



جمهوری اسلامی ایران
وزارت مسکن و شهرسازی



حقوقات ساختمان و مسکن

لیگا بتن

بتن سبک با استفاده از پوکه صنعتی

مجری پروژه: کامپیز تاییدی

چاپ دوم

پیشگفتار

مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن در محدوده اساسنامه قانونی خود و در بی تحقق آن دسته از فرصت‌های پژوهشی - کاربردی در زمینه‌های ساختمان و مسکن ، علاوه بر این که تا به حال عمدتا " شروع و خاتمه تعداد زیادی از طرح‌های پژوهشی را بر عهده داشته و خواهد داشت ، لاجرم به منظور گسترش دامنه فعالیت‌های پژوهشی خود به شیوه‌های جدیدی دست یاریده که یکی از آنها قبول همکاری‌های تحقیقاتی به منظور اجرای طرح‌های پژوهشی با اشخاص و مؤسسات ذیربط در چارچوب اهداف و وظایف قانونی خود بوده است . بدین‌سیاست ، این روش علاوه بر تأمین برخی از نیازهای تخصصی جامعه فنی کشور ، شخص یا مؤسسه سرمایه گذارانیز به سرعت به اهداف کاربردی خود نزدیک ساخته و از این طریق نیز گام موثری در ارتقای کمی و کیفی تولیدات مصالح ساختمانی در کشور برداشته می‌شود .
بر پایه این شیوه تحقیقاتی و به دنبال تفاهمی که شرکت لیکا با این مرکز به منظور بررسی و تحقیق در خصوص " بتن سبک با استفاده از پوکه صنعتی " به عمل آورده و بخشی از هزینه‌های مربوط به تهیه آن را نیز تقبل نموده است ، نشیوه حاضر را به امید اینکه محتوای آن بتواند برای پژوهشگران و اشخاص علاقه مند سودمند باشد به چاپ می‌سپارد .

مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن



جمهوری اسلامی ایران
وزارت مسکن و شهرسازی



مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن

نشریه شماره ۷۱

لیکا بتن

بتن سبک با استفاده از پوکه صنعتی

مجری پروژه: کامبیز تاییدی



لیکابتن ، بتن سبک با استفاده از پوکه صنعتی

مجری پروژه : مهندس کامبیز تأییدی مشاور پروژه : مهندس محمد حسین هوشدار تهرانی
 چاپ اول، نشریه شماره ۱۲۱ اردیبهشت ۱۳۶۶ چاپ دوم ، آبان ۱۳۶۹

تعداد : ۳۰۰۰ نسخه

تایپ : انتشارات مرکز

طراحی وصفحه آرایی : گروه گرافیک مرکز

چاپ و صحافی : چاپخانه مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن

مقدمه

یکی از راههای ساخت بتن سبک برای قطعات ساختمانی ، استفاده از دانه‌های سبک رس منبسط شده می‌باشد که نخستین بار در سال ۱۹۱۷ میلادی ساخته شد . این دانه‌های سبک در کشورهای جهان و با توجه روزافزونی که به آن شده بناهای گوناگون تولید و مصرف می‌شود که در ایران بنام لیکا یا پوکه صنعتی معروف است . لیکا (Leca) مخفف حروف لاتین Light expanded clay aggregate می‌باشد .

هدف از تهیه و تدوین این گزارش علمی و پژوهشی این است که با توجه به تکنولوژی پیشرفته در امر ساخت بتنهای سبک ، بتوان بهترین مقاومت فشاری را توأم با کاهش وزن فضایی بدست آورد . در این گزارش ، خواص مکانیکی لازم در طرح و ساخت این نوع بتن بشرح زیر مشخص گردیده است :

- ۱ - مقاومت فشاری
 - ۲ - مقاومت گششی
 - ۳ - چسبندگی به آرماتور
 - ۴ - دوام و سنجش میزان تاثیر یخ‌بندان و ذوب یخ ، آتش‌سوزی و مواد شیمیائی
 - ۵ - مدول استیسیته
 - ۶ - وارفتگی
 - ۷ - افت یا جمع شدگی
 - ۸ - ضریب انبساط حرارتی
 - ۹ - خواص عایق حرارتی
 - ۱۰ - خواص آکوستیکی
- هدف کلی از ارائه این گزارش بررسی ساخت بتنهای دانه سبک لیکاست ، بذخوی که با کاهش وزن فضایی بتوان بهترین مقاومت را به دست آورد . از نتایج بدست آمده در این

فهرست مطالب

صفحه

۱	پیشگفتار
۳	مقدمه
۷	طریقه ساخت بتن سبک لیکا
۹	دانه و دانه‌بندی
۱۷	مقدار سیمان مصرفی
۱۹	مقدار آب مصرفی
۲۰	ساخت و تعیین مقاومت نمونه‌های لیکابتن
۴۰	مقاومت چسبندگی آرماتور به لیکابتن
۴۳	مقاومت گشش لیکابتن
۴۵	مقاومت گششی در خمس
۴۶	تغییر طول لیکابتن
۴۷	مدول الاستیسیته لیکابتن
۴۸	وارفتگی
۵۰	افت یا جمع شدگی
۵۱	ضریب انبساط حرارتی
۵۱	خواص آگوستینکی
۵۲	خواص عایق حرارتی
۵۳	دوام بتن سبک
۵۴	مقاومت در مقابل آتش‌سوزی
۵۴	پایداری در برابر مواد شیمیایی
۵۵	آزمایش یخزدن و ذوب یخ

بررسی می‌توان درکاوش وزن قطعات پیش ساخته درجهت حفظ تعادل دخل و خروج از نظرحمل، نصب و کمترشدن فولاد و ابعاد فونداسیونها (بعلت سبکی ساختمان) استفاده نمود.^{*}

معمولًا " بازدید از وزن این نوع بتن ، مقاومت فشاری آن افزایش می‌یابد . این نوع بتن در ساخت قطعات عایق حرارتی و شبیب بندی با وزنهای کم (Kg/M^3 ۱۰۰۰ - ۴۰۰) ، قطعات غیرباربر با وزنهای متوسط (Kg/M^3 ۱۳۰۰ - ۱۰۰۰) و قطعات باربر با وزنهای زیاد (Kg/M^3 ۱۸۰۰ - ۱۲۰۰) مورد استفاده قرار می‌گیرد . قطعات باربر باید حداقل مقاومت فشاری ۱۸۰۰ Kg/cm² را باحداکثر وزن فضایی Kg/M^3 ۱۸۰۰ دارا باشند .

در طول پنجاه سال گذشته در امریکا ، لیکا بتن برای ساخت قطعات ساختمانی مورد استفاده قرار گرفته است . مرکز تحقیقات ساختمان هندوستان ، بررسیهای مقدماتی بر روی دانههای سبک رس منبسط شده و بتن سبک بدست آمده از آن را از سال ۱۹۶۱ میلادی شروع کرده است . مقدار تولید سالیانه رس منبسط شده درکشورهای جهان بوضوح در جدول شماره یک مشخص گردیده است . ساخت این نوع بتن با مقاومت فشاری بیشتر از $20/3 Kg/cm^2$ در رده بتن سبک ، قابل استفاده در ساختهای قرار گرفته است * (۱) . برای لیکا بتن با وزن حجمی کمتر از $1841 Kg/M^3$ مقاومت فشاری بدست آمده به مقدار $633 Kg/cm^2$ گزارش شده است (۲) . این بتن در ردیف بتنهای سبکی است که از نسبت مقاومت به وزن فضایی بالایی برخوردار می‌باشد . بتنهای دانه سبک رامی توان برای ساخت قطعات ساختمانی در محل که نقش مؤثری درکاوش وزن ساختمان و اقتصادی بودن آن (خصوصاً " در ساختمانهای صرتفع ، زمینهایی با مقاومت کم و مناطقی که دارای معادن سن نباشند) دارد ، بکاربرد . همچنین در کارهای ساختمانی بجا بتن معمولی مورد استفاده قرار می‌گیرد : برای مثال :

- ۱- بتن ریزی درجا برای ساختن پلهای ، ساختمانها ، جاده‌ها و غیره .
 - ۲- تولید تیرچه‌های پیش ساخته و ساخت دیوارهای باندزهای بزرگ و متوسط ، کف و سقف و سایر اجزای ساختمانی .
 - ۳- تولید بلوكهای توپر و توخالی به منظور واحدهای باربر یا غیرباربر .
- افزون برآنچه که گذشت ، از دانههای لیکا ، میتوان بتنی سبک با مقاومتی معادل بتن معمولی ساخت ، بطوری که وزن فضایی آن در حدود $\frac{2}{3}$ بتن معمولی باشد .

* - عدد داخل پرانتز ، شماره ردیف در فهرست مرا جمع را مشخص می‌کند .

فهرست

پایانه تسبیب

۶۰

طرح، ساخت و آزمایش پانل سقفی واحدهای مسکونی از لیگابتن

۶۱

ساخت

۶۱

آزمایش بارگذاری پانل

۶۲

تعیین مدول استیسیته لیگابتن، مبنی بر نتایج آزمایش بارگذاری

۶۵

فهرست منابع

روابط همکاری

۷۱

نتایج تدبیر

۷۲

نتایج تدبیر

۷۳

نتایج تدبیر

۷۴

نتایج تدبیر

۷۵

نتایج تدبیر

۷۶

نتایج تدبیر

۷۷

نتایج تدبیر

۷۸

نتایج تدبیر

۷۹

نتایج تدبیر

۸۰

نتایج تدبیر

۸۱

نتایج تدبیر

۸۲

نتایج تدبیر

۸۳

نتایج تدبیر

۸۴

نتایج تدبیر

۸۵

نتایج تدبیر

۸۶

نتایج تدبیر

۸۷

جدول شماره ۱. مقدار تولید سالیانه دانه‌های سیگرس منبسط شده همراه با نامهای تجاری متداول و سال ۹۰ ماری آن در کشورهای جهان به نقل از:

Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP)

ردیف	نام کشور	سال	مقدار تولید	نام متداول	نام نامهای نیگر
۱	چکسلواکی	۱۹۷۵	۲۵۰۰۰۰ M ³	کرام زیتا	
۲	دانمارک	۱۹۷۵	۲۰۰۰۰۰	لیکا	
۳	فلات	۱۹۷۴-۷۵	۴۰۰۰۰	"	
۴	فرانسه	۱۹۷۴	۳۲۳۰۰۰	"	آرژی لکسپان یا آرژی و یا آرژیوست →
۵	جمهوری فدرال آلمان	۱۹۷۴-۷۵	۱۳۰۰۰۰	-	
۶	جمهوری دمکراتیک آلمان	۱۹۷۵	۶۰۰۰	-	
۷	مجارستان	۱۹۷۲	۱۰۰۰۰	-	
۸	ایتالیا	۱۹۷۵	۱۰۰۰۰	لتربیت لیکا	
۹	هلند	۱۹۷۵	۲۰۰۰۰	-	
۱۰	نروژ	۱۹۷۵	۲۵۰۰۰	لیکا	
۱۱	لهستان	۱۹۷۲	۱۶۰۰۰	کرام زیت	
۱۲	پرتغال	۱۹۷۵	۱۸۰۰۰	لیکا	
۱۳	آفریقای جنوبی	۱۹۷۰	مشخص نشد	آکلایت	
۱۴	اسپانیا	۱۹۷۵	"	لیاپور	
۱۵	سوئد	۱۹۷۵	۹۰۰۰۰	لیکا - اکسل	
۱۶	سوئیس	۱۹۷۵	۲۵۰۰۰	لیکا	
۱۷	انگلیس و ایرلند	۱۹۷۵	۲۰۰۰۰	"	
۱۸	امریکای شمالی	۱۹۷۲	مشخص نشد	-	
۱۹	اتحاد جماهیر شوروی	۱۹۷۲	۱۳۲۰۰۰۰	کرام زیت	
۲۰	استرالیا	۱۹۷۴	۳۸۰۰۰	-	
۲۱	بلژیک	۱۹۷۵	۵۵۰۰۰	اگرکس - ایزول	
۲۲	بلغارستان	۱۹۷۲	۲۵۰۰۰	-	
۲۳	اویزان	۱۹۸۴	۱۲۰۰۰	لیکا	

طریقه ساخت بتن سبک لیکا

بتن سبک لیکا ، مانند بتن معمولی از مخلوط کردن دانه ها ، سیمان و آب ساخته می شود . منتها بجای شن و ماسه ، از دانه های سبک یادانه های درشت لیکا و ماسه استفاده می کنند . دانه های لیکا از پختن خاک رس مرطوب و شکل یافته ، در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد در کوره بدست می آید . سبک شدن دانه ها با تراکم و فرار گاز هایی که باعث متخلخل شدن دانه ها می شوند صورت می گیرد . معمولاً " ساخت دانه های لیکا به یکی از سه روش زیر می انجامد :

- ۱- انبساط در کوره گردان (کارخانه لیکا در ایران واقع در جاده ساوه) از این روش برای تولید دانه های سبک استفاده می کند .
- ۲- انبساط در کوره با بدنه قائم
- ۳- انبساط و سفت شدن بر روی تسمه متحرک *

۱. انبساط در کوره گردان - اغلب دانه های سبک صنعتی بوسیله کوره های گردان منبسط می شوند . کوره های گردان برای تولید دانه های سبک ، از قبیل رس و شیست منبسط شده ، دارای بدنه استوانه ای فولادی طویلی است که از داخل با آجرهای نسوز پوشیده شده که در حول محور مرکزی در دوران است . کوره گردان بطور مایل و با زاویه کمتر از ۵ درجه نسبت به افق نصب می گردد ، طول کوره معمولاً " در حدود ۳۰ الی ۶۰ متر است که به ترکیبات مواد خام مصرفی بستگی دارد . تکه های خمیر رس از دهانه بالایی کوره ریخته شده و حرارت از انتهای دیگر به داخل کوره دمیده می شود . در طول زمان عمل آمدن مواد در

Sintering on a Sinter belt - * کلمه "Sinter" میان "Sinter" و "Sintering" است .

ترجمه شده که با ترکیبات آبهای معدنی بوجود می آید بکاررفته است ، تراورس

کوره ، درجه حرارت دانه‌ها تا وقوع انبساط و سفت شدن بتدريج افزایش می‌يابد . سپس دانه‌ها از کوره تخليه و به داخل سرد کننده گرдан حمل و بوسيله هوای سرد ، خنك می‌شوند . آنگاه دانه‌های سرد شده رادراندازه‌های دلخواه ، الک و تقسيم می‌کنند ، دانه‌های بزرگتر در ضمن اين عمل ممکن است خرد شده و به دانه‌های کوچکتر تبدیل شوند ، اين دانه‌ها معمولاً دارای سطحی صاف و بعضی مواقع شيشه‌ای بوده و اغلب کروی شکل می‌باشد .

۲ . انبساط در کوره با بدنه قائم - دانه‌های شکل یافته خمیر رس (تکه‌های بريده شده از رشته‌های خمیر رس) به داخل کوره با بدنه قائم در توده‌های مشخص منتقل می‌شوند . فوران شدید گاز مشتعل از مرکز پایه مخزن مواد داخل کوره را بطرف بالا تا ارتفاعی بلند می‌کند ، تا جايیکه نيري وارد کمتر از وزن مواد گردد . موادی که به پايین می‌افتنند ، بطرف پایه مخزن احتراق که به شکل قيف است غلتیده و دوباره بطرف بالا پرتاب می‌شوند . اين عمل چندين بار تكرار می‌شود . مدت زمان عمل آوردن توده مواد در کوره ، در حدود يك دقيقه است . شکل اوليه مواد در طی عمل آمدن و انبساط تقریباً ثابت می‌ماند . اين روش بيشتر برای تولید دانه‌های رس و شیست منبسط شده مناسب است .

۳ . سفت شدن بر روی تسمه - ابتدا مواد خام باید یا حاوی مواد کربنی که سوخت را تأمین می‌کند باشد ، یا با سوخته‌ایی از قبیل ذغال پودرشده مخلوط شوند و یا می‌توان از گاز طبیعی استفاده کرد . مواد از قبل آماده شده ، در لایه‌ای به ضخامت ۱۵۰-۲۵۰ میلیمتر بر روی شبکه فولادی متحرک قرار گرفته و در زیر سرپوش‌های خشک کننده و احتراق حمل می‌شوند و سپس در زیر مشعلها بطوری که ابتدا سطح رویی لایه سوزانده شده و در حالی که بتدريج حرارت به عمق لایه منتقل می‌شود ، شبکه فولادی متحرک به حرکت خود ادامه می‌دهد . گازهایی که بوجود می‌آيند عمل انبساط را باعث می‌شوند . گرچه در بعضی حالتها بعلت سوختن مواد سوختنی در مواد خام اين دانه‌ها و از دست دادن رطوبت ، موجب چسبیدن ريزدانه‌های مواد بيکديگر می‌شوند که در نتيجه يك توده منفذدار بهم پيوسته به شکل جوش (Clinker) بدست می‌آيد که پس از سرد شدن خرد و الک می‌شود . دانه‌هایی که به اين نحو آماده می‌شوند عموماً " تيزگوش " و دارای سطحی منفذدار هستند .

دانه و دانه‌بندی

دربتن معمولی دانه بندی‌های مختلف بر مقدار آب لازم اثمر می‌گذارند . افزودن درصدی ریزدانه ، مقدار آب لازم را نیز افزایش می‌دهد . این افزایش بنوبه خود از مقاومت بتون می‌کاهد ، مگراینکه مقدار سیمان ، همزمان افزایش یابد . مقدار درشت دانه و حداکثر اندازه قطر آن بستگی به کارآیی مورد نیاز مخلوط بتون دارد . در بتون سبک ، نیز این همبستگی میان دانه بندی ، مقدار آب لازم و مقاومت بتون بدست آمده ، همچنان برقرار است . اما عامل‌های دیگری وجود دارد که باید به آنها توجه داشت . در غالب دانه‌های سبک مدول تغییر شکل ، مقاومت و وزن فضایی دانه‌ها برای دانه‌های بزرگتر کاهش می‌یابد . استفاده از دانه‌های خیلی درشت سبک بعلت مقاومت کمتر دانه‌ها ، باعث کم شدن مقاومت بتون سبک بدست آمده می‌گردد . درنتیجه حداکثر قطر دانه‌ها ، بایستی در حدود ۲۵ میلیمتر محدود شود .

با کم کردن حداکثر قطر دانه مصرفی و افزایش درصد ریزدانه ، گرچه از دیدگاه وزن بتون سبک را به مراد دارد ، اما مقاومت آن نیز بیشتر می‌شود . برای نمونه ، هرگاه حداکثر قطر دانه از ۲۵ میلیمتر به ۱۶ میلیمتر کاهش یابد ، مقاومت لیکا بتون بدست آمده در حدود ۳۰ درصد افزایش می‌یابد . اغلب ماسه طبیعی را بمنظور کارآیی بهتر ، کاهش از انقباض مخلوط بتون تازه ، افزایش مقاومت بتون و یا بعلت صرفه جویی بیشتر ، به دانه‌های درشت سبک اضافه می‌کنند . برای نمونه "با جایگزین کردن حدود ۱۰ درصد حجم ماسه بعوض دانه‌های سبک ریز ، در حدود ۱۰۰ کیلوگرم در متر مکعب به وزن فضایی افزوده می‌شود ، و همزمان ۲۰ درصد به مدول تغییر شکل اضافه می‌گردد . " کارآیی با جایگزین کردن ماسه بعوض ریزدانه‌های سبک بهتر می‌شود .

