

فصل دوم

جمع آوری اطلاعات

۱-۲- تاریخچه سبکدانه ها^۱ و بتن سبکدانه^۲

سبکدانه های طبیعی از نوع پومیس و اسکوریا از سال های دور مورد توجه بشر بوده اند. حتی

۲۷۳ سال قبل از میلاد در روم باستان به عنوان سنگدانه سبک از فاصله ۴۰ کیلومتری به بندر Cosa در غرب ایتالیا حمل و در بندر سازی استفاده شده است [۱].

در قرن ششم در ساخت اولیه کلیساي صوفیای استانبول نیز سبکدانه بکار رفته است [۲].

در قرن دوم پس از میلاد، مهندسین رومی سبکدانه پومیسی را در ساختمان پانتئون روم

بکار برده اند [۱]. پس از گذشت ۱۰۰۰ سال، سبکدانه در ساختمانی در واتیکان بکار رفت [۳].

از سال ۱۸۴۵ ساخت بلوک های بنائی سبک با پومیس به کمک چسب آهکی به صورت

صنعتی در آلمان آغاز شد [۴].

1- Lightweight Aggregate (LWA)

2- Lightweight Aggregate Concrete (LWAC)

در حدود سال ۱۹۱۷، هایدی^۱ در کانزاس ایالت متحده، روش تولید صنعتی رس منبسط شده را با استفاده از کوره استوانه ای چرخان ابداع نمود. این فرآورده هایدیت^۲ نام گرفت. این سبکدانه مصنوعی در هنگام جنگ جهانی اول به دلیل محدودیت دسترسی به ورق فولادی برای ساخت کشتی بکار رفت [۵]. کشتی Atlantus به وزن ۳۰۰۰ تن که با بتون سبک هایدیتی ساخته شد، در اوخر سال ۱۹۱۸ به آب افتاد. در سال ۱۹۱۹ کشتی Selma به وزن ۷۵۰۰ تن و طول ۱۳۲ متر با همین نوع بتون 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 تا سال های اخیر شناور بود [۶].

برنامه ساخت کشتی ها در اواسط جنگ جهانی دوم متوقف شد و دوباره به دلیل محدودیت تولید ورق فولادی مورد توجه قرار گرفت. تا پایان جنگ جهانی دوم ۲۴ کشتی اقیانوس پیما و ۸۰ بارج دریابی ساخته شد که ساخت آن ها در دوران صلح، اقتصادی محسوب نمی گشت [۷]. ظرفیت این کشتی ها ۳ تا ۱۴۰۰۰ تن بود [۱۰].

در سال های ۵۰ و ۶۰ میلادی ساختمان ها و پل های زیادی با بتون سبک در دنیا ساخته شد. در این مدت بیش از ۱۵۰ پل و ساختمان در ایالت متحده و کانادا با این نوع بتون، مورد بهره برداری قرار گرفت [۸].

ساختمان هتل پارک پلازا در سنت لوئیز، ساختمان ۱۴ طبقه اداره تلفن بل جنوب غربی در کانزاس سیتی در سال ۱۹۲۹ از جمله ساختمان های دهه ۲۰ و ۳۰ میلادی هستند [۹ و ۱۰]. ساختمان ۴۲ طبقه در شیکاگو، ترمینال TWA در فرودگاه نیویورک در سال ۱۹۶۰، فرودگاه Dulles در واشنگتن در سال ۱۹۶۲، کلیسا ای در نروژ در سال ۱۹۶۵، پلی در وايسbaden آلمان در سال ۱۹۶۶ و پل آب بر در روتردام هلند در سال ۶۸ از جمله ساختمان هایی هستند که با بتون سبکدانه ساخته شده اند [۹].

در هلند، انگلستان، ایتالیا و اسکاتلندر نیز در دهه ۷۰ و ۸۰ پل هایی با دهانه های مختلف

ساخته و با موفقیت بهره برداری شده اند [۸].

مخازن عظیم گاز طبیعی مایع، اسکله شناور، مخزن نفت در زیر آب و ساختمان های عظیم فرا ساحلی با بتن سبکدانه ساخته شده اند. هم چنین سکوی بزرگ پرش اسکی، استادیوم ها، محل تماشچی و سقف های آن ها و سازه های دیگر با این نوع بتن به بهره برداری رسیده اند [۸]. بزرگترین بنای بتن سبکدانه، ساختمان اداری ۵۲ طبقه با ارتفاع ۲۱۵ متر در هoustون تکزاس می باشد [۸].

در سال های ۶۰ تا ۷۳ میلادی ۱۵ پل با دهانه بزرگ با بتن سبکدانه در هلند ساخته شده است [۱۰].

در سال های ۱۹۷۰ ساخت بتن سبکدانه پر مقاومت 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 پر مقاومت در این دو کشور با هدایت واحد آغاز شد که نتایج آن در اواخر دهه ۸۰ و اوایل دهه ۹۰ منتشر گشت [۱۱ و ۱۲]. امروزه سبکدانه های مصنوعی به ویژه لیکا در کشورهای مختلف با نام های تجاری گوناگون تولید می گردد.

در ایران در سال ۱۳۵۵ کارخانه لیکا در جاده تهران - ساوه احداث شد و در سال ۱۳۶۰ به بهره برداری رسید. این کارخانه، سبکدانه لیکا و فرآورده های دیگری مانند بلوک های سبک لیکا را تولید می کند [۱۳].

۲-۲- تعریف و تقسیم بندی سبکدانه ها

۱-۲-۲- انواع سبکدانه

سبکدانه را می توان به دو نوع طبیعی^۱ و مصنوعی^۲ تقسیم کرد.

از جمله سبکدانه های طبیعی می توان از پومیس^۳ و اسکوریا^۴ و دیاتومه^۵ نام برد. پومیس و اسکوریا منشأ آذرین و آتشفسانی دارند که پوکه های معدنی تلقی می شوند. دیاتومه از بقایای پوسته آهکی جانوران دریابی تشکیل شده است [۱۰].

سبکدانه های مصنوعی از رس^۶، شیل^۷، سنگ لوح^۸، پرلیت^۹، ورمیکولیت^{۱۰}، خاکستر سوخت^{۱۱} پودر شده^{۱۲}، روباره کوره آهنگدازی^{۱۲}، سیلیس، شیشه^{۱۳}، ذرات چوب^{۱۴} و پلاستیک^{۱۵} ساخته می شوند [۱۰].

در اینجا با توجه به موضوع تحقیق، به سبکدانه های مصنوعی و عمدتاً رس منبسط شده (لیکا) پرداخته می شود.

۲-۲-۲- تولید سبکدانه های مصنوعی

سبکدانه های مصنوعی معدنی با فرآیند "انبساط"^{۱۶} یا "بهم پیوستن"^{۱۷} حاصل می شوند.

در روش "انبساط" مصالح تا نزدیکی دمای ذوب حرارت دیده و در این زمان، گاز نیز تشکیل می گردد. در روش "بهم پیوستن" بخشی از مصالح، ذوب شده و به ذرات دیگر می چسبند. برای ایجاد انبساط کامل، مصالح باید شامل مواد گاز زای کافی باشند و یا خمیری شدن ماده باید همزمان با تشکیل گاز صورت گیرد.

1- Natural

2- Artificial

3 - Pumice

4- Scoria

5 - Diatomite

6- Clay

7 - Shale

8 - Slate

9 - Perlite

10 - Slate

11 - Pulverised – fuel ash

12 – Blast furnace

13 - Glass

14 – Wood Particle

15 - Plastic Particle

16 – Expansion

17 - Agglomeration

تشکیل گاز با واکنش های زیر می تواند همراه باشد.

- تجزیه و احتراق ترکیبات سولفیدی و کربنی در دمای حدود ۴۰۰ درجه سانتیگراد و بالاتر

- خروج آب هیدراسیون از کانی های رسی در دمای حدود ۶۰۰ درجه سانتیگراد

- خروج CO_2 از کربنات ها به صورت تکلیس در دمای حدود ۹۰۰ درجه سانتیگراد

- احیاء Fe_2O_3 و ایجاد اکسیژن در دمای حدود ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد [۱۰]

رس یا شیل منبسط شده عمدتاً در کوره های گردان افقی یا قلئم تولید می شود و برای

انبساط و پوک شدن، ممکن است مواد افزودنی به آن اضافه گردد. دمای پخت، ۱۱۰۰ تا حدود

۱۲۰۰ درجه سانتیگراد است و در کوره گردان افقی دانه های لیکا (سبکدانه رسی منبسط شده)^۱

به صورت تقریباً کروی در می آید [۱۰]. لیکای ایران با این روش تولید می گردد [۱۳].

لیکای تولید شده دارای سطح شیشه ای با تخلخل کم، و بخش متخلخل میانی می باشد.

این حفرات عمدتاً به یکدیگر متصل می باشند و از نظر ابعاد متفاوت هستند [۱۴].

۲-۲-۳- تعریف و تقسیم بندی سبکدانه ها با توجه به وزن مخصوص یا چگالی ذرات

در استانداردها و آیین نامه های مختلف برای سبکدانه ها تعاریف و محدودیت هایی را

قابل شده اند که در زیر به برخی از آن ها اشاره می شود [۱۰].

در ۲-۲ DIN 4226 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 متر acum ۴۰۰ تا

۱۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و درشت دانه با وزن مخصوص ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب را

سبکدانه می نامند.

۱- سبکدانه هایی با منشأ معدنی و دارای چگالی ذرات کمتر از

1200 Kg/m^3 یا وزن مخصوص غیر متر acum کمتر از 2000 Kg/m^3 را سبکدانه می داند.

۲- سبکدانه هایی با منشأ معدنی و دارای چگالی ذرات کمتر از 2000 Kg/m^3 و

وزن مخصوص غیر متراکم کمتر از 1200 Kg/m^3 را سبکدانه می‌داند.

ACI 318-95 سنگدانه‌های با وزن مخصوص غیر متراکم 1120 Kg/m^3 یا کمتر را سبکدانه

می‌نامد.

ASTM C330, C331 سنگدانه‌های ریزدانه با وزن مخصوص غیر متراکم 1120 Kg/m^3 یا

کمتر و سنگدانه‌های درشت دانه با وزن مخصوص غیر متراکم 880 Kg/m^3 یا کمتر را سبکدانه می‌داند. هم‌چنین وزن مخصوص مخلوط درشت دانه و ریزدانه را به 1040 Kg/m^3 محدود کرده است.

۴-۲-۲- تعاریف و تقسیم بندی سبکدانه رسی منبسط شده

سبکدانه رسی منبسط شده در کشورهای مختلف با نام‌های تجاری متفاوتی شناخته

می‌شود. در کشورهای دانمارک، نروژ، سوئد، سویس، آلمان، فنلاند، پرتغال و انگلیس به این

سبکدانه‌ها لیکا می‌گویند. در لهستان، چک، اسلواکی و روسیه بدان کرامزیت^۱ اطلاق می‌کنند. این

سبکدانه‌ها در فرانسه آرجکس^۲، در ایتالیا لترلایت^۳، در اسپانیا لیاپور^۴ و در ایالات متحده و آفریقای

جنوبی آگلایت^۵ نام دارد. در ایران نیز این سبکدانه‌ها لیکا نام گرفته است [۱۳]. در کشورهای

اسکاندیناوی مانند دانمارک نام تجاری فیبو^۶ نیز برای لیکا بکار می‌رود.

به شیل منبسط شده در برخی کشورها مانند آلمان، لیاپور نیز می‌گویند. سنگ لوح

منبسط شده در فرانسه گرانولکس^۷ و در ویز سولیت^۸ نام دارد که از نظر جنس نزدیک به

رس منبسط شده (لیکا) می‌باشد.

خاکستر سوخت^۹ پخته شده را در انگلیس لیتاژ^{۱۰} می‌گویند. در بریتانیا روباره منبسط شده را

را پلیت^{۱۱} می‌نامند. در استرالیا به شیل منبسط شده شلیت^{۱۲} و در ژاپن لیونیت^{۱۳} می‌گویند [۸].

سبکدانه لیکا با توجه به وزن مخصوص توده‌ای خشک، در کشورهای اروپایی تقسیم بندی

1 - Keramzite

2- Argex

3- Laterlite

4 - Liapor

5- Aglite

6- Fibo

7 - Granulex

8- Solite

9- Pulverised – Fuel Ash (PFA)

10 - Lytag

11- Pellite

12- Shalite

13 - Lionite

می شوند و وزن مخصوص توده ای تقریبی آن به دنبال نام لیکا قرار می گیرد. به طور مثال Leca 800 یا جمله لیکاهای سبک و سنگین می باشند [۱۵].
برای مشخص کردن نوع لیکا گاه محدوده اسمی دانه بندی به دنبال نام رس منبسط شده یا سایر سبکدانه ها می آید [۱۵].

۳-۲- تعریف و تقسیم بندی بتن سبکدانه

بتن سبکدانه، بتنه است که با سنگدانه های سبک ساخته می شود. بتن های پوک (اسفنجی) و متخلخل^۱، گازی^۲ یا کفی^۳ که توسط مواد کف زا یا گاز زا سبک و پوک شده اند از این تعریف خارج است.

ACI ایالات متحده بتن سبکدانه سازه ای را بتنه می دارد که حداقل مقاومت فشاری استوانه ای ۲۸ روزه آن 17Mpa و حداکثر وزن مخصوص خشک شده در هوای متناظر با آن 1850 Kg/m^3 باشد و همه سنگدانه های آن یا بخشی از آن سبکدانه باشد.

ACI ایالات متحده را دارای وزن مخصوص خشک شده در هوای برابر با 1840 Kg/m^3 یا کمتر می دارد که طبق دستورالعمل استاندارد انجمن امریکایی آزمایش و مصالح ASTM C567 بدست آمده باشد. در این آیین نامه بتن فاقد سنگدانه ریز (ماسه) معمولی را "بتن تمام سبکدانه"^۴ و بتن سبک حاوی ماشه معمولی را "بتن سبکدانه حاوی ماشه"^۵ می نامد.

ENV 1992-1-4 بتن با ساختار بسته و وزن مخصوص خشک شده در آون کمتر از 2000 Kg/m^3 حاوی سبکدانه طبیعی یا مصنوعی با چگالی ذرات کمتر از 2000 Kg/m^3 را بتن سبکدانه می نامد.

pr EN206 بتن دارای وزن مخصوص خشک شده در آون بیش از 800 Kg/m^3 و کمتر از 2100 Kg/m^3 را بتن سبکدانه می دارد که در آن از سبکدانه به طور کامل و یا جایگزین بخشی از سنگدانه های معمولی استفاده شده است [۱۰].

1- Aerated Concrete

2- Gas Concrete

3- Foam Concrete

4- All – Lightweight Concrete

5 - Sand – Lightweight Concrete

۴-۲- ویژگی های سبکدانه لیکا

۴-۱- شکل^۱ و بافت سطحی^۲

شکل سبکدانه لیکا می تواند از تیزگوشه تا کاملاً گردگوشه باشد. اگر لیکا در کوره دوار افقی تولید گردد، گردگوشه خواهد بود [۹ و ۱۰]. پوسته سطحی می تواند زبر یا صاف، متخلخل یا توپر باشد [۹]. شکل و بافت سطحی سبکدانه لیکا بر خواص آن ها در بتون تازه و سخت شده بتون سبکدانه تأثیر می گذارد [۹].

خانم Zhang نتیجه گرفته است که لیکای گردگوشه دارای پوسته لعابی نسبتاً توپر و نازکتر و بخش میانی متخلخل تر و با حجم بیشتر می باشد در حالی که سبکدانه های دیگر مانند لیتاژ دارای وضعیت متفاوتی هستند. با افزایش وزن مخصوص و چگالی ذرات سبکدانه، معمولاً تخلخل و پوکی آن برای یک نوع سبکدانه مشخص تغییر می کند [۹].

خانم Zhang مدعی است واکنش قلیایی حتی اگر در سطح سبکدانه در منطقه تماس مشاهده شود، اثر آن محدود است [۹].

۴-۲- اندازه ذرات سبکدانه و توزیع آن (دانه بندی)

اندازه سبکدانه لیکا معمولاً از صفر تا ۲۵ میلی متر است. اندازه دانه ها تا حدود زیادی به روش تولید بستگی دارد و به این دلیل می توان اندازه ذرات را کنترل نمود. هم چنین با سرند کردن دانه ها اندازه های مختلف را می توان از هم جدا کرد. سپس با اختلاط آن ها با سهم دلخواه، می توان دانه بندی مطلوب را بدست آورد [۹ و ۱۳ و ۷].

اندازه ذرات سنکدانه و توزیع اندازه ذرات (دانه بندی) بر خواص مخلوط بتون تازه و سخت شده تأثیر می گذارد. بنابر این دانه بندی سبکدانه از اهمیت برخوردار است [۹].

در تولید سبکدانه مصنوعی، ذرات ریز کمتر از سبکدانه طبیعی خرد شده ایجاد می شود. در روش کوره دوار افقی خشک، مقدار ذرات ریزتر از ۱ میلی متر کمتر از روش تر می باشد. ممکن است در

هنگام حمل و نقل و انبار کردن به دلیل خرد شدن یا سایش، ذرات ریز حاصل گردد [۹]. طبق ضوابط آلمانی، بزرگترین قطر ذرات سبکدانه نباید از ۲۵ میلی متر تجاوز کند. در بتون سبکدانه سازه ای استفاده از حداکثر اندازه سبکدانه کوچکتر معمول می باشد. برخی تولیدکنندگان، ذرات بزرگتر از ۱۶ میلی متر را تولید نمی کنند و در مورد لیکا مصرف ذرات بزرگتر از ۱۲ میلی متر برای بتون سبکدانه سازه ای به ویژه پر مقاومت توصیه نمی شود [۸۹]. اندازه سبکدانه در مقاومت ذرات آن می تواند موثر باشد؛ هر چند این امر همواره صادق نیست. به طور مثال اختلاف مقاومت بین ذرات ۴ و ۱۲ میلی متر، در Leca 800 بسیار کم است [۹].

طبق دستور استاندارد ASTM C136 ، دانه بندی لیکا می تواند مانند سنتگدانه های معمولی بdstت آید. ممکن است با توجه به اختلاف در چگالی ذرات سبکدانه با اندازه های مختلف، دانه بندی وزنی و حجمی یکسان نباشد. لذا توصیه می شود در برخی موارد از دانه بندی حجمی استفاده شود. در این حالت مقادیر یا درصد وزنی روی هر الک را بر چگالی حجمی خشک آن گروه از اندازه دانه ها تقسیم نموده و مقادیر حجمی بdstت می آید و سپس دانه بندی حجمی مشخص می گردد [۷۶ و ۷۷]. حداکثر اندازه سبکدانه در کاربردهای نیمه سازه ای و سازه ای ۱۹ ، ۱۲/۵ و ۹/۵ میلی متر منظور می شود که برای بتون های پر مقاومت تر به ۱۲/۵ یا ۹/۵ میلی متر محدود می شود. حداکثر اندازه دانه ها بر عواملی نظری کارآیی، نسبت ریزدانه به درشت دانه، عیار سیمان، درصد بهینه هوا، مقاومت نهایی و جمع شدگی ناشی از خشک شدن بتون سبکدانه اثر می گذارد [۷۷]. در ASTM C330 محدوده دانه بندی برای سبکدانه درشت، ریز و مخلوط آن ها ارائه شده است که در جدول ۱-۲ دیده می شود.

جدول ۲-۱- محدوده دانه بندی سبکدانه ها طبق ASTM C330

درصد وزنی گذشته از الک										نوع مصالح mm	
۱۰۰ μm	۳۰۰ μm	۱/۱۸ mm	۲/۳۶ mm	۴/۷۵ mm	۹/۰ mm	۱۲/۰ mm	۱۹ mm	۲۵ mm			
۵-۲۵	۱۰-۳۵	۴۰-۸۰		۸۵-۱۰۰	۱۰۰				۰-۴/۷۵	درشت دانه	
				۰-۱۰		۲۵-۶۰		۹۵-۱۰۰	۴/۷۰-۲۵		
				۰-۱۵	۱۰-۵۰		۹۰-۱۰۰	۱۰۰	۴/۷۰-۱۹		
		۰-۱۰	۰-۱۰	۰-۲۰	۴۰-۸۰	۹۰-۱۰۰	۱۰۰		۴/۷۰-۱۲/۵		
			۰-۲۰	۵-۴۰	۸۰-۱۰۰	۱۰۰			۲/۳۶-۹/۰		
۲-۱۵	۵-۲۰			۵۰-۸۰		۹۵-۱۰۰	۱۰۰		۰-۱۲/۵	مخلوط ریزدانه و درشت دانه	
۵-۱۵	۱۰-۲۵		۳۵-۶۵	۶۵-۹۰	۹۰-۱۰۰	۱۰۰			۰-۹/۰		

هم چنین در BS 3797 دانه بندی سبکدانه ها داده شده است که در جدول ۲-۲ ملاحظه می گردد.

جدول ۲-۲- محدوده دانه بندی سبکدانه ها طبق BS 3797

درصد وزنی گذشته از الک												نوع مصالح mm	
۱۰۰ μm	۳۰۰ μm	۶۰۰ μm	۱/۱۸ mm	۲/۳۶ mm	۵ mm	۶/۳ mm	۱۰ mm	۱۴ mm	۲۰ mm	۳۷/۰ mm			
۵-۱۹	۱۰-۳۰	۲۰-۶۰	۳۵-۹۰	۵۵-۱۰۰	۹۰-۱۰۰		۱۰۰				L ₁	ماسه	
۲۰-۳۵	۲۵-۴۰	۳۰-۶۰	۴۰-۸۰	۶۰-۱۰۰	۹۰-۱۰۰		۱۰۰				L ₂		
					۰-۱۰		۳۰-۶۰		۹۵-۱۰۰	۱۰۰	۰-۲۰		
					۰-۱۵		۵۰-۹۵	۹۵-۱۰۰	۱۰۰		۰-۱۴		
				۰-۱۵	۱۵-۵۰		۸۵-۱۰۰	۱۰۰			۲/۳۶-۱۰		
					۰-۵		۵-۲۵		۸۵-۱۰۰	۱۰۰	۲۰	گل	
					۰-۱۰		۲۰-۴۵	۹۰-۱۰۰	۱۰۰		۱۴		
				۰-۵	۱۵-۳۵		۸۵-۱۰۰	۱۰۰			۱۰		
				۰-۱۰	۰-۳۵	۶۰-۱۰۰	۱۰۰				۶		

در کشورهای مختلف گروه بندی اندازه‌ای لیکا متفاوت است [۱۵]. در ایران لیکا به صورت گروه‌های اندازه‌ای (۰-۳)، (۳-۱۰) و (۱۰-۲۵) یا (۱۰-۲۰) میلی متر تولید و عرضه می‌گردد [۱۳].

در کشورهای اروپایی لیکا یا فیبو به صورت گروه‌های اندازه‌ای (۴-۸)، (۸-۱۶) یا (۸-۱۲) میلی متر و غیره تولید می‌شود [۱۷].

با کم کردن حداکثر اندازه سبکدانه و افزایش درصد ریزدانه، گرچه افزایش وزن در بتن ایجاد می‌گردد؛ اما مقاومت بتن نیز بیشتر می‌شود. مثلاً اگر حداکثر اندازه از ۲۵ به ۱۶ میلی متر کاهش یابد، مقاومت بتن با سبکدانه لیکا حدود ۳۰ درصد افزایش می‌یابد؛ ضمن این که با اضافه کردن ماسه معمولی کارآیی بتن بیشتر شده و مقاومت آن اضافه می‌شود [۳۵].

۲-۴-۳- مقاومت و مدول الاستیسیته سبکدانه لیکا

مقاومت سبکدانه نقش مهمی در افزایش مقاومت بتن سبکدانه دارد. روش‌های مختلفی برای تعیین مقاومت سنگدانه‌های معمولی و سبکدانه‌ها ابداع شده است که همگی به صورت نیمه مستقیم یا غیر مستقیم، مقاومت سنگدانه‌ها را بدست می‌آورند.

- روش نیمه مستقیم

برای تعیین مقاومت با روش نیمه مستقیم می‌توان از دستورالعمل استاندارد DIN 4226/1983 و یا پیوست A دستور CEN pr EN 130055-1:1997 [۹] و یا از دستورالعمل استاندارد BS 812 part 111 (ده درصد ریزتر)^۱ استفاده نمود [۱۹].

در استاندارد آلمان سبکدانه در یک استوانه با کوبیدگی مشخص قرار می‌گیرد و نیروی لازم برای نفوذ معین پیستون در استوانه، مقاومت سبکدانه خواهد بود [۹]. در روش انگلیسی نیروی لازم برای نفوذ پیستون برای خرد کردن سبکدانه به نحوی که ده درصد آن‌ها از الک جداکننده مشخص عبور نماید، بدست می‌آید [۹]. در ایران ده درصد ریزتر لیکای (۱۲/۵-۱۹) میلی متر با نفوذ

۲۴ میلی متر، ۱۹۳۰ Kg بدست آمده است [۲۰]. هم چنین برای لیکای (۱۰-۲۰) میلی متر تولید ایران، ده درصد ریزتر با نفوذ ۱۸mm حدود ۱۷۰۰ بدست آمده است [۲۲].

