‌گیری مخلوط پمپ

وقتی فرایند پمپ کردن بتن سبکدانه درنظر گرفته می‌شود، اعمال برخی تنظیمات برای رسیدن به مشخصات مطلوب در بتن، الزامی است. معمار، مهندس و پیمانکار باید با تمامی تنظیمات لازم مخلوط‌ها، قبل از اتخاذ هرگونه تصمیم‌گیری برای روش حمل‌ونقل، آشنا باشند. مشورت با تهیه‌کنندگان سبکدانه، برای به دست آوردن بهترین مخلوط پمپ، ضروری است. موارد متعددی از پمپ کردن بتن سبکدانه در گزارش مؤسسه‌ی شیل، رس و اسلیت منبسط شده ایالات متحده‌ی آمریکا آمده است.(*ESCSI-1996*).

وقتی الزامات پروژه ایجاب می‌کند که از پمپ کردن بتن استفاده شود، قوانین کلی زیر، که برپایه استفاده از درشت‌دانه‌های سبک و ریزدانه‌های با وزن معمولی تنظیم شده‌اند، باید اعمال شوند :

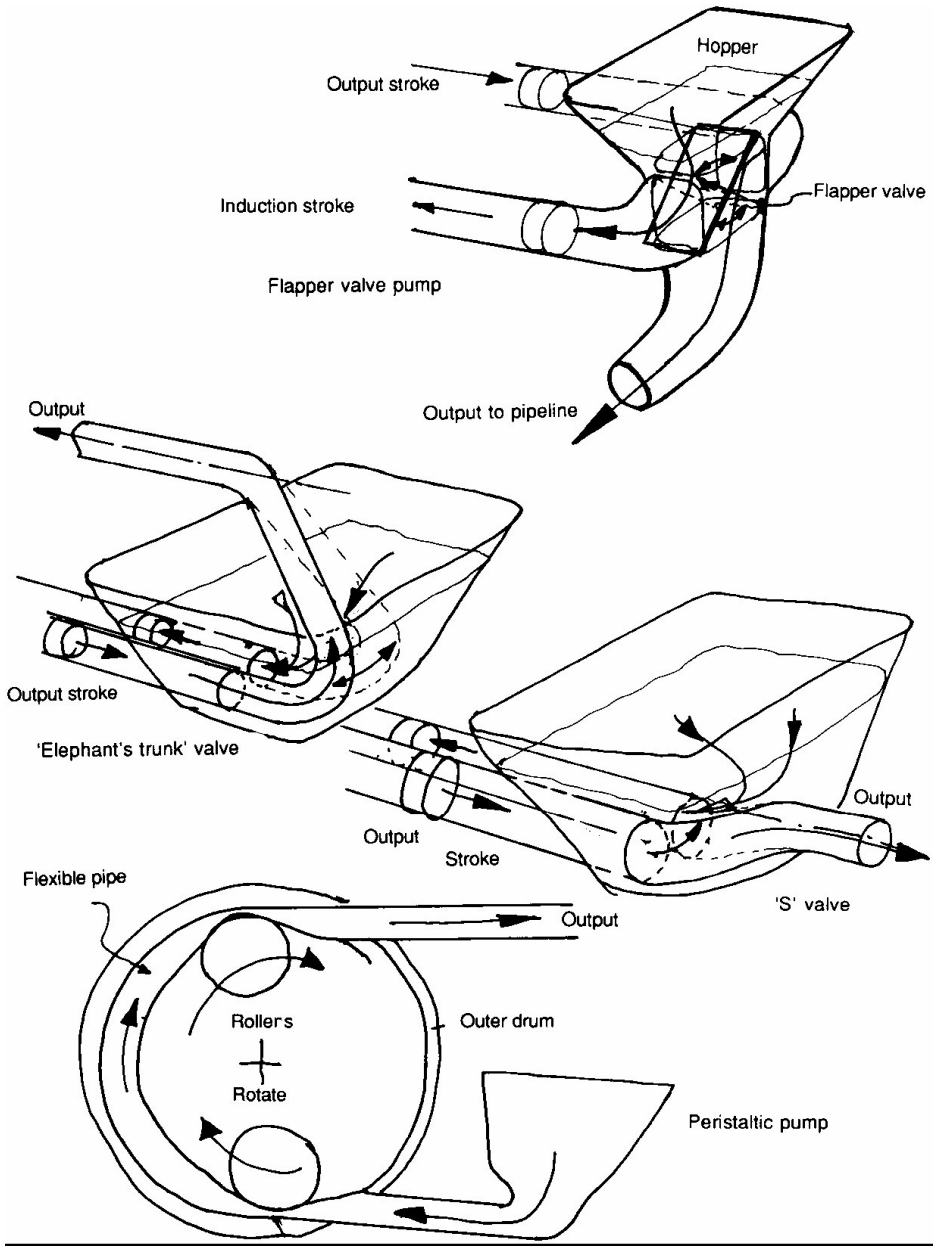
- پیش‌خیس کردن سبکدانه‌ها تا درصد رطوبت توصیه شده توسط تهیه‌کننده سبکدانه
- عیار مواد سیمانی حداقل ۳۳۵ کیلوگرم بر مترمکعب
- استفاده از افزودنی‌های جامد و مایع مناسب برای کمک به فرایند پمپ کردن

- برای تسهیل فرایند پمپ کردن، تنظیمات اعمال شده به پیمانه‌ی مخلوط استاندارد، ممکن است باعث کاهش جزیی در حجم درشت‌دانه‌ها شود که متناظراً افزایش حجم ریزدانه‌ها را به دنبال خواهد داشت.
- عیار سیمان باید برای تأمین اسلامپ ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلیمتر در محل بتن‌ریزی کافی باشد.
- استفاده از ماسه طبیعی خوب‌دانه‌بندی شده و گردگوشه با مدول نرمی در محدوده‌ی ۲/۲ تا ۲/۷
- استفاده از دانه‌بندی تشکیل یافته از ریزدانه و درشت‌دانه. دانه‌بندی باید با استفاده از حجم مطلق- و نه جرم- به دست آمده باشد تا بتواند اختلافات نسبی چگالی در اندازه‌های مختلف ذرات را محاسبه کند.

بعضی اوقات توصیه می‌شود که از طرح‌های مختلفی، مثلاً باتوجه به ارتفاع سازه و یا فاصله‌ی پمپ از محل تخلیه، برای مخلوط پمپ استفاده شود. ارزیابی‌های نهایی بتن باید در محل انتهای تخلیه‌ی پمپ صورت گیرد (*ACI 304.5R*).

۴-۵-۳ پمپ و سیستم پمپ کردن

فرایند پمپ کردن بتن سبکدانه، بخش مهمی از اجرای آن است به‌طوری‌که بیشترین تأثیر را روی خصوصیات بتن سخت شده خواهد داشت. سالیان زیادی طول کشیده تا سیستم پمپ کردن بتن و به‌خصوص بتن سبکدانه، به سطح توسعه‌یافته کنونی برسد. در دهه ۱۹۶۰ و سالیان ابتدایی دهه ۱۹۷۰، پمپ کردن بتن سبکدانه اگر غیرممکن تلقی نشود، کاملاً بی‌کیفیت بود. اکثر دستگاه‌های پمپ در این سال‌ها، دستگاه‌هایی بودند که از بستن و سوار کردن شیرهای زمخت برروی یکدیگر، به وجود می‌آمد. این شیرها به بخشی از بتن اجازه می‌داد که در هر ضربه، وارد یک سیلندر شده که باعث می‌شد عملیات فشرده شدن بتن، چندباره انجام شود و همان‌طور که پیش‌تر نیز ذکر گردید، باعث آب‌انداختگی بتن شود. آب‌بندی کردن کامل اطراف شیرها نیز امکان نداشت و هرگونه از دست دادن آب، به سرعت منجر به خشک شدن خمیر سیمان و درنتیجه انسداد آن می‌شد. برای رفع این مشکل، دانه-بندی‌های بتن سبکدانه تغییر کرد و به مخلوطی از ریزدانه و درشت‌دانه تبدیل شد تا بتواند امکان پمپ کردن یکنواخت را به‌وجود آورد.



شکل ۴-۴- نمایی از سیستم متداول پمپ کردن بتن

نمایی از سیستمهای متداول پمپ کردن بتن در شکل ۴-۴ نشان داده شده است. نقطه‌ی عطف فرایند پمپ کردن بتن سبکدانه به اواخر دهه ۱۹۷۰ میلادی برمی‌گردد. در آن زمان در صنعت افزودنی‌های شیمیایی، ماده قوام-

آور برای کمک به فرایند پمپ کردن، تولید شد که به‌همراه فوق‌روان‌کننده‌ها، باعث کاهش جذب آب و احیای کارپذیری از دست رفته بتن می‌شد. پس‌از این، با توسعه‌ی دستگاه‌های شیر مستقیم، که در آنها لوله‌ی انتقال به یک مخزن خمیده که بین دو سیلندر در نوسان است، متصل می‌باشد و استفاده از افزودنی‌های مکمل، پمپ کردن در طول‌های حدود ۱۰۰ متر و ارتفاع‌های ۵۰ تا ۶۰ متر مقادیری معمول به‌شمار می‌آید. همچنین استفاده از مواد - جایگزین سیمان، فرایند پمپ کردن را آسان‌تر نیز نموده است که حتی به ماده‌ی قوام‌آور و فوق‌روان‌کننده نیز احتیاجی نخواهد داشت. این پیشرفت‌ها که با رشد سازه‌های بلندمرتبه همراه شده بود، سبب شد تا پمپ کردن بتن به ارتفاع‌های زیاد نیز ممکن شود. اگر کارپذیری در میز جریان بیشتر از ۶۵۰ میلیمتر باشد، چاره‌ای برای مشکل انسداد لوله‌های انتقال وجود ندارد و افزودن آب برای افزایش کارپذیری بتن، به‌منظور غلبه بر مشکلات پمپ کردن در فواصل طولانی، تنها باعث آب‌انداختگی و جداشدگی بتن می‌گردد.

موارد زیر از جمله نکات کلیدی وابسته به پمپ و سیستم پمپ کردن است :

- استفاده از بزرگترین لوله‌ی موجود با قطر حداقل ۱۲۵ میلیمتر بدون احتساب کاهنده‌ها
- تمام خطوط انتقال باید هم‌اندازه و تمیز باشند و در ابتدا با دوغاب روغن‌مالی شوند.
- از کاهش سریع اندازه‌ی لوله از پمپ به خطوط انتقال پرهیز شود.
- کاهش فشار اعمال شده باید به‌صورت زیر باشد:

۱. کاهش سرعت بتن‌ریزی

۲. استفاده از حداکثر خطوط انتقال فولادی و حداقل خطوط انتقال لاستیکی ممکن

۳. محدودکردن تعداد خم‌ها

۴. حصول اطمینان از اینکه خطوط انتقال توسط نیروی کافی در محل خم لوله‌ها درزگیری و محکم شده‌اند.

در نهایت باید آزمایش‌هایی با استفاده از پمپ و طرح اختلاط درنظر گرفته شده برای فرایند پمپ کردن، در محل انجام شود. مشاهده‌کنندگان آزمایش باید شامل نمایندگانی از طرف پیمانکار، تهیه‌کننده‌ی بتن آماده، مهندس ناظر، تیم پمپ کردن بتن، آزمایشگاه کنترل کیفیت مخصوص آزمایش و تهیه‌کننده‌ی سبکدانه باشند. در آزمایش پمپاژ، ارتفاع و فاصله‌ای که بتن باید از نقطه‌ی تحویل جابه‌جا گردد، در نظر گرفته شود. به‌دلیل اینکه اکثر مکان‌ها اجازه‌ی پمپاژ عمودی بتن را به اندازه‌ای که درطول پروژه لازم است، نمی‌دهند، قوانین زیر می‌توانند برای جابه‌جایی‌های افقی با خطوط انتقال فولادی به‌کار گرفته شوند:

۰/۳ متر عمودی = ۱/۲ متر افقی

۰/۳ متر شلنگ لاستیکی = ۰/۶ متر لوله‌ی فولادی

۰/۳ متر خم ۹۰ درجه = ۳ متر لوله‌ی فولادی

شکل ۴-۵- ساختمان *Canary Wharf* انگلستان

در پایان جالب است یک نمونه موفق در فرایند پمپ کردن بتن سبکدانه در ارتفاع زیاد، اجرای ساختمان *Canary Wharf* در انگلستان که درشکل ۴-۵ نشان داده شده بررسی گردد. این ساختمان که اسکلت فولادی داشت و برای اجتناب از زیاد شدن وزن مرده‌ی آن، تصمیم براین بود که کف طبقات آن با بتن سبکدانه اجرا شود. این ساختمان بسیار بلندتر از تمام سازه‌هایی بود که تا آن‌زمان در انگلستان ساخته شده بود و ۴ برابر ارتفاعی را داشت که توانسته بودند تا آن زمان به‌وسیله‌ی پمپ کردن بتن سبکدانه اجرا کنند. ایده‌های موجود برای پمپ کردن بتن سبکدانه تا ارتفاع ۲۵۰ متر بالاتر از محل ساخت بتن، یکی پمپ کردن در چند مرحله بود و دیگری پمپ کردن یکسره، هرچند پمپ کردن چندمرحله‌ای بعد از بررسی‌های لازم نامناسب شناخته شد، زیرا در هر مرحله از پمپ، کارپذیری و میزان رطوبت بتن باید آزمایش می‌گردید و این موضوع باعث سختی بسیار زیاد این فرایند می-

شد. البته در ایالات متحده‌ی آمریکا ثابت شده است که پمپ کردن بتن سبکدانه‌ای که سنگدانه‌های آن به‌طور کامل اشباع شده است، خیلی سخت‌تر از پمپ کردن بتن معمولی نیست. بنابراین، اولین گام در تحقق این پروژه، تلاش برای اشباع کردن کامل سنگدانه‌ها بود. پس از آنکه پیش‌خیس کردن لیتاژ، که سبکدانه‌ی اصلی در این پروژه بود، به روش آب‌پاشی چندان رضایتمندانه از کار در نیامد، با استفاده‌ی مجدد از تجربیات اجرایی آمریکا، روش مکش برای این کار انتخاب گردید که با قدرت ۸۰ درصد و برای ۳۰ دقیقه به سنگدانه‌ها اعمال می‌شد و پس از آن، آب کافی در هنگام چرخش مخزن سنگدانه‌ها به آنها اضافه می‌گردید تا باعث تولید بتنی با کارپذیری مطلوب در انتهای فرایند پمپ کردن شود.

البته لازم به ذکر است که مدل کاملی از فرایند پمپ کردن این پروژه، توسط پیمانکاران نروژی و در محل اجرای عملیات ساخت سکوهای نفتی همین کشور در کنار دریای شمال، انجام شد که کمک شایانی به اجرای این عملیات در واقعیت کرد. برای این کار، از چندین خط لوله‌ی افقی و موازی باهم که در انتها به ۵۲ متر لوله قایم می‌رسید، استفاده شد و هرچند ارتفاع تخلیه زیاد نبود، ولی آزمایش‌ها بیانگر آن بودند که خط انتقال افقی طولانی، مقاومت معادل لوله‌ی قایم را تأمین خواهد کرد. ۳۰ متر اول لوله‌ها افقی بود که پس از گذشتن از یک مقطع خمیده به سمت بالا، به بالابرنده می‌پیوست و پس از آن وارد قسمت قایم می‌شد. ارتفاع بالابرنده با افزایش ارتفاع ساختمان، افزوده می‌شد. تولیدکنندگان دستگاه‌های پمپ توصیه می‌کردند که از چند بالابرنده در سطوح مختلف استفاده شود تا در صورت انسداد لوله‌ها، راحت‌تر بتوان به رفع آن پرداخت.

تا طبقه‌ی ۴۲ این ساختمان از سنگدانه‌هایی استفاده شد که علاوه بر مکش، ۳ روز نیز در آب غوطه‌ور شده بودند تا ۱۶ درصد رطوبت به‌دست آورند. این مخلوط بدون هرگونه انسداد اما با اعمال فشار بیشتر، پمپ شد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که اگر از حدود ۱۰۰ متر خط لوله استفاده شود، جذب آب اجباری سنگدانه‌ها به‌خاطر فشار پمپ، به یک مقدار بهینه خواهد رسید و افزایش فشار و زمان پمپ، از این به بعد تغییرات چندانی ایجاد نخواهد کرد. طبق منابع نویسنده، پمپ کردن لیتاژ خیس نشده تا ۲۵۰ متر لوله‌ی انتقال که ۶۰ متر آن نیز می‌تواند قایم باشد، امکان‌پذیر می‌باشد.

فصل پنجم– آزمایش‌های مرتبط با تولید بتن سبکدانه

۵–۱ آزمایش‌های بتن سبک

خواص بتن تازه باید در بازه‌های زمانی مشخصی کنترل گردد تا از انطباق نسبت‌های اختلاط در کارگاه با نسبت-های در نظر گرفته شده در طرح اختلاط اطمینان حاصل شود. ثابت بودن این نسبت‌ها و یا تغییر آنها با آزمایش‌های وزن مخصوص بتن تازه قابل تشخیص است. این آزمایش‌ها نه تنها به ازای حجم مشخصی از مخلوط و در بازه‌های زمانی با فواصل مشخص باید انجام شوند، بلکه در مواقعی که مشاهدات، علائمی از تغییر در خصوصیات طرح اختلاط را نشان می‌دهد، نیز ضروری است.