بعلت سنگینی ملات ماسه سیمان ، ممکن است دانه‌های درشت سبک در مخلوط بتون در سطح فوقانی قرار گیرد ، و مخلوط حاصل ناهمگن شود . برای اجتناب از این ناهمگنی ، لازم است که مقدار آب لازم دقیقاً "کنترل شود . " اضافه نمودن یک الی دو درصد وزن سیمان مصرفی از ماده بنتونیت (Bentonite) که نوعی خاک رس است موجب افزایش چسبندگی (Viscosity) ملات سیمان می‌شود که بنوبه خود باعث همگن شدن مخلوط بتون سبک می‌گردد . مواد هوازا نیز خطر ناهمگن شدن مخلوط را کم می‌کند .

بمنظور جلوگیری از ناهمگن شدن مخلوط بتون باید به مقدار کافی از ریزدانه‌های کوچکتر از ۰/۲۵ میلیمتر استفاده نمود . در جدول شماره ۲ نشان داده شده است که برای

بتن سبک خصوصاً " بادانه‌های سبک کروی شکل با سطحی صاف تعیین مقدار ریزدانه لازم ، به حداقل اندازه قطر درشت دانه مصرفی بستگی دارد .

جدول شماره ۲ . مقدار ریزدانه لازم نسبت به حداقل اندازه قطر درشت دانه	
مقدار ریزدانه دریک مترمکعب بتن *	متراکم شده حداقل اندازه قطر درشت دانه
به میلیمتر	(سیمان + ریزدانه بقطر ۲۵ / ۰ میلیمتر و کمتر)
۸	۱۸۰ لیتر ۵۲۵ کیلوگرم
۱۶	" ۴۵۰ " ۱۵۰
۲۵	" ۴۲۰ " ۱۴۰

تعویض مقداری از دانه‌های ریزسبک با ماسه طبیعی ، مقاومت بتن بدست آمده را افزایش می‌دهد . این افزایش مقاومت به دو دلیل زیرقابل توجه است :

۱- جذب آب در ریزدانه‌های سبک با سطح زبر و زاویه‌ای بیشتر از دانه‌های ریزطبیعی با سطح صاف و گرد صورت می‌گیرد . درنتیجه درمورد ریزدانه‌های سبک ، نسبت آب به سیمان افزایش می‌یابد ، و مقاومت کم می‌شود .

۲- ملات ماسه سیمان مقاوم تراز ملات ریزدانه سبک و سیمان است . وقتی ماسه طبیعی بجای ریزدانه‌های سبک مورد استفاده قرار گیرد ، بمنظور کارآبی بهتر می‌باید حداقل قطر ماسه از دو میلیمتر کمتر باشد . کارآبی بهتر منجر به استفاده کمتر از ماسه (در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد حجم کل دانه‌ها) و وزن کمترین می‌شود . در صورت استفاده از ریزدانه‌های سبک ، عیار سیمان بیشتری بخصوص برای قطعات عمودی با سطح نمایان لازم است . در حالی‌که با استفاده از دانه‌های ریز طبیعی رودخانه‌ای ، به مقدار سیمان کمتری احتیاج است . قابل توجه اینکه ، با مقدار ملات سیمان کم ، متراکم کردن مخلوط بتن با اشکال صورت می‌گیرد و ساختمان بتن پوک و در آن منفذهای زیادی ایجاد می‌گردد . و درنتیجه کاهش مقاومت بتن بدست آمده را باعث می‌شود . گرچه با استفاده از مقدار ملات سیمان زیاد ، خصوصاً " وقتی که با آب فراوان نیز همراه باشد ، خطرناک‌مگن شدن

* - مقداری از این ماسه خیلی ریز می‌تواند با مواد هوا را جایگزین گردد .

مخلوط و در سطح قرار گرفتن دانه های درشت سبک رادر بردارد . در بعضی حالتهای شرایط مناسب مخلوط کردن و ریختن بتن) می توان مقدار ملات سیمان زیاد راهنمراه با دانه های ریز طبیعی یا مواد هوازا مورد استفاده قرارداد .

در ساخت بتن سبک مانند بتن معمولی می‌توان از دو نوع دانه بندی پیوسته یا ناپیوسته استفاده نمود . انتخاب دانه بندی به مقاومت ، وزن ، کارآیی ، اندازه دانه‌های موجود و تسهیلات محله‌ای انبار دانه‌های سبک (به اندازه‌های مختلف) بستگی دارد . دانه بندی پیوسته بطور کل باعث چسبندگی مناسب جهت جلوگیری از ناهمگنی مخلوط بتن می‌شود . (۴)

دانه بندی ناپیوسته در صورت محدود بودن تسهیلات انبار دانه‌ها ، استفاده می‌شود .
خواص مکانیکی اغلب بتونهای سبک بادانه‌های سبک بستگی زیادی به دانه بندی آنها دارد .
وقتی دانه بندی مبنا ، مشخص گردید باید کنترل دقیق در مورد ثابت نگاهداشت آیین
دانه بندی در ساخت بتن سبک منظور گردد . دانه بندی بكمك دو مخلوط دانه‌های ریز و درشت ،
معمولًا " کافی بنظر نمی‌رسد ، و این بخاطر جلوگیری از ناهمگنی دانه‌هاست که دارای
وزنهای مختلف می‌باشد . دانه‌های سبک با توجه به حداقل اندازه قطر دانه‌ها می‌توانند به
گروههای زیر تقسیم و انبار گردد :

تقسیمات پیشنهادی دانه‌ها به میلی‌متر حداقل قطر بر حسب میلی‌متر

در مورد دانههای ناپیوسته برای حداکثر ۱۶ میلیمتر اندازه قطردانه، یکی از قسمتهای اندازه متوسط حذف و برای حداکثر اندازه ۲۵ میلیمتر دو تا از قسمتهای اندازههای متوسط دانهها حذف می‌شود.

حداکثر قطر دانه‌ها بوسیله سه عامل : کمترین بُعد قطعه بتنی ، فاصله آرماتورها وضخامت پوشش روی آرماتورها محدود می‌شود . بعلت متغیربودن وزن فضایی دانه‌های سبک در اندازه‌های مختلف برخلاف دانه‌های معمولی (سنگ شکسته یا شن و ماشه رودخانه‌ای) دانه بندی دانه‌های سبک ، بعوض نسبت وزنی بر حسب نسبت حجمی صورت می‌گیرد .

مقاومت بتنی در صورتی مقاومت ملات ماسه سیمان پرکننده خلل و فرج دانه‌های درشت آن می‌باشد که مقاومت و سختی * دانه‌های مصرفی حداقل برابر مقاومت ملات ماسه سیمان پرکننده آن باشد ، این حالت معمولاً " درمورد بتنهای معمولی صادق است . اما مقاومت و سختی دانه‌های سبک بعلت توخالی بودنشان ، کمتر از دانه‌های معمولی بوده و حتی کمتر از مقاومت ملات ماسه سیمان مصرفی نیز می‌باشد . این مطلب نشان می‌دهد که درمورد بتنهای سبک با مقاومت ثابت ملات ماسه سیمان (مقاومت ملات ماسه سیمان به نوع و مقدار سیمان ، ماسه - در صورت مقدار آب یکسان - بستگی دارد) می‌توان به یک مقدار مقاومت مشخص و مناسب با مقاومت و سختی دانه‌های سبک دست یافت : امکان دارد مقاومت بتن سبک از اندازه مقاومت اشاره شده در بالا ، نیز افزایش یابد ، این امر در وضعی است که مقاومت و سختی ملات ماسه سیمان را نسبت به مقاومت و سختی دانه‌های سبک افزایش دهیم ، در این صورت در تغییر طول ثابت ، تنش بیشتری متوجه ملات ماسه سیمان شده و در حال گسیختگی ، تنش در ملات ماسه سیمان بیشتر از دانه‌های سبک می‌گردد . درنتیجه لازم است که مقاومت ملات ماسه سیمان ، بیشتر از مقاومت گسیختگی بتن سبک با دانه‌های سبک در نظر گرفته شود .

بمنظور دلایل اقتصادی بهتر است جهت رسیدن به مقاومتی ثابت با ملات ماسه سیمان کم مقاومتر ، از دانه‌های سبک قوی و سنگین تر استفاده شود . دانه‌های سبک سنگین تر ، وزن فضایی بتن سبک بیشتری را بدست می‌دهند . با افزایش وزن فضایی دانه‌های سبک ، مقاومت بتن سبک ساخته شده با این دانه‌ها نیز افزایش می‌یابد . برای رسیدن به مقاومتی ثابت ، هرچه دانه‌های سبک ، ضعیف تربا شند . به ملات سیمان قوی تری احتیاج دارند . درمورد بتنهای سبک با مقاومت یکسان که با دانه‌های سبک با مقاومتی مخالف ساخته می‌شوند ، اختلافات زیر را می‌توان انتظار داشت (۸) :

* - سختی یا مدول تغییرشکل Modulus of deformation

دانه سبک با مقاومت و وزن فضایی کم	دانه سبک با مقاومت و وزن فضایی زیاد
۱- به مقدار سیمان بیشتری احتیاج دارد	۱- سیمان لازم، تقریباً " معادل مقدار سیمان
۲- وزن فضایی کمتری را دارد .	۲- مصرفی در بتن معمولی است
۳- افزایش مقاومت در روزهای اولیه گیرش سریعتر است	۳- وزن فضایی بیشتری را دارد
۴- مقاومت چسبندگی بتن و آرمه توربینه است	۴- در قطعات خمش، چسبندگی آرمه توربینه بتن کمتر از بتن معمولی است . در حالیکه در
۵- مدول الاستیسیته کمتر است .	قطعات فشاری، تقریباً " معادل بتن معمولی می باشد
۵- مدول الاستیسیته بیشتر ولی کمتر از بتن معمولی است	۵- مدول الاستیسیته بیشتر ولی کمتر از بتن معمولی است

برای رسیدن به مقاومت‌های بیشتر بتن سبک با عیار سیمان ثابت و نوع خاص دانه سبک، لازماست دانه‌ها با وزن فضایی با لاتری انتخاب شوند، که خود دارای مقاومت و مدول تغییرشکل با لاتری می‌باشند . هرگاه وزن فضایی مشخصی از بتن سبک موردنظر باشد، میانگین وزن ظاهری دانه‌های باید از حداقل مشخص شده در جدول شماره (۳) بیشتر شود .

جدول شماره ۳ . وزن فضایی لیگابتن نسبت به وزن ظاهری دانه‌های مصرفی

وزن فضایی خشک آونی بتن سبک میانگین تقریبی وزن ظاهری * دانه‌ها	(ممکن است ماسه طبیعی هم به دانه‌های سبک اضافه شود)	Kg/M ^۳	Kg/M ^۳
۸۰۰		۱۰۰۰	
۱۱۰۰		۱۲۰۰	
۱۴۵۰		۱۴۰۰	
۱۷۰۰		۱۶۰۰	
۲۰۰۰		۱۸۰۰	
۲۳۰۰		۲۰۰۰	

*- وزن ظاهری برای حجم اشغالی خود دانه‌ها، یعنی بدون درنظر گرفتن منفذ‌های هوای بین دانه‌ها و باد رنگرگفتن منفذ‌های هوای داخلی دانه‌هاست .

وزن فضایی بتن سبکی که به مقدار متوسط از آب اشباح شده باشد (در حدود ۵ درصد حجمی رطوبت ، * بعد از نگاهداری درازمدت در یک ساختمان) در حدود ۵۰ کیلوگرم در متر - مکعب از وزن خشک آونی (Oven - تنوری) بیشتر است .

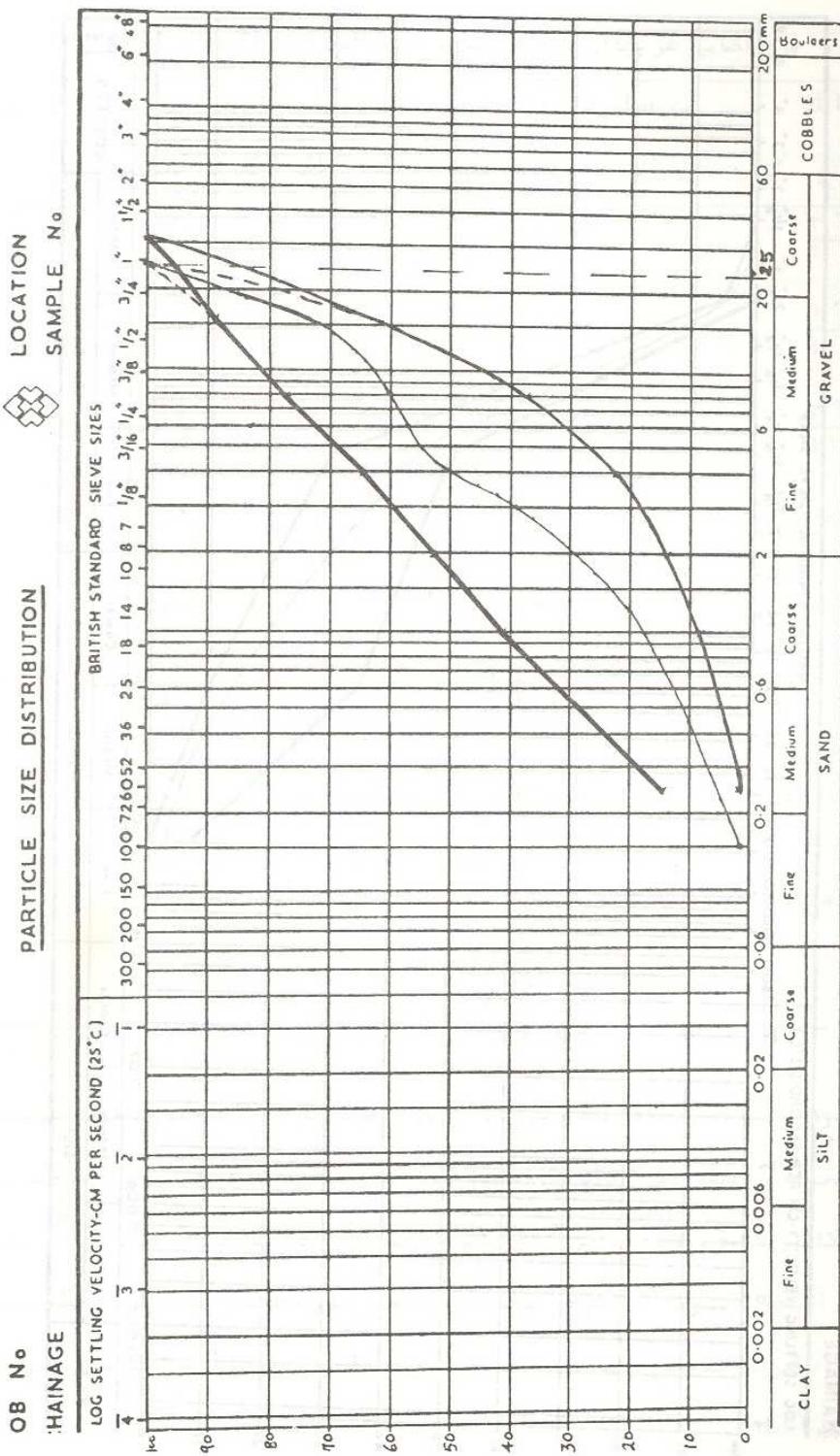
در این بررسی ، دانه بندی دانه ها بمنظور ساخت نمونه های آزمایشی بشرح زیر انجامیده است : ابتدا دو نوع دانه بندی استانداردهای آلمانی و انگلیسی به ترتیب دانه بندی نوع یک و دو انتخاب گردید . این دانه بندی های استاندارد به شن و ماسه طبیعی ، جهت ساخت بتن معمولی مربوط می باشند . دانه بندی های استاندارد نوع یک و دو درصد نسبتی وزنی دانه های رد شده از هر الک را مشخص می کند (شکل های شماره ۱ و ۲) .
 بمنظور دانه بندی دانه های لیکا یا مخلوط دانه های لیکا و ماسه طبیعی ، ابتدا باتوجه به منحنی های دانه بندی نوع یک و دو و وزن فضایی هر یک از اندازه های مختلف دانه های شن و ماسه ، نسبتی ای حجمی دانه ها ب دست می آید . سپس با استفاده از وزن فضایی هر یک از اندازه های مختلف دانه های لیکا (جدول شماره ۴) و نسبتی ای حجمی بدست آمده که قبل از آنها اشاره شد ، نسبتی ای وزنی دانه های لیکا مشخص و ماسه مصرفی هم مطابق نسبتی وزنی ماسه در منحنی دانه بندی استانداردهای یاد شده مشخص می شود .

* - ممنوع از ۵ درصد حجمی رطوبت نسبی ، نسبت حجم آب رطوبت نمونه به کل حجم نمونه است .