روش دیگر برای ایجاد امکان تعیین مقاومت سبکدانه تعیین جرم سنگدانه خرد شده در هنگام بارگذاری است [۲۱]. با استفاده از روش مستقیم و تهیه نمونه استوانه ای از لیکا، مقاومت خرد شدن و مدول الاستیسیته استاتیکی لیکای ایران بدست آمده است [۲۲]. این مقادیر بسیار کم به نظر می رسد. مقاومت فشاری لیکای ۲۵ میلی متری $\frac{1}{3}$ و $\frac{2}{4}$ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته آن به ترتیب $0/15$ و $0/39$ گیگاپاسکال بدست آمد.

-روش غیر مستقیم

از آن جا که رابطه تنش - کرنش بتن سبکدانه تا مرحله گسیختگی تقریباً خطی است و اختلاف بین مدول الاستیسیته ملات و سبکدانه کم می باشد، با فرض مدل ساده اجسام مركب و در نظر گرفتن طراحی خوب بتن سبکدانه و با فرض این که سبکدانه محدود کننده مقاومت است، مقاومت سبکدانه را بدست آورد. در این زمینه، تحقیقاتی بر روی بتن های حاوی لیکا 400 ، 600 و 700 و 800 توسط Smeplast در اروپا در سال ۱۹۹۲ صورت گرفته است [۶]. در این تحقیق برای لیکا با چگالی ذرات $0/6-1/7$ ، مقاومت خرد شدن طبق دستورالعمل استاندارد DIN بین $8-170$ کیلو نیوتون بدست آمده است. برای چگالی ذرات حدود $0/8$ این مقدار حدود 20 KN می باشد.

مولر - رشتھولز^۱ در سال ۱۹۷۹ با اندازه گیری مستقیم سرعت پالس و مدول الاستیسیته E سعی کرده اند رابطه ای بین چگالی خشک ذرات و مدول الاستیسیته دینامیکی سنگدانه بدست آورند که نتیجه کار، رابطه $1-2$ می باشد [۷]. این رابطه برای سنگدانه های معمولی نیز کاربرد دارد.

$$E_d = 0.008\rho^2 \quad (1-2)$$

E_d =مدول الاستیسیته دینامیکی [Mpa]

$$\rho = \text{چگالی متوسط خشک ذرات سنگدانه} [\text{Kg/m}^3]$$

به طور مثال برای سبکدانه دارای چگالی 800 Kg/m^3 ، مدول دینامیکی سنگدانه 5120 Mpa یا $5/12 \text{ Gpa}$ یا 2500 Kg/m^3 مدول دینامیکی سنگدانه حدود 50 Gpa یعنی در حدود 10 برابر سبکدانه فوق حاصل می شود.

۲-۴-۴- وزن مخصوص انبوهی^۱ سبکدانه لیکا

وزن مخصوص یا چگالی انبوهی لیکا به صورت غیر متراکم و متراکم اندازه گیری می شود. در همه دستورالعمل ها از وزن مخصوص غیر متراکم استفاده می گردد؛ اما در دستورالعمل ACI 211-2 برای تعیین نسبت های اختلاط بتن سبکدانه، وزن مخصوص انبوهی خشک متراکم با ميله برای سبکدانه درشت بکار می رود.

در تعیین وزن مخصوص انبوهی یا توده ای، فضای خالی بین ذرات سبکدانه منظور می شود و وزن خشک سبکدانه به حجم پیمانه یا ظرفی که در آن ریخته شده تقسیم می گردد. وزن مخصوص انبوهی تابع شکل ذرات، شرایط سطح یا بافت سطحی، دانه بندی، حداکثر اندازه ذرات، چگالی ذرات و رطوبت آن می باشد. هم چنین نحوه ریختن مصالح در پیمانه و شرایط تراکمی بر نتیجه اثر می گذارد [۷۶-۹۰]. در مورد ریزدانه های سبک مانند سنگدانه های معمولی، رطوبت بر چگالی انبوهی خشک نیز اثر می گذارد و پدیده تورم حجم مشاهده می شود. چگالی انبوهی برای ذرات ریز معمولاً بیشتر از ذرات درشت است [۲۳-۲۶].

برای ایجاد سبکی بیشتر، علاقه به تولید لیکای سبک در اروپا با وزن مخصوص $250-400$ کیلوگرم بر متر مکعب وجود دارد [۹-۲۳].

وزن مخصوص (چگالی) انبوهی لیکای ایران بدست آمده از منابع مختلف در جدول ۳-۲ دیده می شود.

جدول ۲-۳- وزن مخصوص انبوهی خشک لیکای ایران

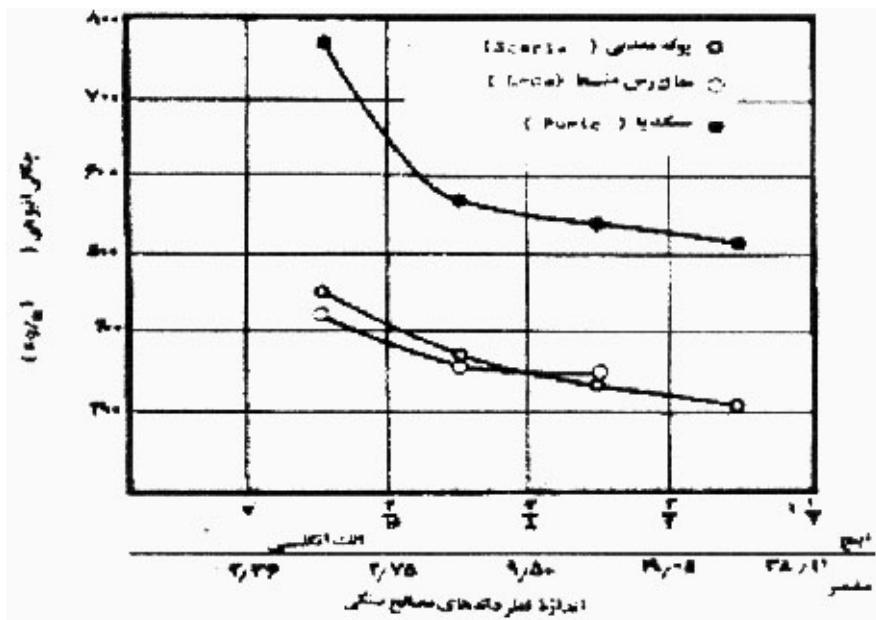
(۰-۳) mm	(۳-۱۰) mm	(۱۰-۲۰) mm	مخلوط (۰-۲۵) mm	منبع
۴۸۵±۳۰	۳۸۵±۳۰	۳۳۵±۳۰	۳۸۰±۳۰	[۱۳]
	۳۸۳	۳۳۸		[۲۲]

هم چنین برای لیکای ایران پوکه معدنی تبریز و سنگ پای قروه چگالی انبوهی خشک در

شکل ۱-۲ مشاهده می گردد [۲۰].

وزن مخصوص غیر متراکم لیکای (۳-۱۰) میلی متر نیز برابر 466 Kg/m^3 و لیکای (۰-۳)

میلی متر برابر 676 Kg/m^3 بدست آمده است [۲۷].



شکل ۱-۲- رابطه چگالی انبوهی خشک و اندازه سبکدانه های لیکای ایران، پوکه تبریز و سنگ پای قروه

۴-۵- چگالی ذرات سبکدانه و پوکی

برای ذرات حاوی منافذ، معمولاً سه نوع چگالی تعریف می شود [۲۴]. در حالی که برای سایر اجسام غیر متخلخل فقط یک نوع چگالی تعریف شده است که چگالی مطلق یا واقعی^۱ می باشد. این روابط برای سنگدانه های معمولی نیز صادق است.

$$\rho = \frac{m_d}{V_s} \quad (2-2)$$

ρ = چگالی مطلق یا واقعی

m_d = جرم جسم خشک

V_s = حجم جسم بدون منافذ

برای اجسام متخلخل، حجم ماده پودر شده باید بدست آید.

- چگالی حجمی (فضایی) خشک دانه ها^۲

$$\rho_b = \frac{m_d}{V} \quad (3-2)$$

ρ_b = چگالی حجمی خشک

V = حجم دانه ها شامل کلیه منافذ

- چگالی (حجمی) ظاهري^۳

$$\rho_a = \frac{m_d}{V_a} \quad (4-2)$$

ρ_a = چگالی (حجمی) ظاهري

V_a = حجم دانه ها بدون منافذ نفوذپذير (باز)

- چگالی (حجمی) اشباع با سطح خشک^۴

$$\rho_{SSD} = \frac{m_{SSD}}{V} \quad (5-2)$$

ρ_{SSD} = چگالی (حجمی) اشباع با سطح خشک

m_{SSD} = جرم ذرات اشباع با سطح خشک

1 - Actual Specific Gravity (Density)

2- Bulk Specific Gravity

3 - Apparent Specific Gravity

4- Saturated – Surface – Dry Bulk Specific Gravity

حجم دانه های بدون منافذ نفوذپذیر و حجم دانه ها بدون هر گونه منفذی از روابط ۶-۲ و ۷-۲ بدست می آید.

$$V_a = V - V_w \quad (6-2)$$

$$V_s = V - V_v \quad (7-2)$$

= حجم منافذ نفوذپذیر که آب در آن نفوذ کرده است V_w

= حجم کلیه منافذ اعم از نفوذپذیر و نفوذناپذیر V_v

همواره $V_w \leq V_v$ می باشد.

هم چنین می توان روابطی را بین چگالی های مختلف برقرار کرد [۲۵].

$$\rho_{SSD} = \rho_b (1 + A) \quad (8-2)$$

$$\rho_a = \frac{\rho_b}{1 - A \rho_b} \quad (9-2)$$

$$\rho_a = \frac{\rho_{SSD}}{1 - A(\rho_{SSD} - 1)} \quad (10-2)$$

در این روابط A ظرفیت جذب آب سنگدانه ها به صورت اعشاری می باشد.

پوکی نیز برای سبکدانه ها و یا به طور کلی برای سنگدانه ها به سه صورت وجود دارد [۷].

- پوکی بین ذرات

این پوکی شامل فضای حفرات بین ذرات است و مقدار آن از رابطه ۱۱-۲ بدست می آید.

$$n_b = \frac{V_b}{V_t} \quad (11-2)$$

پوکی ذرات n_b

= حجم فضای خالی بین ذرات V_b

= حجم کل پیمانه ای که سنگدانه در آن ریخته شده است V_t

اگر وزن مخصوص (چگالی) انبوهی خشک D_b و چگالی حجمی خشک ρ_b باشد، n_b طبق رابطه ۱۲-۲ بدست می آید.

$$n_b = \frac{\rho_b - D_b}{\rho_b} \quad (12-2)$$

اگر وزن مخصوص انبوهی Kg/m^3 ۴۵۰ و چگالی حجمی خشک $1000 Kg/m^3$ باشد، مقدار پوکی

$$n_b = (1000 - 450) / 1000 = 0.55$$

بین ذرات عبارت است از:

- پوکی درون ذرات

این پوکی مربوط به منافذ درون ذرات است و مقدار آن از رابطه ۱۳-۲ بدست می‌آید.

$$n_i = \frac{V_v \text{ or } V_i}{V} \quad (13-2)$$

$$\text{یا } V_i = \text{کلیه منافذ داخلی ذرات}$$

$$V = \text{حجم کل ذرات شامل کلیه منافذ داخلی}$$

اگر چگالی واقعی یا مطلق ρ و چگالی حجمی خشک ρ_b باشد مقدار پوکی درون ذرات از رابطه ۱۴-۲ بدست می‌آید.

$$n_i = \frac{\rho - \rho_b}{\rho} \quad (14-2)$$

به عنوان مثال اگر چگالی واقعی ذرات سبکدانه لیکا 2500 Kg/m^3 و چگالی حجمی خشک آن 1000 Kg/m^3 باشد، پوکی داخلی (درون ذرات) عبارتست از:

$$n_i = (2500 - 1000) / 2500 = 0.6$$

پوکی داخلی را می‌توان به پوکی منافذ نفوذپذیر و نفوذناپذیر تقسیم نمود.

- پوکی کل

پوکی کل مجموع دو نوع پوکی داخلی و پوکی بین ذرات است.

$$n_t = \frac{V_i + V_b}{V_t} \quad (15-2)$$

اگر پوکی‌ها را به صورت جداگانه بدست آورده باشیم، پوکی کل طبق رابطه ۱۶-۲ بدست می‌آید.

$$n_t = n_b + n_i \quad (1 - n_b) \quad (16-2)$$

در مثال فوق پوکی کل خواهد بود:

$$n_b = 0.55 + 0.6 = 0.82$$

صرف نظر از اختلاف در مورد روش تعیین چگالی‌های مختلف برای سبکدانه‌ها، باید گفت

چگالی حجمی خشک سبکدانه‌های معمولی است و طبق DIN 4226 مقدار

چگالی حجمی خشک نباید بیش از ۲۰ درصد با مقدار اعلام شده اختلاف داشته باشد [۹].

چگالی حجمی خشک لیکا در منابع مختلف بین ۵۰۰ تا ۱۵۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب ذکر شده است [۱۳ و ۱۴ و ۲۰ و ۱۸].

برای لیکای ایران چگالی حجمی خشک و اشباع با سطح خشک در جدول ۴-۲ آمده است [۲۰].

جدول ۴-۲ - چگالی حجمی خشک و اشباع با سطح خشک لیکای ایران (طبق ASTM)

(۱۹-۳۸) mm	(۹/۵-۱۹) mm	(۴/۷۵-۹/۵) mm	(۰-۴/۷۵) mm	چگالی حجمی خشک Kg/m^3
۵۳۳	۵۴۶	۶۲۳		چگالی اشباع با سطح خشک Kg/m^3
۶۵۸	۶۶۹	۷۴۷		

هم چنین چگالی حجمی خشک لیکای ایران از منابع مختلف در جدول ۵-۲ آمده است [۱۳ و ۲۲].

جدول ۵-۲ - چگالی حجمی خشک و اشباع با سطح خشک لیکای ایران (طبق ASTM)

(۰-۳) mm	(۳-۱۰) mm	(۱۰-۲۰) mm	مخلوط (۰-۲۵) mm	چگالی حجمی خشک Kg/m^3
۶۹۰ ± ۲۰	۵۳۰ ± ۲۰	۵۰۰ ± ۲۰	۵۱۵ ± ۲۰	چگالی حجمی خشک [۱۳]
	۷۵۰	۷۳۶		چگالی حجمی خشک [۲۲]
	۹۰۶	۸۸۹		چگالی اشباع با سطح خشک [۲۲]

ACI 211.2 در پیوست A روشی را برای تعیین فاکتور چگالی مشخص نموده است.

فاکتور چگالی به طور علمی در ACI و ASTM تعریف نشده است و مفهوم فیزیکی آن روشن نیست. از

فاکتور چگالی در طرح اختلاط روش ACZI 211.2 برای بتن سبکدانه استفاده شده است و سبکدانه

می تواند به صورت خشک یا مرطوب مورد آزمایش قرار گیرد. در منابع اروپایی فاکتور چگالی

سبکدانه بدست نیامده است [۱۸]. برای لیکای ایران به طور محدود فاکتور چگالی تعیین شده که در

جدول ۶-۲ ملاحظه می شود [۲۲].

جدول ۶-۲- فاکتور چگالی لیکای خشک ایران (طبق روش ACI 211.2)

فاکتور چگالی S				
۲۴ ساعت	۳۰ دقیقه	۱۰ دقیقه	صفر دقیقه	
۰/۸۷۲	۰/۷۴۸	۰/۷۴۰	۰/۷۳۵	لیکای (۱۰-۵) میلی متر
۰/۸۹۱	۰/۷۶۹	۰/۷۶۳	۰/۷۵۸	لیکای (۱۰-۲۰) میلی متر

هم چنین فاکتور چگالی ۲۴ ساعته لیکای (۱۰-۳) میلی متر برابر ۰/۹۱۵ و فاکتور چگالی ۲۴ ساعته لیکای (۰-۳) میلی متر برابر ۱/۵۱۲ تعیین شده است [۲۷].

۶-۴-۲- جذب آب لیکا

جذب آب در ارتباط با منافذ و پوکی درون ذرات است و بر خواص مخلوط بتن تازه و هم چنین خصوصیات هیدراسیون تأثیر می گذارد. مقدار کل جذب و روند جذب برای سبکدانه ها بسیار مهم است و به عوامل زیر بستگی دارد [۹].

- پوکی کل سبکدانه

- توزیع منافذ و پیوستگی آن ها در داخل سبکدانه

- ویژگی های سطحی سبکدانه

- درصد رطوبت اولیه سبکدانه

سبکدانه شکسته شده بیش از سبکدانه نشکسته آب جذب می کند. سبکدانه نشکسته ریز کمتر و آهسته تر از سبکدانه درشت آب را جذب می نماید [۹].

برای لیکاهای اروپایی جذب آب ۳۰ دقیقه در حدود ۵ تا ۴۰ درصد و جذب آب ۲۴ ساعته بین ۷ تا ۴۱ درصد داده شده است [۱۸]. آزمایش جذب آب برای لیکاهای اروپایی طبق دستور استاندارد EN 1097-6 انجام شده است [۷].

برای سبکدانه های امریکایی جذب آب ۲۴ ساعته طبق دستور العمل استاندارد ASTM C127, C128 بین ۵ تا ۲۵ درصد داده شده است [۷].

آب جذب شده در داخل سبکدانه نمی تواند فوراً در معرض هیدراسيون سيمان قرار گيرد و هم چنین به عنوان آب اختلاط منظور نمی شود. بنابر اين در محاسبات، نسبت آب به سيمان موثر داخل نمی گردد [۷]. به هر حال اين آب در زمان هاي بعد برای هیدراسيون و بهبود وضعیت منطقه تماس خمير سيمان و سبکدانه به مصرف می رسد [۷].

عمل آوري داخلی^۱ در بتن سبکدانه عامل مهمی برای کاهش نفوذپذیری به دلیل ایجاد محصولات اضافی هیدراسيون در منافذ و موئینگی های منطقه تماس می باشد [۷]. باید گفت نسبت آب به سيمان موثر عملاً همواره کمتر از نسبت آب به سيمان در هنگام تعیین کارآیی و قالب گیری بتن است.

برای رس منبسط شده به خاطر وجود پوسته سطحی متراکم تر، مکش آب مخلوط کندتر بوده و قبل از تخلیه مخلوط کن فقط بخشی از آب را جذب می کند. برای لیکا افت قابل توجه در کارآیی و کاهش نسبت آب به مواد سیمانی در هنگام گیرش ملاحظه می شود [۷].

داده است که در آن از چرخاندن سبکدانه در محفظه ای با سرعت ۵۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه استفاده شده است. به هر حال در این نوشته هدف از ایجاد چنین روشی و مفهوم کاربردی آن روشن نگشته است.

برای لیکای ایران نیز آزمایش هایی توسط مراجع مختلف انجام شده است. در هیچ یک از این آزمایش ها از دستور ACI 211.2 استفاده نشده است.

جذب آب ۲۴ ساعته لیکای (۱۰-۳) میلی متر با روش معمولی برابر $13/1$ درصد و برای لیکای (۳-۰) میلی متر برابر $10/3$ درصد بدست آمده است [۲۷].

هم چنین جذب آب ۲۴ ساعته لیکای (۲۰-۱۰) میلی متر با روش چرخاندن دستی برابر $18/8$ درصد و برای لیکای (۵-۱۰) میلی متر با همین روش برابر $18/6$ درصد حاصل شده است. جذب آب ۳۰ دقیقه ای لیکای (۵-۱۰) میلی متر نیز برابر $13/0$ درصد بدست آمده است [۲۲].

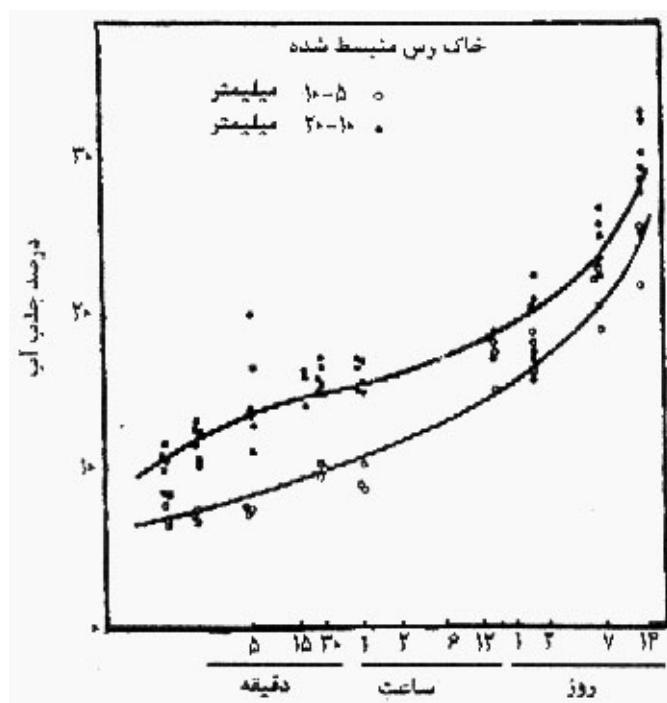
در جدول ۷-۲ جذب آب لیکای ایران را برای دو زمان ۳۰ دقیقه ای و ۷۲ ساعته

مشاهده می نمایید [۷].

جدول ۷-۲ - جذب آب لیکای ایران با روش ASTM

(۰-۳) mm	(۳-۱۰) mm	(۱۰-۲۰) mm	(۰-۲۵) mm	مخلطه	
۱۵±۲	۱۷±۲	۱۹±۲	۱۸±۲	۳۰ دقیقه	جذب آب (%)
۳۰±۲	۳۰±۲	۳۰±۲	۳۰±۲	۷۲ ساعته	

همان گونه که ملاحظه می گردد ظاهراً جذب آب طولانی مدت سبکدانه لیکای ریز و درشت نزدیک به هم می باشد. در یک پژوهش تحقیقاتی نیز جذب آب لیکای ایران بر اساس روش استاندارد ASTM به صورت شکل ۲-۲ دیده می شود [۲۰].



شکل ۲-۲ - منحنی جذب آب خاک رس منبسط شده

بیشترین مقدار جذب آب توسط لیکا در ۲ تا ۳ دقیقه اول اتفاق می‌افتد ولی آهنگ جذب آب انواع مختلف لیکا از نظر نوع و اندازه متفاوت است. جذب آب ۳۰ دقیقه‌ای انواع لیکا بین ۸ تا ۱۲ درصد است که بیش از نیمی از جذب آب ۲۴ ساعته آن‌ها می‌باشد. اگر دانه‌های لیکا را بشکنیم، آهنگ جذب آب به شدت تسريع می‌شود و این امر نشانه تأثیر پوسته سطحی لیکا بر روند جذب آب است [۱۴].

وضعیت جذب آب سبکدانه در آب با وضعیت آن در خمیر سیمان یا بتن متفاوت است. در بتن تازه، سبکدانه آب کمتری را جذب می‌کند و آهنگ جذب نیز کمتر می‌شود. در یک خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان بیشتر از ۰/۶، سبکدانه‌ها تقریباً آبی را معادل جذب آب ۳۰ دقیقه‌ای غوطه ور در آب جذب می‌کنند [۱۴].

مقدار جذب آب لیکا در ۳۰ دقیقه اول حدود ۵۰ تا ۸۰ درصد جذب آب ۲۴ ساعته است. برخی پژوهشگران مقدار جذب آب را در طرح مخلوط بتن برای جذب ۱ ساعته در آب منظور می‌کنند [۳۶]. در نروژ ۹۰ تا ۱۰۰ درصد جذب ۱ ساعته را برای محاسبه نسبت آب موثر به مواد سیمانی در نظر می‌گیرند [۹].

در آلمان توصیه می‌شود معادل دو برابر آب جذب شده در ۳۰ دقیقه غوطه وری در آب را برای جذب آن در مخلوط بتن در نظر بگیرند [۹].

۵-۲- ساختار بتن سبکدانه

بتن سبکدانه نیز مانند بتن معمولی چند فازی است. در مرحله اختلاط، ریختن و تراکم می‌توان آن را دو فازی شامل "فاز خمیری"^۱ (خمیر سیمان) و "فاز صلب"^۲ (سنگدانه) دانست. در هنگام سخت شدن بتن، مصالح غیر همگن تبدیل به یک مصالح ظاهرآ همگن می‌شوند. این امر در شکل ۳-۲ مشاهده می‌گردد. به هر حال این ویژگی بتن به سطح دیدگاه ما بستگی دارد. سطح دیدگاه شامل سطح کلان نگر^۳، سطح میانه^۴ و سطح ریز نگر^۵ می‌باشد.

