

بتن سيليكافوم

احسان حقيقت خرازي، دانشجو (*)
سيد محمد علي سادات لواساني بزرگ، دانشجو (**)
ehsan_rasti2000@yahoo.com (*) ۰۹۱۱۳۵۳۸۲۹۵
mohamad_slb@yahoo.com (**) ۰۹۱۲۲۱۷۲۰۱۴

چکیده

دوده سيليسي چگالیده، محصول فرعي کوره هاي قوس الکتریکي مي باشد که به عنوان یک پوزولان در بتن هاي امروزي مورد استفاده قرار مي گيرد. مهمترين پوزولان هاي مورد استفاده عبارتند از: دوده سيليسي و خاکستر بادي. دوده سيليسي به علت اندازه کوچکتر ذراتش، واکنش پذيري بهتري نسبت به خاکستر بادي داشته و در نتيجه بتن هاي ساخته شده با آن، در قياس با بتن هاي ساخته شده با خاکستر بادي، در شرايط یکسان مقاومت و دوام بيشتري دارند. مشاهده شد که استفاده از سيليكافوم در بتن باعث کاهش ترک خوردگي حرارتي ناشي از حرارت هيدراتاسيون، بهبود دوام، مقاوم شدن آن در برابر آب هاي اسيدي و سولفاتي و مهم تر از همه بهبود مقاومت فشاري بتن مي شود. در اين مقاله ابتدا خواص فيزيکي و شيميايي دوده سيليسي مورد بحث قرار گرفت و سپس خواص بتن ساخته شده با آن مانند مقاومت، دوام، نفوذپذيري و ... تشریح مي گردد.

واژگان کلیدی : پوزولان - دوده سيليسي

۱- مقدمه

سيليكافوم چگالیده شده محصول فرعي کوره هاي قوس الکتریکي است که در ساخت فنر و يا آلياژ سيليس مورد استفاده قرار مي گيرد. سيليكافوم شامل بيش از ۸۵-۸۰٪ SiO_2 آمورف غير کريستالي بوده که اندازه ذرات آن 0.1 تا 2 ميكرون يعني حدود ۲ برابر ريزتر از ذرات سيمان مي باشد. سيليكافوم چگالیده شده خواص پوزولاني عالي از خود نشان داده، بنابراین براي استفاده به عنوان افزودني پوزولاني به بتن ایده آل مي باشد و به فوايد فني متعددي مانند کاهش ترک خوردگي حرارتي ناشي از حرارت هيدراتاسيون، بهبود دوام و مقاوم شدن در برابر آبهاي اسيدي و سولفات ها و مهم تر از همه بهبود مقاومت فشاري بتن مي انجامد.

توليد جهاني سيليكافوم به عنوان محصول فرعي صنايع توليد فنر و آلياژ سيليس در حدود یک ميليون تن مقدار ۱۹۸۱ بود. در سال هاي بعد با توجه به سرعت نوآوري در صنعت مواد به نظر مي رسد که توليد جهاني سيليكافوم چگالیده شده از محدوده ۳ تا ۵ ميليارد تن در

سال ۲۰۰۱ و قرن ۲۱ خارج شده و سیلیکافوم چگال استفاده ای گسترده در صنعت بتن به عنوان افزودنی پوزولانی خواهد یافت.

تحقیقات وسیعی در چهار دهه اخیر توسط Aitcin، Loland و Gjorv، Markstead، Metha، Garette و Malhorta و سایر محققین فواید استفاده از سیلیکافوم برای بهبود خواص بتن ساخته شده با سیمان پرتلند را به اثبات رسانید.

2- خواص فیزیکی و شیمیایی

بسته به نوع آلیاژ سیلیس ساخته شده و طرح کوره الکتریکی، خواص شیمی فیزیکی سیلیکافوم چگال، تغییر می کند. ترکیبات کانی شناسی و مواد شیمیایی، چگالی، توزیع اندازه ذرات، مقدار آب و شاخصه فعالیت پوزولانی سیلیکافوم چگالیده شده در این جا مورد آزمایش قرار گرفته است.

الف) ترکیبات شیمیایی

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی اسمی سیلیکافوم که توسط Aitcin و از ۷ کارخانه صنعتی مختلف تولید آلیاژهای متفاوت گزارش شده را نشان می دهد.