مطابق رابطه زیر :

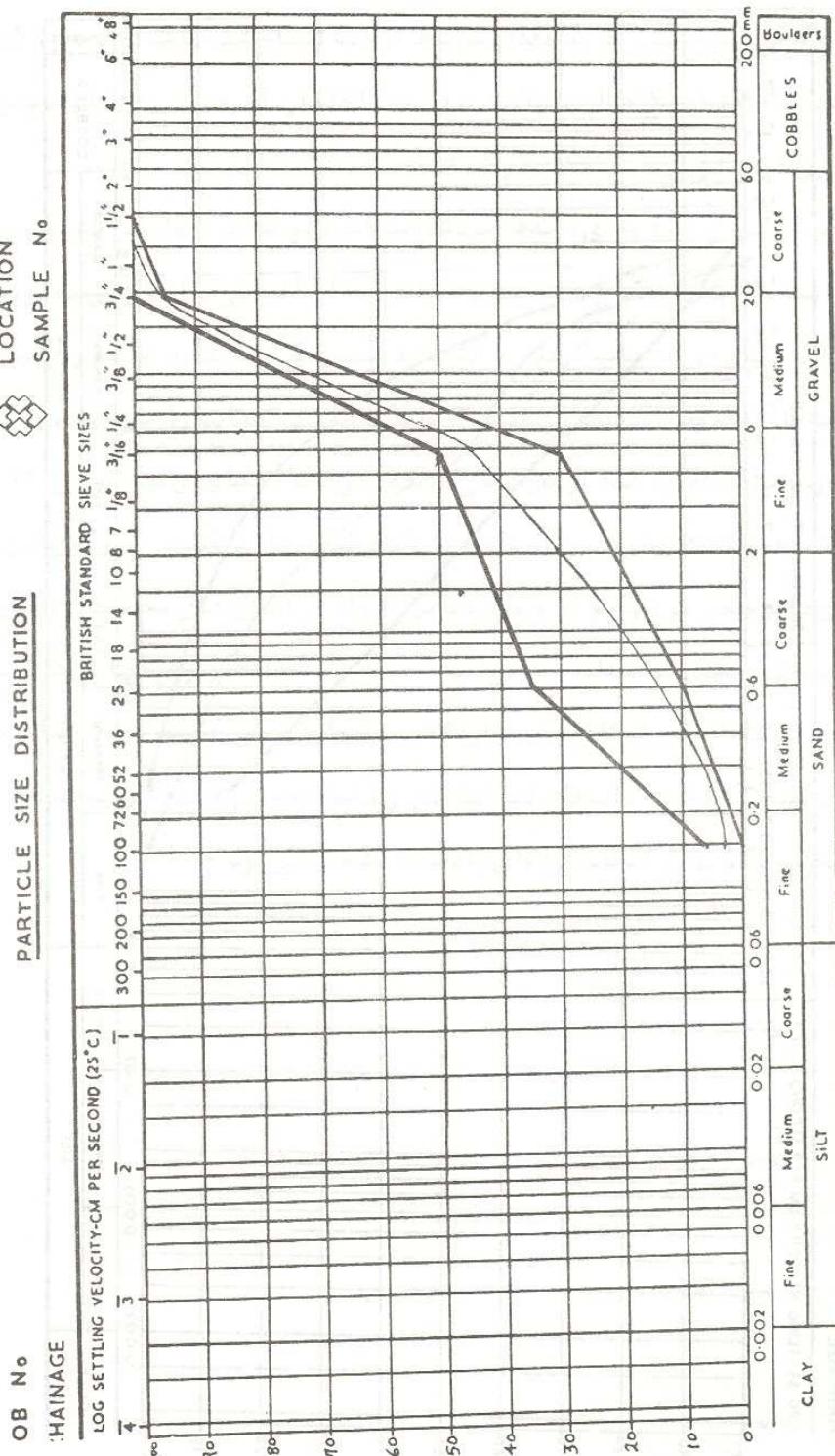
$$\frac{V_W}{V_T} = 0 / ۰۵ \quad V_W = V_T \cdot \text{حجم آب}$$

BUILDING & HOUSING RESEARCH CENTER



شکل شماره یک — مختصی دانه‌بندی نوع یک در حدود ۵۰ سانتی‌متر آن بندی ۱۳۵ میلی‌متر —
DIN 1045

BUILDING & HOUSING RESEARCH CENTER



شكل شطرود — منحني را به بندی نوع دو، در محدوده استاندارد را به بندی (۸۲۸ BS) انگلیس.

جدول شماره ۴۰ وزن فضایی هر یک از دانه‌های شن، ماسه و لیکا در اندازه‌های مختلف.

شماره الک	وزن فضایی دانه‌ای شن و ماسه مانند	وزن فضایی دانه‌ای لیکا، مانند روی	میلیمتر	اینج - شماره روی الک به کیلوگرم در مترمکعب
			۱۹	۳/۴
			۱۲/۵	۱/۲
			۴/۹	۳/۱۶
۲/۳۶	۱۳۷۲	۱۴۳۳	۸	۵۶۴
۱/۴	۱۳۵۰	۱۴۷۴	۳۰	۶۸۰
۰/۶	۱۴۰۰	۱۴۰۰	۵۲	۷۹۰
۱۰۰	۱۳۹۱	۸۴۰	۰/۰	۸۳۰
۱۰۰	۱۴۰۰	۸۵۰	۰/۱۵	زیر

در محدوده استاندارد دانه بندی نوع یک و دو، هر کدام با یک منحنی بمنظر دور دانه بندی دلخواه و تعیین مقدار دانه‌ها مطابق روش یاد شده و استفاده از آن در ساخت نمونه‌های لیکا بتن مشخص شد. سعی شده است که منحنی‌های دانه بندی مشخص شده بطور پیوسته کامل انتخاب نشوند، تا هرچه نزدیکتر با منحنی‌های تصحیح شده در عمل مطابقت داشته باشند. این دو منحنی و محدوده منحنی‌های استاندارد مربوط به شکل‌های یک و دو نشان داده شده است.

مقدار سیمان مصرفی

مقدار سیمان مورد احتیاج بمنظور مقاومت ثابت بتن بسته به انواع مختلف دانه‌های مصرفی متغیر است. در اصل این مقدار سیمان برای مقاومت ثابت بتن به مقاومت و مسدول تغییر شکل دانه‌های مصرفی و هم چنین مقدار آب آزاد لازم برای کارآیی مشخص بستگی دارد.

برای اطمینان به حصول کارآیی مناسب ، دوام ، حفاظت از آرماتورها و بمنظور جلوگیری از زنگ زدگی و چسبندگی مناسب بتن و آرماتور ، باید دقت کرد که مقدار سیمان از عیار ۳۰۰ کیلوگرم در مترمکعب بتن کمتر نباشد . با اضافه کردن مقدار سیمان ، مقاومت بتن سبک افزایش می‌یابد اما نه به مقداری که مقاومت در بتن معمولی افزوده می‌شود .

" در بتن معمولی با افزایش ده درصد مقدار سیمان ، در حدود ۱۵ درصد مقاومت بتن بدست آمده اضافه می‌شود در صورتی که برای بتن سبک ، افزایش مقاومت به ازای ده درصد افزایش سیمان در حدود ۵ تا ۱۰ درصد یا حتی کمتر می‌باشد . (۸)" افزودن مقدار سیمان باعث افزایش وارفتگی (Creep) ، انقباض ، گرمای تولید شده توسط هیدراتاسیون سیمان و خطر ترک خوردگی بتن می‌گردد . بنابراین ، معمولاً " مقدار سیمان نباید از عیار ۵۰۰ کیلوگرم در مترمکعب بیشتر باشد .

بعلت با لا بودن وزن مخصوص سیمان (در حدود ۳۱۰۰ کیلوگرم در مترمکعب) با افزایش سیمان ، وزن فضایی بتن بدست آمده با لا می‌رود . " افزودن ۵۰ کیلوگرم در مترمکعب سیمان باعث می‌شود که وزن فضایی بتن در حدود ۳۰ کیلوگرم در مترمکعب افزایش یابد . برای مقاومت مشخص بتن ، با افزایش مقاومت سیمان ، مقدار سیمان مورد احتیاج کاهش می‌یابد که خود باعث کم شدن وزن فضایی بتن بدست آمده نیز می‌شود . با مقاومت ثابت ، معمولاً " مقدار سیمان لازم در بتنهای سبک نسبت به بتنهای معمولی بیشتر است . مقدار سیمان مورد نیاز برای مقاومت بتن مشخص ، در صورت وجود منحنی‌های مبنا (برای دانه سبک و کیفیت سیمان مشخص) ، از طریق نسبت کل حجم منافذ به وزن سیمان یا از طریق نسبت آب مُوشبه سیمان بدست می‌آید ، مقدار آب مُوشبه را بر کل مقدار آب مصرفی منهای مقدار آبی که در منافذ دانه‌ها جذب شده است می‌باشد . مقدار سیمان بهینه از طریق ساخت مخلوط‌هایی با مقادیر مختلف سیمان و بررسی آن از طریق آزمون و خطای مشخص می‌شود . بهتر است ابتدا با مقادیر سیمان مورد مصرف بتنهای معمولی شروع کنیم . گرچه برای اغلب بتنهایی با دانه‌های سبک ، مقدار سیمان لازم جهت رسیدن بیک مقاومت ثابت بیشتر از مقدار سیمانی است که برای بتنهای معمولی لازم است ، " برای بهبود بخشیدن به کارآیی مخلوط بتن سبک و درنتیجه چسبندگی بهتر به آرماتور و وزن بیشتر با سطحی صاف تر ، از عیار سیمان با لاتری نسبت به بتن معمولی استفاده می‌شود . در بتن سبک ، ملات ماسه سیمان باید در حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد حجمی باشد . (۵ و ۶)"

مقدار آب مصرفی

آب موجود در بتون سبک شامل ، آب آزاد یا مُؤثر بین دانه‌ها و آب موجود در منافذ دانه‌ها می‌باشد . آب آزاد که مقدار اعظم آب موجود را تشکیل می‌دهد در خمیر سیمان وجود دارد ، و این مقدار آبی است که مقاومت و کارآبی را تعیین می‌کند . مقدار آب آزاد به حداقل اندازه قطر دانه ، مقدار اسلامپ (Slump) به منظور کارآبی لازم ، شکل و وضعیت سطح دانه‌ها (صاف یا زبر) و بادرصد کمتر به مقدار سیمان مصرفی بستگی دارد . در مورد دانه‌ای سبک لیکا که در کوره گردندۀ تولید می‌شوند ، بعلت سطح صاف و گردی که دارند ، جذب آبشان نسبت به دانه‌ای سبک با سطحی زبر و زاویه‌ای به مراتب کمتر است . مقدار اسلامپ مخلوط بتون بستگی به نوع قطعه ساختمانی و لوازم موجود جهت متراکم کردن آن دارد که مشخص می‌شود .

هرگاه ویبراتور دستی (که در مخلوط بتون فرو برده می‌شود) مورد استفاده قرار گیرد ، مخلوط بتون باید خمیری باشد . از مخلوطهای بتون با آب اضافی باید اجتناب نمود . برای تهییه مخلوط بتون سفت در ساخت قطعات پیش ساخته ، از ویبراتورهای میزی یا سطحی و در بعضی موارد از ویبراتورهای دستی استفاده می‌شود .

" ساخت بتون سبک بويژه بادانه‌ای سبک متخالخل ، مشکل تراز ساخت بتون معمولاً " ساخت بتون سبک بويژه بادانه‌ای سبک متخالخل ، مشکل تراز ساخت بتون معمولی است . دانه‌های سبکی که دارای منفذهای هوای بسیار هستند ، مانند دانه‌های لیکائی تولید شده به روش سخت شدن بر روی تسمه ، جذب آبشان به مراتب بیشتر از دانه‌های معمولی (شن و ماسه رودخانه‌ای) است . تعیین مقدار آب جذب شده در این دانه‌ها معمولی (شن و ماسه رودخانه‌ای) است . تعیین مقدار آب جذب شده در این دانه‌ها بعلت متغیر بودن مقدار آن کمی دشوار است ، که این خود عامل اصلی در مشکل تربودن طرح مخلوط بتون سبک نسبت به بتون معمولی است . دانه‌های تولید شده بروش کوره گردان بعلت سطح صاف و صیقلی که دارد ، جذب آبشان تقریباً " برابر (کمی بیشتر) جذب آب دانه‌های معمولی است . لذا طرح مخلوط این نوع بتون از نظر مشکل بودن ، معادل بتون معمولی است . برای تعیین مقادیر اجزاء تشکیل دهنده بتون سبک (ضمن تعیین مقدار آب جذب شده در دانه‌های سبک بويژه دانه‌های سبک زبر و تیز گوشه با ساخت مخلوطهای آزمایشی) ، می‌توان از روش‌های متداول طرح بتنه‌ای معمولی استفاده کرد . چون شرح کامل این روش از حوصله این مقال خارج است ، لذا به توضیح کوتاه در این مورد بسنده می‌کنیم .

مقدار دانه‌های خشک لازم برای یک مترمکعب بتن متراکم ، در حدود ۱/۱۵ تا ۱/۲۲ مترمکعب حجم فضایی^{*} است . اما برای دانه‌های کروی شکل بادانه بندی پیوسته کامل ، این مقدار در حدود ۱/۰۵ مترمکعب است . حجم مخلوط خمیری بتن تازه با ترکیب هر نوع مصالح ، برابر مجموع حجم‌های مطلق^{**} سیمان ، دانه‌ها ، آب و منفذهای هوایی متشکل از منفذهای مسدود و ایجاد شده ، توسط مواد هوایی (موادی که به مخلوط بتن جهت مقاوم تر کردن آن در برابر بیخ زدن و ذوب یخ اضافه می‌شود) می‌باشد . یک مترمکعب بتن سیمان ، همانند بتن معمولی دارای حجم‌های مطلق در حدود ۱/۰ مترمکعب سیمان ، ۰/۷ مترمکعب دانه و ۰/۲ مترمکعب آب و هوای در خمیر سیمان است . هرگاه حجم‌های تخمینی آب ، هوای سیمان از کل حجم بتن متراکم شده (یک مترمکعب) کم شود ، درنتیجه حجم دانه‌های مصرفی در یک مترمکعب بتن متراکم بدست می‌آید . با استفاده از نسبتهای مناسب مقادیر دانه‌ها و سیمان ، می‌توان یک مخلوط آزمایشی فراهم نمود ، سپس با افزودن مقدار آب کافی ، مخلوط بتن با کارآیی لازم را بدست آورد . آزمایشها را می‌توان برای تعیین کارآیی و وزن فضایی مخلوط بتن تازه دنبال کرد . محاسبات برای حجم ثابت بتن تازه ساخته شده و مقادیر اجزای متشکل مخلوط انجام می‌پذیرد . اجزای متشکل مخلوط بتن محاسبه و مقادیر آنها تنظیم می‌گردد . مخلوطهای آزمایشی را تا دستیابی به یک نسبت رضایت‌بخشی از اجزای متشکل ، ادامه می‌دهیم . برای مخلوطهای آزمایشی لازم است وزن فضایی دانه‌ها ، مقدار رطوبت موجود در دانه‌ها ، نسبت بهینه درشت دانه به ریزدانه و تخمین مقدار سیمان لازم به منظور رسیدن به مقاومت مشخص بتن ، از قبل تعیین و معلوم گردد .

ساخت و تعیین مقاومت نمونه‌های لیگا بتن

از مخلوط دانه‌های لیگا و ماسه مطابق منحنی‌های دانه‌بندی نوع یک و دو ، آب و سیمان اولین سری نمونه مکعبی $15 \times 15 \times 15$ سانتیمتر و استوانه‌ای ۱۵ سانتیمتر قطعه و ۳۰ سانتیمتر ارتفاع بوسیله میل زدن (میله‌ای به قطر ۱/۵ سانتیمتر و وزن ۹۵۱ گرم) درسه لایه ساخته و پس از ۲۴ ساعت از قالبه‌ها خارج و برای مدت ۲۰ روز در آب قرارداده

* - حجم فضایی باد رنظرگرفتن منفذهای هوایی بین و داخل دانه‌ها بدست می‌آید .

** - حجم مطلق بدون رنظرگرفتن منفذهای هوایی بین و داخل دانه‌ها بدست می‌آید .

شد ، و سپس بمدت ۸ روز درهای کارگاه نگاهداری شدند . پس از ۲۸ روز نمونه‌های مورد بحث، توزین و برروی آنها آزمایش‌های مقاومت فشاری (برای نمونه‌های مکعبی) و مقاومت کشش غیرمستقیم (برای نمونه‌های استوانه‌ای) بعمل آمد . این مقاومتها از روابط زیر بدست می‌آید :

$$\frac{\text{حداکثرنیروی گسیختگی نمونه}}{\text{سطح مقطع نمونه}} = \frac{P}{A} \leftrightarrow \begin{array}{c} \downarrow P \\ \square \\ \uparrow P \end{array} \quad (1)$$

$$\frac{\text{دوابرابرد اکثرنیروی گسیختگی}}{\pi \times \text{ارتفاع} \times \text{قطر}} = \frac{P}{\pi D L} \leftrightarrow \begin{array}{c} \text{المان مرکزی} \\ \downarrow P \\ \sigma_C \downarrow \quad \uparrow \sigma_T \\ \sigma_T \uparrow \quad \downarrow \sigma_C \end{array} \quad (2)$$

توضیح : در المان عنصر مرکزی نمونه تحت آزمایش کشش غیرمستقیم ، تنش فشاری (σ_C) سه برابر تنش کششی (σ_T) است ($\sigma_C = 3\sigma_T$) .

مشخصات نمونه‌های ساخته شده سری اول و نتایج بدست آمده از آزمایش‌های آنها [باتوجه به اینکه از سمت چپ به راست حرف I و II به ترتیب نشان دهنده دانه بندی نوع یک و دو ، عدد اول وزن دانه‌های لیکا ، عدد دوم وزن دانه‌های ماسه ، عدد سوم وزن سیما ، عدد چهارم مقدار آب در متر مکعب لیکابتن ، عدد پنجم میانگین مقاومت سه نمونه فشاری برای نمونه‌های مکعبی و کششی غیرمستقیم برای نمونه‌های استوانه‌ای] ، عدد ششم وزن فضایی خشک ، عدد هفتم نسبت آب به سیمان ، عدد هشتم جذب آب را بس از ۲۴- ساعت قراردادن نمونه‌هادر آب (بعضی نمونه‌ها آزمایش شده‌اند) مشخص می‌کند .] بشرح زیر است :

توضیح : در نمونه‌های ۱ الی ۱۲ از دانه‌های لیکای زیرالک ۲۵ میلیمتری و روی الک ۲/۳۶ میلیمتری استفاده شده است ، نمونه‌های ۱۳ الی ۲۶ بدانه‌های لیکاروی الک ۲/۳۶ میلیمتری و زیرالک ۲۵ میلیمتری و با نسبت‌های مختلف از هر دو دانه لیکا و ماسه زیرالک ۲/۳۶ میلیمتری ساخته شده‌اند ، در نمونه‌های ۳۷ الی ۴۰ فقط از دانه‌های لیکای زیرالک ۲۵ میلیمتری و فاقد ماسه استفاده شده است .

جدول شماره ۵ . مشخصات و نتایج بدست ۹ مدله از نمونه های سری اول

آب به لیتر	مقادیر روزه Kg/cm ³	وزن فضای خشک Kg/M ³	آب سیمان	درصد وزنی جدب آب
۱۸۲	۱۱۳	۱۳۲۳	. / ۶۴	-
"	۱۴	۱۳۳۲	. / ۶۴	-
۱۶۸	۱۴۱	۱۲۸۷	. / ۶۱	۸ / ۱٪.
۱۸۱	۱۸	۱۳۸۲	. / ۷۱	۹ / ۷٪.
۱۸۲	۷۹	۱۲۴۸	. / ۵۶	۱۴ %.
۱۶۹	۱۱	۱۳۱۰	. / ۵۲	۱۳ %.
۱۸۰	۱۰۸	۱۲۹۸	. / ۶۶	۶ / ۵٪.
"	۱۳	۱۲۶۰	. / ۶۳	۱۳ %.
"	۱۱	۱۲۷۴	. / ۵۸	۱۰ / ۱٪.
"	۹۸	۱۲۸۲	. / ۵۸	۱۱ / ۲٪.
"	۱۱۲	۱۳۰۶	. / ۵۴	۸ / ۷٪.
"	۹	۱۱۰۷	. / ۵۴	۱۶ / ۹٪.
۲۰۱	۱۰۷	۱۳۰۵	. / ۷۳	۷ %.
۱۹۷	۱۴	۱۳۰۹	. / ۷۷	۷ / ۳٪.
۲۰۱	۱۳۱	۱۳۰۲	. / ۶۲	۸ / ۱٪.
۱۷۱	۱۹	۱۳۵۰	. / ۶۲	۶ / ۸٪.
۲۰۱	۱۴۱	۱۳۶۸	"	۱۰ / ۷٪.
۱۸۱	۱۴	۱۳۱۸	. / ۶۱	۲۱ %.
"	۱۴۲	۱۲۸۳	. / ۶۴	۱۱ / ۶٪.
۱۹۰	۱۴	۱۲۹۸	. / ۶۸	۱۶ / ۴٪.
۱۸۱	۱۴۷	۱۳۴۰	. / ۵۹	۱۴ / ۴٪.
۱۹۰	۱۶	۱۳۲۰	. / ۶۰	۱۷ / ۹٪.
۱۸۱	۱۲۳	۱۳۲۰	. / ۵۷	۱۶ / ۶٪.
۱۹۳	۱۶	۱۳۳۰	. / ۶۱	۱۸ / ۱٪.
۱۸۱	۱۴۴	۱۳۰۷	. / ۶۷	۱۰ / ۸٪.