۱ - Plastic Phase

2 - Rigid Phase

3 - Macro – Level

4 – Mesco - Level

5 - Micro - Level

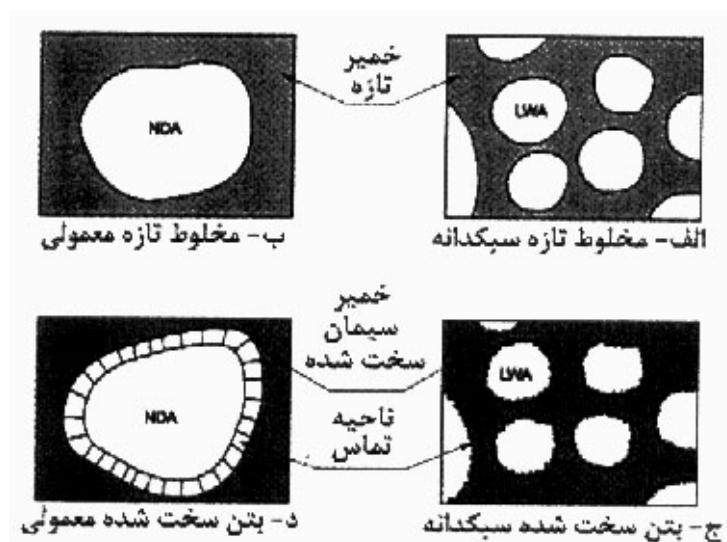
از دید کلان نگر که خواص مهندسی بتن تعیین می شود، بتن مصالح همگن تلقی می گردد.

این خواص شامل ویژگی های فیزیکی - مکانیکی و تابع زمان می باشد.

از دید میانه، در مقیاس میلی متر تا سانتی متر، بتن دارای دو یا سه فاز می باشد.

از دید ریز نگر، فرآیندهای هیدراسیون و شکل گیری ریز ساختار توضیح داده می شود که

در آن ویژگی های ناحیه وجه مشترک^۱ سنگدانه و خمیر سیمان تشریح می گردد. خواص ناحیه وجه مشترک (انتقالی یا تماس) به خصوصیات سطح سنگدانه و ساختار منافذ و رطوبت اولیه سنگدانه ها بستگی دارد. بسته 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 [۲۸].



شکل ۳-۲- 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^۲) و فاز ذرات (سنگدانه) می باشد [۲۹]. خواص مکانیکی مصالح تحت تأثیر خواص هر فاز و اندر کنش بین فازها می باشد.

معمولًاً بتن سبکدانه (LWAC) شامل سبکدانه (LWA) و سنگدانه معمولی (NDA)^۱ معمولی است که از نظر خواص متفاوتند. در این حالت مدل دو فازی را می‌توان اصلاح نمود و ماسه معمولی را در فاز خمیر سیمان منظور کرد یعنی یک فاز ملات و یک فاز سبکدانه بدست می‌آید. به طور کلی سنگدانه معمولی مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بیشتری را نسبت به خمیر سیمان دارا است^[۲۹]. این امر بر توزیع تنش اثر می‌گذارد و محل ترک‌های اولیه را مشخص می‌کند و بنابر این توسعه گسیختگی و شکست بتن^۲ را تعیین می‌نماید. در وهله اول، سنگدانه معمولی به خاطر داشتن مدول الاستیسیته بالاتر تنش را جذب می‌کند. اختلاف در صلبیت، موجب ایجاد تنش کشش عرضی^۳ در وجه مشترک خمیر سیمان و سنگدانه می‌گردد. اختلاف موجود در ضربی پواسون می‌تواند تنش کششی عرضی را افزایش دهد و حتی تیزگوشگی سنگدانه‌ها تمرکز تنش کششی موضعی را باعث می‌شود^[۹].

بتن معمولی با مقاومت کم، دارای وجه مشترک خمیر سیمان - سنگدانه با مقاومت، سختی و طاقت شکست کمتری نسبت به خمیر سیمان است. منطقه وجه مشترک (انتقالی) را می‌توان فاز سوم ماده مرکب دانست [۳۰ و ۸۵]. ظرفیت کمتر ناحیه انتقالی و تمایل به تمرکز تنش کششی در سطح سنگدانه‌ها موجب بروز ترک خوردگی موضعی حتی با وجود تنش خارجی نسبتاً کم می‌شود. با افزایش تنش کل، ریز ترک‌های پخش پدیدار می‌گردد و از وجه مشترک به درون فاز ملات توسعه می‌یابد. با بالا رفتن کل تنش، انرژی الاستیک تولید شده اضافی، در ایجاد ترک صرف می‌گردد.

در این مرحله منحنی تنش - کرنش از حالت رفتار الاستیک خطی فاصله می‌گیرد و منحرف می‌شود. پس از رسیدن به تنش نهایی، ریز ترک‌ها یک توزیع موثر مجدد تنش را بوجود آورده و شکست تردتری حاصل می‌گردد. این اثر به قابلیت مهار ترک توسط سنگدانه یعنی طاقت گسیختگی مواد سنگی بستگی دارد.

اختلاف زیاد در مقاومت و سختی بین سه فاز باعث می شود تا بتن معمولی در سطح میانه نگر یک ماده غیر همگن فرض شود. خواص مکانیکی و حالات مختلف گسیختگی تا حد زیادی به این ناهمگنی مربوط می گردد. غیر همگنی بتن با کاسته شدن از اختلاف مقاومت و سختی فازهای مختلف کاسته می شود. بتن سبکدانه در واقع مصدق این امر است. مقاومت بسیاری از سبکدانه ها نزدیک به مقاومت خمیر سیمان معمولی است.

اگر منطقه وجه مشترک در بتن سبکدانه بهتر از بتن معمولی منظور شود درک خواص بتن سبکدانه ساده تر خواهد بود. مفهوم آن این است که وجه مشترک اغلب بتن های سبکدانه خوب عمل آوری شده ضعیف ترین ناحیه بتن نیست. برای درک خواص مکانیکی، روند گسیختگی، تردی، نفوذپذیری و دوام بتن سبکدانه، دانستن این مفهوم ضروری است [۹]. در بتن های سبکدانه توزیع تنش به دلیل نزدیکی مدول الاستیسیته سبکدانه و ملات یکنواخت تر از بتن معمولی است.

اغلب اوقات، سبکدانه دارای مدول الاستیسیته کمتر از فاز ملات است و موجب جذب تنش بیشتر توسط ملات می گردد. تنش کششی عرضی موضعی در ملات اثر می کند و در وجه مشترک تأثیری ندارد. در واقع در این حالت، وجه مشترک تا حدودی توسط تنش فشاری عرضی، محدود و محصور می گردد [۲۱].

به طور کلی کیفیت ضعیف وجه مشترک در بتن پر مقاومت به ویژه سبکدانه از اهمیت کمتری برخوردار است. این پدیده ناشی از بهبود پایداری خمیر سیمان به دلیل استفاده از نسبت آب به سیمان کم و بکارگیری دوده سیلیسی است. هم چنین جذب آب توسط سبکدانه، نسبت آب به سیمان را به صورت موضعی در سطح سنگدانه در وجه مشترک کاهش می دهد و آب ناشی از آب انداختن در زیر سنگدانه ها تشکیل نمی شود. ضمناً به دلیل کاهش پاسخ سبکدانه در برابر لرزش ناشی از متراکم کردن بتن، اثر آب انداختن در سطح سنگدانه ها کاهش می یابد [۳۱ و ۳۲].

همان طور که گفته شد خواص وجه مشترک تابع ویژگی های سطحی سبکدانه و هم چنین ساختار منافذ و رطوبت اولیه سنگدانه است. در این رابطه حتی اگر ظاهر دو سبکدانه یکسان باشد خواص بتن آن ها ممکن است کاملاً متفاوت باشد [۳۳].

مقاومت و طاقت گسیختگی سبکدانه به مقدار زیادی کمتر از مقاومت و طاقت گسیختگی سنگدانه های طبیعی و معمولی و حتی فاز ملات است. بنابر این قابلیت مهار ترک توسط آن ها کمتر است. ترک پس از ایجاد در فاز ملات بتن سبکدانه یا در خود سبکدانه، مستقیماً از سبکدانه می گذرد و بر خلاف بتن معمولی وارد وجه مشترک نمی شود. در نتیجه ترک های بتن سبکدانه محدود به چند ترک می باشد و ریز ترک در منطقه وجه مشترک ایجاد نمی گردد. این امر رفتار تقریباً خطی تنش - کرنش بتن سبکدانه و شکست ناگهانی آن را توجیه می کند [۹].

اعتقاد برخی از محققان دیگر نیز بر این است که کیفیت وجه مشترک بتن های سبکدانه بسیار خوب بوده و از بتن های معمولی بهتر است.

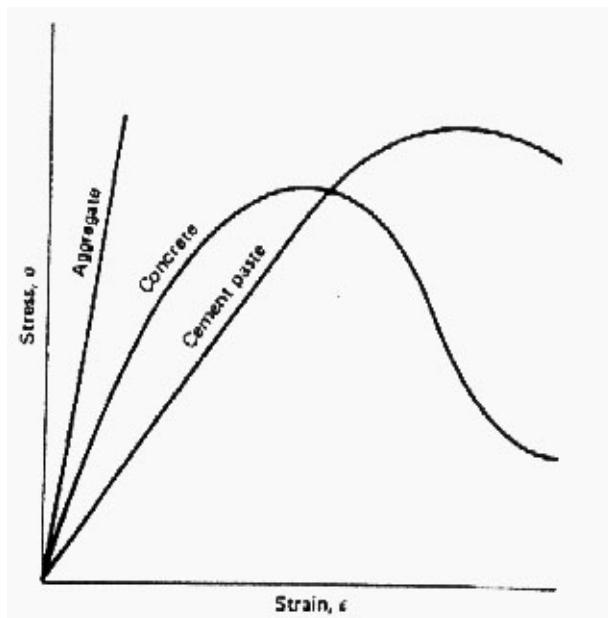
لازم به ذکر است که ساختار خمیر سیمان در نزدیکی میلگرد، سنگدانه و حتی قالب تغییر می کند و تخلخل و خواص مکانیکی این ناحیه مرزی با بقیه خمیر سیمان متفاوت است [۵۲].
به این دلیل رفتارهایی به شرح زیر در بتن دیده می شود [۵۳].

- بتن در کشش ترد عمل می کند، اما در فشار نسبتاً انعطاف پذیر است.
- مقاومت فشاری آن بیشتر از مقاومت کششی است.

- هر چند اجزای بتن شامل سنگدانه ها و خمیر سیمان تحت فشار به صورت الاستیک باقی می مانند اما رفتار مجموعه آن ها یعنی بتن، غیر الاستیک است (شکل ۴-۲).
- مقاومت فشاری بتن با افزایش اندازه سنگدانه درشت، کاهش می یابد.
- نفوذ پذیری بتن از خمیر سیمان بیشتر است.

اثر وجه مشترک در رفتار غیر الاستیک بتن در شکل ۴-۲ مشهود است. در کمتر از٪۳۰ بار نهایی ترک های ناشی از آب انداختن و جمع شدگی یا ناشی از اختلاف بین مدول الاستیسیته خمیر سیمان و سنگدانه های درشت، در منطقه تماس ثابت باقی می مانند و منحنی تنش - کرنش خطی است. در بیش از٪۳۰ بار نهایی تعداد، عرض و طول ترک های ریز در وجه مشترک افزایش می یابد و منحنی تنش - کرنش کم کم از حالت خطی خارج می شود. وقتی تنش از٪۵۰ بار نهایی بیشتر می شود، ترک ها در ماتریس خمیر سیمان تشکیل می شوند و در٪۷۵ تنش نهایی ترک ها در

خمیر سیمان گسترش می یابند و منحنی تنش - کرنش به حالت افقی میل پیدا می کند و با افزایش تنش، ترک ها به یکدیگر مرتبط شده و گسیختگی حاصل می گردد [۵۴و۵۳].



شکل ۲-۴- رفتار تنش - کونش خمیر سیمان، سنگدانه و بتن

در هنگام اختلاط و ریختن بتن، لایه ای از آب دور سنگدانه ها به ویژه درشت دانه ها را می گیرد. ضخامت این لایه در حدود نیمی از ضخامت منطقه تماس است. ضخامت منطقه تماس بین ۱۵ تا ۲۵ میکرون می باشد. بنابر این در منطقه تماس، ذرات سیمان وجود ندارند و به دلیل وجود لایه آب، تمام ذرات در فاصله ای در حدود ۲ برابر ضخامت لایه آب قرار می گیرند.

در شروع هیدراسیون سیمان، هیدروکسید کلسیم و پس از گذشت زمان کوتاهی اترینگایت^۱ تشکیل و در آب دور دانه ها حل می گردد و به درون آب دور سنگدانه نفوذ می کند و در آن جا بلوری می شود. با توسعه بلوری شدن از سمت ذرات سیمان به طرف سنگدانه، منطقه تماس شکل می گیرد. فرآیند هیدراسیون فرآورده هایی از جمله C-S-H را در اطراف و بین ذرات سیمان بوجود می آورد که فضای بین ذرات سیمان را پر می کند. برای پر کردن فضای بین ذرات سیمان و سنگدانه

۱ - Ettringite

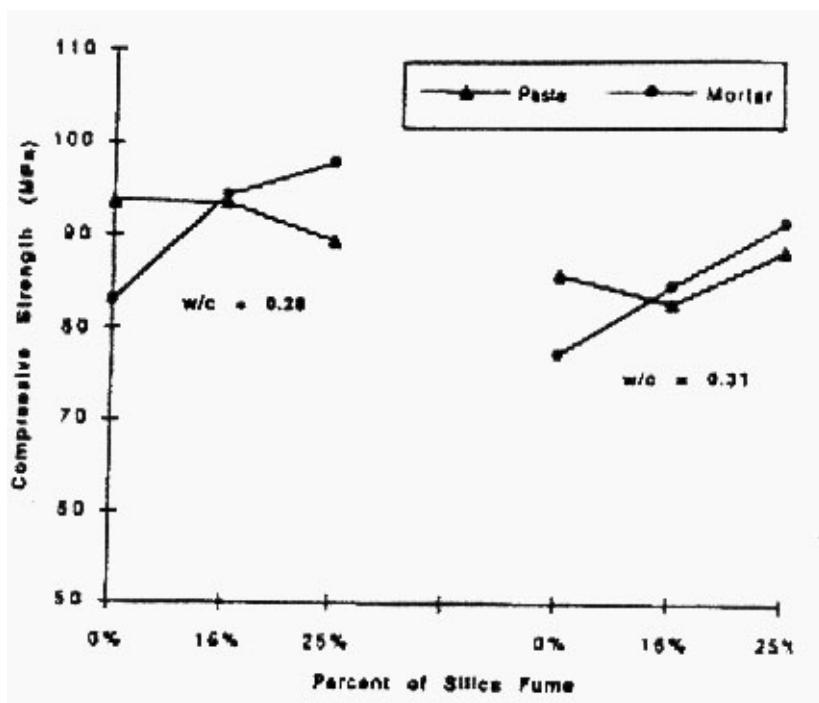
از بلورهای بزرگ مانند هیدروکسید کلسیم و اترینگایت استفاده می شود [۵۵ و ۵۶]. هر چه اندازه سنگدانه بزرگتر باش لایه آب نیز ضخیم تر خواهد بود [۵۳].

در منطقه تماس بلورهای هیدروکسید کلسیم و پوکی بیشتر از ماتریس خمیر سیمان است. ترک های موئی در این منطقه وجود دارند و می توان انتظار داشت که مقاومت این منطقه کمتر و نفوذپذیری آن بیشتر از ماتریس خمیر سیمان باشد. در ماتریس خمیر سیمان C-S-H بیشتر و پوکی کمتری نسبت به منطقه تماس وجود دارد و C-S-H از مقاومت و استحکام بیشتری برخوردار است.

به علت وجود بلورهای هیدروکسید کلسیم در منطقه تماس، ضعف در این منطقه کاملاً وجود دارد و بلورها در این منطقه به صورت جهت دار قرار گرفته اند [۵۲]. برخی معتقدند بلورهای منطقه تماس جهت دار نیستند [۵۷]. به هر حال آرایش بلورها به هر صورتی که در این منطقه باشد، مقاومت کششی ناحیه انتقالی بین ۱۰ تا ۵۰ درصد مقاومت کششی خمیر سیمان است [۵۸].

وجود دوده سیلیسی در منطقه تماس و در خمیر سیمان باعث اختلاف نظر در بین پژوهشگران شده است. آیا دوده سیلیسی باعث افزایش ماتریس خمیر سیمان می گردد یا منطقه تماس را بهبود می بخشد؟ [۵۹]

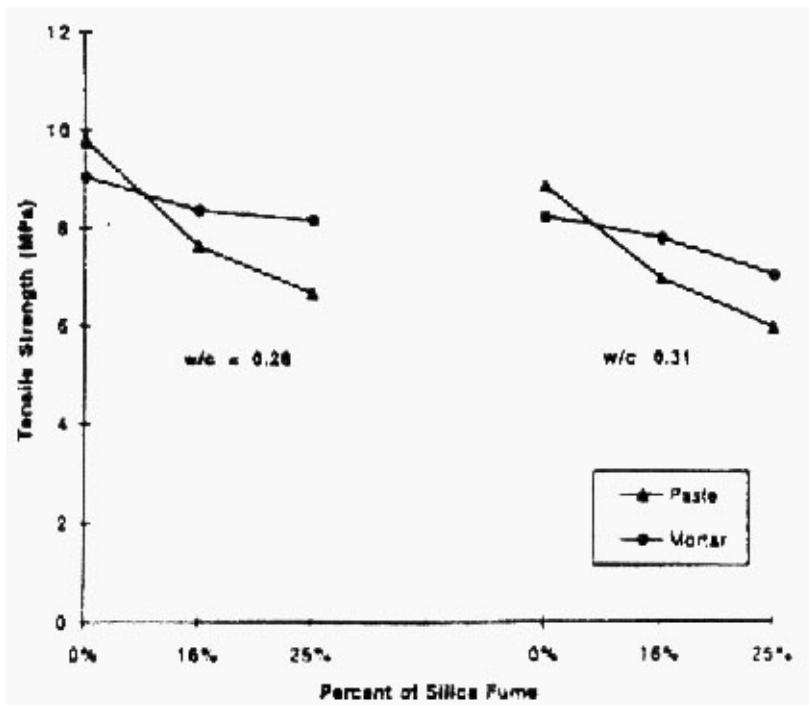
برای این منظور مقاومت فشاری و کششی مستقیم خمیر سیمان خالص و حاوی میکروسیلیس و هم چنین ملات حاوی میکروسیلیس و بدون میکروسیلیس مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه آن کاهش مقاومت فشاری خمیر سیمان حاوی میکروسیلیس نسبت به خمیر سیمان خالص بود. در حالی که ملات حاوی دوده سیلیسی از مقاومت بیشتری نسبت به ملات بدون دوده سیلیسی برخوردار بود [۶۰]. نتایج در شکل ۵-۲ دیده می شود.



شکل ۵-۲- مقاومت فشاری خمیر سیمان و ملات با مقدار مختلف میکروسیلیس

این پژوهشگران هم چنین مقاومت کششی مستقیم را نیز بررسی کردند و نشان دادند که مقاومت کششی خمیر سیمان و ملات حاوی دوده سیلیسی کمتر از خمیر سیمان و ملات بدون دوده سیلیسی می باشد (شکل ۵-۶). توجیه این امر افزایش ترک موئی ناشی از حضور دوده سیلیسی و خود جمع شدگی آن است.

تغییر ریز ساختار منطقه تماس به دلیل وجود دوده سیلیسی توسط دیگران نیز مورد تأیید قرار گرفته است [۱۶۲]. در ملات و بتن، دوده سیلیسی از رشد هیدروکسید کلسیم جلوگیری می نماید و خاصیت پرکنندگی ایفا می کند.



شکل ۶-۲- مقاومت کششی مستقیم خمیر سیمان و ملات با مقادیر مختلف میکروسیلیس

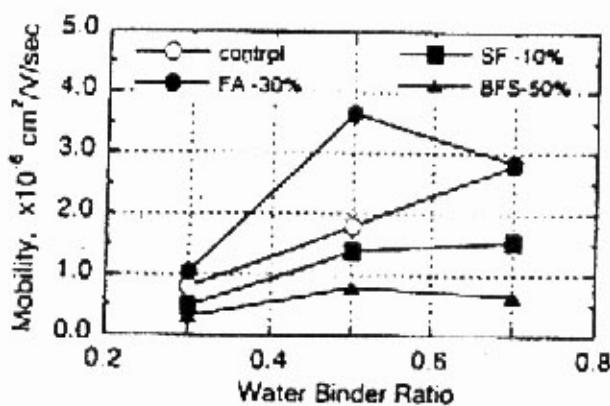
برخی اعتقاد دارند که دوده سیلیسی تأثیر مثبتی بر خواص خمیر سیمان دارد [۶۳]. طبق این نظر پوکی C-S-H حاوی پوزولان ۱۹٪ و پوکی C-S-H بدون پوزولان ۲۸٪ می باشد. نظریه دیگر بر آن است که با وجود دوده سیلیسی تغییرات شیمیایی در منافذ بوجود می آید و نقش مهمی در نفوذ یون کلر دارد. گفته می شود برخی نشان داده اند که نفوذپذیری بتن حاوی میکروسیلیس در برابر آب و هوا کمتر از بتن فاقد میکروسیلیس نمی باشد اما اعتقاد عمومی بر آن است که نفوذپذیری بتن حاوی میکروسیلیس در برابر یون کلر به مراتب کمتر از بتن بدون میکروسیلیس است. بنابر این می توان نتیجه گرفت تخلخل و منافذ (از نظر مقدار و بزرگی اندازه) در این کاهش نفوذپذیری بی تأثیر است و این امر به تحرک یون کلر در بتن مربوط می شود. برخی یون ها مانند Ca, AL و Si از تحرک یون کلر می کاهند اما برخی دیگر مانند K, Na و OH که خود دارای تحرک زیادی هستند باعث تحرک بیشتر یون کلر می گردند. اعتقاد برخی بر آن است که وجود میکروسیلیس باعث آزاد شدن یون کلر می شود زیرا PH بتن به دلیل مصرف هیدروکسید کلسیم کم می گردد. به هر حال علیرغم آزاد شدن یون کلر به خاطر تحرک کم، میزان نفوذ یون کلر کم می شود و افزایش مقاومت

ویژه الکتریکی نیز دلیلی بر این امر می باشد [۶۵]. تحقیقات انجام شده در ایران نیز ضمن تأیید آزاد شدن یون کلر با وجود میکروسیلیس و داشتن پوشش حفاظتی نشان می دهد مقاومت ویژه الکتریکی، آزمایش مناسبی برای کنترل دوام ناشی از خوردگی است [۶۷و۶۵]. غلظت یون های Na^+ ، K^+ و OH^- با حضور دوده سیلیسی در منافذ کاهش یافته و باعث کاهش تحرک یون Cl^- می گردد؛ زیرا تحرک یون های مذکور باعث تحرک Cl^- است [۶۳و۶۴و۶۵].

دوده سیلیسی و مواد افزودنی معدنی تحرک یون کلر را کاهش می دهند.

همان طور که در شکل ۲-۲ مشاهده می شود تحرک Cl^- در بتون حاوی دوده سیلیسی با نسبت آب به سیمان ۰/۰ در حد بتون بدون پوزولان و با نسبت آب به سیمان ۳/۰ می باشد [۶۶].

در بتون سبکدانه وضعیت منطقه تماس بهتر از بتون معمولی است و وجود دوده سیلیسی می تواند به خوبی آن را بهبود بخشد و وجود سبکدانه می تواند از بروز جمع شدگی ناشی از وجود دوده سیلیسی تا حدودی جلوگیری کند. منطقه تماس اثر مهمی در حرکت یون ها دارد لذا دوده سیلیسی به نوبه خود می تواند با بهبود کیفیت منطقه تماس از نفوذ یون ها جلوگیری نماید [۶۶].



شکل ۲-۲- اثر مواد افزودنی معدنی و نسبت آن به سیمان در تحرک Cl^-

۶-۲- خواص بتن با سبکدانه لیکا

۶-۱- مقاومت فشاری

از مشخصه های مهم بتن سبکدانه سازه ای و پر مقاومت، مقاومت فشاری آن است. عوامل متعددی بر مقاومت فشاری بتن سبکدانه تأثیر دارد که بسیاری از آن ها در بتن معمولی نیز به همین صورت موثرند. حداکثر اندازه دانه ها، دانه بندی، جنس (مقاومت و مدول E) سنگدانه، بافت سطحی و جذب آب، شکل ذرات، کیفیت سیمان (جنس و ترکیبات آن)، نسبت آب به سیمان، عیار سیمان، نسبت سنگدانه به سیمان، مواد افزودنی شیمیایی و معدنی، اسلامپ و کارآبی، هوای بتن، اندازه و شکل آزمونه، نحوه اعمال بار و وضعیت سر و ته نمونه، شرایط عمل آوری، شرایط دمای هنگام قالب گیری و شرایط دما و رطوبت در هنگام آزمایش از جمله عوامل موثر در مقاومت فشاری بتن می باشد.

