



انستیتو مصالح ساختمانی
دانشکده فنی دانشگاه تهران

Leca®

شرکت لیکا

(سهامی خاص)

سبکدانه سازه‌ای





موضوع :

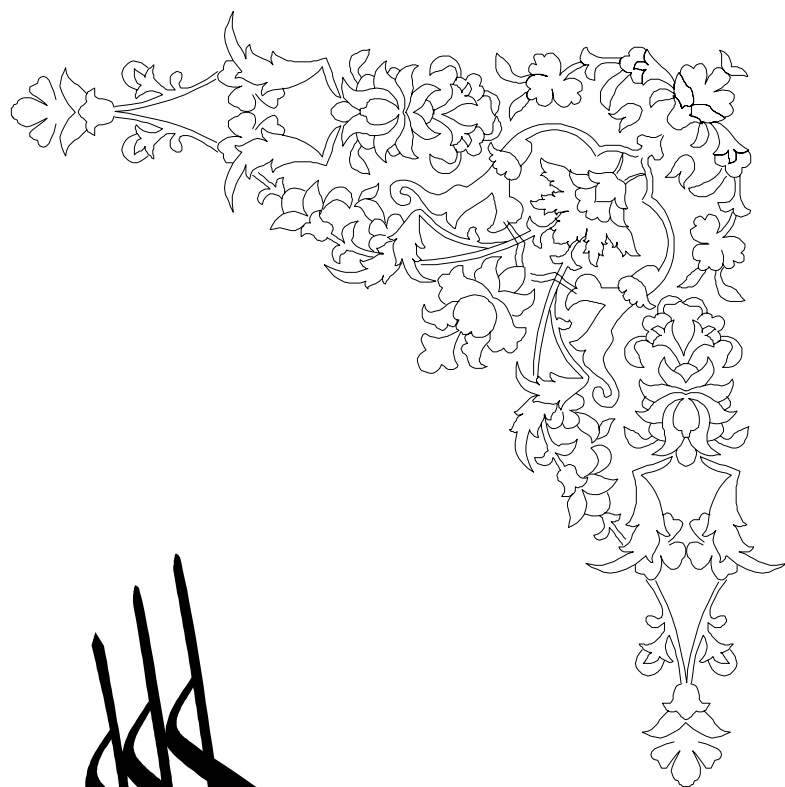
بررسی سبکدانه لیکا سازه ای
بخش اول : گزارش نهائی تعیین ظرفیت مقاومتی

کارفرما : شرکت لیکا

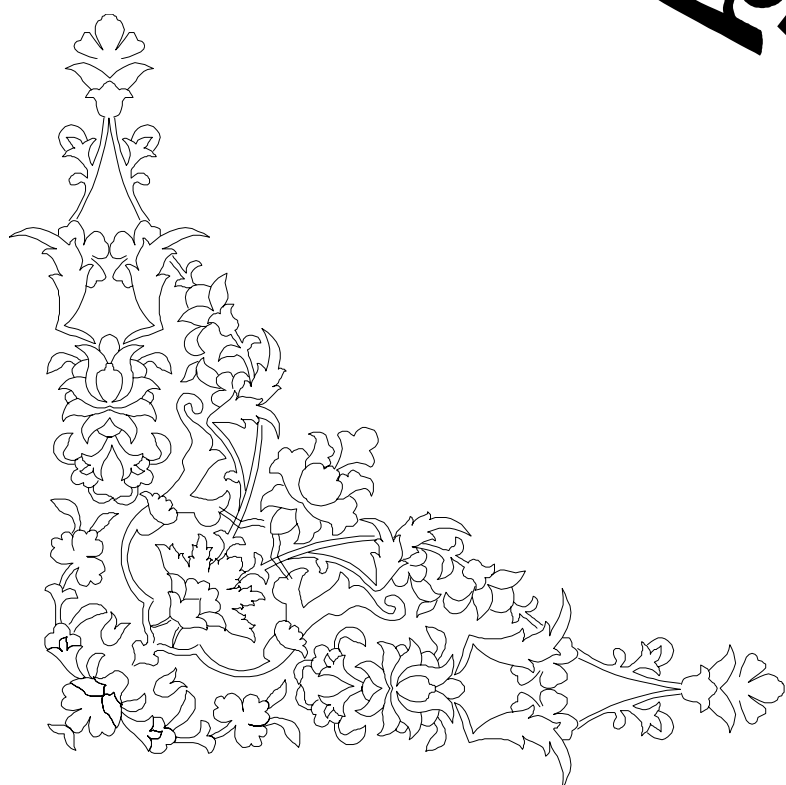
شماره گزارش : CMI-8606234

شماره قرار داد : ۱۴۳/۱۴۳۱۴

تاریخ ارسال : ۱۳۸۶/۶/۳۱



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



پیشگفتار الف

۱- مقدمه ۱

۲- حدود خدمات ۲

۳- بررسی پیشینه تحقیق ۳

۳-۱- تاریخچه بتن سبک ۳

۳-۲- روش های تولید بتن سبک ۷

۳-۲-۱- بتن اسفنجی ۷

۳-۲-۲- بتن های با ساختار باز ۸

۳-۲-۳- بتن سبکدانه ۸

۳-۳- طبقه بندی بتن سبک بر مبنای مقاومت ۹

۳-۳-۱- بتن سبک غیرسازه ای ۹

۳-۳-۲- بتن سبک نیمه سازه ای ۱۰

۳-۳-۳- بتن سبک سازه ای ۱۰

۳-۴- مشخصات عمومی بتن سبک ۱۱

۳-۴-۱- مقاومت فشاری بتن سبکدانه ۱۲

۳-۴-۲- مقاومت کششی و خمشی بتن سبکدانه ۱۲

۳-۴-۳- مدول الاستیسیته بتن سبکدانه ۱۳

۳-۴-۴- پایداری بتن سبکدانه ۱۴

۳-۴-۵- ریز ساختار بتن سبکدانه ۱۵

۳-۵- سبکدانه های مورد استفاده در بتن سبک ۱۶

۳-۵-۱- وزن مخصوص سبکدانه ها ۱۷

۳-۵-۲- مشخصات سبکدانه های موجود در ایران ۱۷

الف- سنگ پا ۱۷

ب- پوکه معدنی یا پومیس ۱۸

ج- توف ۱۹

د- لیکا ۲۰

* لیکای سوئد ۲۰

* لیکای نروژ ۲۰

* لیکای ایران ۲۰

۳-۶- تئوری ظرفیت مقاومتی ۲۱

۴- خدمات آزمایشگاهی.....	۲۵
۴-۱- آزمایش های انجام گرفته بر روی سبکدانه.....	۲۵
۴-۱-۱- وزن مخصوص.....	۲۵
۴-۱-۲- دانه بندی.....	۲۷
۴-۱-۳- مقاومت غیر مستقیم از آزمایش سایش لس آنجلس.....	۲۷
۴-۱-۴- جذب آب.....	۲۹
۴-۱-۵- خلاصه نتایج آزمایشهای سبکدانه ها.....	۳۲
۴-۲- آزمایش های انجام گرفته بر روی بتن سبکدانه.....	۳۳
۴-۲-۱- روش تعیین ظرفیت مقاومتی.....	۳۳
۴-۲-۲- طرح اختلاط های ساخته شده.....	۳۴
۴-۲-۳- روش اختلاط، نمونه برداری و قالب گیری.....	۳۷
۴-۲-۴- مقاومت فشاری.....	۳۷
۴-۲-۵- وزن مخصوص بتن سخت شده.....	۴۲
۴-۲-۶- بررسی نتایج به دست آمده.....	۴۳
الف- نمودار ظرفیت مقاومتی سبکدانه لیکا ۵۰۰.....	۴۴
ب- نمودار ظرفیت مقاومتی سبکدانه لیکا ۷۰۰.....	۴۶
ج- مقایسه نمودار ظرفیت مقاومتی سبکدانه های آزمایش شده.....	۴۷

۵- نتیجه گیری..... ۵۰

پیوست یک: جزئیات مقادیر مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتن سخت شده.....	۵۲
پیوست دو: جزئیات مقادیر جذب آب سبکدانه های لیکا.....	۵۸
پیوست سه: واژه نامه.....	۶۰

پیشگفتار

امروزه در دنیا احداث ساختمان و سازه های زیربنایی با سرعت زیادی در حال انجام است. استفاده از مصالح قدیمی و روش های سنتی ساخت دیگر جوابگوی سرعت مورد نظر و نیاز های طراحی نمی باشد. از این رو استفاده از مصالح جدید و کارا به همراه تکنیکهای نوین در ساخت و ساز امر اجتناب ناپذیری محسوب می شود. بتن سبکدانه سازه ای از جمله این مصالح کارا محسوب می شود که استفاده از آن در اروپا و آمریکا به حدود ۵۰ سال پیش برمی گردد. با توجه به گذشت چند سال از شروع استفاده از این نوع بتن در دنیا و کسب تجارب گوناگون، امروزه استفاده از بتن سبکدانه متداول شده است.

با توجه به وجود منابع عظیم رس به منظور تولید سبکدانه سازه ای مصنوعی در ایران، هنوز بتن سبکدانه سازه ای به صورت صنعتی در کشور تولید نمی گردد. باوجود اینکه ایران برروی نوار زلزله هیمالیا - آلپ (آلیاید) واقع شده است و سبک سازی ساختمان ها باعث کاهش نیروی وارد بر آن ها و در نتیجه کاهش خسارات و تلفات مالی و جانی می شود، تاکنون توجه لازم به بتن سبکدانه در ایران صورت نگرفته است. این درحالی است که آمار قابل توجه تلفات جانی در زلزله های اخیر توجه به رویکرد سبک سازی را ضروری می سازد. بر مبنای مطالعات انجام گرفته، علت اصلی عدم استقبال دست اندرکاران ساخت و ساز کشور از بتن سبک را می توان به کم بودن مقاومت بتن های سبکدانه ساخته شده نسبت داد. دلیل عمده کم مقاومت بودن بتن های سبکدانه سازه ای ساخته شده در ایران نازل بودن کیفیت سبکدانه های استفاده شده در این بتن ها می باشد. به دلیل کم بودن مقاومت سبکدانه های مورد نیاز برای تولید بتن سبک، مصرف سیمان برای دستیابی به مقاومت مورد نیاز افزایش یافته و در نتیجه ساخت بتن سبک با این سبکدانه ها غیر اقتصادی می گردد. تحقیقات نشان می دهد که سبکدانه های طبیعی که سابق بر این برای ساخت بتن سبک به کار رفته اند جوابگوی تولید بتن سبکدانه سازه ای نمی باشد و تنها تعداد محدودی از سبکدانه های مصنوعی مقاوم قابلیت تولید بتن سبکدانه سازه ای را دارا می باشند.

به منظور ترویج ساخت و استفاده از بتن سبکدانه سازه ای در کشور، انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران و شرکت لیکا تحقیقات جدیدی برای تولید سبکدانه های سازه ای را آغاز نمودند که نتیجه آن تولید سبکدانه لیکا سازه ای ۵۰۰ و ۷۰۰ توسط شرکت لیکا ایران می باشد. امید است که تولید این سبکدانه ها بتواند شروع مناسبی برای کاربرد بتن سبک سازه ای برای ساخت و سازهای مهندسی باشد. این گزارش که حاصل تجربه چندین ساله مولفین و آزمایش های صورت گرفته در انستیتو مصالح ساختمانی می باشد، به بررسی ظرفیت مقاومتی این سبکدانه ها و بتن های ساخته شده با آن ها پرداخته است. گزارشات تکمیلی درمورد مشخصات

مکانیکی بتنهای سبک ساخته شده، تعیین طرح اختلاط بهینه بر مبنای مقاومت مورد نیاز و سبکدانه مورد استفاده و نظایر آن پس از پیشرفت و اتمام آزمایشهای مراحل مختلف ارایه خواهد شد. امید است این مجموعه از یک سو به پیشبرد صنعت ساخت و ساز در کشور که از اهداف عالی دانشگاه و صنعت می باشد و از سوی دیگر به کاهش میزان تلفات جانی در زلزله، کمک موثری نماید. در پایان از همکاری آقایان مهندس نمدمالیان و مهندس نعمت الهی از شرکت لیکا و آقایان یکتا، فرشچیان، نازنینی دانشجویان دانشکده فنی دانشگاه تهران و همچنین آقای ریحانی و آقای گلزاری تکنسینهای انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران که ما را در تهیه این مجموعه یاری دادند تشکر می شود. پیشاپیش از تذکرات و رهنمودهای کلیه پژوهشگران و صاحب نظران در جهت اصلاح این مجموعه قدردانی می گردد.

محمد شکرچی زاده

نیکلاس علی لیبر

مهرداد ماهوتیان

انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران

انجام آزمایش ها و ارائه نتایج آن در گزارش حاضر، در راستای قرارداد به شماره ۱۴۳/۱۴۳۱۴ مورخ ۱۳۸۵/۱۰/۲۷ صورت گرفته است. این گزارش شامل آزمایشهای انجام شده بر روی دو نوع سبکدانه سازه ای به نامهای لیکا ۵۰۰ و لیکا ۷۰۰ می باشد. تفسیر کلی نتایج به دست آمده از آزمایشهای انجام شده بر روی سبکدانه های لیکای سازه ای نیز در این گزارش ذکر شده است. این گزارش به عنوان گزارش نهایی طرح پژوهشی تلقی می گردد. براساس قرارداد منعقد شده مابین کارفرما و پژوهشگر، انجام آزمایش های لازم برای تعیین ظرفیت مقاومتی بتن سبکدانه با استفاده از سبکدانه های ارسالی کارفرما، موضوع اصلی این گزارش می باشد.

۲- حدود خدمات

خدمات مشاوره ای مذکور در این گزارش شامل تعیین ظرفیت مقاومتی سبکدانه های لیکای سازه ای و تعیین مشخصات عمومی بتنهای سبک ساخته شده با آنها می باشد. بنابراین بهینه سازی طرح اختلاط بر مبنای مقاومت و کارایی مورد نیاز و تعیین مشخصات رئولوژیکی (رفتاری) بتن سبک تازه و پایایی بتن سخت شده موضوع بحث این گزارش نمی باشد. در ادامه همکاریهای مشترک کارفرما و پژوهشگر، این مطالب در گزارشهای آتی و پس از انجام آزمایشهای لازم بررسی و ارایه خواهد شد.

۳- بررسی پیشینه تحقیق

۳-۱- تاریخچه بتن سبک

اولین گزارشهای تاریخی در مورد کاربرد بتن سبک و مصالح سبک وزن به روم باستان بر می گردد. رومیان در احداث معبد پانتئون (شکل ۳-۱) و ورزشگاه کلوزیوم (شکل ۳-۲) از پومیس که نوعی مصالح سبک است استفاده کرده اند. کاربرد بتن سبکدانه پس از تولید سبکدانه های مصنوعی و فراوری شده در اوایل قرن بیستم وارد مرحله جدیدی شد. در سال ۱۹۱۸، S. J. Hayde با استفاده از کوره دوار اقدام به منبسط کردن رس و شیل کرد و بدین ترتیب سبکدانه ای مصنوعی تولید کرد که از آنها در ساخت بتن استفاده شد. وی نام این سبکدانه ها را هایدیت نهاد. تولید تجاری روباره های منبسط شده نیز از سال ۱۹۲۸ آغاز گردید.

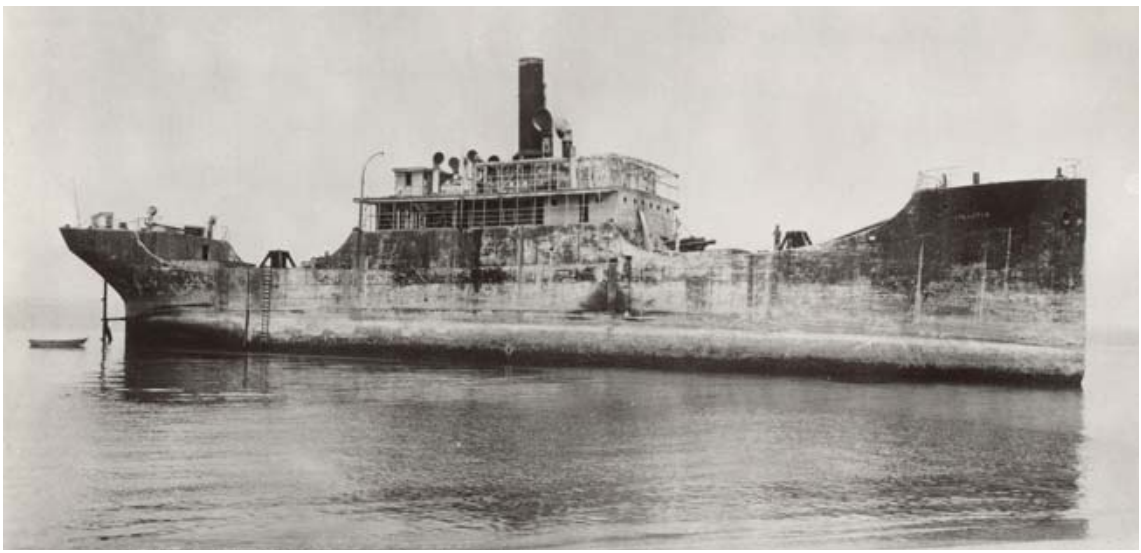


شکل ۳-۲- ورزشگاه کلوزیوم



شکل ۳-۱- معبد پانتئون

سبکدانه های مصنوعی در هنگام جنگ جهانی اول به دلیل محدودیت دسترسی به ورق فولادی برای ساخت کشتی به کار رفت. کشتی Atlantus به وزن ۳۰۰۰ تن (شکل ۳-۳) که با بتن سبک هایدیتی ساخته شد و در اواخر سال ۱۹۱۸ به آب افتاد. در سال ۱۹۱۹ کشتی Selma به وزن ۷۵۰۰ تن و طول ۱۳۲ متر (شکل ۳-۴) با همین نوع بتن ساخته و به آب انداخته شد. تا آخر جنگ جهانی اول و سپس تا سال ۱۹۲۲ کشتی ها و مخازن شناور متعددی ساخته شد که یکی از آن ها Peralta (شکل ۳-۵) تا سال های اخیر شناور بود.



شکل ۳-۳- کشتی *Atlantus*



شکل ۳-۴- کشتی *Selma*



شکل ۳-۵- کشتی *Peralta*

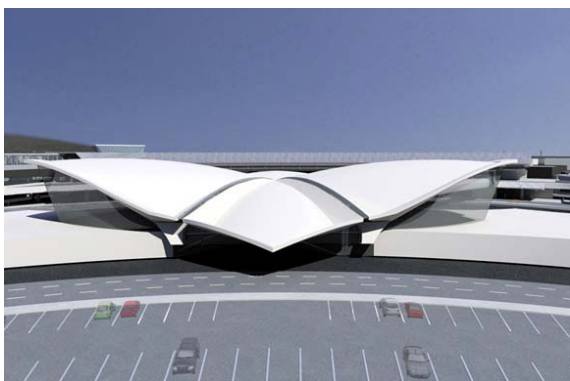
برنامه ساخت کشتی ها که پس از جنگ جهانی اول متوقف شده بود دوباره در اواسط جنگ جهانی دوم به دلیل محدودیت تولید ورق فولادی مورد توجه قرار گرفت. تا پایان جنگ جهانی دوم ۲۴ کشتی اقیانوس پیما و ۸۰ بارج دریایی با استفاده از بتن سبک ساخته شد که ساخت آن ها در دوران صلح، اقتصادی محسوب نمی گردید. ظرفیت این کشتی ها ۳ تا ۱۴۰.۰۰۰ تن بود.

در طی سال های ۵۰ و ۶۰ میلادی ساختمان ها و پل های زیادی با بتن سبک در دنیا ساخته شد. در این مدت بیش از ۱۵۰ پل و ساختمان در ایالات متحده و کانادا با این نوع بتن، مورد بهره برداری قرار گرفت. در سال ۱۹۴۸ اولین ساختمان با استفاده از شیل منبسط شده در پنسیلوانیای شرقی احداث گردید. در ادامه، از سال ۱۹۵۰ ساخت بتن سبک گازی اتوکلاو شده در انگلستان متداول شد. اولین ساختمان بتن سبکدانه مسلح در این کشور که یک ساختمان سه طبقه بود در سال ۱۹۵۸ و در شهر برنت فورد احداث گردید.