ردیف	نمونه	نوع دانه بندی	لیکا Kg	ماسه Kg	سیمان Kg
۱	مکعبی	I	۳۹۹	۵۲۷	۲۸۳
۲	استوانه‌ای	I	"	"	"
۳	مکعبی	I	"	"	۲۷۶
۴	استوانه‌ای	I	"	"	۲۵۴
۵	مکعبی	I	"	"	۳۲۴
۶	استوانه‌ای	I	"	"	۲۹۹
۷	مکعبی	II	۴۲۲	۵۴۵	۲۷۳
۸	استوانه‌ای	II	"	"	۲۸۴
۹	استوانه‌ای	II	"	"	۳۰۸
۱۰	مکعبی	II	"	"	"
۱۱	مکعبی	II	"	"	۳۳۱
۱۲	استوانه‌ای	II	"	"	۳۳۲
۱۳	مکعبی	I	۴۳۶	۴۶۰	۲۷۷
۱۴	استوانه‌ای	I	"	"	۲۵۶
۱۵	مکعبی	I	"	"	۳۰۰
۱۶	استوانه‌ای	I	۴۳۶	۴۶۰	۲۷۷
۱۷	مکعبی	I	"	"	۳۲۴
۱۸	استوانه‌ای	I	"	"	۲۹۹
۱۹	مکعبی	II	۴۷۱	۴۵۷	۲۸۴
۲۰	استوانه‌ای	II	"	"	۲۸۰
۲۱	مکعبی	II	"	"	۳۰۸
۲۲	استوانه‌ای	II	"	"	۲۹۱
۲۳	مکعبی	II	"	"	۳۱۸
۲۴	استوانه‌ای	II	"	"	"
۲۵	مکعبی	II	۵۴۳	۳۲۷	۲۷۲

ادامه جدول شماره (۵)

آب به لیتر	مقاومت ۲۸ روزه Kg/cm ²	وزن فضای خشک Kg/M ³	آب سیمان	درصد وزنی جدب آب
۱۶۹	۱۷	۱۳۴۸	۰/۷	۱۵/۴%
۱۸۶	۱۸۲	۱۳۲۳	۰/۶۳	—
۱۷۰	۲۱	۱۲۹۰	۰/۶۶	—
۱۸۶	۱۶۲	۱۲۹۲	۰/۶۲	۱۴%
۱۷۰	۱۸	۱۲۷۹	۰/۵۷	۱۵%
۱۷۶	۱۴۲	۱۳۰۱	۰/۶۲	—
۱۷۳	۱۸	۱۴۱۳	۰/۶۶	—
۱۷۶	۱۶۶	۱۴۱۰	۰/۶۲	—
۱۷۳	۲۲	۱۴۶۱	۰/۶۱	—
۱۷۶	۱۶۸	۱۴۴۸	۰/۵۸	—
۱۷۳	۱۹	۱۴۹۴	۰/۵۷	—
۱۷۶	۱۵۰	۱۲۹۱	۰/۶۲	—
۱۷۰	۲۰	۱۳۰۶	۰/۶۰	—
۱۸۶	۱۴۶	۱۲۱۰	۰/۶۳	۱۳%
۱۷۹	۱۸	۱۱۰۴	۰/۶۰	۱۹%

ردیف	نمونه	نوع دانه بندی	لیکا Kg	مسه Kg	سیطان مسه Kg
۲۶	استوانه ای	II	۵۴۳	۲۲۷	۲۴۱
۲۷	مکعبی	II	"	"	۲۹۰
۲۸	استوانه ای	II	"	"	۲۰۹
۲۹	مکعبی	II	"	"	۳۰۰
۳۰	استوانه ای	II	"	"	"
۳۱	مکعبی	I	۵۲۰	۳۱۸	۲۶۱
۳۲	استوانه ای	I	"	"	"
۳۳	مکعبی	I	"	"	۲۸۳
۳۴	استوانه ای	I	"	"	"
۳۵	مکعبی	I	"	"	۳۰۴
۳۶	استوانه ای	I	"	"	۳۰۵
۳۷	مکعبی	I	۶۹۶	۰	۲۸۳
۳۸	استوانه ای	I	"	"	"
۳۹	مکعبی	II	۷۲۳	۰	۲۹۳
۴۰	استوانه ای	II	"	۰	۲۸۰

پس از بررسی نتایج فوق ، بهینه نسبت آب به سیمان که حداقل مقاومت لیکابتون را بدست می دهد برای عبارت سیمان در حدود ۳۰۰ الی ۳۵۰ در حدود ۶۲/۰۰ الی ۶۳/۰ است . با این نسبت بهینه آب به سیمان یک سری مجدد از نمونه های مکعبی و استوانه ای به ترتیب ، بمنظور آزمایش مقاومت فشاری و کششی غیر مستقیم بوسیله میل زدن (با میله یاد شده) و کوبیدن با میله ای که یک سر آن مسطح و با سطح مقطع $2/5 \times 10$ سانتیمتر و وزن ۸۲۳ گرم است درسه لایه ساخته شده و مطابق نمونه های اشاره شده در صفحات قبل عمل آورده شدند .
 توضیح : متراکم کردن قطعات لیکابتون به روش صنعتی (در اینجا توسط میل زدن و کوبیدن صورت گرفت) رامیتوان بوسیله پرس کردن همراه با لرزاندن ، طوری انجام داد تا دانه های درشت سبک لیکابه طرف سطح فوقانی جدا نشد و مخلوط همگن شد .

تحقیقاتی که در بسیاری از کشورهای جهان در این زمینه بعمل آمد ، یکسان بوده و جملگی به این نتیجه رسیده اند که : ویبراتور بتن سبک بادانه های سبک در مقایسه با ویبراتور بتن معمولی ، بهتر است از فرکانس بالاتری برخوردار باشد . گرچه بتن سبک با دانه های سبک * رامی توان با ویبراتور معمولی متراکم کرد ، ولی برخی ، دامنه فرکانس با لای بهینه را در حدود $\frac{Cycles}{Min} ۱۴۰۰۰$ الی ۱۵۰۰۰ ، و درجای دیگر در حدود $\frac{Cycles}{Min} ۱۶۰۰۰$ الی ۲۰۰۰۰ مشخص کرده اند . مقادیر وزنی دانه های لیکا و ماسه برای یک متراکم کعب لیکابتون برای دانه بندی نوع یک و دو این سری مجدد نمونه های سری دوم مطابق جدول شماره ۷ می باشد .

مقدار آب بهینه بستگی به اندازه درشت ترین دانه اسلامپ و بادرصد کمتر مقدار سیمان مصرفی دارد ، درشت ترین دانه بنوبه خود بستگی به کوچکترین بُعد قطعه ساختمانی ، فاعله آرماتورها و ضخامت بتن پوششی روی آرماتورها و اسلامپ ، بستگی به نوع قطعه ساختمانی و روش ریختن و متراکم کردن بتن دارد .

پس از آزمایش نمونه های مکعبی و استوانه ای سری دوم ، نتایج زیر بدست آمد :

* - دانه های سبک که اسلامپ آن کمتر از $5/2$ سانتیمتر باشد .

جدول شماره ۶. مشخصات و نتایج بدست آمده از نمونه های سری دوم

ردیف	نامه بندی	نمودن	ریف	لیک	مسه	سیمان	متراحت روزه	آب	وزن فضای خشک	آب	ردیف وزنی
۱	مکعبی	I	۵۰۰	۰۲۰	۳۲۲	۲۰۷	۱۸۱	—	۱۰۳۷	۰۶۲	—
۲	مکعبی	I	۵۰۰	۰۲۰	۳۲۲	۲۰۷	۱۸۱	—	۱۰۳۷	۰۶۲	—
۳	مکعبی	I	۵۰۰	۰۲۰	۳۲۲	۲۰۷	۱۸۱	—	۱۰۳۷	۰۶۲	—
۴	مکعبی	II	۵۰۰	۰۲۰	۳۲۲	۲۰۷	۱۸۱	—	۱۰۳۷	۰۶۲	—
۵	مکعبی	II	۵۰۰	۰۲۰	۳۲۲	۲۰۷	۱۸۱	—	۱۰۳۷	۰۶۲	—
۶	مکعبی	II	۵۰۰	۰۲۰	۳۲۲	۲۰۷	۱۸۱	—	۱۰۳۷	۰۶۲	—
۷	مکعبی	II	۵۰۰	۰۲۰	۳۲۲	۲۰۷	۱۸۱	—	۱۰۳۷	۰۶۲	—
۸	استوانه‌ای	I	۵۰۰	۰۲۰	۳۲۲	۲۰۷	۱۸۱	—	۱۰۳۷	۰۶۲	—
۹	استوانه‌ای	I	۵۰۰	۰۲۰	۳۲۲	۲۰۷	۱۸۱	—	۱۰۳۷	۰۶۲	—

جدول شماره ۷. نسبت اندازه‌های وزنی دانه‌های لیکا و ماسه به کیلوگرم برای یک متر مکعب لیگابتن

شماره الک	ماند هروی الک برای دانه‌بندی نوع یک	ماند هروی الک برای دانه‌بندی نوع دو	به کیلوگرم	به میلیمتر
گزنهای ساده	۷/۳۰۰		۷۲/۳۰۰	۱۹/-
	۶۶/۱۰۰		۵۸/-	۱۲/۵
	۲۴۱/۷۰۰		۹۲/۳۰۰	۴/۹
	۱۰۷/۳۰۰		۱۷۹/۶۰۰	۲/۳۶
گزنهای مسدود	۱۶۳/۷۰۰		۱۴۸/۹۰۰	۱/۴
	۱۸۱/۸۰۰		۱۵۲/۶۰۰	۰/۶
	۷۲/۷۰۰		۱۱۷/۲۰۰	۰/۳
	۷۲/۲۰۰		۶۵/۳۰۰	۰/۱۵
	۵۴/۶۰۰		۴۶/۵۰۰	۰/۱۵ زیر

سری سوم به تعداد نه نمونه مکعبی به ابعاد $15 \times 15 \times 15$ سانتیمتر که با افزودن
مقدار ماسه مطابق جدول شماره ۹، مانند نمونه‌های قبلی ساخته و بعمل آمد. مشخصات
و نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری این نمونه‌ها با شرح زیر است:

جدول شماره ۸. مشخصات و تابع پدستآمده از نمونهای سری سوم

ردیف	نمونه	نامه بندی	لیگ	کلسه	سیمان	لایه	وزن فضای خشک	مقادیر وقت‌نشانی	جایزه روند	لایه	
										kg	Kg/cm ²
۱	مکعبی	I	۳۰.۹/۹	۷۱۰	۲۳۲	۲۰۵/۹	۲۱۰	۱۵۰.	۰/۶۲		
۲	مکعبی	I	"	"	"	"	۲۱۹	۱۰۴۷	"		
۳	مکعبی	I	"	"	"	"	۲۰۴	۱۰۲۵	"		
۴	مکعبی	II	۲۲۳۸/۷	۷۰۷/۷	۲۹۹/۷	۱۸۸/۷	۱۰۱	۱۴۹۳	۰/۶۳		
۵	مکعبی	II	"	"	"	"	۱۷۰	۱۰۵۰	"		
۶	مکعبی	II	"	"	"	"	۱۳۸	۱۴۱۳	"		
۷	مکعبی	I	۳۰.۰/۰	۷۰۵	۳۴۰	۲۱۹/۳	۱۳۷	۱۰۴۸	۰/۶۲۶		
*۸	مکعبی	I	"	"	"	"	۱۹۸	۱۰۲.	"		
*۹	مکعبی	I	"	"	"	"	۱۹۰	۱۰۰۹	"		

جدول شماره ۹ . نسبت اندازه‌های وزنی دانه‌های لیکا و ماسه مانده روی الک به کیلوگرم برای یک متر

مکعب لیکابتن

دانه‌بندی نوع یک برای نمونه‌ها	دانه‌بندی نوع د و شماره ۸، ۹، ۱۰ که در جدول صفحه	دانه‌بندی نوع یک به کیلوگرم	شماره الک به کیلوگرم	شماره الک به میلیمتر
قبل باعلامت * مشخص شده است				
۷۱/۳۰۰	۷/۳۰۰	۷۲/۳۰۰	۱۹	
۵۷/۲۰۰	۶۶/۱۰۰	۵۸/۰۰۰	۱۲/۰	
۹۱/۰۰۰	۲۴۱/۲۰۰	۹۲/۳۰۰	۴/۹	
۸۶/۰۰۰	۲۳/۶۰۰	۸۷/۳۰۰	۲/۳۶	
۲۳۱/۲۰۰	۲۱۲/۱۰۰	۲۳۴/۵۰۰	۲/۳۶	
۱۴۶/۸۰۰	۱۶۳/۲۰۰	۱۴۸/۹۰۰	۱/۴	
۱۵۰/۴۰۰	۱۸۱/۸۰۰	۱۵۲/۶۰۰	۰/۶	
۱۱۵/۵۰۰	۷۲/۲۰۰	۱۱۷/۲۰۰	۰/۳	
۶۴/۳۰۰	۷۲/۲۰۰	۶۵/۳۰۰	۰/۱۵	
۴۵/۸۰۰	۵۶/۶۰۰	۴۶/۵۰۰	۰/۱۵	زیر

سری چهارم به تعداد ۲۳ نمونه مکعبی که با افزایش مقدار سیمان و مقادیری دانه مشابه جدول شماره ۹ (در این جدول فقط برای نمونه‌های شماره ۸ الی ۲۳ دانه‌های روی الک ۲/۳۶ میلیمتر ماسه انتخاب * شد و دانه‌های لیکا در این اندازه حذف گردید). مانند نمونه‌های قبلی ساخته و بعمل آمد . مشخصات و نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری این ۲۳ نمونه بشرح زیراست :

* - با توجه به جدول شماره ۴ ، می‌توان مقدار وزنی ماسه معادل لیکا یا بالعکس را تعیین نمود .

جدول شماره ۱۰. مشخصات و نتایج بدست آمده از نمونه‌های سری چهارم

ردیف	بعنوان نمونه	دنه بندی	ابعاد نمونه	کیلو	کیلو	کیلو	لیتر	سینه	سینه	آب	متراحت فشاری از روزه	وزن فضای بین خشک	آب / سیمان	
۱	۱۰۰×۱۰۰×۱۰	گلوب	۱۱	۲۷۷	۷۲۰	۶۹۶	۲۳۲	۱۹۱	۱۹۱	۱۹۱	۰	۱۴۰	۰	۰
۲	۱۰۰×۱۰۰×۱۰	گلوب	۱۱	۲۷۷	۷۲۰	۶۹۶	۲۳۲	۱۹۱	۱۹۱	۱۹۱	۰	۱۴۰	۰	۰
۳	۱۰۵×۱۰۵×۱۰	گلوب	۱۱	۲۷۷	۷۲۰	۶۸۸	۲۳۰	۱۹۰	۱۹۰	۱۹۰	۰	۱۴۲	۰	۰
۴	۱۰۵×۱۰۵×۱۰	گلوب	۱۱	۲۷۷	۷۲۰	۶۸۸	۲۳۰	۱۹۰	۱۹۰	۱۹۰	۰	۱۴۲	۰	۰
۵	۱۰۵×۱۰۵×۱۰	گلوب	۱۱	۲۷۷	۷۲۰	۶۸۸	۲۳۰	۱۹۰	۱۹۰	۱۹۰	۰	۱۴۲	۰	۰

ادامه جدول شماره ۱۵. مشخصات و نتایج بدست آمده از نمونه های سری چهارم

سیمان Kg	آب لیتر	مقاومت فشاری ۲ روزه Kg/cm ²	وزن فضای خشک Kg/M ³	آب سیمان
۴۷۴	۲۴۰	۲۳۸	۱۰۷۹	۰ / ۰۲
"	"	۲۴۰	۱۰۵۶	"
"	"	۲۶۱	۱۰۷۹	"
"	"	۲۷۵	۱۶۶۴	"
"	"	۲۱۴	۱۰۹۰	"
۴۷۴	۲۴۰	۲۰۱	۱۰۲۴	۰ / ۰۲
"	"	۲۰۴	۱۰۱۹	"
۴۹۶	۲۳۶	۲۲۹	۱۰۰۳	۰ / ۴۸
"	"	۲۵۱	۱۰۰۸	"
"	"	۲۴۸	۱۰۰۷	"
"	"	۱۹۶	۱۰۳۰	"
"	"	۲۰۴	۱۰۳۴	"
۴۸۷	۱۹۰	۲۱۳	۱۰۲۴	۰ / ۲۹
"	"	۱۹۳	۱۶۹۳	"
"	"	۱۸۴	۱۰۴۶	"
۵۴۴	۲۱۸	۲۰۸	۱۶۷۰	۰ / ۴۰
"	"	۲۶۷	۱۶۶۱	"
"	"	۲۶۱	۱۶۱۳	"

ردیف	بعاد نمونه	دانه‌بندی	لیکا	ماسه
			Kg	Kg
۶	۱۵×۱۵×۱۵ مکعبی	I	۲۶۷	۷۰۹
۷	" " "	I	"	"
۸	" " "	I	"	"
۹	۱۰×۱۰×۱۰	"	I	"
۱۰	" " "	I	"	"
۱۱	" " "	I	۲۶۷	۷۰۹
۱۲	" " "	I	"	"
۱۳	۱۵×۱۵×۱۵	"	II	۲۷۷
۱۴	" " "	II	"	"
۱۵	" " "	II	"	"
۱۶	۱۰×۱۰×۱۰	"	II	"
۱۷	" " "	II	"	"
۱۸	۱۵×۱۵×۱۵	"	II	۲۷۲
۱۹	" " "	II	"	"
۲۰	۱۰×۱۰×۱۰	"	II	"
۲۱	۱۵×۱۵×۱۵	"	II	۲۶۷
۲۲	" " "	II	"	"
* ۲۳	" " "	II	"	"

* — نمونه ردیف ۲۳ فقط با میز و بیراتور معمولی و در حد ون یک دقيقه متراکم شده است.

