



انستیتو مصالح ساختمانی
دانشکده فنی دانشگاه تهران

Leca®

شرکت لیکا

سبکدانه سازه ای

دانش، فن آوری و کاربردها





انستیتو مصالح ساختمانی پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران



□ شماره قرارداد : ۱۴۳/۱۲۴۴۴۳

□ شماره گزارش : CMI – ۸۹۰۷۵۱۴

□ تاریخ گزارش : ۱۳۸۹/۰۷/۱۰

□ عنوان گزارش :

بتن سبکدانه سازه‌ای لیکا

□ کارفرما:

شرکت لیکا

فهرست مطالب

پیشگفتار

۱	فصل اول - تاریخچه بتن سبک
۱-۱	مقدمه
۱-۲	پیش‌زمینه‌های تاریخی
۳-۱	تاریخچه بتن سبکدانه در عصر جدید
۴-۱	آغاز صنعت رس منبسط شده
۵-۱	کشتی‌های ساخته شده با بتن سبکدانه
۶-۱	ساختمان‌های ساخته شده با بتن سبکدانه
۷-۱	بتن سبکدانه در صنعت پیش‌ساخته
۸-۱	استفاده از بتن سبکدانه در ساخت پل‌ها
۹-۱	استفاده از بتن سبکدانه در ساخت ساختمان‌های بلند مرتبه
۱۰-۱	چشم‌اندازهای کاربرد بتن سبکدانه
۱۹	فصل دوم - مشخصات بتن سبک
۱۹-۱	ویژگی‌های بتن سبک
۲۰-۲	روش‌های تولید بتن سبک
۲۰-۲-۱	بتن اسفنجی
۲۰-۲-۲	بتن‌های با ساختار باز
۲۰-۲-۳	بتن سبک‌دانه
۲۲-۲	رده‌بندی بتن سبک بر مبنای مقاومت
۲۲-۳-۱	بتن سبک غیر سازه‌ای
۲۲-۳-۲	بتن سبک نیمه سازه‌ای
۲۲-۳-۳	بتن سبک سازه‌ای
۲۴-۲	مشخصات عمومی بتن سبک
۲۴-۲-۱	مقاومت فشاری بتن سبکدانه
۲۴-۲-۲	مقاومت کششی و خمشی بتن سبکدانه
۲۴-۲-۳	مدول الاستیسیته بتن سبکدانه
۲۴-۲-۴	پایایی بتن سبکدانه
۲۴-۲-۵	ریزساختار بتن سبکدانه
۲۹-۲	سبکدانه‌های مورد استفاده در بتن سبک
۲۹-۵-۱	وزن مخصوص سبک‌دانه‌ها
۲۹-۵-۲	مشخصات سبک‌دانه‌های موجود در ایران
۳۳-۲	رده‌بندی بتن سبکدانه بر مبنای مقاومت
۳۵-۲	رده‌بندی بتن سبکدانه بر مبنای وزن مخصوص
۳۵-۲-۸	رده‌بندی بتن سبکدانه قابل استفاده در شرایط محیطی مختلف

۳۹	..... فصل سوم - مشخصات مصالح سبکدانه
۳۹	..... ۱-۳ مقدمه
۳۹	..... ۲-۳ دانه‌بندی
۴۱	..... ۳-۳ وزن مخصوص توده‌ای غیرمتراکم
۴۲	..... ۴-۳ وزن مخصوص دانه‌ای
۴۳	..... ۵-۳ یکنواختی مقاومت دانه‌ها
۴۴	..... ۶-۳ جذب آب
۴۶	..... ۷-۳ مقاومت در برابر چرخه ذوب و یخ
۴۸	..... ۸-۳ دانه‌های شکسته در سنگدانه‌ها
۴۸	..... ۹-۳ ریزدانه‌ها در سنگدانه
۴۸	..... ۱۰-۳ ترکیبات تشکیل‌دهنده سبکدانه
۴۹	..... ۱۱-۳ واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها
۴۹	..... ۱۲-۳ جمع‌شدگی

۵۰	..... فصل چهارم - ساخت بتن سبک
۵۰	..... ۱-۴ مقدمه
۵۱	..... ۲-۴ آب آزاد و آب جذب‌شده
۵۱	..... ۳-۴ حجم ظاهری
۵۲	..... ۴-۴ حجم مطلق
۵۳	..... ۵-۴ وزن مخصوص دانه‌ای
۵۳	..... ۶-۴ وزن مخصوص توده‌ای
۵۳	..... ۷-۴ عوامل مؤثر بر تغییرات وزن مخصوص سبکدانه‌ها
۵۴	..... ۸-۴ پیمان‌گیری درشت‌دانه
۵۸	..... ۹-۴ پیمان‌گیری ریزدانه
۵۹	..... ۱۰-۴ فرآیند اختلاط
۶۱	..... ۱-۱۰-۴ بارگیری مخلوط‌کن‌ها
۶۱	..... ۲-۱۰-۴ مخلوط‌کن‌های ثابت
۶۲	..... ۳-۱۰-۴ عملکرد مخلوط‌کن‌ها
۶۲	..... ۱۱-۴ حمل و نقل
۶۳	..... ۱-۱۱-۴ تراکم‌میکسر‌ها
۶۴	..... ۲-۱۱-۴ حمل و نقل و زمان انتظار
۶۵	..... ۳-۱۱-۴ تأثیرات دما
۶۵	..... ۴-۱۱-۴ افزودن آب در کارگاه ساختمانی

۶۶	..... فصل پنجم - اجرای بتن سبک
۶۶	..... ۱-۵ بتن ریزی
۶۷	..... ۲-۵ تراکم
۶۸	..... ۳-۵ پرداخت
۶۹	..... ۴-۵ عمل آوری
۷۰	..... ۵-۵ فرآیند پمپ کردن بتن
۷۱	..... ۱-۵-۵ ملاحظات کلی در فرآیند پمپ کردن بتن سبکدانه
۷۲	..... ۲-۵-۵ نسبت های اختلاط
۷۴	..... ۳-۵-۵ پیمانہ گیری مخلوط پمپ
۷۴	..... ۴-۵-۵ پمپ و سیستم پمپ کردن

۷۹	..... فصل ششم - آزمایش های مرتبط با تولید بتن سبکدانه
۷۹	..... ۱-۶ آزمایش های بتن سبک
۷۹	..... ۱-۱-۶ وزن مخصوص
۸۱	..... ۲-۱-۶ آزمایش مقاومت
۸۱	..... ۳-۱-۶ کارپذیری
۸۲	..... ۱-۳-۱-۶ آزمایش اسلامپ
۸۲	..... ۲-۳-۱-۶ آزمایش جریان
۸۳	..... ۴-۱-۶ آزمایش مقدار هوا
۸۳	..... ۱-۴-۱-۶ روش فشاری
۸۴	..... ۲-۴-۱-۶ روش حجمی
۸۵	..... ۵-۱-۶ پمپ پذیری
۸۶	..... ۱-۵-۱-۶ آزمایش آب انداختگی
۸۶	..... ۲-۵-۱-۶ آزمایش فشار-حجم
۸۷	..... ۶-۱-۶ پایداری
۸۷	..... ۱-۶-۱-۶ آزمایش ستون جدا شدگی
۸۹	..... ۲-۶ آزمایش های درجا
۹۰	..... ۳-۶ اصلاح طرح اختلاط

۹۱	..... فصل هفتم - اقتصاد بتن سبکدانه
۹۱	..... ۱-۷ مقدمه
۹۵	..... ۲-۷ هزینه جا به جایی
۹۷	..... پیوست ها
۹۷	..... پیوست الف
۱۰۲	..... پیوست ب
۱۰۶	..... پیوست پ

بسمه تعالی

پیشگفتار

تاکنون بخش‌های اول و دوم نتایج تحقیقات انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران در خصوص بتن سبکدانه سازه‌ای که با پشتیبانی شرکت لیکا انجام پذیرفته و توسط آن شرکت منتشر شده که مورد استقبال علاقه‌مندان قرار گرفته است. این در حالی است که تحقیقات در خصوص راهکارهای اجرایی برای گسترش کاربرد این نوع بتن، کماکان در حال انجام است.

در گزارش حاضر مجموعه‌ای از اطلاعات مفید، سودمند و روزآمد برای کاربران ارائه شده است. در بخش اول، به تاریخچه کاربرد بتن سبک پرداخته شده و چشم اندازهای کاربرد آن در آینده ترسیم شده است. در فصل دوم، مشخصات بتن سبک شامل مشخصات عمومی، مشخصات مکانیکی و پایایی آن مورد بحث قرار گرفته است و در فصل سوم، الزاماتی که باید سبکدانه در یک بتن سبک دارا باشد، تشریح شده است و آزمایش‌های متنوع آن ارائه گردیده است. فصل چهارم به عملیات اختلاط، حمل و نقل و ساخت بتن سبک اختصاص داده شده است و به تفاوت‌های آن با بتن معمولی اشاره شده است. اجرای بتن سبک و ملاحظات خاصی که در اجرای این نوع بتن باید مورد توجه مجریان قرار گیرد، فصل پنجم را به خود اختصاص داده است و آزمایش‌هایی که در طی مراحل اجرا باید بر روی بتن سبک انجام شود، در فصل ششم قرار داده شده است و نهایتاً در فصل هفتم جنبه‌های اقتصادی بتن سبک مورد بحث قرار گرفته است. در سه پیوست که در پایان کتاب قرار داده شده، جزییات نحوه انجام آزمایش‌های مهمی که در گزارش حاضر به آن‌ها اشاره شده مطرح گردیده است که می‌تواند برای مهندسان و کاربران مفید باشد.

با جامعیتی که در تدوین گزارش حاضر در نظر گرفته شده است امید است مطالب آن مورد توجه قرار گیرد. بر خود لازم می‌بینیم از همکاری تمامی مدیران و کارشناسان شرکت لیکا خصوصاً دکتر نمدالیان، مهندس محمدی و مهندس علیدوستی و همچنین همکاران خود خانم‌ها جلیلی، جاویدمهر و آقای پورضرابی کارشناسان انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران، که در تهیه مطالب همکاری نموده‌اند، قدردانی نماییم. امید داریم در آینده کماکان مطالب مفید و روزآمدی در اختیار خوانندگان قرار گیرد و این مطالب زمینه‌های گسترش کاربرد بتن سبکدانه سازه‌ای را فراهم‌تر نماید.

محمد شکرچی زاده

نیکلاس علی لیبر

احسان آشوری

راحیل خوش نظر

فصل اول - تاریخچه بتن سبک

۱-۱ مقدمه

شناخت تاریخچه بتن سبکدانه و روند گسترش کاربرد آن در دنیا و همچنین موارد عمومی استفاده از بتن سبکدانه ، به شناخت پتانسیل کاربرد بتن سبکدانه در ایران کمک می کند . بنابراین در این فصل به شروع صنعت بتن سبک ، مواردی از ساختمان هایی که با بتن سبکدانه ساخته شده اند ، کشتی های سبکی که در جنگ جهانی مورد استفاده قرار گرفتند و همچنین نمونه هایی از پل هایی که در تمام و یا قسمتی از آن ها از بتن سبکدانه استفاده شده است ، اشاره می شود . در ادامه توضیحی مختصر در خصوص المان های پیش ساخته سبک و همچنین چشم اندازی که برای بتن سبکدانه سازه ای می توان متصور شد ، آورده شده است .

۱-۲ پیش زمینه های تاریخی

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



شکل ۱-۱- تصویر شماتیک بندر Cosa

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



(ب)



(الف)

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

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

معبد **Pantheon** در سال ۲۷ پیش از میلاد مسیح به اتمام رسید. در این سازه، بتن از نظر وزن مخصوص از پایین تا بالای گنبد تغییر می کند. مهندسان رومی اعتماد به نفس کافی داشته اند تا گنبدی با قطر $\frac{43}{3}$ متر بسازند که تا بیش از ۲۰۰۰ سال بی رقیب باقی مانده است. سازه اکنون در وضعیتی خوبی قرار دارد و تا امروز از آن برای به جا آوردن اعمال مذهبی استفاده می شود. گنبد شامل دیواره ای تو در تو است که از چارچوبی از جنس چوب ساخته شده است که این امر برای کاهش بار مرده، مؤثر می باشد. نقش و نگارهای سطح چوب هنوز هم در این سازه دیده می شود. قالب کاری عالی سطح که کاملاً نمایانند، به بیننده به روشنی نشان می دهند که سازندگان اولیه نیز به صورت بسیار عالی بر هنر قالب بندی بتن سبک مسلط بوده اند.

استادیوم **Coliseum** که در سال ۷۵ تا ۸۰ پس از میلاد ساخته شد، یک آمفی تئاتر بسیار بزرگ است که ظرفیت آن ۵۰،۰۰۰ صندلی می باشد. فونداسیون به وسیله بتن سبک قالب گیری شده است؛ این بتن از تکه های

خرد شده آتشفشانی به دست آمده بود. دیوارها، متخلخل و سبک بودند که دلیل آن استفاده از دانه های آجری بود. همچنین طاق ضربی و فضای بین دیوارها، با استفاده از توف متخلخل سبک ساخته شده بود.

۱-۳ تاریخچه بتن سبکدانه در عصر جدید

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

اتحادیه ناوگان آمریکا دریافت که برای استفاده از بتن سبک در سازه کشتی، وزن مخصوص بتن نباید از ۱۷۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب بیشتر و مقاومت فشاری آن نیز باید تقریباً برابر با ۲۸ مگا پاسکال باشد. با استفاده از سنگدانه های رسی منبسط شده در کوره های گردان بتن با مقاومت ۳۴ مگاپاسکال و وزن مخصوص ۱۷۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد.

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

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

۱-۴ آغاز صنعت رس منبسط شده

آغاز کاربرد بتن سبکدانه در عصر جدید ، با ساخت سبکدانه های مصنوعی از رس منبسط شده که علاوه بر سبکی، مقاومت خوبی داشته و امکان تولید یکنواخت آن ها به صورت صنعتی میسر است ، آغاز گردید . استفان جی هایدی (**Stephen J. Hayde** ، ۱۹۱۸) ، یک سازنده آجر و مهندس سرامیک ، فرایند کوره چرخان را ابداع کرد و کاربرد سنگدانه رس منبسط شده را توسعه بخشید . هایدی با داشتن تجربه قابل توجهی که در مورد ساخت و ساز و مشکلات آن داشت ، در پی یافتن راهی به منظور حل مشکلات آن بود . او دریافت که می توان از مواد سبک وزن منبسط شده که دور انداخته می شوند به عنوان سنگ دانه سبک استفاده کرد . این مواد از منافذ منفصلی تشکیل شده اند که در اثر تشکیل و انبساط گازهای داخل سنگ رس ایجاد می شوند . همچنین دارای سختی زیادی مانند شیشه هستند . در نتیجه این مواد الزامات سنگدانه ها یعنی سختی و نفوذناپذیری را دارا هستند و وزن مخصوص کمتری نسبت به سنگدانه های معمولی مانند شن و ماسه دارند . استدلال هایدی که بعدها توسط آزمایش های تجربی اثبات شد ، این بود که یک سنگدانه با ویژگی های ذکر شده می تواند بارهای مرده سازه های بتنی را کاهش دهد و در نتیجه مشکلات هزینه و طراحی را حل کند . این سبکدانه های تولید شده توسط هایدی ، به عنوان ماده ای ایده آل برای ساختن بتن های مخصوص محسوب شد . تقریباً بعد از یک دهه تجربه و آزمایش ، هایدی فرآیند ساختن این سنگدانه ها توسط گرما دادن به ذرات کوچک رس و اسلیت در کوره گردنده را ثبت کرد .

این وجود او استفاده رایگان از حقوق امتیازش را برای فازهای اجرایی و آزمایش برنامه کشتی سازی ، به دولت فدرال اهدا کرد . در نتیجه ساخت سبکدانه رسی به صورت گرم نمودن تدریجی رس به منظور فرصت یافتن گازهای محبوس برای ایجاد تخلخل به سرعت رایج شد . شواهد نشان می دهد که بتن ساخته شده با این مصالح ، رفتار مکانیکی مشابه با بتن های معمولی دارد . با گذشت زمان ، محققان آزمایش های بیشتری را انجام دادند که یافته های هایدی را تأیید می کرد . آژانس ملی استاندارد ، موظف به تحقیق و آزمایش های تکمیلی در خصوص تولید عمده سنگدانه ها شد .

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

۱-۵ کشتی های ساخته شده با بتن سبکدانه

سلما^۱ کشتی سبکی بود که در ژوئن سال ۱۹۱۹ به آب انداخته شد . سلما اولین کشتی بتنی ساخته شده در آمریکا نبود ، آتلانتیسین ۳۰۰۰ تنی در دسامبر ۱۹۱۸ به آب انداخته شد . بدنه کشتی که با بتن سبک مسلح و سنگدانه های رس منبسط شده ساخته شده بود ، دارای ضخامت ۵ اینچ در کف و ۴ اینچ در جداره اطراف بود . برای ساخت این کشتی ۲۶۶۰ یارد مکعب بتن مسلح با ۱۵۵۰ تن میلگرد و یا به عبارت دیگر ۱۶۵ تن فولاد مسلح کننده در هر یارد مکعب بتن مصرف گردید . شکل ۱-۳ کشتی سبک سلما را نشان می دهد .



شکل ۱-۳- کشتی سبک سلما

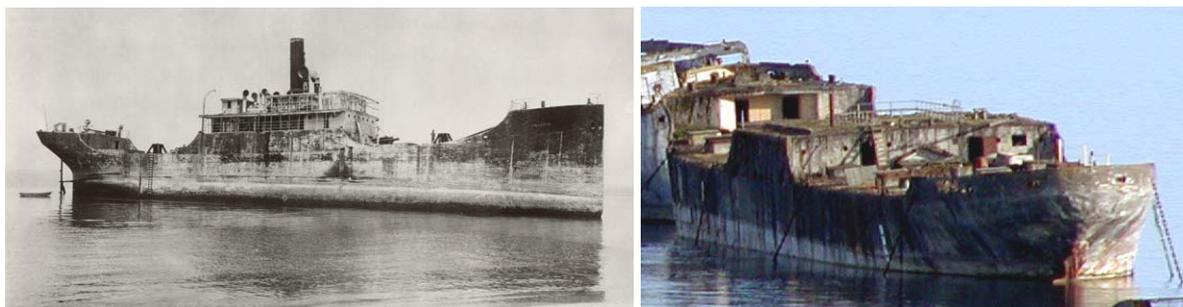
^۱ Selma

برای اینکه در مقاطع داخلی نازک بدنه کشتی و اطراف شبکه های میلگرد بتن ریزی خوبی انجام شود ، باید از بتن بسیار سیال و روان استفاده می شد . یکی از مهندسان ، دستگاهی ساخت که با استفاده از آن امکان تعیین روانی این نوع بتن به طور موفقیت آمیز وجود داشت . این دستگاه از یک قالب استوانه ای 12×6 اینچ و تعدادی مسیرهای عمود ثابت تشکیل شده که به کمک آن ها می توان قالب را بالا برد. استوانه از بتن پر شده، سپس بالا برده می شود و مقدار افت اندازه گیری می گردد . نتیجه به عنوان افت روانی برحسب اینچ گزارش می گردد . پس از چند سال استفاده از کشتی سلما ، تعمیرات اساسی بر روی آن انجام شد و تجهیزات جدیدی به آن اضافه شد . پس از این اقدامات ، بلافاصله وارد سرویس حمل و نقل نفت خام از بندر **Tampico** به تگزاس شد و یک دوره خدمت رسانی کوتاه ولی رضایت بخش داشت .

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

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

۲۴ فروند از این کشتی ها ، کشتی های بزرگ دریایما بودند و ۸۰ فروند دیگر کشتی های دریایما با ابعاد بسیار بزرگ بودند . کل ظرفیت بار آن ها ۴۸۸۰۰۰ تن یا معادل ظرفیت ۴۶ کشتی معمولی بودند . هزینه کل ساخت این کشتی ها ۱۶۷ میلیون دلار بوده است . شکل ۱-۴ تعدادی از کشتی های ساخته شده با بتن سبک را نشان می دهد .



شکل ۱-۴ - نمونه هایی از کشتی های ساخته شده با بتن سبک

گزارش‌های ارائه شده در خصوص این کشتی‌ها نشان می‌دهد که این کشتی‌ها مقاومت بی‌نظیری در برابر بمب‌ها دارند و قابلیت جا به جایی بسیار مناسبی دارند. بر اساس این گزارش‌ها هنگامی که یک بمب در پشت کشتی منفجر می‌شود، رگباری از قطعات پوسته پوسته شده ایجاد می‌شود ولی هیچ صدمه‌ای به افراد وارد نمی‌شود. همچنین کمیته گزارش داد که در طول عمر کشتی، بدنه کشتی‌ها کاملاً ضد آب می‌باشند و می‌توانند محموله‌های گندم و شکر را بدون هیچ‌گونه آسیب ناشی از تراوش و تعریق حمل کنند. این موضوع حتی برای کشتی‌هایی که در نزدیک بمب‌ها مورد آزمایش قرار گرفتند نیز صادق بود. همچنین در گزارش‌های ارائه شده، به این مطلب اشاره شده بود که بارهایی مثل سولفور که برای فولاد مخرب است را می‌توان با کشتی‌های ساخته شده با بتن سبک حمل کرد. کمیته اضافه نمود که تعمیرات کشتی در دوران خدمت کم هزینه تر است و به صورت کلی نیاز کمتری به تعمیر وجود داشت. این کمیته نتیجه گرفت که مدارک کافی وجود دارد که نشان می‌دهد که اگر کشتی ساخته شده با بتن سبک به خوبی طراحی و تجهیز شود، مانند کشتی‌های فولادی عمل خواهد کرد.

۱-۶ ساختمان‌های ساخته شده با بتن سبکدانه

یکی از کاربردهای مهم سبکدانه‌ها در ساختمان، کاربرد آن در ساخت بلوک‌های بنایی سبک است. مدت کوتاهی پس از جنگ جهانی اول، اشتراوب^۲ یک آلمان بتنی ساخت که در آن از پوک‌های زغال‌چوب به عنوان سنگدانه استفاده شده بود و بلوک پوک نام گرفت. پس از آن سروی^۳ از کانزاس، نخستین بلوک بنایی که در آن سنگ رس منبسط شده سبک به عنوان سنگدانه به کار رفته بود را معرفی کرد و این سنگدانه سنگ رس منبسط، به سرعت در میان تولیدکنندگان بلوک و مصرف‌کنندگان محصول، محبوبیت پیدا کرد.

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

درجه بالای عایق بندی بلوک‌های رس منبسط شده در برابر گرما، آتش و صوت باعث شد این بلوک‌ها جذابیت زیادی به ویژه برای مهندسان معمار داشته باشد. از سوی دیگر با توجه به اینکه سبک وزنی باعث افزایش بهره‌وری

^۲ F.J.Straub

^۳ Dan F. survey

گروه های کاری می گردید ، پیمانکاران آن ها را به استفاده از این بلوک ها تشویق می کردند . بناهای مستقل نیز دریافتند کار با این بلوک ها خستگی کمتری به همراه دارد و در صورت استفاده از این بلوک ها به طور متوسط در روز ۴۰۰۰ پوند کمتر بلند می کنند . از آن زمان تا کنون استفاده از این بلوک ها چندین برابر شده است و تخمین زده می شود نیاز به بلوک های سبک استاندارد سالانه به بیش از یک میلیارد عدد برسد .

المان های بتنی سبک را می توان در هر نوع ساختمان از ساختمان های روستایی و مزرعه تا خانه ها ، سازه های صنعتی و تجاری ، مدرسه ها ، تئاترها ، ساختمان های چندطبقه ، نیروگاه ها و ساختمان های تفریحی به کار برد . پذیرش روز افزون سطوح منقوش بلوک ها باعث شده است از آن ها به عنوان یکی از المان های طراحی داخلی برای پارتیشن بندی در ساختمان ها ، استفاده شود . این نوع کاربرد به ویژه برای ساختمان های آموزشی مثل کلاس های مدرسه ، واحدهای کتابخانه و مواردی نظیر آن مفید می باشد . مزیت اقتصادی استفاده از این بلوک ها به دلیل ویژگی های عایق صدا و عایق بندی قابل توجهی که دارند ، قابل توجه است . شکل ۱-۵ دو ساختمان را نشان می دهد که با استفاده از بتن سبک ساخته شده است .



شکل ۱-۵ - نمونه هایی از ساختمان های ساخته شده با بتن سبک

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

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

بلوک های سبک برای انواع دیوار های داخلی و خارجی و باربر و غیر باربر ایده آل هستند . به دلیل این که تولید کنندگان طیف گسترده ای از انواع واحدهای ویژه مثل بلوک های تیرچه ، تیرهای نعل درگاه ، بلوک های مربع شکل ، واحد های ستون چهارچوب و واحد های شیاری ویژه برای پنجره های فولادی را تولید نمی کنند ، استفاده از این بلوک ها در ساخت و ساز ، نیاز به افراد حرفه ای و ماهر را برای کارهای ویژه کاهش داده است و با به حداقل رساندن زمان انجام پروژه ، بهره وری را افزایش داده است . این موضوع به یکی از ملاحظات اساسی و مهم در پروژه های بزرگ تبدیل شده است . در این پروژه ها ، از روش مسیر بحرانی و تکنیک های مشابه برای هماهنگ کردن و برنامه ریزی کارها به منظور رسیدن به بیشترین بهره وری استفاده می شود . در ادامه به طور خلاصه به مزایای بناهای ساخته شده با بتن سبک اشاره می گردد .

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

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

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

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

طبیعت سلولی منحصر به فرد سنگدانه سبک، آن را به ویژه برای اجرای دیوارهای بنایی که در آن ها حذف انتقال صوت مهم است، مناسب ساخته است. همان طور که پیشاپیش اشاره شد، یکی از کاربردهای اصلی این المان در مدارس و کتابخانه هاست. در کتابخانه مرکزی دانشگاه **Utah** که اخیراً ساخت آن کامل شده است و استفاده گسترده‌ای از بتن سبک سازه‌ای در قاب‌ها و طبقات آن شده است، از واحدهای بنایی سبک برای اتاقک های ۱۱۰۰ دانشجو و برای تمام دیوار های داخلی ساختمان به کار رفته است. کاربرد این بلوک های بنایی در ساختمان های اداری، آپارتمان و هتل‌ها نیز دارای منافع اقتصادی است.

در آزمایش های انفجار اتمی **Yucca Flats** خانه‌های یک طبقه که با المان های بتنی سبک ساخته شدند، دوام آوردند و خسارت سازه‌ای ناچیزی به آن‌ها وارد شد. این در حالی است که ساختمان های قابی و آجری موجود در آن محل، کاملاً تخریب شدند. ذکر این نکته ضروری است که این ساختمان‌های سبک برای آزمایش طراحی نشده بودند و تنها مطابق با آئین‌نامه ساختمانی نواحی لرزه خیز، ساخته شده بودند.

۱-۷ بتن سبکدانه در صنعت پیش ساخته

استفاده از المان‌های پیش ساخته بتن سبک سازه ای، در مورد پل‌ها و سازه‌های مشابه که در آن‌ها شرایط فیزیکی و رفت و آمد باعث سخت و غیرممکن شدن روش‌های معمولی و متداول می شود، مفید است. شکل ۱-۶ نمونه‌هایی از المان‌های پیش ساخته را نشان می دهد.



شکل ۱-۶ - نمونه‌هایی از المان‌های پیش ساخته

به عنوان مثال در اسکله‌ای در **Venia** کالیفرنیا از ۲۱۵ دال سبک پیش ساخته استفاده شده است که این المان‌ها در کارخانه تولید و سپس به این محل منتقل شده بودند .

یکی دیگر از موارد استفاده از بتن سبکدانه ، استادیوم **Chavez Ravine Los Angeles Dodger** بود که در آن تعداد زیادی اعضای سازه ای سبک به کار رفته بود . تیرها ، ستون‌ها و پلکان ، اعضای بودند که در محیطی نزدیک کارگاه بتن ریزی شده و به محل سازه منتقل شده بودند . تمام المان‌های بالایی این استادیوم نیز از بتن سبک می باشد . در این پروژه فاصله از کارگاه مانعی برای استفاده از بتن سبک پیش ساخته نبود. به عنوان مثال در ساخت دانشگاهی در آمریکا از ۷۴ پانل بتن سبک پیش ساخته استفاده شده بود . این پانل‌ها توسط کامیون از کارخانه ساخت قطعات پیش ساخته در فاصله ۳۰۰ مایلی ، به کارگاه منتقل می شدند. دلیل اصلی استفاده از سنگدانه سنگ رس منبسط شده در این پروژه ، کاهش وزن بوده است که کاهش هزینه های حمل و نقل و جا به جایی را به همراه داشته است .