ساختمان هتل پارک پلازا در سنت لوئیز (شکل ۳-۶) و ساختمان ۱۴ طبقه اداره تلفن بل جنوب غربی در کانزاس سیتی در سال ۱۹۲۹ از جمله ساختمان های دهه ۲۰ و ۳۰ میلادی ساخته شده در آمریکای شمالی با استفاده از بتن سبک هستند. ساختمان ۴۲ طبقه در شیکاگو، ترمینال TWA در فرودگاه نیویورک (شکل ۳-۷) در سال ۱۹۶۰، فرودگاه Dulles در واشنگتن (شکل ۳-۸) در سال ۱۹۶۲، کلیسایی در نروژ در سال ۱۹۶۵، پلی در وایسبادن آلمان در سال ۱۹۶۶ و پلی در روتردام هلند در سال ۱۹۶۸ از جمله ساختمان هایی هستند که با بتن سبکدانه ساخته شده اند.



شکل ۳-۶- ساختمان هتل پارک پلازا در سنت لوئیز



شکل ۳-۷- ترمینال TWA در فرودگاه نیویورک



شکل ۳-۸- فرودگاه Dulles در واشنگتن

در هلند، انگلستان، ایتالیا و اسکاتلند نیز در دهه ۷۰ و ۸۰ میلادی پل هایی با دهانه های مختلف ساخته و با موفقیت بهره برداری شده اند. در دهه ۱۹۷۰ ساخت بتن سبکدانه پرمقاومت آغاز شد و در دهه ۸۰ به دلیل نیاز برخی شرکت های نفتی در امریکا و نروژ برای ساخت سازه ها و مخازن ساحلی و فراساحلی مانند سکوهای نفتی یک رشته تحقیقات وسیع برای ساخت بتن سبکدانه پرمقاومت در این دو کشور با هدایت واحد آغاز شد که نتایج آن در اواخر دهه ۸۰ و اوایل دهه ۹۰ منتشر گردید.

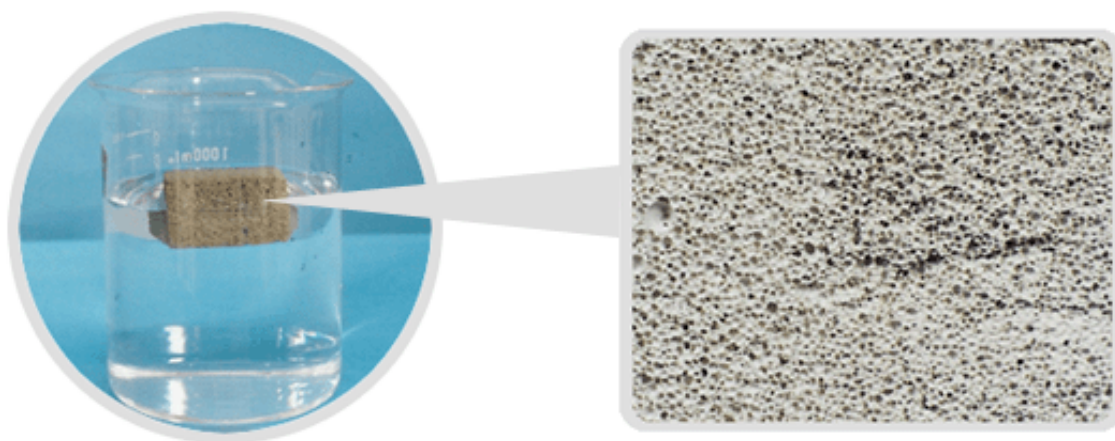
در سالیان اخیر نیز استفاده از بتن سبک در دال سقف ساختمانهای بلند مرتبه، عرشه پلهای با دهانه های بلند و دیگر موارد مشابه و همچنین کاربردهای خاص مانند عرشه و پایه دکلهای استخراج نفت کاربرد فراوانی یافته است.

۳-۲- روش های تولید بتن سبک

روشهای گوناگونی برای سبک کردن بتن و تولید بتن سبک به کار گرفته شده است که می توان عمومی ترین آنها را به سه دسته تقسیم کرد.

۳-۲-۱- بتن اسفنجی: دسته اول بتن های اسفنجی که در حین ساخت آنها با ایجاد کف یا حباب گاز،

حبابهایی در خمیر سیمان یا در ملات سیمان - سنگدانه ایجاد می گردد. 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 حبابها و توزیع یکنواخت آنها 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 ۳-۹)



شکل ۳-۹- بتن اسفنجی

۳-۲-۲- بتن های با ساختار باز: این بتن ها در واقع بدون ریز دانه هستند و در آن ها ماسه از مخلوط

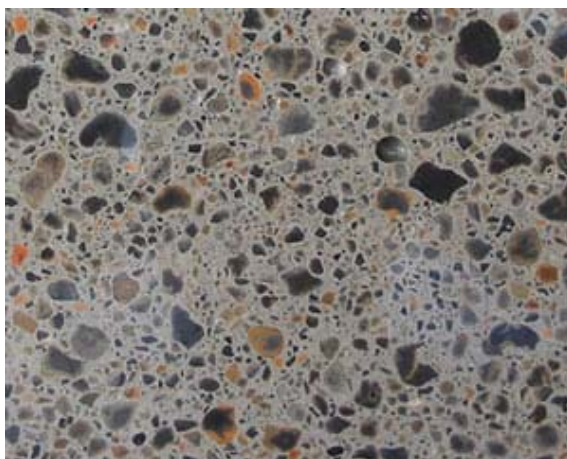
بتن حذف گردیده و دانه های درشت با خمیر سیمان به یکدیگر چسبیده اند. ساخت بتن سبک با ساختار باز، هم با استفاده از سنگدانه های طبیعی و هم با استفاده از سبکدانه امکان پذیر است. این بتن ها برای مصارفی چون زهکش و یا پرکننده های سبک به کار می روند. وزن مخصوص این بتن ها عمدتاً در محدوده ۷۰۰ تا ۱۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب قرار می گیرد. (شکل ۳-۱۰)



شکل ۳-۱۰- بتن با ساختار باز

۳-۲-۳- بتن سبکدانه: دسته سوم، بتن با سنگدانه سبک یا به اختصار بتن سبکدانه است. در این نوع

بتن، سبک کردن از طریق استفاده از سنگدانه های سبک صورت می گیرد. لازمه ساخت این نوع بتن استفاده از سبکدانه مناسب با ویژگیهای مورد نیاز است. سبکدانه ها را می توان به سبکدانه سازه ای و غیر سازه ای و طبیعی و مصنوعی تقسیم بندی نمود. عمده بتنهای سبکی که دارای کاربرد سازه ای هستند در طبقه بندی بتن سبکدانه قرار می گیرد. به دلیل آنکه موضوع بحث این گزارش بتن سبک سازه ای می باشد در ادامه این گزارش به بررسی بتنهای سبکدانه پرداخته می شود. منظور از بتن سبک در ادامه این گزارش بتن سبکدانه می باشد مگر آنکه خلاف آن ذکر شده باشد. حداکثر وزن مخصوص بتن سبک سازه ای به ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب محدود می شود. ساخت بتن سبکدانه سازه ای با وزن مخصوص کمتر از ۱۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب نیز معمولاً عملی نمی باشد. (شکل ۳-۱۱)



شکل ۳-۱۱- بتن سبک/انه

۳-۳- طبقه بندی بتن سبک بر مبنای مقاومت

علاوه بر طبقه بندی بتن سبک از لحاظ روش ساخت، این بتن‌ها بر مبنای مقاومت نیز طبقه بندی می گردند. بتن‌های سبک از دیدگاه مقاومتی در سه دسته طبقه بندی می شوند که عبارتند از بتن سبک غیرسازه‌ای، بتن سبک نیمه سازه‌ای یا بتن سبک با مقاومت متوسط و بتن سبک سازه ای که در ادامه به آن پرداخته می شود.

۳-۳-۱- بتن سبک غیرسازه‌ای: بتن های سبک با مقاومت کمتر از ۷ مگاپاسکال در رده بتنهای سبک

غیر سازه ای طبقه بندی می شوند. 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 معمولی، موجب افزایش وزن بتن و مقاومت آن می شود، 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 می گردد. به عنوان مثال بتن‌هایی با مقاومت فشاری حدود ۰/۷ مگاپاسکال و کمتر برای عایق‌سازی لوله‌های بخار زیرزمینی

مناسب هستند و از بتن‌های با مقاومت زیادتر تا حدود ۳/۵ مگاپاسکال بیشتر در پیاده‌روها استفاده می‌شود. باید توجه داشت که جمع شدگی بتن‌های سبک در هنگام خشک شدن در اکثر موارد و به خصوص در موارد حذف سنگدانه‌های درشت از مخلوط، همواره مشکل‌ساز است.

۳-۳-۲- 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 چگالی 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 پوکه 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 مگاپاسکال تغییر می‌کند. کاربرد مواد افزودنی نظیر تسریع‌کننده‌ها و روان‌کننده‌ها می‌تواند در تغییر مقاومت بتن‌های ساخته شده با سنگدانه‌های تولید شده از روش‌های مذکور موثر باشد. کاربرد این بتن‌ها معمولاً در بلوک‌های مجوف بتنی، کف‌سازیه‌ها و موارد مشابه است.

۳-۳-۳- بتن سبک سازه‌ای: بتن‌های سبک سازه‌ای بتن‌هایی هستند که علی‌رغم دارا بودن چگالی

کمتر از ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت فشاری بیش از ۱۷ مگاپاسکال دارند. ساخت این بتن‌ها صرفاً با استفاده از سنگدانه‌های سبک و مقاوم امکان‌پذیر است. اکثر بتن‌های سبک سازه‌ای از خانواده بتن‌های سبکدانه می‌باشند که در آن برای کاهش وزن مخصوص بتن از سنگدانه‌های سبک استفاده شده است. به این دلیل بعضاً از عبارات بتن سبکدانه و بتن سبک سازه‌ای برای بیان یک مفهوم استفاده می‌شود. سنگدانه‌هایی که این شرایط را عموماً برآورد می‌کنند و طبق استاندارد ASTM-C330 برای ساخت بتن سبک سازه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند عمدتاً عبارتند از:

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

ب) سنگدانه‌هایی که از فرآیند تبادل یونی به دست می‌آیند مانند لیکا

ج) روباره‌های منبسط شده

د) پوکه‌های معدنی مانند اسکریا و پومیس

ه) پوکه‌های صنعتی

و) سبکدانه‌های تولید شده از خاکستر بادی گندوله شده

تأمین مقاومت فشاری معادل ۲۰ مگاپاسکال و بیشتر با بعضی از این سنگدانه‌ها امکان‌پذیر 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 متأثر از وزن مخصوص سنگدانه‌های مصرفی است، به گونه‌ای که استفاده از مصالح سبکتر موجب کاهش وزن مخصوص بتن می‌شود. لازم به ذکر است که استفاده از سبکدانه‌های سنگین‌تر، 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 می‌باشد. بیشترین مقاومت بتن سبکدانه معمولاً وقتی حاصل می‌شود که از سبکدانه‌های سازه‌ای که مقاومت آن برابر یا بیش از مقاومت ماتریس سیمان باشد برای سبک سازی بتن استفاده گردد. سبکدانه‌های سازه‌ای مقاوم که در ساخت بتن سبک پرمقاومت به کار رفته اند عمدتاً ساخته شده از شیل، رس و اسلیت منبسط شده در فرآیند کوره دوار می‌باشند.

۳-۴- مشخصات عمومی بتن سبک

مصالح سبک وزنی که از آن‌ها به عنوان سنگدانه در ساخت بتن استفاده می‌شود، محدوده وسیعی دارند و با به کار بردن مصالح و روش‌های مناسب، وزن مخصوص بتن می‌تواند 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 مقاومت‌های بیشتری را نیز نتیجه گرفت.

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 محققین 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 محققین مختلف توجه به نوع مصالح به کار رفته در ساخت بتن سبک و سایر عوامل تاثیر گذار بر مشخصات بتن ضروری است.

مقاومت بتن معمولاً با افزایش عیار سیمان زیاد می شود. 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 سبکدانه ها می باشد. به این ترتیب انتخاب سبکدانه متناسب برای ساخت اقتصادی بتن سبک با مقاومت معین اهمیت بیشتری پیدا می کند.

در ادامه مروری اجمالی بر بخشی از مشخصات عمومی بتن سبکدانه شامل مقاومت، پایداری و ریز ساختار بتن سبکدانه انجام می شود.

۳-۴-۱ مقاومت فشاری بتن سبکدانه: حداقل مقاومت ۲۸ روزه بتن سازه ای در آئین نامه های مختلف

از ۱۵ تا ۱۷/۵ مگاپاسکال تغییر می کند. برای نمونه آئین نامه بتن ایران، آباء، این حد را ۱۶ مگاپاسکال، آئین نامه بتن آمریکا، ACI، ۱۷ مگاپاسکال و آئین نامه بتن انگلیس CP110، این حد را ۱۵ مگاپاسکال تعیین می کنند. البته حداقل مقاومت مجاز بتن برای اعضای پیش تنیده متفاوت است. برای مثال آئین نامه انگلیس، حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه مجاز اعضای پس تنیده را ۳۰ مگاپاسکال اعلام می کند. این حد برای اعضای پیش تنیده - پیش ساخته ۴۰ مگاپاسکال است. این حداقل مقاومت ها گزینه های مجاز طراح را در انتخاب نوع سنگدانه محدود می کند. برای استفاده از بتن سبک در این موارد باید بررسی های فنی و اقتصادی بیشتری صورت گیرد.

۳-۴-۲ مقاومت کششی و خمشی بتن سبکدانه: برای تعیین مقاومت کششی بتن معمولی از

آزمایش برزلی استفاده می شود. 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 می توان از آزمایش کشش غیر مستقیم (برزلی) به دست آورد. در این جا نیز مشابه بتنهای معمولی می توان رابطه ای بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن سبک به دست آورد. آئین نامه های اروپائی روابط زیر را برای تخمین مقاومت کششی بتن پیشنهاد می کنند:

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

$$f_t = 0.375 \left(0.3 + 0.7 \frac{p_{ic}}{p_{oc}} \right) \sqrt{f'_c}$$

که در رابطه بالا:

f_t مقاومت کششی بر حسب مگاپاسگال، f'_c مقاومت فشاری نمونه مکعبی بر حسب مگاپاسگال، p_{ic} وزن مخصوص نمونه بتن سبک خشک شده در هوا و p_{oc} وزن مخصوص بتن معمولی خشک شده در هوا است. با وجود روابط داده شده در عمل تغییرات زیادی مشاهده می شود. 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 می شود. برای مثال مقاومت خمشی بتنهای با مقاومت بیشتر از ۵۰ مگاپاسگال در صورت عمل آوری در شرایط خشک حدود ۵۰٪ کاهش می یابد. برای بهبود مقاومت خمشی و کششی می توان مقداری ماسه معمولی را جایگزین ریزدانه سبک کرد. البته در این صورت وزن بتن افزایش می یابد و طراح باید به نکات منفی این امر نیز توجه داشته باشد.

۳-۴-۳- 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 می شود. مدول الاستیسیته بتن سبک به پارامترهای مختلفی بستگی دارد ولی به متغیرهای میزان تخلخل بتن، نوع سبک دانه، مقاومت فشاری و وزن مخصوص بستگی بیشتری دارد. برای مثال می توان از جدول ۱-۳ حدود مدول الاستیسیته بتن های ساخته شده از سبک دانه های مختلف را مشاهده کرد.

جدول ۳-۱- 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 اما در عمل کاهش مدول الاستیسیته بتن تا ۰/۲۵ نیز مشاهده شده است. برای افزودن بر مدول الاستیسیته بتن می توان از جایگزینی بخشی از ریزدانه سبک با ماسه طبیعی استفاده کرد.

۳-۴-۴ پایایی بتن سبکدانه : علاوه بر مقاومت، بتن باید در طول عمر خود نیز بتواند شرایط مطلوب

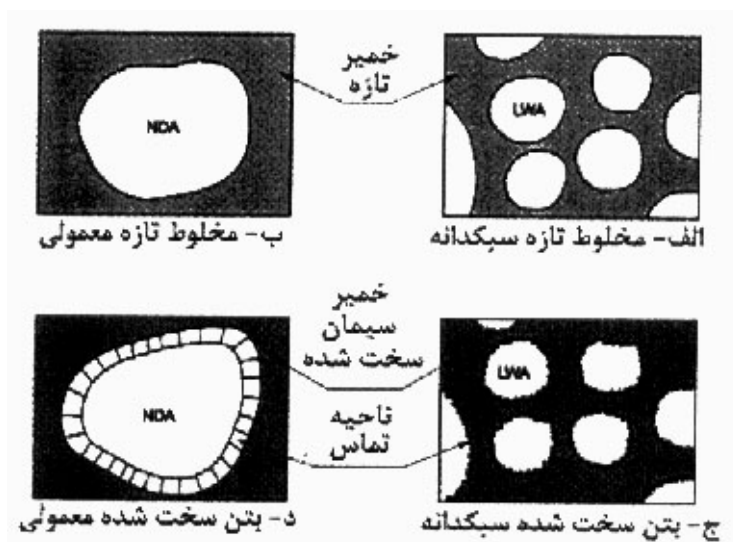
اولیه را داشته باشد. برای نمونه بتن باید نه تنها از مقاومت فشاری کافی برخوردار باشد، بلکه در برابر سیکل ذوب و یخ، واکنش های سیلیکاتی قلیایی و خوردگی آرماتور مقاومت کافی را داشته باشد.

از این رو برای تامین 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 تامین 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.

۳-۴-۵- ریز ساختار بتن سبکدانه : بتن سبکدانه نیز مانند بتن معمولی چند فازی است. در مرحله

اختلاط، ریختن و تراکم می توان 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 می شوند. این امر در شکل شماره ۳-۱۲ مشاهده می گردد. به هر حال این ویژگی بتن به سطح دیدگاه بستگی دارد. سطح دیدگاه شامل سطح کلان نگر، سطح میانه و سطح ریز نگر می باشد.

از دید کلان نگر که خواص مهندسی بتن تعیین می شود، بتن مصالح همگن تلقی می گردد. این خواص شامل ویژگی های فیزیکی - مکانیکی و تابع زمان می باشد. از دید میانه، در مقیاس میلی متر تا سانتیمتر، بتن دارای دو یا سه فاز می باشد. از دید ریز نگر، فرایندهای هیدراتاسیون و شکل گیری ریز ساختار توضیح داده می شود که در آن ویژگی های ناحیه لایه مرزی سنگدانه و خمیر سیمان تشریح می گردد. خواص لایه مرزی (انتقالی یا تماس) به خصوصیات سطح سنگدانه و ساختار منافذ و رطوبت اولیه سنگدانه ها بستگی دارد. با توجه به ساختار منافذ سنگدانه، حتی برخی فرآورده های واکنش آب و سیمان مانند هیدروکسید کلسیم می تواند به داخل منافذ سنگدانه نفوذ کند. این پدیده بیشتر در منافذ بزرگتر و سنگدانه هایی با جذب آب بیشتر اتفاق می افتد.



شکل ۳-۱۲- اختلاف ساختار بتن سبکدانه و معمولی در سطح میانه نگر

ساده ترین 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) می باشد. خواص مکانیکی مصالح تحت تأثیر خواص هر فاز و اندر کنش بین فازها می باشد.

معمولاً بتن سبکدانه شامل سبکدانه و سنگدانه معمولی است که از نظر خواص متفاوتند. در این حالت مدل دو فازی را می توان اصلاح نمود و ماسه معمولی را در فاز خمیر سیمان منظور کرد یعنی یک فاز ملات و یک فاز سبکدانه بدست می آید. 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 می گذارد و محل ترک های اولیه را مشخص می کند و بنابر این توسعه گسیختگی و شکست بتن را تعیین می نماید. در وهله اول، سنگدانه معمولی به خاطر داشتن مدول الاستیسیته بیشتر، تنش بیشتری را جذب می کند. اختلاف در صلبیت، موجب ایجاد تنش کششی عرضی در لایه مرزی خمیر سیمان و سنگدانه می گردد. اختلاف موجود در ضریب پواسون می تواند تنش کششی عرضی را افزایش دهد و حتی تیزگوشگی سنگدانه ها تمرکز تنش کششی موضعی را باعث می شود.