تغییر در وزن مخصوص بتن تازه با ثابت بودن وزن محموله تحویل داده شده و حجم هوای آن، نشان می‌دهد که حجم مخلوط با حجمی که باید تحویل داده شود، متفاوت خواهد بود و بنابراین، بررسی آن از اهمیت زیادی برخوردار است. اگر آزمایش‌ها، تغییر در رطوبت را نشان دهند، میکسر باید تنظیم شود. اگر در وزن سنگدانه‌ها تغییری حاصل شود، تعیین مجدد وزن مخصوص- درصد رطوبت ضروری می‌شود. تغییردراسلامپ می‌تواند حاصل تغییر در درصد هوا، رطوبت سنگدانه‌ها، دانه‌بندی آنها و یا وزن مخصوص آنها باشد. همه این عوامل بر این مشخصه‌ی بتن مؤثر هستند. کنترل مخلوط‌های بتنی می‌تواند به تغییرات محتمل دما، طول اختلاط و زمان هم‌زدن مخلوط وابسته باشد که فراتر از محدوده بحث این دستورالعمل هستند.

۵–۱–۱ چگالی

همان‌طور که انجام آزمایش‌های چگالی بتن سبکدانه در ابتدای تولید، استفاده از مصالح جدید و یا طرح اختلاط جدید بتن لازم است، این آزمایش‌ها در هنگام تولید پیوسته بتن نیز باید به طور مرتب تکرار شوند. چگالی بتن تازه به عنوان معیاری برای مقایسه‌ی مخلوط ساخته شده با طرح اختلاط به کار می‌رود. اندازه‌گیری چگالی نمونه تازه معمولاً با متراکم‌کردن نمونه با میله یا با لرزاندن آن به اندازه معین در قالبی فلزی با حجم معلوم، انجام می‌پذیرد. در این برآیند، وزن نمونه اندازه‌گیری شده و براساس آن چگالی بتن متراکم تعیین می‌گردد. این روش

بدون هیچ مشکلی برای بتن سبکدانه نیز قابل انجام است، با این حال برای بتن دارای هوای اضافی وارد شده یا خیلی سفت که متراکم کردن آن دشوار است، توصیه نمی‌شود. عامل بسیار حائز اهمیت، این است که از آن‌جایی که متراکم کردن نمونه با دست معمولاً با اعمال نیروی بیشتری همراه است و احتمال خردشدن سنگدانه‌ها در آن بیشتر است، در خصوص نمونه‌های سبکدانه توصیه نمی‌شود. به جای آن با تعیین زمان استانداردی برای لرزاندن می‌توان از احتمال خردشدن سنگدانه‌ها کاست. استانداردهای *BS 1881: Part 107: 198322* و *ASTM C138 – 8123* نمونه هایی از این روش را ارائه می‌کنند. از معایب این روش آن است که نیاز به تنظیم دقیقی دارد اما در عوض ارزان و ساده است و با محاسبات اندکی می‌توان به اطلاعات موردنظر رسید. درهریک از این آیین‌نامه‌ها این امکان داده شده است که چگالی بدست آمده در محدوده خاصی از مقدار مطلوب طرح اختلاط قرارداشته باشد، به عنوان مثال چگالی بتن تازه‌ای که بر اساس آیین‌نامه *ASTM C138* اندازه‌گیری می‌شود، اگر تا $30\ kg/m^3$ نسبت به طرح اختلاط نوسان داشته باشد، مخلوط ساخته شده قابل‌قبول خواهد بود.

هرچند آزمایش‌های چگالی بتن خشک‌شده درحین انجام پروژه و بر روی نمونه‌های تازه قابل انجام نیست، با این‌حال توصیه می‌شود که چگالی بتن سخت‌شده نیز با استفاده از آیین‌نامه *ASTM C330* انجام شود. درخصوص بتن سبک، آیین‌نامه‌ها معمولاً حد بالایی برای چگالی بتن خشک شده در نظر می‌گیرند (رجوع کنید به *ASTM 567* و *ACI 301*). ده درصد تفاوت درچگالی خشک نسبت به میزان موردنظر، معادل $30\text{-}50\ kg/m^3$ اختلاف در چگالی بتن تازه است و بر اساس آنچه گفته شد، خارج از بازه‌ی نوسان در آیین‌نامه *ASTM* قرار داشته و مخلوط موردنظر نیاز به اصلاح خواهد داشت. آزمایش‌های چگالی بتن سخت‌شده در شرایط زیر انجام می‌شود:

- چگالی نمونه‌های بتنی نگهداری شده استاندارد در هنگام انجام آزمایش مقاومت
- چگالی بتن خشک شده در هوا در تعادل با شرایط آب و هوایی پیرامونی که‌درمحل اجرای پروژه و روی نمونه‌های خشک‌شده در محیط طرح انجام می‌شود و در طراحی به عنوان بارمرده مورد استفاده دارد
- چگالی خشک شده در اجاق، دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد که از این دما به بعد دیگر تغییری در وزن نمونه حاصل نمی‌شود.

چگالی بتن تازه و خشک‌شده در اجاق به آسانی قابل تکرار بوده و ثابت می‌باشد. چگالی بتن خشک شده در هوا با توجه به شرایط آب و هوایی تغییر می‌کند و ممکن است از محلی به محلی دیگر متفاوت باشد. با این وجود این چگالی، مقداری است که طراح سازه برای محاسبه بارمرده سازه به آن نیاز دارد. چگالی خشک شده در هوا را می‌توان بر پایه عیار سیمان، نسبت آب به سیمان، مقدار سبکدانه و همدماهای شناخته شده خمیر سیمان و سبکدانه در یک رطوبت نسبی ثابت هوای اطراف سازه مورد نظر، تعیین نمود. چگالی نهایی بتن خشک شده در هوا، بر حسب

عیار سیمان از چگالی خشک شده در اجاق ۶۰-۹۰ kg/m^3 بیشتر است. تغییردادن چگالی مشخصه یک بتن سبکدانه موجود کار مشکلی است، بنابراین بهتر است طراح درمحدوده مصالح موجود، کار طراحی را انجام دهد.

۵-۱-۲ آزمایش مقاومت

آزمایش‌های مشابهی برای بتن‌های سبکدانه و بتن‌های معمولی انجام می‌شود. هم نمونه مکعبی و هم نمونه استوانه‌ای برای انجام آزمایش مقاومت فشاری و کششی در سنین اولیه و ۲۸ روزه مناسبند. مقاومت اولیه (برای مثال یک روزه) نسبت به مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن‌های سبکدانه به طور مشخص از بتن‌های معمولی بیشتر است. دلیل این پدیده تأثیر مقاومت کمتر دانه‌های سبکدانه بر افزایش مقاومت بتن است. رده مقاومتی بتن‌های سبکدانه بر پایه مقاومت ۲۸ روزه است. البته باز کردن قالب را می‌توان زودتراز معمول انجام داد و ممکن است این موضوع تأثیر مثبتی بر هزینه ساخت و ساز داشته باشد.

قابل اعتمادترین روش آزمایش مقاومت فشاری، آزمایش نمونه‌های مغزه‌گیری شده از بتن سازه است. آزمایش‌های غیرمخربی همچون آزمایش ضربه و آزمایش اولتراسونیک وجود دارد، که به تنهایی و یا توأم به کار می‌روند و باید با احتیاط استفاده شوند، زیرا دانه‌های سبکدانه به راحتی و تنها با یک آزمایش ضربه، خرد می‌شوند.

۵-۱-۳ کارپذیری

آزمایش کارپذیری به روش مشابه بتن معمولی توسط آزمایش اسلامپ یا ترجیحاً آزمایش میز جریان انجام می‌شود. آزمایش اسلامپ به دلیل چگالی کمتر این نوع بتن و نیروی کمتر برای ایجاد تغییر شکل، کارپذیری بتن را مقدار کمتری برآورد می‌کند. در صورتی که اسلامپ بتن سبکدانه حدود دو سوم اسلامپ بتن معمولی باشد، کارپذیری مشابهی خواهد داشت. در صورتی‌که بتن در محل اجرا، مسافتی بین میکسر و محل ساخت منتقل شده است، بهتر است که آزمایش مقایسه‌ای دیگری برای تعیین کارپذیری در محل ساخت نیز انجام شود. در این صورت بتن باید طبق *ASTM C 172* مجدداً مخلوط گردد و پس از آن آزمایش اسلامپ روی آن انجام شود. معمولاً آزمایش میز جریان برای بتن‌های سبکدانه به کار می‌رود و برای مقدار جریان بیش از *400mm* تا حداکثر *700mm* مناسب است. کارپذیری مورد نیاز برای بتنی که باید پمپ شود، مقدار جریانی بیش از *600mm* است، بنابراین در بتن‌های با کارپذیری زیاد پرکاربرد است. در ابتدای کار، قضاوت چشمی مشخصات اختلاط ممکن نیست، اما با داشتن تجربه و آموزش، ممکن است بتوان برآورد چشمی از کارپذیری بتن تازه داشت. جزئیات دو آزمایش متداول اسلامپ و میز جریان در ادامه آمده است.

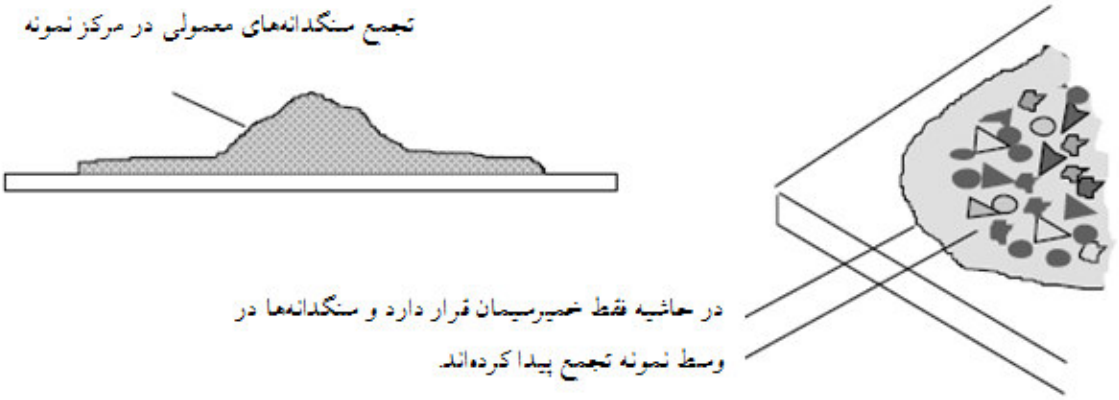
۵-۱-۳-۱ آزمایش اسلامپ: اندازه‌گیری کارپذیری معمولاً با آزمایش اسلامپ انجام می‌گیرد. بتن با استفاده از یک قالب مخروطی متراکم می‌شود و پس از برداشتن مخروط، ازتفاع نمونه اسلامپ واقعی را نشان می‌دهد. افت نامتوازن بتن و یا ریزش آن می‌تواند نشانه ای از این باشد که نمونه، فاقد چسبندگی مناسب است، بنابراین نتایج واضح نبوده و آزمایش اسلامپ قابل اعمال بر این گونه نمونه‌ها نمی‌باشد.

معمولاً تنها آزمایشی که در کارگاه انجام می‌گیرد، با توجه به سادگی و قابل حمل بودن، آزمایش اسلامپ است. این آزمایش برای بررسی نمونه‌های مشابه به منظور کنترل اجزای نمونه‌ها و اطمینان از رعایت نسبت ها هم کاربرد دارد. شرح روش به‌کارگیری این آزمایش در *BS 1881:part 102* ، *ASTM C143* ، *GOST 10181.1-81* ، *DIN 12382*، استاندارد دانمارکی *DS 423.12*، استاندارد نروژی *NS 3662*، استاندارد ژاپنی *JIS A110* و استاندارد ایرانی د.ت.۵۰۵ موجود است. تاکنون هیچ گزارشی از عدم امکان استفاده از آزمایش اسلامپ برای بتن سبکدانه وجود نداشته است.

از معایب این روش آن است که امکان خطای کاربری در آن زیاد است، با این حال ابزار آن ارزان است و به نتایج سریعی منجر می‌شود، به راحتی در کارگاه قابل انجام است و متداولترین آزمایش برای بررسی خواص بتن تازه محسوب می‌شود. با ضربه زدن به سطحی که نمونه اسلامپ بر روی آن قرار گرفته است، می‌توان به معیاری از پایداری نمونه نیز دست یافت. اگر ضربه‌زدن مداوم به اسلامپ معمولی بیانجامد، نمونه پایدار است. اما اگر اسلامپ نمونه برشی شود یا مخروط دچارگسیختگی گردد، نمونه می‌تواند کاملاً ناپایدار و مستعد آب‌انداختگی باشد. البته این بررسی صرفاً کیفی است و به هیچ وجه به معیاری از پایداری نمی‌انجامد. با این‌حال برای تشخیص اولیه این قابلیت مفید است.

۵-۱-۳-۲ آزمایش جریان: این آزمایش می‌تواند برای بررسی میزان کارپذیری نیز مورد استفاده قرار گیرد. یک مخروط اسلامپ روی صفحه‌ای قرار گرفته و بتن در داخل آن ریخته می‌شود. سپس مخروط برداشته شده و صفحه به دفعات استانداردی بالا برده و انداخته می‌شود. میانگین وسعت پخش شدن بتن (معمولاً ۴۰۰ تا ۶۰۰ میلی-متر) اندازه‌گیری می‌شود. این آزمایش معمولاً برای نمونه‌هایی با اسلامپ ریزشی به کار برده می‌شود و برای برررسی‌های مقایسه‌ای بسیار کارآمد است. آزمایش جریان برای بتن سبکدانه هم قابل استفاده است. شرح روش این آزمایش در آیین‌نامه های *BS 1881:Part 105* ، *DIN 1045:198814* آورده شده است.

آزمایش جریان می‌تواند شاخصی سریع از پایداری مخلوط ارائه دهد. به این ترتیب که مطابق شکل ۵-۱ با بررسی لبه نمونه جریان یافته پس از ضربه زدن، می‌توان فهمید که در این بتن با آب‌انداختگی مواجه هستیم یا نه. این آزمایش برای بتن سبک به نتایج کمی نمی‌انجامد ولی معیار کیفی مفیدی در اختیار قرار می‌دهد.



شکل ۵-۱ تشخیص ناپایداری بتن با استفاده از آزمایش جریان

مزیت این روش ساده، نتایج سریع و مناسب بودن آن برای نمونه‌های بتنی با روانی زیاد است. البته این روش معایبی نیز دارد، به طور مثال مستقل از نحوه‌ی اجرای بتن است و همچنین برای اجرای آن به صفحه‌ای کاملاً افقی نیاز است.

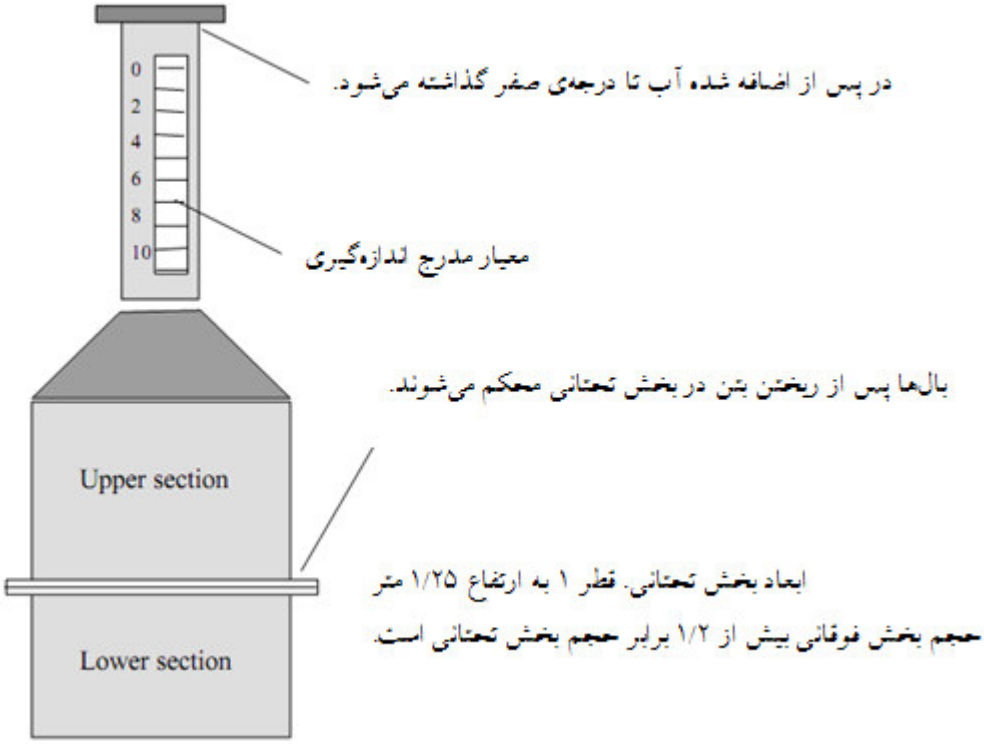
۵-۱-۴ آزمایش مقدار هوا

دو روش متداول برای تعیین مقدار هوای بتن تازه وجود دارد، روش فشاری و روش حجمی. مقدار هوا بر خواص بتن تأثیر به‌سزایی دارد تا جایی که تفاوت میزان هوا بیش از ۲درصد نسبت به میزان موردنظر در طرح اختلاط، چگالی را تا kg/m^3 ۳۰ تغییر می‌دهد و تفاوت بیش از این مقدار، مخلوط را غیر قابل قبول می‌سازد. تغییرات حجم هوا مقاومت را در بتن‌های غنی(پر سیمان) به‌شدت دستخوش تغییر می‌کند و همین مسأله بررسی آن را در خصوص این بتن‌ها حساس‌تر می‌کند. در ادامه به بررسی این دو روش پرداخته شده است.