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



شکل ۱-۷- جابجا نمودن المان های پیش ساخته

۸-۱ استفاده از بتن سبکدانه در ساخت پل ها

علاوه بر کشتی و المان های بلوک ، استفاده از سنگدانه رس منبسط شده در پل ها با استقبال چشمگیری روبرو گردید . یک مورد از پل هایی که در آن از بتن سبک استفاده شده است ، پلی واقع بر روی خلیج کوچک سباستین در ساحل شرقی فلوریدا می باشد . در زمان ساخت این پل سه شرط به طراحان تحمیل شده بود :

۱ - سازه نباید در اثر هوای حاوی یون کلر دچار خوردگی شود . ۲- کانال عبور باید در طول اجرا باز نگه داشته شود و نباید به وسیله داربست های موقت تنگ شود . ۳ - دهانه اصلی عبوری باید ۱۸۰ فوت طول داشته باشند . این دهانه ۱۸۰ فوتی با استفاده از شاه تیرهای ۱۲۰ فوتی از بتن سبک سازه ای ساخته شده بود که توسط شاه تیرهای ساخته شده از بتن معمولی که ۳۰ فوت آن از طرف پایه های پل طره شده بود ، نگه داری می شد . شاه تیرهای به ارتفاع ۶ فوت و طول ۱۲۰ فوت از بتن سبک ۵۱ تن وزن داشت در حالی که شاه تیرهای مهار طره ای به طول ۶۵ فوت از بتن معمولی ۴۲ تن وزن داشتند .

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

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



شکل ۱-۸ - پل خلیج سن فرانسیسکو- اوکلند

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



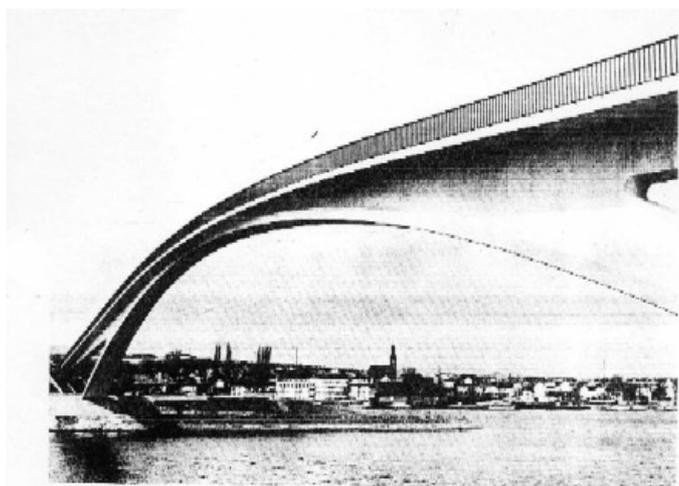
شکل ۱-۹ - پل رودخانه **Napa**

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

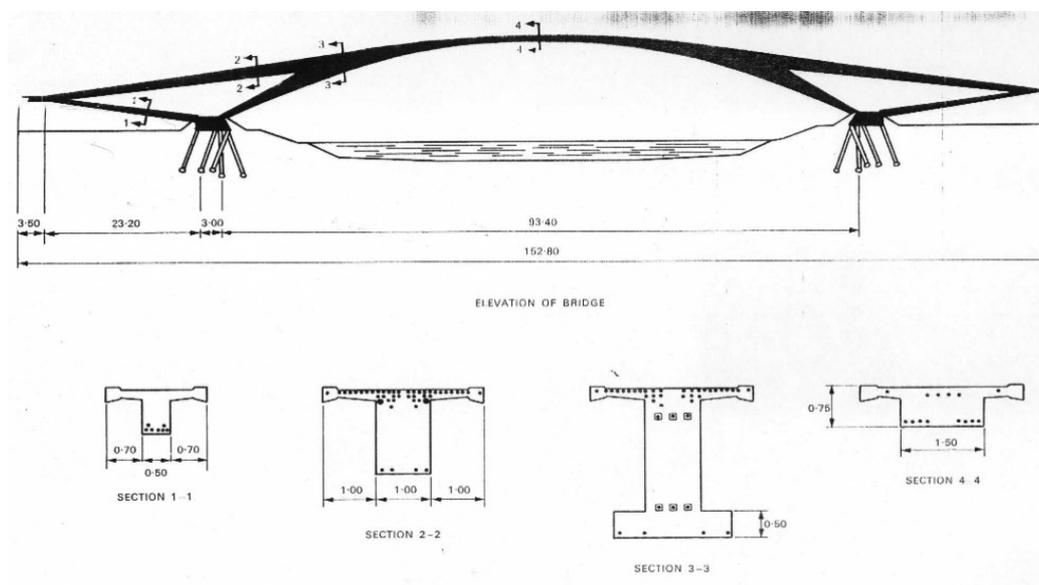


شکل ۱-۱۰ - پل سبک در سن دیگو ایالت کالیفرنیا

علاوه بر آمریکا، کشورهای اروپایی نیز با توجه به مزایای گسترده ای که در بتن سبکدانه وجود داشت، اقدام به ساخت و ساز با این مصالح نمودند. نمونه ای از این سازه ها را می توان در کشور آلمان مشاهده نمود. پل **Dyckerhoff** با دهانه 153 m ، پل عابر پیاده ای است که احتمالاً اولین سازه بتن سبک اجرا شده به صورت طره ای است. این پل به مناسبت صدمین سالگرد تشکیل شرکت **Dyckerhoff-zementwerke**، در این شهر ساخته شده است. شکل های ۱-۱۱ و ۱-۱۲ به ترتیب پل عابر **Dyckerhoff** و پی آن را نشان می دهند.



شکل ۱-۱۱ - پل ویسبادن آلمان

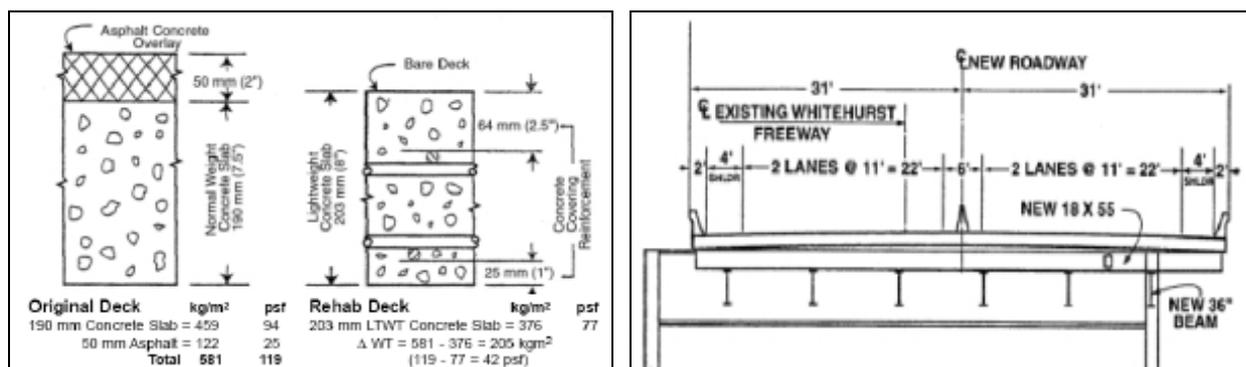


شکل ۱-۱۲ - پی ها و شمعیهای پل ویسبادن

در ساخت تمام اجزای پل، به جز پی و شمع ها، از بتن سبک با دانه های شیل منبسط شده استفاده شده است. متوسط مقاومت فشاری بتن استفاده شده در حدود $39/5$ مگا پاسکال و وزن مخصوص بتن، بین $1580 - 1640$ کیلوگرم بر متر مکعب بوده است. نکته جالب در طراحی این پل این بود که تغییر شکل بازوهای طره ای آن با استفاده از تئوری دقیق محاسبه شده بود. محاسبات نشان داد که بار $14/2$ تنی مربوط به تجهیزات ساخت و

قالب بندی که روی طره اعمال شد ، باعث تغییر مکانی در حدود ۴۰ میلی متر در هر طرف می شود که این مقدار با مقدار تئوری تنها در حدود ۳ میلی متر تفاوت داشت . این بدین معنی است که فرضیات انجام شده در طراحی درباره مدول الاستیسیته بتن ساخته شده با شیل منبسط شده تا حد زیادی با واقعیت (در محدوده رفتار خواسته شده) مطابقت داشته است .

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

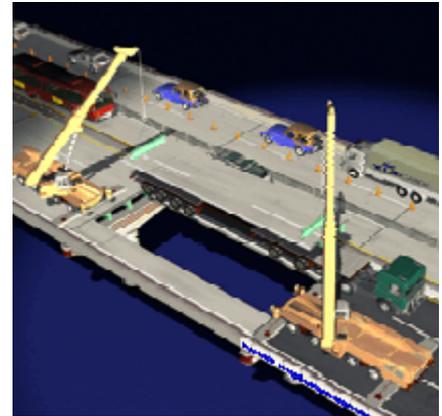


شکل ۱- ۱۳- بازسازی عرشه پلی با استفاده از بتن سبکدانه

پروژه دیگر پل رودخانه **James** در ایالت **Virginia State** است . این پل در حومه شهر ریچموند واقع شده است . در این پروژه عرشه پل جدید سبک ، جایگزین عرشه قدیمی شد . در طول انجام عملیات ساختمانی این پل ، تردد ترافیک مختل نگردید و تعویض عرشه پل بدون هیچگونه اختلالی در رفت و آمد صورت پذیرفت . عرشه کل دهانه پل به صورت یک عرشه پیش ساخته از جنس بتن سبکدانه ساخته شده بود که به صورت یکجا در محل ، نصب گردید . شکل ۱-۱۴ پل رودخانه **James** و شکل ۱-۱۵ تصاویر نحوه اجرای عرشه پل را نشان می دهد .

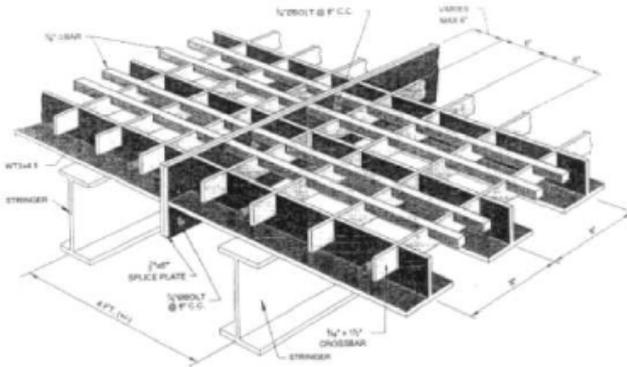


شکل ۱-۱۴ - پل رودخانه James



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

پل سبک دیگر، پل بروکلین در شهر نیویورک در آمریکا می باشد. عرشه این پل به صورت اضطراری، جایگزین عرشه قدیمی شد. سیستم این پل شامل یک شبکه فلزی می باشد که درون این شبکه با بتن سبکدانه پر شده است. تعریض این پل نیز با پانل های پیش ساخته $30 \times 7/5$ فوت انجام شده است. شکل ۱-۱۶ نمای پل را نشان می دهد.



(ب)



(الف)

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

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



شکل ۱-۱۷- پل رودخانه **Coleman**

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

۱-۹ استفاده از بتن سبکدانه در ساخت ساختمان های بلند مرتبه

در سال های اخیر ، ساختمان های فراوانی ساخته شده اند که در ساخت آن ها از بتن سبک سازه ای استفاده شده است . از این رو تعیین دقیق بلندترین سازه ساخته شده با بتن سبک دشوار است . در بعضی از موارد ، استفاده از بتن سبک ، اجازه اضافه کردن طبقات ، علاوه بر آن چه را که در طراحی پیش بینی شده است ، می دهد . به عنوان مثال یک برج اداری در اتاوا که طراحی اصلی آن (در صورت استفاده از بتن معمولی) بر مبنای ۲۲ طبقه بوده است ، در

نهایت با استفاده از بتن سبک به ۲۵ طبقه رسید. نمونه ای دیگر مربوط به ساختمانی در می سی سی پی می باشد که در ابتدا سازه ساختمان برای ۲ طبقه طراحی شده بود ولی با استفاده از بتن سبک، تعداد طبقات این ساختمان به ۶ رسید.

۱-۱۰ چشم اندازهای کاربرد بتن سبکدانه

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

بیش از یک دهه پیش، فرانک رایت^۵ فردی که در به کارگیری از بتن سبک برای سازه ها نابغه بود، توصیفی درباره سال های آینده برای این نوع بتن بیان کرد. او گفت: «عصر ما، برای ما بهترین ابزارها بر روی زمین را فراهم آورده است. ما تقریباً می توانیم هر چیزی را بسازیم، اما فقط باید درک کنیم که چگونه از قدرتمان برای ساخت آن ها استفاده کنیم.»

⁵ Frank L loyal wright

فصل دوم - مشخصات بتن سبک

۱-۲ ویژگی‌های بتن سبک

همانطور که در فصل پیش نیز اشاره شد، 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 هزاره سوم پیش از میلاد وجود دارد که در آن‌ها مواد آتشفشانی مثل پومیس و اسکریا، به کار رفته است.

در عصر صنعتی شدن و هم‌زمان با توسعه 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. به‌نحوی که در بعضی کشورها مصرف سرانه سبکدانه به حدود ۲۰۰ لیتر در سال می‌رسد. به‌خاطر مزایای عملی استفاده از بتن سبکدانه در سال‌های اخیر، این بتن به عنوان 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 جا به جایی عناصر ساختمانی را در بر خواهد داشت، به این ترتیب جرثقیل‌های کوچکتری می‌تواند به کار رود و یا عضوهای پیش‌ساخته بزرگتری را می‌توان جا به جا کرد.

راه‌های مختلفی برای تولید بتن سبک وجود دارد. از این میان، سه گروه اصلی قابل تشخیص است. نوع اول بتن سبکدانه با ساختار یکپارچه که در آن سبکدانه به جای سنگدانه معمولی در بتن استفاده می‌شود. این نوع بتن را می‌توان یا به عنوان بتن سازه‌ای و یا بتن غیرسازه‌ای، به‌عنوان عایق حرارتی استفاده کرد. روش دوم بر اساس داخل کردن حجم زیادی فضای خالی در بتن است و با عنوان بتن هوا دمیده، 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 درشت‌دانه 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 برابر سازه‌ای را دارند از نوع بتن سبکدانه است، در این گزارش صرفاً به بیان مشخصات بتن سبکدانه سازه‌ای پرداخته می‌شود.

برخلاف بتن‌های با وزن معمولی که عمدتاً بر مبنای مقاومت فشاری طبقه بندی می‌شوند، طبقه بندی بتن‌های سبک را می‌توان بر مبنای وزن مخصوص 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 وزن مخصوص کم، مقاومت کمتری دارد و بتن با وزن مخصوص زیاد، اغلب مقاومت بیشتری خواهد داشت. بتن‌های سبکدانه سازه‌ای، مقاومت فشاری در محدوده حداقل ۱۵ تا حداکثر ۷۰ مگا پاسکال دارند. اگر چه گزارش‌هایی از ساخت بتن سبکدانه سازه‌ای با مقاومت بیش از ۷۰ مگا پاسکال نیز ارائه 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 می‌یابد. سیستم هوا و تخلخل در بتن سبکدانه، به مصالح چسباننده و افزودنی‌های شیمیایی به کار رفته بستگی دارد. با اضافه کردن دوده سیلیس و خاکستر بادی، هدایت حرارتی کاهش پیدا می‌کند. هنگامی که مقدار استفاده از دوده 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، هندسه حفرات و نحوه توزیع آن‌ها نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در هدایت حرارتی بر عهده دارد. در واقع، با کاهش وزن مخصوص، 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 سبکدانه پرمقاومت سازه‌ای، با استفاده از یک ماتریس سیمان پرمقاومت تولید می‌شوند. البته سبکدانه‌های لیکای سازه‌ای هم که امروزه موجودند، مقاومت بیشتری نسبت به سنگدانه‌های رس منبسط لیکای غیر سازه‌ای دارند. این سبکدانه‌های سازه‌ای می‌توانند برای تولید بتن پرمقاومت به کار روند.

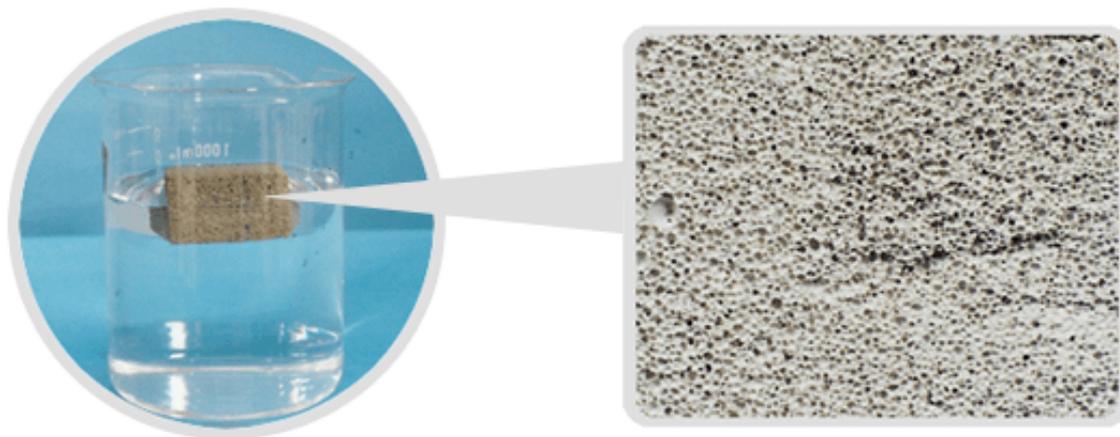
۲-۲ روش‌های تولید بتن سبک

روش‌های گوناگونی برای سبک کردن بتن و تولید بتن سبک به کار گرفته شده است که می‌توان عمومی‌ترین آن‌ها را به سه دسته تقسیم کرد.

۲-۲-۱ بتن اسفنجی

دسته اول بتن‌های اسفنجی که در حین ساخت آن‌ها با ایجاد کف یا حباب‌گاز، حباب‌هایی در خمیر سیمان یا در ملات سیمان - سنگدانه، ایجاد می‌گردد. حباب مورد نظر یا از طریق مواد کف‌زا در حین اختلاط تولید شده و یا

به صورت کف آماده به مخلوط اضافه می شود. یا با افزودن مواد واکنش زایی مانند پودر آلومینیوم به بتن تازه تولید می شود. واکنش این مواد باعث ایجاد گاز در بتن و در نتیجه سبک شدن ماتریس سیمان آن می شود. ویژگی اصلی مورد نیاز در ساخت بتن اسفنجی پایدار بودن حباب ها و توزیع یکنواخت آن ها در هنگام اختلاط، حمل و نقل و بتن ریزی می باشد. وزن مخصوص بتن اسفنجی عمدتاً در محدوده ۲۰۰ تا ۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب تنظیم می شود اما بتن اسفنجی می تواند وزن مخصوصی تا حدود ۱۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب نیز داشته باشد. (شکل ۱-۲)



شکل ۱-۲- بتن اسفنجی

۲-۲-۲ بتن های با ساختار باز

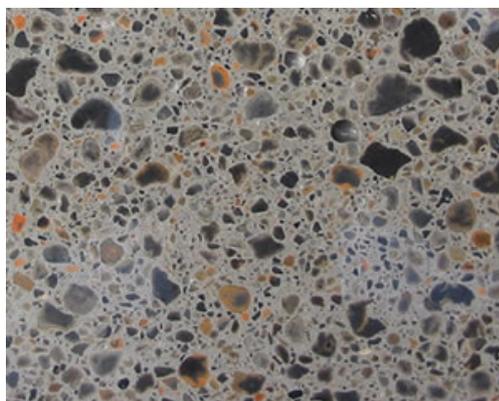
این بتن ها، در واقع بدون ریزدانه هستند و در آن ها ماسه از مخلوط بتن حذف گردیده و دانه های درشت با خمیر سیمان به یکدیگر چسبیده اند. ساخت بتن سبک با ساختار باز، هم با استفاده از سنگدانه های طبیعی و هم با استفاده از سبکدانه امکان پذیر است. این بتن ها برای مصارفی چون زهکش و یا پرکننده های سبک به کار می روند. وزن مخصوص این بتن ها عمدتاً در محدوده ۷۰۰ تا ۱۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب قرار می گیرد. (شکل ۲-۲)



شکل ۲-۲- بتن با ساختار باز

۳-۲-۲ بتن سبکدانه

دسته سوم، بتن با سنگدانه سبک، یا به اختصار بتن سبکدانه است. در این نوع بتن، سبک کردن از طریق استفاده از سنگدانه‌های سبک صورت می‌گیرد. لازمه ساخت این نوع بتن استفاده از سبکدانه مناسب با ویژگی‌های مورد نیاز است. سبکدانه‌ها را می‌توان به سبکدانه سازه‌ای و غیر سازه‌ای و طبیعی و مصنوعی تقسیم‌بندی نمود. عمده بتن‌های سبکی که دارای کاربرد سازه‌ای هستند، در طبقه‌بندی بتن سبکدانه قرار می‌گیرند. به دلیل آنکه موضوع بحث این گزارش بتن سبک سازه‌ای می‌باشد، در ادامه این گزارش به بررسی بتن‌های سبکدانه پرداخته می‌شود. منظور از بتن سبک در ادامه این گزارش، بتن سبکدانه می‌باشد مگر آنکه خلاف آن ذکر شده باشد. حداکثر وزن مخصوص بتن سبک سازه‌ای به ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب محدود می‌شود. ساخت بتن سبکدانه سازه‌ای با وزن مخصوص کمتر از ۱۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب نیز معمولاً عملی نمی‌باشد. (شکل ۳-۲)



شکل ۳-۲- بتن سبکدانه

۳-۲-۳ طبقه بندی بتن سبک بر مبنای مقاومت

علاوه بر طبقه بندی بتن سبک از لحاظ روش ساخت، این بتن‌ها بر مبنای مقاومت نیز طبقه‌بندی می‌گردند. بتن‌های سبک از دیدگاه مقاومتی در سه دسته طبقه‌بندی می‌شوند که عبارتند از بتن سبک غیرسازه‌ای، بتن سبک نیمه سازه‌ای یا بتن سبک با مقاومت متوسط و بتن سبک سازه‌ای که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

۱-۳-۲ بتن سبک غیرسازه‌ای

بتن‌های سبک با مقاومت کمتر از ۷ مگاپاسکال، در رده بتن‌های سبک غیر سازه‌ای طبقه‌بندی می‌شوند. این نوع بتن‌ها با وزن مخصوصی معادل ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و کمتر، به عنوان تیغه‌های جداساز و عایق‌های حرارتی و

صوتی در کف بسیار مؤثر هستند. این نوع بتن می‌تواند در ترکیب با مواد دیگر در دیوار، کف و سیستم‌های مختلف سقف مورد استفاده قرار گیرد.

اضافه کردن ریزدانه‌هایی با وزن مخصوص معمولی، موجب افزایش وزن بتن و مقاومت آن می‌شود، لیکن به منظور حصول خواص عایق‌بندی حرارتی (ضریب انتقال حرارت کم)، حداکثر وزن مخصوص به ۸۰۰ کیلوگرم در مترمکعب محدود می‌گردد. هنگام ساخت و استفاده از بتن سبک غیرسازه‌ای، سعی بر این است که با کاهش وزن بتوان خصوصیات عایق حرارتی را افزایش داد، اما ذکر این مطلب ضروری است که با کاهش وزن مخصوص بتن، مقاومت آن نیز کاهش می‌یابد. مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتن، ارتباط نزدیکی با هم دارند و با افزایش وزن مخصوص، مقاومت زیادتری مورد انتظار است. با توجه به مقاومت به دست آمده از این نوع بتن، محل کاربرد آن تعیین می‌گردد. به عنوان مثال بتن‌هایی با مقاومت فشاری حدود ۰/۷ مگا پاسکال و کمتر، برای عایق‌سازی لوله‌های بخار زیرزمینی مناسب هستند و از بتن‌های با مقاومت زیادتر تا حدود ۳/۵ مگا پاسکال بیشتر، در پیاده‌روها استفاده می‌شود. باید توجه داشت که جمع‌شدگی بتن‌های سبک در هنگام خشک شدن، در اکثر موارد و به خصوص در موارد حذف سنگدانه‌های درشت از مخلوط، همواره مشکل‌ساز است.

۲-۳-۲ بتن سبک نیمه سازه‌ای

بتن‌های سبک موجود در این طبقه عمدتاً از نوع بتن‌های سبکدانه و بتن‌های با ساختار باز می‌باشند. به عبارت دیگر برای کاهش وزن مخصوص بتن، یا ریزدانه از مخلوط بتن حذف می‌شود یا از سنگدانه‌های سبک طبیعی یا مصنوعی، برای سبک‌سازی مخلوط استفاده می‌گردد. سبکدانه‌های مورد استفاده در بتن‌های سبک نیمه سازه‌ای معمولاً از یکی از روش‌های آهکی شدن (تکلیس)، کلینکر محصولات منبسط شده‌ای نظیر روباره‌های منبسط شده، خاکستر بادی، شیل و اسلیت یا سنگدانه‌های به دست آمده از مصالح طبیعی مانند پوک سنگ‌های آذرین و سنگ‌های آذرین متخلخل (توف) تولید می‌شوند. وزن مخصوص بتن ساخته شده با سنگدانه‌های فوق بین ۸۰۰ تا ۱۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. مقاومت فشاری این نوع بتن از ۷ تا ۱۷ مگا پاسکال تغییر می‌کند. کاربرد مواد افزودنی نظیر تسریع‌کننده‌ها و روان‌کننده‌ها، می‌تواند در تغییر مقاومت بتن‌های ساخته شده با سنگدانه‌های تولید شده از روش‌های مذکور مؤثر باشد. کاربرد این بتن‌ها معمولاً در بلوک‌های مجوف بتنی، کف‌سازی‌ها و موارد مشابه است.

۲-۳-۳ بتن سبک سازه ای

بتن های سبک سازه ای ، بتن هایی هستند که علی رغم دارا بودن وزن مخصوص کمتر از ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب ، مقاومت فشاری بیش از ۱۷ مگاپاسکال دارند . ساخت این بتن ها صرفاً با استفاده از سنگدانه های سبک و مقاوم امکان پذیر است . اکثر بتن های سبک سازه ای از خانواده بتن های سبکدانه می باشند که در آن برای کاهش وزن مخصوص بتن از سنگدانه های سبک استفاده شده است . به این دلیل بعضاً از عبارات بتن سبکدانه و بتن سبک سازه ای برای بیان یک مفهوم استفاده می شود . سنگدانه هایی که این شرایط را عموماً برآورد می کنند و طبق استاندارد **ASTM-C330** برای ساخت بتن سبک سازه ای مورد استفاده قرار می گیرند ، عمدتاً عبارتند از :

الف) شیل ، رس و اسلیت منبسط شده در کوره دوار

ب) سنگدانه هایی که از فرآیند تبادل یونی به دست می آیند ، مانند لیکا

ج) رویاره های منبسط شده

د) پوک های معدنی مانند اسکریا و پومیس

ه) پوک های صنعتی

و) سبکدانه های تولید شده از خاکستر بادی گندوله شده

تأمین مقاومت فشاری معادل ۲۰ مگاپاسکال و بیشتر با بعضی از این سنگدانه ها امکان پذیر است. همانطور که پیش از این ذکر شد ، مقاومت بتن سبک ، معمولاً تابعی از وزن مخصوص آن است . باید توجه داشت که وزن مخصوص بتن عمدتاً بستگی به وزن مخصوص سنگدانه های مصرفی دارد ، به گونه ای که استفاده از مصالح سبک تر موجب کاهش وزن مخصوص بتن می شود . لازم به ذکر است که استفاده از سبکدانه های سنگین تر ، لزوماً باعث افزایش مقاومت بتن ساخته شده نخواهد شد . استفاده از سبکدانه با مقاومت متناسب با مقاومت مورد نیاز بتن سبک برای دستیابی به حداقل وزن مخصوص و حداکثر مقاومت ، مطلوب می باشد . بیشترین مقاومت بتن سبکدانه معمولاً وقتی حاصل می شود که از سبکدانه های سازه ای که مقاومت آن برابر یا بیش از مقاومت ماتریس سیمان باشد ، برای سبک سازی بتن استفاده گردد . سبکدانه های سازه ای مقاوم که در ساخت بتن سبک پرمقاومت به کار رفته اند عمدتاً در فرآیند کوره دوار از شیل ، رس و اسلیت منبسط شده ساخته شده اند .