با این وجود شباهت بیشتر مدول الاستیسیته فاز سبکدانه و فاز ملات باعث توزیع یکنواخت تر تنش در بتن سبکدانه می شود. با افزایش بارگذاری، ترکها عمدتاً از سبکدانه ها آغاز شده و گسترش می یابند. این امر بر خلاف نحوه شروع ترک در بتن معمولی می باشد که عمدتاً از فاز لایه مرزی آغاز می شود. 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 پدیده های 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.

۳-۵- سبکدانه های مورد استفاده در بتن سبک

با توجه به اینکه بتن سبکدانه تنها نوعی از بتن سبک است که می توان به طور سازه ای مورد استفاده قرار گیرد و برای ساخت بتن سبکدانه استفاده از سبکدانه مناسب ضروری است، در ادامه این گزارش به بررسی مشخصات سبکدانه ها پرداخته می شود. سبکدانه ها مصالحی طبیعی یا فرآوری شده می باشند که به دلیل تخلخل ایجاد شده در ساختار آنها از وزن مخصوص کمتری نسبت به سنگدانه های طبیعی برخوردار هستند.

۳-۵-۱ وزن مخصوص سبکدانه ها: در استانداردها و آیین نامه های مختلف برای سبکدانه ها تعاریف و

محدودیت هایی را قائل شده اند که در ادامه به برخی از آن ها اشاره می شود. آیین نامه ASTM سبکدانه ها را از لحاظ اندازه به دو دسته تقسیم می کند.

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 880 kg/m^3 نیست. معمولاً درشت دانه سبک در دو اندازه زیرطبقه بندی می شود:

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

ب- درشت دانه ریز: ۲/۵ تا ۱۰ میلیمتر

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

در BS 3797 بریتانیا سنگدانه های ریز دانه با وزن مخصوص غیر متراکم ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب 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 2000 Kg/m^3 و وزن مخصوص غیر متراکم کمتر از 1200 Kg/m^3 را سبکدانه می داند.

۳-۵-۲- مشخصات سبکدانه های موجود در ایران: در این بخش مشخصات فیزیکی تعدادی از

سبکدانه های طبیعی و مصنوعی مورد بررسی قرار می گردد. برای تولید سبکدانه های طبیعی فراوری خاصی بر روی آنها انجام نمی شود. 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

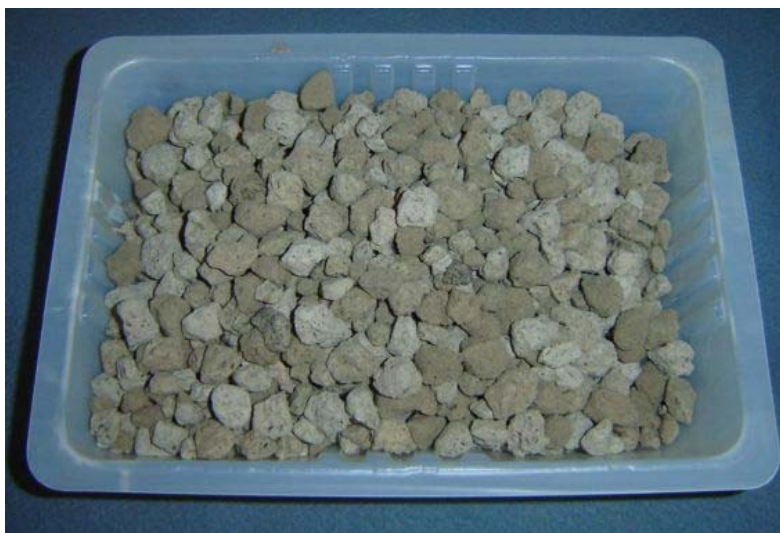
در اثر ورود مواد مذاب آتشفشانی به مخازن آب مثل دریاها و دریاچه ها و سرد شدن سریع ایجاد می شود. رنگ این سبکدانه ها سیاه، خاکستری روشن و قهوه ای تیره است. به دلیل سرد شدن سریع مواد مذاب آتشفشانی حبابهای

نسبتا درشتی در این سنگدانه ها وجود دارد که بعضا 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 نسبتا بزرگی از این مصالح در قروه کرمانشاه وجود دارد. نمونه ای از سنگ پا در شکل شماره ۳-۱۳ نشان داده شده است.

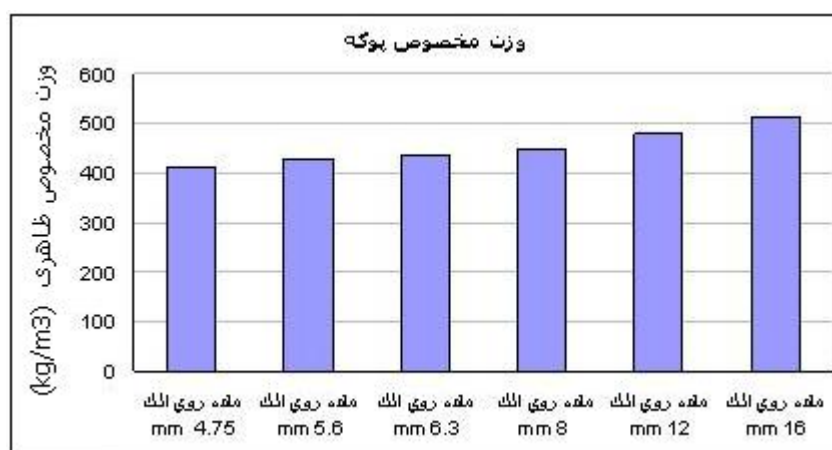


شکل ۳-۱۳-سنگ پا

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 آنها همراه با انبساط ناشی از حبابهای به وجود آمده توسط بخار و گازهای موجود در آن به وجود می آید. نمونه ای از پوکه معدنی در شکل شماره ۳-۱۴ آورده شده است. معادن غنی پومیس ایران در اردبیل، آذربایجان شرقی و به خصوص بستان آباد تبریز، قروه کرمانشاه، دامنه های البرز، کرمان و سیستان و بلوچستان وجود دارد. وزن مخصوص خشک ظاهری این سبکدانه ها در حدود ۴۰۰ تا ۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد. نمونه ای از وزن مخصوص پوکه های معدنی با اندازه های متفاوت در شکل شماره ۳-۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۴- نمونه ای از پوکه معدنی



شکل ۳-۱۵- وزن مخصوص پوکه های معدنی با اندازه های متفاوت

ج- توف : خاکسترهای آتشفشانی که بعد از انفجار به طریق جریانی یا ریزشی تجمع نموده و سخت می شوند به توف شهرت دارند. نوع توف تابع ترکیب شیمیایی و کانی شناسی خاکسترهاست. وزن مخصوص توفهای طبیعی در محدوده سنگدانه های معمولی است و از نوع سبکدانه به شمار نمی آیند اما برخی از انواع توف متخلخل بوده و وزن مخصوص آنها در حدود ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است که در خانواده سنگدانه های سبک به شمار می روند. رنگ این توفها معمولا سیاه، قرمز و سبز بوده و دارای رگه می باشند. گزارشهایی مبنی بر وجود توف سبک در دامنه کوههای البرز ارایه شده است.

د - لیکا : سبکدانه های رس منبسط (لیکا) با استفاده از رس باد شونده به روش فرآیند تر در داخل یک کوره گردان تولید می شوند. این سبکدانه ها در سوئد و نروژ تحت عنوان لیکای سوئدی و نروژی تولید می گردند. از مخلوط کردن رس و آب، خمیر ایجاد می شود. این خمیر در انتهای بالایی کوره گردان در حالیکه از طریق زنجیره هایی به دانه های کوچکتر شکسته می گردد ریخته می شود. از این رو، آنها هنگام عبور از کوره گردان، در حالیکه به مصالح شیشه ای تبدیل می شوند ، سبکدانه های با اشکال و اندازه های مختلف ایجاد می کنند. سنگدانه هایی که از کوره خارج می شوند به اندازه های مختلف سرند می شوند. در ادامه به بررسی مشخصات تعدادی از سبکدانه های لیکا تولید شده در کشورهای مختلف پرداخته می شود.

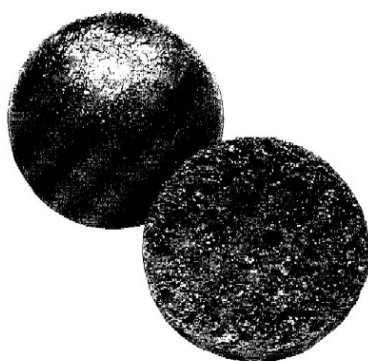
***لیکای سوئد:** سنگدانه های رس منبسط شده از ذرات ریز رس که مقدار آنها کم است ، بدست می آید. معادن آنها در Garstad در محدوده Linkoping در سوئد می باشد. کارخانه تولید سبکدانه های سوئدی AB Svensk Leca دارای کوره های گردان است که سبکدانه لیکا را تولید می کند. رس، خشک شده و در کوره گردان در دمای زیاد حدود 1100°C تا 1200°C ، هنگام عبور از منطقه پخت، منبسط می شود. 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 دانه ها ، چگالی و مقاومت آنها تغییر می کند. دانه های با اندازه کوچکتر ، چگالی و مقاومت بیشتری دارند. مدول الاستیسیته برای مصالح متراکم شده ۱۲ تا ۲۰ میلیمتر، ۲۰ مگاپاسگال و برای مصالح غیر متراکم ۱۰ مگاپاسگال می باشد.

***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 متر مکعب در سال بود. امروز کل تولید رس منبسط نروژ ، تقریباً یک میلیون متر مکعب در سال از چهار کوره گردان است. بعد از ۴۰ سال از آغاز تولید لیکا ، حدود ۱۸ میلیون متر مکعب 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 متر مکعب سبکدانه می رسد. 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 می باشد.

***لیکای ایران:** در حال حاضر در ایران تنها یک کارخانه به تولید سبکدانه های مصنوعی با رس منبسط شده می پردازد. 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 متر مکعب 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.

مجموع 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 می شود. به این ترتیب که این رسها را آسیاب می کنند و آنها را با یک سری مواد که موجب تسریع تورم می شوند، مخلوط می کنند. سپس از داخل یک کوره گردان عبور داده می شوند. کوره بوسیله ترکیبی از زغال سنگ و نفت مشتعل می شود و دما را تا حدود $1000^{\circ}C$ می رساند. در نهایت مصالح سبکی با ساختار داخلی شبیه به لانه زنبور تشکیل می گردد. 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. نمونه ای از دانه لیکا تولیدشده در ایران در شکل ۳-۱۶ نشان داده شده است.

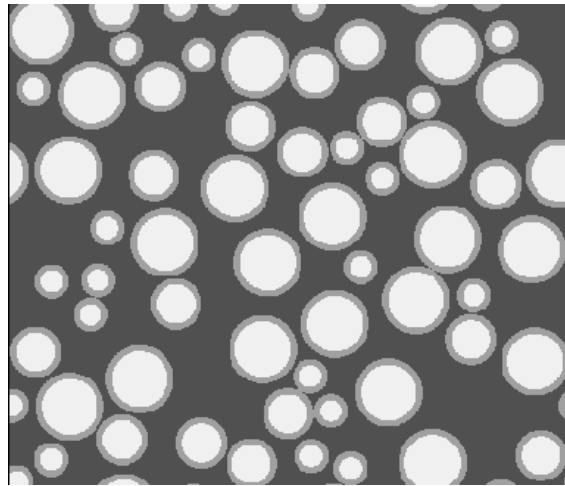
شرکت لیکا ایران اخیراً موفق به تولید سبکدانه های سازه ای با وزن مخصوص ظاهری در محدوده ۵۰۰ تا ۷۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب شده است. این فرآورده ها در انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران مورد بررسی و بهینه سازی قرار گرفته است. گزارش حاضر به بررسی نتایج فاز اول این مطالعات که شامل تعیین ظرفیت مقاومتی سبکدانه ها می باشد می پردازد.



شکل ۳-۱۶ - سبکدانه لیکا

۳-۶- تئوری ظرفیت مقاومتی

بتن سخت شده از فازهای مختلفی تشکیل شده است. مطابق مطالب ذکر شده در بخش ریز ساختار بتن سبکدانه می توان فازهای تشکیل دهنده بتن را سنگدانه و ماتریس در برگیرنده آن در نظر گرفت (شکل ۳-۱۷). به این ترتیب انتظار می رود که مقاومت بتن تابعی از مقاومت فازهای تشکیل دهنده آن یعنی سنگدانه و ماتریس باشد. در بتن معمولی مقاومت سنگدانه معمولاً بیشتر از مقاومت ماتریس است. بنابراین عامل تعیین کننده در مقاومت بتن، مقاومت ماتریس در بر گیرنده سنگدانه ها می باشد. در این حالت انتظار می رود که افزایش یا کاهش مقاومت بتن صرفاً تابعی از مقاومت ماتریس آن باشد. در بررسی بتن سبکدانه می توان در نظر گرفت که بتن از دو فاز تشکیل شده است. فاز اول ملات که شامل خمیر سیمان و ریزدانه طبیعی است و فاز دوم که شامل درشت دانه سبک است.



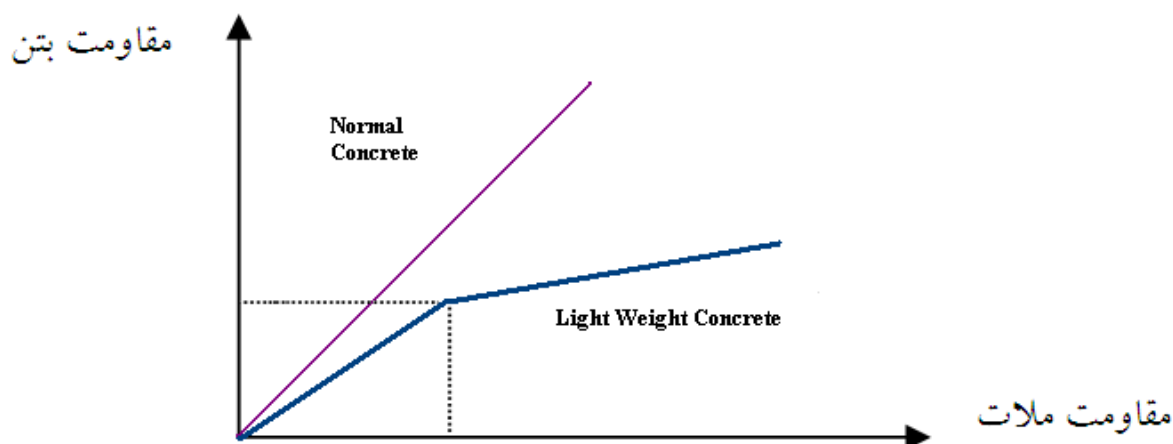
شکل ۳-۱۷- مخلوط بتن تشکیل شده از دو فاز ماتریس ملات و سنگدانه

در بتن سبکدانه معمولاً مقاومت سبکدانه چندان زیاد نیست و مقاومت بتن تابعی از هر دو عامل مقاومت سبکدانه و مقاومت ملات در بر گیرنده آن است. فرض می کنیم مقاومت مشخصی از بتن مورد نیاز است. در صورتی که مقاومت سبکدانه کمتر از مقاومت مشخصه مورد نیاز بتن باشد، مقاومت ملات بتن سبکدانه باید از مقاومت ماتریس بتن معمولی متناظر آن بیشتر شود تا هر دو بتن دارای مقاومت فشاری یکسان باشند. این افزایش مقاومت ملات بتن سبکدانه که معمولاً به وسیله افزایش عیار سیمان، استفاده از مواد افزودنی شیمیایی و معدنی و نظایر آن انجام می شود هزینه ای اضافی در ساخت بتن تحمیل می کند که ممکن است استفاده از بتن سبک را

غیر اقتصادی بنماید. بنابراین انتخاب سبکدانه مناسب برای کاربرد در بتن سبک باید بر مبنای مقاومت مشخصه مورد نیاز بتن انجام گردد. در حالت ایده آل مقاومت سبکدانه بهتر است که بزرگتر یا برابر مقاومت مشخصه مورد نیاز بتن باشد.

تعیین مقاومت مطلق سنگدانه به دلیل عدم امکان انجام آزمایش مستقیم مقاومت فشاری و کششی بر روی دانه ها و نیز وابستگی آن به اندازه دانه تقریباً امکان پذیر نمی باشد. از سوی دیگر حتی در صورت معلوم بودن مقاومت مطلق سبکدانه، بررسی نحوه تاثیر آن بر مقاومت بتن نیازمند تحلیل عددی محیط مرکب بر مبنای اندرکنش سنگدانه ها و ماتریس در بر گیرنده آن با استفاده از روشهای مکانیک شکست غیر خطی است که بر پیچیدگی کار می افزاید.

"*تئوری ظرفیت مقاومتی*" برای حل این مشکل توسعه یافته است. در این تئوری مقاومت بتن و مقاومت ملات تشکیل دهنده آن در مقیاس ماکرو بررسی شده و اثر مقاومت سبکدانه در مقاومت بتن سبک با ترسیم نمودار مقاومت بتن در مقابل مقاومت ملات تشکیل دهنده آن بررسی می گردد. در صورتی که مقاومت سبکدانه بیشتر از مقاومت ملات در برگیرنده آن باشد شیب این نمودار برابر یک می گردد. در این حالت به ازای هر واحد افزایش مقاومت ملات، مقاومت بتن نیز یک واحد افزایش می یابد. این امر پدیده ای است که در بتنهای با مقاومت معمولی و ساخته شده با سنگدانه های طبیعی مشاهده می شود. اما در صورتی که مقاومت سبکدانه کمتر از مقاومت ملات در برگیرنده باشد شیب نمودار ظرفیت مقاومتی کاهش می یابد. هر چقدر میزان این کاهش شیب بیشتر باشد نشان دهنده آن است که سبکدانه ها از مقاومت کمتری برخوردار هستند. ترسیم و بررسی نمودار ظرفیت مقاومتی تعیین محدوده کاربرد بهینه سبکدانه ها را امکان پذیر می نماید. نمودار ظرفیت مقاومتی بتنهای سبکدانه مطابق شکل ۳-۱۸ معمولاً به صورت خط صاف نبوده و نمی توان یک شیب برای آن تعریف نمود. معمولاً استفاده از شیب اولیه و شیب ثانویه برای مشخصات نمودار ظرفیت مقاومتی مناسب است.



شکل ۳-۱۸- نمودار مقاومت بتن نسبت به مقاومت ملات متناظر آن (نمودار ظرفیت مقاومتی)

در صورتی که شیب نمودار ظرفیت مقاومتی عددی نزدیک به یک باشد نسبت افزایش مقاومت بتن به افزایش عیار سیمان برای بتن سبک و بتن معمولی نسبتاً یکسان است، در حالیکه با کاهش شیب نمودار ظرفیت مقاومتی این نسبت کاهش می یابد. یعنی در صورت کاهش شیب نمودار ظرفیت مقاومتی با افزایش عیار سیمان، افزایش مقاومت بتن کمتری حاصل می گردد. در این حالت باید در مورد اقتصادی بودن یا نبودن این افزایش عیار سیمان در صورت کاهش شیب نمودار ظرفیت مقاومتی دقت بیشتری صورت پذیرد.

به این ترتیب ظرفیت مقاومتی سبکدانه ها به عنوان پارامتری سودمند برای تعیین محدوده مقاومتی مناسب برای استفاده از سبکدانه، مطرح می شود. ظرفیت مقاومتی پارامتری است که برای بتن تعریف می شود و تابعی از مقاومت سبکدانه ها و درصد حجمی سبکدانه موجود در بتن است. در این تحقیق وابستگی ظرفیت مقاومتی به درصد حجمی سبکدانه مورد استفاده بررسی شده است.