سری پنجم به تعداد ۱۶ نمونه مکعبی فقط بادانه‌های لیکا* (بدون ماسه) مانند قبل ساخته و بعمل آمد. مشخصات و نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری این ۱۶ نمونه بشرح زیر می‌باشد:

جدول شماره ۱۱۵. مشخصات و نتایج بدست آمده از نمونه‌های سری پنجم

سیطان Kg	آب لیتر	مقاومت فشاری ۷ روزه Kg/cm ²	وزن فضایی خشک Kg/m ³	آب سیطان
۵۱۰	۲۳۱	۱۶۵	۱۲۴۴	۰/۴۵
"	"	۱۷۲	۱۳۱۰	"
۵۲۴	۲۳۴	۱۸۱	۱۲۶۶	"
"	"	۱۷۰	۱۲۴۹	"
۳۵۷	۲۲۲	۱۳۰	۱۱۸۵	۰/۶۲
"	"	۱۱۱	۱۱۶۰	"

سیطان Kg	آب لیتر	مقاومت فشاری ۲۸ روزه Kg/cm ²	وزن فضایی خشک Kg/m ³	آب سیطان
۵۱۰	۲۳۱	۱۷۷	۱۴۱۰	۰/۴۵
"	"	۱۹۰	۱۴۰۴	"
"	"	۱۷۱	۱۳۸۸	"
"	"	۱۲۷	۱۴۲۷	"
۵۲۴	۲۳۴	۱۵۴	۱۳۸۸	"
"	"	۱۹۰	۱۳۷۶	"
۳۵۷	۲۲۲	۱۲۷	۱۲۹۸	۰/۶۲
"	"	۱۵۴	۱۳۰۹	"
"	"	۸۷	۱۲۲۳	"
"	"	۱۱۲	۱۳۳۰	"

* - به پا ورقی صفحه ۳۰ رجوع شود.

لیکا	Kg	رانه بندی	ابعاد نمونه	شماره نمونه
۱	۶۴۰	I	۱۰×۱۰×۱۰ مکعبی	
۲	"	I	" " "	
۳	۶۶۷	II	۱۵×۱۵×۱۵ "	
۴	"	II	" " "	
۵	۶۹۶	I	" " "	
۶	"	I	۱۰×۱۰×۱۰ "	

ردیف	نامهندی	ابعاد شمونه	شماره نمونه
۱	I	۱۰×۱۰×۱۰	مکعبی
۲	"	"	"
۳	"	"	"
۴	I	۱۰×۱۰×۱۰	مکعبی
۵	"	"	"
۶	"	"	"
۷	I	۱۰×۱۰×۱۰	مکعبی
۸	"	"	"
۹	"	"	"
۱۰	I	۱۰×۱۰×۱۰	مکعبی
۱۱	I I	۱۰×۱۰×۱۰	مکعبی
۱۲	I I	۱۰×۱۰×۱۰	مکعبی
۱۳	I	۱۰×۱۰×۱۰	مکعبی
۱۴	I	۱۰×۱۰×۱۰	مکعبی
۱۵	I	۱۰×۱۰×۱۰	مکعبی
۱۶	I	۱۰×۱۰×۱۰	مکعبی

سری ششم ، بتعاد سه نمونه مکعبی $15 \times 15 \times 15$ سانتیمتر و سه نمونه مکعبی $10 \times 10 \times 10$ سانتیمتر ، مطابق جدول شماره ۱۳ و با سه دقیقه ویبره کردن بر روی میز ویبره جهت تراکم نمونهها و مانند نمونههای قبلی عمل آورده شد . نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه و نسبت اجزای تشکیل دهنده آنها بشرح زیراست :

جدول شماره ۱۲ . مشخصات و نتایج بدست آمده از نمونههای سری ششم

سیمان Kg	آب لیتر	مقاومت فشاری ۲۸ روزه kg/cm^2	وزن فضای خشک آونسی kg/m^3	آب / سیمان
۳۵۰	۲۲۱	۲۲۱	۱۵۲۳	۰ / ۶۳
"	"	۲۵۲	۱۴۹۹	"
"	"	۱۸۴	۱۰۱۰	"
"	"	۲۰۶	۱۰۰۳	"
"	"	۱۹۸	۱۴۹۸	"
"	"	۱۸۸	۱۵۱۴	"

جدول شماره ۱۳ . نسبت اندازههای وزنی دانههای لیکا و ماسه مانده روی الک به کیلوگرم برای یک مترمکعب لیکا بتن

مقدار دانه مانده روی الک به کیلوگرم	نوع دانه	شماره الک
		به میلیمتر
۱۱۴	لیکا	۹ / ۵
۱۶۰	لیکا	۴ / ۹
۳۶۱	ماسه	۲ / ۳۶
۵۲	لیکا	۱ / ۴
۱۰۸	لیکا	۰ / ۶
۱۵۲	ماسه	۰ / ۳
۷۶	ماسه	۰ / ۱۵
۷۶	ماسه	۰ / ۱۵

شماره نمونه	ابعاد نمونه - سانتیمتر	لیکا	ماسه
		Kg	Kg
۱	۱۰×۱۰×۱۰ مکعبی	۴۳۴	۶۶۵
۲	" " "	"	"
۳	" " "	"	"
۴	۱۰×۱۰×۱۰ "	"	"
۵	" " "	"	"
۶	" " "	"	"

در امریکا با بررسی نتایج گزارش‌های منتشر شده، رابطه‌ای بین مقدار سیمان مصرفی و مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های لیکابتون بدست آمده است (۷). این رابطه برای نمونه‌های لیکابتونی است که در رطوبت عمل آمده و اسلامپ مخلوط بتن آنها در حداود ۵ الی ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. این رابطه خطی بوده و در نمودار زیر نشان داده شده است:

با

$$C = 3 + \frac{Cu}{1000}$$

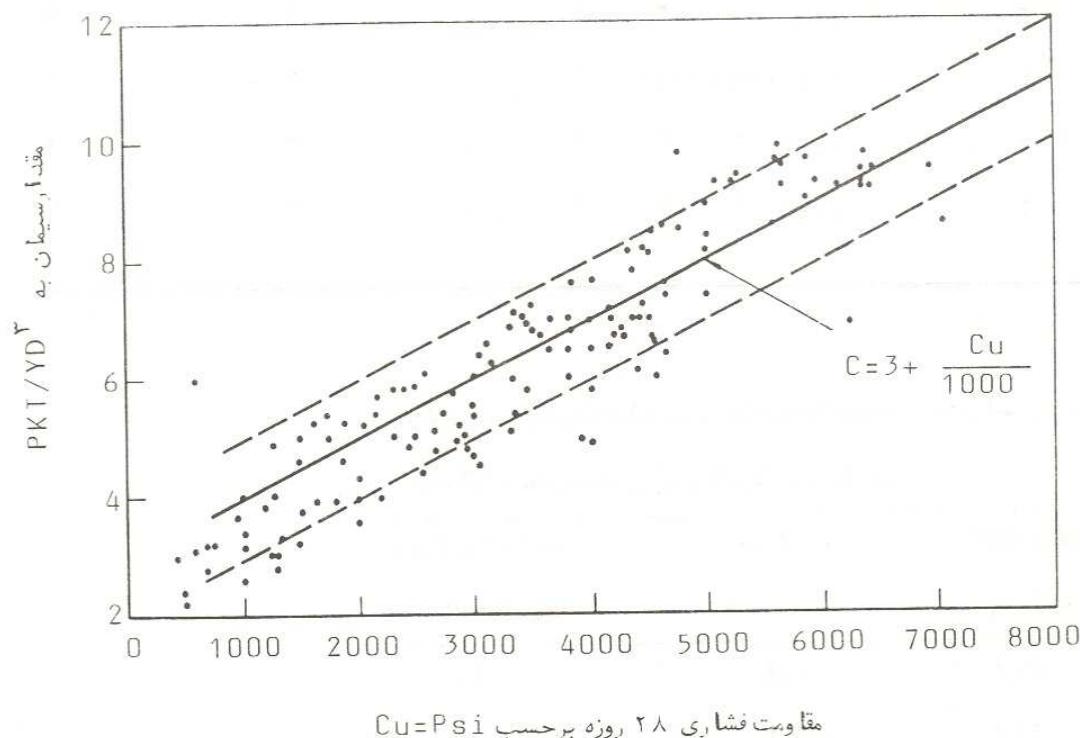
مقدار سیمان به کیسه در یاردمکعب =

مقاومت فشاری ۲۸ روزه به

$$C = 196/2 + 0/9302 Cu$$

مقدار سیمان به کیلوگرم در مترمکعب *

Cu = Kg/cm² مقاومت فشاری ۲۸ روزه به



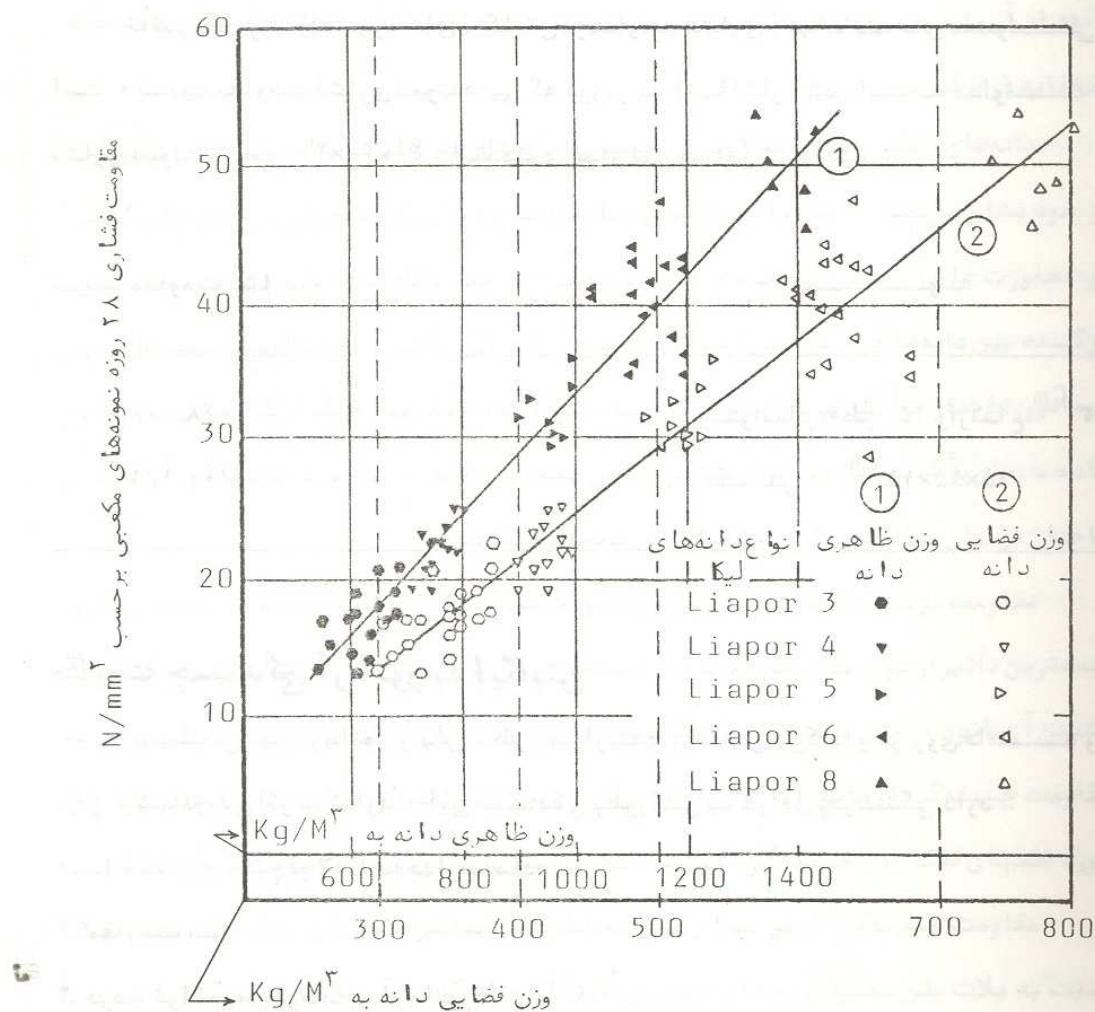
شکل ۳ - مقدار سیمان بتن سبک با آنها سبک استفاده شده در امریکا

* - در صورتیکه هر کیسه سیمان را در حدود ۵۰ کیلوگرم در نظر بگیریم.

مقدار سیمان تخمینی از این طریق، با توجه به دانه‌ها و کارآبی لازم، در حدود

$$* \quad 65/4 \pm \text{کیلوگرم در متر مکعب قابل تغییر می‌باشد.}$$

همانطور که قبله اشاره شد، همراه با بالا رفتن وزن دانه‌های لیکا، مقاومت و مدول تغییر شکل این دانه‌ها افزایش می‌یابد. گرچه وزن لیکا بتن بدست آمده افزایش می‌یابد، اما مقاومت لیکا بتن ساخته شده با این دانه‌های سنگین‌تر زیادتر است. در شکل شماره ۴ - رابطه بین وزن دانه‌های مختلف لیکا و مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه مکعبی حاصل از این دانه‌ها نشان داده شده است (۸).



شکل ۴ - رابطه بین وزن ظاهري و فضائي خشک دانه‌هاي لیکا (Liapor) و مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه مکعبی ساخته شده با اين دانه‌ها به نسبت موثرآب به سیستان برابر ۵/۰.

* - در صورتیکه هر کیسه سیمان در حدود ۵ کیلوگرم در نظر گرفته شود.

مقاومت فشاری بتن معمولی ، بستگی به مقاومت ملات خمیرسیمان و نسبت کمتر به مقاومت دانه‌های سنگی آن دارد . در صورتی که مقاومت بتن سبک بدانه‌های سبک ، بیشترین بستگی رابه مقاومت دانه‌های سبک دارد نه ملات ماسه سیمان آن ، زیرا معمولاً " مقاومت ملات ماسه سیمان از مقاومت دانه‌های سنگی کمتروارم مقاومت دانه‌های سبک بیشتر است . این موضوع با دیدن نمونه‌های شکسته شده بتن معمولی و لیکابتون تأیید می‌شود . در نمونه‌های بتن معمولی با عیار سیمان متوسط و کم عوموماً " دانه‌های شن ، در سطح شکسته شده نمونه ، از ملات سیمان بیرون می‌آیند ، در صورتی که در نمونه‌های لیکابتون دانه‌های درشت سبک از وسط بدوبونیم می‌شوند .

تأثیر شکل و ابعاد نمونه‌های لیکابتون در مقاومت فشاری آنها مانند بتن معمولی است . نسبت مقاومت فشاری نمونه‌هایی که در زیر به آنها اشاره شده است به مقاومت فشاری نمونه مکعبی $20 \times 20 \times 20$ سانتی‌متری همان بتن به این شرح است :

نمونه	نسبت مقاومت فشاری
استوانه‌ای، قطر 30 cm و ارتفاع 15 cm	$0.80/85$
مکعبی ، $15 \times 15 \times 15\text{ cm}^3$	$1.00/1.10$

مقاومت چسبندگی آرماتور به لیکابتون

چسبندگی بین آرماتور و بتن ، طرح مهاربندی را تعیین می‌کند و بر روی فاصله و عرض ترکه‌ادریتن اثر می‌گذارد . این چسبندگی بطورکلی به عوامل زیر استگی دارد :

۱- ماهیت روی سطح فولاد (عاجدار یا ساده)

۲- مقاومت بتن

۳- درصد تراکم بتن در مجاور آرماتورها

۴- کیفیت ملات ماسه سیمان بین دانه‌ها

۵- مقاومت تغییر شکل دانه‌ها تحت بار متمرکز موضعی در سطح روی فولاد

۶- مدول تغییر شکل بتن

در مورد آرماتورهای عاجدار ، چسبندگی به تصویر سطح برآمده عاج در طول آرماتور

برای نمونه ، بتن سبک باید با بتون معمولی مقایسه شود که حداقل تنفس چسبندگی بدست آمده از آزمایش بیرون کشیدن آرماتور از بتون بعنوان خواص اصلی قابل مقایسه ، مسورد استفاده قرار گیرد .

برای نتایج بدست آمده از مصالح و طرحی که مشخص شده است مقایسه نمود و بکار گرفت .

برای تقویت خاص هم صورت گرفته است، وضعیت قابل اجرا در آزمایش بیرون کشیدن آرماتور از بتون مانند وضعیت موجود در یک قطعه ساختمانی نمیباشد، نتایج بدست آمده از آزمایش بیرون کشیدن ، مستقیما " در عمل قابل استفاده نیست و میتوان نتیجه این آزمایش را با تیرهای خاص هم قابل تعیین نمیباشد . آزمایش بیرون کشیدن آرماتور از بتون معمولاً مقاومت فشاری آن قابل تعیین نمیباشد .

بستگی دارد (۱۰۹) . مقدار چسبندگی بتن به آرماتور ، بكمك يك خاصيت مکانيکي مانند

دانههای سبک ، مقاومت کمتری نسبت به دانههای معمولی دربرابرتنش های مرکز از خود نشان می دهند . بنابراین بتنهای سبک نسبت به بتنهای معمولی درتنش های کمتر در مجاورت عاج آرماتور گسیخته و خرد می شوند . هرچند مقاومت ملات ماسه سیمان پرکننده بین دانهها درهاردو بتن (سبک و معمولی) برابر باشد ، اما مقاومت چسبندگی آرماتور عاجدار در بتن سبک کمتر از بتن معمولی است . به بیان دیگر هرگاه مقاومت ملات ماسه سیمان پرکننده دربتن سبک بیشتر از بتن معمولی باشد ، مقاومت چسبندگی آرماتور عاجدار در بتن سبک می تواند بیشتر از بتن معمولی باشد .

مقاویم درشت دانه‌ها تأثیرکمی بر مقاومت چسبندگی آرماتور ساده به بتن دارد، و بیشترین تأثیر از سوی مقاویم ملات ماسه سیمان پرکننده است. آزمایش‌های بیرون کشیدن آرماتور از بتن و تیرهای راستگاه تحقیقات ساختمان انگلیس نشان داده است که مقاویت چسبندگی آرماتور ساده به بتن سبک، معمولاً "کمتر از بتن معمولی است" ، در مورد بتنهای لیکا این چسبندگی تقریباً " معادل بتن معمولی بدت آمده است" * (11).

* - البته به مقدار وزن فضایی رانههای لیکای مصرفی اشارهای نشده است .

آرماتورهای عمودی با انواع مختلف دانه‌ها و سایر شرایط دیگر یکسان ، چندان تغییری نمی‌کند . در مورد آرماتورهای عمودی ، مقاومت چسبندگی به انواع مختلف دانه‌ها بستگی ندارد (۸) .

هرگاه مخلوط بتن سبک خیلی شل و آبکی باشد ، بخاطر جداشدن دانه‌های درشت و کم شدن مقاومت بتن بدست آمده ، خصوصاً " مقاومت چسبندگی آرماتورهای فوقانی کم می‌شود . بتهای سبک آبکی عموماً " بخاطر زیانهای وارده از جداشدن دانه‌ها و ایجاد ترکهای افت یا جمع شدگی ، مناسب برای قطعات خمش نیستند . علت این امر این است که ، با وجود مقاومت فشاری یکسان ، مقاومت کششی بتن سبک کمتر از بتن معمولی است . در بتن سبک امکان ایجاد ترک در امتداد آرماتور بیشتر می‌شود . بنابراین ، افزایش خاموت و ضخامت بتن روی آرماتور الزام آور است .