۵-۱-۴-۱ روش فشاری: در *BS 1881: part 106* روش فشاری شرح داده شده است. اساس آن روش این است که بتن با حجم هوای بیشتر، بیشتر از نمونه‌ای با حجم هوای کمتر فشرده می‌شود. با ضریب تصحیحی برای اثر جذب آب سبکدانه‌ها، این روش برای بتن معمولی به نتایج قابل قبولی می‌انجامد. برای سبکدانه‌های غیر اشباع، دستگاه نتایج معناداری ارائه نمی‌کند و ضریب تصحیح به تنهایی از ظرفیت دستگاه بیشتر خواهد بود. به طور کلی این روش در کارگاه معمولاً برای بررسی چسبندگی به مواد حباب‌ساز و نظارت بر تولید انجام می‌شود و دامنه تغییرات نتایج بسیار کمتر از بتن معمولی است. نتایج نیازی به اطلاع از میزان دقیق اجزای نمونه ندارد و قابل اجرا در کارگاه است، با این حال این روش نیاز به کالیبراسیون دقیقی دارد و انجام آن مهارت زیادی می‌طلبد، ضمن اینکه برای بتن با سبکدانه غیر اشباع نیز کاربردی نیست، لذا کاربرد آن محدود می‌باشد. با استفاده

از روش فشاری که در بتن معمولی از روش حجمی بسیار متداول‌تر است ، کاهش حجم هوای محفوظ درون سبکدانه‌ها باعث می‌شود که مقدار هوای بدست آمده از آزمایش از مقدار هوای واقعی بیشتر خوانده شود. عدد به‌دست آمده حتی با افزایش زمان اعمال فشار هم افزایش می‌یابد. آزمایش نشان داده است که این میزان خطای احتمالی برای لیکا و لیاپور ۰/۵ تا ۱ درصد است. این خطا برای نسبت آب به مواد سیمانی بیشتر و سنگدانه‌های سبک‌تر (با تخلخل و نفوذپذیری بیشتر) افزایش نیز خواهد یافت. در صورت وجود ماسه سبک‌دانه در نمونه‌ها، خطا باز هم بیشتر خواهد شد. با این وجود روش فشاری می‌تواند برای کنترل کارگاهی که روند ثابتی برای تولید دارند، به کار رود. آزمایش باید حداقل ۱۰ دقیقه پس از افزودن آب روی نمونه تازه انجام شود و خواندن میزان هوا باید بلافاصله پس از اعمال فشار انجام شود. قبل از اینکه بتوان از اعداد بدست آمده استفاده کرد، ارتباط آنها با مرجع *ASTM* برای این مخلوط خاص باید بررسی شود.

۵-۱-۴-۲ روش حجمی: استاندارد آمریکایی ASTM C 173-9529 و استاندارد ایرانی د.ت.۵۱۰ روشی را بر این اساس ارائه می‌دهند که حجم هوای نمونه بتنی که با هم زدن از بین می‌رود را می‌توان از روی افت ارتفاع آبی که روی نمونه قرار دارد، اندازه گرفت. وسیله استفاده در این آزمایش در شکل ۵-۲ دیده می‌شود.



شکل ۵-۲ دستگاه آزمایش تعیین مقدار هوا به روش حجمی

این آزمایش برای همه‌ی بتن‌ها استفاده می‌شود. هنگامی‌که استفاده از این روش برای بتن سبکدانه پیشنهاد شد، بزرگترین دغدغه آن بود که تمایل سنگدانه‌ها برای جذب آب روی نتایج آزمایش اثر بگذارد و درواقع حجم آب برای نمونه موجود کم باشد. به منظور رفع این مشکل، نمونه‌های بتن سبکدانه کوچکتر از نمونه‌های معمولی انتخاب شوند. درحال‌حاضر استفاده از روش حجمی مناسب‌ترین روش برای بررسی حجم هوای بتن سبکدانه تازه است. این روش دستگاه ساده‌ای دارد و به همین سبب در کارگاه به‌آسانی قابل انجام است و به نظر می‌رسد نسبت به روشهای دیگر تأثیر کمتری از سبکدانه می‌پذیرد. اشکال این روش این است که هم‌زدن نمونه، استفاده از نمونه‌های کوچکتر را ایجاب می‌کند و این مسئله از دقت آزمایش می‌کاهد.

۵-۱-۵ پمپ‌پذیری

در ابتدا لازم است اشاره شود که گرچه روش‌ها و ضوابطی برای ساخت مخلوطی با پمپ‌پذیری مناسب وجود دارد، تنها راه اطمینان یافتن از پمپ‌پذیربودن یک مخلوط بتنی، آن است که آن را دقیقاً در شرایط کارگاه و در همان حجم پمپ کنیم که البته روشی بسیار پرهزینه و زمان‌بر است. در ادامه به بررسی آزمایشهای متداول برای بررسی پمپ‌پذیری خواهیم پرداخت:

۵-۱-۵-۱ آزمایش آب‌انداختگی: یکی از روش‌های آزمایش پمپ‌پذیری برای بتن معمولی، آزمایش آب-انداختگی است که طبق آن میزان آب‌انداختگی بتن که از مجرایی متصل به نمونه بتنی تحت فشار خارج می‌شود، اندازه‌گیری می‌شود. دلیل اصلی گرفتگی در مسیر پمپ‌کردن بتن معمولی، آب‌انداختن آن تحت فشار است که باعث خشن شدن مخلوط باقی‌مانده و گرفتگی در مسیر می‌شود. این روش، آزمایشی کاملاً علمی بر اساس عامل اصلی ایجاد بتنی با پمپ‌پذیری کم است و به دستگاه کوچکی نیاز دارد، اما برای بتن سبکدانه کاربردی نیست، زیرا در خلال آن سبکدانه‌ها رطوبت خود را تحت فشار از دست داده و غیر اشباع می‌شوند، همچنین انجام آن نیاز به کاربر ماهر دارد.

۵-۱-۵-۲ آزمایش فشار- حجم: این آزمایش در نروژ همچنان در حال توسعه است. در این روش با اعمال فشاری بر نمونه‌ی بتنی تغییر حجم آن اندازه‌گیری می‌شود. پس‌از قرار دادن نمونه بتن سبکدانه تازه و اتصال آن به محفظه نگهدارنده، آن را به محفظه گاز تحت فشار متصل کرده و فشار مورد نیاز را اعمال می‌کنیم. تغییر درحجم با اندازه‌گیری تغییرات وزن محفظه نگهدارنده متصل به نمونه که جریان تحت فشاری به سوی نمونه دارد، اندازه-گیری می‌شود. دستگاه این آزمایش در شکل ۵-۳ نشان داده شده است. در انجام این آزمایش باید توجه کرد که از نمونه‌های بزرگتر، نتایج دقیق‌تری بدست می‌آید. این آزمایش برای بتن سبکدانه طراحی شده است وارتباط بین پمپ‌پذیری و تراکم‌پذیری بتن را نشان می‌دهد. با این وجود گزارش‌های کمی از کاربرد این دستگاه منتشر شده است. علاوه بر آن به دستگاه بزرگی نیاز دارد که استفاده از آن را در محل کارگاه ناممکن می‌سازد. به همین دلیل چندان متداول نیست.

شکل ۵-۳ دستگاه تعیین پمپ‌پذیری بتن به روش فشار-حجم

۵-۱-۶ پایداری

پایداری به معنای حفظ همگنی بتن در همه‌ی مراحل اجرای بتن یعنی ساخت، حمل‌ونقل، بتن‌ریزی، تراکم و پرداخت است. پایداری مخلوط‌های بتنی معمولاً با برآوردهای چشمی ارزیابی می‌شود و آزمایش خاصی برای پایداری انجام نمی‌شود. اما از آن‌جایی‌که به دلیل تفاوت در چگالی عناصر تشکیل‌دهنده، بتن سبک پتانسیل بیشتری پتانسیل زیادی برای ناپایدار شدن دارد، برآورد پایداری بتن سبک از اهمیت بیشتری برخوردار است. در ادامه آزمایش‌های متداول ارزیابی پایداری بتن سبکدانه ذکر شده است:

۵-۱-۶-۱ آزمایش ستون جداشدگی: آزمایش پیشنهادی برای جداشدگی بتن به این صورت است که استوانه‌ای مطابق شکل۵-۴ در نظر می‌گیریم، که از دو استوانه به قطر داخلی ۲۰۰ میلی‌متر و ارتفاع آن ۱۰۰ میلی‌متر ساخته شده است.

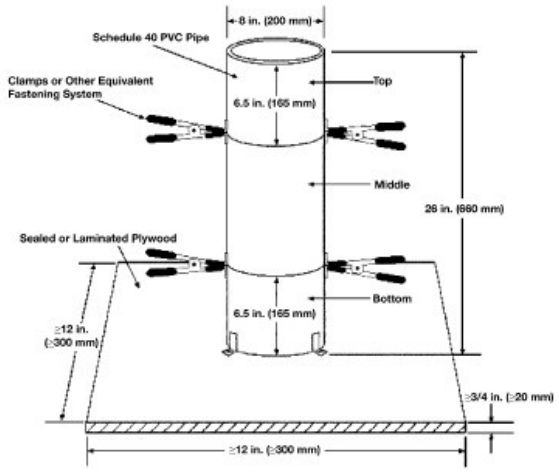
شکل ۵-۴ دستگاه آزمایش ستون جداشدگی

نحوه انجام آزمایش جداشدگی پس از مخلوط کردن کامل، در جدول ۵-۱ ارائه شده است:

جدول ۵-۱ نحوه انجام آزمایش جداشدگی

فعالیت	زمان انجام
اندازه‌گیری اسلامپ بر روی میز جریان مطابق آیین‌نامه و اندازه‌گیری مجدد آن پس از اعمال ۵ ضربه به میز جریان	۰-۵ دقیقه
استوانه جداشدگی را به میز لرزش متصل کرده و استوانه را با بتن سبک پر می‌کنیم. نمونه با فرکانس ۵۰ هرتز و دامنه ۰/۵ میلی‌متر لرزانده می‌شود.	۵-۷ دقیقه
اتصالات باز شده و و ورق فولادی بین دو استوانه قرار داده می‌شود.	۷-۸ دقیقه
انتخاب اول: از بخش بالایی و پایینی دو نمونه تهیه می‌شود. نمونه‌ها باید در یک لایه پر شوند و پس از ۲۵ ضربه وزن شده و چگالی تازه‌ی آنها اندازه‌گیری می‌شود.	۸-۹ دقیقه
انتخاب دوم: نمونه‌های انتخاب قبل از قالب خارج شده و پس از یک روز وزن آنها هم در هوا و هم پس از مستغرق شدن برای محاسبه چگالی سخت شده اندازه‌گیری می‌شود.	۸-۹ دقیقه

با این وجود این آزمایش که برای بتن سبک طراحی شده است، هنوز استاندارد نشده و می‌توان از آزمایش معادل آن که برای بتن خودتراکم استاندارد شده است، استفاده نمود. در آزمایش بتن‌های خودتراکم که برای مقاومت در برابر جداشدگی توسط انجمن آمریکایی مصالح و روش‌های آزمایش(*ASTM C 1610*) استاندارد شده است، به شرح زیر عمل می‌شود. دستگاه این آزمایش، همان‌طور که در شکل ۵-۵ آورده شده است، از یک استوانه به قطر ۲۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۶۶۰ میلی‌متر تشکیل می‌شود که به سه قسمت تقسیم شده است. ارتفاع قسمت‌های بالا و پایین، هر کدام ۱۶۵ میلی‌متر و ارتفاع قسمت وسط، ۳۳۰ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۵-۵ دستگاه آزمایش ستون جداشدگی برای بتن خودتراکم

در این روش، دستگاه به‌مدت ۲دقیقه از بتن پر می‌شود و به مدت ۱۵دقیقه دست نخورده باقی می‌ماند. سپس، بتن موجود در قسمت‌های بالا و پایین دستگاه بر روی الک ۴/۷۵ میلی‌متر(#۴) شسته شده و سنگدانه‌های درشت باقی-مانده روی الک خشک می‌شود و اندیس جداشدگی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$SI = 2\left[\frac{(CA_B - CA_T)}{(CA_B + CA_T)}\right]\times 100$$

که در آن، CA_T وزن درشت‌دانه قسمت بالای دستگاه و CA_B وزن درشت‌دانه قسمت پایین دستگاه است. در صورتی که اندیس جداشدگی بتن خودتراکم کوچکتر از ۱۰ درصد باشد، بتن خودتراکم مقاومت کافی در برابر جداشدگی استاتیکی دارد. با توجه به استاندارد بودن و متداول بودن این دستگاه به نظر می‌رسد می‌توان از آن برای تعیین جداشدگی در بتن سبک نیز استفاده کرد، با این تفاوت که به جای اندازه‌گیری وزن درشت‌دانه در قسمت بالا و پایین دستگاه، چگالی بتن سبک در هر قسمت اندازه‌گیری شود و اندیس جداشدگی از تقسیم چگالی قسمت بالا به چگالی قسمت زیرین محاسبه شود و از آنجایی که حجم دو قسمت باهم برابرند، می‌توان برای سادگی وزن دو قسمت را محاسبه کرد.

۵-۲ آزمایش‌های درجا

اگر در حین اختلاط تغییراتی در رطوبت اولیه سنگدانه‌ها، دانه‌بندی یا درصد هوا نسبت به طرح اختلاط صورت گیرد، بر درصد رطوبت بتن و چگالی نسبی سنگدانه‌ها تأثیر می‌گذارد. این امر انجام آزمایش‌های کارگاهی را ضروری می‌کند. نمونه‌گیری باید مطابق آیین‌نامه انجام شود. با استفاده از آزمایشهای متداول در آغاز پروژه، چگالی، درصد هوا و اسلامپ یک یا دو نمونه اولیه باید تعیین شوند تا تطابق آنها با نمونه‌های آزمایشگاهی مشخص شود. اصلاحات موردنظر جزئی در صورت لزوم انجام خواهد شد. در حالت کلی اگر تفاوت در چگالی بتن تازه بیش از $30\text{-}50\ kg/m^3$ باشد، تغییرات مورد نیاز باید اعمال شود. این مقدار در خصوص حجم هوا ± 1.5 درصد است تا از تغییرات ناخواسته در چگالی، مقاومت فشاری، کارپذیری و پایایی جلوگیری شود.

در جدول ۵-۲، خلاصه‌ای از آزمایشهای متداول بتن تازه و توضیحات مربوط به کاربرد هر یک در بتن سبکدانه ارائه شده است:

جدول ۵-۲ آزمایشهای متداول بتن تازه و کاربرد آن‌ها در بتن سبکدانه

کمیت مورد بررسی	آزمایش	توضیحات
	آزمایش اسلامپ	
	آزمایش جریان	
چگالی	آزمایش استاندارد	در صورت خرد نشدن سبکدانه‌ها مناسب است
درصد هوا	روش فشاری	نامناسب برای استفاده برای نمونه-هایی با سبکدانه غیر اشباع
	روش حجمی	
پمپ پذیری	آزمایش آب‌انداختگی	نامناسب ارزیابی شده است.
	آزمایش فشار/ حجم	دستگاه آن بزرگ است ولی مناسب ارزیابی شده است.
پایداری	ریزش آزمایشی	در بتن سبکدانه ممکن است برای پروژه‌های در مقیاس کوچک مناسب بناشد.
	آزمایش ستون جداشدگی	هنوز در حال گسترش است.
	بررسی‌های مشاهداتی	بر مبنای مشاهدات حاصل از آزمایشها کارپذیری استواراست تنها برای دستیابی به دیدی کلی مناسب است.

۵-۳ اصلاح طرح اختلاط

هم مخلوط‌های کارگاهی و هم نمونه‌های آزمایشگاهی باید دائماً در بازه‌های زمانی خاص، مورد بررسی قرار گیرند تا در صورت به‌وجود آمدن تغییرات ناخواسته در بتن یا برای اعمال تغییری تعمدی در آن، اقدامات لازم انجام پذیرد. به طور مثال برای جبران تغییر در میزان رطوبت سنگدانه‌ها این بررسی‌ها الزامی است. شاید نیاز باشد که مخلوطی با میزان سیمان کمتری ساخته شود یا از افزودنی‌های شیمیایی استفاده کرده و یا شاید تغییر در اسلامپ یا درصد هوا الزامی باشد. این آزمایش‌ها به اطمینان از کیفیت بتن مورد نظر می‌انجامند، زیرا نمونه‌های آزمایشگاهی زمانی که در کارگاه با حجمی بسیار بیشتر ساخته می‌شوند، ممکن است با تغییراتی در ویژگی‌ها همراه

باشند و این موضوع، انجام آزمایش برروی نمونه‌های کارگاهی را الزامی می‌کند. زمانی که ایجاد تغییری در خواص بتن ماند حجم هوا، درصد سنگدانه‌ها در مخلوط یا اسلامپ مدنظر باشد، ضروری است این تغییر در دو یا چند فاکتور ایجاد شود تا مقدار کل بتن و سایر خواص بتن ثابت بمانند. در ادامه به این تنظیمات خواهیم پرداخت. میزان این تنظیمات برای هر مترمکعب بتن داده شده است. با این حال این اعداد صرفاً برای ارائه‌ی یک دید کلی هستند و آزمایش با مواد مختلف در صورت لزوم باید انجام شود:

- افزایش در درصد ریزدانه به کل سنگدانه‌ها: برای هر درصد افزایش در سبکدانه آب حدوداً ۱/۸ کیلوگرم بر متر مکعب باید اضافه شود. افزایش میزان آب نیاز یه افزایش سیمان برای تنظیم مقاومت نمونه دارد. برای هر ۸/۱ کیلوگرم بر متر مکعب آب، سیمان باید تقریباً ۱ درصد افزایش یابد. درشت‌دانه ها و ریزدانه-ها باید برای رسیدن به حجم کل مطلوب تنظیم گردند.
- درصد هوا: اگرمیزان آب تغییر نکند، افزایش در درصد هوا می‌تواند باعث افزایش در اسلامپ شود. برای هر یک درصد افزایش در درصد هوا، آب باید حدوداً تا ۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب کاهش یابد. همچنین در صورت عدم تغییر میزان سیمان، افزایش حجم هوا به کاهش مقاومت خواهد انجامید. همچنین میزان ریزدانه نیز برای دستیابی به حجم کل مورد نظر باید تغییر کند.
- اسلامپ: تغییر در اسلامپ می‌تواند حاصل افزایش در رطوبت باشد. برای هر یک اینچ تغییر در اسلامپ زمانی که اسلامپ اولیه ۷/۵ سانتی‌متر است، آب باید حدوداً به اندازه ۶ کیلوگرم بر متر مکعب اضافه شود. این میزان زمانی که اسلامپ اولیه بیشتر است، کمتر خواهد شد. افزایش آب باعث کاهش در مقاومت می‌شود. در نتیجه میزان سیمان نمونه نیز باید تغییر کند، برای هر ۶ کیلوگرم بر متر مکعب آب اضافه شده ۳ درصد به میزان سیمان افزوده خواهد شد.