برای بدست آوردن ظرفیت مقاومتی، نیاز است مقاومت ملات بتن تغییر داده شود و مقاومت بتن متناظر تعیین گردد. روشهای متفاوتی برای تغییر مقاومت ملات بتن قابل استفاده است، مانند: تغییر عیار سیمان، تغییر نسبت آب به سیمان، استفاده از مواد افزودنی و تغییر سن نمونه ها. به طور منطقی مقدار ظرفیت مقاومتی باید مستقل از نحوه تعیین آن باشد. در این تحقیق از روش تغییر سن نمونه ها و تغییر نسبت آب به سیمان برای تعیین ظرفیت مقاومتی استفاده شده است.

۴- خدمات آزمایشگاهی

آزمایشهای انجام شده در این گزارش شامل دو بخش کلی آزمایشهای انجام گرفته بر روی سبکدانه ها و آزمایشهای انجام گرفته بر روی بتن سبک می باشد. آزمایشهای سبکدانه در بخش ۴-۱ و آزمایشهای بتن سبک در بخش ۴-۲ ارائه شده اند. در ادامه این گزارش منظور از لیکای سازه ای ۵۰۰ و لیکای سازه ای ۷۰۰، لیکای ارسالی از سوی کارفرما (با وزن مخصوص تقریبی ۵۰۰ و ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب) می باشد. لیکای غیر سازه ای ۳۵۰ نیز به لیکای سنتی تولید شده توسط کارفرما اطلاق می گردد که میانگین وزن مخصوص آن در حدود ۳۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد. نتایج به دست آمده از آزمایشهای انجام شده بر روی سبکدانه های سازه ای لیکا ۵۰۰ و لیکا ۷۰۰، علاوه بر مقایسه با یکدیگر، با نتایج به دست آمده از سبکدانه غیر سازه ای لیکا ۳۵۰ که قبلا توسط پژوهشگر مورد بررسی قرار گرفته بود نیز مقایسه شده است.

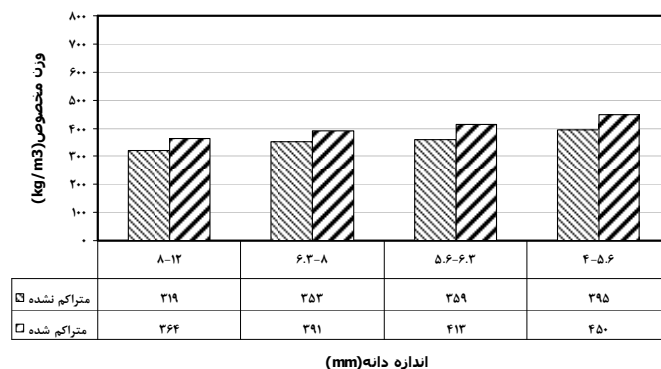
۴-۱- آزمایش های انجام گرفته بر روی سبکدانه

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

۴-۱-۱- وزن مخصوص: تعیین وزن مخصوص فضایی لیکا بر اساس استاندارد ASTM C127 انجام

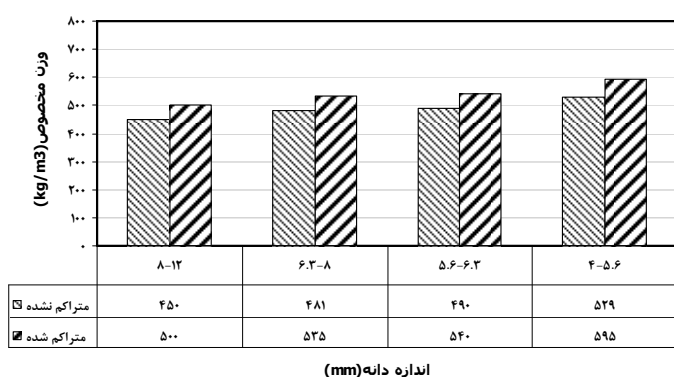
گرفته است. نتایج وزن مخصوص فضایی رده های مختلف سبکدانه های لیکا در دو حالت متراکم نشده (loose density) و میله خورده متراکم شده (rodded density) در شکل ۴-۱ نشان داده شده است.

لیکای غیر سازه ای ۳۵۰



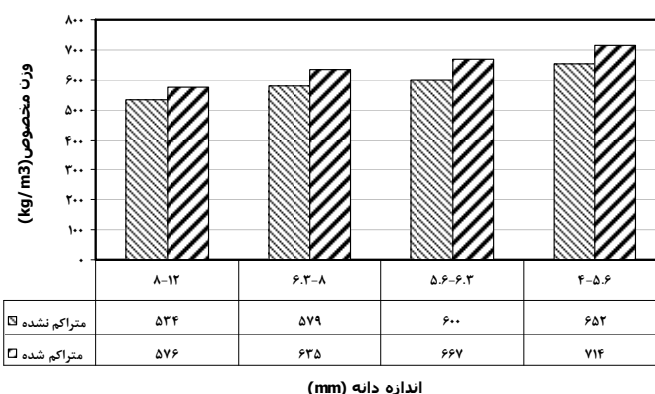
الف- لیکا ۳۵۰

لیکای سازه ای ۵۰۰



ب- لیکا ۵۰۰

لیکای سازه ای ۷۰۰



ج- لیکا ۷۰۰

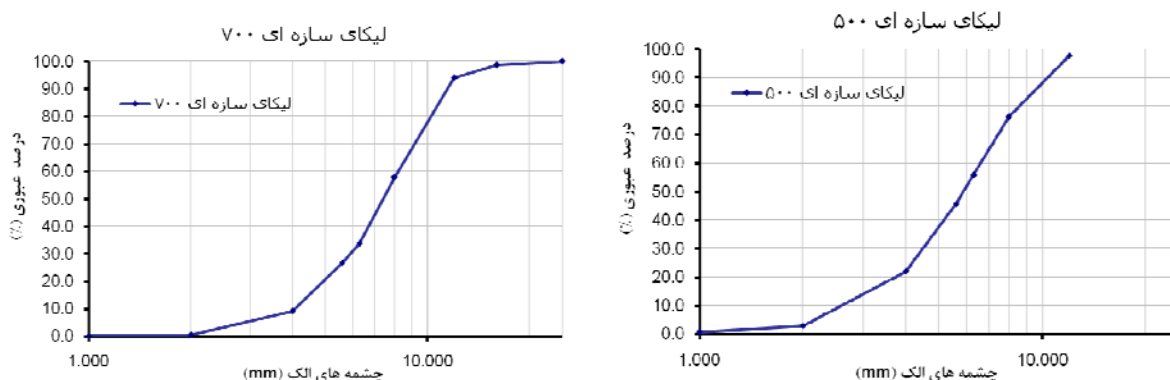
شکل ۴-۱- وزن مخصوص فضایی انواع لیکا

با توجه به نتایج بدست آمده (شکل ۴-۱-الف) میانگین وزن مخصوص لیکای غیر سازه ای ۳۵۰ تا ۳۹۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد. این امر باعث شده است تا نام لیکا ۳۵۰ برای این سبکدانه انتخاب گردد. میانگین وزن مخصوص لیکای سازه ای نوع اول ۵۰۰ تا ۵۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد که با توجه به این موضوع این سبکدانه با نام لیکا ۵۰۰ شناخته می شود (شکل ۴-۱-ب). همانطور که در نمودار شکل شماره ۴-۱-ج نشان داده شده است، میانگین وزن مخصوص لیکای سازه ای نوع دوم مورد بررسی، در حدود ۶۵۰ تا ۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد از این رو نام این سبکدانه، لیکای سازه ای ۷۰۰ انتخاب گردیده است. با توجه به وزن های ارائه شده مشاهده می گردد که وزن مخصوص لیکای سازه ای نوع اول نسبت به لیکای غیر سازه ای ۴۳ درصد افزایش پیدا کرده است. این افزایش برای لیکای سازه ای نوع دوم در حدود ۱۰۰ درصد می باشد. همچنین قابل

ذکر است که وزن مخصوص سبکدانه لیکای سازه ای نوع دوم ۴۰ درصد از وزن مخصوص لیکای سازه ای نوع اول بیشتر می باشد.

۴-۱-۲- دانه بندی: آزمایش دانه بندی لیکا طبق استاندارد شماره ASTM C136 و بصورت مکانیکی

انجام گرفته است. نمودار دانه بندی لیکای سازه ای ۵۰۰ و لیکای سازه ای ۷۰۰ تولید شده در کارخانه در شکل شماره ۴-۲ ارائه شده است. با توجه به گستردگی اندازه های موجود در محدوده زیرالکی تا دانه هایی با درشتی حدود ۱۲ میلیمتر و بزرگتر امکان مقایسه دانه بندی موجود با محدوده استاندارد دانه بندی شن یا ماسه وجود ندارد. بنابراین در این نمودارها صرفا دانه بندی سبکدانه ها ترسیم شده است.



ب- لیکا سازه ای ۷۰۰

الف- لیکا سازه ای ۵۰۰

شکل ۴-۲- نمودار دانه بندی لیکا سازه ای

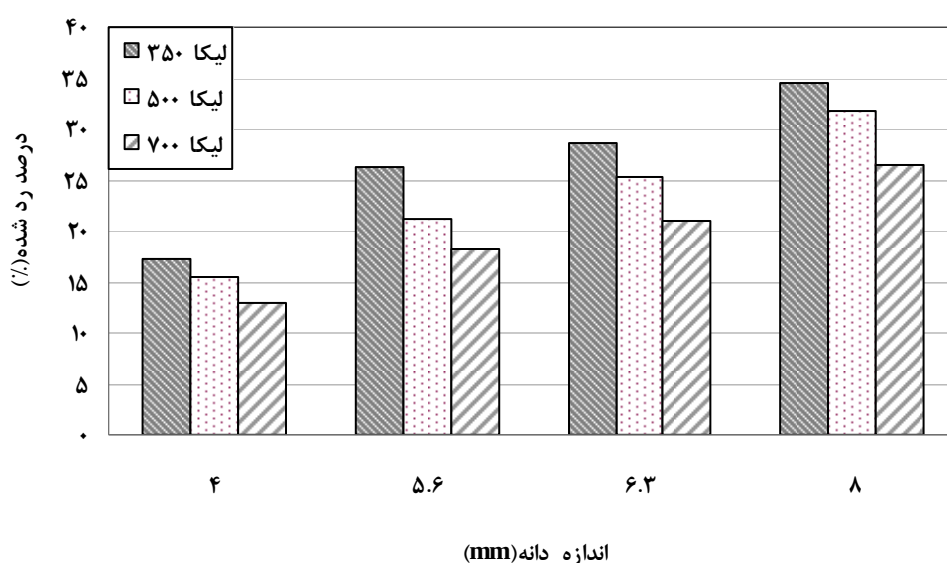
۴-۱-۳- مقاومت غیر مستقیم از آزمایش سایش لس آنجلس: به منظور اندازه گیری غیر مستقیم

مقاومت سبکدانه های لیکا، آزمایش سایش لس آنجلس بر روی این سبکدانه ها انجام گردید. نتایج به دست آمده برای تعیین مقاومت نسبی سبکدانه ها مورد استفاده قرار می گیرد.

در آزمایش سایش لس آنجلس ذکر شده در استاندارد ASTM C535، پنج کیلوگرم سنگدانه به همراه ۱۲ گلوله فلزی در داخل یک استوانه دوار ۵۰۰ دور چرخانده می شود. بدلیل آنکه سبکدانه ها از مقاومت سایشی به مراتب کمتری نسبت به سنگدانه های طبیعی برخوردارند و اگر سبکدانه ها ۵۰۰ دور چرخانده شوند تقریبا به صورت کامل خرد می شوند، آزمایش سایش سبکدانه ها دقیقا مطابق با استاندارد ASTM C535 صورت نگرفته است و در روند انجام آن اصلاحاتی انجام شده است. به دلیل آنکه نتایج برای تعیین مقاومت نسبی سبکدانه ها و نیز

مقایسه با یکدیگر طراحی شده اند، تغییر مذکور مشکلی در تفسیر نتایج پدید نمی آورد. در این آزمایش از ۱۲ عدد گلوله ای که در استاندارد ASTM C535 ذکر شده، استفاده شده است با این تفاوت که آزمایش به جای ۵۰۰ دور، با ۵۰ دور انجام شده است. همچنین از آنجا که چگالی سبکدانه های سازه ای و غیر سازه ای با هم تفاوت محسوسی دارند، بجای آزمایش برروی جرم ثابتی از سبکدانه ها آزمایش برروی حجم ثابتی از مصالح انجام گردیده است. نتایج آزمایش سایش هر دو نوع لیکای سازه ای ۵۰۰، ۷۰۰ و غیر سازه ای ۳۵۰ در شکل ۳-۴ آورده شده است.

درصد رد شده از الک پس از ۵۰ دور آزمایش لس آنجلس



شکل ۳-۴ - نتایج آزمایش سایش لیکا

نتایج رسم شده در نمودار فوق نشان می دهد میزان خرد شدگی لیکای ۵۰۰ برای اندازه های مختلف در حدود ۱۲٪ کمتر از لیکای ۳۵۰ می باشد و به همین نسبت مقاومت در برابر ضربه لیکای ۵۰۰ بیشتر از مقاومت در برابر ضربه لیکای ۳۵۰ است. میزان خردشدگی لیکای ۷۰۰ برای اندازه های مختلف الک در حدود ۱۶٪ کمتر از لیکای ۵۰۰ و در حدود ۲۶٪ کمتر از لیکای ۳۵۰ می باشد و به همین نسبت مقاومت در برابر ضربه لیکای ۷۰۰ بیشتر از دو نوع لیکای قبلی است. مطابق نتایج درج شده در شکل ۳-۴ با افزایش وزن مخصوص لیکا یا کاهش اندازه دانه ها مقاومت سبکدانه ها افزایش می یابد. نکته قابل توجه در این میان وابستگی زیاد مقاومت سبکدانه به اندازه دانه ها است. بر این مبنا می توان نتیجه گیری نمود که با افزایش اندازه حداکثر دانه مقاومت بتن سبک ساخته شده تا حد

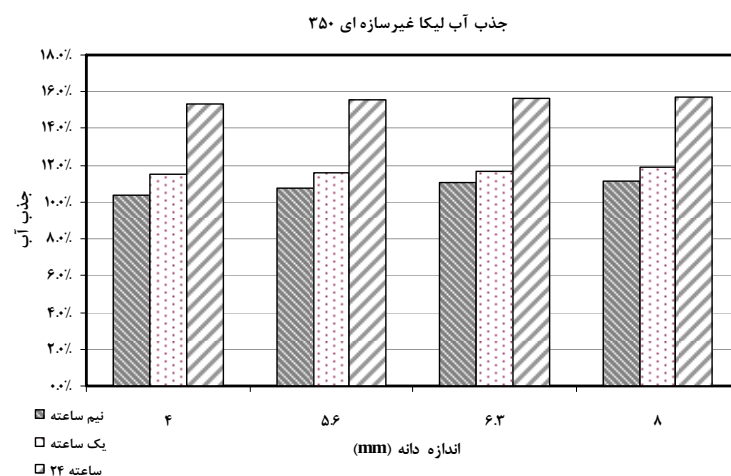
زیادی تغییر می نماید. قابل ذکر است که اعداد به دست آمده از آزمایش لس آنجلس به تنهایی نمی تواند معیاری برای مقاومت سبکدانه باشد و تنها می تواند معیار مناسبی برای مقایسه باشد.

بر مبنای نتایج به دست آمده انتظار می رود که مقاومت بتن ساخته شده از لیکای ۷۰۰ بیش از بتن ساخته شده با لیکای ۵۰۰ و ۳۵۰ باشد. تاثیر افزایش مقاومت سبکدانه ها در مقاومت بتن ساخته شده با آن در بخش ۴-۲ بررسی می گردد.

۴-۱-۴- جذب آب : تعیین جذب آب لیکا بر اساس استاندارد ASTM C127 انجام گرفته است. از آن

جا که جذب آب سبکدانه به شدت به زمان وابسته است، جذب آب نیم، یک و ۲۴ ساعته لیکا اندازه گرفته شده است. برخلاف بتن معمولی که میزان جذب آب سنگدانه ها در ۲۴ ساعت ملاک شرایط اشباع با سطح خشک (SSD) قرار می گیرد برای محاسبه میزان آب موثر بتن سبکدانه جذب آب نیم تا یک ساعته معمولاً ملاک شرایط اشباع با سطح خشک می باشد. دلیل این امر آن است که معمولاً آب آزاد موجود در بتن تازه پس از گذشت نیم تا یک ساعت تا حدی با سیمان واکنش داده و امکان نفوذ آن به داخل سبکدانه از بین می رود.

جذب آب کوتاه مدت نیم و یک ساعته نشان دهنده میزان تخلخلهایی است که امکان اشباع سریع آنها توسط آب وجود دارد. ویژگی این تخلخلها به هم پیوسته بودن آنها توسط مجراهای نسبتاً باز است. از سوی دیگر جذب آب ۲۴ ساعته سبکدانه عمدتاً برای تعیین میزان کلی تخلخل ظاهری یا به عبارت بهتر تعیین میزان تخلخلهای به هم پیوسته آن به کار می رود. این تخلخلها ممکن است توسط مجراهای باز یا مجاری موئینه به یکدیگر متصل شده باشند به نحوی که در مدت زمان ۲۴ ساعت، آب فرصت کافی برای نفوذ به داخل آنها را داشته باشد. با این وجود جذب آب ۲۴ ساعته نمی تواند به عنوان ملاک اندازه گیری کل تخلخل موجود در سبکدانه مورد استفاده قرار گیرد. برای تعیین تخلخل کلی سبکدانه ها که شامل تخلخلهای به هم پیوسته و تخلخلهای ناپیوسته است انجام آزمایش جذب آب تحت فشار ضروری است. در این حالت آب با فشار راه خود را باز کرده و تمامی حفرات سبکدانه را پر می نماید. نتایج جذب آب سبکدانه های مختلف در زمانهای نیم، یک و ۲۴ ساعته در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.



الف - لیكای غیرسازه ای ۳۵۰



ب- لیكای سازه ای ۵۰۰



ج- لیكای سازه ای ۷۰۰

شکل ۴-۴- جذب آب در سه دوره زمانی مشخص

با نگاه کلی به نمودارهای فوق مشاهده می شود که جذب آب لیکا ۳۵۰ بیشتر از لیکا ۵۰۰ و جذب آب لیکا ۵۰۰ نیز بیشتر از لیکا ۷۰۰ می باشد. جذب آب نیم و یک ساعته لیکا ۳۵۰ در حدود ۱۰۰ درصد بیشتر از لیکای سازه ای ۵۰۰ و ۷۰۰ می باشد.

نکته قابل توجه دیگر تفاوت نسببات زیاد جذب آب ۲۴ ساعته با جذب آب یک ساعته در لیکا ۳۵۰ و ۵۰۰ می باشد. همانطور که در بالا اشاره گردید این اختلاف زیاد به دلیل ساختار داخلی و چگونگی ارتباط بین منافذ می باشد. به عبارت دیگر در لیکا ۳۵۰ و ۵۰۰ اختلاف بین مجراهای باز و مجراهای مویینه قابل توجه می باشد. اما احتمالا تفاوت زیادی بین میزان تخلخلهای ناپیوسته در این دو نوع سبکدانه وجود ندارد. این در حالی است که در لیکا ۷۰۰ اختلاف محسوسی بین جذب آب نیم، یک و ۲۴ ساعته دیده نمی شود. دلیل این امر یکسان بودن نسبی منافذ با مجرای باز و منافذ مویینه در این نوع سبکدانه سازه ای می باشد. با توجه به وزن مخصوص کم این سبکدانه احتمالا بخش زیادی از تخلخلهای موجود در این سبکدانه از نوع تخلخلهای ناپیوسته می باشد. از آنجا که ثابت بودن خواص مصالح از جمله جذب آب در طول زمان، به کنترل مناسبتر شرایط ساخت بتن کمک می کند، بنابراین استفاده از لیکا ۷۰۰ از این دیدگاه مزیت بیشتری دارد.