تابحال مطالعات دقیق و جامع در مورد مقاومت چسبندگی تحت نیروی دائمی صورت نگرفته است . در بتن معمولی ، دانه‌های سخت ماسه طبیعی بین فصل مشترک بتن و آرماتورها ، مانع لغزش آرماتورها می‌شوند . در صورتی که ریزدانه‌های سبک ، مقاومت این عمل را بقدر کافی ندارند ، اما با اضافه کردن ماسه طبیعی به دانه‌های سبک ، این وضع بهبود می‌یابد . در بتن سبک مانند بتن معمولی ، آرماتورهای ساده و عاجدار ، قابلیت مهار کردن با خم کردن سر و ته را دارا می‌باشند (۱۲ و ۱۳) . برای جلوگیری از ترک خوردن در محل نیروهای متصرک در قسمت مهاربندی می‌توان از خاموت به مقدار کافی استفاده نمود . همان‌طور که اشاره شد ، مقاومت چسبندگی آرماتور به بتهای سبک ، کمتر از بتهای معمولی است . بمنظور تعیین نسبت مقاومت چسبندگی لیکابتون و بتن معمولی ، نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر از لیکابتون و بتن معمولی به نسبت اندازه‌های وزنی دانه‌های آمده در جدول شماره (۵) با طرح مخلوط و نحوه ساخت و عمل آوردن یکسان ، با سه آرماتور $\phi 8$ ، $\phi 8$ و $\phi 8$ تهیه و آماده شدند . نمونه‌ها با قراردادن آرماتور در وضعیت عمودی ساخته شدند . آزمایش بیرون کشیدن آرماتور از بتن نیز در وضعیت عمودی صورت گرفت . با توجه به مقاومت چسبندگی آرماتور به بتن ، حداقل طول آرماتور لازم تحت فشار یا کشش تعیین می‌شود . در کد ACI ، حداقل طول یا طول مؤثر آرماتور عاجدار (برای آرماتورهای کوچک‌تر از قطر ۲۵ میلی‌متر) ، در کشش برای بتهای معمولی برابر رابطه زیر تعیین شده و برای مقاومت چسبندگی آرماتور بتهای بتنی سبک ، طول مؤثر برابر رابطه زیر ضرب در $1/23$ مشخص گردیده است .

$$(2) \quad L_d = \frac{0.0594 A_b f_y}{\sqrt{f_c}} \quad \text{اما} \quad > 0.00224 d_b f_y$$

توضیح :

A_b = سطح مقطع آرماتور به سانتی متر مربع

f_y = مقاومت حد خطی آرماتور به کیلوگرم بر سانتی متر مربع

f_c' = مقاومت فشاری بتن به کیلوگرم بر سانتی متر مربع

d_b = قطر آرماتور به سانتی متر

L_d = طول مؤثر آرماتور به سانتی متر

پس از انجام آزمایش‌های یاد شده بر روی نمونه‌های لیکابتن و بتن معمولی،

مقاومت چسبندگی آرماتور به لیکابتن در حدود ۶۰ درصد مقاومت چسبندگی همان آرماتورها

به بتن معمولی با همان عیار سیمان بdst آمد . در صورتیکه در کد ACI ، آن را برابر

۲۵ درصد قید کرده است . درنتیجه بدلیل کمتر بودن مقاومت چسبندگی آرماتور به لیکابتن،

نسبت به بتن معمولی ، طول گیرداری آرماتورها در لیکابتن باید در حدود ۱/۵ برابر همان

طول و برای همان آرماتور در بتن معمولی، با همان عیار سیمان در نظر گرفته شود . (طبق

آئین نامه ACI ، ۱/۳۳ برابر)

مقاومت کشش لیکابتن

بعضی از خواص مکانیکی بتن مسلح از قبیل مقاومت برشی ، مقاومت چسبندگی

آرماتور به بتن و مقاومت دربرابر ترک خوردگی به مقاومت کشش آن بستگی دارد . آزمایش

مقاومت کشش غیرمستقیم برای تخمین مقاومت کشش بتن قطعات ساختمانی در امتداد

خطوط مورب * ، استفاده می‌شود . آزمایش‌های انسان داده است که مقاومت کششی مورب -

بتن در قطعات ساختمانی رابطه نزدیک با مقاومت کشش غیرمستقیم دارد . " مقاومت

کشش غیرمستقیم نمونه‌هایی که در هوا بعمل آمده ، کمتر از نمونه‌هایی است که در آب

بعمل آمده باشند . این امر بعلت اختلاف انقباض‌های ناشی از اختلاف درجه حرارت نقاط

داخلی و روی سطح نمونه است که باعث تنفس های کششی در نزدیکی سطح نمونه می‌شود .

این عامل منفی ایجاد کشش در نمونه‌های بعمل آمده در هوا برای بتن‌های سبک‌که دارای

ریزدانه سبک می‌باشد بیشتر است . این اختلاف انقباض نواحی داخلی و خارجی نمونه، با

* - Diagonal Tensile Strength

جایگزین کردن مقدار یا کل ریزدانه‌های سبک با ماسه طبیعی به مقدار زیادی کم می‌شود^(۸) .
تغییرات مقاومت کششی غیرمستقیم در بتن‌های سبک عموماً "بیشتر از بتن‌های معمولی،
معمولی است . این مقاومت به مقدار قابل توجهی در بتن‌های سبک کمتر از بتن‌های معمولی،
با همان مقاومت فشاری است (حداکثرتا ۳۰ درصد کمتر) . در رابطه زیر ، میانگین مقاومت
کشش غیرمستقیم به مقاومت فشاری برای بتن‌های سبک مشخص شده است^(۸) .

$$(5) \quad f_{ct} = +/23 \sqrt[3]{f_{cu}^2}$$

در این رابطه f_{ct} مقاومت کششی غیرمستقیم بر حسب N/mm^2 و f_{cu} مقاومت
فشاری نمونه مکعبی بر حسب N/mm^2 است .
رابطه زیرهم چنین وزن فضایی بتن رانیز در نظر می‌گیرد^(۸) .

$$(6) \quad f_{ct} = +/375 (+/3 + +/2 \frac{P_{Lc}}{P_{oc}}) \sqrt{f_{cu}}$$

P_{Lc} وزن فضایی نمونه بتن سبک خشک شده در هوا و P_{oc} وزن فضایی بتن معمولی
خشک شده در هوا می‌باشد . در اینجا آداوری می‌شود که اندازه‌های روابط فوق تقریبی ولی
درجہت اطمینان است .

مطالعات جدیدی که در این زمینه توسط دکتر Olav Berge * انجام یافته
به این نتیجه رسیده است که وزن فضایی بتن ، عمر و شکل نمونه تحت آزمایش (مکعبی یا
سیلندری) بر رابطه بین مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت فشاری تأثیر دارد . در اغلب
حالات اندازه‌های حقیقی در داخل محدوده‌های زیر بودست می‌آید :

$$\text{مقادیر مقاومت فشاری نمونه مکعبی به } N/mm^2$$

۱۰	۱/۹ - ۱/۳
۲۰	۱/۴ - ۲/۰
۳۰	۱/۸ - ۲/۷
۴۰	۲/۲ - ۲/۳
۵۰	۲/۵ - ۳/۸
۶۰	۲/۸ - ۴/۲

* Dr. Olav Berge of Chalmers University of Technology,
Goteborg . Sweden.

* مقاومت گششی در خمش

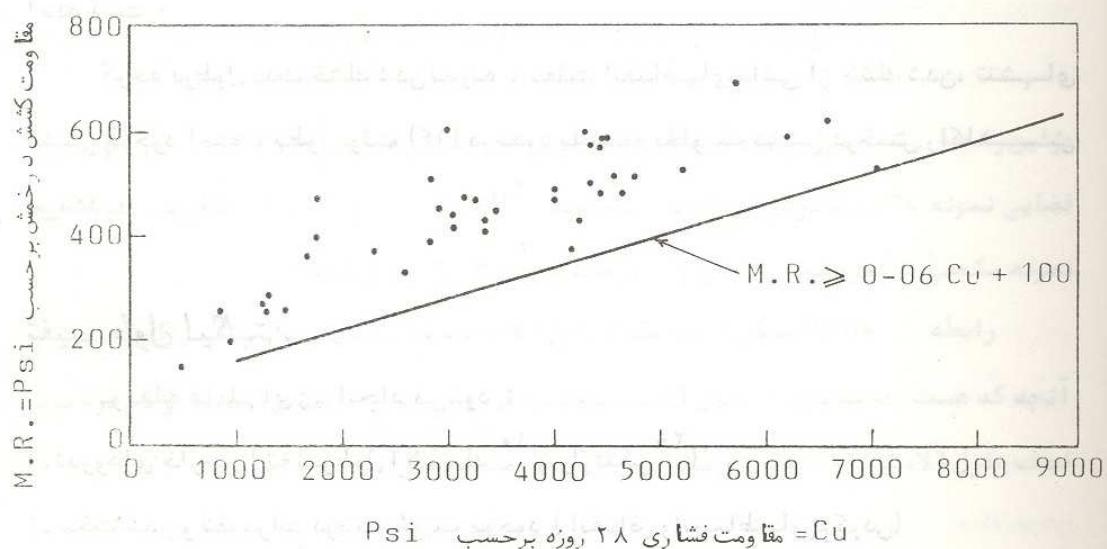
شکل شماره ۵ ، نتایج بررسیهای انجام شده در آمریکا درمورد رابطه بین مقاومت گششی در خمش (M.R.) و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتنهای سبک ساخته شده از انواع دانههای سبک رانشان می دهد . بدینهی است مقاومت گششی در خمش با با لارفتن مقاومت فشاری افزایش می یابد . براساس نتایج این بررسیها می توان مقدار مقاومت گششی در خمش را با ضریب اطمینان از رابطه زیربسط آورد :

$$(7) \quad M.R. \geq 0.06 Cu + 100 \quad \text{یا} \quad M.R. \geq 0.06 Cu + 7.031$$

$$\text{مقادیم کششی در خمش برای} = M.R. = \frac{\text{نمونههای ۲۸ روزه به}}{\text{نمونههای ۲۸ روزه به}} \text{Kg/cm}^2$$

$$Cu = \text{Psi} \quad \text{مقادیم فشاری ۲۸ روزه به} \quad Cu = \text{Kg/cm}^2$$

$$\text{و برای} \quad Cu \geq 1000 \text{Psi} \quad \text{و برای} \quad Cu \geq 70.3 \text{Kg/cm}^2$$



شکل ۵ - مقادیم کششی در خمش بتنهای سبک با دانههای سبک که در آمریکا استفاده می شود .

* Modulus of rupture

تحقیقات انجام شده در هندستان به این نتیجه رسیده است که مقاومت کششی در خممش نمونه‌های لیکابتون به ابعاد 10×50 سانتی‌متر، حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد مقاومت فشاری آن است (۱۴). این مقاومت از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$(8) \quad M.R. = K \sqrt{f_{c}} \iff \begin{cases} K = 1/6 - 2/7 & \text{بتن معمولی} \\ K = 2/62 - 3/52 & \text{بتن لیکا} \end{cases}$$

در این رابطه f_c مقاومت فشاری ۲۸ روزه بر حسب Kg/cm^2 و $M.R.$ مقاومت کششی در خممش ۲۸ روزه بر حسب Kg/cm^2 است (۱۴).

برای مقاومت‌های فشاری بین 20 N/mm^2 و 60 N/mm^2 ، میانگین مقاومت کششی در خممش نسبت به مقاومت فشاری بتنی معمولی بصورت زیر بیان شده است (۱۵):

$$(9) \quad M.R. = 0.46 \sqrt{f_{cu}^2}$$

در این رابطه $M.R.$ مقاومت کششی در خممش بر حسب N/mm^2 و f_{cu} مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بر حسب N/mm^2 می‌باشد. مقاومت کششی در خممش نمونه‌های لیکابتون ماسه دار که در آب عمل آمده‌اند، در با لا یا نزدیک به منحنی رابطه (۹) بدست آمده است.

گرچه در طول مدت خشک شدن نمونه، بعلت انقباض‌های ناشی از خشک شدن، تنفس ای کششی بوجود آمده، بطور موقت (۱۶) در حدود یک سوم مقاومت کششی در خممش را کاهش می‌دهد.

تغییر طول لیکابتون

بوسیله عاملهای زیر ایجاد می‌شود:

- ۱- نیروهای خارجی (تغییر طول الاستیک 1^{*} و وارفتگی 2^{*})
- ۲- سخت شدن و تغییرات درصد رطوبت موجود (انقباض و انبساط یا اورم کردن)
- ۳- تغییرات درجه حرارت

تغییر طول الاستیک لحظه‌ای بوده و با نیروهای وارد در مدت زمان کم ایجاد می‌گردد، این تغییر طول به قابلیت تغییر شکل لحظه‌ای خمیر سیمان سخت شده و دانه‌ها به نسبت درصد

حجم اشغالی آنها و نیروی واردہ بستگی دارد .
 نتایج بدست آمده از آزمایش فشاری یک محوری نشان می‌دهد که رابطه تغییرات
 تنش^{۱*} و کرنش^{۲*} در بتون لیکا (خصوصاً "ماسه دار") مانند بتن‌های معمولی است حداکثر
 کرنش فشاری لیکابتن در حداکثر نیروی واردہ یک محوری بین $10^{-6} \times 2000$ و $10^{-6} \times 2500$ -
 یعنی تقریباً " مشابه بتن معمولی می‌باشد .

مدول الاستیسیته لیکابتن

مدول الاستیسیته بتن به مدول الاستیسیته اجزای تشکیل دهنده آن یعنی دانه‌ها و
 ملات سیمان سفت شده بستگی دارد . مدول الاستیسیته به درصد حجمی موجود هر کدام از
 دانه‌ها و ملات سیمان سفت شده مرتبط است . این ارتباط همچنان با نوع دانه لیکای استفاده
 شده ، مقاومت فشاری و وزن فضایی آن نیز بستگی دارد ، مدول الاستیسیته لیکابتن
 مابین مقادیر 24000 N/mm^2 و 5000 N/mm^2 متغیر است (۸) . معمولاً " این
 مقدار کمتر از مدول الاستیسیته ملات ماسه سیمان موجود در آن می‌باشد ، مقدار مدول
 الاستیسیته بتن سبک را P_{auw} (۱۷) در رابطه زیر تخمین زده است :

$$(10) \quad E_{cj} \text{ (Modulus of deformation)} = 0.04 \sqrt{\rho^3 f_{cj}}$$

در این رابطه E_{cj} مدول وتری * بتن سبک در عمر j روز بر حسب N/mm^2 و وزن ρ فضایی نمونه 28 روزه در هوای خشک شده بر حسب Kg/m^3 و f_{cj} مقاومت فشاری نمونه مکعبی در عمر مشخص j روز بر حسب N/mm^2 می‌باشد .

رابطه P_{auw} ممکن است مقدار مدول الاستیسیته لیکابتن را بیشتر یا کمتر از آنچه که هست بدست دهد . مدول الاستیسیته بنهای سبک در وزنهای متوسط و کم در حدود نصف مدول الاستیسیته بنهای معمولی (باما مقاومت فشاری معادل) است .

$2*$ - Stress . $1*$ - Strain کرنش تنش

* - مدول وتری $=$ Secant Modulus

استاندارد آلمانی درباره بتنهای سبک مقادیر طرح زیر را که فقط به وزن فضایی بتن
بستگی دارد مشخص نموده است :

۱۸۰۱	۱۶۰۱	۱۴۰۱	۱۲۰۱	۱۰۰۱	۸۰۰
Kg/M ^۳	Kg/cm ^۲				
وزن فضایی خشک به	۲۰۰۰	۱۸۰۰	۱۶۰۰	۱۴۰۰	۱۲۰۰

۲۳۰۰۰	۱۹۰۰۰	۱۵۰۰۰	۱۱۰۰۰	۸۰۰۰	۵۰۰۰
N/mm ^۲	N/mm ^۲	N/mm ^۲	N/mm ^۲	N/mm ^۲	N/mm ^۲
مدول الاستیسیته به	۲۳۰۰۰	۱۹۰۰۰	۱۵۰۰۰	۱۱۰۰۰	۸۰۰۰

در گزارش‌های تحقیقاتی کشور هندوستان (۱۴) مدول الاستیسیته دینامیکی بتن لیکا
برابر $10^5 \times 2/95 - 2/39$ در مقایسه با $10^5 \times 4/29$ بتن
معمولی تعیین شده است .

مدول الاستیسیته دینامیکی بتن لیکا در حدود ۳۲ تا ۶۸ درصد بتن معمولی با مقاومت
فشاری یکسان بدست آمده است . لیکا بتن با ماسه، مدول الاستیسیته دینامیکی بزرگتری را
نسبت به لیکا بتن باتمامی دانه‌های سبک لیکا (با مقاومت یکسان) از خود نشان داده
است (۱۴) . باید خاطرنشان ساخت که این مقادیر پیشنهادی با تقریب زیاد همراه است .
بخصوص وقتی که بتن سبک در مجاورت مصالح دیگری مانند فولاد و بتن معمولی به ورت
قطعه مرکب طرح می‌شود ، چون نسبت مدول الاستیسیته مصالح مرکب در تعیین تنش‌ها
حایزاً همیت است ، مدول الاستیسیته بتن سبک می‌بایست از طریق آزمایش بطور دقیق
مشخص و تعیین گردد .

وارفتگی (Creep)

وارفتگی تغییر طول تحت نیروی ثابت نسبت بگذشت زمان است ، این تغییر طول
اضافه بر تغییر طول لحظه‌ای (بلافاصله پس از اعمال نیرو) و انقباض ناشی از خشک شدن و
کم شدن درجه حرارت محیط برنمونه بتنی اعمال می‌گردد . اثر وارفتگی در مورد کم کردن
تنش‌های ناشی از انقباض که خطر ترک خوردگی را کاهش می‌دهد ، می‌تواند سودمند باشد
اما بطور کلی اغلب وارفتگی بعلت افزایش کلی تغییر طول و پایین افتادگی قطعات ساخته
ضر و مناسب نمی‌باشد . در مرجع شماره (۸) ، محدوده مقادیر وارفتگی برای بتنهای سبک
بطور متوسط بر حسب کرنش وارفتگی نسبت به واحد تنش برابر $10^{-5} \times 0.9 / 0.6$ بر N/mm^2
مشخص شده است .