۲-۴ مشخصات عمومی بتن سبک

مصالح سبک وزنی که از آن ها به عنوان سنگدانه در ساخت بتن استفاده می شود ، محدوده وسیعی دارند و با به کار بردن مصالح و روش های مناسب ، وزن مخصوص بتن می تواند از ۳۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب تغییر نماید و

مقاومت‌های متناظر آن‌ها در حدود ۳ مگاپاسکال و در بعضی موارد بیش از ۶۰ مگاپاسکال می‌باشد. با استفاده از مقادیر زیاد سیمان و کاهش نسبت آب به سیمان می‌توان به مقاومت بیشتری دست پیدا کرد.

تغییرات زیاد وزن مخصوص و مقاومت بتن‌های سبک باعث تفاوت زیادی در مشخصات مکانیکی انواع مختلف بتن سبک می‌شود. تفاوت موجود در مشخصات مکانیکی بتن سبک ذکر شده توسط محققان مختلف در ادبیات فنی نیز عمدتاً ناشی از این دلیل می‌باشد. بنابراین در هنگام مقایسه مشخصات یک بتن سبک خاص با نتایج ذکر شده توسط محققان مختلف، توجه به نوع مصالح به کار رفته در ساخت بتن سبک و سایر عوامل تأثیرگذار بر ویژگی‌های بتن، ضروری است.

مقاومت بتن معمولاً با افزایش عیار سیمان زیاد می‌شود. مقدار سیمان مورد نیاز برای ساخت بتن سبک معمولاً برابر یا بیش از مقدار سیمان مورد نیاز برای ساخت بتن با وزن معمولی هم مقاومت آن است.

بر حسب نوع مصالح، برای هر متر مکعب بتن سبکدانه با مقاومت ۲۰ مگاپاسکال، ممکن است بین ۳۰۰ تا ۴۵۰ کیلوگرم سیمان لازم باشد. این مقدار برای بتن سبکدانه با مقاومت ۳۰ مگاپاسکال برابر ۳۵۰ تا ۵۵۰ کیلوگرم سیمان بر مترمکعب است. تفاوت زیاد عیار سیمان مورد نیاز برای دستیابی به مقاومت مورد نظر به دلیل تفاوت زیاد مشخصات سبکدانه‌ها می‌باشد. به این ترتیب انتخاب سبکدانه متناسب برای ساخت اقتصادی بتن سبک با مقاومت معین، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

در ادامه مروری اجمالی بر بخشی از ویژگی‌های عمومی بتن سبکدانه شامل مقاومت، پایداری و ریز ساختار بتن سبکدانه انجام می‌شود.

۲-۴-۱ مقاومت فشاری بتن سبکدانه

حداقل مقاومت ۲۸ روزه بتن سازه‌ای در آئین‌نامه‌های مختلف از ۱۵ تا ۱۷/۵ مگاپاسکال تغییر می‌کند. برای نمونه آئین‌نامه بتن ایران، آبا، این حد را ۱۶ مگاپاسکال، آئین‌نامه بتن آمریکا، **ACI**، ۱۷ مگاپاسکال و آئین‌نامه بتن انگلیس **CP110**، این حد را ۱۵ مگاپاسکال تعیین می‌کنند.

البته حداقل مقاومت مجاز بتن برای اعضای پیش‌تنیده متفاوت است. برای مثال آئین‌نامه انگلیس، حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه مجاز اعضای پس‌تنیده را ۳۰ مگاپاسکال اعلام می‌کند. بر اساس این آئین‌نامه، حد مجاز برای اعضای پیش‌تنیده - پیش‌ساخته ۴۰ مگاپاسکال است. این حداقل مقاومت‌ها گزینه‌های مجاز طراح را در انتخاب نوع سنگدانه محدود می‌کند. برای استفاده از بتن سبک در این موارد باید بررسی‌های فنی و اقتصادی بیشتری صورت گیرد.

۲-۴-۲ مقاومت کششی و خمشی بتن سبکدانه

برای تعیین مقاومت کششی بتن معمولی ، از آزمایش برزیلی استفاده می‌شود . برای تعیین مقاومت کششی در بتن معمولی رابطه زیر پیشنهاد شده است :

$$f_t = 0.55\sqrt{f'_c}$$

مقاومت کششی بتن‌های سبک را مشابه بتن‌های معمولی می‌توان از آزمایش کشش غیر مستقیم (برزیلی) به دست آورد . در این جا نیز مشابه بتن‌های معمولی می‌توان رابطه‌ای بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن سبک به دست آورد . آئین نامه‌های اروپائی روابط زیر را برای تخمین مقاومت کششی بتن پیشنهاد می‌کنند :

$$f_t = 0.23 \sqrt[3]{f'_c}$$

$$\sqrt{f'_c} f_t = 0.375(0.3 + 0.7 \frac{P_{1c}}{P_{0c}})$$

که در رابطه بالا :

f_t مقاومت کششی بر حسب مگاپاسگال ، f'_c مقاومت فشاری نمونه مکعبی بر حسب مگاپاسگال ، P_{1c} وزن مخصوص نمونه بتن سبک خشک شده در هوا و P_{0c} وزن مخصوص بتن معمولی خشک شده در هوا است . با وجود روابط داده شده در عمل تغییرات زیادی مشاهده می‌شود . طبق بررسی‌های انجام شده مقاومت کششی بتن سبک به دو پارامتر بستگی بیشتری دارد. یکی نوع سبکدانه و دیگری روش عمل آوری بتن. معمولاً اگر عمل آوری بتن در شرایط خشک باشد ، مقاومت کششی بتن سبک حدود ۳۰٪ کمتر از بتن معمولی هم مقاومت آن است . مقاومت خمشی بتن سبک بیشتر از مقاومت کششی به شرایط عمل آوری بستگی دارد و این حساسیت با افزایش مقاومت بتن بیشتر می‌شود . برای مثال مقاومت خمشی بتن‌های با مقاومت فشاری بیش از ۵۰ مگاپاسگال در صورت عمل آوری در شرایط خشک حدود ۵۰٪ کاهش می‌یابد . برای بهبود مقاومت خمشی و کششی می‌توان مقداری ماسه معمولی را جایگزین ریزدانه سبک کرد . البته در این صورت وزن بتن افزایش می‌یابد و طراح باید به نکات منفی این امر نیز توجه داشته باشد .

۲-۴-۳ مدول الاستیسیته بتن سبکدانه

مدول الاستیسیته بتن سبک تفاوت نسبتاً زیادی با بتن معمولی هم مقاومت آن دارد و تا ۰/۲ آن هم می‌رسد و این امر در بعضی موارد باعث بروز مشکلاتی در اعضای ساخته شده با بتن سبک خصوصاً المان‌های خمشی می‌شود . اما در مواردی از جمله در تحقیق انجام گرفته بر روی سبکدانه لیکای سازه‌ای ایران ، مشاهده گردیده که مدول

الاستیسیته بتن سبکدانه ، تقریباً با مدول الاستیسیته بتن با وزن مخصوص معمولی هم مقاومت با آن ، برابر می‌باشد . مدول الاستیسیته بتن سبک به پارامتر های مختلفی از جمله متغیر های میزان تخلخل بتن ، نوع سبک دانه ، مقاومت فشاری و وزن مخصوص بستگی دارد. برای مثال می توان از جدول ۱-۲ حدود مدول الاستیسیته بتن های ساخته شده از سبک دانه های مختلف را مشاهده کرد .

جدول ۱-۲- حدود مدول الاستیسیته در بتن سبک با سبکدانه های مختلف

نوع سبکدانه	مدول الاستیسیته (E)
	(GPa)
روباره منبسط شده	۱۴-۲۱
لیتاژ	۱۴-۱۸
آگلایت	۱۴-۱۸
لیکا	۱۱-۱۸
سولیت	۱۱-۱۸

به همین دلیل تخمین مدول الاستیسیته بتن صرفاً بر اساس مقاومت فشاری کار مشکلی است . در بعضی مراجع ، مدول الاستیسیته بتن سبک حدود ۰/۵ تا ۰/۷۵ بتن معمولی هم مقاومت آن داده شده است . برای افزودن بر مدول الاستیسیته بتن سبکدانه ، می توان از جایگزینی بخشی از ریزدانه سبک با ماسه طبیعی استفاده کرد .

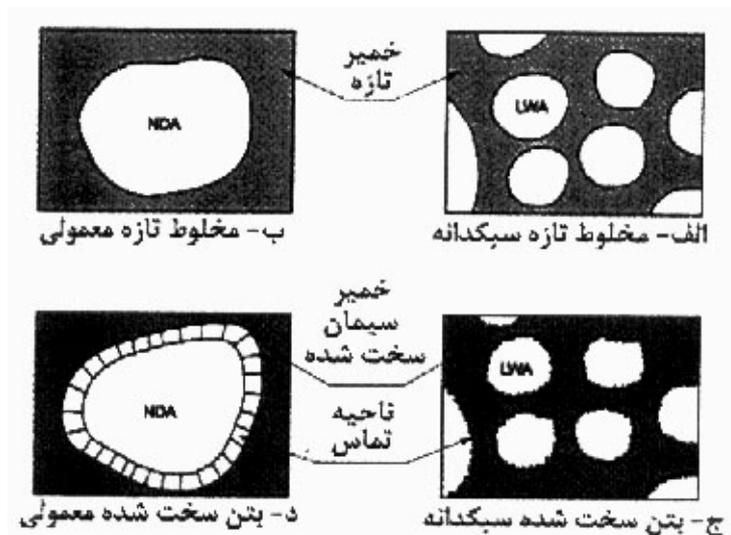
۴-۴-۲ پایایی بتن سبکدانه

علاوه بر مقاومت ، بتن باید در طول عمر خود نیز بتواند شرایط مطلوب اولیه را داشته باشد . برای نمونه بتن باید نه تنها از مقاومت فشاری کافی برخوردار باشد ، بلکه در برابر سیکل ذوب و یخ ، واکنش های سیلیکاتی قلیایی و خوردگی آرماتور ، مقاومت کافی را داشته باشد .

از این رو برای تأمین پایایی بتن با سنگدانه معمولی در شرایط محیطی نامساعد ، در اکثر آیین نامه ها ، حداکثر نسبت آب به سیمان محدود شده است . این درحالی است که برای اطمینان از پایایی بتن سبکدانه ، تأمین حداقل مقاومت فشاری توصیه شده است . بر اساس آیین نامه **ACI-318-92** چنانچه بتن سبکدانه در معرض یخ بندان و یا در تماس با نمک های یخ زدا قرار گیرد و یا چنانچه پایایی بتن در محیط جزر و مد پاششی دریا مورد نظر باشد ، مقاومت فشاری حداقل بین ۳۱ تا ۳۴ مگاپاسکال توصیه شده است . همچنین برای مقاومت بتن سبکدانه در شرایط بسیار سخت حملات سولفاتی ، حداقل مقاومت فشاری از ۲۹/۵ مگاپاسکال نباید کمتر باشد .

۲-۴-۵ ریز ساختار بتن سبکدانه

بتن سبکدانه نیز مانند بتن معمولی چند فازی است. در مرحله اختلاط، ریختن و تراکم می‌توان آن را دو فازی شامل "فاز خمیری" (خمیر سیمان) و "فاز صلب" (سنگدانه) دانست. در هنگام سخت شدن بتن، مصالح غیر همگن تبدیل به یک مصالح ظاهراً همگن می‌شوند. این امر در شکل شماره ۲-۴ مشاهده می‌گردد. به هر حال این ویژگی بتن، به سطح دیدگاه بستگی دارد. سطح دیدگاه شامل سطح کلان نگر، سطح میانه و سطح ریزنگر می‌باشد. از دید کلان نگر که خواص مهندسی بتن تعیین می‌شود، بتن مصالح همگن تلقی می‌گردد. این خواص شامل ویژگی‌های فیزیکی-مکانیکی و تابع زمان می‌باشد. از دید میانه، در مقیاس میلی‌متر تا سانتی‌متر، بتن دارای دو یا سه فاز می‌باشد. از دید ریزنگر، فرآیند‌های هیدراتاسیون و شکل‌گیری ریز ساختار توضیح داده می‌شود که در آن ویژگی‌های ناحیه لایه مرزی سنگدانه و خمیر سیمان تشریح می‌گردد. خواص لایه مرزی (انتقالی یا تماس) به ویژگی‌های سطح سنگدانه و ساختار منافذ و رطوبت اولیه سنگدانه‌ها بستگی دارد. با توجه به ساختار منافذ سنگدانه، حتی برخی فرآورده‌های واکنش آب و سیمان مانند هیدروکسید کلسیم می‌تواند به داخل منافذ سنگدانه نفوذ کند. این پدیده بیشتر در منافذ بزرگتر و سنگدانه‌هایی با جذب آب بیشتر اتفاق می‌افتد.



شکل ۲-۴ - اختلاف ساختار بتن سبکدانه و معمولی در سطح میانه نگر

ساده‌ترین روش ممکن برای مدل کردن بتن سخت شده، در نظر گرفتن مصالح به صورت مرکب دو فازی مانند فاز خمیری (ماتریس) و فاز ذرات (سنگدانه) می‌باشد. خواص مکانیکی مصالح تحت تأثیر خواص هر فاز و اندرکنش بین فازها می‌باشد.

معمولاً بتن سبکدانه شامل سبکدانه و سنگدانه معمولی است که از نظر خواص متفاوتند. در این حالت مدل دو فازی را می‌توان اصلاح نمود و ماسه معمولی را در فاز خمیر سیمان منظور کرد، یعنی یک فاز ملات و یک فاز سبکدانه به دست می‌آید. به طور کلی سنگدانه معمولی مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بیشتری را نسبت به خمیر سیمان دارا است. این امر بر توزیع تنش اثر می‌گذارد و محل ترک های اولیه را مشخص می‌کند و بنابراین توسعه گسیختگی و شکست بتن را تعیین می‌نماید. در وهله اول، سنگدانه معمولی به خاطر داشتن مدول الاستیسیته بیشتر، تنش بیشتری را جذب می‌کند. اختلاف در صلیبیت، موجب ایجاد تنش کششی عرضی در لایه مرزی خمیر سیمان و سنگدانه می‌گردد. اختلاف موجود در ضریب پواسون می‌تواند تنش کششی عرضی را افزایش دهد و حتی تیز گوشگی سنگدانه‌ها تمرکز تنش کششی موضعی را باعث می‌شود.

با این وجود شباهت بیشتر مدول الاستیسیته فاز سبکدانه و فاز ملات باعث توزیع یکنواخت تر تنش در بتن سبکدانه می‌شود. با افزایش بارگذاری، ترک‌ها عمدتاً از سبکدانه‌ها آغاز شده و گسترش می‌یابند. این امر بر خلاف نحوه شروع ترک در بتن معمولی می‌باشد که عمدتاً از فاز لایه مرزی آغاز می‌شود. دلیل این امر ضعیف بودن نسبی فاز سبکدانه در مقایسه با فازهای لایه مرزی و ملات در بتن سبکدانه است. بنابراین برای توجیه برخی از پدیده‌های مشاهده شده در بتن سبک که ممکن است متفاوت با بتن معمولی باشد، توجه به ریز ساختار بتن سبک و تفاوت آن با بتن معمولی ضروری است.

۲-۵ سبکدانه های مورد استفاده در بتن سبک

با توجه به این که بتن سبکدانه تنها نوعی از بتن سبک است که می‌تواند به طور سازه ای مورد استفاده قرار گیرد، و برای ساخت بتن سبکدانه استفاده از سبکدانه مناسب ضروری است، در ادامه این گزارش، ویژگی‌های سبکدانه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. سبکدانه‌ها، مصالحی طبیعی یا فرآوری شده می‌باشند که به دلیل تخلخل ایجاد شده در ساختار آن‌ها، از وزن مخصوص کمتری نسبت به سنگدانه های طبیعی برخوردار هستند.

۲-۵-۱ وزن مخصوص سبکدانه ها

در استانداردها و آیین نامه های مختلف برای سبکدانه‌ها، تعاریف و محدودیت هایی در نظر گرفته شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. آیین نامه **ASTM** سبکدانه‌ها را از لحاظ اندازه به دو دسته تقسیم می‌کند. **ریزدانه سبک**: ریزدانه، سنگی است که ۸۵ تا ۱۰۰ درصد آن از الک شماره ۴ عبور کند و وزن مخصوص خشک ظاهری آن کمتر از 1120 kg/m^3 باشد.

درشت دانه سبک : وزن مخصوص خشک ظاهری درشت دانه بیشتر از kg/m^3 ۸۸۰ نیست . معمولاً درشت دانه سبک در دو اندازه زیر طبقه بندی می شود :

الف - درشت دانه متوسط : ۳ تا ۱۵ میلی متر و ۵ تا ۱۹ میلی متر

ب- درشت دانه ریز : ۲/۵ تا ۱۰ میلی متر

در **DIN 4226-2** آلمان ، محدودیتی برای وزن مخصوص یا چگالی ارائه نشده است و برخی از سبکدانه هایی مانند پرلیت ، ورمیکولیت و شیشه منبسط شده ، در قالب این آیین نامه نمی گنجند .

در **BS 3797** بریتانیا سنگدانه های ریزدانه با وزن مخصوص غیرمترکم ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و درشت دانه با وزن مخصوص ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب را سبکدانه می نامند .

EN206 سنگدانه هایی با منشأ معدنی و دارای وزن مخصوص ذرات کمتر از **Kg/m³ ۲۰۰۰** و وزن مخصوص غیر مترکم کمتر از **Kg/m³ ۱۲۰۰** را سبکدانه می داند .

۲-۵-۲ مشخصات سبکدانه های موجود در ایران

در این بخش مشخصات فیزیکی تعدادی از سبکدانه های طبیعی و مصنوعی مورد بررسی قرار گرفته است . برای تولید سبکدانه های طبیعی ، نیاز به فرآوری خاص بر روی آن ها وجود ندارد . در ادامه این بخش مشخصات لیکا که تنها سبکدانه مصنوعی تولیدی در ایران است ، با دقت بیشتری مورد بررسی قرار می گیرد .

الف- سنگ پا : سنگ پا قدیمی ترین سبکدانه ای است که مورد استفاده بشر قرار گرفته است . این سنگ در اثر ورود مواد مذاب آتشفشانی به مخازن آب مثل دریاها و دریاچه ها و سرد شدن سریع ایجاد می شود . رنگ این سبکدانه ها سیاه ، خاکستری روشن و قهوه ای تیره است . به دلیل سرد شدن سریع مواد مذاب آتشفشانی حباب های نسبتاً درشتی در این سنگدانه ها وجود دارد که بعضاً به هم پیوسته می باشند و تا سطح سنگدانه امتداد یافته اند . وزن مخصوص خشک ظاهری این سبکدانه ها در حدود ۵۰۰ تا ۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد . معادن نسبتاً بزرگی از این مصالح در قروه کرمانشاه وجود دارد . نمونه ای از سنگ پا در شکل شماره ۲-۵ نشان داده شده است .

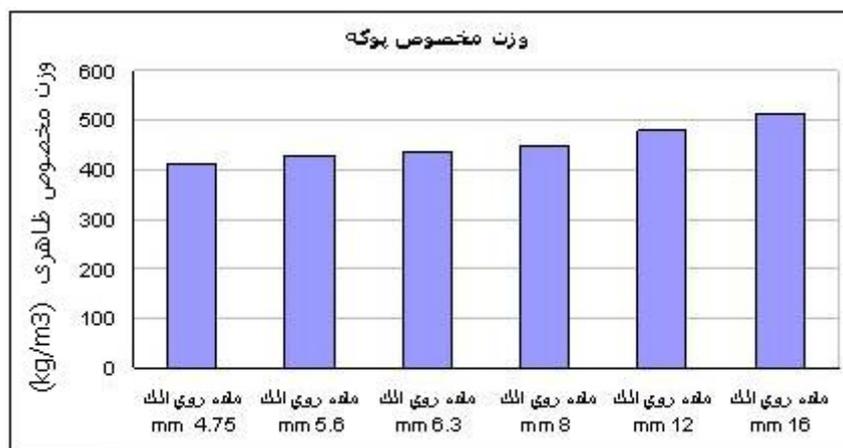


شکل ۲-۵ - سنگ پا

ب- **پوکه معدنی یا پومیس** : این سنگ به رنگ سفید مایل به زرد تا خاکستری روشن است و در اثر انباشته شدن خاکسترهای آتشفشانی و آهسته سرد شدن آن ها همراه با انبساط ناشی از حباب‌های به وجود آمده توسط بخار و گازهای موجود در آن به وجود می‌آید. نمونه‌ای از پوکه معدنی در شکل شماره ۲ - ۶ آورده شده است. معادن غنی پومیس ایران در اردبیل، آذربایجان شرقی و به خصوص بستان‌آباد تبریز، قروه کرمانشاه، دامنه‌های البرز، کرمان و سیستان و بلوچستان وجود دارد. وزن مخصوص خشک ظاهری این سبکدانه‌ها در حدود ۴۰۰ تا ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. نمونه‌ای از وزن مخصوص پوکه‌های معدنی با اندازه‌های متفاوت در شکل شماره ۲-۷ نشان داده شده است.



شکل ۲-۶- نمونه‌ای از پوکه معدنی



شکل ۲-۷ - وزن مخصوص پوکه‌های معدنی با اندازه‌های متفاوت

ج- **توف** : خاکسترهای آتشفشانی که پس از انفجار به طریق جریانی یا ریزشی تجمع نموده و سخت می‌شوند، به توف شهرت دارند. نوع توف، تابع ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی خاکسترهاست. وزن مخصوص توف‌های طبیعی در محدوده سنگدانه‌های معمولی است و از نوع سبکدانه به شمار نمی‌آیند اما برخی از انواع توف متخلخل

بوده و وزن مخصوص آن‌ها در حدود ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است که در خانواده سنگدانه‌های سبک به شمار می‌روند. رنگ این توف‌ها معمولاً سیاه، قرمز و سبز بوده و دارای رگه می‌باشند. گزارش‌هایی مبنی بر وجود توف سبک در دامنه کوه‌های البرز، ارایه شده است.

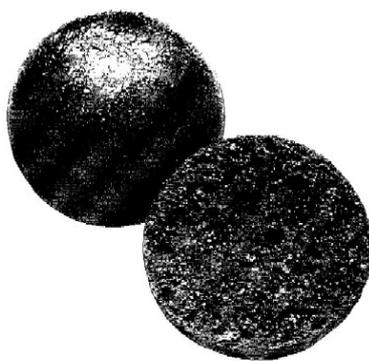
۵ - لیکا: سبکدانه‌های رس منبسط (لیکا) با استفاده از رُس باد شونده به روش فرآیند تر در داخل یک کوره گردان تولید می‌شوند. این سبکدانه‌ها در سوئد و نروژ، تحت عنوان لیکای سوئدی و نروژی تولید می‌گردند. از مخلوط کردن رس و آب، خمیر ایجاد می‌شود. این خمیر در انتهای بالایی کوره گردان در حالی که از طریق زنجیره‌هایی به دانه‌های کوچکتر شکسته می‌گردد، ریخته می‌شود. از این رو، آن‌ها هنگام عبور از کوره گردان، در حالی که به مصالح شیشه‌ای تبدیل می‌شوند، سبکدانه‌های با اشکال و اندازه‌های مختلف ایجاد می‌کنند. سنگدانه‌هایی که از کوره خارج می‌شوند به اندازه‌های مختلف سرنند می‌شوند. در ادامه به بررسی ویژگی‌های تعدادی از سبکدانه‌های لیکا تولید شده در کشورهای مختلف پرداخته می‌شود.

* **لیکای سوئد:** سنگدانه‌های رس منبسط شده از ذرات ریز رس که مقدار آهک آن‌ها کم است، به دست می‌آید. معادن آن‌ها در **Garstad** در محدوده **Linkoping** در سوئد می‌باشد. کارخانه تولید سبکدانه‌های سوئدی **AB Svensk Leca** دارای کوره‌های گردان است که سبکدانه لیکا را تولید می‌کند. رس، خشک شده و در کوره گردان در دمای زیاد حدود $1100^{\circ}C$ تا $1200^{\circ}C$ ، هنگام عبور از منطقه پخت، منبسط می‌شود. محصول نهایی، رس منبسط با یک پوسته سرامیکی سخت است. در داخل این ذرات، سوراخ‌هایی با اندازه متفاوت وجود دارد که معمولاً با یکدیگر مرتبط اند. با تغییر در اندازه دانه‌ها، چگالی و مقاومت آن‌ها تغییر می‌کند. دانه‌های با اندازه کوچک‌تر، چگالی و مقاومت بیشتری دارند. مدول الاستیسیته برای مصالح تراکم شده ۱۲ تا ۲۰ میلی‌متر، ۲۰ مگاپاسگال و برای مصالح غیر تراکم ۱۰ مگاپاسگال می‌باشد.

* **لیکای نروژ:** در نروژ، تولید سبکدانه براساس رس منبسط با استفاده از یک کوره تک در سال ۱۹۵۴ آغاز شد. ظرفیت تولید کم‌تر از ۱۰۰,۰۰۰ مترمکعب در سال بود. امروز کل تولید رس منبسط نروژ، تقریباً یک میلیون مترمکعب در سال، از چهار کوره گردان است. پس از ۴۰ سال از آغاز تولید لیکا، حدود ۱۸ میلیون مترمکعب بلوک سبکدانه در نروژ تولید و به فروش رسیده است. اگر این حجم سبکدانه بین ۴ میلیون نفر (جمعیت نروژ) تقسیم شود، به هر نفر ۴/۵ مترمکعب سبکدانه می‌رسد. این موضوع بدین معنی است که در طول ۴۰ سال گذشته مصرف بلوک لیکا ۴/۵ متر مکعب یا ۲۵ تا ۲۰ متر مربع برای هر فرد بوده است.

* **لیکای ایران** : در حال حاضر در ایران ، تنها یک کارخانه به تولید سبکدانه‌های مصنوعی با رس منبسط شده می‌پردازد . این کارخانه که **لیکا** نام دارد و تحت لیسانس لیکا بین المللی است ، در سال ۱۳۵۳ توسط بخش خصوصی ثبت و اولین کوره دوار آن در سال ۱۳۵۷ به بهره برداری رسید . ظرفیت اولیه تولید سبکدانه لیکا ۱۵۰/۰۰۰ مترمکعب توسط یک کوره دوار بوده که در سال ۱۳۸۴ با بهره برداری از واحد دوم به ۳۰۰/۰۰۰ هزار متر مکعب سبکدانه افزایش یافته است .

مجموعه کارخانجات لیکا در کیلومتر ۱۰۵ جاده تهران - ساوه و در شهرستان زرنندیه استان مرکزی قرار دارد . محصولات این کارخانه از نوع خاصی از رس‌ها که قابلیت تورم دارند، درست می‌شود. به این ترتیب که این رس‌ها را آسیاب می‌کنند و آن‌ها را با موادی که موجب تسریع تورم می‌شوند، مخلوط می‌کنند. سپس از داخل یک کوره گردان عبور داده می‌شوند . کوره بوسیله ترکیبی از زغال سنگ و نفت مشتعل می‌شود و دما را تا حدود $1000^{\circ}C$ می‌رساند . در نهایت ، مصالح سبکی با ساختار داخلی شبیه به لانه زنبور تشکیل می‌گردد . وزن مخصوص ظاهری لیکای تولید شده در ایران عمدتاً در حدود ۳۰۰ تا ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است و معمولاً برای مصارف غیر سازه ای کاربرد دارد . تصویر نمونه‌ای از دانه لیکا تولیدشده در ایران در شکل ۲-۸ نشان داده شده است . شرکت لیکای ایران چند سالی است که اقدام به تولید سبکدانه های سازه ای با وزن مخصوص ظاهری در محدوده ۵۰۰ تا ۷۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب نموده است . این فرآورده‌ها و بتن سبکدانه ساخته شده با آن‌ها، در انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار گرفته است .