بر اساس نتایج ذکر شده (شکل های ۴-۴ الف و ۴-۴ ب) جذب آب نیم و یک ساعته لیکا ۵۰۰ در حدود ۷٪ و جذب آب ۲۴ ساعته در حدود ۱۱٪ می باشد و برای لیکا ۳۵۰ جذب آب ۲۴ ساعته حدود ۱۶٪ است که تخلخل ظاهری زیاد آن را نشان داد. همچنین ملاحظه می شود که تفاوت جذب آب نیم ساعته با یک ساعته نسبت به وضعیت مشابه در لیکا ۵۰۰ بیشتر می باشد که سرعت بیشتر جذب آب در لیکا ۳۵۰ را نشان داد.

مجموع نتایج جذب آب بیانگر این موضوع است که میزان درصد جذب آب به اندازه حداکثر دانه لیکا وابسته نیست و تقریبا برای اندازه های مختلف سبکدانه یکسان است. عدم وابستگی زیاد میزان جذب آب سبکدانه ها به اندازه دانه در نتایج به دست آمده از آزمایش جذب آب لیکا ۷۰۰ نیز مشاهده می شود. همانطور که در شکل ۴-۴ ج مشاهده می شود جذب آب نیم و یک ساعته لیکا ۷۰۰ در حدود ۵/۶٪ درصد می باشد که با توجه به شکل ۴-۴ ب میزان ۱/۴٪ نسبت به لیکا ۵۰۰ کاهش داشته است و جذب آب ۲۴ ساعته در حدود ۶/۷٪ درصد است که در حدود ۴/۳٪ نسبت به لیکا ۵۰۰ کمتر شده است.

با توجه به شکل شماره ۴-۴-ج جذب آب یک ساعته در لیکا ۷۰۰ برابر ۷۸٪ جذب آب ۲۴ ساعته می باشد در حالی که جذب آب یک ساعته در لیکا ۵۰۰ به میزان ۶۰٪ جذب آب ۲۴ ساعته می باشد. تفاوت قابل توجه در میزان جذب آب ۲۴ ساعته لیکای سازه ای ۷۰۰ با لیکا ۵۰۰ و ۳۵۰ نشان دهنده کاهش قابل توجه فضاهای متخلخل مرتبط در این نوع از سبکدانه است. این امر با توجه به افزایش وزن مخصوص لیکا نسبت به سبکدانه های قبلی نیز قابل توجیه است.

۴-۱-۵- خلاصه نتایج آزمایشهای سبکدانه ها: مقایسه آزمایشهای انجام شده بر روی سبکدانه های

سازه ای با یکدیگر و با سبکدانه لیکای غیر سازه ای می تواند برای شناخت ویژگیهای سبکدانه ها سودمند باشد. خلاصه نتایج به دست آمده از آزمایشهای ذکر شده در این بخش در جدول ۴-۱ درج شده است.

جدول ۴-۱- خلاصه نتایج آزمایشهای سبکدانه ها

نوع سبکدانه	جذب آب دراز مدت (یک روزه)		جذب آب کوتاه مدت (یک ساعته)		سایش لس آنجلس	
	نسبت به لیکا ۳۵۰	میانگین (%)*	نسبت به لیکا ۳۵۰	میانگین (%)*	نسبت به لیکا ۳۵۰	میانگین (%)*
لیکا ۳۵۰	۱	۱۵/۶	۱	۱۱/۷	۱	۲۶/۷
لیکا ۵۰۰	۰/۷۱	۱۱/۰	۰/۵۸	۶/۸	۰/۸۸	۲۳/۵
لیکا ۷۰۰	۰/۴۴	۶/۸	۰/۴۷	۵/۵	۰/۷۴	۱۹/۶

* منظور از میانگین، نتایج به دست آمده از اندازه دانه های متفاوت است.

خلاصه نتایج درج شده در جدول ۴-۱ نشان دهنده آن است که میزان افزایش وزن مخصوص در سبکدانه ها تقریباً برابر میزان کاهش جذب آب دراز مدت و کوتاه مدت اندازه گیری شده در آنها می باشد. سبکدانه لیکا ۵۰۰ در حدود ۴۰٪ چگالتر از سبکدانه لیکا ۳۵۰ است. میزان جذب آب دراز مدت و کوتاه مدت آن نیز در حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد کمتر از میزان جذب آب متناظر در سبکدانه لیکا ۳۵۰ می باشد. نتایج مشابهی در سبکدانه لیکا ۷۰۰ در مقایسه با لیکا ۳۵۰ قابل مشاهده است. دوبرابر شدن میزان وزن مخصوص سبکدانه در این حالت باعث نصف شدن تقریبی جذب آب سبکدانه ها شده است.

از دیدگاه مقاومتی نیز سبکدانه سازه ای لیکا ۵۰۰ در مقایسه با لیکا ۳۵۰ در حدود ۴۰٪ افزایش وزن مخصوص و ۱۲٪ افزایش مقاومت غیر مستقیم را نشان می دهد. از سوی دیگر سبکدانه لیکای سازه ای ۷۰۰ در مقایسه با

لیکا ۳۵۰ در حدود ۱۰۰٪ افزایش وزن مخصوص و ۲۶٪ افزایش مقاومت غیر مستقیم نشان می دهد. بنابراین مشاهده می شود که میزان مقاومت افزایش یافته به میزان وزن مخصوص افزایش یافته، نمی باشد. اما این نتیجه نباید تنها ملاک رد یا قبول سبکدانه قرار گیرد. همانطور که ذکر شد مقاومت به دست آمده از آزمایش های سایش لس آنجلس به صورت غیر مستقیم برای اندازه گیری مقاومت سبکدانه مورد استفاده قرار می گیرد. تاثیر اصلی مقاومت سبکدانه در مرحله انجام آزمایش های بتن سبک نمایان می گردد. در بخش بعدی تاثیر مقاومت سبکدانه بر مقاومت بتن سبک ساخته شده با آن بررسی می گردد.

۴-۲- آزمایش های انجام گرفته بر روی بتن سبکدانه

پس از انجام آزمایش های اولیه بر روی سبکدانه، طرح اختلاطهای مختلفی ساخته شد. پس از نمونه گیری و تعیین مقاومت فشاری آن ها ظرفیت مقاومتی سبکدانه ها بررسی می گردد. در ادامه به آزمایش های انجام گرفته بر روی بتن سبکدانه پرداخته می شود.

۴-۲-۱- روش تعیین ظرفیت مقاومتی : ظرفیت مقاومتی سبکدانه، نشان دهنده محدوده کاربرد

اقتصادی سبکدانه ای برای ساخت بتن سبکی با مقاومت معین می باشد که پس از آن دستیابی به مقاومت های زیادتر با صرف هزینه های نسبتاً زیاد امکان پذیر می باشد. وجود این هزینه های اضافی ممکن است منجر به غیراقتصادی شدن استفاده از بتن سبک در کاربردی خاص شود. به عبارت دیگر برای ساخت اقتصادی بتن سبکی با مقاومت معین استفاده از سبکدانه ای که ظرفیت مقاومتی آن در محدوده مورد نیاز باشد مطلوب است. یادآوری می گردد که هدف از یافتن ظرفیت مقاومتی، به دست آوردن طرح اختلاط بهینه به صورت مستقیم نمی باشد. اگرچه نتایج به دست آمده می تواند برای تعیین محدوده بهینه کاربرد سبکدانه مورد استفاده قرار گیرد.

ظرفیت مقاومتی یک نوع از سبکدانه با توجه به نمودار مقاومت فشاری بتن سبک بر حسب مقاومت فشاری ملات آن به دست می آید. بدین منظور، باید نقاط متعددی در این نمودار رسم شود. این نقاط به روشهای مختلفی که منجر به تغییر مقاومت بتن سبک و ملات متناظر آن بشود امکان پذیر است. از جمله این روشها می توان به روشهای تغییر عیار سیمان، تغییر نسبت آب به سیمان، تغییر سن، تغییر درصد ماده افزودنی و نظایر آن اشاره کرد. در این تحقیق ظرفیت مقاومتی از دو روش تغییر سن و تغییر نسبت آب به سیمان تعیین شده است. در روش اول

طرح اختلاط مشخصی از بتن (که لزوماً بهینه هم نمی باشد) تهیه می گردد. سپس قالب ها از بتن و ملاتی که از الک کردن بتن تازه تهیه شده اند، پر می شوند. به منظور دستیابی به محدوده وسیعی از مقاومت، بتن و ملات متناظر آن در سنین مختلف شکسته می شوند. روش دوم برای بدست آوردن نقاط نمودار، ساخت طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان مختلف است. در این روش در یک سن و یا چند سن محدود مقاومت فشاری بتن و ملات بدست می آید و در نمودار مربوطه رسم می شود. قابل ذکر است که هیچ یک از این روش ها نسبت به یکدیگر مزیت خاصی ندارد و تنها با توجه به مصالح موجود و همچنین زمان بندی مورد نظر می توان یکی از این دو روش را انتخاب نمود. همانطور که پیشتر هم اشاره گردید در این تحقیق از روش تغییر سن و تغییر نسبت آب به سیمان استفاده شده است.

در هر دو روش شرح داده شده، تهیه ملات متناظر با بتن سبک برای ترسیم نمودار مقاومتی ضروری می باشد. با توجه به آنکه سبکدانه های مورد استفاده همگی بزرگتر از $4/75$ میلیمتر می باشند از الک شماره ۴ ($4/75$ میلیمتر) برای جداسازی ملات بتن از سبکدانه استفاده شده است. این جداسازی به روش الک تر انجام شده است. در این روش سطح الک مرطوب می شود و بتن تازه روی آن ریخته می شود و الک می گردد. با توجه به اینکه سبکدانه استفاده شده در بتن مانده بر روی الک شماره ۴ می باشند، از این الک به منظور تفکیک ماتریس بتن از سبکدانه استفاده گردیده است. مخلوطی که از الک عبور می کند، در واقع همان ماتریس بتن است و لیکا آغشته به خمیر سیمان تنها مصالحی است که بر روی الک باقی می ماند.

۴-۲-۲- طرح اختلاط های ساخته شده : نوع سیمان مصرفی در این طرح از نوع ۴۲۵-۱ تهران

می باشد. عیار سیمان به کار رفته در تمامی طرح ها ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده و برای ساخت نمونه ها از آب شرب تهران استفاده گردیده است.

به منظور تعیین ظرفیت مقاومتی نسبت آب به سیمان در طرحهای بتنی تغییر داده شده است. همچنین برای افزایش کارپذیری و کاهش نسبت آب به سیمان از فوق روان کننده نسل سوم پایه پلی کربکسیلات با نام تجاری Glenium 51 محصول شرکت ب-آ-اس-اف ایرانیان استفاده گردیده است. این افزودنی بر اساس میزان وزن سیمان به طرح اضافه می گردد. برای طرح های با نسبت آب به سیمان کم، از فوق روان کننده به میزان ۱ درصد وزن سیمان استفاده شده تا کارایی مخلوط کاهش نیابد.

ماسه طبیعی مورد استفاده در طرح اختلاط ها از شرکت متوساک تهیه شده است. با توجه به تاثیر اندازه حداکثر دانه بر مقاومت سبکدانه ها، لیکای مورد استفاده، سبکدانه رد شده از الک شماره ۱۲ و مانده روی الک شماره ۴ انتخاب گردید. دلیل این امر امکان مقایسه آن با نتایج ظرفیت مقاومتی دیگر سبکدانه های بررسی شده در انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران می باشد که در آنها نیز اندازه حداکثر سبکدانه به ۱۲ میلیمتر محدود شده بود.

ظرفیت مقاومتی پارامتری است که برای بتن تعریف می شود و تابعی است از مقاومت سبکدانه ها و درصد حجمی سبکدانه موجود در بتن. در این تحقیق وابستگی ظرفیت مقاومتی به درصد حجمی سبکدانه نیز مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور دو حد بالا و پایین عملی استفاده از سبکدانه تعریف شده است و ظرفیت مقاومتی در این دو حد تعیین شده است. حدپایین مقدار سبکدانه، حدی است که اگر کمتر از آن سبکدانه مصرف شود، وزن مخصوص بتن سبک از حد مجاز وزن مخصوص بتن سبک (حدود 2000 kg/m^3) بیشتر می شود. حد بالای مصرف سبکدانه هم حدی است که با توجه به عیار مورد استفاده و آب مصرفی در بتن، در صورتیکه بیشتر از آن سبکدانه مصرف گردد، بتن بیش از اندازه خشن شده و در نتیجه ساخت، تراکم و قالب گیری آن مشکل می گردد.

در این تحقیق حد بالای مصرف سبکدانه برابر $0/60$ متر مکعب سبکدانه در یک متر مکعب بتن و حجم پایین مصرف آن برابر $0/45$ متر مکعب سبکدانه در یک متر مکعب بتن انتخاب شده است.

نسبت بندی سبکدانه مورد استفاده در ساخت بتن سبک در مواردی که از سبکدانه های با وزن مخصوص متفاوت استفاده می شود، معمولاً از نوع نسبت بندی حجمی است. دلیل این امر استفاده از حجم یکنواختی سبکدانه در طرحهای مختلف و امکان مقایسه آنها با یکدیگر است. به منظور ساخت بتن با استفاده از لیکا ۵۰۰ از دو مقدار حجمی لیکا استفاده شده است، در طرح اول در یک مترمکعب بتن $0/45$ متر مکعب سبکدانه لیکا (معادل وزنی ۲۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب لیکا ۵۰۰) و در طرح دوم در یک متر مکعب بتن $0/60$ متر مکعب سبکدانه لیکا (معادل وزنی ۳۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب لیکا ۵۰۰) مصرف شده است. این طرح ها به ترتیب حجم کم (LC) و حجم زیاد (HC) نامیده شده اند. به طور مشابه به منظور ساخت بتن با استفاده از لیکا ۷۰۰ از همین مقادیر حجمی لیکا استفاده شده است. در طرح اول در یک مترمکعب بتن $0/45$ متر مکعب سبکدانه لیکا (معادل وزنی ۲۹۵ کیلوگرم بر متر مکعب لیکا ۷۰۰) و در طرح دوم در یک متر مکعب بتن $0/60$ متر مکعب سبکدانه لیکا

(معادل وزنی ۳۹۰ کیلوگرم بر متر مکعب لیکا ۷۰۰) مصرف شده است، این طرح ها به ترتیب حجم کم (LL) و حجم زیاد (HL) نامیده شده اند.

جزئیات طرح اختلاط ها در جدول شماره ۴-۲ آورده شده است. اعداد مربوط به نسبت آب به سیمان موثر طرح اختلاط ها بر مبنای شرایط اشباع با سطح خشک سنگدانه ها و جذب آب یک ساعته محاسبه و ثبت شده است.

جدول ۴-۲- طرح اختلاط ها

الف- لیکا ۵۰۰

درصدافزودنی (%)	W/C	وزن ماسه (kg)	عیار سیمان (kg/m ³)	لیکا (kg/m ³)	طرح اختلاط
۱	۰/۲۳	۸۰۰	۴۰۰	۲۵۰	LC1
۰	۰/۶۴	۸۰۰	۴۰۰	۲۵۰	LC2
۱	۰/۵۵	۸۰۰	۴۰۰	۲۵۰	LC3
۱	۰/۲۹	۸۰۰	۴۰۰	۳۳۰	HC1
۱	۰/۵۰	۸۰۰	۴۰۰	۳۳۰	HC2

ب: لیکا ۷۰۰

درصد افزودنی (%)	W/C	وزن ماسه (kg/m ³)	عیار سیمان (kg/m ³)	لیکا (kg/m ³)	طرح اختلاط
۱	۰/۲۷	۸۰۰	۴۰۰	۲۹۵	LL1
۰	۰/۴۷	۸۰۰	۴۰۰	۲۹۵	LL2
۰	۰/۵۸	۸۰۰	۴۰۰	۲۹۵	LL3
۱	۰/۳۳	۸۰۰	۴۰۰	۲۹۵	LL4
۱	۰/۳۴	۸۰۰	۴۰۰	۳۹۰	HL1
۰	۰/۵۴	۸۰۰	۴۰۰	۳۹۰	HL2
۱/۵	۰/۲۷	۸۰۰	۴۰۰	۳۹۰	HL3

۴-۲-۳- روش اختلاط، نمونه برداری و قالب گیری : مراحل ساخت بتن شامل توزین مصالح و

مخلوط کردن آنها می باشد. به منظور کاهش تاثیر منفی جذب آب موثر در مخلوط بتن توسط سبکدانه ها، قبل از

مخلوط کردن مصالح، مقدار مشخصی آب (معادل ۱۰٪ وزنی) به لیکا اضافه می شود. این آب در محاسبه نسبت آب به سیمان موثر لحاظ شده است.

برای مخلوط کردن مصالح و ساخت بتن از مخلوط کن ۲۰۰ لیتری که به صورت تابه ای مصالح را هم می زند استفاده شده است. به منظور اطمینان از یکنواخت بودن بتن و ملات هایی که در قالب ریخته می شوند، قبل از ریختن بتن در قالب، مجموعه به مدت ده ثانیه مخلوط می گردد. به منظور بدست آوردن مقاومت فشاری بتن سبک و ملات متناظر آن از قالب های ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی متر استفاده شده است. برای بدست آوردن ملات و انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی آن، بتن تازه از الک شماره ۴ عبور داده شده است.

۴-۲-۴- مقاومت فشاری : آزمایش مقاومت فشاری بتن مطابق استاندارد ASTM C39 و بر روی

آزمونه های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی متر انجام گرفته است. این آزمایش بر روی ملات سخت شده و بتن سخت شده در سنین مختلف انجام گرفته است. سنین شکست بتن به صورتی انتخاب شده اند که تعداد نقاط کافی در مقادیر مختلف مقاومت بتن و ملات برای رسم نمودار ظرفیت مقاومتی وجود داشته باشد. با این وجود و برای مقایسه با دیگر نتایج موجود در ادبیات فنی معمولاً یک سری آزمونه از هر طرح اختلاط در سن ۲۸ مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته است.

دستگاه آزمایش تعیین مقاومت فشاری با ظرفیت ۲۰۰ تن در شکل شماره ۴-۵ آورده شده است. جزئیات مقاومت فشاری بتن و ملات برای طرح های مختلف در پیوست سه ارائه شده است.

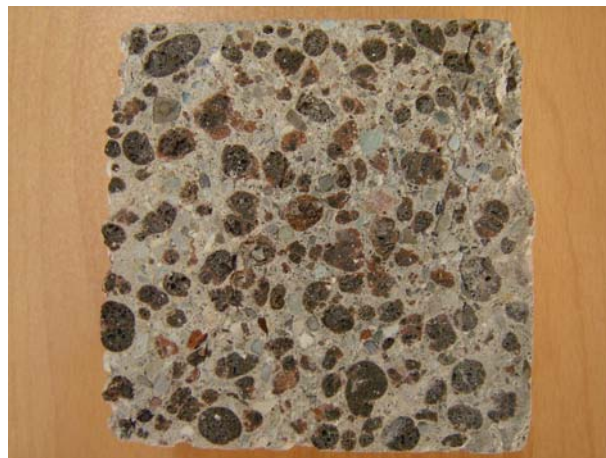


شکل ۴-۵- دستگاه آزمایش تعیین مقاومت فشاری

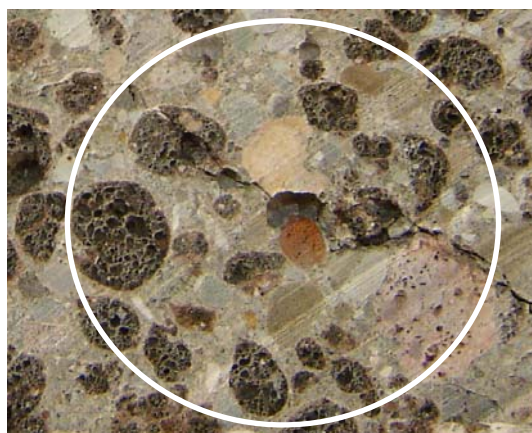
سطح مقطع برش خورده بتن های سبکدانه که در شکل ۴-۶ نشان داده شده، بیانگر همگن بودن مخلوط و یکنواختی توزیع سبکدانه ها در ملات بتن است.