پیوست الف – تعیین مقاومت خرد شدگی

(بر اساس ضمیمه A استاندارد EN 13055-1)

الف– ۱- اساس روش

نمونه سبکدانه در استوانه آزمایش قرار داده می‌شود و به وسیله لرزاندن متراکم می‌گردد. پیستونی با فشار، به مقدار مشخصی وارد استوانه می‌شود. نیروی لازم برای این کار اندازه‌گیری شده و به عنوان مقاومت سنگدانه در برابر خرد شدن ثبت می‌شود. دو روش برای انجام این آزمایش وجود دارد. اولین روش برای سبکدانه‌های در اندازه ۴ تا ۲۲ میلیمتر با وزن مخصوص بیشتر از kg/m^3 ۱۵۰ قابل استفاده است. دومین روش معمولا برای سبکدانه‌هایی با وزن مخصوص kg/m^3 ۱۵۰ و کمتر از آن انجام می‌شود.

الف–۲– وسایل مورد نیاز

- همه ابزارآلات استفاده شده به جز مواردی که ذکر می‌شود باید مطابق با الزامات ذکر شده در EN932-5 باشد.
- دو روش برای انجام آزمایش قابل استفاده است. در آزمایش به روش اول استوانه فولادی استفاده شده باید مطابق شکل ۱ باشد و در صورتی که از روش دوم برای انجام آزمایش استفاده شود استوانه باید مطابق شکل ۲ باشد.
- پرس هیدرولیکی یا دستگاه دیگری که توانایی ایجاد فشار لازم برای انجام آزمایش راداشته باشد و فشار را با دقت ۵ درصد اندازه‌گیری کند.
- میز لرزه با ۳۰۰۰ لرزش در دقیقه و دامنه نوسان ۰/۵
- تیغه فولادی با طول مناسب
- پیمانه با حجم مناسب برای پرکردن استوانه آزمایش

- آون ترمواستاتیک که قادر به تأمین دمای $110\pm5^{o}C$ باشد.

الف–۳– آماده کردن نمونه‌ها

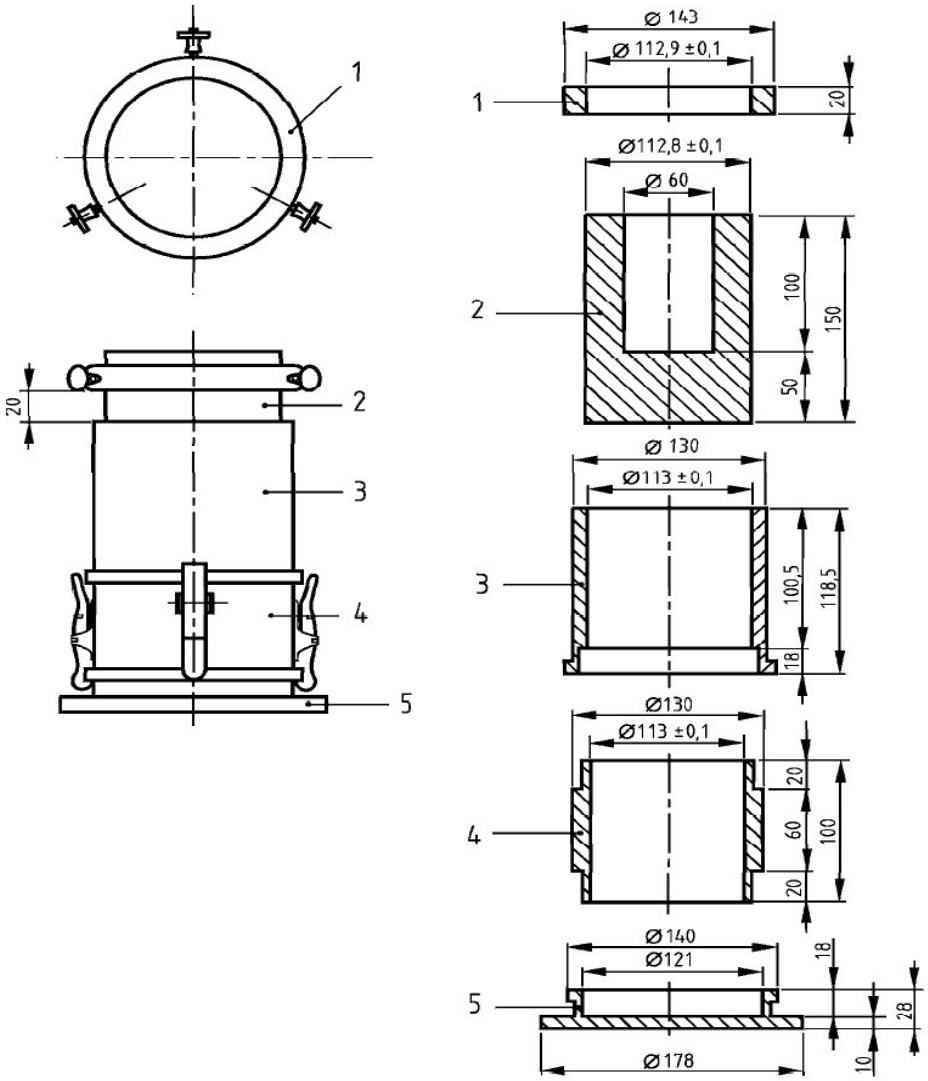
نمونه‌گیری باید بر اساس *EN932-1* انجام شود. سه نمونه با اندازه مناسب برای آزمایش آماده می‌شود و نمونه‌های با اندازه کوچک یا بزرگ از آزمایش خارج می‌گردند.

الف–۴– روش انجام

دو روش برای انجام آزمایش تعیین مقاومت خردشدگی قابل انجام است که هر دو روش در این بخش شرح داده شده است.

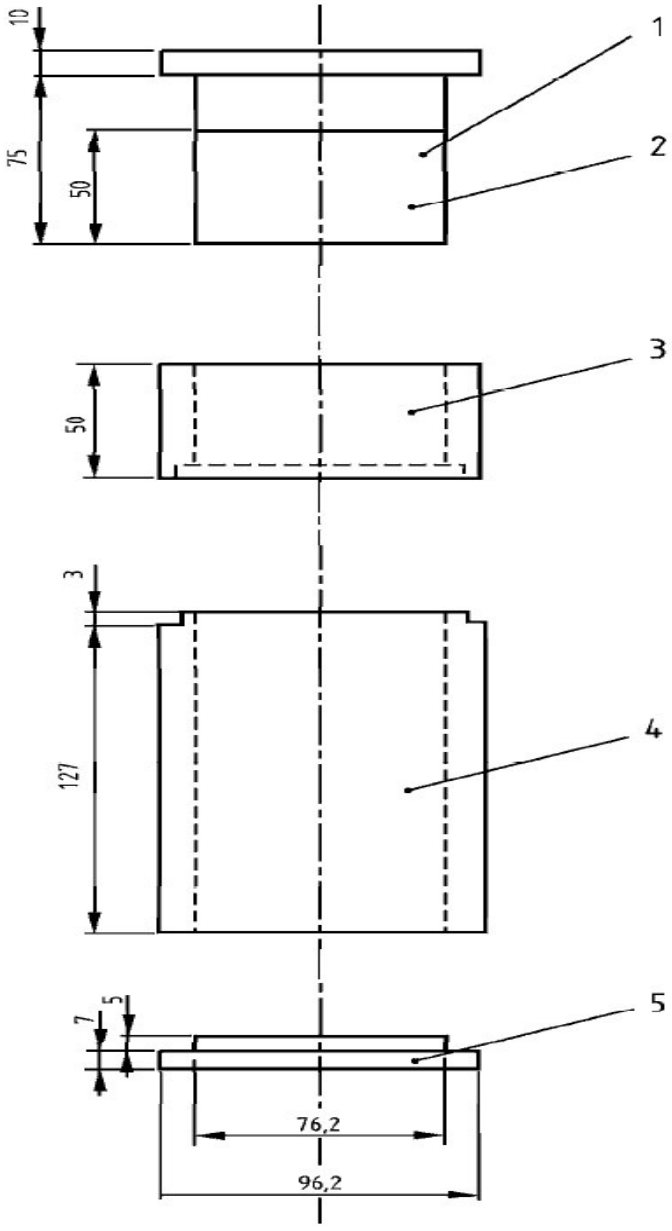
روش اول: استوانه بر روی میز لرزه قرار داده شده و سبکدانه‌های مورد آزمایش به آرامی درون آن و در کناره‌های آن ریخته می‌شوند تا سرریز گردد. باید مراقب بود تا در سبکدانه‌ها جداشدگی اتفاق نیفتد. سپس استوانه به مدت ۳ تا ۶۰ ثانیه لرزانده می شود. به دلیل لرزش سبکدانه ها متراکم می شوند و بخشی از بالای استوانه خالی می گردد. بنابراین پس از لرزش استوانه مجددا از سبکدانه پر می‌گردد. پس از پر کردن استوانه از سبکدانه، استوانه به مدت ۳ تا ۶۰ ثانیه لرزانده شده و پس از آن سطح آن با استفاده از شمشه صاف می‌گردد. ریل بالایی روی استوانه قرار گرفته و پیستون به آرامی روی سبکدانه‌های متراکم شده قرار می‌گیرد. فاصله بین ریل بالایی تا حلقه تماس را برابر $20mm$ تنظیم کرده و مجموعه در دستگاه پرس هیدرولیکی قرار داده می‌شود. نیروی پیستون افزایش یافته تا در ۱۰۰ ثانیه تقریبا $20mm$ به درون استوانه نفوذ کند. نیرو بر حسب نیوتن ثبت می‌شود. همین کار برای دو نمونه باقی‌مانده هم انجام می‌شود.

روش دوم: استوانه بر روی میز لرزه قرار داده شده و سبکدانه‌های مورد آزمایش به آرامی درون آن و در کناره‌های آن ریخته می‌شوند تا سرریز گردد. باید مراقب بود تا در سبکدانه‌ها جداشدگی اتفاق نیفتد. استوانه به مدت ۳ ثانیه لرزانده شده و حلقه‌ای دور استوانه قرار می‌گیرد. سبکدانه‌های اضافی برای پر شدن این حلقه درون آن ریخته شده و استوانه مجددا به مدت ۳ ثانیه لرزانده می‌شوند. پس از آن حلقه جدا شده و مصالح اضافی از روی استوانه به پایین ریخته، سپس سطح سبکدانه‌ها صاف می‌شود و مجموعه در دستگاه پرس هیدرولیکی قرار می‌گیرد. نیروی وارده به پیستون به تدریج افزایش یافته تا در ۱۰۰ ثانیه تقریبا به اندازه $50mm$ در استوانه نفوذ کند. مقدار نیرو بر حسب نیوتن ثبت می‌شود. همین مراحل بر روی دو نمونه دیگر هم انجام می‌شود.



۱- حلقه قابل تنظیم ۲- پیستون ۳- استوانه بالایی ۴- استوانه پایینی ۵- پایه

شکل الف- ۱- وسیله آزمایش تعیین مقاومت خرد شدگی در روش اول



۱-علامت روی قیف ۲-پیستون ۳- حلقه ۴- استوانه ۵- پایه

شکل الف- ۲- وسیله آزمایش تعیین مقاومت خرد شدگی در روش دوم

الف-۵- محاسبات و ارائه نتایج

مقاومت در برابر خرد شدگی(C_b یا C_a) بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_a \text{ یا } C_b = \frac{L+F}{A} N/mm^2$$

در این رابطه

C_a مقاومت در برابر خرد شدگی بر حسب نیوتن بر میلیمتر مربع است که بر اساس آزمایش اول به دست می‌آید.

C_b مقاومت در برابر خردشدگی بر حسب نیوتن بر میلیمتر مربع است که بر اساس آزمایش دوم به دست می‌آید.

L نیروی وارد بر پیستون بر حسب نیوتن

F نیروی فشاری بر حسب نیوتن

A مساحت پیستون بر حسب میلیمتر مربع

مقدار میانگین نتایج سه آزمونه اندازه‌گیری شده محاسبه شده و گزارش می‌شود.

پیوست ب – تعیین مقاومت در برابر ذوب و یخ

(بر اساس ضمیمه C استاندارد EN 13055-1)

ب–۱– مقدمه

روش ارائه شده در این بخش از ضمیمه برای سبکدانه‌هایی با اندازه بزرگتر از ۴ میلیمتر و با وزن مخصوص ظاهری ۱۵۰ کیلو گرم بر متر مکعب و یا بیش از آن مناسب می‌باشد.

ب–۲– اساس روش

نمونه‌ای از سبکدانه‌ها پس از غوطه‌ور شدن در آب در فشار اتمسفر، تحت ۲۰ چرخه ذوب و یخ قرار می‌گیرند. این عمل شامل سرد کردن سبکدانه‌ها تا دمای زیر ۱۵– درجه سانتیگراد در هوا و سپس قرار دادن آن‌ها در آب با دمای ۲۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. پس از تکمیل این چرخه، سبکدانه‌ها برای مشاهده هرگونه تغییرات، همچون تشکیل ترک یا تغییر در وزن، آزمایش می‌شوند.

ب–۳– وسایل و ابزارآلات مورد نیاز برای آزمایش

- تمام ابزارآلات، مگر در مواردی که ذکر شده است، باید الزامات ذکر شده در EN 932-5 را دارا باشند.
- آون دارای تهویه، با ظرفیت متناسب باحجم آن. آون باید توانایی تنظیم دمای ۵±۱۱۰ درجه سانتیگراد را داشته باشد.
- ترازو دارای دقت $\pm ۰/۲g$ در وزن کردن نمونه‌هایی با وزن کمتر از $۴۰۰g$ و دقت $۰/۵g$ در وزن کردن نمونه‌هایی با وزن بیش از $۴۰۰g$.

- مجفظه سرد ،با گردش هوا. محفظه باید امکان آن را داشته باشد که دما را در ۲/۵ ± ۱۷- درجه سانتیگراد نگه دارد.
- ظروف آزمایش، ساخته شده از ورق‌های فولادی مقاوم در برابرخردگی با مساحت کف تقریبا برابر $۰/۰۲m^2$ و ارتفاع $۱۰۰mm$
- الک‌های آزمایش، استفاده از آن‌ها مطابق با *EN 933-2* باشد.
- آب مورد استفاده باید آب مقطر یا آب بدون مواد معدنی باشد.

ب-۴- نمونه‌گیری

نمونه‌گیری باید بر اساس *EN 932-1 انجام* شود.

ب-۵- نمونه‌های آزمایش

در این آزمایش از سه نمونه استفاده می‌شود. تهیه این نمونه‌ها باید بر اساس *EN 932-2* و با کاهش نمونه‌ها از سنگدانه‌هایی که دانه‌های بزرگتر و کوچکتر از اندازه اسمی از آن جدا شده‌اند انجام گیرد.

ب-۵-۲- اندازه نمونه‌های آزمایش

هر یک از اندازه‌هایی که در جدول ب-۱ برای سنگدانه‌ها ذکر شده است، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. حجم لازم برای آزمایش هر کدام از این سبکدانه‌ها در جدول ۱ آمده است. تا ۵ درصد انحراف از مقادیر داده شده مجاز می‌باشد.

جدول ب-۱- نمونه‌های مورد نیاز برای انجام آزمایش ذوب یخ

بزرگترین سنگدانه (mm)	حجم سبکدانه مورد نیاز (ml)
۴ تا ۸	۵۰۰
۸ تا ۱۶	۱۰۰۰
۱۶ تا ۳۲	۱۵۰۰

ب-۵-۳- آماده‌کردن نمونه‌های آزمایش

نمونه‌ها شسته شده می‌شوند تا در صورتی که ناخالصی‌هایی به آن چسبیده است جدا شود. براساس *EN 1097-5* به نمونه‌ها فرصت داده می‌شود تا در دمای محیط خشک شوند. سپس نمونه‌ها وزن می‌شوند. دقت در وزن‌کشی باید طبق دو مورد زیر باشد:

- نمونه‌های با وزن کمتر از ۴۰۰gr با دقت ۰/۰۴gr
- نمونه‌های با وزن بیش از ۴۰۰gr با دقت ۰/۱gr

ب-۶- روش آزمایش

خیس کردن

نمونه‌ها به مدت ۴ ساعت در فشار اتمسفر در درون ظرف‌هایی که در بخش ب-۳-۵ شرح داده شد در دمای ۳±۲۰ درجه سانتیگراد در آب مقطر یا آب بدون مواد معدنی، با اطمینان از اینکه در طول ۴ ساعت آب تمامی نمونه‌ها را پوشش می‌دهد و سطح آب حداقل ۱۰۰mm بالاتر از سطح نمونه‌ها می‌ایستد، قرار می‌گیرند. برای اطمینان از عدم غوطه‌ور شدن نمونه‌ها با استفاده از توری‌های موجود نمونه‌ها کاملا زیر آب نگه داشته می‌شوند.