شکل ۲-۸ - سبکدانه لیکا

۲-۶ رده بندی بتن سبکدانه بر مبنای مقاومت

همانطور که ذکر شد بتن‌های سبکدانه عمدتاً بر مبنای مقاومت و چگالی طبقه بندی می‌گردند. در استاندارد اروپایی **EN 206-1** بتن‌های سبکدانه بر مبنای مقاومت فشاری بر مبنای اعداد نشان داده شده در جدول ۲-۲ طبقه‌بندی

می‌شوند. 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 می‌شود. رده بندی مقاومت فشاری بر مبنای هر دو آزمون مکعبی و استوانه‌ای امکان‌پذیر است. نکته‌ای که باید به آن توجه نمود این است که رابطه میان مقاومت فشاری آزمون‌های مکعبی و آزمون‌های استوانه‌ای در بتن سبک متفاوت از رابطه میان مقاومت فشاری آزمون‌های مکعبی و آزمون‌های استوانه‌ای در بتن با وزن مخصوص معمولی است. با توجه به نتایج جدول، به نظر می‌رسد تفاوت مقاومت آزمون‌های استوانه‌ای و آزمون‌های 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 آزمون‌های استوانه‌ای و مکعبی کم تر می‌شود، حال آنکه برای بتن سبکدانه این موضوع برعکس است.

جدول ۲-۲ طبقه‌بندی بتن سبکدانه برحسب مقاومت فشاری در استاندارد **EN 206-1**

رده‌بندی مقاومت فشاری	$f_{ck,cyl}$ (نمونه استوانه‌ای) N/mm^2	$f_{ck,cube}$ (نمونه مکعبی) 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 آیین‌نامه بتن آمریکا **ACI 318** تمایزی میان رده‌های مقاومتی بتن سبک و بتن با وزن مخصوص معمولی دیده نشده است اما در بند ۲۱-۲-۴-۲ این آیین‌نامه تصریح شده است که مقاومت فشاری مشخصه بتن سبکی که به عنوان مصالح باربر در اعضای سازه‌ای به کار می‌رود، نباید بیشتر از ۳۴ مگاپاسکال در نظر گرفته شود مگر آنکه به وسیله آزمایش‌های سازه‌ای نشان داده شود که مقاومت و طاقت اعضای سازه‌ای ساخته شده با بتن سبک برابر یا بیشتر از مقاومت و طاقت اعضای سازه‌ای مشابه ساخته شده با بتن با وزن معمولی هستند. این محدودیت به دلیل وجود اطلاعات تجربی کافی در مورد رفتار اعضای سازه‌ای ساخته شده با بتن سبک پرمقاومت در برابر بارهای لرزه‌ای است.

۷-۲ رده بندی بتن سبکدانه بر مبنای وزن مخصوص

در استاندارد اروپایی **EN 206-1** شش رده مختلف وزن مخصوص برای بتن‌های سبک تعریف شده است. این رده‌بندی در جدول ۲-۳ نشان داده شده است. همانطور که در جدول نشان داده شده حداکثر وزن مخصوص بتن برای آنکه در رده بتن‌های سبک قرار گیرد ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. به عبارت دیگر بتن‌های با وزن مخصوص بیش از ۲۰۰۰ و کم تر از ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب اگر چه چگالی کمتری نسبت به بتن با وزن معمولی دارند اما در رده‌بندی بتن‌های سبک قرار نمی‌گیرند.

جدول ۲-۳ رده‌بندی بتن سبکدانه بر حسب وزن مخصوص در استاندارد *EN 206-1*

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

در آئین نامه **ACI 318** در تعریف بتن سبک ذکر شده است، بتن سبک بتنی است که وزن مخصوص آن مطابق با استاندارد **ASTM C576** کمتر از **1840** کیلوگرم بر مترمکعب باشد. مطابق این آیین‌نامه در صورتی که کل سنگدانه‌های به کار رفته در ساخت بتن از نوع سبکدانه باشند، بتن سبک به نام "بتن تمام سبک" نامیده می‌شود. در صورتی که تمام ریزدانه‌های بتن از سنگدانه‌های با وزن مخصوص معمولی باشند، بتن به دست آمده به نام "بتن سبک ماسه ای" نامیده می‌شود.

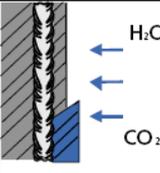
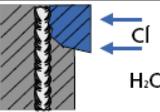
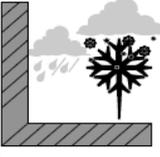
۸-۲ رده‌بندی بتن سبکدانه قابل استفاده در شرایط محیطی مختلف

در استاندارد اروپایی **EN 206-1** شرایط محیطی مختلفی تعریف شده است که بر مبنای میزان خوردگی محیط نوع بتنی که در آن شرایط محیطی قابل استفاده است محدود می‌باشد. معمولاً هر چقدر شرایط محیطی خوردگی بیشتری داشته باشد و خطر آسیب دیدگی بیشتری متوجه سازه باشد، حداقل مقاومت بتنی که در آن شرایط قابل استفاده است افزایش می‌یابد. حداقل رده مقاومتی توصیه شده برای بتن سبکدانه در شرایط محیطی مختلف مطابق استاندارد **EN 206-1** در جدول ۲-۴ نشان داده شده است.

جدول ۲-۴ حداقل رده مقاومتی بتن سبکدانه برحسب شرایط محیطی (توصیه شده در استاندارد **EN 206-1**)

رده بندی شرایط محیطی	حداقل رده 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	LC25/28
XF 4	LC30/33

دسته بندی شرایط محیطی مختلف و نوع بتن سبک قابل استفاده در آن شرایط به صورت شماتیک در شکل ۲-۹ نشان داده شده است. برای اطلاع از جزئیات نحوه دسته بندی شرایط محیطی می توان به **EN 206-1** رجوع کرد. مقادیر ذکر شده در این شکل بر مبنای عمر بهره برداری ۵۰ ساله و تعمیر و نگه داری متناسب سازه هستند. در صورتی که طول دوره بهره برداری از سازه، کمتر یا بیشتر از ۵۰ سال باشد، یا شرایط تعمیر و نگه داری ویژه ای برای سازه پیش بینی شده باشد، مقادیر توصیه شده در شکل ۲-۹ قابل اصلاح هستند. لازم به ذکر است که مقادیر نشان داده شده در شکل ۲-۹ برای بتن های با وزن مخصوص معمولی است و استاندارد **EN 206-1** تبصره خاصی برای بتن های سبکدانه در این مورد ارائه 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 dry	0,75	240	C16/20
		2 constantly wet	0,75	240	C16/20
		3 moderately moist	0,65	260	C20/25
		4 carbonation wet / dry	0,60	280	C25/30
XD/ XS		1 moderately moist	0,55	300	C30/37
		2 constantly wet	0,50	320	C35/45
		3 chloride wet / dry	0,45	320	C35/45
XF		1 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		
XA		1 weakly corrosive	0,60	280	C25/30
		2 moderately corrosive	0,50	320	C35/45
		3 Chem. Angriff chemical attack strongly corrosive	0,45	320	C35/45
XM		1 moderate wear	0,55	300	C30/37
		2 severe wear	0,45	320	C35/45
		3 Verschleiß wear very severe wear	0,45	320	C35/45

شکل ۲-۹ رده بندی شرایط محیطی و نوع بتن سبک قابل استفاده در آن شرایط

در آیین‌نامه بتن آمریکا **ACI 318** برای بتن‌های 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 ۲-۵ و ۲-۶ نشان داده شده است. همانطور که این جدول‌ها نشان می‌دهند برای بتن با وزن مخصوص معمولی هر دو معیار حداکثر نسبت آب به سیمان و حداقل مقاومت، ملاک قرار گرفته است در حالی که برای بتن سبک معیار مورد استفاده تنها مقاومت فشاری بتن سبک است. دلیل این امر، به این نکته بر می‌گردد که محاسبه دقیق نسبت آب به سیمان و تنظیم آن در بتن سبک به دلیل جذب آب سریع سبکدانه‌ها مشکل است.

جدول ۲-۵ 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 هنگامی که 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 ۲-۶ ملزومات بتن قرار گرفته در معرض محلولهای سولفاتی

در معرض سولفات	یون سولفات قابل حل در خاک (درصد نسبت به وزن)	سولفات ($S04$) موجود در آب (ppm)	نوع سیمان مصرفی	حداکثر نسبت آب به مواد سیمانی برای بتن معمولی (درصد بر حسب وزن)	حداقل f'_c برای بتن سبک و بتن معمولی (MPa)
ناچیز	$0.00 \leq S04 < 0.10$	$0 \leq S04 < 150$	-	-	-
متوسط ^۱	$0.10 \leq S04 < 0.20$	$150 \leq S04 < 1500$	II, IP(MS), IS(MS), P(MS), I(PM)(MS), I(SM)(MS)	۰/۵	۲۸
شدید	$0.20 \leq S04 \leq 2.00$	$1500 \leq S04 < 10,000$	V	۰/۴۵	۳۰
بسیار شدید	$2.00 < S04$	$10,000 < S04$	V به علاوه پوزولان ^۲	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 جایی که بتن حاوی سیمان نوع V است.

فصل سوم - مشخصات مصالح سبکدانه

۳-۱ 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. این بدان معنی است که همه سبکدانه‌های ذکر شده در **EN13055-1** برای استفاده در بتن‌های سازه‌ای مناسب نیستند. تجربیات در این زمینه برای سبکدانه‌هایی با وزن مخصوص بیش از 250 kg/m^3 (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 استاندارد **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 می‌گردد.

۳-۲ دانه‌بندی

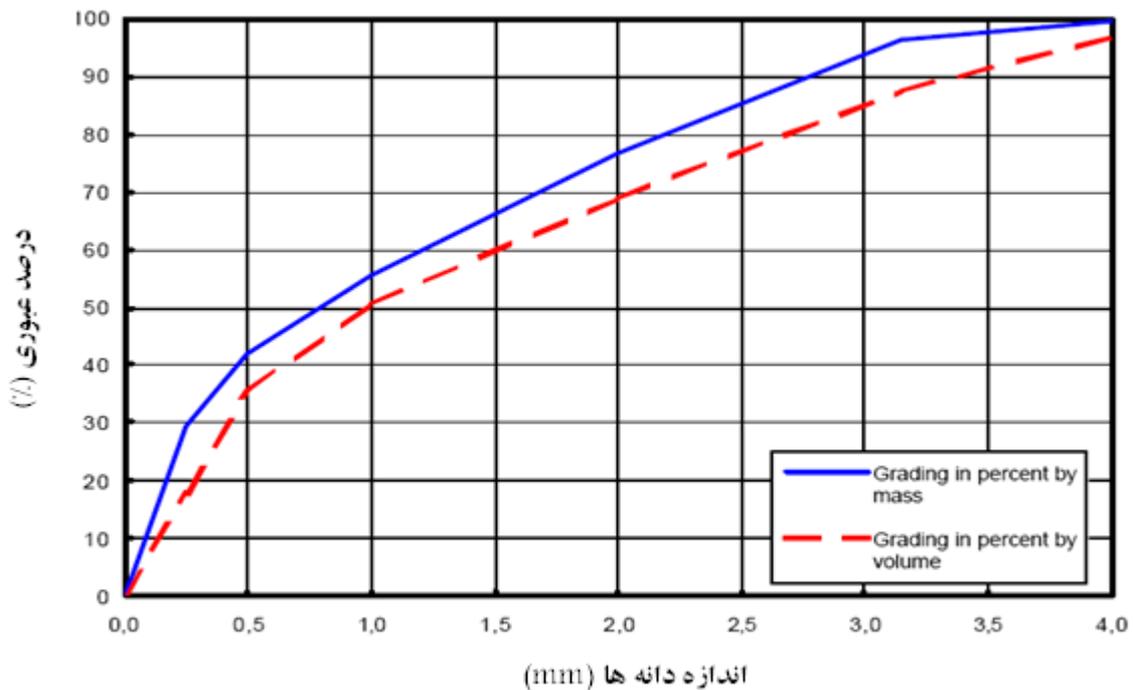
دانه‌بندی طبق **EN 933-1** به وسیله الک کردن دانه‌های خشک و بر اساس محدوده‌های مشخص شده برای درصد سنگدانه‌های شکسته تعیین می‌شود. در این آیین‌نامه محدودیت خاصی برای حدود مجاز دانه‌بندی ذکر نشده است؛ اما تصریح شده است که حداکثر مقدار سنگدانه‌های بزرگ تر از اندازه اسمی ۱۵ درصد کل اندازه سنگدانه‌ها و حداکثر مقدار سنگدانه‌های کوچک تر از ریزترین اندازه اسمی ۱۰ درصد کل سنگدانه‌هاست. در استاندارد **ASTM C330** نیز الزاماتی برای دانه‌بندی سبکدانه‌ها ذکر شده که باید مطابق جدول ۳-۱ 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 باشد، 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 می شود. به این ترتیب، جرم کمی از سبکدانه‌های با وزن مخصوص کم نسبت حجمی بیشتری در کل سنگدانه‌ها خواهد داشت.

جدول ۳ - ۱ - الزامات مربوط به دانه‌بندی سنگدانه‌های سبک در بتن‌های سازه‌ای

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

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 میلی متری، 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 ۳-۱ دو منحنی دانه‌بندی متفاوت را برای ریزدانه رس منبسط شده نشان می‌دهد. یکی از آن‌ها بر پایه جرمی است که به وسیله الک کردن به دست آمده و دیگری نشان‌دهنده دانه‌بندی بر اساس روش حجمی برای همان مصالح است. تفاوت بین دو نمودار قابل توجه است.



شکل ۳-۱- مقایسه دانه‌بندی ماسه سبک‌دانه بر اساس روش‌های حجمی و جرمی

۳-۳ وزن مخصوص توده‌ای غیر متراکم

در استاندارد **EN 13055-1** حداکثر وزن مخصوص توده ای غیر متراکم سبک‌دانه ها 1200 kg/m^3 ذکر شده است. بر اساس این استاندارد وزن مخصوص توده ای غیر متراکم سبک‌دانه های تحویل داده شده برای ساخت بتن نباید بیش از ۱۵ درصد وزنی یا حداکثر 1000 kg/m^3 با مقادیر وزن مخصوص توده ای اسمی سبک‌دانه ها تفاوت داشته باشد. وزن مخصوص توده ای غیر متراکم سبک‌دانه ها بر اساس **ASTM C330**، باید الزامات ذکر شده در جدول ۳-۲ را دارا باشد.

جدول ۳-۲ - وزن مخصوص غیر متراکم سنگدانه‌های سبک در بتن‌های سازه‌ای

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

بر اساس آیین نامه **ASTM C330** وزن مخصوص توده‌ای غیرمتراکم 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 ۳-۲ بیشتر باشد.

۴-۳ چگالی دانه‌ای

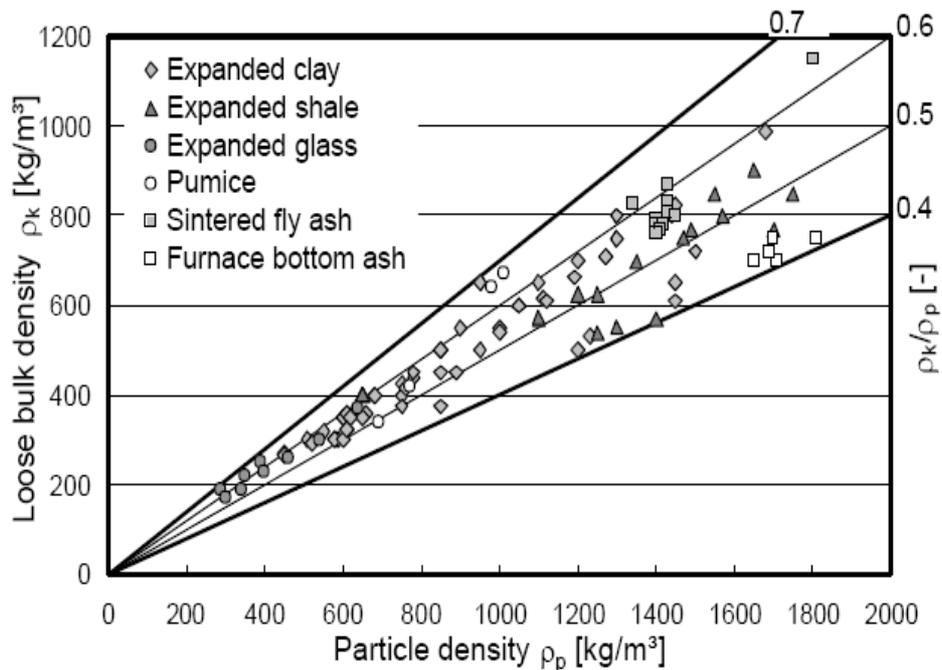
چگالی دانه‌های با قطر بیش از ۴ میلی متر با استفاده از **EN 1097-6** تعیین و چگالی دانه‌های با قطر کمتر از ۴ میلی متر توسط **DIN 4226-2:99** مشخص می‌شود. در استاندارد **EN 13055-1** حداکثر چگالی دانه‌ای مجاز سبکدانه‌ها 2000 kg/m^3 ذکر شده است. حداکثر میزان تفاوت چگالی دانه‌ای نمونه‌های تحویل داده شده با مقادیر اعلام شده توسط تولید کننده سبکدانه ۱۵ درصد یا 150 kg/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 **N 13055-1** یعنی ۱۵ درصد چگالی یا 150 kg/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 مترمکعب بیش از چگالی اسمی و حداکثر ۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب کم تر از چگالی اسمی هستند، برآورده نمی‌کند. به جای استفاده از محدوده‌های ثابت ذکر شده در استاندارد **EN** محدوده‌هایی مطابق جدول ۳-۳ پیشنهاد می‌شود. مطابق این جدول سه رده رواداری برای محدوده مجاز چگالی سبکدانه‌ها پیشنهاد می‌شود که محدوده قابل قبول برای تغییر چگالی دانه‌ای سبکدانه‌ها به ترتیب برابر ± 50 ، ± 100 و ± 150 کیلوگرم بر مترمکعب است. به این ترتیب تهیه کننده سبکدانه‌ها علاوه بر درج وزن مخصوص دانه‌ای سبکدانه‌ها بر روی بسته‌های سبکدانه مؤظف به درج محدوده رواداری تغییرات وزن مخصوص دانه‌ای سبکدانه‌ها مطابق جدول ۳-۳ است.

جدول ۳-۳ - تقسیم بندی‌های پیشنهاد شده برای چگالی توده‌ای غیرمتراکم

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

در استاندارد **ASTM** در مورد چگالی دانه‌ای سبکدانه‌ها 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 0.4 تا 0.7 متغیر است (شکل ۳-۲).



شکل ۳-۲ - ارتباط بین چگالی توده‌ای غیرمتراکم و چگالی دانه‌ای برای سبکدانه‌های مختلف

۳-۵ یکنواختی مقاومت دانه‌ها

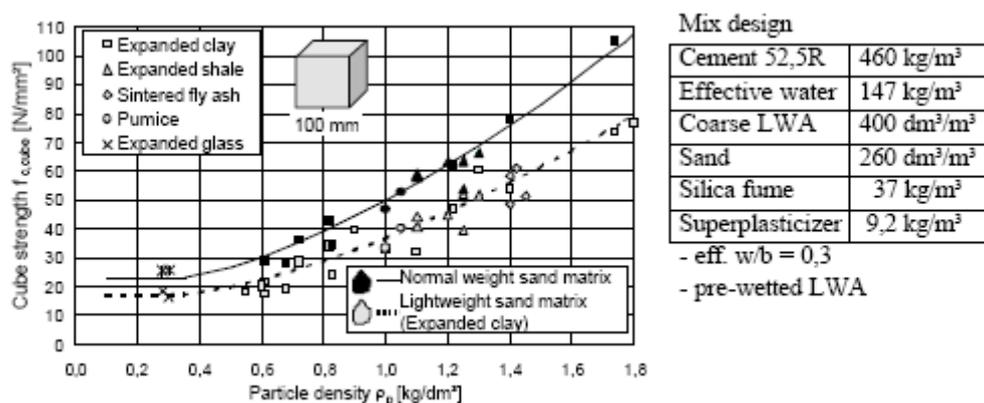
هیچ روشی برای اندازه‌گیری مستقیم مقاومت دانه‌ها وجود ندارد و به جای آن مقاومت در برابر خردشدگی به عنوان معیاری برای سنجش مقاومت دانه‌ها استفاده می‌شود. مقاومت در برابر خردشدگی سبکدانه‌های با کوچکترین اندازه اسمی ۴ میلی متر بر اساس **EN 13055-1** تعیین می‌شود. روش انجام این آزمایش در پیوست (الف) این گزارش 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 لزوماً پیش بینی عمومی قابل اعتمادی از مقاومت سبکدانه‌های آزمایش شده بتن را به دست نمی‌دهد. برای مصالح استفاده شده در آزمایش مقاومت در برابر خردشدگی بر اساس **EN-13055-1** پیش از انجام آزمایش، به ویریه کردن مصالح نیاز است و در صورتی که آزمایش بر اساس **DIN 4226-2:83** انجام شود. به ویریه کردن مصالح احتیاجی نخواهد بود. مقاومت خردشدگی اندازه‌گیری شده بر اساس **EN 13055** از مقادیر اندازه‌گیری شده بدون ویریه 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 پایه گذاری کرد، اما این شرایط تنها در آزمایشگاه قابل ایجاد است؛ به همین دلیل تا زمانی که رابطه‌ای بین این دو پایه گذاری نشده است نمی‌توان مقاومت خردشدگی را به عنوان مقاومت فشاری بتن در نظر گرفت. با وجود اینکه آزمایش مقاومت

خردشدگی معمولاً برای سنگدانه‌های سبک بین ۴ تا ۲۲ میلی متر قابل استفاده است اما برای سنگدانه‌های شکسته نشده ریزتر از ۴ میلی متر 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 تیپ ۱، 42.5 MPa ، 440 lit/m^3 درشت‌دانه سبک، نسبت مؤثر آب به سیمان ۰/۵ و ماسه طبیعی. این طرح اختلاط، برای ارزیابی مقاومت سبکدانه‌هایی با وزن مخصوص 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 تأثیر مقاومت سبکدانه‌ها نخواهد بود و مقاومت بتن به مقاومت ملات آن محدود می‌شود.

آزمایشی مشابه با ماتریسی قوی تر 460 kg/m^3 سیمان تیپ یک با مقاومت اسمی 52.5 MPa ، 37 kg/m^3 دوده سیلیس، 400 lit/m^3 سنگدانه سبک پیش‌خیس، 260 lit/m^3 ماسه یا ماسه طبیعی، آب مؤثر 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 ۳-۳)



شکل ۳-۳- مقاومت پتانسیل برای سبکدانه‌های مختلف با استفاده از دو ماتریس مختلف

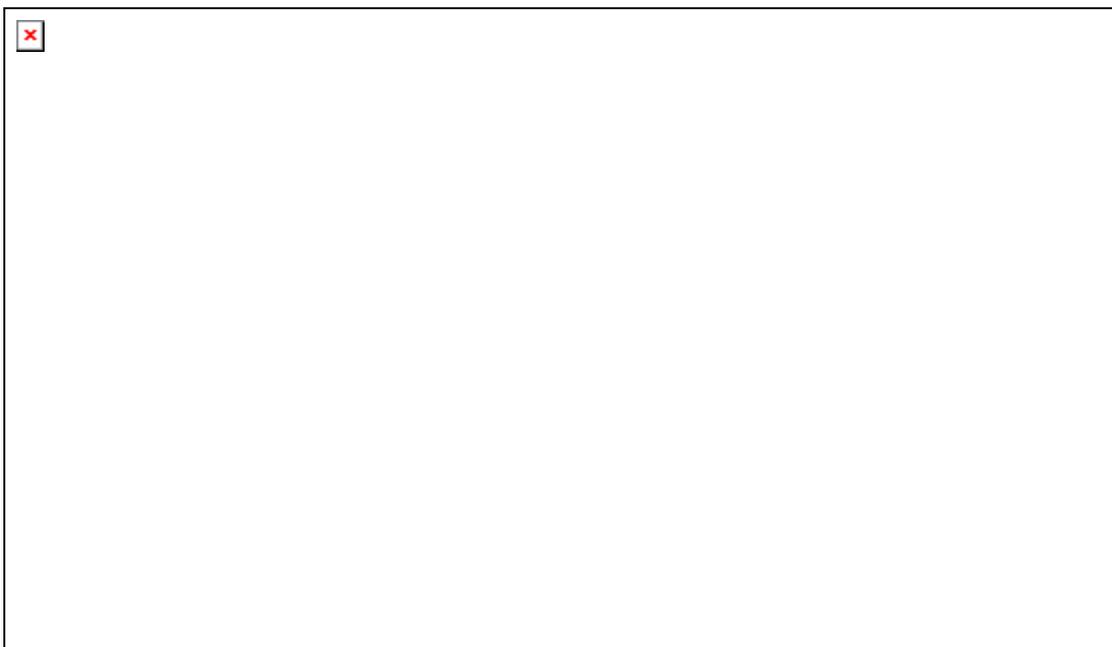
۳-۶ جذب آب

آزمایش جذب آب که در **EN 1097-6** شرح داده شده است برای سنگدانه‌های سبک در محدوده ۴ تا ۳۱/۵ میلی متر و همچنین برای سنگدانه‌های سبک خرد نشده با اندازه کمتر از ۴ میلی متر 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 میلی متر قابل استفاده می‌باشد .

مقدار جذب آب سنگدانه‌های سبک باید به وسیله تولیدکننده سنگدانه‌ها درج شود . آزمایش شرح داده شده در **EN 1097-6** ، ۵ دقیقه جذب آب را برای سنگدانه‌های خشک شده در دستگاه آون پیش از انجام آزمایش اجازه می‌دهد . این عمل باعث به‌دست آمدن نتایج غیرقابل 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 ۳-۴ نشان داده شده است .

مقادیر به‌دست آمده برای جذب آب ماسه‌های سبکدانه شکسته از مقادیر معمول برای درشت‌دانه‌های سبک بیشتر است . این مقادیر معمولاً بین ۲۰ تا ۴۵ درصد وزنی است که مقدار آب موجود در بتن را تقریباً 100 l/m^3 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 ۳ - ۴ - مقایسه جذب آب برای انواع درشت‌دانه‌های سبک

در جدول ۳-۴ مقادیر جذب آب ۱۵ دقیقه ای تا ۷ روزه برخی از سبکدانه های متداول مورد استفاده در ساخت بتن سبک ذکر شده است .

جدول ۳-۴ - جذب آب ۱۵ دقیقه تا ۷ روزه برخی از سبکدانه های متداول در ساخت بتن سبک

مصالح	اندازه دانه (میلی متر)	جذب آب (%)				
		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	***	***	***	***	***
بومیس	۸-۴	***	***	***	***	***
	۱۲-۸	۳۶/۳	۳۶/۳	۶۶/۰	***	۱۹۰/۰
	۱۶-۱۲	۳۹/۰	۳۹/۰	***	***	۷۶/۱

۳-۷ مقاومت در برابر چرخه ذوب و یخ

در بتن های سبکدانه که در معرض چرخه ذوب و یخ هستند (رده شرایط محیطی **XF1-XF4** مطابق شرایط تعریف شده در **EN 206-1**) باید از سبکدانه های مقاوم در برابر ذوب و یخ استفاده شود . مقاومت در برابر ذوب- یخ سبکدانه ها با انجام آزمایش روی بتن و با توجه به سبکدانه استفاده شده در آن ثبت می شود . روش آزمایش و ضوابط پذیرش باید در محل استفاده از سبکدانه ها 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 سبکدانه‌ها در برابر ذوب و یخ ، بتن سبک ساخته شده با سبکدانه‌ها تحت شرایط ذوب و یخ بررسی می‌گردد . 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 و یخ ، تولید کننده سبکدانه‌ها باید با انجام آزمایش روی بتن ساخته شده از سبکدانه‌ها ، مقاوم بودن در برابر ذوب و یخ را نشان دهد .

مقاومت در برابر یخ زدن برای سنگدانه‌های با وزن معمولی ، معمولاً 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 در ادامه آورده شده است .