ب-مقطع ترک خورده



الف-مقطع ترک نخورده

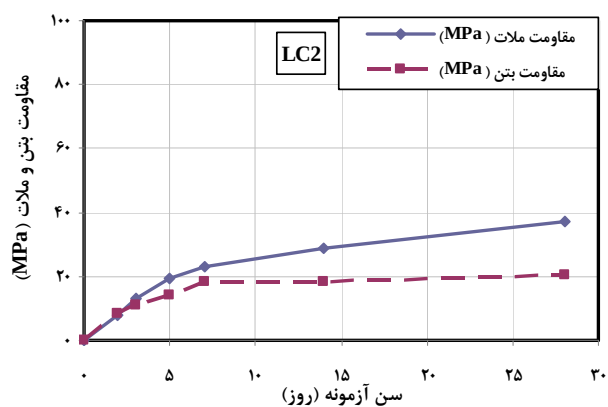


ج-عبور ترک از داخل سبکدانه و کنار سنگدانه های طبیعی

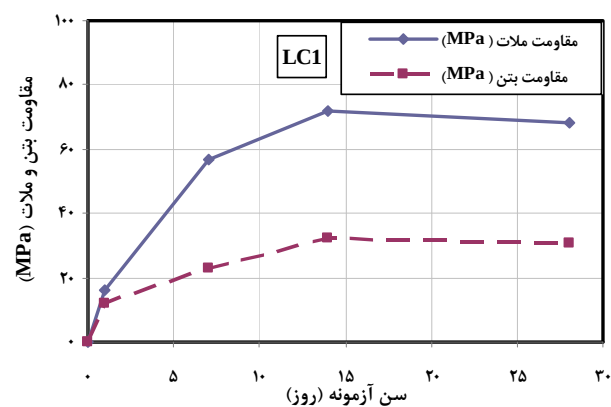
شکل ۴-۶- سطح مقطع برش خورده بتن سبکدانه

همانطور که در شکل ۴-۶ ج نشان داده شده، در بتن سبکدانه ترک ها معمولا از داخل سبکدانه ها عبور می کنند؛ در حالی که در بتن با سنگدانه طبیعی معمولا ترک ها در هنگام مواجه شدن با سنگدانه تغییر مسیر داده و از لایه مرزی عبور می کند.

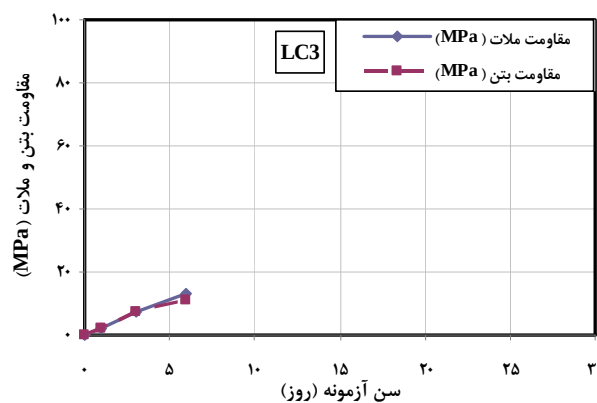
روند کسب مقاومت در بتن های سبک ساخته شده در شکلهای ۴-۷ تا ۴-۱۰ نشان داده شده است. در این شکلهای مقاومت ملات متناظر نیز نشان داده شده است. همانطور که انتظار می رود مقاومت ملات بیشتر از مقاومت بتن سبکدانه است اما روند کسب مقاومت در بتن و ملات یکسان است.



ب- LC2

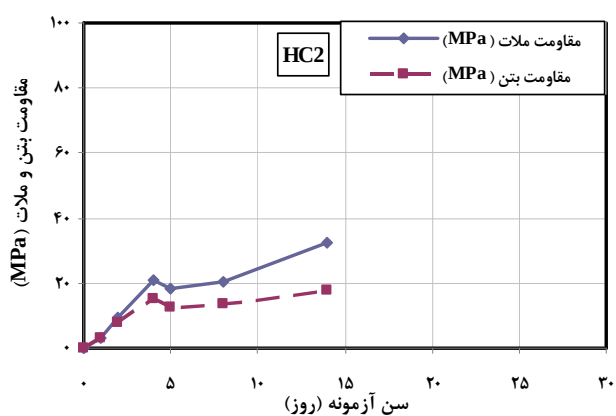


الف- LC1

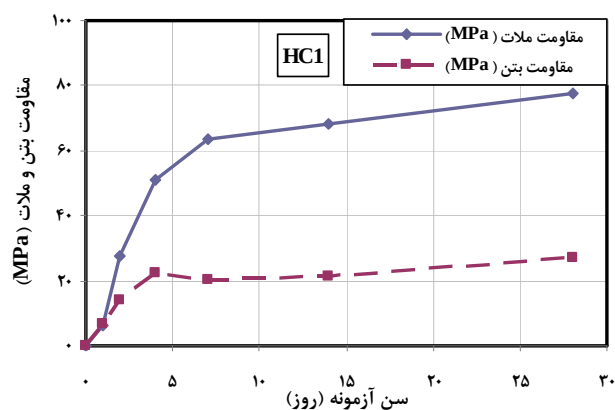


ج- LC3

شکل ۴-۷- روند کسب مقاومت فشاری در ملات و بتن ساخته شده با ۴۵٪ مترمکعب لیکا ۵۰۰

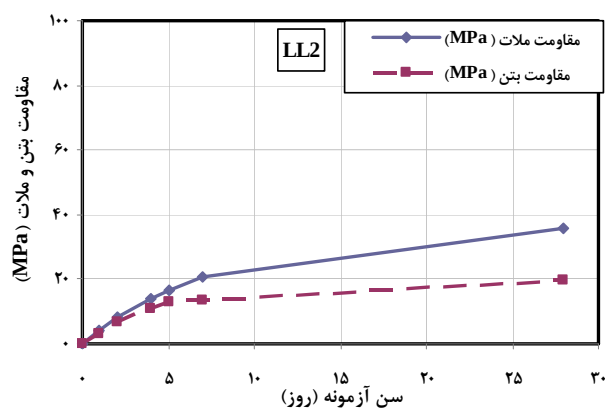


ب- HC2

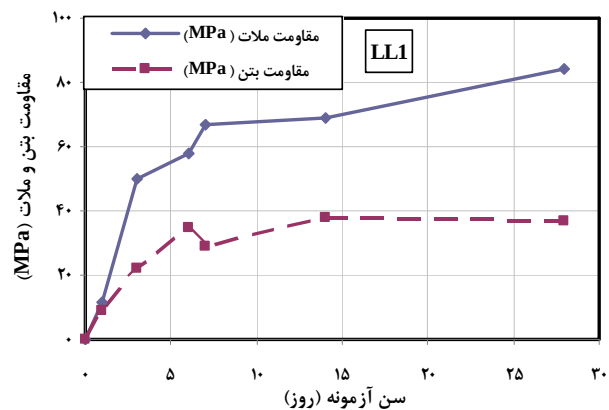


الف- HC1

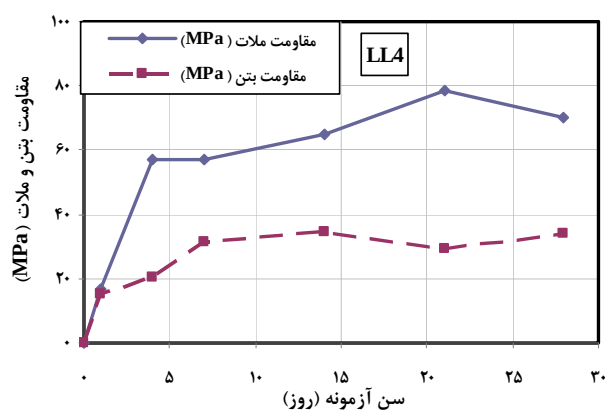
شکل ۴-۸- روند کسب مقاومت فشاری در ملات و بتن ساخته شده با ۶۰٪ مترمکعب لیکا ۵۰۰



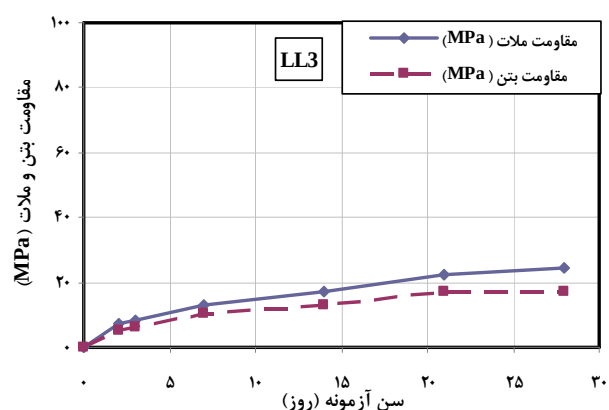
ب- LL2



الف- LL1

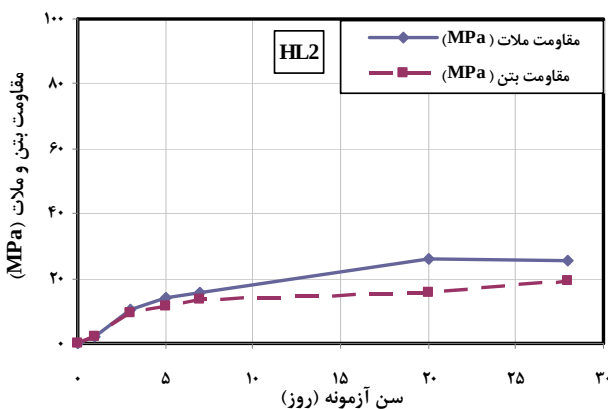


د- LL4

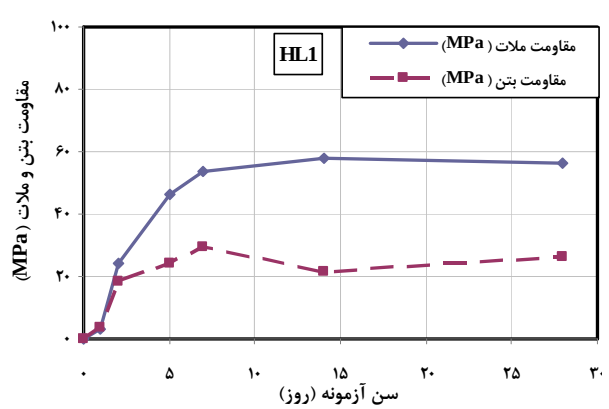


ج- LL3

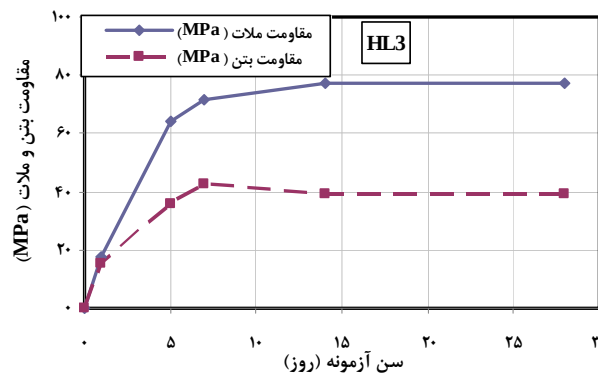
شکل ۴-۹- روند کسب مقاومت فشاری در ملات و بتن ساخته شده با ۴۵٪ مترمکعب لیکا ۷۰۰



ب- HL2



الف- HL1



ج- HL3

شکل ۴-۱۰- روند کسب مقاومت فشاری در ملات و بتن ساخته شده با ۶۰/۰ مترمکعب لیکا ۷۰۰

همانطور که از شکل های ۴-۷ تا ۴-۱۰ مشخص است، در مقاومت های کم بتن، اختلاف بین مقاومت فشاری ملات و مقاومت فشاری بتن ناچیز است. این در حالی است که در مقاومت های زیادتر این اختلاف قابل توجه می شود. به عبارت دیگر می توان با توجه به این نمودارها ظرفیت مقاومتی را تخمین زد. با توجه به تعاریف صورت گرفته ظرفیت مقاومتی بهینه سبکدانه در محدوده ای است که اختلاف زیادی بین نمودار مقاومت فشاری بتن و مقاومت فشاری ملات وجود نداشته باشد. به عنوان مثال، در نمونه LC2 تا مقاومت ۲۰ مگاپاسکال فاصله بین خطوط مقاومت بتن و مقاومت ملات کمتر از یک مگاپاسکال می باشد. با این حال در نمودار نمونه LC1 دیده می شود که هنگامیکه مقاومت ملات از ۷۰ مگاپاسکال تجاوز می کند اختلاف بین مقاومت ملات و بتن در حدود ۴۰ مگاپاسکال می شود. بنابراین با توجه به این نمودارها می توان برآورد نمود که ظرفیت مقاومتی بهینه این سبکدانه در حدود ۲۰ مگاپاسکال می باشد. قابل ذکر است که اختلاف قابل توجه بین مقاومت فشاری بتن و ملات پس از ظرفیت مقاومتی بهینه در بتن های فوق پرمقاومت ساخته شده با سنگدانه معمولی نیز دیده می شود.

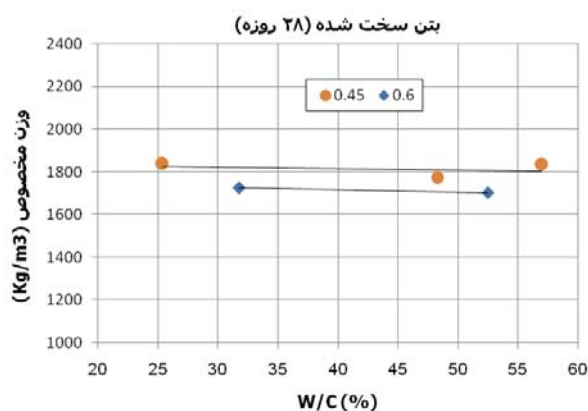
همچنین در تعدادی از نمودارهای فوق دیده می شود که با افزایش سن نمونه مقاومت فشاری ملات و یا بتن کاهش یافته است. این کاهش مقاومت (هرچند محسوس نمی باشد) به دلیل خطای آزمایشگاهی ناشی از ناهمگنی نمونه های شکسته شده می باشد. به نظر می رسد به منظور کاهش این خطا، می توان تعداد بیشتری نمونه را در هر سن مورد آزمایش قرار داد. البته این امر منجر به افزایش قابل توجه تعداد نمونه ها و افزایش هزینه آزمایش می گردد.

۴-۲-۵- وزن مخصوص بتن سخت شده : برای بتن ساخته شده با لیکا ۵۰۰، میانگین وزن مخصوص

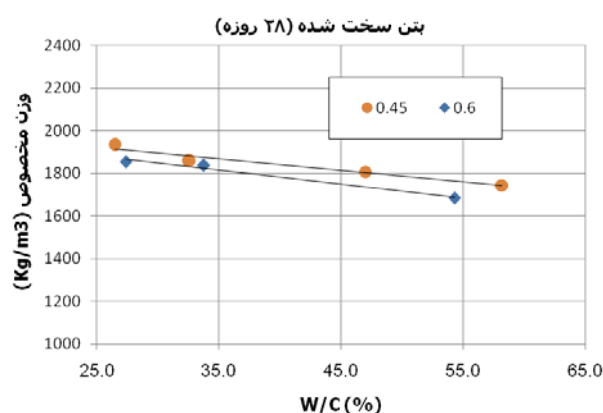
بتن خشک شده در هوا با حجم لیکای ۰/۴۵ متر مکعب، در حدود ۱۸۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد. میانگین وزن مخصوص بتن خشک شده در هوا با میزان لیکای ۰/۶۰ متر مکعب نیز در حدود ۱۷۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد. همانطور که ملاحظه می شود افزایش ۰/۱۵ متر مکعب لیکا در بتن باعث کاهش وزن مخصوص به میزان ۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب بتن می شود.

برای بتن ساخته شده با لیکا ۷۰۰، میانگین وزن مخصوص بتن خشک شده در هوا با حجم لیکای ۰/۴۵ متر مکعب، در حدود ۱۸۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد. میانگین وزن مخصوص بتن خشک شده در هوا با حجم لیکای ۰/۶۰ متر مکعب نیز در حدود ۱۷۹۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد. افزایش میزان لیکای استفاده شده به میزان ۰/۱۵ متر مکعب در بتن، در هر دو حالت استفاده از سبکدانه لیکا ۵۰۰ و لیکا ۷۰۰ وزن مخصوص بتن را در حدود ۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب کاهش داده است.

نتایج به دست آمده حاکی از آن است که علاوه بر میزان سبکدانه به کار رفته در ساخت بتن سبک، نسبت آب به سیمان مخلوط نیز بر وزن مخصوص بتن سبک تاثیر گذاشته است. تاثیر نسبت آب به سیمان بر روی وزن مخصوص بتن ساخته شده با سبکدانه لیکا ۵۰۰ و لیکا ۷۰۰ در دو حجم مختلف سبکدانه در شکل ۴-۱۱ آورده شده است. در حالت کلی با افزایش نسبت آب به سیمان وزن مخصوص بتن سبک کاهش یافته است. دلیل این امر را می توان به تاثیر نسبت آب به سیمان بر وزن مخصوص ملات بتن نسبت داد. همانطور که در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است با افزایش نسبت آب به سیمان وزن مخصوص ملات نیز کاهش می یابد.



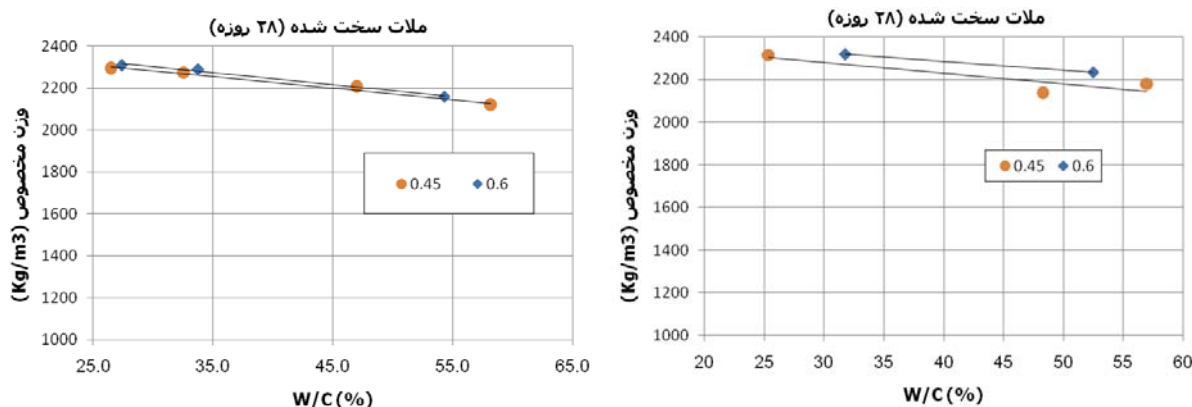
(ب) سبکدانه ی لیکا ۷۰۰



(الف) سبکدانه ی لیکا ۵۰۰

شکل ۴-۱۱- تاثیر نسبت آب به سیمان بر روی وزن مخصوص بتن سبک ساخته شده با لیکا ۵۰۰ و لیکا ۷۰۰

بنابراین برای دستیابی به بتن با وزن مخصوص مشخص علاوه بر پارامتر حجم لیکای مصرف شده در بتن، پارامتر نسبت آب به سیمان هم باید مد نظر قرار گیرد. نتایج به دست آمده از تاثیر نسبت آب به سیمان بر وزن مخصوص بتن سخت شده حاکی از آن است که با افزایش نسبت آب به سیمان وزن مخصوص بتن تا حدی کاهش می یابد.



ب) سبکدانه ۷۰۰

الف) سبکدانه ۵۰۰

شکل ۴-۱۲- تاثیر نسب آب به سیمان بر روی وزن مخصوص ملات و بتن سبک ساخته شده با

نکته قابل توجه در این میان عدم تفاوت قابل توجه در وزن مخصوص بتنهای ساخته شده با لیکا ۵۰۰ و لیکا ۷۰۰ می باشد. علی رغم آنکه وزن مخصوص سبکدانه های به کار رفته در ساخت این سری از بتن ها در حدود ۴۰٪ با یکدیگر متفاوت است (حدود ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب) اما میانگین وزن مخصوص بتنهای ساخته شده با آنها در هر دو حالت حجم ۰/۴۵ متر مکعب و ۰/۶۰ متر مکعب تنها در حدود ۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب متفاوت است. دلیل این امر را می توان تا حدی در میزان وزنی کم لیکا به کار رفته در ساخت بتن سبک جستجو کرد. به این معنا که تفاوت ۰/۱۵ متر مکعبی سبکدانه ها در دو حالت حجمی مختلف معادل تفاوت وزنی در حدود ۷۵ تا ۱۰۰ کیلوگرم سبکدانه است. با این وجود اظهار نظر قطعی در مورد میزان تاثیر وزن مخصوص سبکدانه ها بر وزن مخصوص بتن سبک ساخته شده پس از انجام آزمایشهای تکمیلی و ساخت آزمون هایی با نسبتهای اختلاط یکسان و نوع سبکدانه متفاوت امکان پذیر خواهد بود.