درباره برخی عوامل قبلًا بحث شده است. همان طور که می دانیم در اکثر بتن ها مسئله نسبت آب به سیمان بسیار مهم است و کاهش آن معمولاً به افزایش مقاومت بتن منجر می گردد. برای ساخت بتن های پر مقاومت معمولاً نسبت آب به سیمان به کمتر از ۰/۴۵ می رسد. بتن پر مقاومت سبکدانه طبق ACI 318 دارای مقاومت فشاری استوانه ای ۲۸ روزه بیش از ۳۵Mpa می باشد.

کنترل نسبت آب به سیمان در بتن های سبکدانه مشکل است و در اغلب موارد، بتن سبکدانه را با عیار سیمان و اسلامپ مشخص می کنند [۲۳]. ACI 213 دستیابی به مقاومت های بیش از ۳۵Mpa را در گرو مصرف عیار سیمان ۴۰۰ تا ۵۰۰ کیلو گرم بر متر مکعب می دارد در حالی که اسلامپ ۷۵ تا ۱۰۰ میلی متر و هوای ۵ تا ۷ درصد را منظور کرده است. هم چنین این منبع مصرف سیمان بیش از 600 Kg/m^3 را برای کسب مقاومت های زیاد پیش بینی کرده است.

در حالت عادی بتن سبکدانه دارای مقاومت فشاری ۲۱ تا ۲۸ مگاپاسکال است ولی می توان آن را به بیش از ۴۰ Mpa رساند. معمولاً با مقدار سیمان در اسلامپ ثابت و کاهش حداکثر

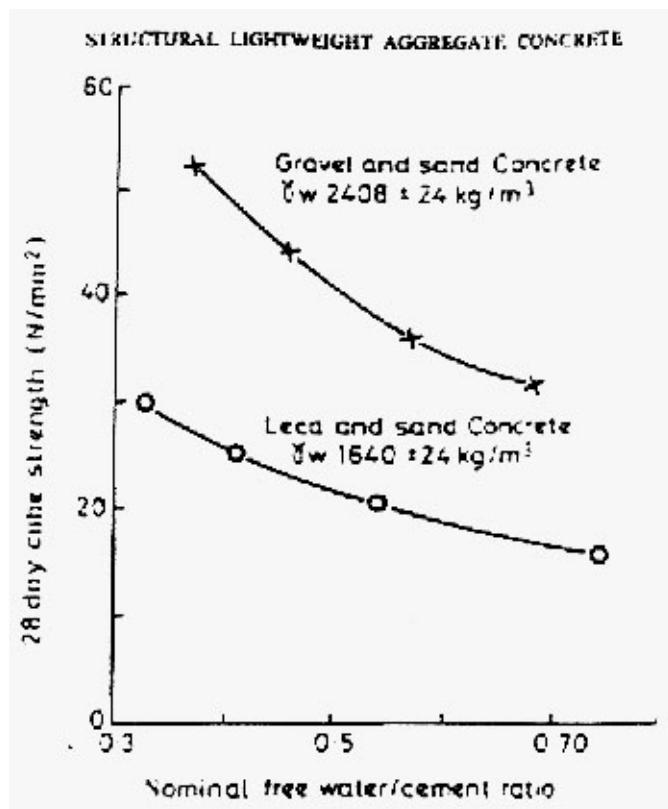
اندازه سبکدانه می توان مقاومت را بالا برد [۳۷]. مثلاً اگر با حداکثر اندازه ۱۹ میلی متر مقاومت ۳۸Mpa داشته باشیم و حداکثر اندازه را به ۱۲/۵ یا ۹/۵ میلی متر برسانیم، مقاومت فشاری آن به ۴۵ و ۴۸ مگاپاسکال خواهد رسید [۲۳]. با جایگزینی ماسه طبیعی به جای سبکدانه ریز می توان مقاومت فشاری را افزایش داد که در این حالت وزن مخصوص بتن سبک نیز افزایش می یابد. کم کردن حداکثر اندازه، افزایش عیار سیمان با اسلامپ مشخص و به عبارتی کاهش نسبت آب به سیمان، جایگزینی ماسه طبیعی به جای سبکدانه ریز، بکارگیری دوده سیلیسی به همراه بکارگیری روان کننده های ممتاز با توجه به استفاده از یک لیکای مشخص می تواند موجب افزایش مقاومت گردد.

با افزایش مقاومت سبکدانه که معمولاً با افزایش چگالی حجمی خشک و وزن مخصوص انبوهی آن همراه است، مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتن سبکدانه حاصله نیز افزایش می یابد. لیکای ایران، جزو لیکاهای سبک و کم مقاومت تلقی می شود و پروژه های تحقیقاتی متعددی سعی کرده اند مقاومت فشاری بتن سبکدانه با لیکا را در شرایط مختلف بدست آورند. در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن بتن سبکدانه با لیکا و ماسه معمولی با نسبت آب به سیمان بالاتر از ۰/۳۹ و حداکثر عیار سیمان 548Kg/m^3 و با وزن مخصوص خشک حداکثر 275Kg/cm^2 ساخته شد که حداکثر مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های مکعبی آن 1670Kg/m^3 بدست آمده است [۳۵]. مقاومت بدست آمده نمونه های استوانه ای بسیار کم و عجیب، به نظر می رسد. هم چنین بتن سبکدانه لیکا بدون ماسه معمولی با نسبت آب به سیمان بیش از ۰/۴۵ و حداکثر عیار سیمان 525Kg/m^3 و حداکثر وزن مخصوص خشک 1425Kg/m^3 ساخته شده که حداکثر مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های مکعبی 195Kg/cm^2 حاصل شده است [۳۵].

در پروژه تحقیقاتی بتن سبکدانه در دانشگاه علم و صنعت، بیشترین مقاومت ها با عیار سیمان 1650Kg/m^3 ، بیش از 400Kg/cm^2 روی نمونه مکعبی و با وزن مخصوص خشک بتن 220Kg/cm^2 بدست آمد [۲۰]. هم چنین تحقیقاتی در دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی بر روی بتن سبکدانه حاوی لیکا و ماسه طبیعی بدون دوده سیلیسی و با دوده سیلیسی انجام شده است که بیشترین

مقاومت ۲۸ روزه نمونه مکعبی بدون میکروسیلیس با عیار سیمان 550 Kg/m^3 با نسبت آب به سیمان تقریبی 0.37 در حدود 174 Kg/cm^2 بدست آمده است. وزن مخصوص بتن خشک در این حالت 1492 Kg/m^3 بوده است. در این تحقیق هم چنین بیشترین مقاومت های ۲۸ روزه با 1.0 درصد دوده سیلیسی جایگزین سیمان برابر 206 Kg/cm^2 حاصل شده است که وزن مخصوص بتن خشک در این رابطه 1426 Kg/m^3 بوده است [۲۲].

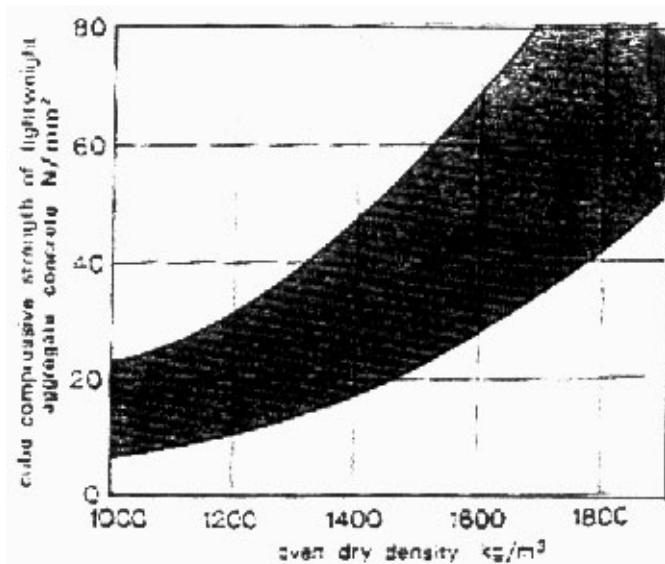
رابطه مقاومت ۲۸ روزه مکعبی بتن سبکدانه با لیکا و ماسه معمولی را با نسبت آب به سیمان در مقایسه با بتن معمولی در شکل ۸-۲ مشاهده می کنید [۸].



شکل ۸-۲- رابطه مقاومت فشاری ۲۸ روزه مکعبی بتن سبکدانه و معمولی با نسبت آب به سیمان

رابطه مقاومت فشاری مکعبی ۲۸ روزه و وزن مخصوص بتن سبکدانه را در شکل ۹-۲

مشاهده می نمایید [۲۱].



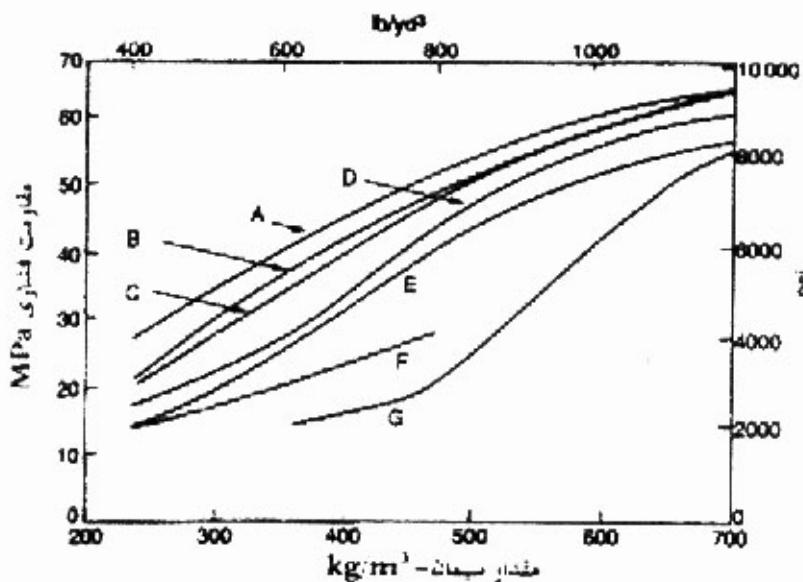
شکل ۹-۲- رابطه مقاومت فشاری مکعبی ۲۸ روزه و وزن مخصوص بتن سبکدانه

رابطه مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های مکعبی با عیارهای مختلف سیمان و سبکدانه های

متفاوت که دارای اسلامپ ۵۰ میلی متر بوده اند را در شکل ۹-۳ مشاهده می نمایید. منحنی

F مربوط به بتن سبکدانه حاوی لیکا و ماسه معمولی است. همان گونه که ملاحظه می گردد در عیارهای

نزدیک به $500 \text{ Kg}/\text{m}^3$ مقاومت بتن دارای لیکا به حدود 30 Mpa می رسد.

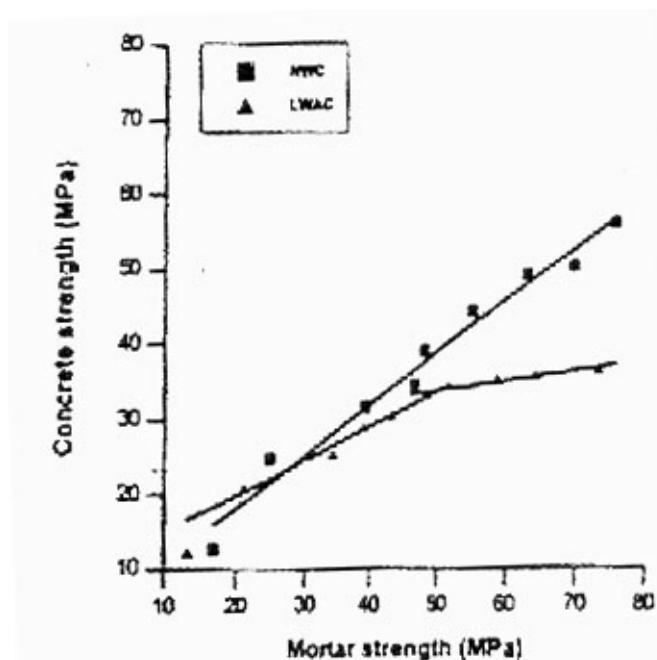


شکل ۲-۱- رابطه مقاومت فشاری ۲۸ روزه مکعبی و عیار سیمان برای بتن با سبکدانه های مختلف

برای رسیدن به مقاومت های بیشتر، کاهش W/C و مصرف دوده سیلیسی و روان کننده ظاهرآ مفید است. اما سقف مقاومتی مانع پیشبرد امر در جهت دلخواه می باشد. این موضوع ابتدا به عنوان نقطه تغییر مقاومت^۱ توسط وايلر و كارل در سال ۱۹۷۲ مطرح شد. نقطه تغییر مقاومت زمانی حاصل می شود که تغییری در توزیع تنش بین ملات و سبکدانه ها در هنگام افزایش تنش فشاری ایجاد گردد و در این زمان منحنی افزایش مقاومت بتن در برابر افزایش ملات دچار شکستگی می شود و شیب آن به مراتب کمتر می گردد.

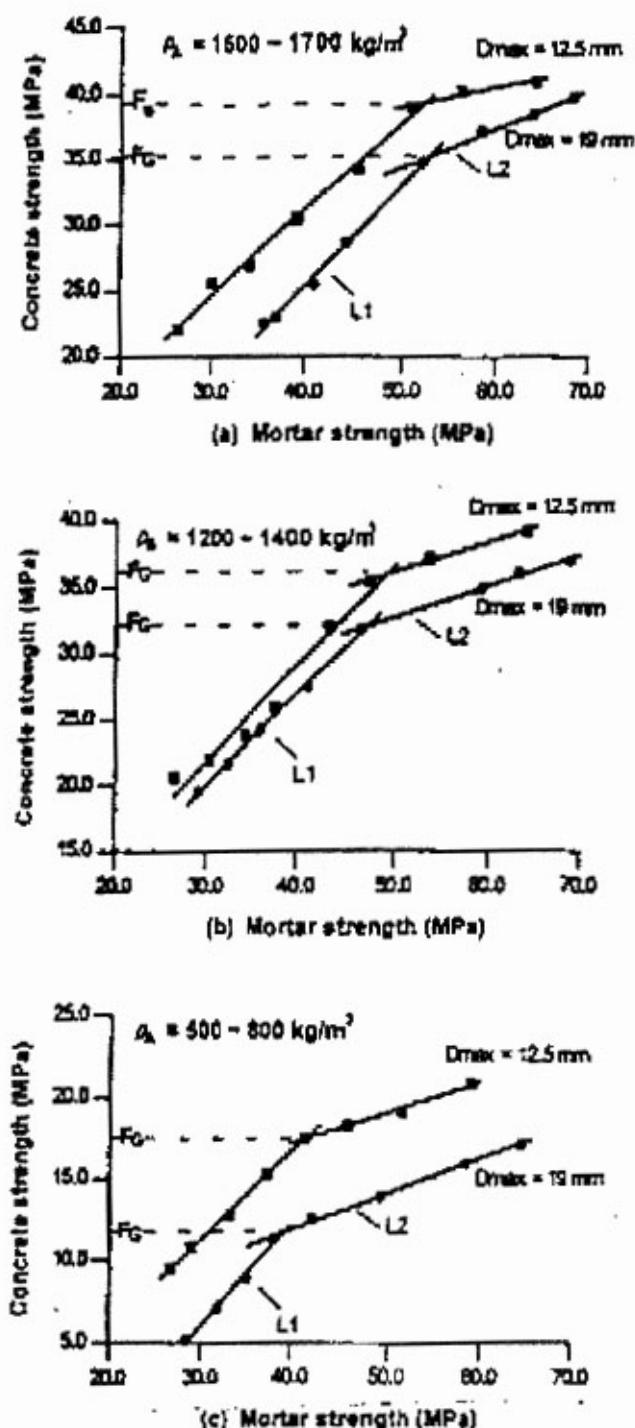
برای بتن سبکدانه معمولاً مقاومت سبکدانه به جای مقاومت ملات تعیین کننده مقاومت بتن سبکدانه است و تقویت ملات نقش چندانی را در افزایش مقاومت بتن ندارد [۳۷].

در شکل ۱۱-۲ منحنی های رابطه افزایش مقاومت بتن و ملات را برای بتن معمولی و سبکدانه و نقطه شکست آن را مشاهده می نمایید.



شکل ۱۱-۲- رابطه بین مقاومت فشاری بتن و ملات آن

هم چنین در شکل ۱۲-۲ رابطه بین مقاومت ملات و بتن سبکدانه با چگالی حجمی متفاوت را می بینید.



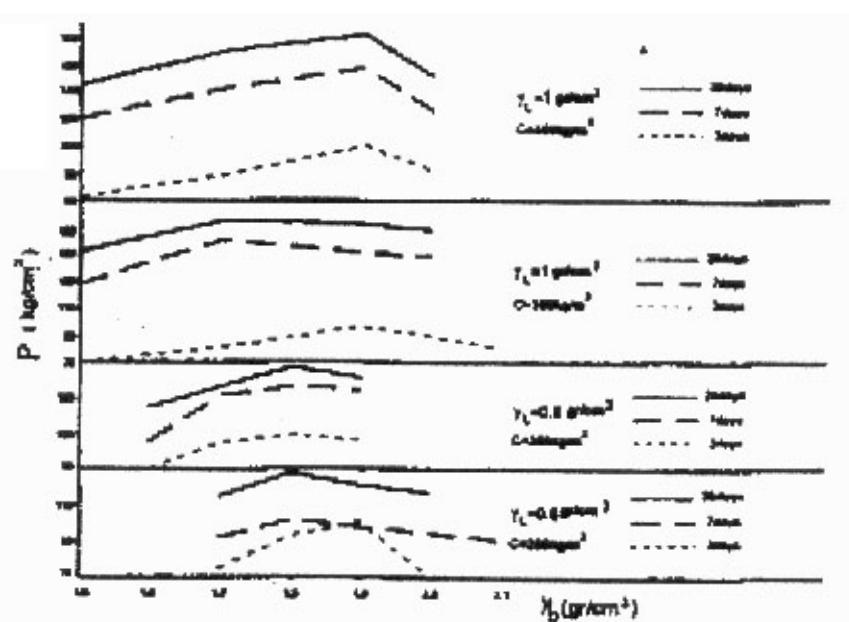
شکل ۱۲-۲- تعیین نقطه تقسیم مقاومت برای های حاوی سبکدانه های با جرم حجمی متفاوت

همان گونه که دیده می شود برای لیکاهاي شبيه ليکا ايران با حداکثر اندازه ۱۲/۵ ميلى متر

نقطه تقسیم مقاومت در حدود ۱۷/۵ MPa می باشد.

محبی [۲۲] برای بتن سبکدانه با لیکای ایران بدون دوده سیلیسی و با دوده سیلیسی با جایگزینی های ۶، ۱۰ و ۱۴ درصد، نقطه تقسیم را به ترتیب برای نمونه های مکعبی ۲۰۰، ۱۷۰، ۲۰۰ و ۱۸۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع متناظر با مواد سیمانی ۴۵۰، ۵۰۰، ۴۰۰ و ۳۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب بدست آورده است.

خالو [۳۸] رابطه تغییرات مقاومت فشاری بتن سبکدانه با لیکا را بر حسب تغییرات وزن مخصوص نشان داده است که در شکل ۱۳-۲ می بینید.



شکل ۱۳-۲- رابطه تغییرات مقاومت فشاری بتن لیکا بر حسب تغییرات وزن مخصوص

برای وزن مخصوص 1900 Kg/m^3 و عیار سیمان 350 Kg/m^3 و با مصرف لیکای با چگالی حجمی خشک $1/0$ ، مقاومت 28 Kg/cm^2 روزه 184 Kg/cm^2 حاصل گردید.

حققان مختلف سعی کرده اند بتن سبک پر مقاومت بسازند و موفق نیز شده اند اما در هیچیک از این موارد از لیکا با چگالی حجمی کمتر از $1/0$ استفاده نشده است [۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲].
به هر حال معمولاً نسبت آب به سیمان در صورت استفاده از لیکا بین $0/25$ تا $0/35$ بوده و دوده سیلیسی در آن بکار رفته است [۳۹ و ۴۰ و ۴۱]. هوف پس از انجام تحقیقاتی در مورد ساخت

بتن سبکدانه پر مقاومت برای مناطق قطبی به این نتیجه رسید که افزایش مقاومت پس از ۲۸ تا ۹۰ روز بسیار جزئی و کمتر از ۱۰ درصد است و در مخلوط های حاوی خاکستر بادی، این افزایش بیشتر می باشد. نسبت مقاومت های ۷ به ۲۸ روزه بین ۸۶ تا ۹۲ درصد است [۱۱].

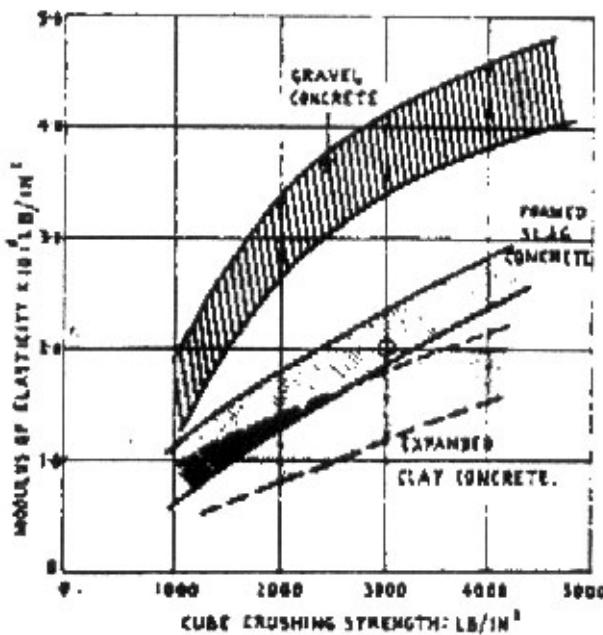
در جنگ جهانی اول بتن حاوی لیکا که در ساختن کشتی مورد استفاده قرار گرفته بود، مقاومت 35Mpa را داشت در حالی که مقاومت های معمول آن زمان برای بتن عادی در حدود 15Mpa بود.

پس از ۳۱ سال مقاومت فشاری مغزه های بتنی بدست آمده از کشتی Selma بین ۵۵ تا ۷۵ مگاپاسکال بدست آمد [۸].

مقاومت فشاری بتن سبکدانه بیش از بتن معمولی، مستقل از آهنگ اعمال تنش و آزمونه های آزمایش بتن است. نسبت بین مقاومت استوانه ای و مکعبی عمدتاً به نوع و مقدار سبکدانه بستگی دارد تا مقاومت بتن سبکدانه [۴۴]. نسبت مقاومت استوانه ای به مکعبی به طور متوسط برای بتن سبکدانه با Leca 800 توسط Smepllass برابر $9/0$ بدست آمده است. هم چنین برای بتن سبکدانه با Leca 700 این مقدار $95/0$ حاصل شده است. برای بتن های سبکدانه که ریزدانه آن نیز لیکا می باشد مقادیر این نسبت تا ۱ نیز بدست آمده است [۹].

۲-۶-۲- خواص الاستیک بتن سبکدانه

در محاسبات سازه ای خواص الاستیک بتن کاربرد جدی دارد. مدول الاستیسیته بتن به مدول الاستیسیته خمیر سیمان و سنگدانه ها و نسبت اشغال فضا توسط آن ها در بتن بستگی دارد. بتن حاوی سنگدانه های معمولی بیشترین مدول الاستیسیته را دارد و دلیل آن بالاتر بودن E سنگدانه معمولی نسبت به سبکدانه ها می باشد. با افزایش مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته بتن سبکدانه با لیکا افزایش می یابد. رابطه بین مقاومت فشاری مکعبی و مدول الاستیسیته استاتیکی در شکل ۱۴-۲ مشاهده می شود [۴۳].



شکل ۱۴-۲- رابطه بین مقاومت فشاری مکعبی و مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته با افزایش عیار سیمان بالاتر می رود. این امر به دلیل کاهش نسبت

آب به سیمان و افزایش مقاومت صورت می گیرد.

رابطه زیر را برای مدول الاستیسیته استانیکی بتن ارائه کرده است. ACI 318

$$E_s = 0.042 \rho_c^{1.5} f_c^{0.5} \quad 21 < f_c < 41 \quad 1440 < \rho_c < 2480 \quad (17-2)$$

مدول الاستیسیته بر حسب E_s Mpa ، ρ_c وزن مخصوص خشک بتن بر حسب Kg/m^3 و

f_c مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه ای استاندارد بر حسب Mpa است.

ACI 363 R برای بتن های معمولی تا مقاومت ۸۳Mpa رابطه دیگری را ارائه کرده است.

$$E_s = 3320 f_c^{0.5} + 6900 \quad (18-2)$$

این منبع ضریب پواسون بتن ۰/۲ روزه با مقاومت های تا ۷۳Mpa برای بتن معمولی را داده است.