روش ذکر شده در **EN** شامل ۱۰ چرخه ذوب و یخ در محدوده دمای ۱۷/۵- تا ۲۰ درجه سانتی گراد در آب/ یخ است . حد آن بسته به این که 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 (پس از غوطه ور کردن سنگدانه‌ها در آب به مدت ۲۴ ساعت) در دمای بین ۱۵- تا ۲۰ درجه سانتی گراد می باشد . 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 روش‌ها برای انجام این آزمایش هستند.

۳-۸ دانه‌های شکسته در سبکدانه‌ها

در هیچ یک از دو استاندارد **ASTM** و **EN** پیش‌بینی‌ای در مورد دانه‌های شکسته در سبکدانه‌ها صورت نگرفته است. اگر سبکدانه‌های تحویل گرفته شده شامل دانه‌های شکسته و غیرشکسته بود، مقدار دانه‌های شکسته باید ذکر شود. اقدامات لازم، با توجه 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 سبکدانه‌ها را به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهد.

۳-۹ ریزدانه‌ها در سبکدانه

مقدار ریزدانه در سبکدانه‌های 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 تأثیر قرار می‌دهد. برخلاف سبکدانه‌های معمولی، بیشتر ریزدانه‌های سبک دارای دانه‌های شکسته هستند. وقوع واکنش‌های پوزولانی برای برخی از این ریزدانه‌ها به اثبات رسیده است. مشخص کردن تأثیر تغییر مقدار ریزدانه‌های سبک بر جذب آب بتن سبکدانه به ندرت قابل انجام است. برای جلوگیری از خرد شدن سبکدانه‌های ریز مورد نیاز در حین حمل و نقل و استفاده آن‌ها، دقت بیشتری لازم است.

۳-۱۰ ترکیبات تشکیل دهنده سبکدانه

در سبکدانه‌ها نباید موادی وجود داشته باشد که با توجه به زمینه استفاده آن‌ها بر این مصالح تأثیرات منفی به جای بگذارد. در ادامه برخی از مواد مضر که ممکن است در سبکدانه‌ها وجود داشته باشد بررسی می‌گردد. **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 تأثیر 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 تأثیرات 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 تأثیری 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 سبکدانه‌ها به دلیل وجود موادی است که دارای مقادیر **Fe203** بیش از ۱/۵ میلی گرم در نمونه ۲۰۰ گرمی است، سبکدانه‌ها رد می‌شوند.

۳-۱۱ 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

۳-۱۲ جمع شدگی

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

فصل چهارم - ساخت بتن سبک

۴-۱ مقدمه

پیمان‌گیری، اختلاط، حمل و نقل و عملیات ساخت بتن سبکدانه، شبیه به فرآیندهای متناظر در بتن معمولی است، هرچند که تفاوت‌های خاصی نیز وجود دارد، خصوصاً در نحوه نسبت‌بندی و روش‌های پیمان‌گیری که منجر به بدست آوردن محصول نهایی با کیفیت مناسب خواهد شد. وزن و ویژگی‌های جذب‌کنندگی 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 پیمان‌گیری و توزین مصالح بتن سبک تا حدی متفاوت با توزین مصالح بتن معمولی است. اصول پایه روش‌های پیمان‌گیری بتن سبکدانه که در این بخش بیان می‌شود، بر مبنای دستورالعمل‌های ذکر شده در استانداردها و راهنماهای موجود مانند **ASTM**، **EN** و نظایر آن می‌باشد. روش‌های متداول دیگری امروزه در نقاط مختلف به کار می‌روند که ممکن است مورد استفاده قرار گیرند. شکل ۴-۱ نمونه‌ای از دستگاه کنترل پیمان‌گیری کامپیوتری را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱ - نمونه‌ای از کارگاه پیمان‌گیری و ساخت بتن

کنترل کیفیت بتن سبکدانه مستلزم تأکید ویژه و توجه به اندازه‌گیری مصالح و روش‌های پیمان‌گیری به همراه کنترل مقدار آب اختلاط و جذب آب مصالح ریزدانه است. در ادامه به منظور آشنایی بیشتر با فاکتورهایی که بر پیمان‌گیری مؤثر است، به صورت اجمالی به تعریف این پارامترها پرداخته می‌شود. آب آزاد و جذب شده، حجم‌های 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.

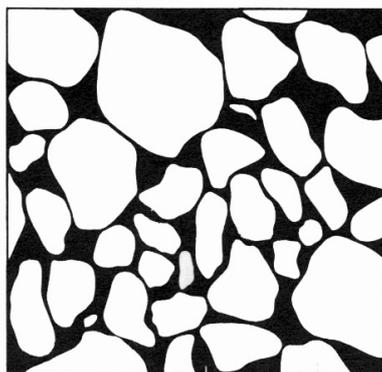
۴-۲ آب آزاد و آب جذب شده

یکی از نکات مهم در پیمانه‌گیری مخلوط بتن سبک، داشتن شناخت درست از آب به کار 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 بر روی 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 پایداری بتن سخت شده تأثیر گذار است. باید توجه داشت که تعیین دقیق میزان آب جذب شده در بتن تازه مشکل است، زیرا نتایج به‌دست آمده از آزمایش جذب آب به وسیله مستغرق کردن سنگدانه‌ها در آب خالص اندازه‌گیری می‌شود، در حالی که 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 مؤثر 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.

۴-۳ حجم ظاهری^۶

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 می‌باشد. در هنگام توزین و پیمانه‌گیری بتن در روش حجمی، از حجم ظاهری مصالح استفاده می‌شود. به دلیل آن که تراکم ذرات بر حجم ظاهری مصالح تأثیر گذار است، حجم ظاهری

در دو حالت متراکم نشده و متراکم شده ، اندازه گیری می شود . شکل ۴-۲ حجم ظاهری سنگدانه‌هایی با جرم معین را نشان می دهد . به عبارت دیگر حجم ظاهری ، مجموع حجم سنگدانه و حجم حفرات هوای میان آن‌ها است . حجم ظاهری معمولاً برای پیمانگی حجمی سنگدانه‌ها استفاده می شود . هر قدر سنگدانه‌ها متراکم تر گردند ، حجم ظاهری جرم معینی از آن‌ها کاهش می یابد . در صورتی که هدف اندازه گیری ، حجم خالص سنگدانه‌ها باشد ، از پارامتر حجم مطلق استفاده می شود .



شکل ۴-۲- حجم ظاهری سنگدانه‌ها در یک حجم مشخص

۴-۴ حجم مطلق^۷

حجم اشغال شده توسط سنگدانه‌ها بدون در نظر گرفتن فضای خالی بین آن‌ها ، حجم مطلق نام دارد . برای مثال در شکل ۴-۲ مساحت ناحیه سفیدرنگ ، حجم مطلق سبکدانه‌ها را نشان می دهد . در بتن سبک از مصالح سبک به جای مصالح با وزن مخصوص معمولی به منظور دستیابی به وزن مطلوب در هنگام سخت شدن بتن استفاده می شود . 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 می گیرد ، درحالی که حجم ظاهری در هنگام توزین مصالح و ساخت بتن به کار می رود . 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 رابطه زیر محاسبه می شود :

وزن مصالح متراکم نشده در یک متر مکعب (Kg)

$$\text{حجم مطلق} = \frac{\text{وزن مخصوص دانه ای مصالح} \times 1000}{\text{وزن مصالح متراکم نشده در یک متر مکعب (Kg)}}$$

تعیین حجم مطلق عناصر تشکیل دهنده 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 .

۴-۵ وزن مخصوص دانه‌ای^۸

اگر حجم مواد جامد به نحوی در نظر گرفته شود که شامل منافذ غیر قابل نفوذ ، به جز لوله‌های موئینه نیز گردد ، وزن مخصوص به دست 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 .

۴-۶ وزن مخصوص توده‌ای^۹

وزن مخصوص توده‌ای ، وزن یک مترمکعب مصالح متراکم شده یا غیر متراکم ، تقسیم بر وزن یک مترمکعب 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 تشکیل دهنده 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 .

۴-۷ عوامل مؤثر بر تغییرات وزن مخصوص سبکدانه

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

وزن مخصوص مصالح سبکدانه وابسته به مواد خام بکار رفته و اندازه سنگدانه است. ذرات کوچک تر معمولاً وزن مخصوص بیشتری نسبت به ذرات بزرگ تر دارند. وزن مخصوص نیز به واسطه تغییرات در میزان جذب و یا درصد رطوبت مختلف است. اگر مصالح سبکدانه بدون در نظر گرفتن تغییرات وزن مخصوص و متعاقباً تغییرات حجم، مورد پیمانگی قرار گیرند، ممکن است مشکلاتی در محاسبات حجم بتن تولید شده ایجاد شود. برای جلوگیری از بروز چنین مشکلاتی، تنظیمات مختلفی برای نسبت بندی استاندارد بتن سبک وزن در **ACI 211.2** پیشنهاد شده است. برای حصول اطمینان از این که محصول بتن به دست آمده، دارای حجم یا کیفیت مورد نظر باشد. این تنظیمات شامل تنظیم اندازه وزن های پیمانگی مصالح سبک وزن (درشت دانه و یا ریز دانه) است.

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

اگر تغییراتی در منبع مواد خام، وسایل متراکم کردن یا غربال گری و یا در روش های تولید صورت گیرد، محصول به دست 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 می توان از آن کارخانه به دست آورد.

برخلاف وزن مخصوص توده ای که با تغییرات سبکدانه و میزان تراکم آن تغییر می کند، وزن مخصوص دانه ای مصالح ثابت است. بنابراین حجم مطلق یا حجم جا به جا شده در بتن برای یک مصالح سبک با وزن معین حتی اگر میزان تراکم شدن آن تغییر کند، یکسان خواهد بود. البته وزن مخصوص دانه ای با تغییر رطوبت سنگدانه تغییر می کند. هر چه رطوبت سنگدانه ها بیشتر باشد، وزن مخصوص دانه ای آن هم بیشتر خواهد بود. استفاده درست از این اصول اولیه، پیمانگی، تولید بتن و تحویل بتن سبک با اسلامپ مورد نظر و برای هر نوع کاربری را ممکن می سازد. در ادامه به ارائه روشی برای پیمانگی سبکدانه اشاره می شود.

۴-۸ پیمانگی درشت دانه

در پیمانگی بتن های سبکدانه به روش وزنی، به دلیل متغیر بودن وزن مخصوص سنگدانه ها، برای دستیابی به حجم مطلوبی از بتن، باید وزن مخصوص سبکدانه ها به طور پیوسته اندازه گیری شود و در صورت تغییر وزن مخصوص سبکدانه ها، وزن پیمانگی باید به نحوی تنظیم شود که حجم کل سبکدانه در پیمانگی ثابت بماند. در

یک واحد تولید بتن پرکار، این عمل بسیار وقت گیر خواهد بود. روشی که در ادامه ارائه می شود، جایگزینی بهتر و سریع تر برای این روش خواهد بود. با این وجود نتایج به دست آمده از هر دو روش موفقیت آمیز بوده است.

در این روش تنظیمات حجم برای هر پیمانانه به طور خودکار انجام می شود. هم چنین از ظرف بزرگتری برای سنجش وزن مخصوص استفاده می کنیم که به قیف توزین معروف است. اساس روش به این صورت است که سبکدانه ها را در قیف توزین ریخته و با محاسبه وزن مخصوص غیرمتراکم چند نمونه و داشتن وزن مصالح درون قیف، حجم قیف را حساب می کنیم (v_1). حال در صورتی که حجم v_1 از سبکدانه ها را برای ساخت بتن احتیاج داشته باشیم، قیف را پر کرده و وزن می کنیم (m_1). با تقسیم این عدد بر حجم قیف که برابر حجم سبکدانه هاست، (v_0) وزن مخصوص غیرمتراکم مصالح درون آن تعیین می شود (m_1/v_0). برای تکمیل پیمانانه گیری به حجمی برابر $v_1 - v_0$ از سبکدانه ها احتیاج داریم که با ضرب کردن این حجم در وزن مخصوص غیرمتراکم که در مرحله قبل محاسبه شد، وزن آن حساب می شود. بدین ترتیب وزن مورد نیاز برای تکمیل پیمانانه گیری به دست می آید.

با استفاده از این روش بر مبنای وزن سبکدانه ای که در مرتبه اول در قیف توزین داریم، می توان جدولی تهیه کرد که ستون های آن به ترتیب، وزن اولین قیف پر، وزن مخصوص غیر متراکم، وزن دومین قیف و وزن کل سنگدانه هاست. به این ترتیب برای پیمانانه گیری حجم مشخص v_1 از سنگدانه، پس از پر کردن قیف و وزن کردن آن به ردیفی از جدول مراجعه می کنیم که عدد ستون اول آن نزدیک به وزن قیف پر می باشد. به این ترتیب وزن های مورد نیاز برای پیمانانه گیری مشخص می شود. برای سایر نسبت های اختلاط نیز، در صورت تغییر نکردن نوع سبکدانه ها یا دانه بندی آن ها، می توان چنین جدولی را تشکیل داد، زیرا با تغییر نوع سبکدانه یا دانه بندی آن، حجم ظرف پیمانانه گیری تغییر می کند. علت تغییر حجم ظرف پیمانانه گیری این است که مصالح متفاوت با شیب سطحی مختلفی در ظرف به حالت پایداری می رسند. به همین علت در صورت تعویض سبکدانه ها باید انتظار داشته باشیم که v_0 تغییر کند.

اگر بار بتنی کم تر از ظرفیت اسمی میکسر باشد، برای محاسبه وزن سبکدانه ها در این مخلوط می توان از وزن مخصوص ظاهری سبکدانه های پیمانانه 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 می کنیم. مشخصات لازم برای بتنی سبک به همراه ویژگی های درشت دانه و ریزدانه آن به صورت زیر است:

مشخصات بتن: مقاومت ۲۸ روزه 20 MPa ، اسلامپ $75-100 \text{ mm}$ ، هوای وارد شده $1 \pm 6\%$ درصد، وزن خشک

شده در هوا حداکثر 1600 kg/m^3 ، وزن مرطوب حداکثر 1680 kg/m^3 ، بزرگترین اندازه سنگدانه 19 mm

درشت‌دانه سبک : دانه‌بندی بر اساس **ASTM C330** ، خشک شده در دستگاه آون (OD) ، وزن مخصوص غیر متراکم 730 kg/m^3 ، ضریب وزن مخصوص (خشک) $1/40$ ، جذب آب $12/6$ درصد .

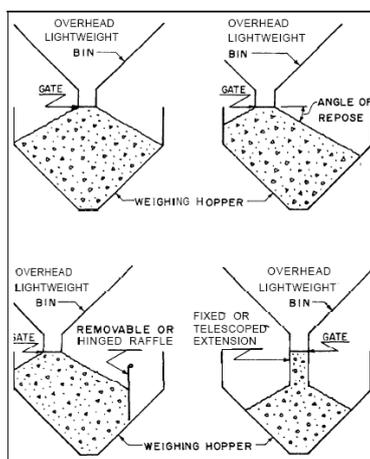
ریزدانه : دانه‌بندی مطابق **ASTM C 330** ، خشک شده در دستگاه آون (OD) ، وزن مخصوص غیر متراکم 956 kg/m^3 ، ضریب وزن مخصوص (خشک) $1/74$ ، جذب آب $13/4$ درصد .

طرح این مخلوط با استفاده از روش وزنی ذکر شده در **ACI211-2** تهیه شده و در جدول ۴-۱ نشان داده شده است . برای ساخت این بتن از میکسری با حجم 5 m^3 استفاده می‌شود .

جدول ۴-۱- نسبت‌های اختلاط آزمایشگاهی

مقدار برای هر متر مکعب (وزن مخصوص بتن تازه = 1674 kg/m^3 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
درشت‌دانه سبک (خشک)	۴۵۹	۰/۶۳۰	۰/۳۲۸
ریزدانه 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 ۴-۳ اصلاح می‌شوند .



شکل ۴-۳- 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 غیرمتراکم تعیین می‌گردد. اگر وزن خالص قیف پر kg ۲۱۱۰ و متوسط وزن مخصوص مصالح درون آن kg ۷۷۲ باشد، حجم قیف پر به صورت زیر محاسبه می‌شود: $v_0 = 2110 \div 772 = 2/73$

برای اطمینان، این عمل را چند بار تکرار می‌کنیم.

با فرض اینکه هر میکسر گنجایش m^3 ۵ از مخلوط بتن را دارا باشد، حجم کل درشت‌دانه سبک مورد نیاز در طرح اختلاط مورد بررسی $3/15 = 5 \times 0/63$ خواهد بود. با توجه به اینکه حجم قیف m^3 ۲/۷۳ است، برای پیمانہ‌گیری کل سبکدانه به دو مرتبه وزن‌کشی نیازمندیم. حجم مورد نیاز برای پیمانہ‌گیری در مرحله دوم برابر $3/15 - 2/73 = 0/42$ خواهد بود. با توجه به موجود بودن وزن مخصوص غیرمتراکم که در مرحله اول محاسبه شد، وزن مورد نیاز در مرحله دوم توزین kg $0/42 \times 772 = 324$ خواهد بود. برای سادگی کار می‌توان جدولی مانند جدول ۲-۴ تشکیل داد و با استفاده از آن، با معلوم بودن وزن اولیه قیف پر و با داشتن حجم آن، وزن مخصوص مصالح محاسبه شده با تفریق حجم کل سنگدانه‌های مورد نیاز از حجم مصالح درون قیف، حجم مورد نیاز برای توزین پیمانہ دوم به دست می‌آید. از حاصل ضرب این حجم در وزن مخصوصی که در مرحله قبل محاسبه شد، وزن پیمانہ دوم حساب می‌شود. یعنی می‌توان با پیدا کردن وزن اولین قیف پر روی جدول، وزن مورد نیاز برای پیمانہ دوم را مشخص کرد. همچنین می‌توان مانند جدول ۲-۴، ستون آخر جدول را در صورت نیاز به ثبت وزن کل درشت‌دانه‌های سبک در برگه تحویل اختصاص داد.

جدول ۴-۲- جدول پیمانانه گیری برای $5m^3$ بتن (حجم قیف پر $m^3 = 2/73$)

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

۴-۹ پیمانانه گیری ریزدانه

پیمانانه گیری ریزدانه های سبک با استفاده از روش قبل امکان پذیر نمی باشد ، زیرا تغییر مقدار آب سطحی باعث متورم شدن سنگدانه ها خواهد شد . به همین دلیل ، ریزدانه های سبک با روشی بسیار مشابه ماسه طبیعی ، با در نظر گرفتن مقدار کل رطوبت ، بر اساس وزن پیمانانه گیری می شوند . مشکل اصلی در توزین سبکدانه های ریز تعیین درصد رطوبت مصالح است. از آنجایی که رطوبت موجود در ریزدانه های سبک ممکن است به صورت آب جذب شده ، آب سطحی یا آب آزاد وجود داشته باشد ، رطوبت سنج های استفاده شده برای ماسه های طبیعی ، نتایج

رضایت بخشی را برای ریزدانه های سبک نمی دهد . نتایج به دست آمده از تعیین درصد رطوبت نمونه های کوچک (حدود ۵۰۰ گرم) خشک شده در دستگاه آون در دمای ۱۰۰ تا ۱۱۰ درجه سانتی گراد ، رضایت بخش بوده است . مقدار کل رطوبت (رطوبت جذب شده به علاوه رطوبت سطحی) از مقایسه وزن نمونه مرطوب با وزن خشک آن به دست می آید . آزمایش اندازه گیری رطوبت باید حداقل یک بار در روز یا در هر زمانی که از مصالح جدیدی با مقدار رطوبت متفاوت استفاده می شود ، انجام شود . به منظور اصلاح مقدار ریزدانه های سبک و استفاده از مقادیر وزن مخصوص خشک شده در دستگاه آون این مصالح ، بر اساس آنچه در بالا نشان داده شد ، تعیین می شود . چنانچه وزن مخصوص خشک به دست آمده ، با آنچه که در نسبت های اختلاط به کار رفته در آزمایشگاه داشتیم ، متفاوت باشد ، (طبق مثال ۹۵۶ کیلوگرم بر مترمکعب) آنگاه وزن مصالح خشک اصلاح شده ، با ضرب کردن حجم غیرتراکم (۰/۵۹ مترمکعب) در وزن مخصوص خشک جدید ، به دست می آید این وزن خشک اندازه گیری شده با احتساب مقدار رطوبتی که قبلاً محاسبه شد ، مقدار واقعی وزن را به دست می دهد .

۴-۱۰ فرآیند اختلاط

فرآیند اختلاط در یک بتن سبکدانه مشابه بتن معمولی است و این بتن در دستگاه مخلوط کن مشابه تولید می شود . یک فرآیند اختلاط دیگر این است که بتن در دو مرحله جداگانه مخلوط شود . براساس تجربیات فراوان سالیان گذشته ، این روش به خصوص برای بتن های سبکدانه سازه ای با وزن مخصوص کم موفقیت آمیز است . در مرحله اول ، ملات که شامل سیمان ، ماسه ، مواد افزودنی و حدود دوسوم آب اختلاط است ، تولید می شود . در مرحله دوم ، درشت دانه ها به همراه باقیمانده آب اضافه شده و آخرین هم زدن ها انجام می شود . بتنی که با استفاده از این روش مخلوط می شود ، دارای خاصیت یکنواختی خوب و عملکردی مناسب است . برخی مواقع ، استفاده از ریزدانه های خشک سبب می شوند که مخلوط ناهمگن شده و به صورت گلوله ای درآید . در صورتی که اگر در ابتدا آب کمتری اضافه شود و سپس بقیه آب به صورت مرحله به مرحله اضافه شود ، می توان از وقوع این پدیده جلوگیری کرد . نرخ جذب آب ریزدانه های سبک به نسبت سریع است . نباید تفاوت چندانی میان مخلوط کردن ریزدانه های سبک و ماسه معمولی وجود داشته باشد . برای برآورد زمان اختلاط می توان منحنی جذب آب مصالح واقعی را بررسی کرد . از این منحنی مشخص است که در عمل ، جذب آب سبکدانه هایی با قطر کم تر از ۸ یا ۱۰ میلی متر پس از چند دقیقه افت پیدا می کند . در صورت لزوم ، آبی که هنگام اختلاط اضافه می شود ، باید شامل آب جذب شده در هنگام حمل و نقل 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 کاهش یافته ، روان کننده 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 وزن مخصوص 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 وزن مخصوص توده‌ای و درصد رطوبت به طور مرتب اندازه‌گیری شود و وزن بتن مورد نظر ، به طور متناوب تنظیم شود .

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

زمان اختلاط بتن سبک نسبت به بتن معمولی تا حدی بیشتر است . به همین دلیل باید اثر بیشتر بودن زمان اختلاط بر روی مقاومت فشاری بتن سبک در نظر گرفته شود . اگر از سنگدانه‌های جاذب آب (غیر اشباع) استفاده می‌شود ، باید توجه شود که جذب آب در طول فرآیند اختلاط و به سبب آن خروج حباب‌های هوا از درون بتن سبک تازه ، هیچ اثرات منفی قابل توجهی بر مقاومت فشاری بتن و پایایی طولانی مدت آن ، نداشته باشد . آزمایش‌های اولیه مقاومت فشاری و وزن مخصوص بر روی نمونه‌ها توصیه می‌شود . بدین ترتیب که ابتدا مقاومت فشاری نمونه‌های 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 **EN12350-1** ، **EN12390-2** 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 فرآیند اختلاط مورد توجه قرارگیرد . باید اطمینان حاصل شود که مقدار قابل توجهی از آب پیش از پیمانگی 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 حمل و نقل جذب شود. این امر باعث می‌شود 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 چرخه اختلاط گنجانده شود تا استحکام و ثبات بتن به خوبی کنترل گردد.

۴-۱۰-۱ 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 مخلوط‌کن در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۴- بارگیری بتن در کامیون مخلوط‌کن

۴-۱۰-۲ مخلوط‌کن‌های ثابت

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

پس از آن که تمامی عناصر در مخلوط کن ریخته شدند ، سرعت مخلوط کردن باید به گونه‌ای باشد که مخلوط همگن تولید شده ، بتواند معیارهای ذکر شده در **ASTM C94** را ارضا کند . هنگامی که از مخلوط کن‌های ثابت برای اهدافی چون اختلاط جزئی استفاده می‌شود ، باید توجه داشت که آن‌ها صرفاً برای جلوگیری از گیرش بتن مورد استفاده قرار می‌گیرند ، زیرا فرآیند اختلاط در تراک میکسرها کامل شده است . تصویری از مخلوط کن‌های ثابت در شکل ۴-۵ نشان داده شده است .



شکل ۴-۵ - نمونه ای از یک مخلوط کن ثابت

۴-۱۰-۳ عملکرد مخلوط کن‌ها

از آنجایی که 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 .

۴-۱۱ حمل و نقل

حمل و نقل بتن سبکدانه تولید کارخانه و بتن سبکدانه آماده ، به محل بتن‌ریزی ، تقریباً مشابه حمل و نقل بتن معمولی است . همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد ، کاهش کارایی بتن از هنگام اختلاط تا بتن‌ریزی ، به دلیل جذب آب دانه‌های متخلخل بیشتر می‌شود . وسایل حمل و نقل ممکن است منجر به جداشدگی دانه‌ها و از دست رفتن همگنی

بتن بشوند . می توان با تغییر اجزای اختلاط ، نگه داشتن بتن در حالت آرام و یا اختلاط متناوب آن برای مثال با استفاده از یک تراک میکسر یا به صورت اساسی تر ، استفاده از دیگر وسایل حمل و نقل ، بر این مشکل فایق آمد . همیشه باید به تأخیرهای احتمالی ، مثلاً به دلیل وجود ترافیک سنگین ، در حمل و نقل بتن تحت شرایط گرم و خشک توجه کرد . در شرایط آب و هوایی سرد، معمول است که دمای بتن تازه در حین اختلاط ، حتی در صورت لزوم حتی تا ۳۰ درجه سانتی گراد نیز افزایش یابد . البته لازم است بر این نکته تأکید شود که وزن مخصوص کمتر بتن سبکدانه ، موجب کاهش گرمای مخصوص بتن سبکدانه نسبت به بتن معمولی و افزایش از دست رفتن دما با گذشت زمان می شود .

امروزه مقادیر زیادی از بتن را می توان به وسیله پمپ کردن از راه خطوط لوله در فواصل طولانی به خصوص به محل هایی که توسط دیگر وسایل به آسانی قابل دسترس نیستند، منتقل کرد . پمپ کردن ، نمونه ای از آخرین مرحله یک نوع سیستم حمل و نقل است و شامل ریختن بتن نیز می شود . فرآیند پمپ کردن در مورد بتن سبکدانه با استفاده از روش های مناسب و اطمینان از این که ترکیبات مخلوط و خواص بتن تازه به نحوی تنظیم شده اند که ملزومات مصالح مورد استفاده را رعایت می کنند ، به راحتی قابل انجام است . پمپ کردن بتن تازه ای که شامل هوای وارد شده زیاد و وزن مخصوص حدود نصف بتن معمولی است ، هنوز با موفقیت همراه نبوده است . در مراحل پیش از ساخت بتن نیز باید در هنگام حمل و نقل سبکدانه ها نهایت دقت به کار بسته شود ، به طوری که سبکدانه ها با کمترین ریسک خردشدگی جا به جا شوند و در مکانی خشک ، انبار و نگه داری شوند . خردشدگی احتمالی سنگدانه ها در هنگام جا به جایی که می تواند باعث ناهمگونی کارپذیری در نقاط مختلف بتن شود ، ممکن است به دلیل تفاوت در اندازه ذرات و یا به خاطر جذب آب اختلاط پیش بینی نشده باشد . جداسدگی قابل توجه نیز ممکن است در درشت دانه های سبکی که دارای محدوده دانه بندی وسیع و غیریکنواخت هستند ، رخ دهد .

۴-۱۱-۱ تراک میکسر ها

تخلیه و بارگیری یک تراک میکسر ، مشابه عملیاتی است که در مخلوط کن های ثابت انجام می شود . گاهی حجم بیشتری از بتن سبک می تواند توسط تراک میکسر ها بدون تجاوز از وزن قانونی و یا محدودیت های باری حمل شود . هر چند طبق **ASTM C94** حجم بتن موجود در مخزن میکسر نباید از میزان ظرفیت اسمی آن و یا ۶۳ درصد حجم آن ، هنگامی که برای ساخت بتن و از ۸۰ درصد حجم آن هنگامی که برای حمل بتن استفاده می شود ، بیشتر باشد . در شکل ۴-۶ عملیات تخلیه بتن از تراک میکسر نشان داده شده است .