۴-۲-۶- بررسی نتایج به دست آمده : برای تعیین ظرفیت مقاومتی بهینه سبکدانه ها، تاثیر

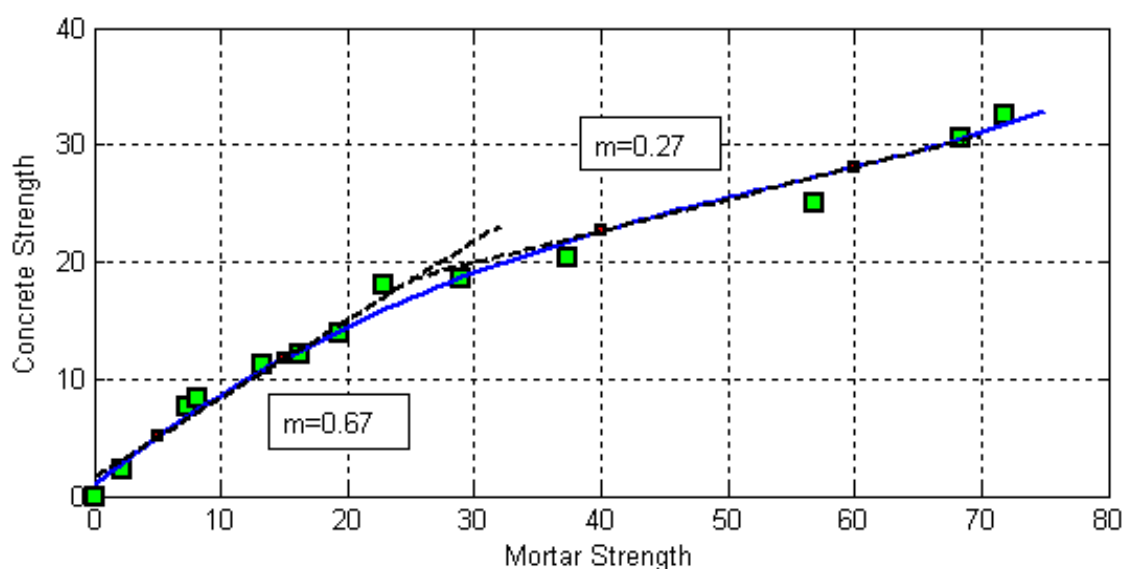
سبکدانه ها بر مقاومت بتن سبکدانه بررسی می گردد. به این منظور، نمودار مقاومت بتن سبکدانه در مقابل مقاومت ملات تشکیل دهنده آن ترسیم می شود. در صورتی که شیب نمودار مقاومت بتن در مقابل مقاومت ملات، یک یا عددی نزدیک آن باشد، نشان دهنده آن است که با افزایش مقاومت ملات، مقاومت بتن نیز به همان اندازه افزایش

یافته است. در این حالت سبکدانه ها تاثیر منفی در مقاومت بتن سبکدانه نداشته و عملکرد بتن از لحاظ مقاومتی شبیه بتنهای ساخته شده با سنگدانه معمولی است. این وضعیت در عمل کمتر اتفاق می افتد و حضور سبکدانه ها در بتن باعث کاهش شیب نمودار مقاومت بتن در مقابل مقاومت می گردد. این امر به آن معنا است که میزان افزایش مقاومت بتن سبکدانه کمتر از میزان افزایش مقاومت ملات تشکیل دهنده آن است. هر چقدر میزان شیب نمودار مقاومت بتن در برابر مقاومت ملات کمتر باشد نشان دهنده ضعف مقاومتی سبکدانه مورد استفاده و تاثیر منفی آن بر مقاومت بتن است.

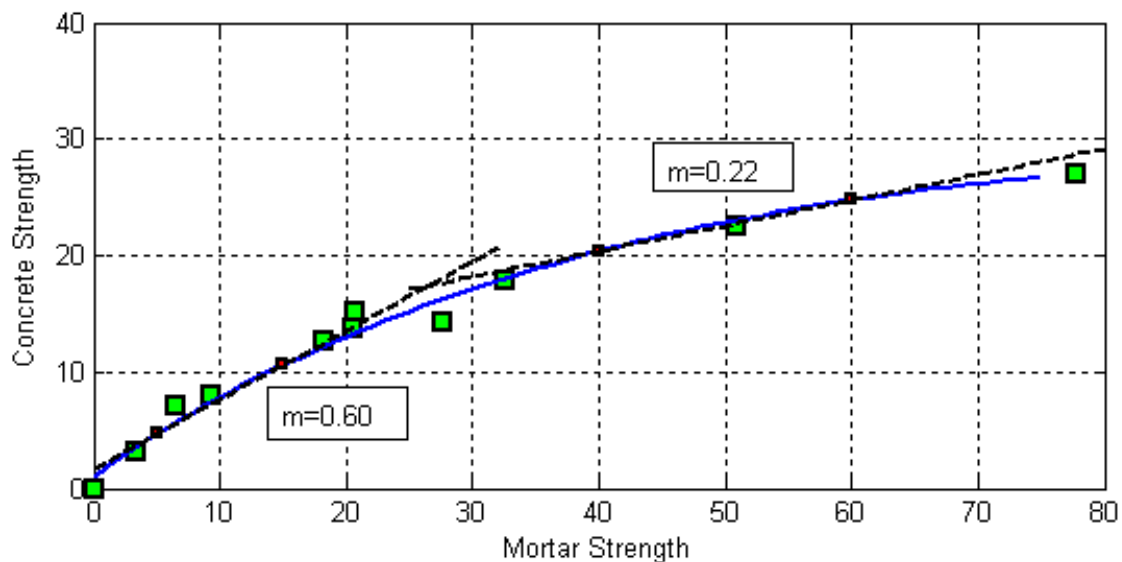
برای ترسیم نمودارهای ظرفیت مقاومتی از روش تقریب بر مبنای حداقل مربعات متحرک استفاده شده است. استفاده از این روش باعث می گردد که نیازی به در نظر گرفتن الگوی خاص از پیش تعیین شده مانند توابع خطی، درجه دو، نمایی و نظایر آن برای نمودار ظرفیت مقاومتی نباشد و نمودار بر مبنای آرایش گره ها به صورت خودکار ترسیم می گردد. برنامه ترسیم نمودار ظرفیت مقاومتی در محیط Matlab 7.3 نوشته و اجرا گردیده است. نمودارهای ظرفیت مقاومتی هر کدام از سبکدانه های آزمایش شده در ادامه بررسی می گردد.

الف - نمودار ظرفیت مقاومتی سبکدانه لیکا ۵۰۰ : نمودار ظرفیت مقاومتی سبکدانه لیکا ۵۰۰ در دو

حالت حجم کم لیکا (۰/۴۵ مترمکعب سبکدانه) و حجم زیاد (۰/۶۰ متر مکعب سبکدانه) در شکل ۴-۱۳ ترسیم شده است.



الف - سری LC، حجم لیکا ۰/۴۵ متر مکعب



ب- سری HC، حجم لیکا ۰/۶۰ متر مکعب

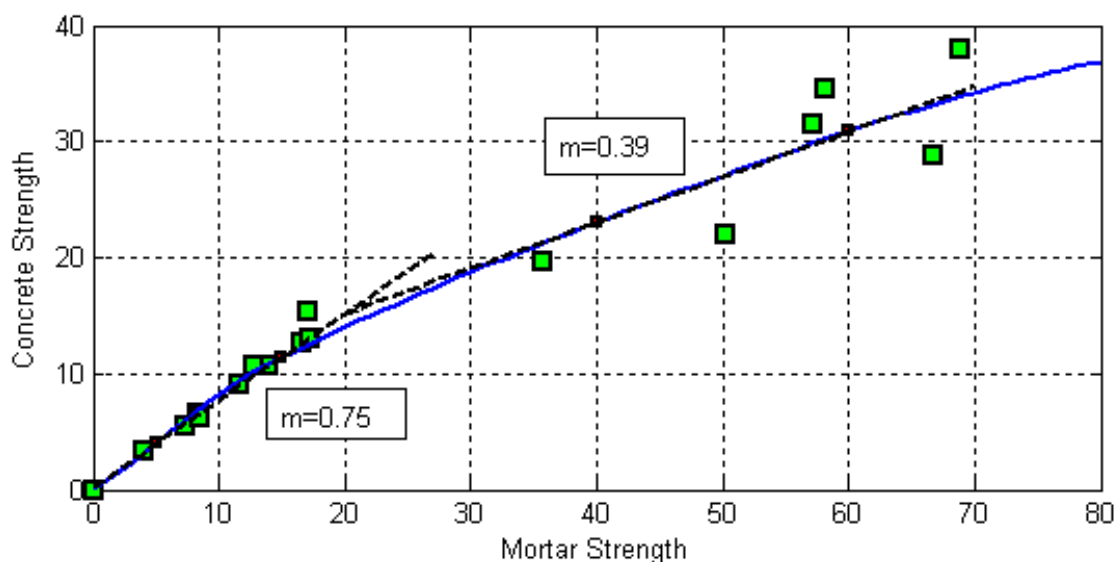
شکل ۴-۱۳ - نمودار ظرفیت مقاومتی لیکا ۵۰۰

نتایج به دست آمده نشان می دهد که شیب اولیه منحنی نمودار ظرفیت مقاومتی در هر دو حالت حجم کم و حجم زیاد تقریباً با یکدیگر برابر بوده و در حدود ۰/۶ تا ۰/۶۷ می باشد. این امر به آن معنا است که در محدوده مقاومت ملات کمتر از ۲۰ مگاپاسکال به ازای هر ۱۰ مگاپاسکال افزایش مقاومت ملات، مقاومت بتن در حدود ۶ تا ۷ مگاپاسکال افزایش می یابد. اما پس از عبور مقاومت بتن از حدود ۲۰ مگاپاسکال شیب نمودار تا حد زیادی کاهش می یابد به نحوی که در محدوده ۰/۲۲ تا ۰/۲۷ قرار می گیرد. یعنی به ازای هر ۱۰ مگاپاسکال افزایش مقاومت ملات، افزایش مقاومتی در حدود ۲/۲ تا ۲/۷ در بتن سبک متناظر آن مشاهده می شود. در این سری از آزمایشها تفاوت معنا داری میان شیب اولیه و ثانویه نمودار در دو حالت حجم کم و حجم زیاد مشاهده نشده است. این نتیجه تایید کننده نتایج قبلی به دست آمده در انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران می باشد.

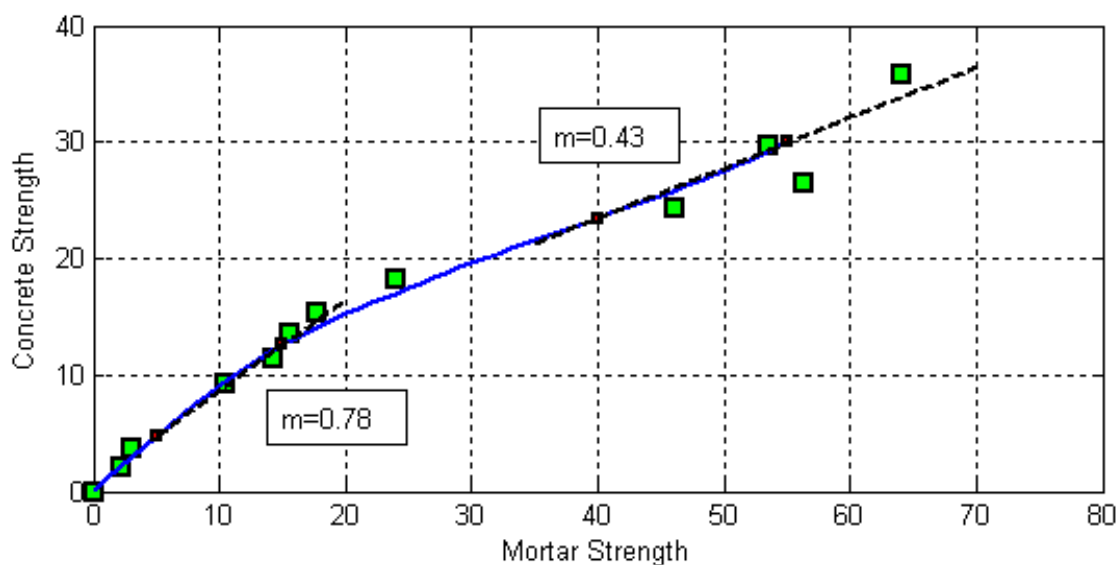
این نتایج نشان می دهد که استفاده از این سبکدانه برای ساخت بتن سبکی با مقاومتی در حدود ۲۰ مگاپاسکال مناسب می باشد. اما در صورتی که از این سبکدانه برای ساخت بتنی با مقاومت بیش از ۲۰ مگاپاسکال استفاده شود، به دلیل کاهش شیب نمودار ظرفیت مقاومتی هزینه نسبتاً زیادی برای افزایش مقاومت ملات مورد نیاز است که ممکن است باعث عدم توجیه اقتصادی بتن سبک ساخته شده با این سبکدانه برای کاربرد مورد نظر گردد.

ب- نمودار ظرفیت مقاومتی سبکدانه لیکا ۷۰۰: نمودار ظرفیت مقاومتی سبکدانه لیکا ۷۰۰ در دو

حالت حجم کم لیکا (۰/۴۵ مترمکعب سبکدانه) و حجم زیاد (۰/۶۰ متر مکعب سبکدانه) در شکل ۴-۱۴ ترسیم شده است.



الف- سری LL حجم لیکا ۰/۴۵ متر مکعب



ب- سری HL حجم لیکا ۰/۶۰ متر مکعب

شکل ۴-۱۴- نمودار ظرفیت مقاومتی لیکا ۷۰۰

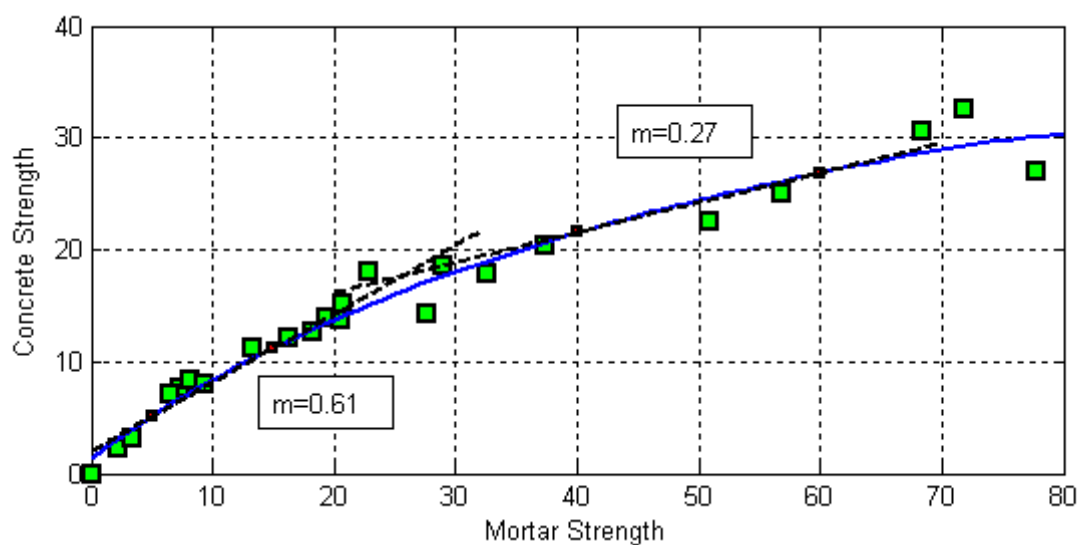
در این سری از آزمایشها نیز تفاوت زیادی میان شیب اولیه و ثانویه نمودارهای ظرفیت مقاومتی در دو حالت حجم سبکدانه ۰/۴۵ مترمکعب و ۰/۶۰ متر مکعب مشاهده نشده است. شیب نمودار مقاومت بتن سبک در برابر مقاومت

ملات در محدوده مقاومت ملات کمتر از ۲۰ مگاپاسکال در حدود ۰/۷۵ تا ۰/۷۸ می باشد. اما پس از عبور مقاومت ملات از محدوده ۲۰ مگاپاسکال شیب نمودار تا حد ۰/۳۹ تا ۰/۴۳ کاهش می یابد.

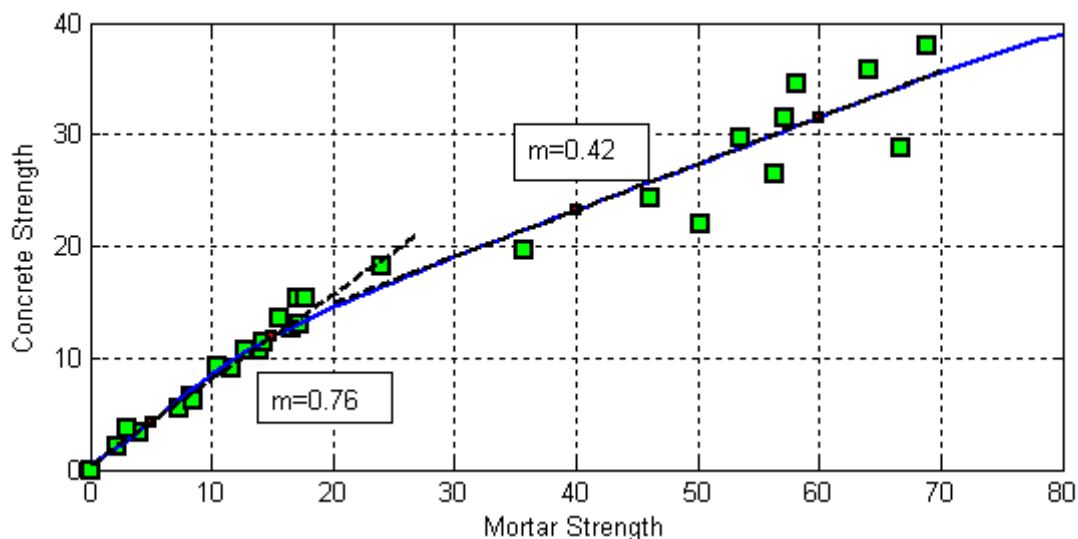
اگرچه در این سبکدانه پس از عبور مقاومت ملات از ۲۰ مگاپاسکال شیب نمودار کاهش یافته است اما این کاهش به اندازه کاهش مشاهده شده در لیکا ۵۰۰ نیست. در بتن سبک ساخته شده با سبکدانه لیکا ۷۰۰ پس از عبور مقاومت ملات از ۲۰ مگاپاسکال به ازای هر ۱۰ مگاپاسکال افزایش مقاومت ملات، مقاومت بتن سبک در حدود ۴ مگاپاسکال افزایش می یابد.

ج- مقایسه نمودار ظرفیت مقاومتی سبکدانه های آزمایش شده : با توجه به عدم تاثیر محسوس

حجم کاربرد سبکدانه در نمودار ظرفیت مقاومتی، مجموعه اطلاعات دو حجم ۰/۴۵ متر مکعب و ۰/۶۰ متر مکعب در یکدیگر ادغام شده تا با افزایش تعداد نقاط، دقت ترسیم نمودار ظرفیت مقاومتی افزایش یابد. این نمودارها برای دو سبکدانه لیکا ۵۰۰ و ۷۰۰ در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است.