" بعلت اینکه وارفتگی بطورکلی نتیجه تغییر طول خمیر سفت شده سیمان تحت نیروی دائمی می باشد ، مقدار آن با افزایش مقدار خمیر سفت شده سیمان زیاد می شود . می توان گفت که وارفتگی بتن های سبک برابر بتن های معمولی است ، مشروط با اینکه مقدار خمیر سیمان در هردو یکسان باشد . هرگاه اندازه ، مقاومت ^{۱*} ، شکل و جنس روی سطح دانه های سبک نامناسب بوده و در نتیجه به خمیر سیمان بیشتری نیاز باشد ، وارفتگی نیز افزایش می باید . وارفتگی نه تنها به کمیت خمیر سیمان بلکه به کیفیت آن نیز بستگی دارد . وارفتگی با کم شدن درصد منفذ های خمیر سیمان و با افزایش مقاومت خمیر سیمان کاهش می باید . وارفتگی از دو جزء تغییر طول لاستیک بتا خیرافتاده و تغییر طول دائمی غیرقابل برگشت تشکیل یافته است . برای بتن های معمولی جزء تغییر طول لاستیک بتا خیرافتاده (پس از برداشتن نیرو ، در حدود زمان لازم قابل برگشت می باشد) در حدود ۴ / ۰ تغییر طولی است که به زمان بستگی ندارد (پس از برداشتن نیرو در طول زمان قابل برگشت نیست) . در بتن های سبک با مقاومت دانه های متوسط ، قوی و خیلی قوی این نسبت برابر

۰ / ۳ - ۰ / ۰ - ۰ / ۰ بdst آمده است (۸) .

بطورکلی اطلاعات مستند کمی درباره وارفتگی بتن سبک از جمله لیکابتون وجود دارد . وارفتگی بتن سبک در حدود دو برابر بتن معمولی نیز گزارش شده است . از طرف دیگر بحث می شود که چون در ملات سیمان بتن ، وارفتگی بوجود می آید ، این وارفتگی در هر بتن سبک و معمولی با عیار سیمان ثابت برابر است (۸) . Shideler (۱۸) وارفتگی شش نوع بتن سبک ساخته شده از دانه های سبک منبسط از جمله لیکا را با بتن معمولی مقایسه نموده و به این نتیجه رسیده است که وارفتگی بتن سبک در حدود ۱۹ تا ۵۶ درصد بیشتر از بتن معمولی است . هم چنین یادآور می شود که وارفتگی بتن ساخته شده از دانه های ماسه سنگی ^{۲*} می تواند در حدود ۶۰ درصد بیشتر و بتن ساخته شده از دانه های سنگ آهکی ^۳ در حدود ۳۰ درصد کمتر از وارفتگی بتن ساخته شده از دانه های شن ^{۴*} باشد . بهتر است به تغییرات زیاد خواص مکانیکی بتن معمولی بهنگام مقایسه توجه داشت . ^{۵*}

۱* - " مقاومت " اضافه شده است (مؤلف)

۲* - Sandstone ماسه سنگی سنگ آهکی Gravel شن

۳* - آزمایش وارفتگی لیکابتون مقایسه آن با بتن ، از جمله برنامه های تحقیقاتی در آینده است ، که

بزودی در راسترس علاقه مندان فراخواهد گرفت .

افت یا جمع شدگی *

مقدار افت به عوامل زیربستگی دارد :

۱- مقدار خمیرسیمان در بتون (عیار سیمان)

۲- کیفیت خمیرسیمان

۳- نوع دانه مصرفی

دانه‌ها از جمع شدن یا افت خمیرسیمان سفت شده بدرجات مختلف جلوگیری می‌کنند.

این امر بستگی بسختی (مدول تغییرشکل) دانه‌هادارد . نوع دانه‌ها همچنین بر کمیت و

کیفیت لازم خمیرسیمان برای رسیدن به مقاومت ثابت تأثیرمی‌گذارد . دانه‌های مصرفی که

دارای مقاومت و سختی کم هستند برای با لا بردن مقاومت بتون به خمیر سیمان بیشتر ری

احتیاج دارند . نامناسب بودن شکل دانه بندی و جنس رویه دانه‌ها بعلت نیاز بیشتر به آب

و خمیرسیمان برای رسیدن بکار آیی مشخص باعث افزایش افت بتون می‌گردد . افت با لا

رفتن مقدار سیمان افزایش می‌یابد . افت نهایی برای لیکابتن بعیار ۳۰۰ کیلوگرم در

مترا مکعب در حدود $\frac{mm}{M} ۶۵ - ۴۹ / ۰$ بدست آمده است (۱۴) . بتنهای پرعیار با

۶۵۰ کیلوگرم در مترا مکعب یا بیشتر از سیمان ، افت نهایی در حدود $\frac{mm}{M} ۱/۲$ را نشان

داده‌اند (۱۴) . هرگاه دانه‌های سبک در بتون سبک به خمیرسیمان خیلی بیشتری نسبت

دانه‌های معمولی در بتون معمولی احتیاج نداشته باشند ، افت هردو نوع بتون مذکور تقریباً "

برابر خواهد بود . برای بتنهای سبک لیکابا مقاومتی در حدود $\frac{N}{MM^2} ۳۰ - ۵۰$ که

در حرارت 20° و تحت رطوبت نسبی ۶۵ درصد نگاهداری شوند ، افت نهایی در حدود

$\frac{MM}{M} ۰/۴ - ۰/۶$ (۶۰۰×۱۰^۶) بدست آمده است (۸) . ضمناً " با استفاده ماسه

بجای ریزدانه‌های سبک نیز افت نهایی این سری نمونه‌ها چندان تأثیر نکرده است .

طبق نتایج بدست آمده از آزمایش‌های Shideler (۱۶) و Reichard (۱۸) برای

دانه‌های سبکی که خرد شده‌اند و دارای اشکال نامنظم و منفذ‌های زیاد سطحی می‌باشند ،

افت می‌تواند به بزرگی $\frac{mm}{M} ۱$ ، افزایش یابد . هرچند برای این نوع مصالح با

جاگزینی ماسه بجای درصد یا کل ریزدانه‌های سبک ، می‌توان به مقدار قابل توجهی افت

* - افت یا جمع شدگی Shrinkage

۲ - دانه‌های لیکای این نمونه‌ها بایستی دارای وزن و مقاومت بیشتری نسبت به دانه‌های لیکای

شرکت لیکا (که در ساخت نمونه‌های آزمایشی این بررسی بکاررفته است) داشته باشند .

بتن به دست آمده را کاهش داد.

باتوجه به اینکه با استفاده از دانه‌های سبک بار طوبت زیاد افت بتن سبک با تأخیر می‌افتد، تعیین باقی مانده افت پس از خشک شدن در درازمدت مشکل و امکان پذیر نمی‌باشد. هرگاه افت، تأثیر زیادی بر روی تنفس‌های داخلی داشته باشد، منطقی است که تخمین درستی در مورد اندازه‌های بالا و پایین افت زده شود. هرچند افت در بتن سبک، تنفس بدست آمده بیشتر از بتن معمولی است، ولی بعلت مدول الاستیستیت کمتر بتن سبک، تنفس بدست آمده از جلوگیری این افت تقریباً "در هر دونوع بتن سبک و معمولی مساوی می‌باشد."

ضریب انبساط حرارتی Coefficient of Thermal Expansion

در بتن، انبساط حرارتی در درجه اول به مدول تغییر شکل دانه‌ها، نسبت حجمی دانه‌ها به توده سیمان سفت شده، درصد رطوبت موجود در بتن و حرارت بتن بستگی دارد. ضریب انبساط حرارتی دانه‌های سبک لیکا، در حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد کمتر از شن (در حدود 12×10^{-6} می‌باشد) (۸). بعلت مدول تغییر شکل کم دانه‌های سبک نسبت به دانه‌های سفت و سخت طبیعی، دانه‌های سبک از تغییر شکل حرارتی خمیر سیمان سفت شده (ضریب انبساط حرارتی خمیر سیمان سفت شده بستگی به مقدار رطوبت موجود بین $10^{-20} \times 10^{-14}$ K متغیر است) جلوگیری بعمل نمی‌آورند. بطور کلی، ضریب انبساط حرارتی بتنهای سبک در حدود 11×10^{-6} ، و مقادیر معادل برای بتنهای شن و ماسه رودخانه‌ای در حدود 13×10^{-6} است، در صورتی که برای بتنهایی با دانه‌های سنگ آهکی در حدود 9×10^{-6} می‌باشد (۹). ضریب انبساط حرارتی برای بتنهای خشک و خیلی تر حداقل بوده، در صورتی که در رطوبت‌های متعادل (در حدود ۵-۱۰ درصد حجمی) در حدود ۲۰-۳۰ درصد بیشتر است (۸).

خواص آکوستیکی

مقدار نزول در مقدار صدا (به دسیبل = dB) پس از عبور از اجسام، بستگی به جرم هرجسم دارد. هرچه جرم افزایش باید، این مقدار نزول بیشتر می‌شود. بررسیهای فرانسویها، آلمانیها و انگلیسیها، بیانگر این نکته جالب است که از نظر عایق صدا، بتنهای سبک ساخته شده از دانه‌های سبک منبسط که دارای سطحی با بافت نزدیک باشند، بهتر از رابطه از دیگر جرم و مقدار صدای کم شده اجسام دیگر عمل می‌کند؛ برای مثال یک

دیوار لیکابتون به ضخامت 200 mm که دارای وزن فضایی 1000 Kg/M^3 است، معادل یک دیوار بتونی معمولی با همان ضخامت و با وزنی در حدود دو برابر و معادل یک دیوار آجری به ضخامت 330 mm با سه برابر وزن می‌باشد. میانگین عایق صدای هرسه دیوار مشروح، در حدود 52 dB است (۲۰).

خواص عایق حرارتی Thermal Properties

هدایت حرارتی، مقدار حرارتی است که از ضخامت واحد مصالح عبور می‌کند. هدایت حرارتی بتون بطور کلی به وزن فضایی و مقدار رطوبت آن مرتبط است. اما بطور نسبی به اندازه و محل قرارگیری منفذها، ترکیب شیمیایی اجزای جامد تشکیل دهنده بافت آنها (کریستال، سرامیکها "آمورف"، شیشه‌ای) و درجه حرارت بستگی دارد. هدایت حرارتی با زیاد شدن وزن، رطوبت و درجه حرارت افزایش می‌یابد. مواد کریستالی (کوارتز Quartz) حرارت را بهتر از مواد سرامیکها، از خود عبور می‌دهند. مطالعات جدید برای نکته تأکید گذاشته است که ضریب هدایت حرارتی به ازای هر یک درصد حجمی از دیاد رطوبت در حدود 2.6 درصد افزایش می‌یابد. مقادیر ضریب هدایت حرارتی لیکابتون که در عمل بدست آمده است مطابق جدول شماره 14 می‌باشد (۲۱):

آزمایش‌های در درجه حرارت دمای بین 20 تا 60 درجه سانتی‌گراد نشان داده است که با تغییر حرارت، ضریب هدایت حرارتی بتون به مقدار خیلی کم تغییر می‌کند. در درجه حرارت‌های بیشتر از 100°C سانتی‌گراد به مقدار زیادی درجه حرارت بر روی ضریب هدایت حرارتی لیکابتون تأثیر می‌گذارد. برای مثال: بین 100°C و 1100°C سانتی‌گراد ضریب هدایت حرارتی به ازای هر K در حدود $\frac{W}{MK} / 20$ افزایش می‌یابد (۲۲).

جدول شماره ۱۴. ضریب هدایت حرارتی لیگابتن با وزن فضایی و درصد رطوبت مشخص

نوع دانه مصرفی در ساخت بتن سبک	ضریب هدایت حرارتی	وزن فضایی	درصد وزنی رطوبت	W/MK	Kg/M ³
				• / ٤	٩٠٠
رس منبسط شده لیکا	"	"	"	• / ٥٥	١١٣٠
"	"	"	"	• / ٦٤	١٢٥٠
"	"	"	"	• / ٦٣	١٢٩٠
رس منبسط شده با ماسه مرود خانه‌ای	"	"	"	• / ٥٠	١٣٠٠
"	"	"	"	• / ٦٦	١٤٠٠
"	"	"	"	• / ٧٦	١٥٠٠
"	"	"	"	• / ٨٧	١٦٠٠
رس منبسط شده لیکا	"	"	"	• / ٦٤	١٣٠٠
"	"	"	"	• / ٦٧	١٣٠٠

دوماں بتن سپک Durability of Lightweight Concrete

حساب نمود . مواد هوازا درمورد بتنهای سبک که تحت تأثیر یخ زدن و ذوب یخهای شدید قراردارند ، توصیه می شود .

مقاومت در مقابل آتشسوزی Fire resistance

مقاومت بتن در مقابل آتشسوزی ، بطورکلی به عوامل زیربستگی دارد :

- ۱- جزئیات سازه
- ۲- هدایت حرارتی
- ۳- مقاومت حرارتی
- ۴- مقاومت بتن در مقابل گرما

ضریب هدایت حرارتی بتن سبک کمتر از بتن معمولی است و حفاظت بهتری در مقابل افزایش بیش از حد درجه حرارت از خود نشان می دهد . درنتیجه از نظر حفاظت در مقابل گرما به ضخامت کمتری از بتن سبک برروی آرماتور ، احتیاج است .

آزمایش‌های انجام شده در انگلیس و سوئیس در زمینه مقاومت در برابر آتش سوزی ، نشان داده است که لیکابتن ، ترک نخورده و پوسته نمی شود . در صورتی که بتن معمولی ساخته شده از دانه های کوراتز ، بسختی پوسته می شود (۲۵) تا بحال توضیح قابل قبولی در مورد این اختلاف مقاومت داده نشده است ، به گمان قوی برق شدن بتن بر اثر حرارت به درصد رطوبت موجود بستگی دارد .

پایداری در برابر مواد شیمیایی Chemical Stability

پایداری انواع بتن اعم از سبک یا معمولی در برابر مواد شیمیایی به طبیعت و کیفیت سیمان مصرفی بستگی دارد . در آب و هواهای مخرب ، انتخاب نوع سیمان و دانه های خنثی حایز اهمیت است . هرگاه دانه های مصرفی دارای منفذ های مرتبط باشد ، مقاومت در برابر جذب و نفوذ مواد مخرب در بتن کم می شود . از سوی دیگر خمیر سیمان سفت شده در بتن سبک متراکمتر و قویتر از بتن معمولی است (زیرا مقاومت ثابت معمولاً " عیار سیمان بتن سبک با دانه های درشت سبک بیشتر از بتن معمولی است) . اثر این دو عامل متضاد متفاوت است . اما به طور کلی مقاومت در برابر مواد مخرب شیمیایی در هر دو نوع بتن سبک و معمولی تقریباً " برابر است .

آزمایش یخ زدن و ذوب یخ

نمونه های مکعبی $15 \times 15 \times 15$ و $20 \times 20 \times 20$ سانتی متر ، برای انجام آزمایش
یخ زدن و ذوب یخ ، از لیکابتن به نسبت وزنی دانه های مشروح در جدول شماره ۷ ساخته و
نمونه ها در سه گروه A-B-C قرارداده شدند :

۱- نمونه های گروه A در دو مرحله یخ زدن و ذوب یخ در آب قرارداشتند .

۲- نمونه های گروه B در مرحله بیخ زدن در هوای سرد ، و ذوب آنها در آب صورت گرفت .

۳- نمونه های گروه C بدون قرار گرفتن در سیکل یخ زدن و ذوب یخ .

نمونه های گروه C پس از آنکه در آب و هوای کارگاه به عمل آمدند ، تحت آزمایش
 مقاومت فشاری قرار گرفتند . نمونه های قرار گرفته شده در گروه های B و A به مدت
 دو ساعت در هوای سرد تا درجه 15°C - سانتی گراد نزول دمای افتاده و سپس به مدت دو ساعت
 دیگر در دمای ثابت 15°C - سانتی گراد نگاهداری شدند . این نمونه ها پس از اتمام چهار
 ساعت یخ زدن ، طبق شرایط مشروح به مدت بیست ساعت در آب با درجه حرارت $22^{\circ}\text{C} + \text{ذوب}$ -
 گردیدند . مجموع دو مرحله یخ زدن و ذوب یخ ، مطابق شرح فوق ، یک سیکل
 حرارتی به مدت ۲۴ ساعت به طول انجامید . پس از پنج الی بیست و پنج سیکل حرارتی ،
 نمونه های دو گروه B و A تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند ، مدت زمان لازم
 برای خارج کردن نمونه های گروه B از آب $22^{\circ}\text{C} + \text{ذوب}$ و قراردادن آنها در اتاق یخ بندان از
 سه دقیقه افزایش نیافت و درنتیجه نمونه های مذکور تا یخ زدن کامل ، آب زیادی از دست
 ندادند نتایج بدست آمده از آزمایش این سه گروه بشرح جدول های مندرج در صفحات بعد است :

جدول (نمونه گروه A)

شماره نمونه‌های مکعبی	سانتی‌متر	وزن فضایی خشک	مقادیر فشاری
10×10×10	10	Kg/M³	Kg/cm²
نمونه گروه A پس از ۲۹ روز عمل آوردن	۱	۱۲۸۱	۸۴، پس از ۵ سیکل حرارتی
" " "	۲	۱۳۱۰	۹۱
" ۱۰ " "	۳	۱۳۲۶	۷۲
" ۵ " "	۴	۱۳۴۶	۷۸
" ۱۰ " "	۵	۱۳۴۹	۹۳
" ۱۵ " "	۶	۱۳۵۷	۱۰۲
" " "	۷	۱۳۷۴	۹۷
" ۱۰ " "	۸	۱۰۴۱	۱۳۵
" ۱۰ " "	۹	۱۰۷۹	۱۸۱
" ۵ " "	۱۰	۱۰۸۳	۱۰۹
" ۲۰ " "	۱۱	۱۰۸۹	۱۳۷
" ۲۵ " "	۱۲	۱۶۰۸	۱۹۴
" ۵ " "	۱۳	۱۶۰۸	۱۶۸
" ۱۰ " "	۱۴	۱۶۳۶	۱۵۳

شماره نمونه‌های مکعبی	سانتی‌متر	وزن فضایی خشک	مقادیر فشاری
۲۰×۲۰×۲۰	۲۰	Kg/M³	Kg/cm²
نمونه گروه A پس از ۲۹ روز عمل آوردن	۱	۱۳۷۸	۹۶، پس از ۱۵ سیکل حرارتی
" " "	۲	۱۶۰۲	۱۶۲، پس از ۲۰ سیکل حرارتی

جدول (نمونه گروه B)

شماره نمونه های مکعبی	وزن فضایی خشک	مقادیر فشاری	سانتی متر
	15×15×15	Kg/cm ²	Kg/m ³
1	نمونه گروه B پس از ۵ روز عمل آوردن	۵۷	۱۲۱۷
2	" ۱۰ " ۶۵۲	" ۱۰ " ۶۵۲	۱۲۲۶
3	" ۱۰ " ۶۴۶	" ۱۰ " ۶۴۶	۱۲۳۰
4	" ۵ " ۶۷۷	" ۵ " ۶۷۷	۱۲۷۸
5	" ۵ " ۶۱۹	" ۵ " ۶۱۹	۱۳۱۲
6	" ۱۰ " ۶۸۶	" ۱۰ " ۶۸۶	۱۳۳۹
7	" ۱۰ " ۶۹۷	" ۱۰ " ۶۹۷	۱۳۶۷
8	" ۱۰ " ۶۱۵۰	" ۱۰ " ۶۱۵۰	۱۰۱۷
9	" ۱۵ " ۶۱۶۶	" ۱۵ " ۶۱۶۶	۱۰۶۱
10	" ۵ " ۶۱۰۰	" ۵ " ۶۱۰۰	۱۰۷۲
11	" ۲۰ " ۶۱۴۶	" ۲۰ " ۶۱۴۶	۱۰۸۴
12	" ۱۰ " ۶۱۸۳	" ۱۰ " ۶۱۸۳	۱۰۹۰
13	" ۲۵ " ۶۱۷۷	" ۲۵ " ۶۱۷۷	۱۰۹۸
14	" ۱۰ " ۶۱۸۳	" ۱۰ " ۶۱۸۳	۱۶۰۸

شماره نمونه مکعبی	وزن فضایی خشک	مقادیر فشاری	سانتی متر
	20×20×20	Kg/cm ²	Kg/m ³
1	نمونه گروه B پس از ۲۹ روز عمل آوردن	۱۰۱	۱۳۲۵
2	نمونه گروه B پس از ۲۸ روز عمل آوردن	۱۴۰	۱۵۸۶

جدول (نمونه گروه C)

شماره نمونهای مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵	وزن فضای خشک Kg/M ^۳	سانتی متر	نمونه گروه C با عمر ۵۰ روزه								
۵۴	۱۲۴۸	"	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۶۶	۱۲۷۶	"	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۶۸	۱۲۸۰	"	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۹۱	۱۲۹۹	۲۹ روزه	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴
۱۰۰	۱۳۲۳	"	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
۹۷	۱۳۵۲	"	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶
۸۶	۱۳۸۱	"	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷
۱۰۲	۱۰۱۰	۲۸ روزه	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸
۱۲۵	۱۰۰۲	"	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹
۱۶۳	۱۰۶۱	۳۶ روزه	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۱۵۷	۱۰۲۸	۳۲ روزه	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱
۱۷۲	۱۰۷۹	۲۸ روزه	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲
۱۷۸	۱۰۹۴	"	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳
۱۶۱	۱۰۹۷	۳۲ روزه	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴
۱۸۹	۱۶۱۰	"	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵

شماره نمونهای مکعبی ۲۰×۲۰×۲۰	وزن فضای خشک Kg/M ^۳	سانتی متر	نمونه گروه C با عمر ۲۹ روزه	نمونه گروه C با عمر ۲۹ روزه	نمونه گروه C با عمر ۲۹ روزه
۹۶	۱۳۹۰	"	۱	۱	۱
۱۰۹/۳	۱۵۸۵	"	۲	۲	۲

کلیه نمونه‌های یادشده دارای عیار سیمان ۳۳۰ کیلوگرم در مترمکعب لیکا بتن

می‌باشد .