شکل ۴-۶ - تخلیه بتن از تراک میکسر

۴-۱۱-۲ حمل و نقل و زمان انتظار

کارهای ساختمانی بر حسب فاصله‌های مختلفی که از محل پیمان‌گیری دارند، نیازمند زمان حمل و نقل بیشتر یا کمتری می‌باشد و بنابراین تأخیر در تخلیه بار امری غیرعادی نیست. این فاکتورها تعیین کل زمانی را که بتن در هر بارگیری در داخل مخزن مخلوط‌کن خواهد بود را مشکل می‌سازد. 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 می‌دهد اما لزوماً باعث توقف آن نمی‌شود.

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 محدوده مقادیر ذکر شده، برای جلوگیری از افت اسلامپ می‌توان آب اضافه کرد.

تراک میکسرها 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 مخلوط‌کن برای سه یا چهار بار به صورت معکوس بچرخد تا از یکنواختی مخلوط اطمینان حاصل شود.

۴-۱۱-۳ تأثیرات دما

دمای تک‌تک عناصر موجود در بتن و دمای به دست آمده از اختلاط آن‌ها، بر میزان نیاز آبی کل اثر می‌گذارد. معمولاً دمای بین ۱۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد، اثر منفی قابل توجهی روی مخلوط بتن نخواهد داشت. در شرایط گرم آب و هوایی، 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 زود هنگام 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.

۴-۱۱-۴ افزودن آب در کارگاه ساختمانی

ممکن است برای جبران آب جذب شده و دستیابی به اسلامپ مورد نظر، 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، مخلوط کن پیش از اینکه تخلیه شود، می‌بایست حداقل ۳۰ چرخش با سرعت اختلاط داشته باشد. البته بهتر آن است که به جای آب از مواد فوق روان‌کننده استفاده شود.

فصل پنجم - اجرای بتن سبک

۵ - ۱ بتن ریزی

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

مخلوطی کاربردی که با حداقل مقدار آب تهیه شده است.

تجهیزاتی که قابلیت جا به جایی 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 مال‌کشی 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 زمینه اجرا و تراکم گردد:

کاهش حجم باعث افزایش ریسک گیرش‌های کنترل نشده می‌شود؛ و

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 وجود آمدن 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 مخلوط کن، 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 ذکر شده خواهد شد.

۵-۲ تراکم

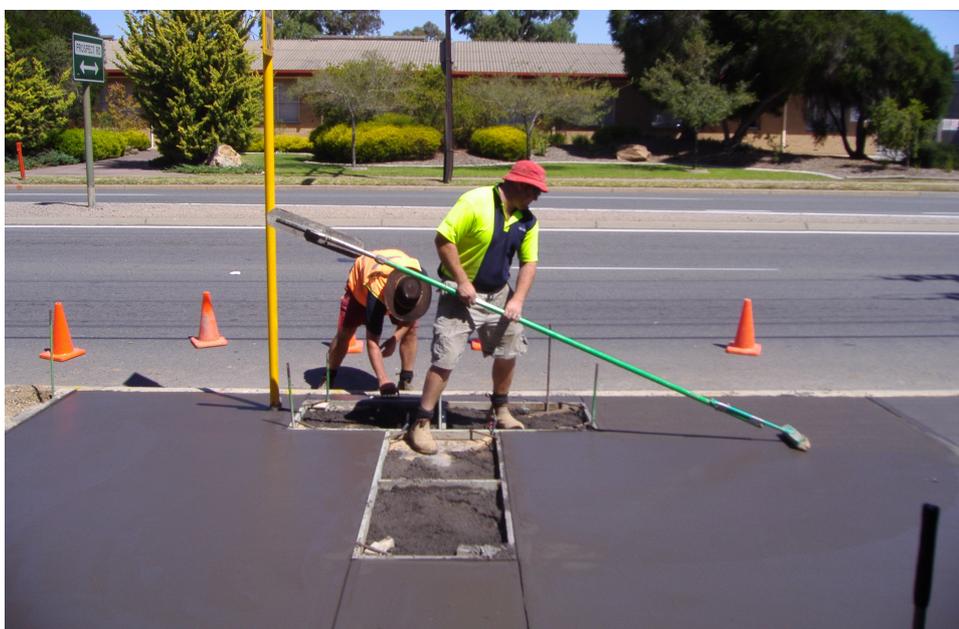
تراکم، فرآیند تحکیمی است که بتن را در میان قالب و اطراف آرماتورها، جای می‌دهد تا توده‌های هوای محبوس شده را خارج نماید. این عمل را می‌توان به روش‌های زیادی انجام داد که اغلب آن‌ها را روش‌های مکانیکی چون لرزاننده داخلی، لرزاننده قلمی و لرزاننده خارجی که به صورت محکم به قالب بسته می‌شود، تشکیل می‌دهند. تراکم قطعات پیش‌ساخته بتنی در کارخانه، اغلب به وسیله میز لرزه انجام می‌پذیرد. مشخصات لرزاندن از فرکانس بسیار کم با دامنه بزرگ تا فرکانس زیاد با دامنه کم تغییر می‌کند. لرزاننده‌های قلمی دارای فرکانس زیاد، حداقل ۲۰۰ هرتز و شتاب زیاد هستند که تابعی از فرکانس و دامنه 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 فاصله بین نقاط تراکم باید به مقدار نسبت وزن مخصوص بتن سبک به وزن مخصوص بتن معمولی، نسبت به فاصله تراکم در بتن معمولی کاهش داده شود. برای نمونه، در صورتی که فاصله بین نقاط تراکم در بتن معمولی با توجه به کارپذیری موجود، در حدود ۷۵ سانتی‌متر مناسب باشد، در بتن سبکدانه با وزن مخصوص $1/8$ کیلوگرم بر مترمکعب و همان میزان کارپذیری، فاصله بین نقاط تراکم باید تا حدود 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 واسطه تبخیر آب و فشار آب ایجاد شده در حفره‌های مویینه بتن را کاهش می‌دهد. آب‌انداختگی کم‌تر، به طور منطقی ترک‌خوردگی‌های اولیه بیشتری را ایجاد می‌کند ولی از سوی دیگر آب جذب شده در سبکدانه‌ها، چنین خطری را کاهش می‌دهد.

تراکم طولانی مدت بتن سبکدانه برخلاف بتن معمولی، موجب تمرکز خمیر یا ملات سیمان در بالای سطح بتن 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، در واقع تفاوت میان وزن مخصوص دانه‌ای و وزن مخصوص 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 اندازه 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 با کیفیتی را پدید آورد.

۵-۳ پرداخت

پرداخت بتن سبک تقریباً مانند بتن معمولی است، با این تفاوت که به دلیل سبک تر بودن درشت دانه‌ها، معمولاً سطح بالایی بتن سبکدانه، دارای سبکدانه بیشتری است. به همین 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 نفوذ ناپذیر، مانند بتن‌های معمولی مشابه، امکان ایجاد حباب‌های هوا در سطح قالب را افزایش می‌دهد. این امر در مورد بتن‌های دارای ریزدانه 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. نمونه‌ای از پرداخت سطوح بتنی در شکل ۵-۱ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱ - پرداخت سطوح بتنی

پرداخت رضایت‌بخش دال‌های بتنی با استفاده از مواد با کیفیت، 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 با وزن مخصوص کم‌تر به سطح می‌شود. اسلامپ بیشتر از ۱۲۵ میلی‌متر، ممکن است باعث روانی بیش از حد بتن تازه شود، به گونه‌ای که امکان شروع عملیات پرداخت را با تأخیرات زیادی رو به رو می‌سازد. آماده‌سازی سطوح پیش از مال‌کشی، 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، اسلامی در حد امکان کم و اجتناب از تراکم بیش از حد بتن
۲. انتخاب زمان مناسب برای اجرای بتن
۳. استفاده از ابزارهای منیزیومی، آلومینیومی و دیگر ابزارهای مناسب برای پرداخت رضایت بخش سطح
۴. انجام تمام عملیات مربوط به پرداخت بتن پس از تبخیر آب ناشی از آب انداختگی بتن
۵. عمل آوری مناسب بتن

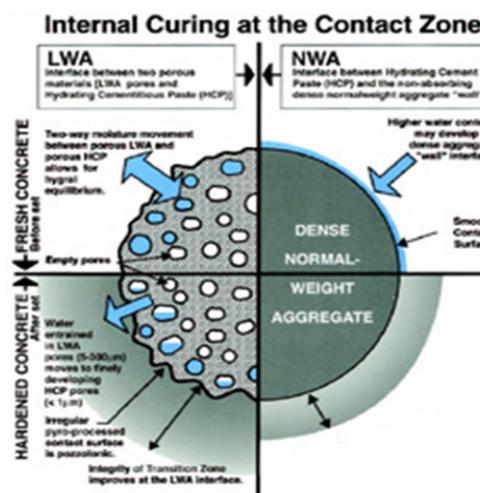
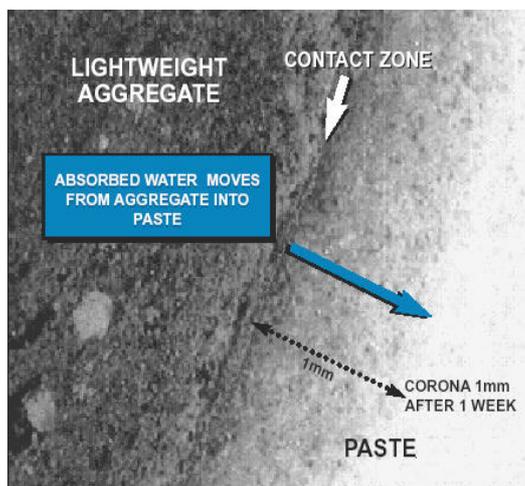
۴-۵ عمل آوری

هدف عمل آوری این است که بتن به نحوی سخت شود که تمام ملزومات مورد نیاز را برآورده کند. شرایط آب و هوایی بیرونی، ترکیبات بتن و مشخصات اجزای تشکیل دهنده آن، بر افزایش مقاومت و دیگر خواص مهم از جمله پایایی تأثیر می‌گذارد. دمای اطراف و شرایط رطوبتی، همچنین مقدار عایق بودن قالب بندی، نقش مهمی در هیدراتاسیون اولیه و سخت شدن بتن ایفا می‌کند. به‌طور معمول، عیار سیمان بیشتر، گرمای ویژه کمتر و ضریب هدایت گرمایی کم تر بتن سبک در مقایسه با بتن معمولی، موجب شتاب بخشیدن به توسعه گرمایی و افزایش دمای بتن می‌شود. درون یک سازه یکپارچه ساخته شده با بتن سبک، دما به دلیل وزن مخصوص 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 روباره کوره آهن‌گدازی دانه‌ای آسیاب شده، پوزولان یا خاکستر بادی جایگزین کرد. به این ترتیب، سرعت فرایند هیدراتاسیون، گرمای حاصل از آن و در نتیجه سرعت آزاد شدن این گرما نیز کاهش می‌یابد. بعد از اتمام عملیات پرداخت، عمل آوری بتن باید هرچه سریع‌تر انجام پذیرد، زیرا کارکرد نهایی بتن کاملاً تحت تأثیر حدود اعمال شده در هنگام عمل آوری می‌باشد. برخلاف روش‌های عمل آوری در گذشته که رطوبت فقط بر سطح بتن اعمال می‌شد، در بتن سبک‌دانه عمل آوری 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 به خاطر هیدراته شدن سیمان کوچک‌تر می‌شود، آب موجود در داخل این حفره‌ها بیشتر به درون خمیر سیمان تزریق می‌شود و در نتیجه دوره عمل آوری طولانی‌تر خواهد شد. عمل آوری داخلی برای بتن‌های توانمند (HPC)، به‌خصوص هنگامی که از مواد تکمیل‌کننده سیمان استفاده می‌شود و نسبت آب به سیمان کمتر از ۰/۴۵ است، بسیار سودمند است.

نمونه‌هایی از اجرای بتن در شکل ۲-۵ و نمونه‌هایی از عمل‌آوری داخلی بتن سبکدانه در شکل ۳-۵ نشان داده شده است.



شکل ۲-۵ تصاویری از اجرای بتن



شکل ۳-۵ عمل‌آوری داخلی بتن سبکدانه

۵-۵ فرآیند پمپ کردن بتن

پمپ کردن بتن تازه کاملاً متداول است. فشار زیاد در هنگام پمپ کردن، آب را به حفره‌های سبکدانه می‌فشرد. این آب می‌تواند وارد خلل و فرج سنگدانه‌ها شده و باعث محبوس شدن هوا داخل سنگدانه‌ها شود که بعد از برداشتن فشار خارجی پمپ، این آب اضافه به دلیل فشار ایجاد شده 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. در نتیجه، پمپ کردن بتن سبک، دارای اثرات منفی، هم روی خواص مکانیکی و هم روی پایداری بتن خواهد بود. با این‌همه، اگر نمونه‌های آزموده شده نشان دهند که خواص بتن سخت شده همچنان مطلوب

است و تحت تأثیر فرآیند پمپ کردن چندان دچار تغییر نمی‌شود ، پمپ کردن بتن سبکدانه مجاز است ، به شرط آنکه مقاومت فشاری بتن پمپ شده بیش از ۱۰ درصد از 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 فرآیند پمپ کردن ، عملکرد خوبی از خود نشان می‌دهند . پمپ کردن به‌طور کلی زمانی قابل قبول است که مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن پمپ شده کم تر از ۹۰ درصد نمونه مشابه پمپ نشده نباشد . اغلب لازم است که مقداری ماده قوام‌آور برای کاهش ورود آب به داخل سبکدانه اضافه شود . سپس با اضافه کردن یک روان‌کننده مناسب ، کارایی بتن دوباره به دست آید . نوع سبکدانه ، ماسه و افزودنی معدنی بر تغییرات خواص رئولوژیک ، تحت فشار زیاد در لوله پمپ تأثیر می‌گذارد . افزودنی‌های معدنی برای مثال دوباره کوره آهنگدازی یا خاکستر بادی به عنوان افزودنی‌های ریزدانه ، بر کارپذیری و قیمت آن تأثیر می‌گذارد . به این دلیل وقتی که از ریزدانه سبک استفاده می‌شود ، استفاده کردن از ماده قوام‌آور لازم نیست . پس از ارایه طرح اختلاط ، ساخت مخلوط‌های آزمایشی برای اطمینان از عملکرد مناسب بتن توصیه می‌شود .

۵ - ۱ - ملاحظات کلی در فرآیند پمپ کردن بتن سبکدانه

تا وقتی که سبکدانه‌ها کاملاً پیش‌خیس نشده‌اند ، ممکن است آب اختلاط را جذب کنند و در نتیجه مشکلاتی در فرآیند پمپ کردن بتن ایجاد شود . بنابراین لازم است که سنگدانه‌ها قبل از پیمانگی 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 . تولیدکننده سبکدانه‌ها می‌تواند اطلاعات مورد نظر را در اختیار سازنده بتن قرار دهد . پیش‌خیس کردن یکنواخت سبکدانه‌ها از روش‌های متعددی می‌تواند انجام گیرد که شامل آب‌پاشی کردن با شلنگ و یا ریختن آب بر روی توده 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 .

پیش خیس کردن سنگدانه ها ، جذب آب توسط آن ها را به حداقل می‌رساند و به همین دلیل افت اسلامپ در زمان پمپاژ نیز به حداقل می‌رسد . این رطوبت اضافه همچنین باعث افزایش وزن مخصوص سبکدانه ها می‌شود که در نتیجه وزن مخصوص بتن تازه را افزایش می‌دهد . البته این افزایش وزن مخصوص ، در نهایت به خاطر خشک شدن بتن در هوا از دست می‌رود و باعث ادامه پیدا کردن عمل آوری داخلی بتن می‌شود .

۵-۵-۲ نسبت های اختلاط

در طرح اختلاطی که برای یک پروژه طراحی می‌گردد باید کاهش اسلامپ ناشی از انتقال و پمپ بتن مد نظر قرار گیرد. به طور کلی باید اسلامپ بتنی که می‌خواهد پمپاژ شود افزایش یافته و از سنگدانه‌های درشت کمتری استفاده گردد . در مواردی مشاهده شده است که کاهش اسلامپ به میزان یک سوم باعث پمپ نشدن بتن سبک می‌شود . وقتی از سنگدانه سبک در بتن استفاده می‌گردد باید مراقبت‌های لازم را مورد توجه قرار دهیم تا بتن ویژگی‌های مورد انتظار ما را برآورده کند . همانطور که اشاره گردید ، سازندگان بتن و همچنین تأمین کنندگان مصالح باید با هم مشورت های لازم برای رسیدن به بهترین طرح اختلاط به منظور دستیابی به بتن پمپ پذیر را داشته باشند . برخی دستورالعمل های عمومی برای نسبت های اختلاط به منظور انجام پمپاژ مناسب بتن به صورت زیر می باشد:

- رطوبت دهی مصالح سبک
- استفاده از حداقل ۳۳۵ کیلوگرم بر متر مکعب مواد سیمانی
- استفاده از افزودنی های زیر برای بهبود پمپاژ
- مواد حباب ساز کافی به منظور ایجاد حباب به میزان ۵ تا ۸ درصد
- استفاده از مواد فوق روان کننده برای افزایش روانی مخلوط
- استفاده از خاکستر بادی یا پوزولان طبیعی برای افزایش حجم خمیر مخلوط
- استفاده از مواد تسهیل کننده پمپاژ
- برای تسهیل پمپاژ ، معمولاً تأکید می‌شود ، مقدار کمی کاهش در حجم سنگدانه درشت و افزایش همزمان حجم مصالح ریزدانه صورت گیرد .
- مصالح سیمانی باید به اندازه‌ای باشد که با اسلامپ ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی متر (۴ تا ۶ اینچ) سازگار باشد .
- اگر از ماسه با وزن مخصوص معمولی استفاده می‌شود ، باید از دانه بندی خوب و مدول نرمی مناسب آن (حدود ۲/۲ تا ۲/۷) اطمینان حاصل شود . اگر این مدول نرمی قابل دستیابی نیست می‌توان از ماسه ریزدانه و یا افزودنی های معدنی در بتن استفاده نمود .

- از نسبت حجمی مناسب مصالح ریزدانه و درشت دانه استفاده شود تا مصالح سیمانی امکان عبور از فضای نامطلوب ایجاد شده بین سنگدانه ها را نداشته باشند. بهتر است پیمانۀ مصالح به جای وزنی، حجمی باشد تا وزن مخصوص دانه‌های مختلف مصالح تأثیر گذار باشد.

جدول‌های ۱-۵ و ۲-۵ مجموعه‌ای از تجربیات اعضای کمیته **ACI 304** می‌باشد و راهنمایی برای مقدار مصالح سبک درشت‌دانه که به صورت پیش‌خیس و غوطه‌وری کامل مرطوب شده‌اند، می‌باشند. این مقادیر تنها به عنوان پیشنهاد ارائه شده‌اند و می‌توانند تا ۱۰ درصد رواداری داشته باشند که این میزان به شرایط محلی و پمپ‌های مختلف بستگی دارد.

جدول ۱-۵- مقادیر حجم پیشنهادی برای مصالح سبک رطوبت‌دهی شده به روش آب‌پاشی در متر مکعب بتن پمپاژ شده

محدوده اندازه درشت دانه های سبک			نوع ریز دانه
۳/۸ اینچ شماره ۴	۱/۲ اینچ شماره ۴	۳/۴ اینچ شماره ۴	
۸/۴ تا ۷/۹	۱۰/۵ تا ۹/۳	۱۲/۶ تا ۱۱/۸	درشت مدول نرمی از ۲/۸ تا ۳
۹/۱ تا ۸/۳	۱۱/۰ تا ۱۰/۲	۱۳/۰ تا ۱۲/۲	متوسط مدول نرمی از ۲/۶ تا ۲/۸
۹/۵ تا ۸/۷	۱۱/۴ تا ۱۰/۶	۱۳/۴ تا ۱۲/۵	درشت مدول نرمی از ۲/۴ تا ۲/۶

جدول ۲-۵- مقادیر حجم پیشنهادی برای مصالح سبک رطوبت‌دهی شده به روش آب‌پاشی در متر مکعب بتن پمپاژ شده

محدوده اندازه درشت دانه های سبک			نوع ریز دانه
۳/۸ اینچ شماره ۴	۱/۲ اینچ شماره ۴	۳/۴ اینچ شماره ۴	
۱۱/۵ تا ۱۰/۶	۱۴/۰ تا ۱۳/۰	۱۶/۷ تا ۱۵/۷	درشت مدول نرمی از ۲/۸ تا ۳
۱۲/۱ تا ۱۱/۱	۱۴/۵ تا ۱۳/۵	۱۷/۲ تا ۱۶/۲	متوسط مدول نرمی از ۲/۶ تا ۲/۸
۱۲/۶ تا ۱۱/۶	۱۵/۰ تا ۱۴/۰	۱۷/۷ تا ۱۶/۷	درشت مدول نرمی از ۲/۴ تا ۲/۶

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

۵-۵-۳ پیمان‌گیری مخلوط پمپ

وقتی فرآیند پمپ کردن بتن سبکدانه در نظر گرفته می‌شود، اعمال برخی تنظیمات برای رسیدن به مشخصات مطلوب در بتن، الزامی است. معمار، مهندس و پیمانکار باید با تمامی تنظیمات لازم مخلوط‌ها، پیش از اتخاذ هرگونه تصمیم‌گیری برای روش حمل و نقل، آشنا باشند. مشورت با تهیه‌کنندگان سبکدانه، برای به‌دست آوردن بهترین مخلوط پمپ، ضروری است. موارد متعددی از پمپ کردن بتن سبکدانه در گزارش مؤسسه شیل، رس و اسلیت منبسط شده ایالات متحده آمریکا آمده است (ESCSI-1996).

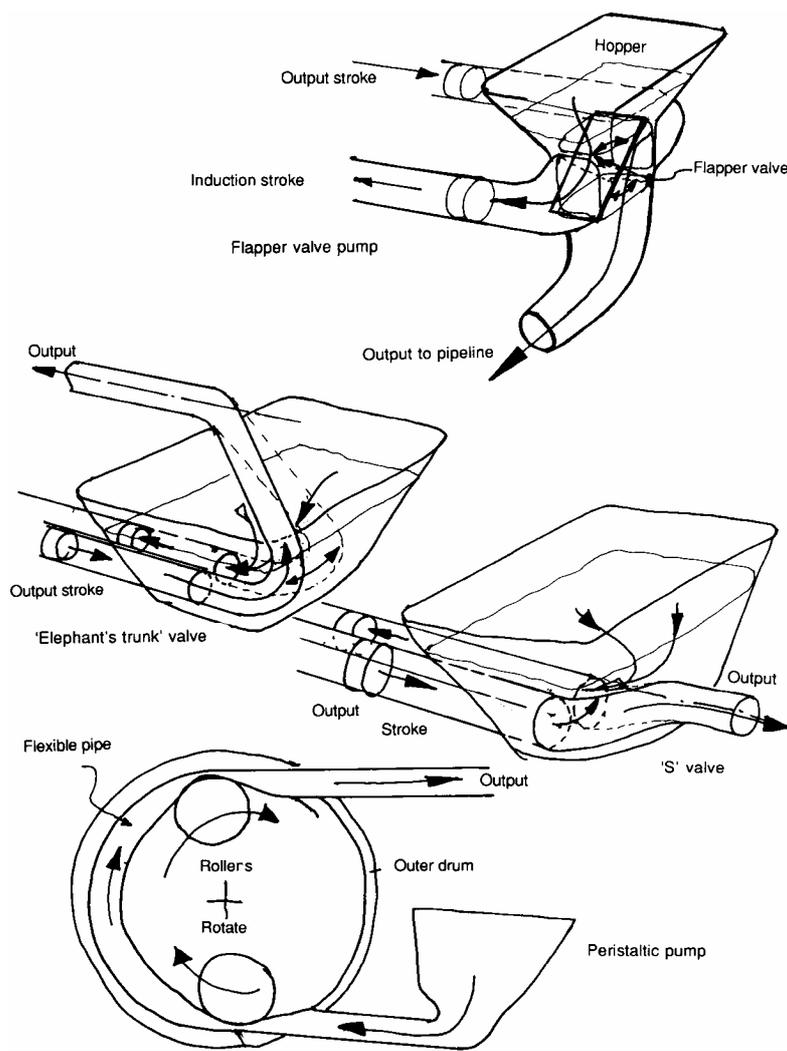
وقتی الزامات پروژه ایجاب می‌کند که از پمپ کردن بتن استفاده شود، قوانین کلی بخش ۵-۵-۲، که بر پایه استفاده از درشت‌دانه‌های سبک و ریزدانه‌های با وزن مخصوص معمولی تنظیم شده‌اند، باید اعمال شوند. همچنین دانه‌بندی باید با استفاده از حجم مطلق، و نه جرم، به دست آمده باشد تا بتواند اختلافات نسبی وزن مخصوص در اندازه‌های مختلف ذرات را محاسبه کند.

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

۵-۵-۴ پمپ و سیستم پمپ کردن

فرآیند پمپ کردن بتن سبکدانه، بخش مهمی از اجرای آن است به طوری که 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 توسعه یافته کنونی برسد. در دهه ۱۹۶۰ و سال‌های 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 بر روی یکدیگر، به وجود آمده بودند. این شیرها به بخشی از بتن اجازه می‌داد که در هر ضربه، وارد یک سیلندر شود که باعث می‌شد عملیات فشرده شدن بتن، چندباره انجام شود و همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، 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 در نتیجه انسداد آن می‌شد. برای رفع این مشکل، دانه‌بندی‌های بتن سبکدانه تغییر کرد و به مخلوطی از ریزدانه و درشت‌دانه تبدیل شد. در این حالت تا امکان پمپ کردن یکنواخت بتن سبکدانه فراهم گردید.

نقطه عطف فرآیند پمپ کردن بتن سبکدانه به اواخر دهه ۱۹۷۰ میلادی برمی گردد . در آن زمان در صنعت افزودنی‌های شیمیایی ، ماده قوام‌آور برای کمک به فرآیند پمپ کردن ، تولید شد که به همراه فوق روان‌کننده‌ها ، باعث کاهش جذب آب و احیای کارپذیری از دست رفته بتن می‌شد. پس از این، با توسعه دستگاه‌های شیر مستقیم، که در آن‌ها لوله 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 ، فرآیند پمپ کردن را آسان‌تر نیز نموده است که حتی به ماده 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 بیش از ۶۵۰ میلی متر 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 .



شکل ۴-۵- نمای از سیستم متداول پمپ کردن بتن

نمایی از سیستمهای متداول پمپ کردن بتن در شکل ۵-۴ نشان داده شده است .

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

- استفاده از بزرگترین لوله موجود با قطر حداقل ۱۲۵ میلی متر بدون احتساب کاهنده‌ها
- تمام خطوط انتقال باید هم‌اندازه و تمیز باشند و در ابتدا با دوغاب روغن مالی شوند .
- از کاهش سریع اندازه لوله از پمپ به خطوط انتقال پرهیز شود .
- کاهش فشار اعمال شده به صورت زیر انجام می‌شود :

۱- کاهش سرعت بتن‌ریزی ،

۲- استفاده از حداکثر خطوط انتقال فولادی و حداقل خطوط انتقال لاستیکی ممکن ،

۳- محدود کردن تعداد خم‌ها ، و

۴- 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 در نظر گرفته شده برای فرآیند پمپ کردن، در محل انجام شود . مشاهده کنندگان آزمایش باید شامل نمایندگان از طرف پیمانکار ، تهیه‌کننده بتن آماده ، مهندس ناظر، تیم پمپ کردن بتن ، آزمایشگاه کنترل کیفیت مخصوص آزمایش و تهیه‌کننده سبکدانه باشند . در آزمایش پمپاژ ، ارتفاع و فاصله‌ای که بتن باید از نقطه تحویل جا به جا گردد ، در نظر گرفته شود . به دلیل اینکه اکثر مکان‌ها اجازه پمپاژ عمودی بتن را به اندازه‌ای که در طول پروژه لازم است ، نمی‌دهند ، قوانین زیر می‌توانند برای جا به جایی‌های افقی با خطوط انتقال فولادی به کار گرفته شوند :

۰/۳ متر عمودی = ۱/۲ متر افقی

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

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

در پایان جالب است یک نمونه موفق در فرآیند پمپ کردن بتن سبکدانه در ارتفاع زیاد ، اجرای ساختمان

Canary Wharf در انگلستان که در شکل ۵-۵ نشان داده شده بررسی گردد .