قرارگیری در معرض ذوب و یخ

نمونه‌ها از ظرف‌های آزمایش خارج شده و به مدت ۱ دقیقه روی الک قرار داده می‌شوند تا آب آن‌ها خارج شود. سپس نمونه‌ها در ظرف آزمایش قرار داده شده و به طور یکنواخت در سطح ظرف پخش می‌شوند. ظرف‌ها در محفظه هوای سرد با اطمینان از اینکه تا حدامکان حرارت به صورت یکنواخت به همه وجوه نمونه‌ها برسد، قرار می‌گیرند. فاصله ظرف‌ها از یکدیگر و همچنین فاصله ظرف‌ها تا دیواره محفظه نبایداز ۵۰mm کمتر باشد. بعد از قرار دادن ظروف در مجفظه دمای هوا در ۲۰- درجه سانتیگراد ثابت می‌شود واجازه کمتر شدن درجه حرارت از ۲۲- درجه سانتیگراد و بیشتر شدن آن از ۱۵- درجه سانتیگراد داده نمی‌شود. در صورت لزوم مصالح درون محفظه باید با قدرت سردکنندگی آن متناسب باشند. ظرف‌های حاوی نمونه‌ها باید حداقل ۴ ساعت در این مجفظه باقی بمانند. بعد از اتمام چرخه یخ، ظروف حاوی نمونه‌ها برای مدت حداقل ۱ ساعت در آب با دمای ثابت ۳±۲۰ درصد قرار داده می‌شوند. بعد از اینکه آب از نمونه‌ها خارج شد چرخه یخ مجددا انجام می‌شود. در مجموع این چرخه ۲۰ مرتبه تکرار می‌شود.

الک کردن و خشک کردن

پس از اتمام ۲۰ چرخه یخ، محتوای ظروف روی الکی که اندازه چشمه آن نصف اندازه چشمه کوچکترین الکی است که در آماده کردن نمونه‌ها از ان استفاده شده بود، ریخته می‌شود. نمونه‌ها شسته شده و به صورت دستی الک می‌شوند. آنچه بر روی الک باقی می‌ماند بر اساس بخش ب-۵-۳ خشک و وزن می‌شود.

محاسبات و ارائه نتایج

ابتدا وزن مقادیر عبوری از الک‌ها برای هر سه نمونه با هم جمع شده و به صورت درصد وزنی مخلوط سه نمونه بیان می‌شود. سپس نتایج آزمایش چرخه ذوب و یخ بر اساس معادله زیر بیان می‌شود:

$$F = \left[\frac{M_1 - M_2}{M_1}\right] \times 100$$

که درآن

M_1 وزن خشک اولیه سه نمونه قبل از قرارگیری در چرخه بر حسب گرم

M_2 وزن خشک نهایی سه نمونه روی الک بر حسب گرم

F درصد کاهش وزن سه نمونه بعد از انجام آزمایش

می‌باشند.

پیوست پ -تعیین چگالی دانه‌ای و جذب آب سبکدانه‌ها

(بر اساس ضمیمه C استاندارد $EN\ 1097\text{-}6$)

پ-۱- مقدمه

این بخش از ضمیمه، روشی را برای تعیین چگالی دانه‌ای و جذب آب سبکدانه‌های خشک با استفاده از پیکومتر ارائه می‌دهد. این روش برای ذرات بین $4\ mm$ تا $31/5mm$ قابل استفاده است.

پ-۲- آماده کردن نمونه آزمایش

نمونه‌گیری از سنگدانه‌ها بر اساس $EN\ 932\text{-}1$ و کاهش بر اساس $EN\ 932\text{-}2$ انجام می‌شود. آزمایش بر روی دو نمونه انجام صورت می‌گیرد. نمونه‌ها باید حجمی بین ۰/۵ تا ۰/۶ لیتر داشته باشند. هر نمونه بر روی الک ۴ میلیمتری شسته می‌شود تا ذرات کوچکتر از آن جدا شوند. سپس به نمونه‌ها فرصت داده می‌شود تا آب آن خارج شود. تمامی سنگدانه‌های باقی‌مانده روی الک ۳۱/۵ میلیمتری از آزمایش حذف می‌شود.

پ-۳- کالیبراسیون پیکومتر

پیکومتر خشک، قیف و توری فلزی (در صورت استفاده) وزن می‌شوند (M_p).

حجم پیکومتر با پر کردن آن از آب به دمای C° ۳±۲۲ و قرار دادن آن در حوضچه آب در دمای $°C$ ۱±۲۲ برای حداقل ۱ ساعت، تعیین می‌شود. تا علامت روی قیف به آن آب اضافه شده و از حوضچه آب خارج می‌شود. سطح بیرونی پیکومتر با دقت خشک شده و وزن می‌شود(M). سپس، تفاوت وزن پیکومتر پر از آب و پیکومتر خشک ($M\text{-}M_p$) تعیین می‌گردد.

حجم آب با تقسیم وزن آب درون پیکومتر بر وزن مخصوص آن در دمای کالیبراسیون تصحیح می‌شود (V_p).

پ-۴- روش آزمایش

آزمایش بر روی دو نمونه انجام می‌شود. در حین آزمایش دمای حوضچه باید در دمای $22\pm1\ ^{\circ}C$ ثابت نگه داشته شود. پیکومتر و قیف آن و در صورت استفاده از سبکدانه‌هایی که غوطه‌ور می‌شوند، پیکومتر؛ توری و قیف وزن می‌شوند(m_1). نمونه‌ها در کوره به دمای $110\pm5\ ^{\circ}C$ تا رسیدن به وزن مشخصی خشک می‌شوند.به نمونه‌ها اجازه داده می‌شود تا در دمای محیط سرد شوند. سپس اولین نمونه در پیکومتر قرار می‌گیرد. پیکومتر حاوی اولین نمونه وزن می‌شود. در صورت استفاده از سبکدانه‌هایی که در آب غوطه‌ور می‌شوند، توری درون پیکومتر قرار گرفته، قیف بر روی پیکومتر نصب شده و کل مجموعه توزین می‌گردد(m_2).

پیکومتر از آب به دمای $22\pm1\ ^{\circ}C$ تا علامت روی قیف پر شده و ۵ دقیقه وقت گرفته می‌شود. مجموعه در حوضچه آب به دمای $22\pm1\ ^{\circ}C$ قرار داده می‌شود. در صورت نیاز، برای نگه داشتن سطح آب نزدیک به علامت روی قیف، در طول آزمایش آب اضافه می‌شود. پس از ۵ دقیقه مجموعه از حوضچه آب خارج می‌شود. برای خارج شدن هوای محبوس در سنگدانه‌ها پیکومتر به آرامی غلت داده شده و به آن ضربه زده می‌شود و یا به آرامی از لرزاننده استفاده می‌شود. مجددا پیکومتر تا علامت روی قیف از آب پر می‌شود. به دقت سطح خارجی آن خشک شده و وزن می‌گردد(M_5). دوباره پیکومتر درون حوضچه قرار می‌گیرد. عملیات شرح داده شده بعد از ۲۴ ساعت تکرار می‌شود.

بعد از اندازه‌گیری نهایی، آب درون پیکومتر تخلیه می‌شود. سنگدانه‌ها بر روی پارچه خشکی قرار داده می‌شوند و با غلتاندن پارچه برای حداکثر ۱۵ ثانیه آب سطحی سنگدانه‌ها خشک می‌شود. سپس سبکدانه‌ها وزن می‌شوند (M_w). همین کار برای نمونه دیگر هم انجام می‌شود. در اکثر آزمایش‌ها M_w بعد از ۲۴ ساعت اندازه‌گیری می‌شود.

پ-۵- محاسبات و ارائه نتایج

برای هر نمونه چگالی دانه‌ای ظاهری(ρ_a) سبکدانه‌ها بر حسب تن بر متر مکعب بر اساس فرمول زیر اندازه‌گیری می‌شود:

$$\rho_a = \frac{(m_2 - m_1)\rho_w}{M_p + (V_p \times \rho_w) + M_w - M_F}$$

در رابطه فوق داریم:

m_1 وزن پیکومتر با قیف و توری (در صورت استفاده) بر حسب گرم

m_2 وزن پیکومتر و نمونه آزمایش خشک و توری(درصورت استفاده) بر حسب گرم

ρ_w چگالی آب در دمای $22\ ^{\circ}C$

M_p وزن پیکومتر و توری(در صورت استفاده) کالیبره شده بر حسب گرم

V_p حجم پیکومتر و توری(در صورت استفاده) کالیبره شده بر حسب میلی‌لیتر

M_w وزن سنگدانه‌ها در حالت SSD در پایان آزمایش بر حسب گرم

M_F وزن پیکومتر، نمونه آزمایش، قیف،توری (در صورت استفاده) و آب در پایان آزمایش بر حسب گرم

اندازه چگالی سنگدانه‌ها تا مقداری نزدیک ۰/۰۰۱ میلی‌گرم بر متر مکعب باید اندازه‌گیری شوند. میانگین مقادیر بدست آمده از دو نمونه با دقت ۰/۰۱ میلی‌گرم بر متر مکعب ، همان اندازه‌ی چگالی سنگدانه‌ی خشک شده برای بتن سبکدانه است. مقادیر جذب آب بر حسب درصدی از وزن خشک با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه هستند.

برای میزان جذب آب در زمان نهایی اندازه‌گیری داریم:

$$W_F = \frac{M_w - (m_2 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100$$

و برای جذب آب در زمان میانی رابطه زیر صادق است:

$$W_I = W_F - \frac{M_w - (M_F - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100$$

در روابط فوق :

m_1 وزن پیکومتر با قیف و توری (در صورت استفاده) بر حسب گرم

m_2 وزن پیکومتر و نمونه آزمایش خشک و توری(درصورت استفاده) بر حسب گرم

M_F وزن پیکومتر، نمونه آزمایش، قیف،توری (در صورت استفاده) و آب در زمان نهایی آزمایش بر حسب گرم

M_I وزن پیکومتر، نمونه آزمایش، قیف، توری (در صورت استفاده) و آب در زمان میانی بر حسب گرم

حجم آب جذب شده در هر حالت با دقت ۰/۱ درصد باید محاسبه شود.

بخش دوم

بررسی آزمایشگاهی

فصل اول- محدوده برنامه آزمایشگاهی

در بخش دوم گزارش حاضر نتایج برنامه آزمایشگاهی انجام گرفته به منظور بررسی و آنالیز حساسیت بتن سبکدانه سازه‌ای ارائه شده است. دراین بخش برای ساخت بتن سبکدانه سازه‌ای، از مصالح ارسالی شرکت لیکا استفاده شده و نتایج ارائه شده در این گزارش در محدوده مصالح ارسالی از سوی شرکت لیکا معتبر می باشد.

این گزارش شامل انجام آزمایش های لازم برای بررسی و آنالیز حساسیت در بتن سبکدانه سازه ای است به نحوی که خطای موجود در ساخت بتن سبکدانه و تاثیر تغییرات هر یک از اجزاء تشکیل دهنده بتن، بر خواص بتن تازه و سخت شده مورد بررسی قرار گرفته است. در قسمت اول این بررسی، خطای موجود در ساخت یک طرح بتن سبکدانه بررسی شده است. بدین منظور، یک طرح به عنوان طرح شاهد انتخاب و در چهار نوبت ساخته شده است. آزمایش‌های مربوط به روانی، مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتن بر روی نمونه‌های شاهد انجام شده و پراکندگی نتایج و خطای اندازه‌گیری‌ها در نمونه شاهد مورد بررسی قرار گرفته است.

در قسمت دوم بررسی آزمایشگاهی، با توجه به احتمال خطا در وزن کردن مصالح مورد استفاده در بتن در کارگاه، خطای توزین هر یک از اجزاء تشکیل‌دهنده بتن سبکدانه و تأثیر آن بر مشخصات بتن تازه و سخت‌شده بررسی شده است. در این قسمت، فقط مقدار یکی از اجزاء تشکیل‌دهنده بتن سبکدانه تغییر داده شده و مقدار بقیه اجزا ثابت نگه داشته شده است. همچنین، به دلیل احتمال تغییر در مشخصات سبکدانه لیکای مورد استفاده در کارگاه و همچنین یکسان نبودن مقدار رطوبت اولیه مصالح سبکدانه لیکا، حساسیت بتن سبکدانه نسبت به تغییرات محدود در مشخصات سبکدانه لیکا و مقدار رطوبت اولیه آن نیز مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین، این قسمت شامل بررسی موارد ذیل است:

۱- **خطای توزین آب:** احتمال خطا در توزین آب در حین اجرای بتن سبکدانه در کارگاه بسیار زیاد است. در این مطالعه، برای بررسی تأثیر خطای توزین آب بر مشخصات بتن سبکدانه، دو طرح بتن سبکدانه، یک طرح با مقدار آب ده درصد کمتر از نمونه کنترل و یک طرح با مقدار آب ده درصد بیشتر از نمونه کنترل ساخته شده و تأثیر این تغییرات بر خواص بتن تازه و سخت شده بررسی شده است. انتظار می‌رود میزان این تأثیر تا حدودی با بتن معمولی متفاوت باشد.

۲- **خطای توزین سیمان:** برای بررسی تأثیر خطای توزین سیمان بر مشخصات بتن سبکدانه، دو طرح بتن سبکدانه، یک طرح با مقدار سیمان ده درصد کمتر از نمونه کنترل و یک طرح با مقدار سیمان ده درصد بیشتر از نمونه کنترل ساخته شده و تأثیر این تغییرات بر خواص بتن تازه و سخت شده بررسی شده است.

۳- **خطای توزین ماسه:** برای بررسی تأثیر خطای توزین ماسه بر مشخصات بتن سبکدانه، دو طرح بتن سبکدانه، یک طرح با مقدار ماسه طبیعی ده درصد کمتر از نمونه کنترل و یک طرح با مقدار ماسه طبیعی ده درصد بیشتر از نمونه کنترل ساخته شده و تأثیر این تغییرات بر خواص بتن تازه و سخت شده مورد بررسی قرار گرفته است.

۴- **خطای توزین سبکدانه:** به منظور بررسی تأثیر خطای توزین سبکدانه یا خطای اندازه‌گیری وزن مخصوص سبکدانه بر مشخصات بتن، دو طرح بتن سبکدانه، یک طرح با مقدار سبکدانه ده درصد وزنی کمتر از نمونه کنترل و یک طرح با مقدار سبکدانه ده درصد بیشتر از نمونه کنترل ساخته شده و تأثیر این تغییرات بر خواص بتن تازه و سخت شده مورد بررسی قرار گرفته است.

۵- **خطای تغییر نوع سبکدانه:** با توجه به احتمال تغییر نوع سبکدانه مورد استفاده در ساخت بتن سبکدانه در کارگاه، تأثیر خطای تولید سبکدانه مصرفی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین صورت که یک طرح بتن سبکدانه با سبکدانه مورد استفاده در فاز قبلی این تحقیقات و یک طرح بتن سبکدانه با سبکدانه حاوی ریزدانه زیاد ساخته شده و نتایج به دست آمده با نتایج نمونه کنترل مقایسه شده است.

۶- **خطای رطوبت اولیه سبکدانه:** به منظور بررسی تأثیر تغییر احتمالی رطوبت اولیه سبکدانه بر مشخصات فیزیکی و مکانیکی بتن سبکدانه، دو طرح بتن سبکدانه شرایط رطوبت اولیه متفاوت سبکدانه‌ها، یک طرح با رطوبت اولیه کمتر از نمونه کنترل و یک طرح با رطوبت اولیه بیشتر از نمونه

کنترل ساخته شده و تغییرات ایجاد شده در مشخصات بتن تازه و سخت شده مورد بررسی قرار گرفته است.

در این تحقیق تلاش بر این بوده است تا آزمایش ها با توجه به شرایط موجود در اغلب کارگاه های کشور و امکان بروز خطا در مراحل توزین و پیمانه کردن مصالح، خطا در اندازه‌گیری وزن مخصوص دانه‌ای سبکدانه یا رطوبت آن، تغییر دانه‌بندی سبکدانه و یا عدم رعایت شرایط اجرایی بتن سبکدانه، طراحی شوند. این گزارش علاوه بر ارائه نتایج به دست آمده از آزمایش ها، نتایج حاصل از آن‌ها را نیز تحلیل و بررسی می‌کند و در حد امکان دلیل بروز تغییرات در خواص بتن تازه و سخت شده عنوان شده است. همچنین این گزارش، پیشنهادهای اجرائی برای کاهش عوامل خطا را ارائه می‌نماید و بحرانی ترین خطاها در ساخت بتن سبکدانه لیکا را مورد توجه قرار داده است.