در حالی که گزارش هایی در این منبع ارائه شده که ضریب پواسون برای بتن های پر مقاومت ۰/۲ تا

۰/۲۸ گزارش شده است.

در DIN 4219 مدول الاستیسیته بتن سبکدانه با توجه به ردی آن از ۵ تا ۲۳ گیگاپاسکال داده

شده است.

در ENV1992 برای بتن سبکدانه مدول الاستیسیته بتن معمولی در ضریب ρ (p/2200)² ضرب می شود که وزن مخصوص خشک بتن بر حسب Kg/m^3 است [۴۵]. در این رابطه در ۹۰ MC کمیته اروپایی بتن هم آمده است [۴۶].

در NZS3101 نیوزیلند ضریب ρ (p/2300)^{1.5} در رابطه ۱۸-۲ ضرب می گردد [۴۵].

در JSCE مدول الاستیسیته بتن سبکدانه برای مقاومت های ۱۸ تا ۴۰ گیگاپاسکال، بین ۱۳ تا ۱۹ گیگاپاسکال داده شده است.

ضریب پواسون در ENV1992 و MC90 بین ۰/۲۵ تا ۰/۱۵ برای بتن سبکدانه ارائه گشته است [۴۶].

در BS8110 رابطه ۱۹-۲ برای محاسبه E_s بر حسب Gpa ارائه شده است.

$$E_s = 1.7 \rho^2 f_{cu}^{0.33} \times 10^{-6} \quad (19-2)$$

ρ = وزن مخصوص بتن سخت شده ۲۸ روزه در آب [Kg/m^3]

f_{cu} = مقاومت فشاری نمونه مکعبی ۱۵ سانتی متری [Mpa]

ضریب پواسون عمدتاً تابع سن بتن یا عیار سیمان نیست. اما به آهنگ بارگذاری بستگی دارد [۴۸].

تحقیقات انجام شده در ایران برای بتن سبکدانه با لیکا و ماسه [۲۲]، نشان می دهد که برای بتن سبکدانه فاقد دوده سیلیسی و با عیار سیمان ۳۰۰ تا ۵۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول الاستیسیته استاتیکی بین ۱۰ تا ۱۲/۳ گیگاپاسکال و برای بتن سبکدانه دارای ۱۰ درصد دوده سیلیسی با عیار مواد سیمانی ۳۰۰ تا ۵۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول الاستیسیته استاتیکی بین ۱۱/۴ تا ۱۴/۴ گیگاپاسکال بوده است. بنابر این در محدوده مقاومت های ۱۰ تا ۲۰ مگاپاسکال مکعبی، مدول الاستیسیته بین ۱۰ تا ۱۵ گیگاپاسکال بدست آمده است.

در مورد شاخه صعودی رابطه تنش - کرنش بتن سبکدانه با لیکا گفته می شود در بخش عمدۀ ای دارای شکل خطی می باشد؛ زیرا مدول الاستیسیته سبکدانه و ملات نزدیک به یکدیگر است.

رابطه ساده ۲۰-۲ مدول الاستیسیته بتن های سبکدانه پر مقاومت را با مقاومت فشاری

مکعبی ارائه می دهد که در آن وزن مخصوص بتن وجود ندارد.

$$E_s = 1.19 f_{cu}^{\frac{2}{3}} \quad (20-2)$$

f_{cu} مقاومت مکعبی ۲۸ روزه ۱۰ سانتی متری است و می توان مقاومت استوانه ای استاندارد را

۰/۸ برابر آن دانست [۴۹]. هم چنین محققین دیگر برای بتن سبکدانه پر مقاومت رابطه ای را پیشنهاد

کرده اند که فرم اصلاح شده رابطه ۱۸-۲ می باشد [۵۰].

$$E_s = (3320 f_c^{0.5} + 6900) \left(\frac{\rho}{2320} \right)^{1.5} \quad (21-2)$$

که در آن ρ وزن مخصوص خشک بتن است.

ضریب پواسون نیز برای شرایط مرتبط نگهداری شده بین ۰/۱۳ تا ۰/۲۴ بدست آمد و

متوسط آن ۰/۰۲ بدون توجه به مقاومت و شرایط نگهداری و سن بتن پیشنهاد شد [۵۰].

در مورد مدول الاستیسیته دینامیکی و تعیین ضریب پواسون دینامیکی منابع بسیار محدودی

وجود دارد. رابطه ساده ۲۲-۲ با توجه به فرض ضریب پواسون معادل ۰/۳۴ داده شده است [۴۷].

$$E_d = 0.000183 \rho V^2 \quad (22-2)$$

E_d = مدول الاستیسیته دینامیکی [Psi]

ρ = وزن مخصوص بتن [lb/ft^3]

V = سرعت پالس طولی [ft/Sec]

این رابطه ظاهراً مدول بزرگی را بدست می دهد.

امروزه رابطه ۲۳-۲ بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد [۴۸].

$$E_d = \frac{\rho V^2 (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad (23-2)$$

ρ = وزن مخصوص بتن [Kg/m^3]

V = سرعت پالس طولی [Km/Sec]

μ = ضریب پواسون بتن

ضریب پواسون دینامیکی معمولاً بیشتر از استاتیکی است و حدود ۰/۲۴ داده می شود.

معمولًاً بین مدول استاتیکی و دینامیکی روابطی را برقرار می کنند این روابط معمولاً به عوامل دیگر بستگی ندارد. ساده ترین رابطه به صورت رابطه ۲۴-۲ توسط Lydon و همکاران داده شده است [۴۸].

$$E_s = 0.83E_d \quad (24-2)$$

در ۲۵-۲ رابطه CP110:1972 ارائه شده بود.

$$E_s = 1.25E_d - 19 \quad (25-2)$$

مقادیر مدول بر حسب گیگا پاسکال است.

برای بتن های با عیار بیش از 500 Kg/m^3 و بتن سبکدانه روابط فوق صادق نیست. برای

بتن سبکدانه رابطه ۲۶-۲ توسط Swamy و همکاران پیشنهاد شده است [۴۸].

$$E_s = 1.04E_d - 4.1 \quad (26-2)$$

هم چنین رابطه دیگری که تابع وزن مخصوص بتن می باشد پیشنهاد شده است [۴۷] و برای

بتن معمولی و سبکدانه صادق است.

$$E_s = \frac{446E_d^{1.4}}{\rho} \quad (27-2)$$

که مدول ها بر حسب Gpa و ρ بر حسب Kg/m^3 می باشد.

خالو و همکار [۸۴] اثر شرایط عمل آوری را بر مقاومت و مدول الاستیسیته بتن سبکدانه

پر مقاومت حاوی شیل منبسط شده بدست آورده اند. هم چنین روابطی را نیز برای تعیین

مدول الاستیسیته با توجه به مقاومت فشاری ارائه کرده اند.

۳-۶-۲- مقاومت کششی و خمشی

مقاومت کششی و خمشی یکی از ویژگی های مهم برای محاسبات سازه ای است.

مقاومت کششی معمولاً به صورت آزمایش برزیلی شکافت^۱ روی نمونه های استوانه ای و حتی مکعبی انجام می شود. هر چند روش هایی برای تعیین کشش مستقیم نیز ارائه شده است؛ اما هنوز کاربرد جدی ندارد [۴۷].

آزمایش خمشی^۲ به دو صورت با بار در وسط دهانه و به صورت اعمال بار در یک سوم و دو سوم دهانه انجام می شود و نتیجه به عنوان مدول گزارش گردد. مقاومت خمشی معمولاً بزرگتر از مقاومت کششی شکافتی است [۴۸].

در ACI318 برای مقاومت کششی شکافتی بتن سبکدانه با ماسه معمولی رابطه ۲۸-۲ و برای بتن سبکدانه با ماسه سبک رابطه ۲۹-۲ ارائه شده است.

$$f_{sp} = 0.53 f_c^{0.5} \quad (28-2)$$

$$f_{sp} = 0.47 f_c^{0.5} \quad (29-2)$$

در ACI363 برای مقاومت کششی شکافتی بتن معمولی طبق رابطه ۳۰-۲ و برای بتن با مقاومت زیاد رابطه ۳۱-۲ داده شده است.

$$f_{sp} = 0.62 f_c^{0.5} \quad (30-2)$$

$$f_{sp} = 0.59 f_c^{0.5} \quad (31-2)$$

کمیته اروپایی FIP برای بتن سبکدانه رابطه ۳۲-۲ را پیشنهاد کرده است [۲۱].

$$f_{ct} = 0.23 f_{cu}^{0.67} \quad (32-2)$$

که در آن f_{ct} همان مقاومت کششی غیر مستقیم بر حسب Mpa و f_{cu} مقاومت مکعبی بر حسب Mpa است.

ضریب کاهنده ای را طبق رابطه ۳۴-۲ با توجه به وزن مخصوص بتن سبکدانه خشک پیشنهاد کرده اند [۴۵ و ۴۶].

$$f_{ct} = 0.3 f_{cu}^{0.67} \quad (33-2)$$

$$\eta = 0.4 + \frac{0.6\rho}{2200} \quad (34-2)$$

همین منبع مقاومت کششی مستقیم محوری را $0/9$ برابر مقاومت کششی شکافت و $0/5$ برابر مقاومت خمشی داده است [۵۱].

مقاومت خمشی را طبق رابطه ۳۵-۲ برای بتن های سبکدانه ارائه کرده است [۲۱].

$$f_{cf} = 0.46 f_{cu}^{0.67} \quad (35-2)$$

$$\text{ مقاومت خمشی } = f_{cf} [\text{Mpa}]$$

$$\text{ مقاومت مکعبی } = f_{cu} [\text{Mpa}]$$

مقاومت خمشی (مدول گسیختگی) را طبق رابطه ۳۶-۲ و برای بتن معمولی داده است.

$$f_r = 0.7 f_c^{0.5} \quad (36-2)$$

مقاومت خمشی را طبق رابطه ۳۷-۲ و برای بتن پر مقاومت داده است.

$$f_r = 0.94 f_c^{0.5} \quad (37-2)$$

مقاومت خمشی را طبق رابطه ۳۸-۲ و ۳۹-۲ برای بتن دارای سبکدانه، ماسه و تمام سبکدانه داده است.

$$f_r = 0.6 f_c^{0.5} \quad (38-2)$$

$$f_r = 0.53 f_c^{0.5} \quad (39-2)$$

خانم Zhang و همکاران، مقاومت کششی شکافت بتن سبکدانه پر مقاومت و مقاومت خمشی (مدول گسیختگی) آن را طبق روابط ۴۰-۲ و ۴۱-۲ ارائه داده اند [۴۹].

$$f_{sp} = 0.23 f_c^{0.67} \quad (40-2)$$

$$f_r = 0.73 f_c^{0.5} \quad (41-2)$$

محبی در دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی برای بتن سبکدانه با ماسه آزمایش هایی را بر روی بتن بدون دوده سیلیسی و با دوده سیلیسی انجام داده است [۲۲]. وی برای بتن سبکدانه بدون دوده سیلیسی نسبت مقاومت کششی شکافت استوانه ای به مقاومت فشاری مکعبی را بین ۰/۱ تا ۰/۱۱ و برای بتن های حاوی ۱۰ درصد دوده سیلیسی جایگزین شده، این نسبت را بین ۰/۰۸ تا ۰/۰۹ بدست آورده است و عملاً نسبت ۰/۰۸ تا ۰/۱۱ حاصل شده است. این بتن ها عمدتاً دارای مقاومت های فشاری کمتر از 20 Mpa بوده اند. این تحقیقات با لیکای ایران انجام گشته است.

خالو منحنی هایی را برای ایجاد ارتباط بین مقاومت کششی بتن سبکدانه حاوی لیکا و وزن مخصوص بتن بدست آورده است [۳۸]. در این تحقیق مشخص شده که مقاومت کششی با افزایش عیار سیمان، افزایش یافته و بیشترین مقاومت کششی با بتن حاوی 350 Kg/m^3 سیمان و وزن مخصوص 1900 Kg/m^3 و لیکای با چگالی حجمی $1/0$ ، برابر $29/5\text{ Kg/cm}^2$ حاصل شده است.

به هر حال آن چه مشخص است، کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش مقاومت فشاری، مقاومت های کششی و خمشی متناسبأً افزایش می یابد.

در تحقیقات انجام شده به اثر مستقل عیار سیمان، دانه بندی و حداکثر اندازه و شکل دانه، سن (عمر) بر مقاومت کششی و خمشی بتن سبکدانه پرداخته نشده است؛ اما برای بتن معمولی این اثرات روشن است [۴۸].

مقاومت فشاری بتن سبکدانه سریع تر از مقاومت کششی رشد می کند. نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری بتن سبکدانه بین ۵ تا ۱۵ درصد برای مقاومت های بیش از 20 Mpa است. مقاومت کششی شکافتی بتن سبکدانه توانمند ۶ تا $6/5$ درصد مقاومت فشاری استوانه ای است و مقاومت خمشی آن $9/8$ تا $10/5$ درصد مقاومت فشاری استوانه ای می باشد [۹].

۱-۶-۴- جمع شدگی^۱

جمع شدگی در بتن های سبکدانه سازه ای از اهمیت برخوردار است. اصولاً جمع شدگی بتن به صورت جمع شدگی خمیری^۲، جمع شدگی خودزا^۳ و جمع شدگی ناشی از خشک شدن^۴ می باشد. حتی جمع شدگی ناشی از کربناته شدن نیز وجود دارد. جمع شدگی نوع اول و سوم مربوط به خروج آب از بتن است. اما در جمع شدگی خودزا، آب از بتن خارج نمی شود و حتی این پدیده ممکن است تورمی باشد و در بتن های با نسبت آب به سیمان خیلی کم، چشمگیر می باشد. این نوع جمع شدگی در دماهای بیشتر، عیار سیمان زیادتر، سیمان های ریزتر و دارای C_4AF و C_3A و C_4AF بیشتر و با وجود افزودنی ها افزایش می یابد.

جمع شدگی بتن کمتر از جمع شدگی خمیر سیمان خالص است زیرا سنگدانه ها قید داخلی ایجاد می کنند. جمع شدگی خودزا در بتن، نصف این نوع جمع شدگی در خمیر سیمان خالص است.

جمع شدگی خمیری در همان ابتدای بتن ریزی و تا مرحله گیرش بتن در اثر تبخیر ایجاد می شود و مشکل آن ترک خوردگی می باشد. مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان، اسلامپ، دانه بندی و آب انداختن بتن از عواملی هستند که میزان جمع شدگی خمیری را تغییر می دهند[۴۸].

جمع شدگی ناشی از خشک شدن در بتن ها از اهمیت بیشتری نسبت به دو نوع جمع شدگی قبلی برخوردار است؛ زیرا در طول بهره برداری و پس از خاتمه عمل آوری مقدار آن افزایش می یابد. جمع شدگی ناشی از خشک شدن در ابتدا کم بوده و با خروج آب به تدریج افزایش می یابد. عواملی مانند نسبت آب به سیمان، عیار سیمان، درصد اشغال سنگدانه در بتن، بافت سطحی، شکل و اندازه و دانه بندی سنگدانه و هم چنین نوع و مدول الاستیسیته آن، آب بتن، شرایط عمل آوری، وجود افزودنی ها و مواد پوزولانی و مواد زیان آور، عمر بتن و حتی به میزان ناچیزی نوع سیمان بر میزان جمع شدگی اثر می گذارد[۱۹].

1 - Shrinkage

2- Plastic Shrinkage

3 - Autogenous Shrinkage

4- Drying Shrinkage

به دلیل جمع شدن مقادیر جمع شدگی و تورم های احتمالی، اندازه گیری جمع شدگی ها به تفکیک و به صورت دلخواه کاری بس مشکل می باشد. به هر حال جمع شدگی بر روی نمونه ای اندازه گیری می شود که دارای قید خارجی و یا قیدهای داخلی است. لذا جمع شدگی بالقوه و واقعی بدست نمی آید و به جای آن یک جمع شدگی ظاهری حاصل می شود. کنترل شرایط محیطی نیز کار اندازه گیری را مشکل می نماید و اندازه و ابعاد نمونه نیز بر نتیجه اثر می گذارد.

برای بتن های معمولی ACI 209R رابطه ۴۲-۲ را جهت پیش بینی جمع شدگی در زمان های مختلف بر اساس جمع شدگی نهایی ارائه داده است.

$$S_t = \frac{t}{35+t} S_{ult} \quad (42-2)$$

S_t =جمع شدگی بتن ۷ روز عمل آوری شده در محیط مرطوب پس از t روز از پایان عمل آوری
 S_{ult} =جمع شدگی نهایی

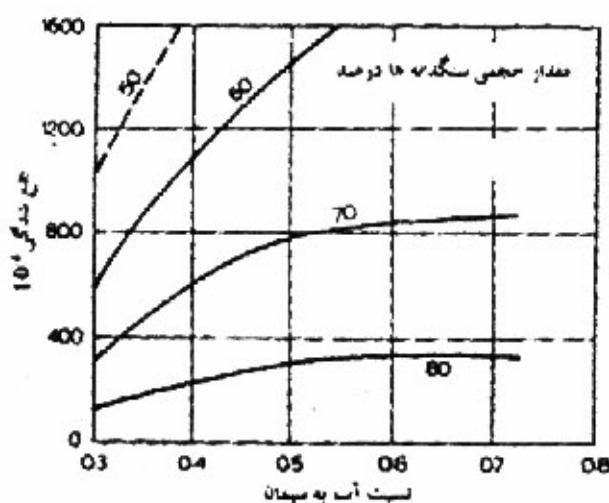
رابطه ۴۳-۲ برای نسبت جمع شدگی بتن به خمیر سیمان خالص داده شده است [۴۸].

$$\frac{S_c}{S_p} = (1-a)^n \quad (43-2)$$

a =میزان حجم اشغال شده توسط سنگدانه در بتن

n =عدد تجربی بین $1/2$ تا $1/7$

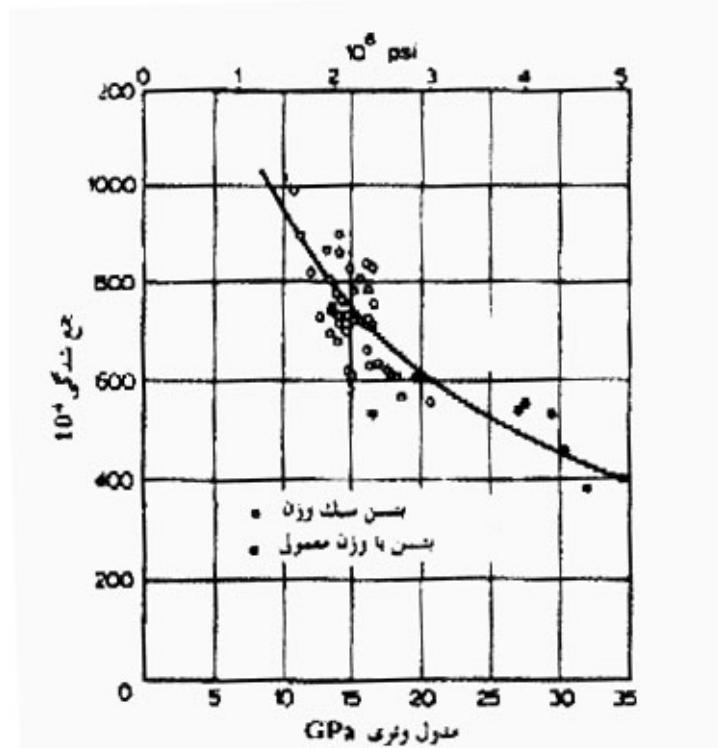
شکل ۱۵-۲ اثر نسبت آب به سیمان و میزان حجمی سنگدانه را بر جمع شدگی بتن نشان می دهد.



شکل ۱۵-۲- تأثیر نسبت آب به سیمان و مقدار سنگدانه بر جمع شدگی

در بخش ۵ آیین نامه BS1881:1970 روشی برای تعیین جمع شدگی کوتاه مدت در شرایط خاصی ارائه شده است. در C137 ASTM نیز روشی برای تعیین جمع شدگی تجویز شده است. انتظار می‌رود جمع شدگی بتن سبکدانه بیشتر از بتن معمولی مشابه باشد. جمع شدگی بتن حاوی شیل منبسط شده حدود یک سوم بیشتر از بتن با سنگدانه معمولی گزارش شده است [۴۸]. علت این امر قید و مدول الاستیسیته کمتر سبکدانه می‌باشد.

هم چنین شکل ۱۶-۲ رابطه جمع شدگی ناشی از خشک شدن ۲ ساله را با توجه به مدول الاستیسیته و تری ۲۸ روزه بتن نشان می‌دهد [۱۹].



شکل ۱۶-۲- رابطه بین جمع شدگی حاصل از خشک شدن پس از ۲ سال و مدول الاستیسیته و تری بتن

اگر مقاومت بتن سبکدانه و معمولی یکی باشد، به دلیل مصرف سیمان بیشتر در بتن سبکدانه، استعداد جمع شدگی بتن سبکدانه بیشتر خواهد بود [۹].

جمع شدگی بتن سبکدانه در یک اتاق خشک ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ میکروکرنش است که ۱ تا ۱/۵ برابر بتن معمولی می‌باشد. برای بتن سبکدانه حاوی رس و شیل منبسط شده با مقاومت ۳۰ تا

۵۰ مگاپاسکال که در فضایی با دمای 20°C و رطوبت نسبی ۶۵٪ نگهداری شود، جمع شدگی نهایی ۵۰۰ تا ۶۰۰ میکروکرنش است. مسلماً این مقادیر تابع نحوه عمل آوری و اندازه آزمونه ها خواهد بود.

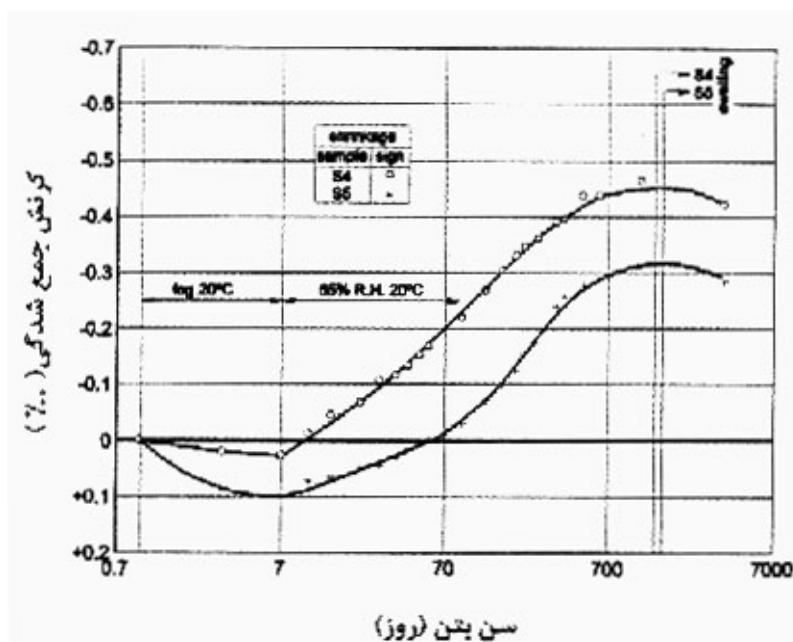
برای مقاومت های کمتر در بتن سبکدانه، جمع شدگی نسبت به بتن معمولی بیشتر خواهد بود [۹]. Prost و همکاران وی در سال ۱۹۸۰ سه بتن سبکدانه حاوی لیاپور ۸، برویلیت^۱ و لیکا را که به ترتیب مقاومت های ۶۵، ۴۳ و ۳۳ مگاپاسکال را داشتند، پس از ۷ روز عمل آوری در رطوبت صد درصد در محیطی با رطوبت نسبی ۶۵٪ و دمای 20°C مورد آزمایش قرار دادند. در ۷ روز اول عمل آوری ۱۰۰ میکرو کرنش تورم دیده شد و سپس در مرحله آزمایش جمع شدگی ۵۰۰ تا ۶۰۰ میکروکرنش در جهت طولی و ۸۰۰ تا ۹۰۰ میکروکرنش در جهت عرضی مشاهده گردید. کاهش آب بتن در ۷ روز اول $\frac{1}{3}$ درصد و پس از ۲ سال، ۵ تا ۶ درصد بود و پس از ۳ تا ۴ سال جمع شدگی و کاهش وزن بتن هنوز متوقف نشده بود. وی نتیجه گرفت که جمع شدگی بتن سبکدانه ۵۰ تا ۱۳۰ درصد از مقدار توصیه شده در منابع آلمانی بزرگتر است [۹].