شکل ۵-۵- ساختمان **Canary Wharf** انگلستان

این ساختمان دارای اسکلت فولادی می‌باشد و برای اجتناب از زیاد شدن وزن مرده آن، تصمیم گرفته شد تا کف طبقات آن با بتن سبکدانه اجرا شود. این ساختمان بسیار بلندتر از تمام سازه‌هایی بود که تا آن زمان در انگلستان ساخته شده بود و ۴ برابر بلندتر از ارتفاعی بود که تا آن زمان به وسیله پمپ کردن، بتن سبکدانه اجرا شده بود. ایده‌های موجود برای پمپ کردن بتن سبکدانه تا ارتفاع بیش از ۲۵۰ متر از محل ساخت بتن، یکی پمپ کردن در چند مرحله و دیگری پمپ کردن یکسره بود. پمپ کردن چند مرحله‌ای بعد از بررسی‌های لازم نامناسب شناخته شد، زیرا در هر مرحله از پمپ کردن، کارپذیری و میزان رطوبت بتن باید آزمایش می‌گردید و این موضوع باعث سختی این فرآیند می‌شد. البته در ایالات متحده آمریکا ثابت شده است که پمپ کردن بتن سبکدانه‌ای که سنگدانه‌های آن به طور کامل اشباع شده است، دشوارتر 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 سبکدانه اصلی در این پروژه بود، به روش آب‌پاشی نتایج رضایتمندانه در بر نداشت، با استفاده 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 گردید تا باعث تولید بتنی با کارپذیری مطلوب در انتهای فرآیند پمپ کردن شود.

البته لازم به ذکر است که مدل کاملی از فرآیند پمپ کردن این پروژه ، توسط پیمانکاران نیروزی 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 لوله افقی و موازی با هم که در انتها به ۵۲ متر لوله قائم می‌رسید ، استفاده شد و هرچند ارتفاع تخلیه زیاد نبود، ولی آزمایش‌ها بیانگر آن بودند که خط انتقال افقی طولانی، مقاومت معادل لوله قائم را تأمین خواهد کرد . ۳۰ متر اول لوله‌ها به صورت افقی بود که پس از گذشتن از یک مقطع خمیده به سمت بالا ، به بالا برنده می‌پیوست و پس از آن وارد قسمت قائم می‌شد . ارتفاع بالا برنده با افزایش ارتفاع ساختمان ، افزوده می‌شد . تولیدکنندگان دستگاه‌های پمپ توصیه می‌کردند که از چند بالا برنده در سطوح مختلف استفاده شود تا در صورت انسداد لوله‌ها ، راحت‌تر بتوان به رفع آن پرداخت .

تا طبقه ۴۲ این ساختمان از سنگدانه‌هایی استفاده شد که علاوه بر مکش ، ۳ روز نیز در آب غوطه‌ور شده بودند تا ۱۶ درصد رطوبت به دست 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 به خاطر 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 لوله انتقال که ۶۰ متر آن نیز می‌تواند قائم باشد ، امکان‌پذیر می‌باشد .

فصل ششم - آزمایش‌های مرتبط با تولید بتن سبکدانه

۶-۱ آزمایش‌های بتن سبک

خواص بتن تازه باید در بازه‌های زمانی مشخصی کنترل گردد تا از انطباق نسبت‌های اختلاط مصالح در کارگاه با نسبت‌های 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، باید مخلوط‌کن با توجه به این موضوع تنظیم شود. اگر در وزن سنگدانه‌ها تغییری حاصل شود، تعیین مجدد وزن مخصوص و درصد رطوبت ضروری می‌باشد. تغییر در اسلامپ می‌تواند حاصل تغییر در درصد هوا، رطوبت سنگدانه‌ها، دانه بندی آن‌ها و یا وزن مخصوص آن‌ها باشد. این عوامل بر این مشخصات بتن تأثیرگذار 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.

۶-۱-۱ وزن مخصوص

همان‌طور که انجام آزمایش‌های مخصوص 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. وزن مخصوص بتن تازه به عنوان معیاری برای مقایسه مخلوط ساخته شده با طرح اختلاط به کار می‌رود. اندازه‌گیری وزن مخصوص نمونه بتن تازه معمولاً با متراکم کردن نمونه با میله یا بالرزاندن آن به اندازه معین در قالب فلزی با حجم معلوم، انجام می‌پذیرد. در این فرآیند، وزن نمونه اندازه‌گیری شده، و براساس آن وزن مخصوص 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 نمی شود . عامل حائز اهمیت ، این است که متراکم کردن نمونه با دست معمولاً با اعمال نیروی بیشتری همراه است و احتمال خردشدن سنگدانه‌ها در آن بیشتر است ، بنابراین در خصوص نمونه‌های سبکدانه توصیه نمی شود . به جای آن با تعیین زمان استاندارد برای لرزاندن می توان از احتمال خردشدن سنگدانه‌ها کاست . استانداردهای **BS 1881: Part 107: 198322** و **ASTM C138 - 8123** نمونه‌هایی از این روش را ارائه می کنند . از معایب این روش آن است که نیاز به تنظیم دقیقی دارد اما در عوض ارزان و ساده است و با محاسبات اندکی می توان به اطلاعات مورد نظر رسید . در هر یک از این آیین‌نامه ها این امکان داده شده است که وزن مخصوص به دست آمده در محدوده خاصی از مقدار مطلوب طرح اختلاط قرارداشته باشد . به عنوان مثال وزن مخصوص بتن تازه‌ای که بر اساس آیین‌نامه **ASTM C138** اندازه‌گیری می شود ، اگر تا 30 kg/m^3 نسبت به طرح اختلاط اولیه نوسان داشته باشد ، مخلوط ساخته شده قابل قبول خواهد بود .

هرچند آزمایش‌های وزن مخصوص بتن سخت‌شده درحین انجام پروژه و بر روی نمونه‌های تازه قابل انجام نیست ، با این حال توصیه می شود که وزن مخصوص بتن سخت‌شده نیز با استفاده از آیین‌نامه **ASTM C567** انجام شود . درخصوص بتن سبک ، آیین‌نامه ها معمولاً حد بالایی برای وزن مخصوص بتن خشک شده در نظر می گیرند (رجوع کنید به **ASTM 567** و **ACI 301**) . ده درصد تفاوت در وزن مخصوص بتن سخت شده نسبت به میزان مورد نظر ، معادل $30\text{-}50 \text{ kg/m}^3$ اختلاف در وزن مخصوص بتن تازه است و بر اساس آنچه گفته شد ، خارج از بازه نوسان در آیین‌نامه **ASTM** قرار داشته و مخلوط مورد نظر نیاز به اصلاح خواهد داشت . آزمایش‌های وزن مخصوص بتن سخت‌شده در شرایط زیر انجام می شود :

- وزن مخصوص نمونه‌های بتنی نگه داری شده استاندارد در هنگام انجام آزمایش مقاومت
- وزن مخصوص بتن خشک شده در هوا در تعادل با شرایط آب و هوایی پیرامونی که درمحل اجرای پروژه و روی نمونه‌های خشک‌شده در محیط طرح انجام می شود و در طراحی به عنوان بارمرده مورد استفاده دارد .
- وزن مخصوص بتن سخت شده در دستگاه آون ، دمای 105 درجه سانتی‌گراد که از این دما به بعد دیگر تغییری در وزن نمونه حاصل نمی شود .

وزن مخصوص بتن تازه و خشک شده در دستگاه آون به آسانی قابل تکرار بوده و ثابت می باشد . وزن مخصوص بتن سخت شده در هوا با توجه به شرایط آب و هوایی تغییر می کند و ممکن است از محلی به محلی دیگر متفاوت باشد . با این وجود این وزن مخصوص ، مقداری است که طراح سازه برای محاسبه بارمرده سازه به آن نیاز دارد . وزن مخصوص بتن سخت شده در هوا را می توان 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. وزن مخصوص نهایی بتن خشک شده در هوا، بر حسب عیار سیمان از وزن مخصوص خشک شده در دستگاہ آون $60-90 \text{ kg/m}^3$ بیشتر است. تغییر دادن وزن مخصوص مشخصه یک بتن سبکدانه موجود کار مشکلی است، بنابراین بهتر است طراح در محدوده مصالح موجود، کار طراحی را انجام دهد.

۶-۱-۲ آزمایش مقاومت

آزمایش های مشابهی برای بتن های سبکدانه و بتن های معمولی انجام می شود. هم نمونه مکعبی و هم نمونه استوانه ای 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 بتن های سبکدانه به طور مشخص از بتن های معمولی بیشتر است. دلیل این پدیده تأثیر مقاومت کم تر دانه های سبکدانه بر افزایش مقاومت بتن است. رده مقاومتی بتن های سبکدانه بر پایه مقاومت ۲۸ روزه است. البته باز کردن قالب را می توان زودتر از معمول انجام داد و ممکن است این موضوع تأثیر مثبتی بر هزینه ساخت و ساز داشته باشد.

قابل اعتماد ترین روش آزمایش مقاومت فشاری، آزمایش نمونه های مغزه گیری شده از بتن سازه است. آزمایش های غیر مخربی همچون آزمایش ضربه و آزمایش فراصوت وجود دارد، که به تنهایی و یا توأم به کار می روند و باید با احتیاط استفاده شوند، زیرا دانه های سبکدانه به راحتی و تنها با یک آزمایش ضربه، خرد می شوند.

۶-۱-۳ کارپذیری

آزمایش کارپذیری به روش مشابه بتن معمولی توسط آزمایش اسلامپ یا ترجیحاً آزمایش میز جریان انجام می شود. آزمایش اسلامپ به دلیل وزن مخصوص کم تر این نوع بتن و نیروی کم تر برای ایجاد تغییر شکل، کارپذیری بتن را مقدار کمتری برآورد می کند. در صورتی که اسلامپ بتن سبکدانه حدود دو سوم اسلامپ بتن معمولی باشد، کارپذیری مشابهی خواهد داشت. در صورتی که بتن در محل اجرا، مسافتی بین میکسر و محل ساخت منتقل شده است، بهتر است که آزمایش مقایسه ای 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 بتن های سبکدانه به کار می رود و برای مقدار جریان بیش از 400 mm تا حداکثر 700 mm مناسب است. کارپذیری مورد نیاز برای بتنی که باید پمپ شود، مقدار جریانی بیش از 600 mm است، بنابراین در بتن های با کارپذیری زیاد پر کاربرد 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 .

۶-۱-۳-۱ آزمایش اسلامپ

اندازه گیری کارپذیری معمولاً با آزمایش اسلامپ انجام می گیرد . بتن با استفاده از یک قالب مخروطی متراکم می شود و پس از برداشتن مخروط ، ارتفاع نمونه اسلامپ واقعی را نشان می دهد . افت نامتوازن بتن و یا ریزش آن می تواند نشانه ای از این باشد که نمونه ، فاقد چسبندگی مناسب است ، بنابراین نتایج واضح نبوده و آزمایش اسلامپ قابل اعمال بر این گونه نمونه ها نمی باشد .

معمولاً تنها آزمایشی که در کارگاه انجام می گیرد ، با توجه به سادگی و قابل حمل بودن ، آزمایش اسلامپ است . این آزمایش برای بررسی نمونه های مشابه به منظور کنترل اجزای نمونه ها و اطمینان از رعایت نسبت ها هم کاربرد دارد . شرح روش به کارگیری این آزمایش در **GOST 10181.1-، ASTM C143 ، BS 1881:part 102** ، **DIN 12382 ، 81** ، 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 .

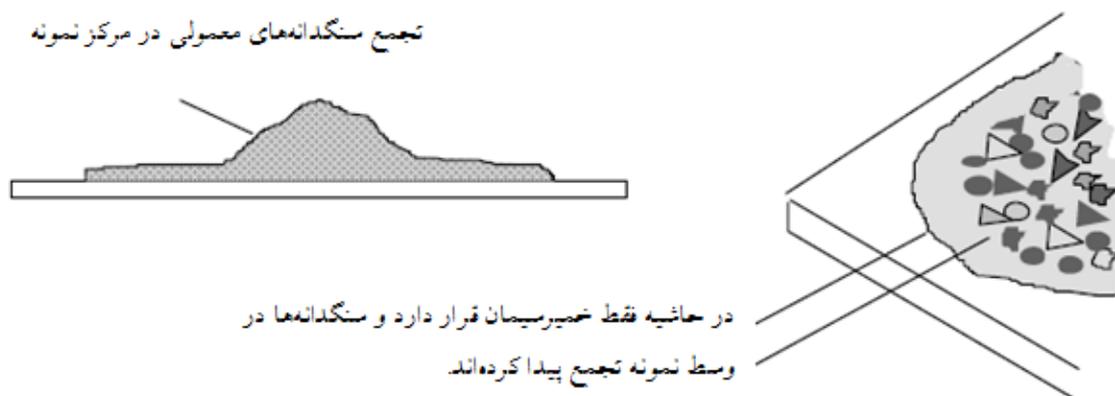
از معایب این روش آن است که امکان خطای کاربری در آن زیاد است ، با این حال ابزار آن ارزان است و به نتایج سریعی منجر می شود ، به راحتی در کارگاه قابل انجام است و متداولترین آزمایش برای بررسی خواص بتن تازه محسوب می شود . با ضربه زدن به سطحی که نمونه اسلامپ بر روی آن قرار گرفته است ، می توان به معیاری از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

۶-۱-۳-۲ آزمایش جریان

این آزمایش می تواند برای بررسی میزان کارپذیری نیز مورد استفاده قرار گیرد . یک مخروط اسلامپ روی صفحه ای قرار گرفته و بتن در داخل آن ریخته می شود . سپس مخروط برداشته شده و صفحه به دفعات استاندارد بالا برده و انداخته می شود . میانگین وسعت پخش شدن بتن (معمولاً ۴۰۰ تا ۶۰۰ میلی متر) اندازه گیری می شود . این آزمایش معمولاً برای نمونه هایی با اسلامپ ریزشی به کار برده می شود و برای بررسی های مقایسه ای بسیار کارآمد

است. آزمایش جریان برای بتن سبکدانه هم قابل استفاده است. شرح روش این آزمایش در آیین‌نامه های **DIN 1045:198814 ، BS 1881:Part 105** آورده شده است.

آزمایش جریان می‌تواند شاخصی سریع از پایداری مخلوط ارائه دهد. به این ترتیب که مطابق شکل ۶-۱ با بررسی لبه نمونه جریان یافته پس از ضربه زدن، می‌توان فهمید که در این بتن با آب‌انداختگی مواجه هستیم یا خیر. این آزمایش برای بتن سبک به نتایج کمی نمی‌انجامد، ولی معیار کیفی مفیدی در اختیار قرار می‌دهد.



شکل ۶-۱ 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 نحوه اجرای بتن است و همچنین برای اجرای آن به صفحه‌ای کاملاً افقی نیاز است.

۶-۱-۴ 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 ۲ درصد نسبت به میزان موردنظر در طرح اختلاط، وزن مخصوص را تا 30 kg/m^3 تغییر می‌دهد و تفاوت بیش از این مقدار، مخلوط را غیر قابل قبول می‌سازد. تغییرات حجم هوا مقاومت را در بتن‌های غنی (پر سیمان) به شدت دستخوش تغییر می‌کند و همین مساله بررسی آن را در خصوص این بتن‌ها حساس‌تر می‌کند. در ادامه به بررسی این دو روش پرداخته شده است.

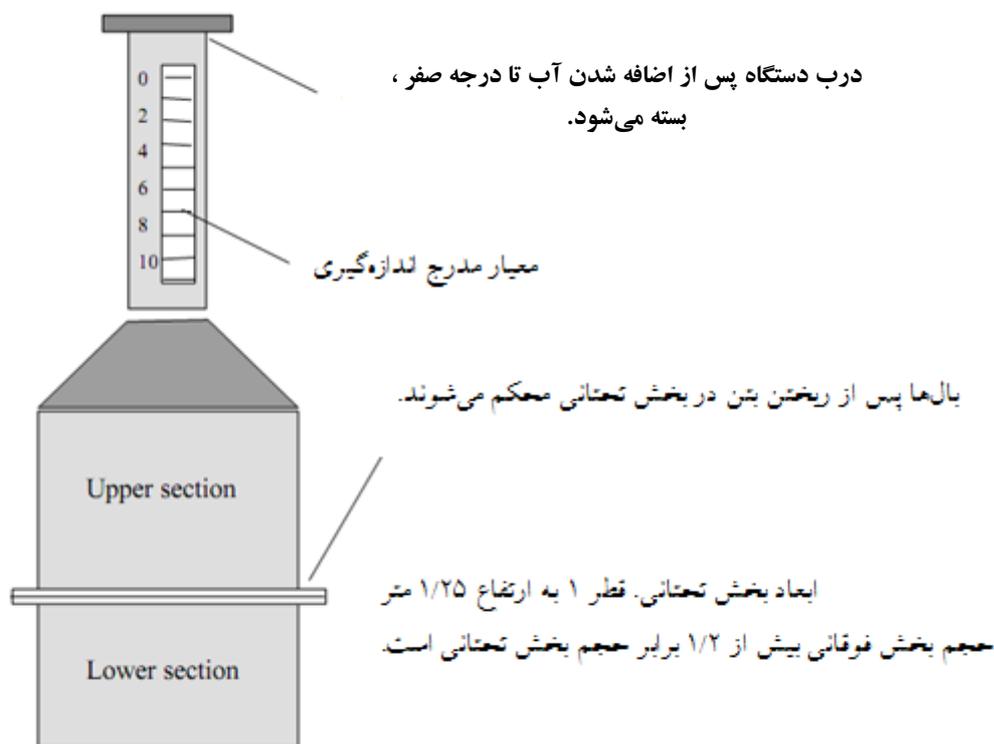
۶-۱-۴-۱ روش فشاری

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 کم تر 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 حباب ساز و نظارت بر تولید انجام می‌شود و دامنه تغییرات نتایج بسیار کم تر 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 متداول تر است، کاهش حجم هوای محفوظ درون سبکدانه‌ها باعث می‌شود که مقدار هوای به دست آمده از آزمایش، از مقدار هوای واقعی بیشتر خوانده شود. عدد به دست آمده حتی با افزایش زمان اعمال فشار هم افزایش می‌یابد. آزمایش نشان داده است که این میزان خطای احتمالی برای لیکا و لیاپور ۵/۰ تا ۱ درصد است. این خطا برای نسبت آب به مواد سیمانی بیشتر و سنگدانه‌های سبک تر (با تخلخل و نفوذپذیری بیشتر) افزایش خواهد یافت. در صورت وجود ماسه سبک دانه در نمونه‌ها، خطا بیشتر خواهد شد. با این وجود روش فشاری می‌تواند برای کنترل کارگاه‌هایی که روند ثابتی برای تولید دارند، به کار رود. آزمایش باید حداقل ۱۰ دقیقه پس از افزودن آب روی نمونه تازه انجام شود و قرائت میزان هوا باید بلافاصله پس از اعمال فشار انجام شود. قبل از اینکه بتوان از اعداد به دست آمده استفاده کرد، ارتباط آن‌ها با مرجع **ASTM** برای این مخلوط خاص باید بررسی شود.

۶-۱-۴-۲ 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. دستگاه استفاده در این آزمایش در شکل ۶-۲ نشان داده شده است.



شکل ۶-۲ دستگاه آزمایش تعیین مقدار هوا به روش حجمی

این آزمایش برای همه بتن‌ها استفاده می‌شود. هنگامی که 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 در واقع حجم آب برای نمونه موجود کم باشد. به منظور رفع این مشکل، بهتر است نمونه‌های بتن سبکدانه کوچک‌تر از نمونه‌های بتن معمولی انتخاب شوند. در حال حاضر 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 به آسانی 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.

۶-۱-۵ 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 پمپ‌پذیر بودن 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.

۶-۱-۵-۱ آزمایش آب‌انداختگی

یکی از روش‌های آزمایش پمپ‌پذیری بتن معمولی، آزمایش آب‌انداختگی است که طبق آن میزان آب‌انداختگی بتن که از مجرای متصل به نمونه بتنی تحت فشار خارج می‌شود، اندازه‌گیری می‌شود. دلیل اصلی گرفتگی در مسیر پمپ کردن 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.

۶-۱-۵-۲ آزمایش فشار-حجم

این آزمایش در نروژ همچنان در حال توسعه است. در این روش، با اعمال فشار بر نمونه بتنی، تغییر حجم آن اندازه‌گیری می‌شود. پس از 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 اعمال می‌شود. تغییر در حجم با اندازه‌گیری تغییرات وزن محفظه نگه‌دارنده متصل به نمونه که جریان تحت فشاری به سوی نمونه دارد، اندازه‌گیری می‌شود. دستگاه این آزمایش در شکل ۳-۶ نشان داده شده است. در انجام این آزمایش باید توجه کرد که از نمونه‌های بزرگتر، نتایج دقیق‌تری به دست می‌آید. این آزمایش برای بتن سبکدانه طراحی شده است و ارتباط بین پمپ‌پذیری و تراکم‌پذیری بتن را نشان می‌دهد. این آزمایش، دستگاه بزرگی دارد که استفاده از آن را در محل کارگاه ناممکن می‌سازد و تا کنون گزارش‌های کمی از کاربرد این دستگاه منتشر شده است. به همین دلیل، انجام این آزمایش چندان متداول نیست.



شکل ۳-۶ دستگاه تعیین پمپ‌پذیری بتن به روش فشار-حجم

۶-۱-۶ پایداری

پایداری به معنای حفظ همگنی بتن در همه مراحل اجرای بتن یعنی ساخت ، حمل و نقل ، بتن ریزی ، تراکم و پرداخت است . پایداری مخلوط‌های بتنی معمولاً با برآوردهای چشمی ارزیابی می‌شود و آزمایش خاصی برای پایداری انجام نمی‌شود . اما از آن جایی که به دلیل تفاوت در وزن مخصوص عناصر تشکیل دهنده ، بتن سبک پتانسیل بیشتری برای ناپایدار شدن دارد ، برآورد پایداری بتن سبک از اهمیت بیشتری برخوردار است . در ادامه ، آزمایش‌های متداول ارزیابی پایداری بتن سبک‌دانه ذکر شده است .

۶-۱-۱-۶ آزمایش ستون جداشدگی

آزمایش پیشنهادی برای جداشدگی بتن به این صورت است که استوانه‌ای مطابق شکل ۶-۴ در نظر گرفته می‌شود، که از دو استوانه به قطر داخلی ۲۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر تشکیل شده است . نحوه انجام آزمایش جداشدگی بتن ، پس از مخلوط کردن کامل ، در جدول ۶-۱ ارائه شده است .

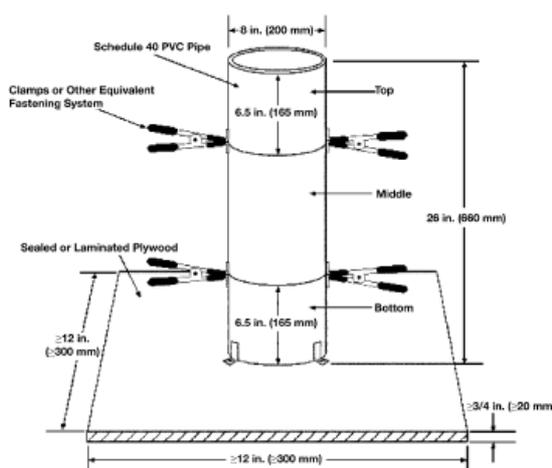


شکل ۶-۴ دستگاه آزمایش ستون جداشدگی

جدول ۶-۱ 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	۵-۰ دقیقه
استوانه جداشدگی را به میز لرزش متصل کرده و استوانه با بتن سبک پر می‌شود. نمونه با فرکانس ۵۰ هرتز و دامنه ۰/۵ میلی‌متر لرزانده می‌شود.	۵-۷ دقیقه
اتصالات باز شده 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 تازه 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 می توان از آزمایش معادل آن که برای بتن خود تراکم استاندارد شده است ، استفاده نمود . در آزمایش بتن های خود تراکم که برای مقاومت در برابر جداشدگی توسط انجمن آمریکایی مصالح و روش های آزمایش (**ASTM C 1610**) استاندارد شده است ، به شرح زیر عمل می شود . دستگاه این آزمایش ، همان طور که در شکل ۵-۶ آورده شده است ، از یک استوانه به قطر ۲۰۰ میلی متر و ارتفاع ۶۶۰ میلی متر تشکیل می شود که به سه قسمت تقسیم شده است . ارتفاع قسمت های بالا و پایین ، هر کدام ۱۶۵ میلی متر و ارتفاع قسمت وسط ، ۳۳۰ میلی متر می باشد .



شکل ۵-۶ دستگاه آزمایش ستون جداشدگی برای بتن خودتراکم

در این روش ، دستگاه در مدت زمان ۲ دقیقه از بتن پر می شود و به مدت ۱۵ دقیقه دست نخورده باقی می ماند . سپس ، بتن موجود در قسمت های بالا و پایین دستگاه بر روی الک ۴/۷۵ میلی متر (# ۴) شسته شده و سنگدانه های درشت باقی مانده روی الک خشک می شود و اندیس جداشدگی از رابطه زیر محاسبه می گردد :

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

که در آن ، **CAT** وزن درشت دانه قسمت بالایی دستگاه و **CAB** وزن درشت دانه قسمت پایینی دستگاه است . در صورتی که اندیس جدا شدگی بتن خود تراکم کوچکتر از ۱۰ درصد باشد ، بتن خودتراکم مقاومت کافی در برابر جدا شدگی استاتیکی دارد . با توجه به استاندارد بودن و متداول بودن این دستگاه به نظر می رسد می توان از آن برای تعیین جدا شدگی در بتن سبک نیز استفاده کرد ، با این تفاوت که به جای اندازه گیری وزن درشت دانه در قسمت بالا و پایین دستگاه، وزن مخصوص بتن سبک در هر قسمت اندازه گیری شود و اندیس جداشدگی از تقسیم وزن مخصوص قسمت بالا به وزن مخصوص قسمت زیرین محاسبه می شود و از آنجایی که حجم دو قسمت با هم برابرند ، می توان برای سادگی وزن دو قسمت را محاسبه کرد .

۶-۲ 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 وزن مخصوص 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، وزن مخصوص، درصد هوا و اسلامپ یک یا دو نمونه اولیه باید تعیین شوند تا تطابق آن‌ها با نمونه‌های آزمایشگاهی مشخص شود. اصلاحات مورد نظر جزئی در صورت لزوم انجام خواهد شد. در حالت کلی اگر تفاوت در وزن مخصوص بتن تازه بیش از $50-30 \text{ kg/m}^3$ باشد، تغییرات مورد نیاز باید اعمال شود. این مقدار در خصوص حجم هوا $\pm 1/5$ درصد است تا از تغییرات ناخواسته در وزن مخصوص، مقاومت فشاری، کارپذیری و پایایی جلوگیری شود.