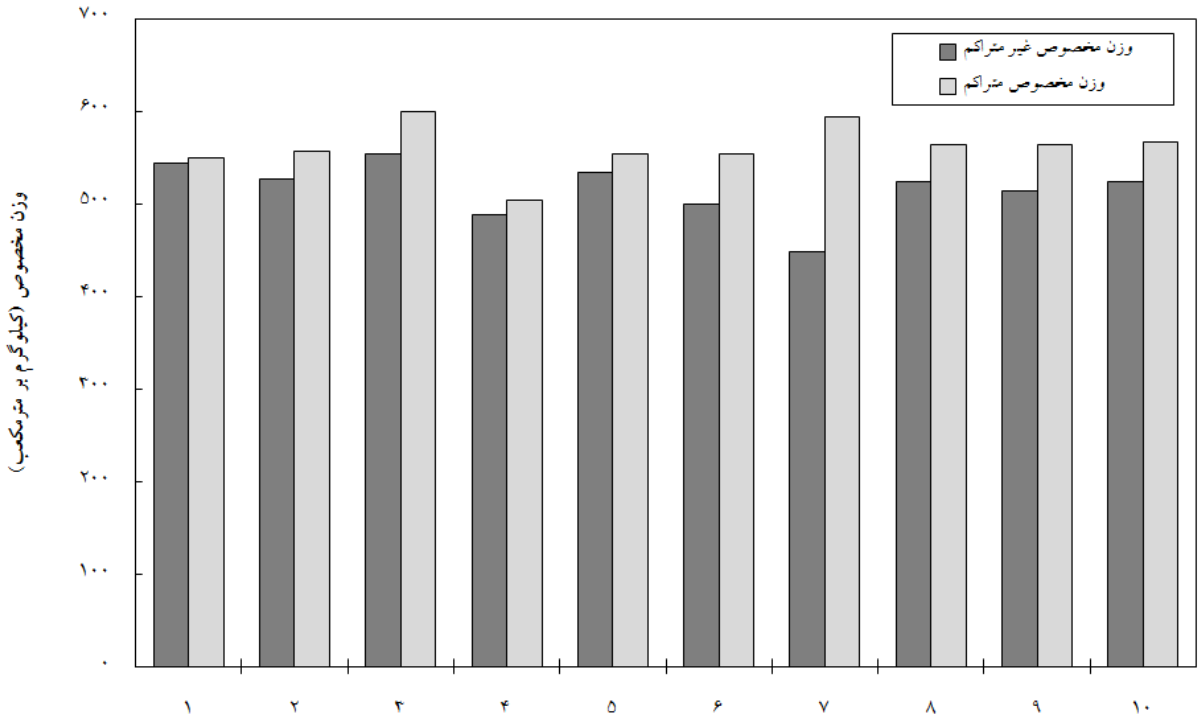
فصل دوم- آزمایش‌های سبکدانه

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 فصل‌های سوم و چهارم ارائه شده اند. به منظور بررسی خواص مکانیکی سبکدانه ها، آزمایش های متفاوتی شامل تعیین وزن مخصوص، دانه‌بندی 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. برای افزایش دقت، آزمایش‌های تعیین مشخصات سبکدانه بر روی ده آزمونه انجام شده است. به این ترتیب، میانگین و دامنه تغییرات مشخصات سبکدانه با دقت بیشتری تعیین می-شود.

۲-۱ وزن مخصوص

وزن مخصوص توده ای ده نمونه مختلف لیکا، در دو حالت غیرمتراکم[۱] و متراکم[۲] بر اساس استاندارد ASTM C 29 انجام گرفته است که نتایج آن در شکل ۲-۱ نشان داده شده است.

[۱] loose density
[۲] rodded density



شکل ۲-۱- وزن مخصوص توده ای نمونه‌های مختلف لیکا از یک رده وزن مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)

با توجه به نتایج بدست آمده میانگین وزن مخصوص لیکای سازه‌ای غیرمتراکم ۵۱۶ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد که نسبت به سبکدانه مورد استفاده در فاز قبل این تحقیقات (۶۵۱ کیلوگرم بر متر مکعب) کمتر است. همچنین، میانگین وزن مخصوص لیکای سازه ای متراکم مورد بررسی، برابر ۵۶۱ کیلوگرم برمترمکعب می باشد. از این رو وزن مخصوص متراکم این سبکدانه نیز، نسبت به وزن مخصوص لیکای سازه ای که در فاز قبلی تحقیقات مورد استفاده قرار گرفت (۷۱۸ کیلوگرم برمترمکعب)، کمتر می‌باشد. خلاصه نتایج آزمایش وزن مخصوص توده‌ای سنگدانه ها و میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات آن‌ها، در دو حالت غیرمتراکم و متراکم، در جدول‌های ۲-۱ و ۲-۲ آورده شده است. بر اساس این نتایج، ضریب تغییرات نتایج وزن مخصوص توده‌ای غیرمتراکم و متراکم، به ترتیب، برابر ۵/۹ و ۴/۷ درصد می‌باشد که نشان می‌دهد نتایج به دست آمده پراکندگی زیادی نداشته است. بر اساس استاندارد اروپایی مصالح سبکدانه (EN 13055-1:2002)، محدوده مجاز برای اختلاف وزن مخصوص توده‌ای غیرمتراکم سبکدانه برابر ۱۵ درصد وزن مخصوص اعلام شده و حداکثر ۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، وزن مخصوص توده‌ای غیرمتراکم سبکدانه لیکای مورد بررسی در محدوده ۴۴۹ تا ۵۵۴ کیلوگرم برمترمکعب بوده که تقریباً در محدوده مجاز

آیین‌نامه قرار می‌گیرد. در این استاندارد، مقدار مجاز محدوده اختلاف وزن مخصوص توده‌ای متراکم سبکدانه، ارائه نشده است. بر اساس نتایج این بررسی، ضریب تغییرات وزن مخصوص توده‌ای متراکم تا حدودی کمتر از ضریب تغییرات وزن مخصوص توده‌ای غیرمتراکم است. این امر می‌تواند به این دلیل باشد همگنی و یکنواختی در آزمونه‌گیری نمونه‌های متراکم بهتر حفظ می‌شود.

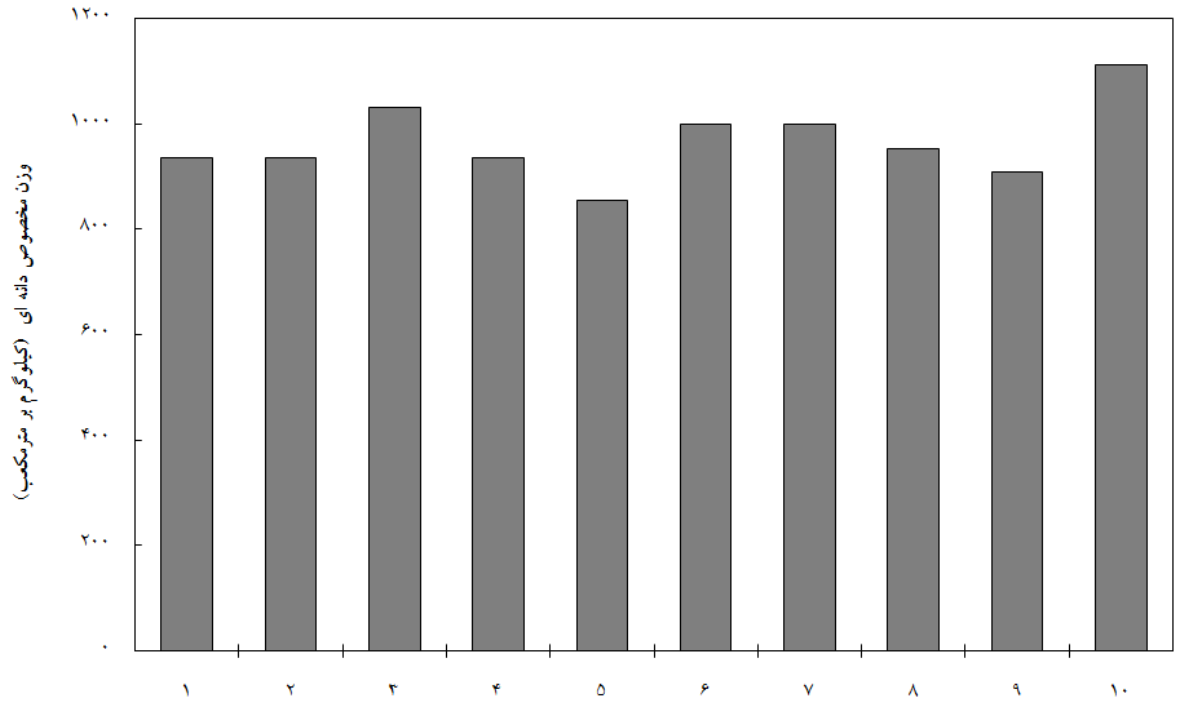
جدول ۲-۱- خلاصه نتایج آزمایش وزن مخصوص توده ای غیرمتراکم سبکدانه ها

شماره آزمونه	وزن مخصوص توده‌ای غیرمتراکم (کیلوگرم بر مترمکعب)			
	نتایج آزمونه‌ها	میانگین (μ)	انحراف معیار (σ)	ضریب تغییرات (COV)
۱	۵۴۴	۵۱۶	۳۱	٪۵/۹
۲	۵۲۷			
۳	۵۵۴			
۴	۴۸۹			
۵	۵۳۴			
۶	۵۰۰			
۷	۴۴۹			
۸	۵۲۴			
۹	۵۱۴			
۱۰	۵۲۴			

جدول ۲-۲- خلاصه نتایج آزمایش وزن مخصوص توده ای متراکم سبکدانه ها

شماره آزمونه	وزن مخصوص توده‌ای متراکم (کیلوگرم بر مترمکعب)			
	نتایج آزمونه‌ها	میانگین (μ)	انحراف معیار (σ)	ضریب تغییرات (COV)
۱	۵۴۹	۵۶۱	۲۶	٪۴/۷
۲	۵۵۶			
۳	۶۰۰			
۴	۵۰۴			
۵	۵۵۴			
۶	۵۵۴			
۷	۵۹۴			
۸	۵۶۴			
۹	۵۶۴			
۱۰	۵۶۷			

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 توسط شرکت لیکا تهیه شده است؛ اندازه گیری شد. نتایج این آزمایش در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲- وزن مخصوص دانه ای نمونه‌های لیکا (کیلوگرم بر متر مکعب)

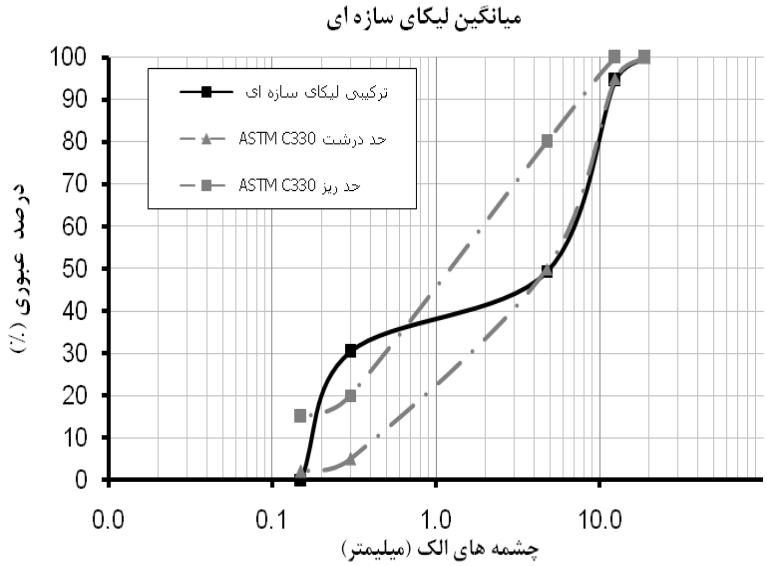
براساس این نتایج، میانگین وزن مخصوص دانه‌ای لیکا ۹۶۶ کیلوگرم در متر مکعب است که در مقایسه با وزن مخصوص دانه‌ای لیکای سازه‌ای در فاز قبل (۱۰۷۵ کیلوگرم در متر مکعب) کمتر است. همچنین، بر اساس نتایج به دست آمده، انحراف معیار نتایج وزن مخصوص دانه‌ای لیکا برابر ۷۲ کیلوگرم در مترمکعب و ضریب تغییرات آن برابر ۷/۴ درصد می‌باشد (جدول ۲-۳) که نشان می‌دهد نتایج وزن مخصوص دانه‌ای نیز پراکندگی زیادی نداشته است. در عین حال، پراکندگی نتایج وزن مخصوص دانه‌ای کمی از نتایج وزن مخصوص توده‌ای سبکدانه لیکا بیشتر است.

جدول ۲-۳- خلاصه نتایج آزمایش وزن مخصوص دانه ای سبکدانه ها

شماره آزمونه	وزن مخصوص توده‌ای دانه‌ای (کیلوگرم بر مترمکعب)			
	نتایج آزمونه‌ها	میانگین (μ)	انحراف معیار (σ)	ضریب تغییرات (COV)
۱	۹۳۵	۹۶۶	۷۲	٪۷/۴
۲	۹۳۵			
۳	۱۰۳۱			
۴	۹۳۵			
۵	۸۵۵			
۶	۱۰۰۰			
۷	۱۰۰۰			
۸	۹۵۲			
۹	۹۰۹			
۱۰	۱۱۱۱			

۲-۲ دانه بندی

آزمایش دانه بندی لیکا طبق استاندارد شماره ASTM C 330 انجام گرفته است. نمودار دانه بندی لیکای سازه ای تولید شده در کارخانه در شکل ۲-۳ ارائه شده است. این آزمایش بر روی بیش از ۱۰ نمونه انجام شده که در شکل زیر میانگین دانه بندی لیکای سازه‌ای نشان داده است.



شکل ۲-۳- نمودار دانه بندی لیکای سازه‌ای

در ساخت طرح اختلاط ها از مصالح ارسال شده با تغییر در دانه بندی استفاده شده است. به این ترتیب که سبکدانه ها بر روی الک نمره ۸، الک شده‌اند تا سبکدانه‌های با اندازه کوچکتر از ۲/۳۶ میلیمتر از سایر سبکدانه-ها جدا شوند. این عمل بدلیل وجود درصد زیادی از سبکدانه‌های با اندازه کوچک، غیر قابل اجتناب بود. با توجه به شکل ۲-۳ نیز مشاهده می‌شود که در قسمت پایین نمودار، نمودار میانگین لیکای سازه‌ای از حد ریز استاندارد ASTM C 330 ریزتر است. همچنین، شکل منحنی دانه‌بندی مصالح نشان می‌دهد که مقدار مصالح ۰/۲ تا ۵ میلی‌متر ناچیز است و منحنی دانه‌بندی پیوسته نیست.

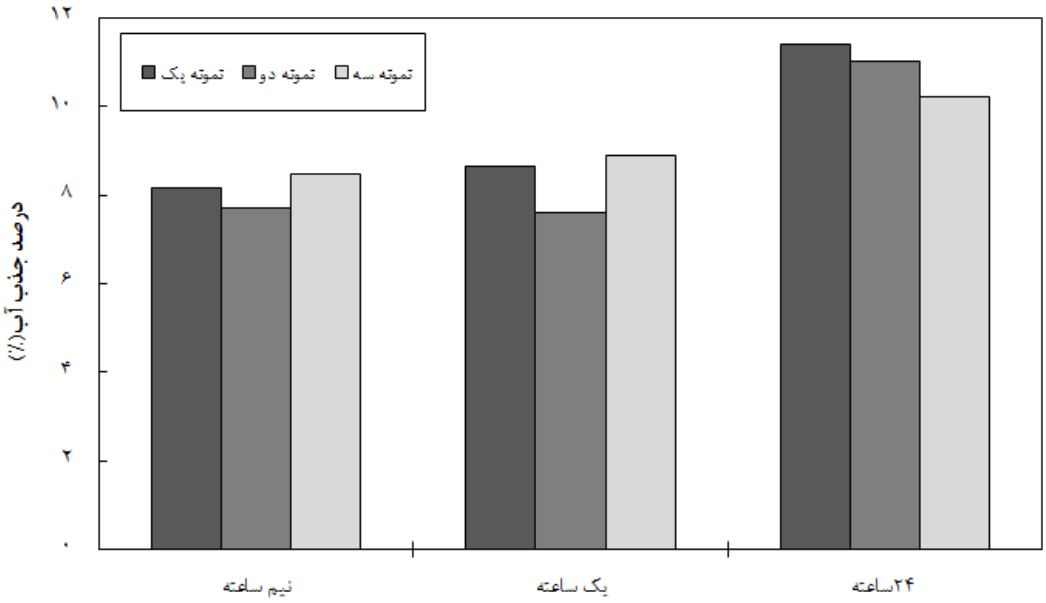
۲-۳ جذب آب

تعیین جذب آب لیکا بر اساس استاندارد ASTM C 127 انجام گرفته است. جذب آب نیم، یک و ۲۴ ساعته سبکدانه های مختلف لیکا اندازه گیری و میانگین نتایج به عنوان 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[۳] می باشد. دلیل این امر آن است که معمولا آب

[۳] Saturated Surface Dry (SSD)

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.

نتایج جذب آب سبکدانه‌های مختلف در زمان‌های نیم، یک و ۲۴ ساعته در شکل ۲-۴ نشان داده شده است. این آزمایش بر روی ۱۵ نمونه انجام شد که در شکل، سه نمونه از آن‌ها نشان داده شده است.



شکل ۲-۴- جذب آب نیم‌ساعته، یک‌ساعته و ۲۴ ساعته لیکای سازه‌ای

بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل ۲-۴ جذب آب نیم و یک ساعته لیکای سازه‌ای به ترتیب ۸ و۸/۲ درصد و جذب آب ۲۴ ساعته در حدود ۱۰/۳ درصد می باشد. میزان افزایش جذب آب بعد از یک ساعت نسبت به میزان جذب آب نیم ساعته، بسیار ناچیز است. در فاز قبل، جذب آب نیم، یک و ۲۴ ساعته لیکا، به ترتیب، برابر ۵/۵،۷/۳ و ۸/۹ درصد بوده است. با توجه به کمتر بودن وزن مخصوص نمونه‌های جدید لیکا نسبت به نمونه‌های مورد استفاده در فاز قبل تحقیقات انتظار می‌رود که تخلخل در سبکدانه‌های جدید افزایش یافته باشد و در نتیجه، افزایش جذب آب سبکدانه‌ها منطقی به نظر می‌رسد. بر اساس این نتایج، اختلاف جذب آب ۲۴ ساعته با جذب آب نیم و یک ساعته لیکای سازه‌ای مورد استفاده در این بررسی نسبت به سبکدانه لیکا مورد آزمایش در فاز قبلی، کمتر است.