بکارگیری شکل تیز گوشه، دانه بندی و بافت سطحی زبر به دلیل افزایش آب لازم و سیمان برای ایجاد کارآیی معین، جمع شدگی را افزایش می دهد. سبکدانه شکسته و با منافذ آشکار شده، جمع شدگی را تا ۱۰۰ میکروکرنش بالاتر برده است. جایگزینی ماسه طبیعی به جای سبکدانه طبق گزارش های روسی و لهستانی، جمع شدگی را در حدود ۱۲ درصد کاهش داده است [۹]. در بتن سبکدانه آب از دست رفته توسط خمیر سطحی، با آب داخل سبکدانه جبران می شود. این امر باعث می گردد که یک تأخیر زمانی برای جمع شدگی در مقایسه با بتن معمولی بوجود آید.

این پدیده توسط Cembureau در سال ۱۹۷۴ و Theissing و همکاران در سال ۱۹۷۱ گزارش شده است و بر این مبنای ابتدا این امر، جمع شدگی بتن سبکدانه از بتن معمولی به خاطر وجود رطوبت زیاد در سنگدانه ها کمتر است. این در واقع وقتی اتفاق می افتد که مقاومت کششی هنوز کم است [۹].

به خاطر ساختار متخلخل سبکدانه، خود سبکدانه نیز در معرض جمع شدگی است و این مسئله می‌تواند دلیلی دیگر بر افزایش جمع شدگی بتن سبکدانه باشد.

در شکل ۱۷-۲ جمع شدگی و تورم دو بتن سبکدانه پر مقاومت دیده می‌شود. پدیده جالب آن است که پس از حدود ۵ تا ۱۰ سال بتن متورم شده، در حالی که امکان جذب رطوبت از خارج برای بتن مقدور نبوده است. توجیه این پدیده می‌تواند وجود آب در سنگدانه‌های بتن باشد.



شکل ۱۷-۲- جمع شدگی و تورم در بتن سبکدانه پر مقاومت

اثر شکل و اندازه نمونه یا قطعه برای قطعات لاغر در بتن سبک و معمولی به صورت یکسان گزارش شده است. در قطعات ضخیم تر، جمع شدگی بتن سبک با تأخیر قابل ملاحظه ای به دلیل وجود آب در سبکدانه ایجاد می‌گردد و حتی ممکن است تورم نیز مشاهده شود که ناشی از مکیدن آب توسط خمیر سیمان از سبکدانه می‌باشد. جمع شدگی نهایی بتن سبکدانه با پیش مرطوبی، مشابه یا حتی بیشتر از بتن سبکدانه ای است که با سنگدانه خشک ساخته شده است [۹].

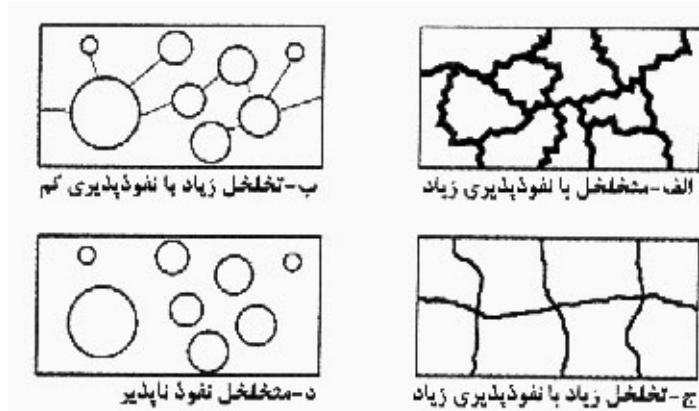
کار تحقیقاتی جدی بر روی بتن سبکدانه حاوی لیکای ایرانی در رابطه با جمع شدگی ملاحظه نشده است.

۶-۲- پوکی^۱ و نفوذپذیری^۲ بتن سبکدانه

پوکی و تخلخل ساختار بتن حاوی سیمان برای درک رفتار آن از اهمیت برخوردار است.

مقاومت، جذب و نفوذپذیری، خواص حرارتی و خزش به پوکی و تخلخل ساختار خمیر سیمان بستگی دارد. به نظر می رسد بتن های سبکدانه باید به دلیل پوکی بیشتر، از نفوذپذیری بیشتری برخوردار و دوام کمتری داشته باشند؛ در حالی که این امر عومومیت ندارد و لازم است به طور دقیق تر به رابطه پوکی و نفوذپذیری پرداخت.

در مواردی که پوکی به عنوان عاملی برای تعیین مقاومت خمیر سیمان بکار می رود و روابطی برای آن ارائه می گردد، توجهی به ساختار منافذ و ارتباط یا عدم ارتباط آن ها با یکدیگر نمی شود. اما وقتی که رابطه پوکی و نفوذپذیری مطرح می شود، اختلاف بین این دو نوع منفذ بسیار مهم می باشد. در شکل ۱۸-۲ اختلاف بین عملکرد منافذ کاملاً مشهود است.



شکل ۲- نمایش شماتیک اختلاف اجسام از نظر نوع تخلخل و نفوذپذیری مرتبط با آن

مسلم است که ارتباط بین منافذ شرط لازم برای نفوذپذیری است. ممکن است مصالحی متخلخل باشد اما به دلیل ارتباط بین منافذ، نفوذپذیر نباشد و از این نظر با دوام تلقی گردد. بنابر این باید گفت نفوذپذیری بتن صرفاً تحت تأثیر نفوذپذیری و تخلخل سنگدانه نیست. سبکدانه پس از اختلاط از خمیر سیمان، آب جذب می کند و بنابر این پس از ریختن در

قالب، نسبت آب به سیمان در نزدیکی سنگدانه‌ها کاهش می‌یابد و در نتیجه نفوذپذیری ناحیه تماس کمتر می‌گردد. به هر حال این امر زمانی متوقف می‌شود و این زمان تابع رطوبت اولیه سنگدانه، نوع سنگدانه، مقدار آب و روانی خمیر سیمان و ویژگی‌های خمیر سیمان از نظر ایجاد مقاومت در برابر از دست دادن آب می‌باشد [۹].

علاوه بر ویژگی‌های خمیر سیمان، سنگدانه و ناحیه تماس آن‌ها که بر پوکی و نفوذپذیری موثر است، ریز‌ترک‌های موجود در خمیر سیمان نیز نقش مهمی را در نفوذپذیری ایفاء می‌کنند. نسبت آب به سیمان و درجه پیشرفت هیدرasiون، تخلخل خمیر سیمان را مشخص می‌کند [۹].

نواحی تماس در بتن معمولی ممکن است به یکدیگر ارتباط داشته باشد و موجب نفوذپذیری گردد، اما در بتن سبکدانه این سیستم نفوذ ناپذیرتر است و انتظار می‌رود در شرایط مشابه از نظر خمیر سیمان، بتن سبکدانه نفوذ ناپذیرتر از بتن معمولی باشد.

بیشتر سبکدانه‌ها دارای منافذ باز هستند و می‌توانند به عنوان منبع آب برای عمل آوری درونی بکار روند و مسلماً خمیر سیمان ناحیه تماس از این امر بهره بیشتری می‌برد و کیفیت بالاتری را کسب می‌کند که موجب نفوذناپذیری بیشتر خمیر سیمان و ناحیه تماس می‌گردد. در اطراف سبکدانه متخلخل، ساختار نفوذناپذیری قرار دارد و بنابر این بتن نفوذناپذیرتری حاصل می‌گردد. دهها پژوهشگر نشان داده اند که نفوذپذیری بتن سبکدانه کمتر و یا حداقل مساوی بتن معمولی مشابه بوده است [۹]. کشتی‌هایی که با سبکدانه لیکا در جریان جنگ جهانی اول و دوم ساخته شده اند، مصدقه بارزی برای این امر هستند.

برخی نیز ادعا کرده اند که همه بتن‌های سبکدانه نفوذپذیری بیشتری نسبت به بتن معمولی دارند [۶۸]، در حالی که ایشان در جای دیگر عکس این ادعا را دارند [۱۹].

۶-۶-۲- جذب آب بتن سبکدانه

حجم منافذ بتن صرف نظر از توزیع اندازه آن ها و سهولت حرکت سیال در آن ها، به وسیله آزمایش های جذب آب اندازه گیری می شود. در این رابطه معمولاً بتن خشک می شود و سپس داخل آب غوطه ورشده و مقادیر آب جذب شده نسبت به وزن بتن خشک اولیه بدست می آید. در روش های مختلف تفاوت هایی دیده می شود و لذا مقایسه نتایج به سهولت مقدور نیست. نحوه خشک کردن بتن از نظر دما، مدت زمان غوطه وری و اندازه گیری جذب در این روش ها متفاوت است.

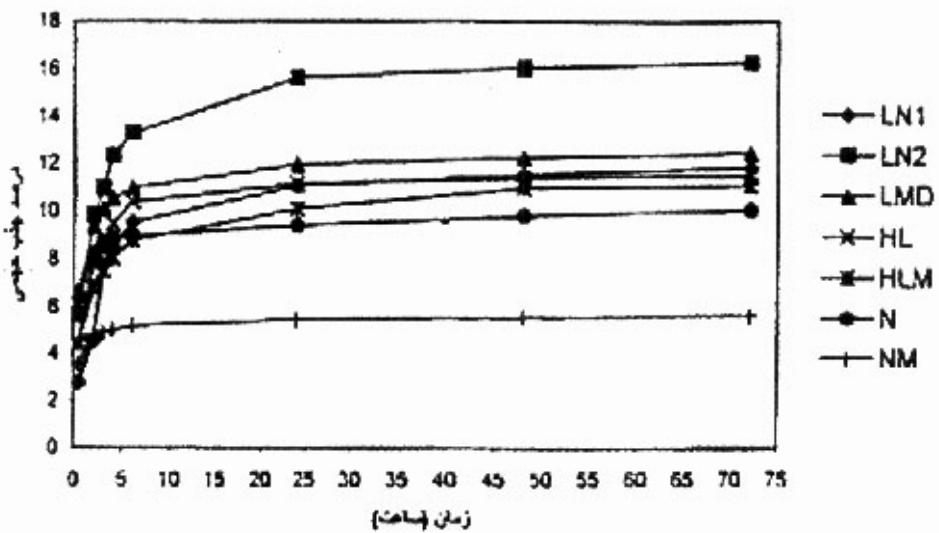
ASTM C642 و BS 1881 دارای آزمایش جذب آب هستند و عمدتاً آن را برای کنترل قطعات و محصولات پیش ساخته بکار می بردند [۱۹].

در BS 1881 آزمایش جذب آب سطحی به ویژه برای منطقه پوشش روی میلگردها پیش بینی شده است که نتایج آن به سادگی قابل تفسیر نیست و به علت اشکالات موجود در آن چندین آزمایش اصلاح شده برای آن پیشنهاد شده که عمومیت نیافته است [۱۹].

Figg نیز آزمایشی را ابداع کرد که در سوراخ کوچکی که در بتن ایجاد می شود و درب آن با لاستیک سیلیکون بسته می شود، سوزنی را فرو می بند که به پمپ خلاً وصل می باشد و هوای آن مکیده می شود. هوا از درون بتن عبور کرده و فشار آن بیشتر می شود و با توجه به مکش و فشار موجود، نفوذپذیری هوا در بتن بدست می آید. این کار را با آب نیز می توان انجام داد و پیشنهاداتی برای این امر شده است [۱۹].

اطلاعات کمی برای جذب آب بتن های سبکدانه در منابع مختلف وجود دارد.

در ایران، قدوسی این آزمایش را برای تعیین جذب آب نیم ساعته تا سه روزه بکار برده است و جذب آب را به صورت وزنی برای بتن معمولی میکروسیلیس دار بیش از بتن نیمه سبک و سبک میکروسیلیس دار بدست آورده است [۲۷]. بتن های سبکدانه دارای لیکا بودند. در شکل ۱۹-۲ نتایج این تحقیق ملاحظه می گردد.



شکل ۲-۱۹- رابطه افزایش جذب آب با زمان برای انواع بتن ها

محبی نیز با لیکای ایران بتن سبکدانه با ماسه را مورد آزمایش قرار داده است و کمترین جذب آب را برای بتن سبکدانه حاوی میکروسیلیس با میزان جایگزینی ۱۰ درصد و بتن سبکدانه بدون میکروسیلیس و با عیار 350 Kg/m^3 سیمان، کمترین جذب آب به صورت حجمی کمتر از ۴/۶ درصد بدست آمده است؛ اما مقایسه ای با بتن های معمولی مشابه صورت نگرفته است. هم چنین برای بتن سبکدانه بدون میکروسیلیس بیشترین جذب حجمی $9/8$ درصد بوده است [۲۲].
به نظر می رسد انجام آزمایش جذب آب نباید به عنوان شاخص دوام منظور شود.
بر خلاف آنچه در استانداردهای موجود آمده است، به نظر می رسد جذب آب برای مقایسه بین بتن معمولی و سبکدانه باید به صورت حجمی تعیین گردد و جذب آب وزنی می تواند گمراه کننده باشد [۶۶].
مسلماً جذب آب بتن هایی که در هوا خشک شده اند از بتن های خشک شده در آون کمتر خواهند بود [۲۲].

۷-۶-۲- جذب آب مؤینه بتن سبکداره

در این روش بخشی از آزمونه بتنی در داخل آب قرار می گیرد و آب با مکش مؤینه رو به بالا وارد خلل و فرج بتن می گردد. افزایش وزن آزمونه بتنی که معادل حجم آب جذب شده است تعیین می گردد و بر سطح آزمونه که در تماس با آب بوده است، تقسیم می شود. در زمان های مختلف این کار، یعنی تعیین حجم آب جذب شده در واحد سطح انجام می گیرد.

جذب آب مؤینه به جای نفوذپذیری در هنگامی که فشار آب وجود ندارد، کنترل کننده عبور آب است [۸۷]. بخش سطحی بتن نقش مهمی در دوام دارد [۸۶ و ۸۸]. رابطه ۴۴-۲ برای این آزمایش توسط Rilem [۸۹] داده شده است که برای مصالح ساختمانی کاربرد دارد [۲۷ و ۸۸ و ۶۹].

$$i = C + S\sqrt{t} \quad (44-2)$$

i = حجم آب جذب شده در واحد سطح [mm]

t = زمان بر حسب ساعت یا دقیقه

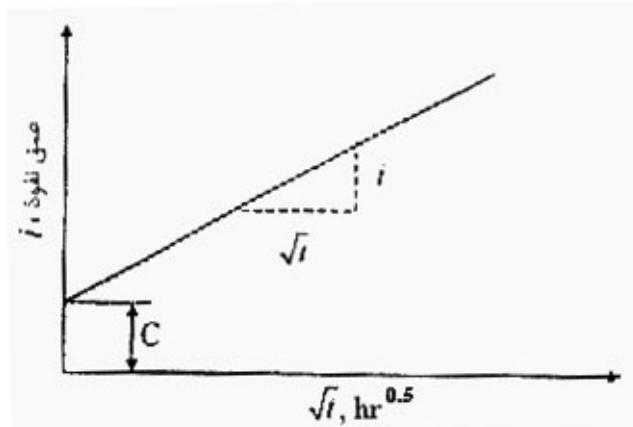
S = ضریب جذب مؤینه [$\text{mm}/\text{min}^{0.5}$] یا [$\text{mm}/\text{hr}^{0.5}$]

C = ثابت جذب مؤینه [mm]

C تابع نوع بتن و روش پرداخت سطح آن می باشد.

نمونه های خشک شده در آون به نحوی در ظرف آب قرار می گیرند که همواره فقط آن داخل آب باشد و قرائت ها معمولاً در زمان های ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۶، ۲۴ و ۷۲ ساعت انجام ۵mm می شود تا بتوان پس از رسم و برازش خط گذرنده از نقاط موجود در محور مختصات $i = t^{0.5}$ مقادیر S و C را مانند شکل ۲۰-۲ بدست آورد.

به عنوان مثال برای بتن معمولی با نسبت آب به سیمان ۰/۴، مقدار ضریب جذب مؤینه در حدود $mm/min^{0.5}$ ۰/۰۹ و برای نسبت آب به سیمان ۰/۶، این مقدار حدود $mm/min^{0.5}$ ۰/۱۷ است [۱۹].



شکل ۲۰-۲- نمودار جذب موئینه

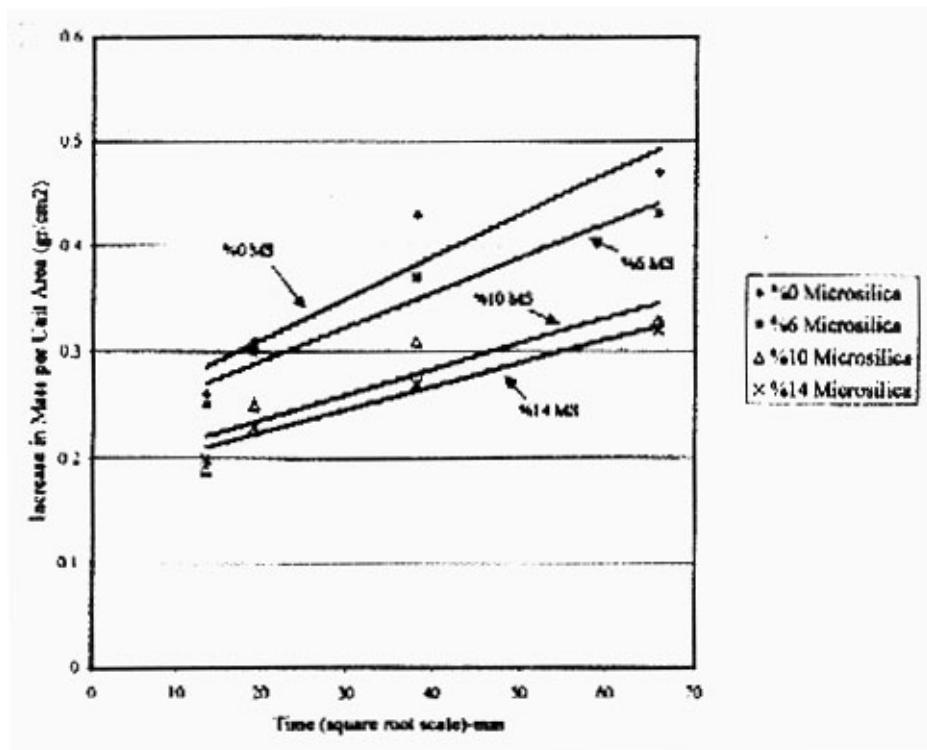
این آزمایش برای بتن های بالاتر از سطح آب بسیار مطلوب می باشد [۸۸]. برای جذب موئینه بتن سبکدانه اطلاعات کمی در منابع وجود دارد. در ایران، قدوسی برای بتن سبکدانه بالیکا، نیمه سبکدانه بالیکا، ماسه و همچنان بتن معمولی مقادیر S و C را بدست آورده است که در جدول ۸-۲ می بینید. مقادیر S بر حسب $\text{mm/hr}^{0.5}$ می باشد [۲۷].

$$1 \text{ mm/hr}^{0.5} = 0.129 \text{ mm min}^{0.5}$$

جدول ۸-۲- رابطه جذب موئینه برای انواع بتن ها

رابطه جذب موئینه $i = C + S\sqrt{t}$	علامت معروف	نوع بتن
$i = 1/91 + 0.78\sqrt{t}$	LN1	بتن سبک
$i = 1/28 + 0.838\sqrt{t}$	LN2	
$i = 2/15 + 0.39\sqrt{t}$	LMD	
$i = 1/52 + 1/11\sqrt{t}$	HL	بتن نیمه سبک
$i = 1/21 + 0.47\sqrt{t}$	HLM	
$i = 1/94 + 0.48\sqrt{t}$	NM	بتن معمولی

هم چنین محبی برای بتن سبکدانه با لیکا و ماسه با عیارهای سیمان مختلف بدون میکروسیلیس و با میکروسیلیس آزمایش جذب موئینه را انجام داده که نمونه نتایج آن را در شکل ۲۱-۲ مشاهده می کنید.



شکل ۲۱-۲- نمودار جذب موئینه بتن سبک لیکا با مقادیر مختلف میکروسیلیس و مقدار سیمان ۵۰۰ Kg/m³

در این تحقیق با بالا رفتن مقدار سیمان، ضریب جذب موئینه کمتر شده است. هم چنین با جایگزینی میکروسیلیس، ضریب جذب موئینه کم گشته است و جایگزینی حدود ۱۰ درصد میکروسیلیس بهترین نتایج و کمترین عمق نفوذ موئینه را نشان داده است. وی جذب موئینه بتن سبکدانه با لیکا را بیش از بتن معمولی دانسته و با مصرف میکروسیلیس نشان داده است. بتن سبکدانه از نظر جذب موئینه در ردیف بتن معمولی قرار می گیرد. مسلماً بتن هایی که در هوا خشک شده اند با آهنگ کنتری آب موئینه را نسبت به بتن خشک شده در آون جذب می کنند [۲۲].

۸-۶-۲- نفوذ^۱ (انتشار) یون کلر در بتون سبکدانه

نفوذ (انتشار) یون کلرید در بتون در رابطه با خوردگی میلگردها مهم است. پارامتر مهمی که در این رابطه مورد بررسی قرار می‌گیرد، ضریب نفوذ (انتشار) یون کلرید می‌باشد [۷۰].

نفوذ یون کلر به درون بتون برای محیط نیمه بی‌نهایت و شرایط ثابت محیطی و تماسی، از قانون دوم فیک^۳ پیروی می‌کنند. وقتی یون کلر به حد معین و بحرانی برسد به شرط آن که سایر شرایط فراهم باشد، خوردگی میلگرد آغاز می‌گردد. رابطه ۴۵-۲ بر اساس قانون دوم فیک بدست آمده است و فرض شده غلظت یون کلر در بتون در ابتدا صفر نبوده است.

$$C(x,t) = C_i + (C_s - C_i) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{4tD}} \right) \quad (45-2)$$

$C(x,t)$ = مقدار یون کلر در عمق x در زمان t از ابتدای در معرض قرار گرفتن

C_i = مقدار یون کلر اولیه در بتون

C_s = مقدار یون کلر در سطح بتون که در تماس با محیط یون کلر باشد

erf^* = تابع خطأ

D = ضریب نفوذ یا انتشار یون کلر در بتون

D در اینجا مستقل از زمان منظور می‌شود؛ اما باید دانست نتایج آزمایشگاهی و مطالعات کارگاهی بر روی سازه‌های موجود نشان می‌دهد که رابطه عمر بتون و ضریب نفوذ یون کلر در محور مختصات کاملاً لگاریتمی، خط مستقیم می‌باشد. مدل ریاضی آن را می‌توان به دو صورت رابطه (۴۶-۲) نشان داد [۷۰].

$$D(t) = D_R \left(\frac{t_R}{t} \right)^k \quad (46-2)$$

$D(t)$ = ضریب نفوذ یون کلر به صورت تابع زمان t

t_R = زمانی که ضریب نفوذ مبنا یعنی D_R بدست آمده است

k = پارامتر حاصله از برآش منحنی نتایج

ضریب نفوذ ممکن است علاوه بر زمان، تابع عمق نیز باشد.

Higgins نشان داده است که ۱۰ میلی متر بالای نمونه های بتن، معمولاً دارای نسبت آب به سیمان بیشتر به خاطر آب انداختن و عیار سیمان کمتری نسبت به مغز بتن می باشد. هم چنین به علت عمل آوری ناکافی ضریب انتشار یون کلر در بخش سطحی بیشتر است.

Tumidagaski و همکاران با توجه به قانون دوم فیک و فرض ضریب نفوذ متغیر و پروفیل یون کلر در بتن توانستند ضرائب انتشار یون کلر را در زمان های مختلف و برای عمق های مورد نظر یون کلر بدست آورند [۷۱].

Tumidagaski و همکاران پروفیل یون کلر را به صورت رابطه ۴۷-۲ فرض نمودند که با فرض رابطه ۴۸-۲ وضعیت نتایج ضریب نفوذ تغییر می کند و با واقعیت سازگارتر می گردد [۷۲].

$$C = A \cdot e^{\frac{-B}{x}} \quad (47-2)$$

$$C = ALnx + B \quad (48-2)$$

$C =$ مقدار یون کلر

$x =$ عمق اندازه گیری یون کلر

$A =$ ضرائب رابطه

Poulsen با استفاده از رابطه ۴۵-۲ روشی را برای محاسبه ضریب انتشار یون کلر ارائه نموده است [۷۳] که بدان پرداخته می شود.

تابع خطرا می توان با تقریب مانند رابطه ۴۹-۲ در نظر گرفت.

$$erf(a) = \left(1 - \frac{a}{\sqrt{3}}\right)^2 \quad 0 \leq a < \sqrt{3} \quad (49-2)$$

برای مقادیر $a \geq \sqrt{3}$ تابع خطرا صفر فرض می شود. بدین ترتیب رابطه ۴۵-۲ به صورت ۵۰-۲ در می آید.

$$C(x, t) \approx C_i + (C_s - C_i) \left(1 - \frac{x}{\sqrt{12tD}}\right)^2 \quad (50-2)$$

رابطه ۵۰-۲ در محدوده $(12tD) \leq x \leq 0$ صادق است. برای مقادیر $(12tD) > x$ مقدار $C(x, t)$ برابر

C_i خواهد شد.