در جدول ۶-۲، خلاصه‌ای از آزمایش‌های متداول بتن تازه و توضیحات مربوط به کاربرد هر یک در بتن سبکدانه ارائه شده است:

جدول ۶-۲ آزمایش‌های متداول بتن تازه و کاربرد آن‌ها در بتن سبکدانه

توضیحات	آزمایش	کمیت مورد بررسی
	آزمایش اسلامپ	
	آزمایش جریان	
در صورت خرد نشدن سبکدانه‌ها مناسب است.	آزمایش استاندارد	وزن مخصوص
نامناسب برای استفاده برای نمونه‌هایی با سبکدانه غیر اشباع	روش فشاری	درصد هوا
	روش حجمی	
نامناسب ارزیابی شده است.	آزمایش آب‌انداختگی	
دستگاه آن بزرگ است ولی مناسب ارزیابی شده است.	آزمایش فشار/حجم	پمپ پذیری
در بتن سبکدانه ممکن است برای پروژه‌های در مقیاس کوچک مناسب نباشد.	ریزش آزمایشی	
همچنان در حال گسترش است.	آزمایش ستون جداشدگی	پایداری
تنها برای دستیابی به دید کلی، مناسب است.	بررسی‌های مشاهداتی	

۶-۳ اصلاح طرح اختلاط

مخلوط‌های کارگاهی و نمونه‌های آزمایشگاهی باید دائماً در بازه‌های زمانی خاص، مورد بررسی قرار گیرند تا در صورت به وجود 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 بر روی نمونه‌های کارگاهی را الزامی می‌کند. زمانی که ایجاد تغییری در خواص بتن مانند حجم هوا، درصد سنگدانه‌ها در مخلوط یا اسلامپ مد نظر 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 ارائه یک دید کلی هستند و آزمایش با مواد مختلف در صورت لزوم باید انجام شود:

- افزایش درصد ریزدانه به کل سنگدانه‌ها: برای هر درصد افزایش در سبکدانه، آب حدود $1/8$ کیلوگرم بر متر مکعب باید اضافه شود. افزایش میزان آب نیاز به افزایش سیمان برای تنظیم مقاومت نمونه دارد. برای هر $1/8$ کیلوگرم بر مترمکعب آب، سیمان باید تقریباً ۱ درصد افزایش یابد. درشت دانه‌ها و ریزدانه‌ها باید برای رسیدن به حجم کل مطلوب تنظیم گردند.
- درصد هوا: اگر میزان آب تغییر نکند، افزایش درصد هوا می‌تواند باعث افزایش در اسلامپ شود. برای هر یک درصد افزایش در درصد هوا، آب باید حدوداً تا ۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب 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 $7/5$ سانتی‌متر است، آب باید حدوداً به اندازه ۶ کیلوگرم بر مترمکعب 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 مترمکعب آب اضافه شده ۳ درصد به میزان سیمان افزوده خواهد شد.

فصل هفتم - اقتصاد بتن سبکدانه

۷ - ۱ مقدمه

شن و ماسه با وزن مخصوص معمولی، سنگدانه های طبیعی هستند که در طبیعت فراوان یافت می شوند. با این حال نقطه ضعف اصلی آن ها وزن مخصوص زیاد آن ها می باشد. بتن معمولی ساخته شده با این سنگدانه ها دارای وزن مخصوص تقریبی ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می باشد. در حالی که در صورت استفاده از سنگدانه رس منبسط شده، وزن مخصوص بتن به میزان سی درصد، یعنی به مقدار ۱۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب کاهش می یابد. قابل درک است که بتن ساخته شده با سنگدانه سبک باید گران تر از بتن ساخته شده با سنگدانه های طبیعی باشد. زیرا سنگدانه های طبیعی بر خلاف سبکدانه ها تحت پردازش و عملیات نسبتاً کمی قرار می گیرند. فرض می کنیم غیر از وزن مخصوص، تفاوت اساسی میان بتن معمولی و بتن سبکدانه وجود نداشته باشد، در این صورت چه دلیل اقتصادی وجود دارد که استفاده از بتن سبک را توجیه کند؟

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

توجیه عوامل اقتصادی را می توان در تاریخ این صنعت در سال ۱۹۲۲ زمانی که استادیوم ورزشی دبیرستان **Westport** در کانزاس سیتی میسوری (شکل ۷-۱) به نخستین ساختمان بتن سبک در تاریخ تبدیل شد، یافت. قیمت سنگدانه رس منبسط شده در آن زمان ۶ دلار در هر یارد مکعب بود. در همان زمان قیمت شن و ماسه ۲/۵ دلار در هر یارد مکعب بود. اما به دلیل پایین بودن مقدار ظرفیت باربری خاک، استفاده از سنگدانه رس منبسط شده علیرغم هزینه بیشتر آن موجه بود.



شکل ۷-۱ - دبیرستان **Wwestport** در کانزاس سیتی میسوری

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

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

مثال دیگر را می توان در کشور آمریکا جستجو کرد . در شمال کانزاس سیتی میسوری سازه ای با مساحت بیش از ۴۴۵۰ متر مربع ، باید بر روی لجن های رودخانه که ظرفیت باربری کمی داشت ، قرار می گرفت . بدین منظور لازم بود تا بارهای مرده به حداقل مقدار خود برسد . این کار از طریق سیستم پانل های **tilt up** بتنی سبک میسر شد .

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

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

پل مرتبط کننده سانفرانسیسکو و اوکلند اقتصادی بودن استفاده از بتن سبک ساخته شده با رس منبسط شده را نشان داد . وودراف ۱۰ ، مهندس طراح این سازه برآورد نمود که استفاده از این مصالح در عرشه بالایی پل باعث کاهش

هزینه سازه به میزان ۳ میلیون دلار می شود. پل روگذر **Heatley Avenue** در شهر ونکوور کانادا که قسمت‌هایی از آن با بتن سبک‌دانه ساخته شده است، کاهش ۵۰،۰۰۰ دلاری در هزینه را نشان می دهد. همانطور که اشاره شد، ۳۰ درصد کاهش بار مرده که معمولاً از طریق استفاده از بتن سبک حاصل می شود، باعث کاهش در میزان فولاد مصرفی و ابعاد ستون و پی مورد نیاز می شود. یکی از محل‌های اجرای بتن سبک‌دانه، توقفگاه‌های سرپوشیده، آپارتمان‌ها و ساختمان‌های اداری و رمپ پارکینگ می‌باشد. در این سازه‌ها کاهش در ابعاد ستون همراه با افزایش تعداد دهانه‌ها، ظرفیت و به طور هم زمان بهره‌وری را افزایش می‌دهد. ملاحظات مشابهی در مورد نیروگاه‌ها نیز وجود دارند که نشان می‌دهد استفاده از بتن سبک‌دانه، تاثیر قابل توجهی بر روی هزینه نگهداری و بازده بهره‌برداری دارد.

مرکز آموزش دانشگاه **Utah** فهرستی از صرفه‌جویی‌هایی که ممکن است از طریق استفاده از بتن سبک ایجاد شود را تهیه کرده است. با توجه به نتایج این تحقیق، استفاده از بتن سبک، کاهش ۳۰ درصدی در شالوده ستون‌ها، کاهش ۳۰ درصدی در وزن دال‌ها و کاهش ۱۲ درصدی در فولاد مسلح را سبب می‌شود. علاوه بر صرفه‌جویی در سازه، استفاده از سبک‌دانه‌های خاک رس منبسط شده در بتن مزایای اقتصادی دیگری نیز دارد. مقاومت در برابر شعله، عایق بودن در برابر حرارت و هدایت گرمایی، مقاومت در برابر رطوبت، هوای حاوی یون کلر خورنده و حشرات نیز از خصوصیات است که بتن سبک‌دانه دارد و در نتیجه باعث می‌شود از هزینه‌های اضافی کاسته شود. اما تن‌ها و پوندها، دلارها و سنت‌ها در مقایسه با بتن عادی، نه تنها توانایی بیان کردن کل داستان سود اقتصادی این نوع بتن‌ها را ندارد، بلکه توانایی بیان کاربردها و استفاده‌های مختلف آن را هم ندارد. و این یک واقعیت است که بتن سبک‌دانه‌ای، ساختن سازه‌هایی را که امکان ساختن آن‌ها با بتن معمولی وجود ندارد را ممکن می‌سازد. همانطور که اشاره شد، استفاده از بتن سبک معمولاً برای کاهش هزینه‌های پروژه، بهبود عملکرد و یا ترکیبی از هر دوی این حالات است. به‌عنوان مثال مجموع هزینه‌های یک پل با دهانه‌های کوتاه ممکن است \$ ۵۴۰-۲۱۵۰ در هر متر مربع باشد. اگر میانگین ضخامت عرشه ۲۰۰ میلی‌متر باشد، یک متر مکعب بتن تقریباً ۵ متر مربع را می‌پوشاند. افزایش قیمت ناشی از استفاده از بتن سبک با قیمت \$ ۲۶ در هر متر مربع نسبت به بتن معمولی در حالت عمومی کم‌تر از یک درصد است. این ۱ درصد افزایش قیمت به راحتی توسط یکی از موارد اقتصادی زیر یا مهمتر از آن، توسط افزایش کارآیی سازه جبران می‌شود.

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

- کاهش بارهای مرده ممکن است در کوچک‌تر کردن اعضای تکیه‌گاهی مؤثر باشد و در نتیجه به مقدار زیادی در هزینه‌ها کاهش ایجاد کند .
 - کاهش بار مرده در واقع به معنای کاهش نیروی اینرسی زلزله است .
 - در تعمیر پل ، عرشه جدید می تواند عریض تر باشد یا یک خط جدید برای عبور وسایل نقلیه اضافه شود ، بدون این که سازه یا پی تغییر کند .
 - با توجه به خاصیت زهکشی مناسب ، عرشه پل می تواند بدون اینکه به سازه ، بار مرده جدیدی اضافه شود ، نازک تر شود .
 - با پیش تنیدگی می توان اعضای بزرگ تر و بلندتری ساخت ، بدون اینکه وزن کلی افزایش یابد . در این صورت کاهش در ستون‌ها یا اعضای تیر امکان پذیر است . این امر موجب حمل و نقل آسانتر آن‌ها می شود .
- چندین نمونه و سند موجود است که میزان صرفه جویی در هزینه های حمل و نقل به واسطه استفاده از بتن سبک را نشان می دهد . در برخی موارد ، هزینه های حمل و نقل توسط رایانه ارزیابی شده تا مقدار وزن مخصوص بهینه برای بتن بدست آید . به عنوان مثال در استفاده‌های دریایی ، افزایش بارهای مجاز روی عرشه پل و کاهش نیروی بالاران ۱۱ در نتیجه استفاده از بتن سبک موجب حرکت و جا به جایی آسانتر بارانداز و نیز حرکت در کانال های با عمق کم تر می شود (شکل ۷-۲) .



شکل ۷-۲- کاربرد بتن سبک در حمل و نقل دریایی

۷-۲- هزینه جا به جایی

در وضعیتی که هزینه‌های حمل و نقل ارتباط مستقیمی با وزن تولیدات بتنی دارند، استفاده از بتن سبک می‌تواند کاملاً اقتصادی باشد. دامنه محصولات، شامل اعضای بلند سازه ای (تیرها و دیوارها و تیرهای حمل و ...) تا اعضای کوچک تر می‌باشد (شکل ۷-۳).



شکل ۷-۳- کاهش هزینه حمل و نقل زمینی بتن سبکدانه

نتایج دو تحقیق صورت پذیرفته درباره حمل و نقل بتن توسط کامیون در جدول ۷-۱ نمایش داده شده است. این تحقیقات اثبات می‌کنند که صرفه‌جویی صورت گرفته در صورت استفاده از بتن سبکدانه ۷ برابر بیشتر از حالتی است که از سنگدانه‌های معمولی استفاده شود. میزان صرفه‌جویی با توجه به جرم و اندازه محصول متفاوت است و این امر برای تولیدات کوچک تر بسیار با اهمیت است.

تعداد کامیون کم تر در شهرهای شلوغ نه تنها از نظر محیط زیست بسیار حائز اهمیت است، بلکه از میزان افراد حقوق بگیر می‌کاهد. هزینه کم تر زمانی امکان پذیر است که حمل و نقل توسط راه آهن یا کشتی (قایق) صورت گیرد، اما اغلب، جا به جایی بتن توسط کامیون‌هایی که در بزرگراه‌ها تردد می‌کنند، انجام می‌گیرد. مثال داده شده در جدول ۷-۱ یک آنالیز خاص از هزینه حمل و نقل اعضای پیش تنیده، مربوط به پروژه‌ای عمرانی در سال ۱۹۹۰ می‌باشد.

جدول ۷-۱ - مقایسه هزینه بتن سبکدانه و بتن معمولی

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

با توجه به جدول ۷-۱ می توان نتیجه گرفت که در صورت استفاده از بتن سبکدانه ، می توان هزینه حمل و نقل را به میزان قابل توجهی کاهش داد . این صرفه جویی در مواردی که هزینه حمل و نقل بتن بخشی قابل توجهی از هزینه ها را شامل شود می تواند بسیار مفید باشد . قابل ذکر است که مثال بالا تنها نمونه ای از صرفه جویی صورت گرفته در هزینه حمل و نقل در صورت استفاده از بتن سبک می باشد . موارد مشابه زیادی نیز گزارش شده است که صرفه جویی در هزینه حمل و نقل در صورت استفاده از بتن سبکدانه را تأیید می کند .

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 150 kg/m^3 قابل استفاده است. دومین روش معمولاً برای سبکدانه‌هایی با وزن مخصوص 150 kg/m^3 و کم تر 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 الف-۱ باشد و در صورتی که از روش دوم برای انجام آزمایش استفاده شود، استوانه باید مطابق شکل الف-۲ باشد.
- پرس هیدرولیکی یا دستگاه دیگری که توانایی ایجاد فشار لازم برای انجام آزمایش رداشته 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
- پیمانان با حجم مناسب برای پرکردن استوانه آزمایش
- دستگاه آون ترمواستاتیک که قادر به تأمین دمای $5 \pm 110^\circ \text{C}$ باشد.

الف-۳- آماده کردن نمونه‌ها

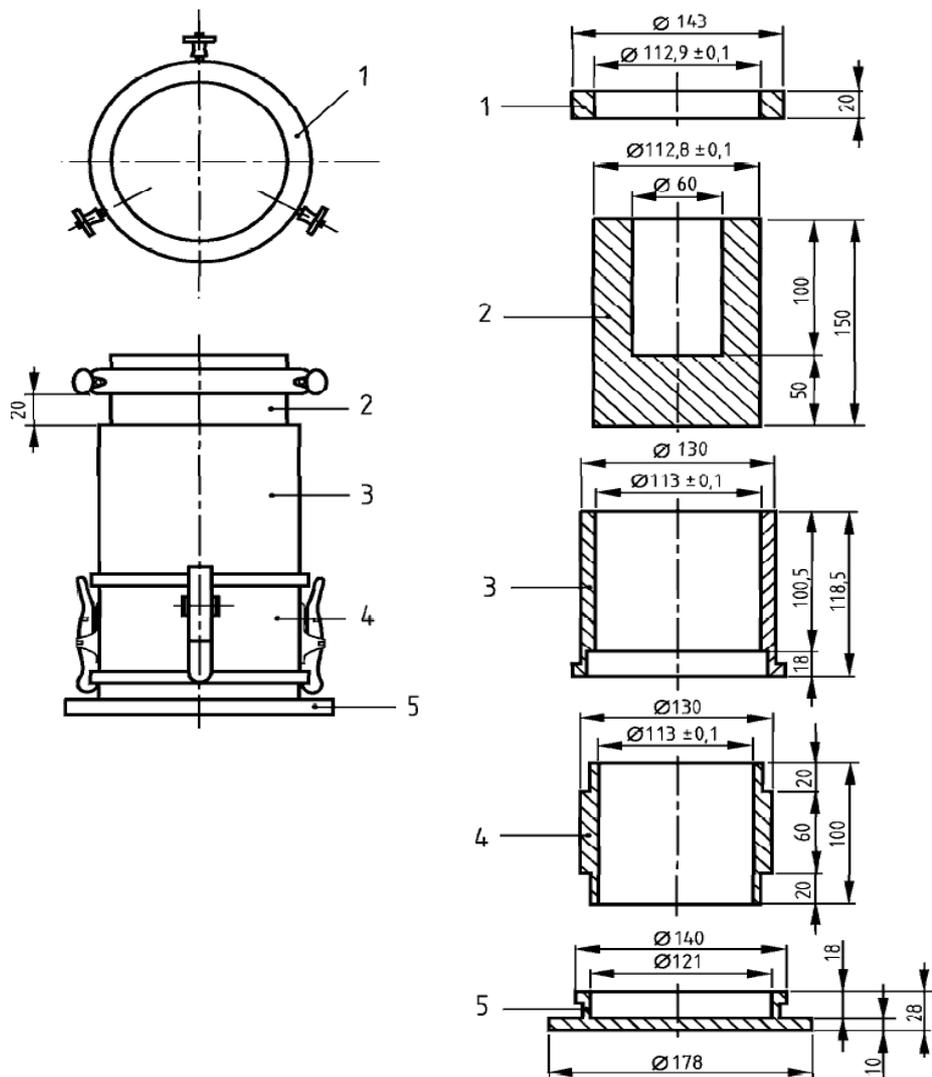
نمونه‌گیری باید بر اساس **EN932-1** انجام شود. سه نمونه با اندازه مناسب برای آزمایش آماده می‌شود و نمونه‌های با اندازه کوچک یا بزرگ، از آزمایش خارج می‌گردند.

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.

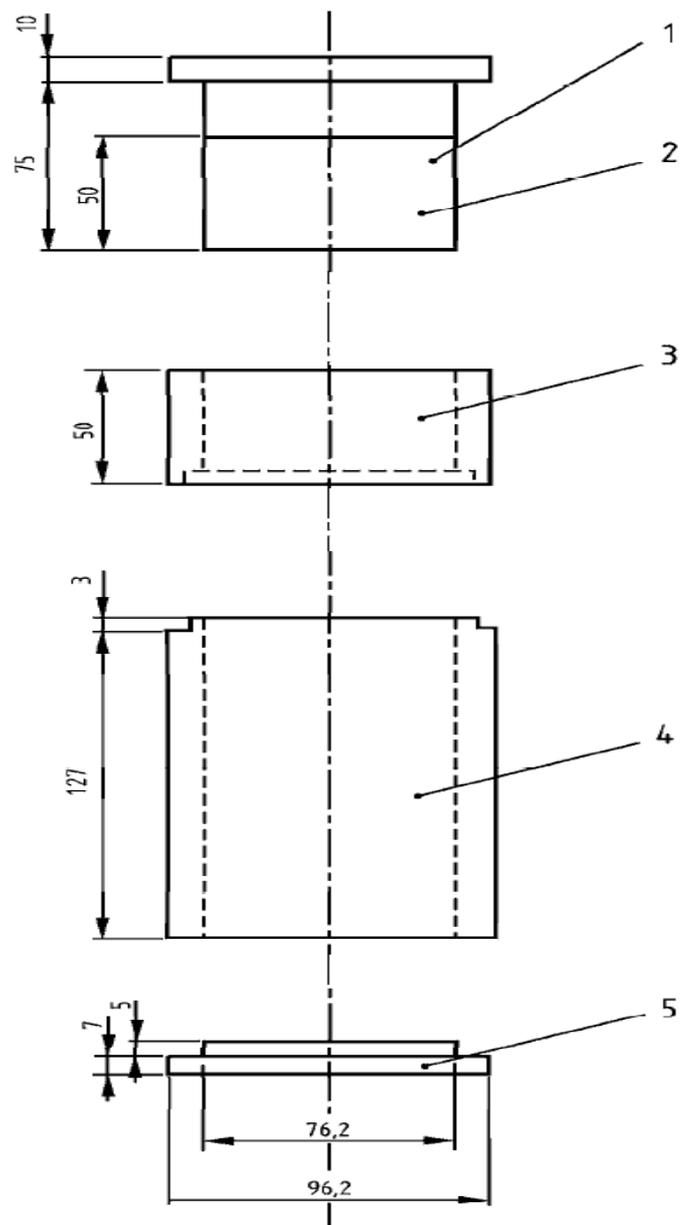
روش اول: استوانه بر روی میز لرزه قرار داده شده و سبکدانه‌های مورد آزمایش به آرامی درون آن و در کناره‌های آن ریخته می‌شوند تا سرریز گردد. باید مراقب بود تا در سبکدانه‌ها جداشدگی اتفاق نیفتد. سپس استوانه به مدت ۳ تا ۶۰ ثانیه لرزانده می‌شود. در اثر لرزش، سبکدانه‌ها متراکم می‌شوند و بخشی از بالای استوانه خالی می‌گردد. بنابراین پس از لرزش، استوانه مجدداً 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 20 mm تنظیم کرده و مجموعه در دستگاه پرس هیدرولیکی قرار داده می‌شود. نیروی پیستون افزایش یافته تا در 100 ثانیه تقریباً 20 mm به درون استوانه نفوذ کند. نیرو بر حسب نیوتن ثبت می‌شود. همین کار برای دو نمونه باقی مانده 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 مجدداً به مدت ۳ ثانیه لرزانده می‌شود. پس از آن حلقه جدا شده و مصالح اضافی از روی استوانه به پایین ریخته شده، سپس سطح سبکدانه‌ها صاف می‌شود و مجموعه در دستگاه پرس هیدرولیکی قرار می‌گیرد. نیروی وارده به پیستون به تدریج افزایش یافته تا در 100 ثانیه تقریباً به اندازه 50 mm 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_a یا C_b) بر اساس رابطه زیر محاسبه می شود:

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

در این رابطه

C_a مقاومت در برابر خردشدگی بر حسب نیوتن بر میلی متر مربع است که بر اساس آزمایش اول به دست می آید.

C_b مقاومت در برابر خردشدگی بر حسب نیوتن بر میلی متر مربع است که بر اساس آزمایش دوم به دست می آید.

L نیروی وارد بر پیستون بر حسب نیوتن

F نیروی فشاری بر حسب نیوتن

A مساحت پیستون بر حسب میلی متر مربع

مقدار میانگین نتایج سه آزمون اندازه گیری شده محاسبه شده و گزارش می شود.

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 بزرگ تر از ۴ میلی متر و با وزن مخصوص ظاهری ۱۵۰ کیلو گرم بر مترمکعب و یا بیش از آن مناسب می‌باشد.

ب-۲- اساس روش

نمونه‌ای از سبکدانه ها پس از غوطه‌ور شدن در آب در فشار اتمسفر ، تحت ۲۰ چرخه ذوب و یخ قرار می‌گیرند . این عمل شامل سرد کردن سبکدانه ها تا دمای زیر ۱۵- درجه سانتی گراد در هوا و سپس قرار دادن آن‌ها در آب با دمای ۲۰ درجه سانتی گراد می‌باشد . پس از تکمیل این چرخه ، سبکدانه ها 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 .
- دستگاه آون دارای تهویه ، با ظرفیت متناسب باحجم آن . دستگاه آون باید توانایی تنظیم دمای 110 ± 5 درجه سانتی گراد را داشته باشد .
- ترازو دارای دقت ± 0.2 گرم در وزن کردن نمونه‌هایی با وزن کمتر از ۴۰۰ گرم و دقت 0.5 گرم در وزن کردن نمونه‌هایی با وزن بیش از ۴۰۰ گرم .
- محفظه سرد ، با گردش هوا . محفظه باید امکان آن را داشته باشد که دما را در $2/5 \pm 17-$ درجه سانتی گراد نگه دارد .
- ظروف آزمایش ، ساخته شده از ورق‌های فولادی مقاوم در برابر خوردگی با مساحت کف تقریباً برابر $0.02 m^2$ و ارتفاع $100 mm$

- 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 بزرگ تر و کوچک تر از اندازه اسمی از آن جدا شده‌اند انجام گیرد .

ب - ۵ - ۱- 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 ب-۱ آمده است . تا ۵ درصد انحراف از مقادیر داده شده مجاز می‌باشد .

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

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

ب - ۵ - ۲- آماده‌کردن نمونه‌های آزمایش

نمونه‌ها شسته شده می‌شوند تا در صورتی که ناخالصی‌هایی به آن چسبیده است جدا شوند . 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 کم تر از **gr ۴۰۰** با دقت **gr ۰/۰۴**
- نمونه‌های با وزن بیش از **gr ۴۰۰** با دقت **gr ۰/۱**

ب-۶- روش آزمایش

خیس کردن

نمونه ها به مدت ۴ ساعت در فشار اتمسفر در درون ظرف‌هایی که در بخش ب-۳ شرح داده شد در دمای 20 ± 3 درجه سانتی گراد 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 100 mm بالاتر از سطح نمونه‌ها می‌ایستد، قرار می‌گیرند. برای اطمینان از عدم غوطه‌ور شدن نمونه‌ها با استفاده از توری‌های موجود نمونه‌ها کاملاً 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 حد امکان حرارت به صورت یکنواخت به همه وجوه نمونه‌ها برسد، قرار می‌گیرند. فاصله ظرف‌ها از یکدیگر و همچنین فاصله ظرف‌ها تا دیواره محفظه نباید از 50 mm کم تر باشد. بعد از قرار دادن ظروف در محفظه، دمای هوا در 20 - درجه سانتی گراد ثابت می‌شود و اجازه کم تر شدن درجه حرارت از 22 - درجه سانتی گراد و بیشتر شدن آن از 15 - درجه سانتی گراد داده نمی‌شود. در صورت لزوم، مصالح درون محفظه باید با قدرت سردکنندگی آن متناسب باشند. ظرف‌های حاوی نمونه‌ها باید حداقل ۴ ساعت در این محفظه باقی بمانند. بعد از اتمام چرخه یخ، ظروف حاوی نمونه‌ها برای مدت حداقل ۱ ساعت در آب با دمای ثابت 20 ± 3 درجه سانتی گراد قرار داده می‌شوند. بعد از اینکه آب از نمونه‌ها خارج شد، چرخه یخ مجدداً 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 کوچک ترین الکی است که در آماده کردن نمونه‌ها از آن 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 - ۲ 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 در آن

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 می‌باشد.

پیوست پ - تعیین وزن مخصوص دانه‌ای و جذب آب سبکدانه‌ها
(بر اساس ضمیمه C استاندارد 6-1097 EN)

پ - ۱ - مقدمه

این بخش از ضمیمه ، روشی را برای تعیین وزن مخصوص دانه‌ای و جذب آب سبکدانه‌های خشک با استفاده از پیکومتر ارائه می‌دهد . این روش برای ذرات بین ۴ mm تا ۳۱/۵ mm قابل استفاده است .

پ - ۲ - آماده کردن نمونه آزمایش

نمونه گیری از سنگدانه‌ها بر اساس **EN 932-1** و کاهش بر اساس **EN 932-2** انجام می‌شود . آزمایش بر روی دو نمونه انجام صورت می‌گیرد . نمونه ها باید حجمی بین ۰/۵ تا ۰/۶ لیتر داشته باشند . هر نمونه بر روی الک ۴ میلی متری شسته می‌شود تا ذرات کوچک تر از آن جدا شوند . سپس به نمونه‌ها فرصت داده می‌شود تا آب آن خارج شود . تمامی سنگدانه های باقی مانده روی الک ۳۱/۵ میلی متری از آزمایش حذف می‌شوند .

پ - ۳ - کالیبراسیون پیکومتر

پیکومتر خشک ، قیف و توری فلزی (در صورت استفاده) وزن می‌شوند (**Mp**) .
حجم پیکومتر با پر کردن آن از آب با دمای $22 \pm 3^{\circ}\text{C}$ و قرار دادن آن در حوضچه آب در دمای $22 \pm 1^{\circ}\text{C}$ برای حداقل ۱ ساعت ، تعیین می‌شود . با 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-Mp**) تعیین می‌گردد .

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

پ - ۴ - روش آزمایش

آزمایش بر روی دو نمونه انجام می‌شود . در حین آزمایش دمای حوضچه باید در دمای $22 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ثابت نگه داشته شود . پیکومتر و قیف آن و در صورت استفاده از سبکدانه هایی که غوطه‌ور می‌شوند ، پیکومتر ، توری و قیف ،

وزن می‌شوند (m_1). نمونه‌ها در کوره به دمای $110 \pm 5^\circ \text{C}$ 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 با دمای $22 \pm 1^\circ \text{C}$ ، تا محل علامت روی قیف پر شده و ۵ دقیقه وقت گرفته می‌شود. مجموعه در حوضچه آب به دمای $22 \pm 1^\circ \text{C}$ 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. مجدداً پیکومتر تا محل 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 پس 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 پس از ۲۴ ساعت اندازه‌گیری می‌شود.

پ - ۵ - محاسبات و ارائه نتایج

برای هر نمونه، وزن مخصوص دانه‌ای (ρ_a) سبکدانه‌ها بر حسب تن بر مترمکعب 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:

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

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

ρ_w وزن مخصوص آب در دمای 22°C

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

V_B حجم پیکومتر و توری (در صورت استفاده) کالیبره شده بر حسب میلی لیتر

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 وزن مخصوص سنگدانه‌ها تا مقداری نزدیک ۰/۰۰۱ میلی گرم بر مترمکعب باید اندازه گیری شوند. میانگین مقادیر به دست آمده از دو نمونه با دقت ۰/۰۱ میلی گرم بر مترمکعب، همان اندازه وزن مخصوص سنگدانه 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 اندازه گیری 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 (در صورت 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.

تهران ، خیابان دکتر بهشتی، نرسیده به میدان تختی، پلاک ۱۸۵

تلفن: ۱۲-۸۵۲۷۹۰۹ فکس: ۸۷۴۶۰۱۱

info@leca.ir

www.leca.ir