۴-۲ مقایسه مشخصات سبکدانه‌ها با سبکدانه‌های مورد استفاده در فاز قبل

نتایج بررسی‌های انجام شده بر روی مشخصات سبکدانه لیکا نشان می‌دهد که وزن مخصوص سبکدانه مورد استفاده در این بررسی تا حدودی از وزن مخصوص سبکدانه مورد استفاده در فاز قبل کمتر است. از طرف دیگر، جذب آب (نیم، یک و ۲۴ ساعته) این سبکدانه نسبت به سبکدانه فاز قبل بیشتر بوده است در حالی که تفاوت جذب آب نیم‌ساعته و ۲۴ ساعته نسبت به فاز قبل کمتر بوده است. همچنین، مانند مصالح مورد استفاده در فاز قبل، با توجه به ریز بودن مصالح سبکدانه ارسال شده، این مصالح بر روی الک نمره ۸ الک شده‌اند.

فصل سوم- برنامه آزمایشگاهی ساخت بتن سبکدانه

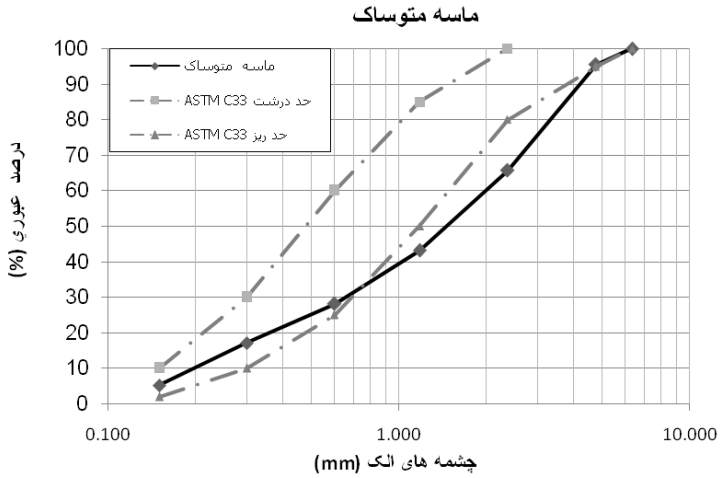
پس از انجام آزمایش های اولیه برروی سبکدانه، و برای بررسی میزان تاثیر اجزا مختلف بتن سبکدانه بر خواص بتن تازه و سخت شده، طرح اختلاط‌های مختلفی ساخته شد. مشخصات مصالح مورد استفاده و همچنین روش ساخت، قالب‌گیری و عمل آوری، و آزمایشهای انجام شده بر روی نمونه های بتن تازه و سخت شده در این فصل بررسی شده است.

۳-۱ مشخصات مصالح مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها

نوع سیمان مصرفی در این طرح از نوع ۴۲۵-۱ 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 ساخت طرح ها از یک نوع افزودنی روان کننده با نام تجاری Pozzolith LD10 که یک افزودنی بصورت مایع با پایه شیمیایی لیگنو سولفونات، می باشد و باعث کاهش مصرف آب و در نتیجه کاهش نسبت آب به سیمان می گردد، استفاده شده 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. نمودار دانه‌بندی ماسه در شکل ۳-۱ نشان داده شده است.



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

به منظور بررسی تاثیر هر یک از اجزا بر روی خواص بتن سبکدانه، که در فاز قبل به عنوان طرح اختلاط بهینه و با مشخصات مکانیکی مطلوب و وزن مخصوص مناسب بدست آمده بود، در این بخش، مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان، نسبت سبکدانه به سنگدانه طبیعی، دانه بندی سبکدانه، درصد رطوبت سبکدانه و روش ساخت بتن سبکدانه 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 نیم‌ساعته 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. این عمل که به پیش خیس کردن مصالح مشهور است، در ساخت تمامی طرح‌ها به جز ۲ طرح، برای بررسی میزان تاثیر این عمل بر خواص بتن سبکدانه، رعایت 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 قالب‌های استوانه ای ۳۰×۱۵ برای آزمایش تنش-کرنش فشاری و تعیین مدول الاستیسیته استفاده شده است.

۳-۳ آزمایشهای انجام شده بر روی بتن سخت شده

۳-۳-۱ مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بتن مطابق استاندارد ASTM C39 اما بر روی آزمونه های مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر 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 ۳-۲ نشان داده شده است.

شکل ۳-۲- دستگاه آزمایش تعیین مقاومت فشاری

۳-۳-۲ 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 شده‌اند، قبل از انجام آزمایش های مکانیکی اندازه‌گیری شده است. این آزمایش مطابق استاندارد ASTM C 642 بر روی بتن سخت شده انجام گرفته است.

فصل چهارم– نتایج آزمایش‌های بتن سبکدانه

۴–۱ بررسی تغییرات در نمونه شاهد

به منظور بررسی حساسیت بتن سبک حاوی سبکدانه لیکا، نمونه شاهد (جدول ۴–۱) در چهار نوبت ساخته شد و بر روی هر نمونه، آزمایش‌های اسلامپ، مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتن در سنین مختلف انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۴–۲ خلاصه شده است. بر اساس این نتایج، بیشترین مقدار خطا در آزمایش اسلامپ مشاهده شده است، پس از آن مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف، بیشترین مقدار خطا را داشته است. خطای اندازه‌گیری وزن مخصوص بتن، اعم از بتن تازه و سخت‌شده، تقریباً با یکدیگر برابر بوده و بسیار کمتر از خطای اندازه‌گیری اسلامپ و مقاومت فشاری بوده است.

جدول ۴–۱ – طرح اختلاط طرح شاهد

وزن مخصوص بتن تازه (کیلوگرم بر مترمکعب)	ماسه (کیلوگرم بر مترمکعب)	سبکدانه (کیلوگرم بر مترمکعب)	سیمان (کیلوگرم بر مترمکعب)	آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	افزودنی فوق روان کننده (درصد وزنی سیمان)
۱۸۰۰	۱۰۲۸	۱۹۸	۴۱۰	۱۶۰	۱٪

جدول ۴-۲ - بررسی آماری نتایج طرح شاهد

متغیر آماری	اسلامپ (سانتی متر)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)			وزن مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)			
		۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	تازه	۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه
میانگین	۷/۰	۱۷/۹	۲۱/۹	۲۸/۲	۱۸۷۷	۱۸۴۱	۱۸۵۲	۱۸۵۶
انحراف معیار	۳/۱	۲/۲	۱/۴	۱/۸	۲۲	۸	۱۱	۲۱
ضریب تغییرات (درصد)	۴۴/۸	۱۲/۵	۶/۶	۶/۳	۱/۲	۰/۴	۰/۶	۱/۱
خطای استاندارد (درصد)	۱۵/۷	۷/۴	۴/۸	۵/۹	۱/۲	۰/۴	۰/۶	۱/۱

نتایج جدول ۴-۲ نشان می‌دهد که انحراف معیار مشاهده شده در آزمایش اسلامپ برابر ۳/۱ سانتی‌متر می‌باشد که از محدوده مجاز استاندارد امریکایی روش‌های آزمایش (ASTM C 143) برای اندازه‌گیری اسلامپ بتن معمولی بیشتر است. بر اساس این استاندارد، اختلاف اسلامپ بتن معمولی، اندازه‌گیری شده بر روی مصالح یکسان و در یک آزمایشگاه، نباید از ۲/۱ سانتی‌متر بیشتر باشد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که خطای مشاهده شده در آزمایش اسلامپ، با وجود شرایط کنترل شده آزمایشگاهی ممکن است تا حدودی از این مقدار تجاوز کند. این افزایش خطا، در مرحله اول می‌تواند ناشی از خطای نمونه‌گیری باشد. به بیان دیگر، در صورتی که بتن کاملاً همگن نشده باشد، نحوه نمونه‌گیری برای پر کردن مخروط اسلامپ می‌تواند بر روی نتایج تأثیر قابل‌توجهی داشته باشد. به‌علاوه، روانی بتن در اثر گذشت زمان کاهش می‌یابد و عوامل مختلفی از جمله نوع افزودنی‌های شیمیایی مورد استفاده در بتن و عوامل خارجی مانند دمای محیط آزمایش بر روی این افت اسلامپ تأثیر می‌گذارد. بنابراین، تفاوت مشاهده شده در اسلامپ‌های گزارش شده ممکن است تا حدودی ناشی از تفاوت زمان سپری شده از ابتدای مخلوط کردن بتن سبکدانه باشد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود علاوه بر مقدار اسلامپ بتن سبکدانه لیکا، زمان انجام این آزمایش نیز ثبت شود. همچنین، نحوه متراکم کردن نمونه در آزمایش اسلامپ نیز می‌تواند بر نتایج آزمایش تأثیرگذار باشد.

در مراجع مختلف، حد مجاز انحراف معیار برای مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتن سبکدانه، ارائه نشده است، اما داده‌های جدول ۴-۲ نشان می‌دهد که تکرارپذیری نتایج آزمایش‌ها، به خصوص آزمایش وزن مخصوص، قابل‌قبول بوده است. همچنین، نتایج آزمایش‌های به دست آمده نشان می‌دهد که پراکندگی نتایج

مقاومت فشاری نمونه‌های مورد آزمایش با گذشت زمان کاهش یافته است، در حالی که پراکندگی نتایج وزن مخصوص نمونه‌ها تغییر قابل‌توجهی نداشته است.

پس از بررسی میزان خطا در ساخت نمونه شاهد، در ادامه، تأثیر خطای توزین هر یک از مصالح آب، سیمان، سبکدانه و ماسه به طور جداگانه بررسی شده است. همچنین، تأثیر خطای ناشی از تغییر نوع مصالح سبکدانه و رطوبت اولیه آن بر مشخصات بتن سبکدانه مورد بررسی قرار گرفته است. در این گزارش، برای مقایسه مقدار خطا، از پارامتری به نام خطای استاندارد (E_{st}) استفاده شده است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E_{st} = \frac{V_n - V_{Ref}}{V_{Exp}}$$

که در آن، V_n نتیجه آزمایش نمونه مورد بررسی، V_{Ref} نتیجه آزمایش نمونه شاهد و V_{Exp} حداکثر مقدار مورد انتظار آزمایش می‌باشد که در این بررسی، حداکثر مقدار مورد انتظار آزمایش اسلامپ برابر ۲۰ سانتی‌متر، آزمایش مقاومت فشاری برابر ۳۰ مگاپاسکال و آزمایش وزن مخصوص برابر ۱۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است.

۴-۲ بررسی تاثیر خطای توزین آب

نتایج تأثیر خطای توزین آب بر مشخصات بتن سبکدانه تازه و سخت‌شده در جدول ۴-۳ خلاصه شده است. نتایج جدول نشان می‌دهد که تغییر مقدار آب تأثیر بسیار زیادی بر روی روانی بتن سبکدانه داشته است. به طوری که، به عنوان مثال، افزایش ده درصدی مقدار آب، اسلامپ بتن را به اندازه ۹ سانتی‌متر افزایش داده است. از طرف دیگر، نتایج آزمایش مقاومت فشاری و وزن مخصوص تغییر زیادی را نشان نمی‌دهد. با توجه به این که تأثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری بتن شناخته شده است، می‌توان نتیجه گرفت که علت مشابه بودن نتایج در واقع خطای موجود در ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها می‌باشد. به دلیل اینکه توزین و مخلوط کردن مصالح در شرایط کاملاً کنترل شده انجام شده است، می‌توان نتیجه گرفت که این خطا می‌تواند ناشی از نحوه پر کردن قالب‌ها یا نحوه متراکم کردن آن‌ها باشد. به عنوان مثال، در صورتی که نمونه‌های با نسبت آب به سیمان کمتر، به خوبی متراکم نشده باشند، با توجه به اینکه وجود هر ۱٪ هوای تصادفی در بتن، مقاومت فشاری آن را حدود ۵٪ کاهش می‌دهد، بنابراین، وجود هوای تصادفی اضافی در این نمونه‌ها می‌تواند باعث کاهش مقاومت

فشاری شده باشد. بر اساس آنچه ذکر شد، در انجام آزمایش‌های بتن، به ویژه بتن سبکدانه، باید توجه شود که علاوه بر وزن کردن دقیق مصالح به منظور کاهش خطای ناشی از توزین، دقت در نحوه نمونه‌گیری و همچنین، اطمینان از تراکم کامل بتن ضروری است.

جدول ۴-۳- بررسی آماری نتایج خطای توزین آب

	متغیر آماری	اسلامپ (سانتی متر)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)			وزن مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)			
			۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	تازه	۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه
نمونه شاهد		۳	۱۷/۹۹	۲۲/۷۸	۲۸/۳۷	۱۸۷۴	۱۸۳۰	۱۸۳۶	۱۸۳۹
ده درصد آب اضافه	تفاوت نسبت به نمونه شاهد	۹	۲	-۱	۰	۶	۴۸	-۲۶	۱۷
	خطای استاندارد (درصد)	۴۵/۰	۶/۵	-۴/۵	۰/۲	۰/۳	۲/۶	-۱/۴	۰/۹
ده درصد آب کم	تفاوت نسبت به نمونه شاهد	-۲	۳	۱	۱	-۲۳	-۶	-۲۲	-۸
	خطای استاندارد (درصد)	-۸/۵	۹/۲	۲/۵	۱/۷	-۱/۲	-۰/۳	-۱/۲	-۰/۴

۴-۳ بررسی تاثیر خطای توزین سیمان

جدول ۴-۴ تأثیر خطای توزین سیمان را بر روانی، مقاومت فشاری و همچنین وزن مخصوص بتن سبکدانه حاوی لیکا نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده، افزایش ده درصدی مقدار سیمان تأثیر قابل‌توجهی در مقدار اسلامپ بتن نداشته است. از طرف دیگر، کاهش ده درصدی مقدار سیمان، به شدت اسلامپ بتن را افزایش داده که دلیل آن افزایش مقدار آب آزاد بتن در حالت نسبت آب به سیمان ثابت و کاهش مقدار سیمان است.

نتایج به دست آمده همچنین نشان می‌دهد که افزایش مقدار سیمان مقاومت فشاری بتن سبکدانه در سنین مختلف را تا حدودی افزایش داده است و با کاهش ده درصدی مقدار سیمان، مقاومت فشاری بتن سبکدانه به طور قابل‌توجهی کاهش یافته است. تأثیر مقدار سیمان بر وزن مخصوص بتن سبکدانه در مقایسه با اسلامپ و

مقاومت فشاری بتن کمتر بوده است. اما در حالت کلی، افزایش مقدار سیمان تا حدودی وزن مخصوص بتن سبکدانه را افزایش و کاهش مقدار سیمان تا حدودی وزن مخصوص بتن را کاهش داده است.

جدول ۴-۴ - بررسی آماری نتایج خطای توزین سیمان

	متغیر آماری	اسلامپ (سانتی متر)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)			وزن مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)			
			۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	تازه	۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه
نمونه شاهد		۳	۱۷/۹۹	۲۲/۷۸	۲۸/۳۷	۱۸۷۴	۱۸۳۰	۱۸۳۶	۱۸۳۹
ده درصد سیمان اضافه	تفاوت نسبت به نمونه شاهد	-۱	۳	۱	۱	۱۹	۱۷	۲	۱۴
	خطای استاندارد (درصد)	-۵/۰	۸/۵	۱/۹	۱/۸	۱/۰	۰/۹	۰/۱	۰/۸
ده درصد سیمان کم	تفاوت نسبت به نمونه شاهد	۱۵	-۱	-۳	-۲	-۲۶	-۱۱	-۴۸	-۲۰
	خطای استاندارد (درصد)	۷۲/۵	-۵/۰	-۱۰/۷	-۶/۸	-۱/۴	-۰/۶	-۲/۶	-۱/۱

۴-۴ بررسی تاثیر خطای توزین سبکدانه

تأثیر خطای توزین سبکدانه بر مشخصات بتن سبکدانه حاوی لیکا در جدول ۴-۵ خلاصه شده است. بر اساس این نتایج، تغییر ده درصدی مصالح سبکدانه تأثیر قابل‌توجهی در روانی بتن سبکدانه نداشته است. از طرف دیگر، افزایش ده درصدی مقدار لیکا، تا حدودی وزن مخصوص و مقاومت فشاری بتن سبکدانه را کاهش داده است. همچنین، با کاهش ده درصدی مقدار لیکا، مقاومت فشاری سه روزه و هفت روزه بتن سبکدانه افزایش یافته است اما مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن تغییر قابل‌توجهی نداشته است.