فرض شده است که این محدوده برابر است با

$$0.1 \leq \frac{x}{\sqrt{12tD}} < 0.9 \quad (51-2)$$

عبارت رابطه ۵۱-۲ برابر U منظور شده است. چون غلظت یون کلر در سطح بتن بسیار زیاد است، $U \geq 0/1$ فرض گردیده و $a < 0/9$ نیز در رابطه $a < \sqrt{12tD}$ منظور شده است. رابطه ۵۰-۲ را می توان به صورت رابطه ۵۲-۲ نوشت.

$$\sqrt{C(x,t) - C_i} = \sqrt{C_s - C_i} - x \sqrt{\frac{C_s - C_i}{12tD}} \quad (52-2)$$

می توان با جایگزینی

$$\begin{aligned} y &= \sqrt{C(x,t) - C_i} \\ q &= \sqrt{C_s - C_i} \\ a &= -\sqrt{\frac{C_s - C_i}{12tD}} = -\frac{q}{\sqrt{12tD}} \end{aligned}$$

در رابطه ۵۲-۲، رابطه ۵۳-۲ را بدست آورد.

$$y = ax + q \quad (53-2)$$

با استفاده از معادله ۵۳-۲ و با بکارگیری پروفیل یون کلر می توان C_s , C_i و D را بدست آورد. برای این کار مقدار C_i میانگین دو قرائت نهایی پروفیل یون کلر منظور می شود. هم چنین تمام مقادیر یون کلر اندازه گیری شده باید به متغیر جدید y تبدیل گردد و برای x و y یک خط برازش شده بدست می آید و a و q تعیین می شود. سپس از رابطه ۵۴-۲ مقدار C_s یعنی غلظت سطحی یون کلر بدست می آید.

$$C_s = q^2 + C_i \quad (54-2)$$

سپس مقدار D یعنی ضریب انتشار یون کلر طبق رابطه ۵۵-۲ محاسبه می گردد.

$$D = \frac{\left(\frac{q}{a}\right)^2}{12t} \quad (55-2)$$

پس از محاسبه D باید محدوده $0/9 \leq U \leq 0/1$ ارضاء شود. اگر این شرط برآورده نشود، باید نقاط خارج از محدوده را حذف کرد و مراحل فوق را تکرار نمود تا D نهایی حاصل گردد. اگر مقدار C_s تخمینی با C_s واقعی تفاوت زیادی داشته باشد ضریب نفوذ بدست آمده پر خطا و غیر واقعی خواهد بود

در غیر اینصورت روش برآش خطی Poulsen بسیار مناسب و آسان می باشد [۷۲].

با محاسبه ضریب نفوذ پتانسیل و مینا برای یون کلر، هم چنین با فرض غلظت بحرانی یون کلر (آستانه خوردگی) می توان زمان شروع خوردگی را محاسبه نمود [۷۰ و ۷۷].

اطلاعات کمی در مورد نفوذ یون کلر به درون بتن سبک و ضریب نفوذ آن وجود دارد و در طول چند سال اخیر مطالعاتی به ویژه توسط کمیته اروپایی بتن انجام شده است [۷۰].

نسبت آب به سیمان بیشتر باعث افزایش میزان نفوذ یون کلر در بتن می شود. روباره آهنگدازی، نفوذ یون کلر را کمتر می کند [۷۴]. افزودن پوزولان ها مانند دوده سیلیسی، نفوذناپذیری بتن در برابر یون کلر را بهبود می بخشد.

عمق نفوذ یون کلر در بتن سبکدانه با بتن معمولی که عیار مواد چسباننده سیمانی مشابه دارد، تفاوت چندانی ندارد [۹].

بتن سبکدانه پر مقاومت نسبت به بتن معمولی هم مقاومت، در برابر نفوذ رطوبت و یون کلر، نفوذناپذیرتر است [۷۵].

دوده سیلیسی مهمترین نقش را در مقابل نفوذ یون کلر در بتن سبکدانه پر مقاومت ایفا کرده است [۷۶]. با ۹ درصد جایگزینی سیمان با دوده سیلیسی، نفوذناپذیری به نصف کاهش یافته است. برای مخلوط های بتنی حاوی دوده سیلیسی، عمر مفید بتن پیش تنیده و بتن آرمه با پوشش ۷۵ میلی متر به ترتیب ۳۰ تا ۶۰ سال و ۱۳۰ تا ۶۰ سال تخمین زده شده است. اگر این مخلوط های بتن، بدون دوده سیلیسی باشند، عمر مفید به ترتیب به ۱۳ و ۲۳ سال کاهش می یابد [۹].

اختلاف در کیفیت سنگدانه بتن سبکدانه تفاوت چندانی را در نفوذناپذیری یون کلر نشان نمی دهد مشروط بر آن که عیار سیمان آن ها مساوی و دارای کیفیت مطلوبی باشد [۷۷ و ۷۸].

مقدار زیاد آب اولیه در سنگدانه سبک ممکن است نفوذ یون کلر را افزایش دهد [۷۶].

یورف [۷۲] و همکاران وی افزایش دمای عمل آوری را عامل نفوذناپذیری بیشتر یون کلر در بتن سبکدانه خشک و مرطوب می دانند. این افزایش در دمای عمل آوری 65°C آغاز شد.

در مطالعات وسیع آزمایشگاهی و در محل، برخی محققان بتن سبکدانه را در شرایط مختلف

عمل آوری و شرایط مختلف ساحل دریا قرار دادند و اندازه گیری های ۴ ساله نشان داد که اثر دمای عمل آوری تا 95°C در نفوذپذیری یون کلر بسیار کم است [۷۹]. شاید دلیل این نتیجه گیری متضاد با تحقیقات یورف، استفاده از ۵ تا ۹ درصد دوده سیلیسی و روباره تا حد ۵۰ درصد در مخلوط های آزمایش شده، باشد؛ زیرا این مواد در دمای زیاد فعالیت بیشتری را بروز می دهند و این نتیجه گیری برای بتن سبکدانه بدون مواد پوزولانی ممکن است، صدق نکند [۹]. تحقیقات انجام شده در رابطه با اثر دمای محیط مجاور بر ضریب نفوذ یون کلر بتن سبکدانه نشان داده است که در دمای ۵ و ۳۵ درجه سانتی گراد ضریب نفوذ اندکی بیشتر از دمای 20°C می باشد [۷۰].

در ایران در رابطه با نفوذپذیری بتن سبکدانه در برابر یون کلرید تا کنون نتیجه یک تحقیق منتشر شده است [۲۷].

ضریب انتشار مبنا در بتن های کاملاً سبک بین ۱۹۷ تا ۲۰۵ میلی متر مربع در سال، برای بتن های نیمه سبک ۱۹۸ تا ۲۳۹ میلی متر مربع در سال و برای بتن معمولی $222\text{mm}^2/\text{year}$ بدست آمده است. ضریب انتشار پتانسیل برای بتن های کاملاً سبک بین ۴۰۴ تا ۴۲۰ میلی متر مربع در سال، برای بتن نیمه سبک ۴۰۵ تا ۴۸۹ میلی متر مربع در سال و برای بتن معمولی $455\text{mm}^2/\text{year}$ بدست آمده است.

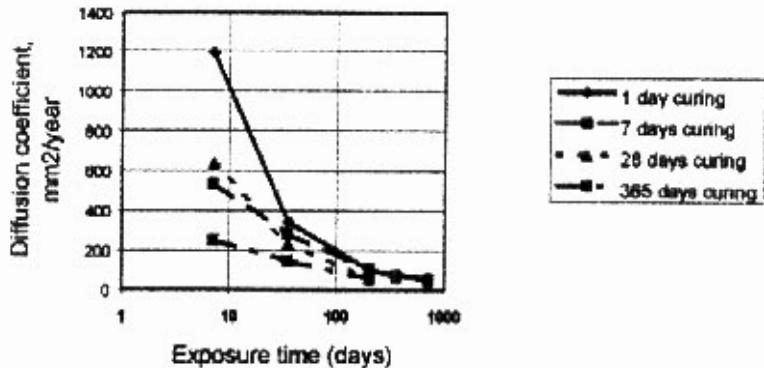
بدین ترتیب مشخص شد که کمترین ضریب انتشار پتانسیل، در بتن نیمه سبک حاوی دوده سیلیسی و بیشترین مقدار برای بتن نیمه سبک بدون دوده سیلیسی حاصل گشته است و در تمام انواع بتن اثر دوده سیلیسی در کاهش ضریب نفوذ یون کلر مشهود می باشد. اعتقاد محقق بر آن است که دوام بتن سبکدانه می تواند در حد بتن معمولی باشد.

این نتایج هر چند با مصالح متفاوتی در مقایسه با تحقیقات اتحادیه اروپا انجام شده است؛ اما شباهت خوبی با نتایج اتحادیه اروپا دارد [۷۰].

تحقیقات اتحادیه اروپا [۷۰] نشان می دهد افزایش مدت عمل آوری بتن سبکدانه موجب کاهش ضرائب نفوذ در ابتدای قرارگیری در معرض یون کلر می شود؛ اما پس از مدت معین در محیط حاوی یون کلر، اثری از مدت عمل آوری در خواص بتن مشاهده نمی گردد. شکل ۲۲-۲ این پدیده را

نشان می دهد.

ظاهراً نشان داده است که دمای عمل آوری تأثیر چندانی بر ضریب نفوذ در بتن سبکدانه حاوی دوده سیلیسی ندارد. با گذشت زمان در معرض قرار گرفتن، از نفوذ کاسته می شود. غلظت یون کلر محیط تأثیری بر ضریب نفوذ نداشته است [۷۰].



شکل ۲-۲- رابطه بین زمان عمل آوری، زمان در معرض قرار گرفتن و ضریب نفوذ یون کلر برای مخلوط های بتنی بدون پوزولان

نتایج مشاهدات کشتی های بتن سبکدانه با لیکا که سال ها از ساخت و شناوری آن ها می گذرد، نشان می دهد که نفوذ یون کلر در آن ها محدود بوده و علیرغم پوشش بتنی روی میلگردها در حد ۱۳ میلی متر، خوردگی در میلگردها به طور جدی رخ نداده است [۷۹ و ۸۰].

۶-۲- مقاومت ویژه الکتریکی^۱ بتن سبکدانه

بتن مانند هر ماده دیگر دارای هدایت الکتریکی^۲ و به عبارتی مقاومت الکتریکی است. هدایت و مقاومت معانی عکس یکدیگر دارند. وجود رطوبت و تخلخل در بتن باعث کاهش مقاومت و افزایش هدایت الکتریکی آن می باشد [۹۳]. وجود یون های پر تحرک مانند یون کلر، مقاومت الکتریکی بتن را شدیداً کاهش می دهد [۱۹]. کاهش الکتروولیت موجود در بتن که با کاهش رطوبت حاصل می گردد، مقاومت را بالا می برد.

برای این که مقاومت الکتریکی بتن صرف نظر از ابعاد مشخص گردد، مقاومت ویژه الکتریکی

طبق رابطه ۲-۵۶ تعریف شده است [۸۰].

$$R_s = \frac{R \cdot A}{L} \quad (56-2)$$

R_s = مقاومت ویژه الکتریکی $[\Omega \cdot m]$

R = مقاومت الکتریکی اندازه گیری شده جسم $[\Omega]$

A = سطح تماس بتن با صفحات اتصال الکتریکی (سطح مقطع نمونه) $[m^2]$

L = فاصله بین سطوح تماس بتن و صفحات اتصال الکتریکی (ارتفاع نمونه) $[m]$

مقاومت ویژه بتن های خشک شده در هوا حدود $10^4 \Omega \cdot m$ و خشک شده در آون $10^9 \Omega \cdot m$

است و عایق نسبتاً خوبی تلقی می شود. در حالی که برای بتن مرطوب و اشباع این مقاومت حدود $10^2 \Omega \cdot m$ می باشد [۸۰].

مقاومت ویژه خمیر سیمان سخت شده مرطوب با نسبت آب به سیمان بیشتر، کاهش چشمگیری را در مقایسه با نسبت آب به سیمان کم نشان می دهد. کاهش سیمان در بتن با وجود ثابت بودن نسبت آب به سیمان باعث افزایش مقاومت الکتریکی به دلیل کاهش الکتروولیت می گردد [۸۱].

مقاومت ویژه بتن با ترکیبات مختلف توسط Hughes و همکاران وی داده شده است [۸۱].

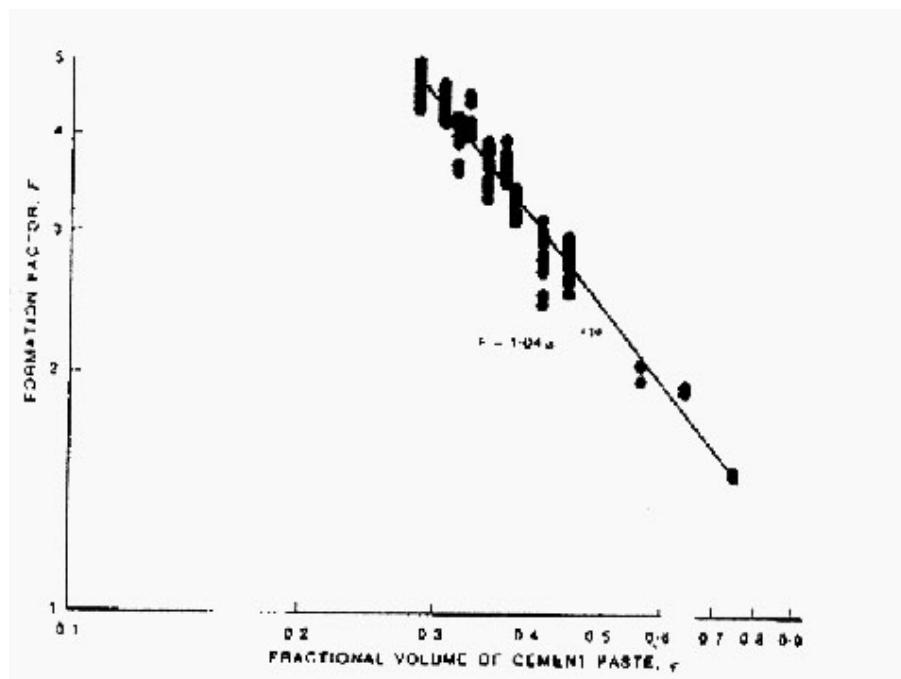
در صورت لزوم می توان مقادیر مقاومت ویژه بتن را با توجه به مقاومت ویژه خمیر سیمان و

سنگدانه بتن بدست آورد [۸۰].

در شکل ۲۳-۲ اثر حجم سنگدانه را در رابطه با ضریب F که نسبت مقاومت بتن به مقاومت

خمیر سیمان است، مشاهده می نمایید. مقاومت الکتریکی بتن معمولاً ۳ تا ۴ برابر مقاومت

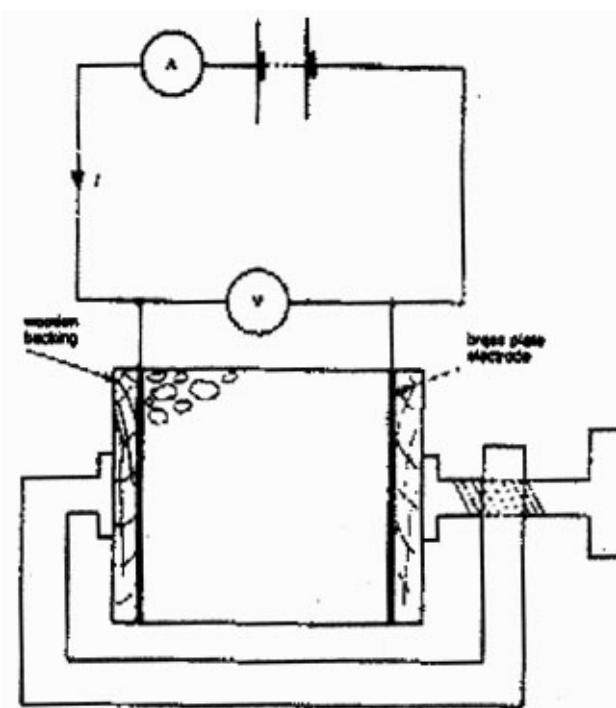
خمیر سیمان است [۸۰].



شکل ۲۳-۲- رابطه نسبت مقاومت الکتریکی بتن به خمیر سیمان با تغییر سهم خمیر سیمان در بتن

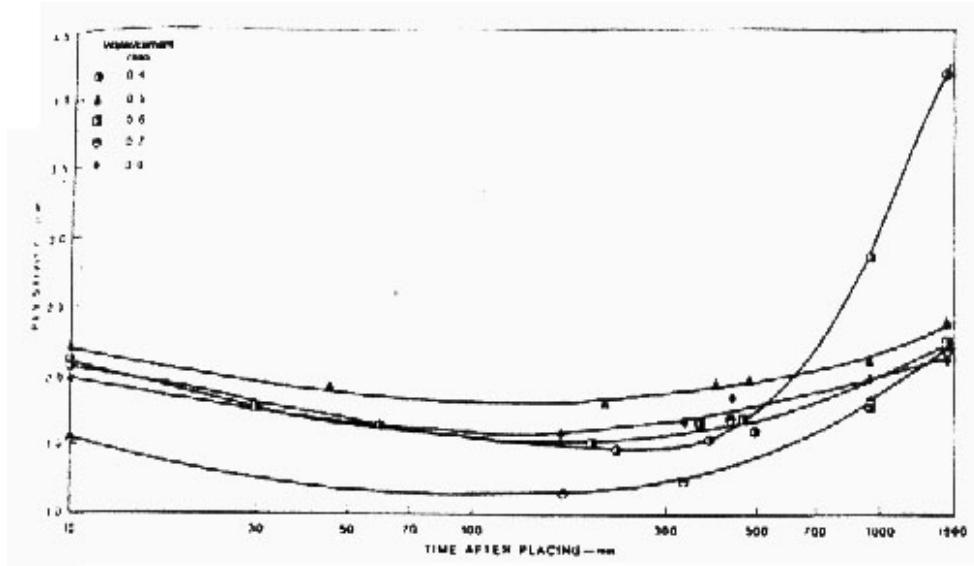
در شکل ۲۴-۲ نحوه خاص تعیین مقاومت الکتریکی بتن سخت شده را

مشاهده می کنید [۸۰].

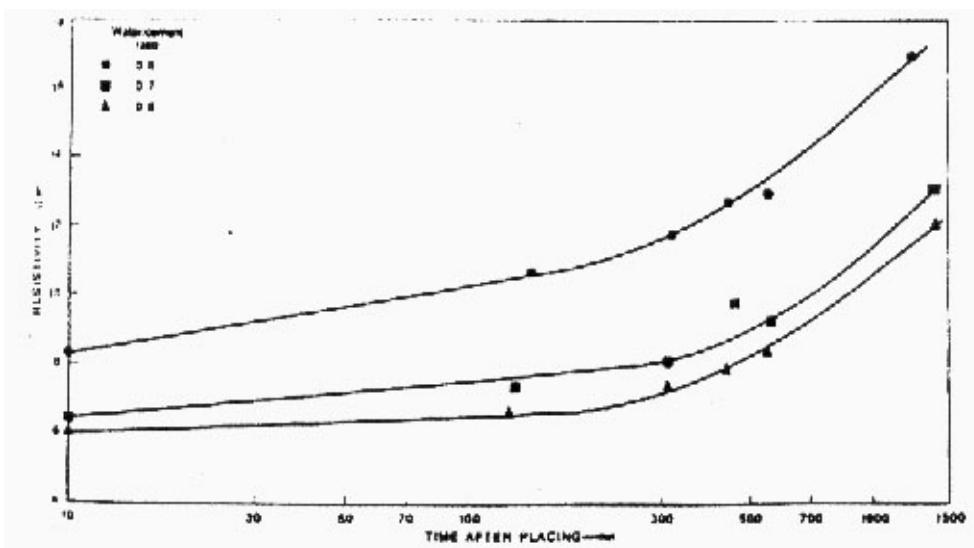


شکل ۲۴-۲- شکل شماتیک برای آزمایش مقاومت الکتریکی بتن سخت شده

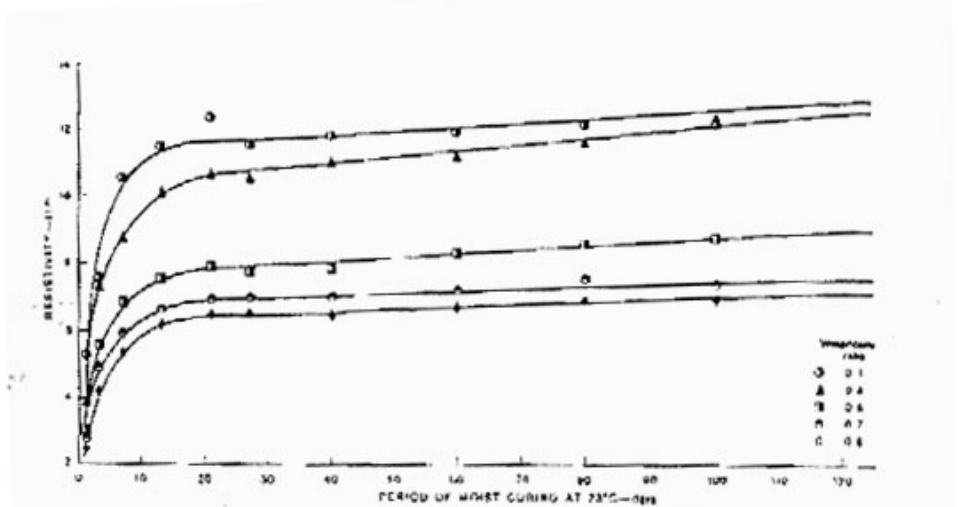
در شکل های ۲۵-۲، ۲۶-۲، ۲۷-۲ و ۲۸-۲ روند رشد مقاومت الکتریکی در خمیر سیمان و بتن را در ۲۴ ساعت اول و در بلند مدت مشاهده می نمایید [۸۰]. دیده می شود مقاومت الکتریکی در ۲۴ ساعت اولیه به ویژه در چند ساعت اول، رشد کم داشته و حتی از کاهش برخوردار است؛ اما تا ۱ روز سریعاً رشد می کند.



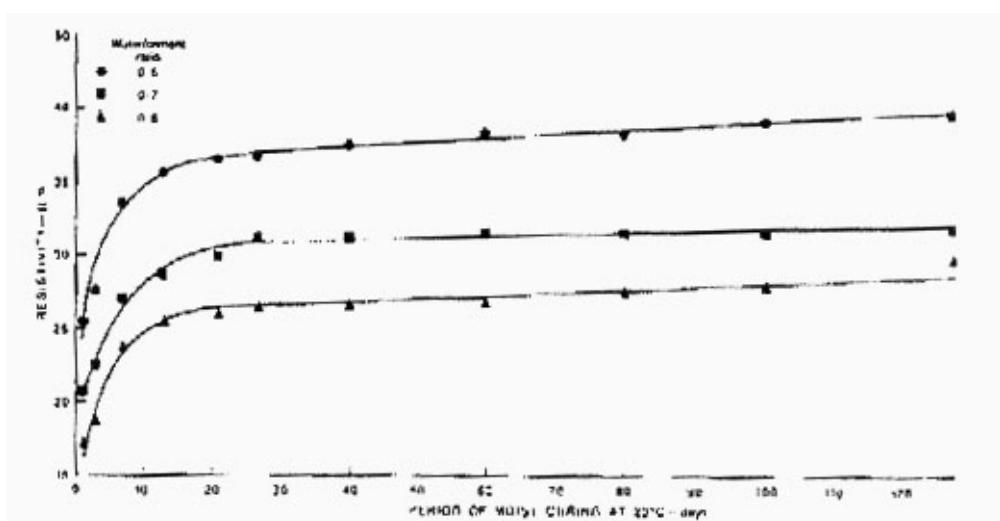
شکل ۲۵-۲ - تغییر مقاومت الکتریکی در ۲۴ ساعت اولیه پس از ریختن خمیر سیمان در قالب



شکل ۲۶-۲ - تغییر مقاومت الکتریکی در ۲۴ ساعت اولیه پس از ریختن بتن با نسبت ۴:۱ در قالب

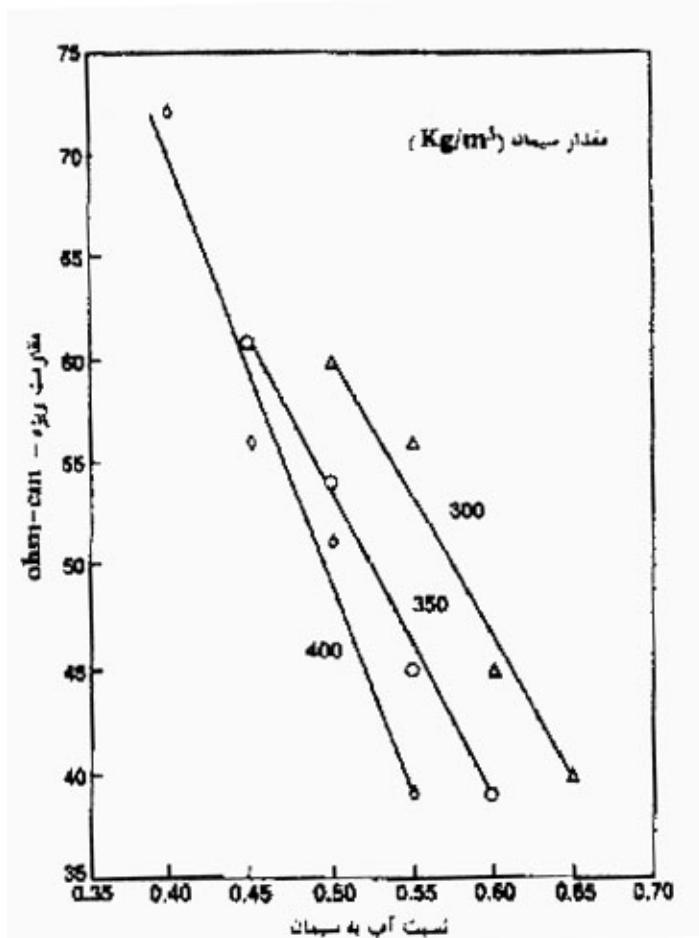


شکل ۲۷-۲ - تغییر مقاومت الکتریکی با گذشت زمان برای خمیر سیمان سخت شده



شکل ۲۸-۲ - تغییر مقاومت الکتریکی با گذشت زمان برای بتن سخت شده با نسبت ۱:۲:۴

در شکل ۲۹-۲ رابطه بین مقاومت ویژه الکتریکی، نسبت آب به سیمان و عبار سیمان بتن معمولی نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۹-۲ - رابطه بین مقاومت ویژه الکتریکی و نسبت آب به سیمان برای بتن ۲۸ روزه با حداکثر اندازه ۴ میلی متر و سیمان پرتلند معمولی نوع ۱

در طول زمان با پیشرفت هیدراسیون و کاهش منافذ خمیر سیمان و بهبود کیفیت منطقه تماس، مقاومت الکتریکی افزایش می یابد. هم چنین برای خمیر سیمان خالص و ملات نیز آزمایش هایی صورت گرفته است که روند افزایش مقاومت الکتریکی را در هنگام گیرش و پس از آن نشان می دهد [۸۲]. در این تحقیقات تأثیر نسبت آب به سیمان و مسائل مربوط به تغییرات خمیر سیمان در هنگام گیرش مورد بررسی قرار گرفته است.