الف- لیکا ۵۰۰



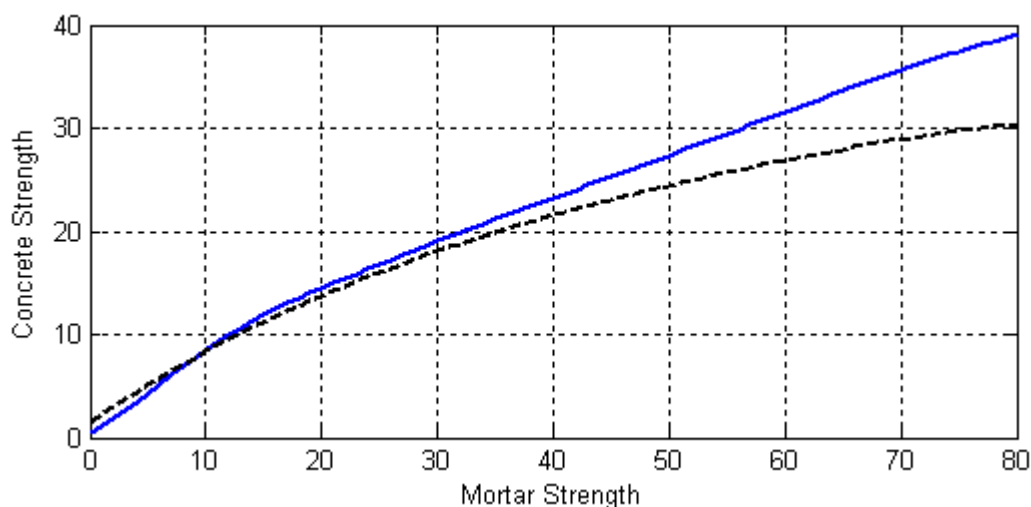
ب- لیکا ۷۰۰

شکل ۴-۱۵- نمودار ظرفیت مقاومتی بر مبنای مجموع اطلاعات حجم کم و حجم زیاد سبکدانه

تفاوت اصلی شیب نمودارهای ظرفیت مقاومتی در دو سبکدانه لیکا ۵۰۰ و لیکا ۷۰۰ در شیب اولیه و ثانویه آنها است. اگرچه محل آغاز تفاوت شیب در این دو نمودار در محدوده ۲۰ مگاپاسکال می باشد و از این جهت تفاوت محسوسی میان دو سبکدانه دیده نمی شود اما شیب اولیه نمودار ظرفیت مقاومتی لیکا ۵۰۰ در حدود ۰/۶۱ می باشد در حالیکه شیب اولیه نمودار ظرفیت مقاومتی لیکا در حدود ۰/۷۶ به دست آمده است. یعنی در محدوده مقاومت ملات کمتر از ۲۰ مگاپاسکال در بتن سبک ساخته شده با لیکا ۵۰۰ به ازای هر ۱۰ مگاپاسکال افزایش مقاومت ملات، مقاومت بتن سبک در حدود ۶ مگاپاسکال افزایش می یابد در حالیکه در بتن سبک ساخته شده با لیکا ۷۰۰ این افزایش در حدود ۸ مگاپاسکال است. به همین ترتیب شیب ثانویه نمودار برای سبکدانه لیکا ۵۰۰ در حدود ۰/۲۷ و برای لیکا ۷۰۰ در حدود ۰/۴۲ می باشد. این نتایج نشان دهنده بیشتر بودن مقاومت سبکدانه لیکا ۷۰۰ در مقایسه با لیکا ۵۰۰ می باشد.

برای مقایسه محدوده کاربرد بهینه هرکدام از سبکدانه ها، نمودار ظرفیت مقاومتی آنها با یکدیگر مقایسه می شود. در شکل ۴-۱۶ نمودار ظرفیت مقاومتی هر دو سبکدانه ترسیم شده است. مطابق این نمودار و صرفاً از دیدگاه مقاومتی، برای ساخت بتن سبک با مقاومت فشاری تا حد ۲۵ مگاپاسکال تفاوت زیادی در استفاده از سبکدانه لیکا ۵۰۰ و لیکا ۷۰۰ وجود ندارد. بنابراین با توجه به سبکتر بودن لیکا ۵۰۰، ضرورتی به استفاده از سبکدانه لیکا ۷۰۰ برای ساخت بتن سبک با مقاومت فشاری مساوی یا کمتر از ۲۵ مگاپاسکال وجود ندارد. اما در صورتی که

هدف ساخت بتن سبکی با مقاومت فشاری در محدوده ۲۵ تا ۴۰ مگاپاسکال باشد استفاده از سبکدانه لیکا ۷۰۰ مزیت قابل توجهی پیدا می کند. برای مثال مطابق نمودارهای ظرفیت مقاومتی شکل ۴-۱۶ برای ساخت بتن سبک با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال، در صورت استفاده از لیکا ۵۰۰ به عنوان سبکدانه، مقاومت ملات مورد نیاز ۸۰ مگاپاسکال است در حالیکه در بتن سبک ساخته شده با لیکا ۷۰۰ مقاومت ملات مورد نیاز برابر ۵۵ مگاپاسکال است که در حدود ۳۳٪ کمتر است. به این ترتیب هزینه کمتری برای تامین مقاومت ملات مورد نیاز بتن سبک صرف می شود و بتن سبک به دست آمده اقتصادی تر خواهد بود.



شکل ۴-۱۶ - مقایسه نمودار ظرفیت مقاومتی دو سبکدانه لیکا ۵۰۰ (خط چین) و لیکا ۷۰۰ (خط پر)

۵- نتیجه گیری

برای تعیین محدوده کاربرد مناسب سبکدانه ها، توجه به مشخصات مورد نیاز بتن سبک مانند وزن مخصوص و مقاومت مورد نظر و نیز شناخت کامل ویژگیهای سبکدانه های در دسترس ضروری است. خلاصه نتایج به دست آمده از آزمایشهای تعیین ظرفیت مقاومتی سبکدانه های سازه ای لیکا ۵۰۰ و لیکا ۷۰۰ در جدول ۵-۱ درج شده است. این نتایج نشان می دهد که تفاوت میانگین وزن مخصوص ظاهری سبکدانه ها در حدود ۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد. با این وجود وزن مخصوص بتنهای سبک ساخته شده با این سبکدانه ها تغییرات کمتری داشته و تفاوت میانگین وزن مخصوص آنها در حدود ۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد.

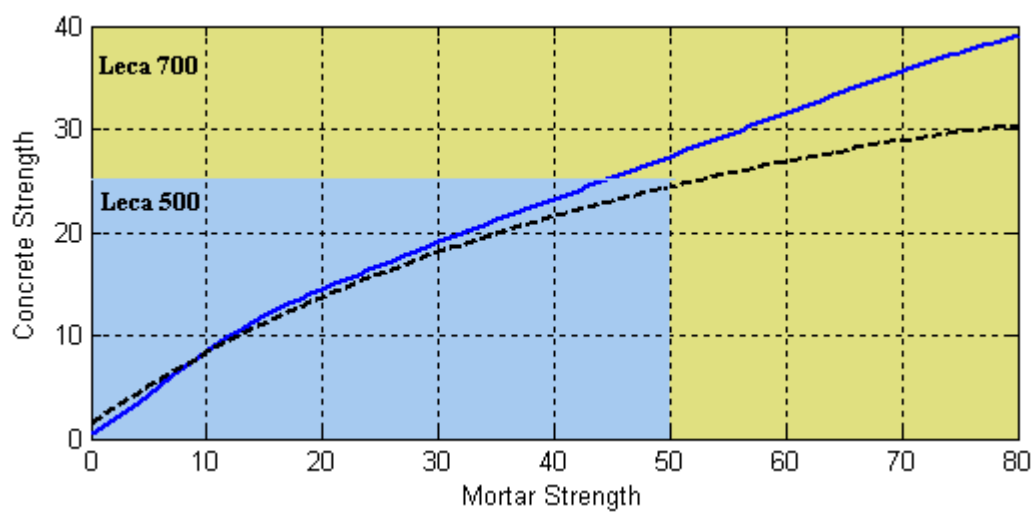
جدول ۵-۱- خلاصه نتایج آزمایشهای ظرفیت مقاومتی بتن سبکدانه

نوع سبکدانه	وزن مخصوص بتن سبکدانه		نمودار ظرفیت مقاومتی	
	وزن مخصوص ظاهری سبکدانه Kg/m ³	وزن مخصوص سبکدانه Kg/m ³	شیب اولیه	شیب ثانویه
لیکا ۵۰۰	۵۰۰-۶۰۰	۱۷۷۰	۰/۶۱	۰/۲۷
لیکا ۷۰۰	۵۸۰-۷۱۰	۱۸۲۰	۰/۷۶	۰/۴۲

از سوی دیگر تفاوت میان شیب نمودار ظرفیت مقاومتی در دو سبکدانه لیکا ۵۰۰ و لیکا ۷۰۰ نسبتاً زیاد است. این تفاوت هم در شیب اولیه نمودار و هم در شیب ثانویه نمودار مشاهده می شود. مقایسه نمودار ظرفیت مقاومتی سبکدانه های لیکا ۵۰۰ و لیکا ۷۰۰ نشان می دهد که در صورتی که مقاومت مورد نیاز بتن سبک در محدوده کمتر از ۲۵ مگاپاسکال باشد تفاوت محسوسی میان مقاومت بتن سبک ساخته شده با دو نوع سبکدانه مشاهده نمی شود. بنابراین در صورت نیاز به بتنی با مقاومت در حدود ۲۵ مگاپاسکال یا کمتر باشد استفاده از سبکدانه لیکا ۵۰۰ به دلیل وزن مخصوص کمتر مناسب تر است. اما در صورتی که مقاومت بتنی بیش از ۲۵ مگاپاسکال مورد نظر باشد، به دلیل شیب ثانویه بیشتر نمودار ظرفیت مقاومتی لیکا ۷۰۰ استفاده از این سبکدانه مزیت بیشتری دارد. شکل ۵-۱ محدوده ظرفیت مقاومتی بهینه هر کدام از سبکدانه های لیکا ۵۰۰ و لیکا ۷۰۰ را نشان می دهد.

بر مبنای این نمودار، ظرفیت مقاومتی بهینه سبکدانه لیکا ۵۰۰ در محدوده ۲۰ تا ۲۵ مگاپاسکال و ظرفیت

مقاومتی بهینه سبکدانه لیکا ۷۰۰ در محدوده ۳۵ تا ۴۰ مگاپاسکال می باشد.



شکل ۵-۱- محدوده ظرفیت مقاومتی بهینه سبکدانه های لیکا ۵۰۰ و لیکا ۷۰۰

پیوست یک

جزئیات مقادیر مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتن سخت شده

جدول ۱- مقاومت فشاری ملات و بتن با ۰/۴۵ مترمکعب لیكا ۵۰۰

مقاومت فشاری و وزن مخصوص ملات و بتن					
طرح اختلاط	LC1				
سن (روز)	۱	۷	۱۴	۲۸	وزن مخصوص (kg/m ³)
بتن (MPa)	۱۲/۱	۲۲/۹	۳۲/۵	۳۰/۵	۱۸۳۷
ملات (MPa)	۱۶/۳	۵۶/۸	۷۱/۹	۶۸/۴	۲۳۱۶

مقاومت فشاری و وزن مخصوص ملات و بتن							
طرح اختلاط	LC2						
سن (روز)	۲	۳	۵	۷	۱۴	۲۸	وزن مخصوص (kg/m ³)
بتن (MPa)	۸/۴	۱۱/۲	۱۳/۹	۱۸/۱	۱۸/۵	۲۰/۴	۱۷۷۲
ملات (MPa)	۸/۱	۱۳/۲	۱۹/۳	۲۲/۹	۲۸/۹	۳۷/۴	۲۱۳۶

مقاومت فشاری و وزن مخصوص ملات و بتن				
طرح اختلاط	LC3			
سن (روز)	۱	۳	۶	وزن مخصوص (kg/m ³)
بتن (MPa)	۲/۳	۷/۶	۱۱/۲	۱۸۳۷
ملات (MPa)	۲/۳	۷/۴	۱۳/۲	۲۳۱۶

جدول ۲- مقاومت فشاری ملات و بتن با ۰/۶۰ مترمکعب لیكا ۵۰۰

مقاومت فشاری و وزن مخصوص ملات و بتن					
طرح اختلاط	HC1				
سن (روز)	۱	۲	۴	۲۸	وزن مخصوص (kg/m ³)
بتن (MPa)	۱۲/۱	۱۴/۲	۲۲/۶	۳۰/۵	۱۷۲۵
ملات (MPa)	۱۶/۳	۲۷/۶	۵۰/۹	۸۶/۴	۲۳۱۹

مقاومت فشاری و وزن مخصوص ملات و بتن							
طرح اختلاط	HC2						
سن (روز)	۲	۳	۵	۷	۱۴	۲۸	وزن مخصوص (kg/m ³)
بتن (MPa)	۸/۴	۱۱/۲	۱۳/۹	۱۸/۱	۱۸/۵	۲۰/۴	۱۷۰۳
ملات (MPa)	۸/۱	۱۳/۲	۱۹/۳	۲۲/۹	۲۸/۹	۳۷/۴	۲۲۳۵

جدول ۳ - مقاومت فشاری و وزن مخصوص ملات و بتن با ۰/۴۵ مترمکعب لیكا ۷۰۰

مقاومت فشاری و وزن مخصوص ملات و بتن							
طرح اختلاط	LL1						
سن (روز)	۱	۳	۶	۷	۱۴	۲۸	وزن مخصوص (kg/m ³)
بتن (MPa)	۹	۲۲	۳۴/۶	۲۸/۸	۳۸	۳۷/۱	۱۹۳۳
ملات (MPa)	۱۱/۶	۵۰/۲	۵۸/۱	۶۶/۸	۶۸/۸	۸۴/۱	۲۲۹۲

مقاومت فشاری و وزن مخصوص ملات و بتن							
طرح اختلاط	LL2						
سن (روز)	۱	۲	۴	۵	۷	۲۸	وزن مخصوص (kg/m ³)
بتن (MPa)	۳/۳	۶/۶	۱۰/۷	۱۲/۷	۱۳/۳	۱۹/۶	۱۸۰۸
ملات (MPa)	۴	۸/۴	۱۴	۱۶/۵	۲۰/۹	۳۵/۷	۲۲۰۵

مقاومت فشاری و وزن مخصوص ملات و بتن							
طرح اختلاط	LL3						
سن (روز)	۲	۳	۷	۱۴	۲۱	۲۸	وزن مخصوص (kg/m ³)
بتن (MPa)	۵/۴	۶/۲	۱۰/۶	۱۳	۱۷	۱۷/۳	۱۷۴۵
ملات (MPa)	۷/۳	۸/۵	۱۲/۸	۱۷/۲	۲۲/۵	۲۴/۶	۲۱۱۷

مقاومت فشاری و وزن مخصوص ملات و بتن							
طرح اختلاط	LL4						
سن (روز)	۱	۴	۷	۱۴	۲۱	۲۸	وزن مخصوص (kg/m ³)
بتن (MPa)	۱۵/۴	۲۰/۶	۳۱/۴	۳۴/۳	۲۹/۱	۳۴	۱۸۵۸
ملات (MPa)	۱۷	۵۷	۵۷/۲	۶۴/۸	۷۸/۶	۷۰/۲	۲۲۷۴

جدول ۴ - مقاومت فشاری ملات و بتن با ۰/۶۰ مترمکعب لیكا ۷۰۰

مقاومت فشاری و وزن مخصوص ملات و بتن							
طرح اختلاط	HL1						
سن (روز)	۱	۲	۵	۷	۱۴	۲۸	وزن مخصوص (kg/m ³)
بتن (MPa)	۳/۷	۱۸/۲	۲۴/۳	۲۹/۷	۲۱/۵	۲۶/۴	۱۸۳۸
ملات (MPa)	۳/۱	۲۴	۴۶/۱	۵۳/۵	۵۷/۸	۵۶/۴	۲۲۹۰

مقاومت فشاری و وزن مخصوص ملات و بتن							
طرح اختلاط	HL2						
سن (روز)	۱	۳	۵	۷	۲۰	۲۸	وزن مخصوص (kg/m ³)
بتن (MPa)	۲/۱	۹/۲	۱۱/۴	۱۳/۵	۱۵/۴	۱۹/۳	۱۶۸۳
ملات (MPa)	۲/۳	۱۰/۵	۱۴/۳	۱۵/۶	۲۵/۸	۲۵/۷	۲۱۶۰

مقاومت فشاری و وزن مخصوص ملات و بتن							
طرح اختلاط	HL3						
سن (روز)	۱	۵	۷	۱۴	۲۸		وزن مخصوص (kg/m ³)
بتن (MPa)	۱۵/۴	۳۵/۷	۴۲/۵	۳۹/۳	۳۹/۳		۱۸۵۲
ملات (MPa)	۱۷/۸	۶۴/۱	۷۱/۶	۷۷/۱	۷۷/۱		۲۳۰۸

پیوست دو

جزئیات مقادیر جذب آب سبکدانه های لیکا

جذب آب لیکای غیر سازه ای ۳۵۰

اندازه دانه (mm)	نیم ساعته	یک ساعته	۲۴ ساعته
۴	۱۰/۴	۱۱/۵	۱۵/۴
۵/۶	۱۰/۸	۱۱/۶	۱۵/۵
۶/۳	۱۱/۱	۱۱/۶	۱۵/۶
۸	۱۱/۱	۱۱/۹	۱۵/۷

جذب آب لیکای سازه ای ۵۰۰

اندازه دانه (mm)	نیم ساعته	یک ساعته	۲۴ ساعته
۴	۶/۷	۷/۰	۱۱/۳
۵/۶	۶/۶	۶/۸	۱۱/۱
۶/۳	۶/۶	۶/۹	۱۰/۹
۸	۶/۳	۶/۷	۱۰/۸

جذب آب لیکای سازه ای ۷۰۰

اندازه دانه (mm)	نیم ساعته	یک ساعته	۲۴ ساعته
۴	۵/۲	۵/۳	۶/۷
۵/۶	۵/۴	۵/۴	۶/۸
۶/۳	۵/۴	۵/۵	۶/۸
۸	۵/۶	۵/۷	۶/۹

پیوست سه

واژه نامه

A		M	
Admixtures	مواد افزودنی	Mix Design	طرح اختلاط
Air Entraining Agent	مواد حباب ساز	Mixture proportions	نسبتهای اختلاط
Artificial Aggregate	سنگدانه مصنوعی	Module of Elasticity	مدول الاستیسیته
B		Molding	قالب گیری
Bending strength	مقاومت خمشی	Mortar	ملات
C		Moving Least Squares Method	روش حداقل مربعات متحرک
Capillary Pores	مجراهای مویینه	N	
Ceiling Strength	ظرفیت مقاومتی	Natural Aggregate	سنگدانه طبیعی
Cement Content	عیار سیمان	Normal Weight Concrete	بتن با وزن طبیعی
Cement Paste	خمیر سیمان	Non-structural Leca	لیکای غیر سازه ای
Clinker	کلینکر	Non-structural LWAC	بتن سبک غیرسازه‌ای
Compressive Strength	مقاومت فشاری	O	
Corrosion	خوردگی	Open-Structure Concrete	بتن با ساختار باز
D		P	
Durability	پایایی	Porosity	تخلخل
E		Pumice	پوکه معدنی یا پومیس
Expanded Clay	رس منبسط	S	
Expanded Shale	شیل منبسط شده	Sampling	نمونه برداری
F		Scoria	اسکریا، سنگ پا
Fly Ash	خاکستر بادی	Shale	شیل
Foamed Concrete	بتن اسفنجی	Sieving	الک کردن
Foamed Slag	روباره منبسط شده	Slate	اسلیت
Foaming Agent	مواد کف ساز	Specific Gravity	وزن مخصوص
Fresh Concrete	بتن تازه	Structural Leca	لیکای سازه ای
G		Structural LWAC	بتن سبک سازه‌ای
Grading	دانه بندی	T	
High Strength Light Weight Concrete	بتن سبک پرمقاومت	Tension Strength	مقاومت کششی
L		Tuff	توف
LA Abrasion Test	آزمایش سایش لس آنجلس	W	
Leca (Light Expanded Clay Aggregate)	لیکا	Water Absorption	جذب آب
Light Weight Aggregate	سبکدانه	Water-Cement Ratio	نسبت آب به سیمان
Light Weight Aggregate Concrete	بتن سبکدانه	Workability	کارپذیری
Light Weight Concrete	بتن سبک		