۱- نمونه‌هایی که پس از ۲۹ روز عمل آوردن تحت آزمایش قرار گرفته‌اند ، با آب زیاد

(نسبت آب به سیمان برابر ۷۵/۰) و بدون میل زدن و کوبیدن ساخته شدند .

۲- نمونه‌های پس از ۵۰ روز با آب کم (نسبت آب به سیمان ۵۶/۰) و بدون میل زدن و -

کوبیدن .

۳- نمونه‌های پس از ۲۸ روز با آب بهینه (نسبت آب به سیمان ۶۲/۰) و با میل زدن و کوبیدن .

۴- نمونه‌های پس از ۳۶ روز با آب کم (نسبت آب به سیمان ۵۴/۰) با میل زدن و کوبیدن .

۵- نمونه‌های پس از ۳۲ روز با آب نسبتاً کم (نسبت آب به سیمان ۵۸/۰) و با میل زدن و -

کوبیدن .

ساخته شدند . بررسی نتایج به دست آمده از آزمایش یخ زدن و ذوب یخ نمونه‌های مشروط

این‌گونه بیان می‌شود :

میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های شماره ۱ الی ۷ با وزنهای بیشتر از ۱۲۰۰ و کمتر از

۱۴۰۰ کیلوگرم در مترمکعب برای گروه A برابر ۸۸ کیلوگرم بر سانتیمترمربع و برای گروه B

برابر ۷۵ کیلوگرم بر سانتیمترمربع و برای گروه C برابر ۸۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع

می‌باشد . هفت نمونه گروه A وزن فضایی بیشتری نسبت به نمونه دو گروه C و B دارد ،

که ممکن است دلیل برآذیاد میانگین مقاومت فشاری گروه A نسبت به دو گروه C و B

باشد . میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های بیشتر از ۱۵۰۰ و کمتر از ۱۶۰۰ برای گروه A

(نمونه‌های شماره ۸ تا ۱۱) برابر ۱۴۱ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع ، برای گروه B

(نمونه‌های شماره ۹ تا ۱۲) برابر ۱۶۳ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و برای گروه C (نمونه‌های

شماره ۱۰ تا ۱۳) برابر ۱۶۷/۶ کیلوگرم بر سانتیمترمربع می‌باشد . میانگین مقاومت

فشاری نمونه‌های ۱۶۰۰ کیلوگرم در مترمکعب برای گروه A (نمونه‌های شماره ۱۲ تا ۱۴)

برابر ۱۷۲ کیلوگرم بر سانتیمترمربع است و برای گروه B (نمونه‌های شماره ۱۳ تا ۱۴) برابر

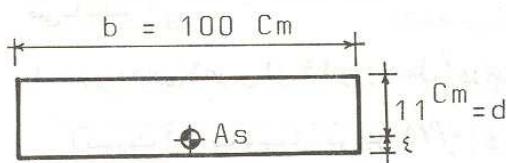
۱۸۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع و برای گروه C (نمونه‌های شماره ۱۴ تا ۱۵) برابر

۱۷۵ کیلوگرم بر سانتیمترمربع است . همان طورکه از توضیحات و نتایج به دست آمده مشهود

است ، بر اثر سیکلهای حرارتی ، نمونه‌های لیکا بن چندان مقاومتی از دست نداده و در نتیجه

لیکابتن در مناطق تحت یخ بندانه اوذوب یخهای متناوب مقاوم می‌باشد .

طرح، ساخت و آزمایش پانل سقفی واحدهای مسکونی از لیکابتن



$$f_y = 2400 \text{ Kg/cm}^2 \quad \text{و متر } L = 4 \quad \text{طول دهانه}$$

$$f_{c'} = 130 \text{ Kg/cm}^2$$

برای تعیین بار مرده سقف، لیکابتن به وزن 1500 Kg/M^3 ، و به علاوه ده سانتی متر بار اضافی (آجر، موزائیک و غیره) به وزن 2400 Kg/M^3 در نظر گرفته می شود و ده سانتی متر بار اضافی، دست بالا اختیار شده است.

$$\rho_{\min} = \frac{14/062}{f_y} = 0.00586 \quad \rho_{\max} = 0.75 (0.185 \beta_1 \frac{f_{c'}}{f_y} \frac{87000}{87000 + \frac{87000}{0.02029}})$$

در رابطه فوق β_1 برابر 0.85 اختیار شده و f_y و $f_{c'}$ بر حسب Kg/cm^2 می باشند، درنتیجه:

$$\rho_{\max} = 0.02108 \implies 10 \phi 12 \quad (\rho = \frac{As}{bd} = \frac{11/3}{100 \times 11} = 0.01027)$$

باتوجه به نامساوی $\rho_{\min} < \rho = 0.01027 < \rho_{\max}$ ، مقدار آرماتور

انتخاب شده $\phi 12$ در عرض یک متر می باشد.

$$M_d = \Phi \rho f_y b d^2 (1.0/0.59 \rho \frac{f_y}{f_{c'}}) = 2/386 t.M. \quad \text{و} \quad M_d = \frac{W_d L^2}{8}$$

$$W_d = 1/4 W_D + 1/2 W_L = \frac{1/4 M_d}{L^2} = 1193 \text{ Kg/M} \quad \text{و}$$

$$W_D = 1500 (0.15) + 2400 (0.1) = 465 \text{ Kg/M} \implies$$

$$W_L = \frac{W_d - 1/4 W_D}{1/2} = 219 \text{ Kg/M}$$

بار زنده،^۲ شامل سربار Kg/M^3 ۲۰۰ (مشخص شده در استاندارد ۳۱۹) م مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران (به علاوه ۱۱۹ کیلوگرم بر متر مربع وزن دیوارهای فرعی مناسب سقف واحدهای مسکونی و اداری می‌باشد.

ساخت

بادانه بندی نوع I آمده در جدول شماره ۷ و عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم و مقدار آب - ۲۲۰ لیتر در متر مکعب لیکابتن، پانل سقفی به ابعاد $15/0 \times 1/0 \times 0/4$ متر با شبکه‌ای از ده آرماتور 12Φ طولی با سرعته خم شده 180° درجه (آرماتورهای کشش اصلی) او ۲۵ آرماتور 8Φ عرضی با سرعته خم شده 90° (آرماتورهای حرارتی)، به فاصله ۴ سانتی‌متر از سطح پایین پانل مناسب سقف واحدهای مسکونی ساخته شده است. پانل مورد بحث به مدت هفت روز پس از ساخت مرطوب نگاهداری شده و پس از ۲۸ روز از تاریخ ساخت، طبق استاندارد ۱۸-۲ مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، تحت آزمایش بارگذاری قرار گرفت.

آزمایش بارگذاری پانل

به منظور تعیین مقدار بار در آزمایش بارگذاری پانل مورد نظر، وزن فضایی پانل لیکا برابر $3 Kg/M^3$ و بار اضافی (آجر، موزائیک، ملات وغیره)، برابر $140 Kg/M^3$ و سربار برابر $200 Kg/M^3$ انتخاب گردید، که در نتیجه رابطه زیره دست آمد:

$$\text{مقدار بار} = 1/7 (200 Kg/M^3) + 0/4(1500 Kg/M^3 \times 0/15 M) + 1/4 (140 Kg/M^3) = 626 Kg/M^3$$

مقدار بار رابطه فوق به مدت نیم ساعت بر روی پانل لیکا قرار گرفت، بلا فاصله پس از بارگذاری، پایین افتادگی وسط دهانه به ۷ میلیمتر رسید، پس از ۲۴ ساعت بارگذاری، این پایین افتادگی به $9/4$ میلیمتر رسید، که از مقدار مشخص شده در استاندارد بارگذاری ۱۸-۲ طبق رابطه زیربیشتر و در نتیجه آزمایش بارگذاری با برداشتن بار ادامه پافت.

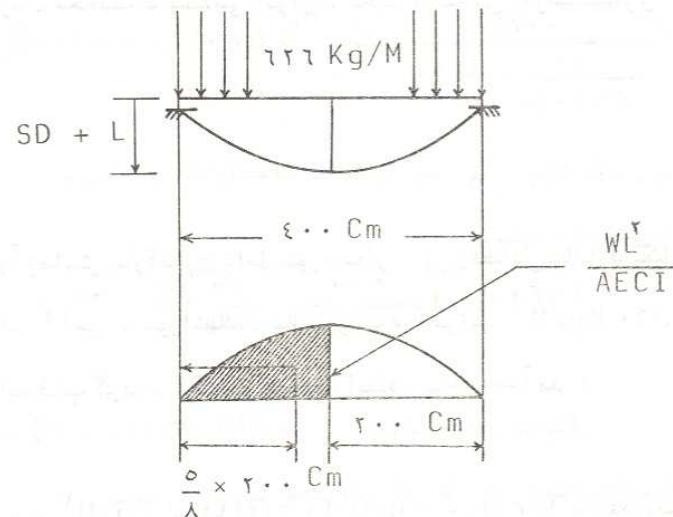
$$a = \frac{l^2}{40000 h} = \frac{(4000)^2}{40000(150)} = 5/3 \text{ mm} < 9/4 \text{ mm}$$

پس از ۲۴ ساعت باربرداری ، پایین افتادگی وسط دهانه به مقدار ۸۴ درصد
 ۹/۴ میلیمتر (یعنی برابر ۷/۶ میلیمتر) به طرف بالا برگشت داشت که از حداقل مقدار
 مجاز ۷۵ درصد مشخص شده در استاندارد ۱۸-۲ بیشتر و درنتیجه سقف مذکور در مرحله دوم
 بارگذاری برای سربار M^3 / Kg ، ۲۰۰ ایمن تشخیص داده شد .

توضیح آنکه به لبه ها و سطح زیرین پانل مورد نظر یک لایه نازک گچ کشیده شده بود
 که طی آزمایش بارگذاری ، حتی یک ترک موبی هم برروی سطح پانل مشاهده نشد .

تعیین مدول الاستیسیته لیگابتن ، مبتنی بر نتایج آزمایش بارگذاری

باتوجه به پایین افتادگی وسط دهانه ، بلا فاصله پس از بارگذاری (برابر ۷/۶ سانتی -
 متر به مدت نیم ساعت بارگذاری) و مشخصات پانل و مقدار بار می توان مدول الاستیسیته
 لیگابتن را مطابق رابطه های زیر (Moment area method) محاسبه کرد :



$$(a) SD + L = \frac{1}{ECI} \left[\frac{1}{3} M \times 200 \times \frac{5}{8} \times 200 \right] = 0.7 \text{ cm}$$

$$(b) M = \frac{WL^2}{L} = \frac{626 \times 16 \times 100}{16} = 125200 \text{ Kg/cm}$$

$$(c) I = \frac{bh^3}{12} + \frac{ES}{EC} ASd^2 = \frac{100(15)^3}{12} + \frac{2028990}{EC} 11/31(2/5)^2 \text{ (پانل بدون ترک)}$$

با قراردادن مقادیر دو رابطه (c) و (b) در رابطه (a) یک معادله یک مجهولی
 بر حسب EC تشکیل می شود که با حل این معادله ، مقدار EC برابر 95945 Kg/cm^3 به دست
 می آید . برای بتن های معمولی با وزن فضایی بیشتر از M^3 / Kg ۱۴۴۱ می توان مدول

الاستیسیته را از رابطه زیر که رابطه پیشنهادی ACI است محاسبه کرد :

$$(11) \quad EC = + / 137 \quad W^{\frac{3}{2}} \sqrt{f_c}$$

در رابطه فوق ، EC برحسب Kg/cm^2 ، W وزن فضایی بتن برحسب Kg/m^3 و f_c مقاومت فشاری طرح بتن برحسب Kg/cm^2 میباشد .

با استفاده از وزن فضایی و مقاومت فشاری طرح لیکا بتن پانل مذکور به ترتیب برابر 1500 Kg/cm^2 و 130 Kg/cm^2 در رابطه شماره (11) ، مقدار EC برابر 1500 Kg/m^3 90746 Kg/cm^2 به دست میآید . مقدار EC از رابطه شماره (10) در صفحه ۴۷ این گزارش برابر 84593 Kg/cm^2 است . در رابطه شماره (11) مقدار مدول الاستیسیته به مقدار مدول الاستیسیته به دست آمده از نتایج بارگذاری نزدیکتر میشود (۹۰۷۴۶ نزدیکتر است به ۹۵۹۴۵) . درنتیجه برای تخمین حدود مدول الاستیسیته لیکا بتن با وزنهای فضایی بیشتر از 1441 Kg/m^3 میتوان از رابطه شماره (11) نیز استفاده کرد .

فهرست مراجع

- 1). ACI Committee 613, Sub-committee on proportioning Lightweight Aggregate Concrete. Proposed recommended practice for selecting proportions for structural lightweight concrete. J.Am. Concr. Inst. Vol.30/No.3 Sept. 1958, PP. 305-14.
- 2). Price, W.H. Gordon , W.A. Tests of Light-weight aggregate concrete designed for monolithic construction . J.Am. Concr. Inst.,Vol.20, No.8, Apr. 1949. PP. 581-99.
- 3). Dennert, V." The Manufacture of expanded clay with Circulation Method ", Aufbereitungs-technik 7(1966) No.6, PP. 314-318.
- 4). Aurich , H." Short handbook on lightweight concrete", Wiesbaden, Berlin, Bauverlag GmbH 1971.
- 5). Haegerman,H, " Lightweight concrets made with expanded clay-Their attainable strength and functional problems ", Betonstein-Zeitung 36,(1970) , No.10, PP. 594-603.
- 6). Aurich, H. " Short handbook on lightweight concrete" Wiesbaden , Berlin, Bauverlag GmbH 1971.

- 7). Expanded lightweight aggregates for concrete, CSIR Research Report 217, NBRI Bulletin No.36, Pretoria, South Africa, 1966, PP. 10-15.
- 8). CEB/FIP Manual of Lightweight aggregate concrete design and technology Longman Inc New York, 1977 , PP. 23-27, PP. 65-98.
- 9). Rehm.G. Martin, H. and Noakowski, S. " Effect of shape of deformed bars and of concrete on the bond of steel in concrete ", Lehrstuhl für Massivbau der TH München, Bericht No. 2203.
- 10). Rehm,G. " The principles of bond between steel and concrete", Deutscher Ausschuss für stahlbeton,Heft 138.
- 11). Short, A and Kinniburgh, W, " Lightweight concrete" 2nd edition revised, London, CR Books Ltd, 1968.
- 12). Martin, H and Janovic, K. " Anchorage of reinforcing bars in lightweight concrete by hooks ", Parts 1 and 2, ibid, Reports No.5, 6279/Ja/Kand 2399/Ja/K.
- 13). Martin, H and Janovic,K. " Anchorage of reinforcing bars in lightweight concrete by loops ", ibid , Report No. 6328/Ja/K.
- 14). Indian Concrete J. Vol. 50, 1976, PP. 174.
- 15). Hummel, A. " The concrete ABC ", 12th edition, W Ernst and Sohn, Berlin, 1959.

- 16). Reichard, T.W. " Creep and drying shrinkage of light-weight and normal weight concrets ", National Bureau of Standards, Monograph 74, March 1964.
- 17). Pauw, A. " Lightweight concrete as a loadbearing building material (Technology of lightweight concrete , claculation of loadbearing structures)", preprint of the Eighth congress of IABSE , New York 1968, Zürich 1967 . IVBH.
- 18). SHIDELER, J.J. Light-weight aggregate concrete for structural use.(Journal of the American Concrete Institute), Vol. 29, No.4, Oct.1957, PP.299-328.
- 19). ACI committee 213 " Guide for structural lightweight aggregate concrete ", Journal of the American concrete institute 64, 1967, No.8, PP.433-469.
- 20). Vironnaud, L. " Physical properties of lightweight concrete", Revue des materiaux de construction et des travaux publics No.662, November 1970, PP.338-342.
- 21). Plonski, W," Thermal conductivity and moisture content of lightweight aggregate concrete ", Contribution to CEB Symposium on lightweight concrete, Cracow 1973, PP. 137-146.
- 22). Ludera, L." Fire resistant concrete based on Portland cement ", Zementkalk - Gips 12, 1959, No.12, PP.575-581.
- 23). Klieger, pand Hanson, JA, " Freezing and thawing tests of lightweight aggergate concrete ", Research Department PCA, Bulletin 121 and ACI Journal, January 1961.

- 24). Weigler, H and Karl, S. " Salt scaling resistance and abrasion resistance of lightweight concrete ", Betonsteinzeitung 34, 1968, No.5, PP.225-240 , No.11, PP. 581-583.
- 25). Malhotra, HL. " Fire resistance of lightweight concrete ". Contribution to discussion on the first International congress on Lightweight concrete, London 27-29 May, 1968.