محدوده مقاومت الکتریکی سنگدانه های معمولی از $180\Omega \cdot m$ برای نوعی ماسه سنگ تا بیش از $10^{12}\Omega \cdot m$ برای کوارتز داده شده است [۸۰]. متأسفانه در مراجع موجود مقاومت الکتریکی لیکاها

مختلف بدست نیامد.

به نظر می رسد روس ها ابداع کننده روش تعیین مقاومت الکتریکی برای تعیین خواص سیمان و زمان گیرش آن بوده اند و این امر به قبل از جنگ جهانی دوم و ابتدای دهه ۳۰ میلادی برمی گردد [۸۲].

معمولًاً مواد افزودنی شیمیایی مقاومت الکتریکی بتن را کاهش نمی دهند [۱۹]؛ اما تأثیر افزودنی های پوزولانی مانند خاکستر بادی و دوده سیلیسی در افزایش مقاومت الکتریکی چشمگیر می باشد [۸۳ و ۸۷].

افزایش ولتاژ و افزایش دمای بتن، مقاومت الکتریکی را افزایش می دهد [۸۰ و ۹۰]. اختلاف فاحشی بین مقاومت ظاهری الکتریکی جریان متناوب با فرکانس ۵۰ هرتز (امپدانس) و جریان مستقیم (مقاومت اهمی) وجود ندارد [۱۹]. مقاومت الکتریکی بتن های معمولی حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس جایگزین شده بیش از ۳ برابر بتن معمولی بدون میکروسیلیس بدست آمده است [۱۰۳]. مقاومت الکتریکی بتن سبکدانه پر مقاومت کم است [۷۵]. حتی با وجود نفوذ رطوبت به داخل این ها، مقدار آب وارد شده کم بوده و بتن ها در برابر خوردگی میلگردها مقاوم هستند.

اصولًاً به دلیل تحرک کم یون ها در بتن با مقاومت الکتریکی زیاد، این بتن ها دارای عمر طولانی تری از نظر خوردگی به حساب می آیند و آزمایش مقاومت الکتریکی در رابطه با بحث دوام اهمیت دارد. یکی از مهمترین عواملی که آغاز و شدت خوردگی را کنترل می کند، مقاومت الکتریکی بتن است [۹۴]. مقاومت ویژه الکتریکی بتن های سبک معمولًاً بیشتر از بتن معمولی است و میکروسیلیس مقاومت ویژه الکتریکی آن را افزایش می دهد [۶۶].

مقاومت الکتریکی بتن های سبکدانه با لیکا (با ماسه سبک و معمولی) در ایران توسط قدوسی [۲۷] برای بتن های حاوی دوده سیلیسی و بدون آن بدست آمده است. این بتن ها در محلول نمک طعام نگهداری شده اند. پس از ۱۰ هفته بتن نیمه سبک حاوی میکروسیلیس بیشترین مقاومت و بتن معمولی بدون دوده سیلیسی کمترین مقاومت را نشان داده است.

اطلاعات دیگری در مورد مقاومت الکتریکی بتن سبکدانه حاوی لیکا در ایران وجود ندارد.

ترکیبی از آزمایش جذب آب موئینه و سطحی با آزمایش مقاومت الکتریکی نیز در مورد بتن ها انجام شده است تا اثر جذب را در مقاومت الکتریکی به نمایش بگذارد به ویژه این آزمایش خواص بتن در ناحیه پوشش روی میلگرد را مورد اندازه گیری قرار می دهد [۸۶].

Vassie [۹۲] خوردگی در بتن با مقاومت الکتریکی بیش از $120\Omega \cdot m$ را محتمل نمی داند و

در بتن هایی با مقاومت الکتریکی کمتر از $50\Omega \cdot m$ خوردگی میلگردها را حتمی تلقی نموده است.

۱۰-۶-۲ - پتانسیل خوردگی میکروپیل^۱ (به روش نیم پیل)^۲ بتن سبکدانه

خوردگی میلگردها در بتن مشکل بزرگ در بهره برداری از سازه ها به ویژه در مناطق خورنده و سواحل دریاهای شور و اقیانوس ها می باشد و سالیانه خسارت های وسیعی را در سراسر جهان ایجاد می کند. خوردگی یک فعالیت الکتروشیمیایی است و در این رابطه خوردگی ممکن است روی یک میلگرد، آند و کاتد را تشکیل دهد که آن را خوردگی از نوع میکروپیل می نامند. اگر تشکیل آند و کاتد روی دو میلگرد صورت گیرد، خوردگی را از نوع ماکروپیل^۳ می گویند.

یکی از آزمایش های خوردگی شامل اندازه گیری پتانسیل خوردگی (اختلاف پتانسیل) با تعیین ولتاژ بین دو منطقه آند و کاتد است. این کار با تشکیل یک مدار الکتریکی که نیمی از آن در بتن و میلگرد واقع می باشد، انجام می شود؛ بنابر این بدان آزمایش نیم پیل می گویند. اختلاف پتانسیل بین بتن و میلگرد در حالت میکروپیل اندازه گیری می شود، لذا باید بتوان با میلگرد داخل بتن ارتباط و اتصال الکتریکی برقرار نمود. هم چنین با سطح بتن یا آب و محلول آب نمک محیطی که بتن در آن واقع است باید اتصال الکتریکی به کمک یک الکترود برقرار نمود. شکل ۳۰-۲ نحوه آزمایش را در محل، بر روی قطعه بتونی موجود نشان می دهد [۹۰] و دستور العمل استانداردی TSO-۲ ASTM برای تعیین استعداد فعالیت خوردگی در محل تدوین شده است. این آزمایش را می توان در آزمایشگاه نیز انجام داد و شرایط دلخواه را برای قطعه بوجود آورد. معمولاً در آزمایشگاه به

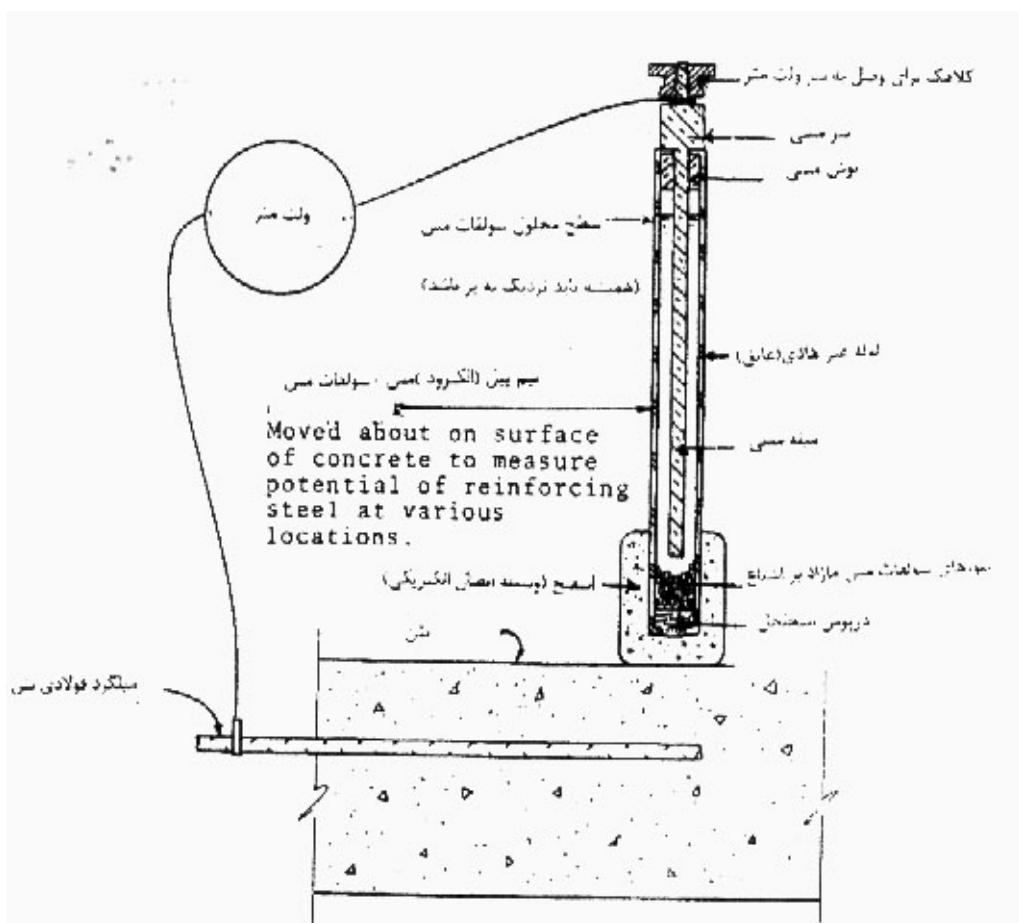
1 - Microcell Corrosion Potential

2- Half Cell

3 - Macrocell

جای الکترود مس - سولفات مس (CSE) در استاندارد ASTM C876 از الکترود کالومل اشباع^۱ (SCE)

استفاده می گردد. همه الکترودها با الکترود هیدروژن (SHE) مقایسه می شوند [۹۱].

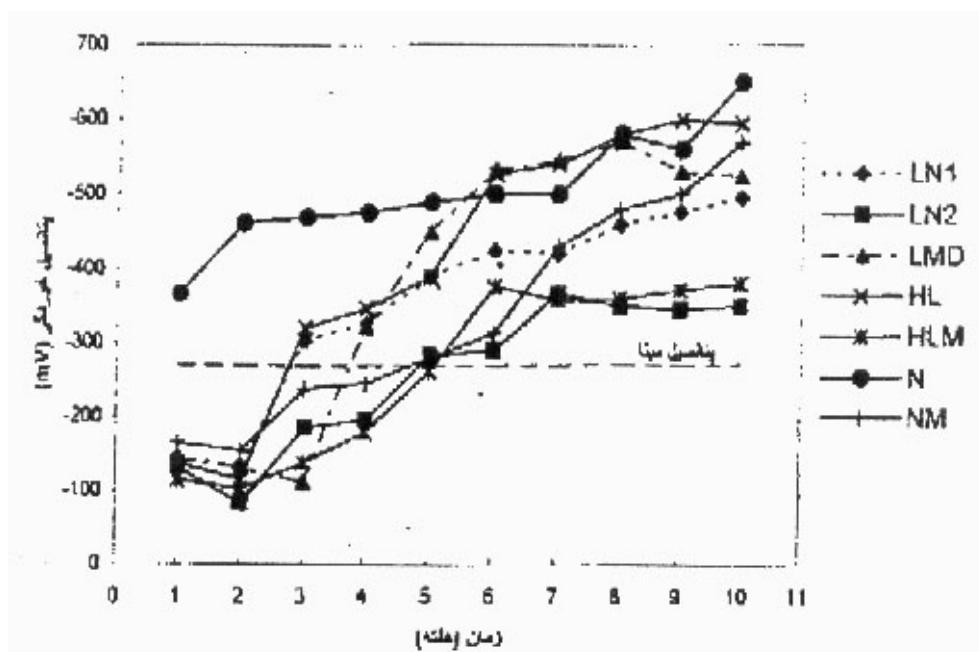


شکل ۲-۳۰-۲- مقدار نیم پیل مس - سولفات مس و مقطع الکترود مربوطه

میلگرد داخل بتن می تواند کاملاً مدفون در بتن و یا نیمه مدفون باشد. در حالت کاملاً مدفون باید بتوان با نصب یک سیم مسی، اتصال الکتریکی را برقرار نمود بدون این که از این محل الکترولیت یا آب نشت کند.

به علت سهولت، انجام این آزمایش کاربرد وسیعی پیدا کرده است. اما تفسیر نتایج گاه مشکل می باشد [۹۰]. برای شروع خوردگی در میلگرد اختلاف پتانسیل ۳۵۰ mv - با الکترود (CSE) و ۲۷۶ mv - با الکترود (SCE) نیاز است.

هر چند این آزمایش کاربرد وسیعی دارد اما اطلاعات کمی در مورد نتایج این آزمایش بر روی بتن سبکدانه در دست است. به ویژه در ایران فقط تحقیقات قدوسی [۲۷] برای بتن تمام سبکدانه و نیمه سبکدانه با لیکا دیده می شود. در این تحقیق ملاحظه می گردد که زمان شروع فعالیت خوردنگی در بتن نیمه سبک حاوی میکروسیلیس در محلول آب نمک ۵ درصد در هفته ششم و برای بتن معمولی بدون میکروسیلیس در هفته اول و با میکروسیلیس در هفته پنجم بوده است. در حالی که برای بتن تمام سبکدانه حاوی میکروسیلیس این فعالیت در هفته پنجم آغاز شده است. در شکل ۳۱-۲ رابطه پتانسیل خوردنگی و زمان را برای بتن های این تحقیق مشاهده می کنید.



شکل ۳۱-۲-پتانسیل خوردنگی در زمان های مختلف برای انواع بتن ها

همان طور که دیده می شود نمی توان بتن معمولی را بادوام تر از بتن تمام سبکدانه یا نیمه سبکدانه دارای لیکا دانست. باید گفت پتانسیل خوردنگی را در آزمایش های ماکروپیل مانند آنچه در ASTM G109 آمده است می توان بدست آورد [۹۸ و ۲۷].

۱۱-۶-۲- شدت یا آهنگ خوردگی^۱ بتن سبکدانه

برای مشخص کردن آهنگ خوردگی میلگرد مدفون در بتن معمولی و سبکدانه روش های متعددی ابداع شده است. پتانسیل خوردگی نمی تواند به تنها ی روند و آهنگ خوردگی میلگرد را مشخص کند. تعیین میزان یون کلرید بتن نیز نمی تواند ملاک خوبی برای آهنگ خوردگی باشد. بسیاری از محققان بر این عقیده اند که آزمایش ماکروپیل شدت خوردگی با روش شبیه به ASTM G109 [۹۸] می تواند آهنگ خوردگی و حتی پتانسیل خوردگی به صورت ماکرو و میکروپیل را نشان دهد و رابطه خوبی بین نتایج این آزمایش و خسارت خوردگی میلگردهای مدفون وجود دارد. این آزمایش می تواند اثر مواد افزودنی ضد خوردگی یا عوامل خوردگی بر میلگرد مدفون در بتن را به خوبی نشان دهد [۹۵ و ۹۶ و ۹۷ و ۱۰۰ و ۱۰۱].

این آزمایش، یک آزمایش از نوع گالوانیک می باشد. در این آزمایش که شامل یک میلگرد آند و دو میلگرد کاتد در یک منشور بتنی است، محلول آب نمک حوضچه فوقانی می تواند به داخل بتن رسخ نماید. می توان ولتاژ بین آند و کاتد، ولتاژ بین حوضچه و آند، ولتاژ بین حوضچه و کاتد را در حالت های مختلف در ضمن اتصال مقاومت ۱۰۰ اهمی بین آند و کاتد و با حذف مقاومت بین آند و کاتد قرائت نمود.

هم چنین می توان مقاومت الکتریکی (اهمی) بین حوضچه و آند، حوضچه و کاتد و بین آند و کاتد را نیز بدست آورد که هر کدام می تواند اطلاعات مفیدی را در رابطه با کیفیت بتن، فعالیت خوردگی و شدت خوردگی نشان دهد [۲۷]. هم چنین می توان شدت جریان بین آند و کاتد را طبق رابطه ۵۷-۲ بدست آورد که رسیدن به $10 \mu A$ ، نشانه شروع خوردگی است. هم چنین می توان جریان کل تجمعی^۲ را که معرف خوردگی کل^۳ می باشد طبق رابطه ۵۸-۲ محاسبه نمود.

$$i_j = \frac{V_j}{100} \quad (57-2)$$

i_j = شدت جریان خوردگی بر حسب آمپر

1 - Rate of Corrosion

2 - Integrated Total Current

3 - Total Corrosion

V_j = اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد بر حسب ولت با وجود مقاومت ۱۰۰ اهمی بین آن ها

$$TC_j = TC_{j-1} + \left[(t_j - t_{j-1}) \frac{i_j + i_{j-1}}{2} \right] \quad (58-2)$$

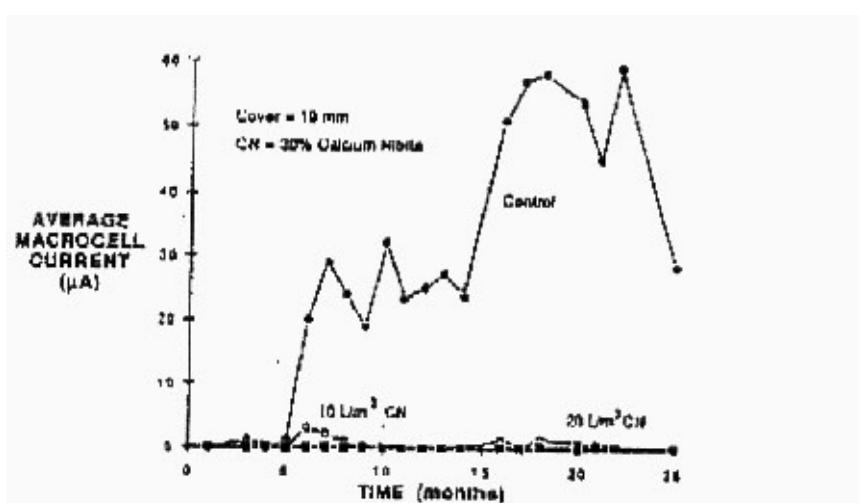
TC = جریان کل تجمعی یا خوردگی بر حسب کولن

t_j = زمان اندازه گیری جریان بر حسب ثانیه

i_j = شدت جریان ماکروپیل در زمان t_j

در شکل ۳۲-۲ نمونه ای از نتایج آزمایش ماکروپیل گالوانیک را که شدت جریان را بر حسب

زمان نشان داده است، مشاهده می نمایید [۹۷].



شکل ۳۲-۲- نتایج میانگین جریان ماکروپیل در میلگرد فولادی بدون پوشش

شروع خوردگی بتن معمولی حاوی میکروسیلیس و بدون میکروسیلیس در یک آزمایش

ماکروپیل به ترتیب $645 \mu\text{A}/\text{Cm}^2$ و $108 \mu\text{A}/\text{Cm}^2$ بدست آمده

است [۱۰۷].

آزمایش شدت خوردگی با روش گالوانیکی برای بتن های معمولی به منظور تعیین اثر

پوشش های سطحی برای حفاظت بتن در شرایط محیطی حاوی یون کلر در مرکز تحقیقات ساختمان و

مسکن ایران انجام شده است [۱۰۳].

به ندرت در منابع موجود نتایج آزمایش ماکروپیل گالوانیک بر روی بتن سبکدانه

موجود است.

قدوسی [۲۷] آزمایش هایی را با این روش بر روی بتن تمام سبکدانه و سبکدانه با لیکا در مقایسه با بتن معمولی انجام داده است و شدت جریان در سنین ۲ و ۴ ماه، مقدار جریان کل تجمعی برای ۲ و ۴ ماه و هم چنین پتانسیل خوردگی و مقاومت اهمی را بین الکترولیت و کاتد، الکترولیت و آند را در سنین ۲ و ۴ ماه گزارش نموده است. وی نتیجه گرفته است که شدت خوردگی میلگرد از نوع ماکروپیل در بتن تمام سبکدانه از بتن سبکدانه کمتر است. استفاده از میکروسیلیس، شدت خوردگی بتن سبکدانه را به میزان قابل توجهی کم می کند.

شدت خوردگی از نوع گالوانیکی برای بتن های معمولی حاوی دوده سیلیسی ایران به مراتب کمتر از بتن معمولی فاقد دوده سیلیسی است و بیشترین تأثیر مربوط به ۱۰ درصد جایگزینی دوده سیلیسی است [۹۴].

برای تعیین شدت خوردگی، آزمایش دیگری بر روی نمونه های میکروپیل نیز انجام می گیرد که در دستور ASTM G5، نحوه کار مشخص شده است و برای شدت خوردگی میلگرد داخل بتن با الهام از این دستور عمل می گردد. آزمایش شدت خوردگی دارای مکانیزم مناسبی برای تعیین وضعیت خوردگی میلگرد می باشد زیرا بسیاری از عوامل مانند جذب، انتشار و جریان خوردگی در این آزمایش دخیل است.

روش پولاریزاسیون خطی^۱ یا مقاومت پولاریزاسیون^۲ از جمله روش های معمول در تعیین شدت خوردگی است. برای اعمال پتانسیل یا پولاریزاسیون و تعیین مقاومت پولاریزاسیون یعنی شبیه منحنی پتانسیل - جریان می تواند از دو روش پتانسیو دینامیک و پتانسیو استاتیک استفاده نمود. در روش پتانسیو دینامیک، پتانسیل به صورت خطی جارو می شود یعنی تدریجاً به صورت یکسره تغییر می کند و جریان نیز به صورت یکسره ثابت می گردد. در حالی که در روش پتانسیو استاتیک پتانسیل به صورت مرحله ای اعمال شده و اجازه داده می شود تا سیستم کم و بیش به حال تعادل درآمده و سپس جریان اندازه گیری می گردد [۱۰۳]. در بتن مسلح فرآیندهای نفوذ و انتشار مواد به کندی

انجام می شود. بنابراین با توجه به مشکلات انجام آزمایش پتانسیو دینامیک به خوبی می توان از آزمایش پتانسیو استاتیک استفاده نمود و نتایج تفاوت چندانی نخواهد داشت [۱۰۵].

در این آزمایش از یافته های آندراده [۱۰۴] استفاده می شود و عدد ثابت B برابر 26mv مورد استفاده قرار می گیرد. نتیجه آزمایش به صورت شدت جریان بر واحد سطح گزارش می گردد. اگر شدت خوردگی از $0.2\mu\text{A}/\text{Cm}^2$ تجاوز کند، خوردگی فعال بوده و چشمگیر است و در غیر این صورت شدت خوردگی قابل اغماس خواهد بود [۱۰۶].

در منابع موجود نتیجه ای در رابطه با شدت خوردگی بتن سبکدانه حاوی لیکا مشاهده نشد.

آزمایش شدت خوردگی با روش پتانسیو استات می تواند قبل از شروع خوردگی در پتانسیل های کم و یا بعد از شروع خوردگی در پتانسیل های بالا انجام گردد. آزمایش شدت خوردگی با روش پتانسیو استات در ایران بر روی بتن های معمولی به منظور تعیین اثر پوشش های سطحی برای حفاظت بتن در محیط کلوری در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن انجام گردیده است [۱۰۳].