جدول ۴-۵- بررسی آماری نتایج خطای توزین سبکدانه

	متغیر آماری	اسلامپ (سانتی متر)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)			وزن مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)			
			۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	تازه	۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه
نمونه شاهد		۷	۱۴/۷۹	۲۰/۳۸	۲۶/۱۵	۱۸۵۱	۱۸۴۷	۱۸۵۶	۱۸۳۹
ده درصد لیکا اضافه	تفاوت نسبت به نمونه شاهد	۴	-۲	-۱	-۲	-۲۶	-۶۰	-۶۲	-۳۸
	خطای استاندارد (درصد)	۱۷/۵	-۵/۰	-۱/۸	-۵/۶	-۱/۴	-۳/۲	-۳/۴	-۲/۱
ده درصد لیکا کم	تفاوت نسبت به نمونه شاهد	۳	۲	۳	۰	۷	-۵	-۲۲	-۸
	خطای استاندارد (درصد)	۱۲/۵	۵/۷	۹/۰	-۰/۳	۰/۴	-۰/۳	-۱/۲	-۰/۴

۴-۵ بررسی تاثیر خطای توزین ماسه طبیعی

نتایج تأثیر خطای توزین ماسه طبیعی در بتن سبکدانه در جدول ۴-۶ ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تغییر مقدار ماسه، تأثیر قابل‌توجهی در مقدار روانی بتن سبکدانه حاوی لیکا داشته است. افزایش ده درصدی مقدار ماسه، اسلامپ بتن سبکدانه را ۷ سانتی‌متر افزایش داده است و کاهش ده درصدی مقدار ماسه، ۲ سانتی‌متر اسلامپ بتن سبکدانه را کاهش داده است.

جدول ۴-۶- بررسی آماری نتایج خطای توزین ماسه طبیعی

	متغیر آماری	اسلامپ (سانتی متر)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)			وزن مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)			
			۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	تازه	۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه
نمونه شاهد		۸	۱۸/۶۴	۲۳/۴۳	۲۷/۷۰	۱۹۰۵	۱۸۴۰	۱۸۶۰	۱۸۸۲
ده درصد ماسه اضافه	تفاوت نسبت به نمونه شاهد	-۲	۰	۲	۰	-۲۳	۲۸	۵	-۳۲
	خطای استاندارد (درصد)	-۱۰/۰	-۱/۰	۷/۲	۱/۶	-۱/۲	۱/۵	۰/۳	-۱/۷
ده درصد ماسه کم	تفاوت نسبت به نمونه شاهد	۷	-۲	-۴	-۳	-۹۶	۱	-۱۱۰	-۹۳
	خطای استاندارد (درصد)	۳۵/۰	-۵/۹	-۱۲/۳	-۱۰/۶	-۵/۲	۰/۱	-۵/۹	-۵/۰

تأثیر تغییر در مقدار ماسه، بر مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتن سبکدانه نیز قابل‌توجه بوده است. به خصوص، کاهش ده درصدی مقدار ماسه باعث کاهش مقاومت فشاری بتن و کاهش وزن مخصوص بتن شده است. باید توجه کرد که تاثیر قابل توجه خطای توزین ماسه بر مشخصات بتن سبکدانه ممکن است ناشی از مقدار زیاد ماسه در طرح اختلاط باشد. به نظر می رسد در عمل ده درصد خطا در توزین ماسه که معادل حدود ۱۰۰کیلوگرم خطای توزین باشد کمتر اتفاق بیفتد. بنابراین، به نظر می‌رسد در مجموع خطای توزین ماسه در مشخصات بتن سبکدانه تاثیر قابل توجهی نداشته باشد.

۴-۶ بررسی تاثیر خطای تغییر نوع سبکدانه

در این بخش، به دلیل احتمال خطا در تولید مصالح سبکدانه، تأثیر تغییر نوع سبکدانه لیکا بر مشخصات بتن سبکدانه مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، یک طرح اختلاط با سبکدانه لیکای مورد استفاده در فاز قبل (لیکای نوع ۱)، و یک طرح با سبکدانه لیکای حاوی ریزدانه زیاد (لیکای نوع ۲) ساخته شده و نتایج به دست آمده با نتایج نمونه کنترل مقایسه شده است (جدول ۴-۷). نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تغییر نوع مصالح سبکدانه لیکا در محدوده مورد بررسی، تأثیر قابل‌توجهی بر اسلامپ بتن نداشته است. از طرف دیگر، استفاده از لیکای حاوی ریزدانه زیاد، وزن مخصوص بتن سبکدانه و درنتیجه مقاومت فشاری آن را افزایش داده است.

جدول ۴-۷ - بررسی آماری نتایج خطای تغییر مشخصات سبکدانه

	متغیر آماری	اسلامپ (سانتی متر)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)			وزن مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)			
			۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	تازه	۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه
نمونه شاهد		۷	۱۴/۷۹	۲۰/۳۸	۲۶/۱۵	۱۸۵۱	۱۸۴۷	۱۸۵۶	۱۸۳۹
لیکای نوع ۱*	تفاوت نسبت به نمونه شاهد	-۱	۲	۴	۰	-۱۰	-۳۵	-۱۲	-۲۴
	خطای استاندارد (درصد)	-۲/۵	۶/۲	۱۳/۷	۱/۵	-۰/۵	-۱/۹	-۰/۷	-۱/۳
لیکای نوع ۲*	تفاوت نسبت به نمونه شاهد	-۲	۵	۷	۹	۱۲۶	۹۲	۸۰	۱۱۲
	خطای استاندارد (درصد)	-۷/۵	۱۵/۲	۲۴/۱	۳۰/۳	۶/۸	۵/۰	۴/۳	۶/۰

* لیکای نوع ۱، لیکای مورد استفاده در فاز قبل تحقیقات و لیکای نوع ۲، لیکای حاوی ریزدانه زیاد است.

۴-۷ بررسی تاثیر خطای رطوبت اولیه سبکدانه

در این بخش، تأثیر رطوبت اولیه مصالح سبکدانه لیکا بر مشخصات بتن سبکدانه بررسی شده است. بدین منظور، یک طرح بدون پیش خیس کردن مصالح سبکدانه لیکا (با رطوبت اولیه ۰/۲٪) و یک طرح با پیش خیس کردن زیاد مصالح سبکدانه، تا رسیدن به رطوبت اولیه ۱۱/۶٪، ساخته شد و نتایج به دست آمده با نتایج نمونه کنترل، که در آن مصالح سبکدانه به روش معمول پیش خیس شده بود (رطوبت اولیه حدود ۸٪)، مقایسه شد. نتایج به دست آمده در جدول ۴-۸ خلاصه شده است. بر اساس این نتایج، پیش خیس کردن مصالح، تأثیر قابل-توجهی بر مشخصات بتن سبکدانه نداشته است.

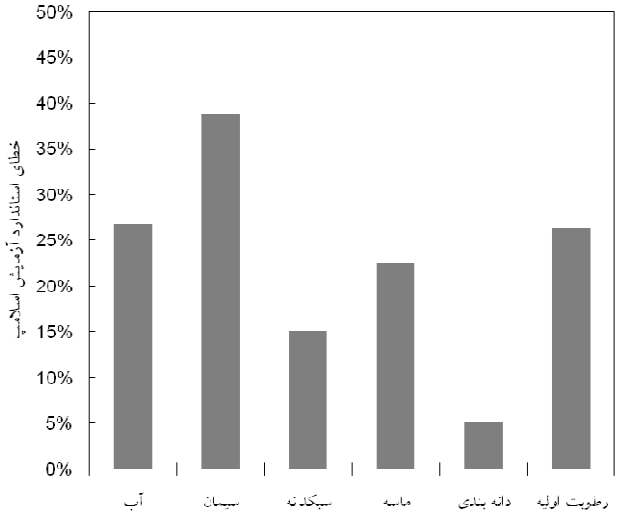
جدول ۴-۸- بررسی آماری نتایج خطای تأثیر رطوبت اولیه مصالح

	متغیر آماری	اسلامپ (سانتی متر)	مقاومت (مگاپاسکال)			وزن مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)			
			۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	تازه	۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه
نمونه شاهد		۱۱	۲۰/۰۸	۲۱/۰۳	۳۰/۴۳	۱۸۷۹	۱۸۴۷	۱۸۵۶	۱۸۶۳
لیکای با رطوبت اولیه کم	تفاوت نسبت به نمونه شاهد	-۴	۰	۳	۰	۱۲	-۷	۰	-۶
	خطای استاندارد	-۱۷/۵	۰/۷	۸/۸	۰/۳	۰/۶	-۰/۴	۰/۰	-۰/۳
لیکای با رطوبت اولیه زیاد	تفاوت نسبت به نمونه شاهد	-۷	۳	۵	-۲	۱۲	۳۲	۱۵	۳۱
	خطای استاندارد	-۳۵/۰	۱۱/۶	۱۵/۱	-۸/۰	۰/۶	۱/۷	۰/۸	۱/۷

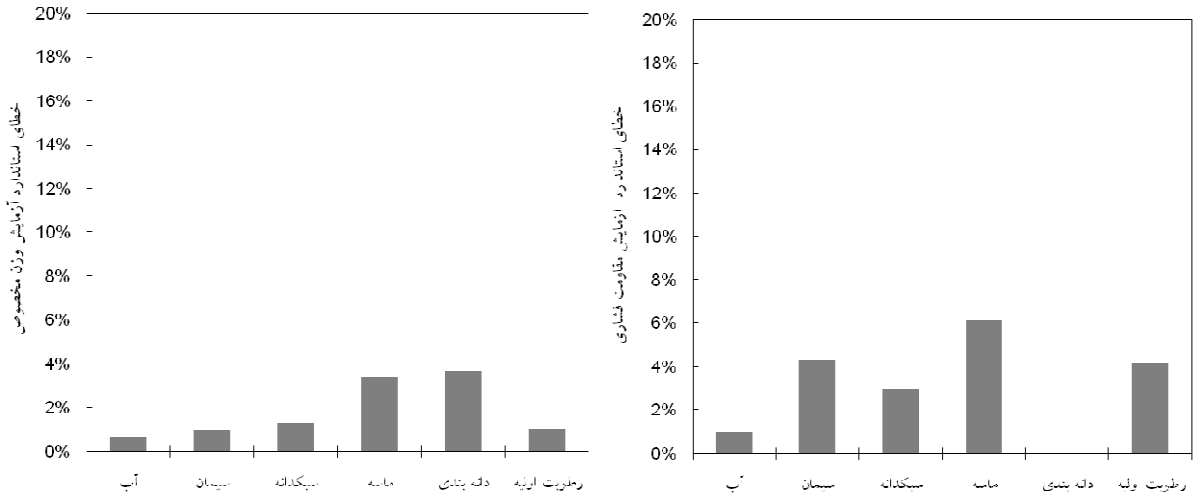
۴-۸ مقایسه خطای پارامترهای مختلف

میانگین خطای استاندارد ناشی از تغییر در مقدار آب، سیمان، سبکدانه و ماسه و همچنین، دانه‌بندی و رطوبت اولیه سبکدانه در آزمایش‌های اسلامپ، مقاومت فشاری و وزن مخصوص ۲۸ روزه بتن سبکدانه در شکل‌های ۴-۱و ۴-۲ نشان داده شده است. بررسی این نتایج نشان می‌دهد که تأثیر خطای توزین مصالح عمدتاً در روانی بتن تازه است و تأثیر آن بر مشخصات مکانیکی بتن سخت شده بسیار کمتر است. بر این مبنا، علی‌رغم آنکه خطای توزین مصالح نسبتاً بزرگ انتخاب شده است اما دامنه تغییرات مشخصات مکانیکی بتن سخت شده مانند چگالی و مقاومت فشاری بتن، که دو عامل اصلی در کاربرد بتن سبکدانه هستند، بسیار محدودتر بوده و کمتر از ۵٪ است.

همچنین، بر اساس نتایج به دست آمده، از بین پارامترهای مورد بررسی، تغییر در مقدار سیمان، آب و رطوبت اولیه سبکدانه لیکا بیشترین تأثیر را بر مقدار اسلامپ بتن سبکدانه داشته است. از طرف دیگر، دانه‌بندی مصالح سبکدانه تأثیر قابل‌توجهی بر وزن مخصوص و مقاومت فشاری بتن سبکدانه داشته است. توجه به این نکته ضروری است که نتایج به دست آمده برای مصالح مورد استفاده در این بررسی و در محدوده تغییرات اعمال شده معتبر می‌باشد و با تغییر در مشخصات مصالح یا نحوه تغییرات اعمال شده ممکن است نتایج متفاوتی به دست آید.



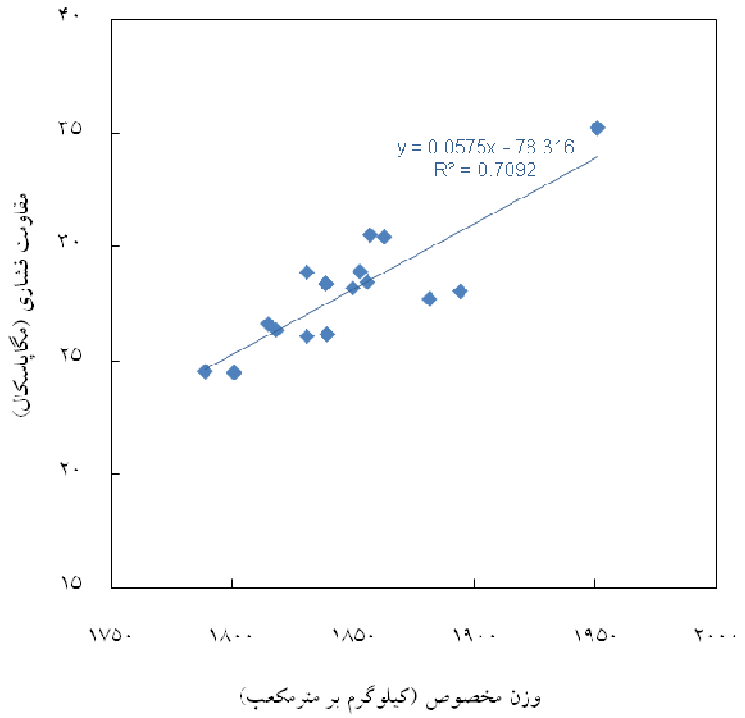
شکل ۴-۱- خطای استاندارد آزمایش اسلامپ



شکل ۴-۲- خطای استاندارد آزمایش مقاومت فشاری (راست)-آزمایش وزن مخصوص (چپ)

۴-۹ بررسی رابطه بین وزن مخصوص و مقاومت فشاری بتن سبکدانه

در برخی از موارد مورد بررسی، با تغییر نسبت‌های اختلاط، مقاومت فشاری بتن سبکدانه افزایش یافته است. بنابراین، ممکن است در نگاه اول استفاده از پارامتر مذکور برای بهبود مقاومت فشاری مطلوب به نظر برسد. اما باید توجه داشت که علاوه بر بهبود مقاومت فشاری بتن به ازای تغییر پارامترهای اختلاط سایر مشخصات بتن سبکدانه نیز تغییر می‌کند. یکی از مهمترین پارامترهایی که ارتباط مستقیم با مقاومت فشاری بتن سبکدانه دارد، وزن مخصوص بتن سبکدانه است. رابطه بین وزن مخصوص و مقاومت فشاری ۲۸ روزه مخلوط‌های بتن سبکدانه مورد بررسی در شکل ۴-۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود وزن مخصوص بتن سبکدانه تأثیر قابل‌توجهی در مقاومت فشاری این بتن دارد و با افزایش وزن مخصوص بتن، مقاومت فشاری آن نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۳- رابطه بین وزن مخصوص و مقاومت فشاری بتن سبکدانه

فصل پنجم- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این گزارش، خطای موجود در ساخت یک طرح بتن سبکدانه حاوی لیکا بررسی شد و حساسیت طرح شاهد نسبت به خطای توزین مصالح تشکیل‌دهنده آن اندازه‌گیری گردید که نتایج به دست آمده به صورت زیر می‌باشد:

- در ساخت و اجرای بتن سبکدانه علاوه بر دقت در توزین مصالح تشکیل‌دهنده بتن، باید از اختلاط کامل بتن و تراکم کافی آن و مناسب بودن شرایط محیطی اطمینان حاصل شود. در غیر این صورت، عدم همگنی بتن و عدم تراکم کافی نمونه‌های بتنی و همچنین، تغییر در شرایط محیطی می‌توانند موجب بروز خطا در مشخصات بتن سبکدانه شوند.

- به طور کلی، تأثیر خطای توزین مصالح عمدتاً در روانی بتن تازه است و تأثیر آن بر مشخصات مکانیکی بتن سخت شده بسیار کمتر است.

- مقدار آب اختلاط تأثیر قابل‌توجهی بر مشخصات بتن سبکدانه دارد و با تغییر مقدار آب روانی بتن به طور قابل‌توجهی تغییر می‌کند. همچنین، با کاهش مقدار سیمان، روانی بتن سبکدانه افزایش و مقاومت فشاری آن، کاهش یافته است.

- مقدار سبکدانه تأثیر قابل‌توجهی بر روانی بتن نداشته است. در حالی که افزایش مقدار سبکدانه، تا حدودی وزن مخصوص بتن و در نتیجه مقاومت فشاری آن را کاهش داده است.

- تغییر ده درصدی مقدار ماسه، تأثیر قابل‌توجهی بر مشخصات بتن داشته است و کاهش ده درصدی مقدار ماسه باعث کاهش اسلامپ، کاهش مقاومت فشاری بتن و کاهش وزن مخصوص بتن شده است.

البته باید توجه کرد که ده درصد خطا در توزین مقدار ماسه خطای قابل‌توجهی است که در عمل کمتر اتفاق می‌افتد.

- نوع سبکدانه مورد استفاده بر روانی بتن تأثیر قابل‌توجهی نداشته است. در حالی که استفاده از لیکای حاوی ریزدانه زیاد، باعث افزایش وزن مخصوص و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری بتن سبکدانه شده است.
- رطوبت اولیه مصالح سبکدانه لیکا تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مشخصات بتن سبکدانه نگذاشته است، هرچند این پارمتر در پمپ‌پذیری بتن مؤثر است.
- وزن مخصوص بتن سبکدانه، یکی از عوامل مهم مؤثر بر مقاومت فشاری آن می‌باشد و با افزایش وزن مخصوص بتن سبکدانه، مقاومت فشاری آن نیز افزایش می‌یابد.