ترکیبات شیمیایی سیلیکافوم چگالیده شده مولف مقدار شیمیایی سیلیکا فوم (درصد)

| SiMn | CaSi | FeCrSi | FeSi-50 | FeSi-75 | FeSi-75 | Si | ه |
|------|------|--------|---------|---------|---------|------|--------------------------------|
| | | | | | | | SiO ₂ |
| 25 | 53/7 | 83 | 83 | 90 | 89 | 94 | Fe ₂ O ₃ |
| 1/8 | 0/7 | 1/0 | 2/5 | 2/9 | 0/6 | 0/03 | Al ₂ O ₃ |
| 2/5 | 0/9 | 2/5 | 2/5 | 1/0 | 0/4 | 0/06 | CaO |
| 4/0 | 23/2 | 0/8 | 0/8 | 0/1 | 0/2 | 0/5 | MgO |
| 2/7 | 3/3 | 7/0 | 3/0 | 0/2 | 1/7 | 1/1 | Na ₂ O |
| 2/0 | 0/6 | 1/0 | 0/3 | 0/9 | 0/2 | 0/04 | K ₂ O |
| 8/5 | 2/4 | 1/8 | 2/0 | 1/3 | 1/2 | 0/05 | C |
| 2/5 | 3/4 | 1/6 | 1/8 | 0/6 | 1/4 | 1/0 | S |
| 2/5 | - | - | - | 0/1 | - | 0/2 | MnO |
| 36/0 | - | 0/2 | 0/2 | - | 0/06 | - | افت |
| 10/0 | 7/9 | 2/2 | 3/6 | - | 2/7 | 2/5 | سرخ |

شدن

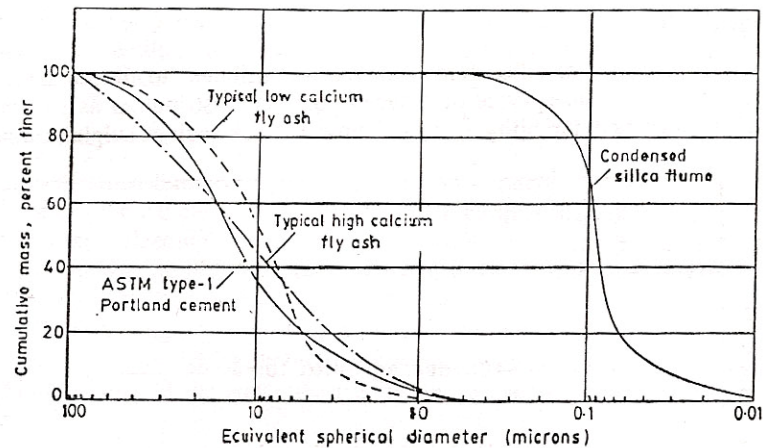
جدول ۲- خواص فیزیکی سیلیکافوم

خصوصیات فیزیکی

- ۱- وزن مخصوص
 - ۲- چگالی حجمی سست
 - ۳- نتایج آزمایش دانه باقی مانده زوی الک ۴۵ بندي
 - ۴- سطح مخصوص (بلین)
 - ۵- اندازه متوسط ذرات
- ارزش اسمی
۲/۲ تا ۳/۱ بسته به نوع
آلیاژ تولیدی
200-250Kg/m³ (سیلیکافوم
عادی)
500Kg/m³ (چگالیده)
میکرون = 3/7%
۳۳۰۰۰ تا ۷۷۰۰۰ cm²/gr
ذرات کروی 0/01 تا 3
میکرومتر
اندازه متوسط = 0/1 تا 0/2
μm

ب) خواص فیزیکی

جدول ۲ خواص فیزیکی اسمی سیلیکافوم چگال را نشان می دهد. شکل ۱ توزیع اسمی اندازه ذرات سیمان پرتلند عادی، خاکستر بادی و سیلیکافوم را همان طور که توسط Metha گزارش داده شده، نشان می دهد. ذرات سیلیکافوم بسیار ریز هستند و اندازه متوسط آن ها ۰/۱ تا ۰/۲ میکرومتر می باشد که در حدود ۲ برابر ریز تر از اندازه ذرات سیمان پرتلند عادی و خاکستر بادی است.



شکل ۱- توزیع اسمی اندازه ذرات مصالح

پ) مقدار آب و شاخصه فعالیت پوزولانی

ذرات بسیار ریز برای ساخت دوغاب روان به مقدار آب زیادی نیاز دارند. مقدار آب ملات سیمان پرتلند و

سیلیکافوم عموماً بیشتر از ۱۱۵٪ مقدار مجاز برای پوزولان های طبیعی است (ASTM C 618). مقدار آب متوسط نمونه های سیلیکافوم که توسط Pistilli مورد آزمایش قرار گرفت ۱۴۵٪ بود. علی رغم مقدار آب زیادتر، شاخصه فعالیت پوزولانی (نسبت مقاومت فشاری ملات های نمونه که روانی یکسان دارند) بیشتر انواع سیلیکافوم به راحتی از ۷۵٪ شرایط برگزیدن آن به عنوان یک پوزولان براساس ASTM C 618 تجاوز می کند.

۳- خواص بتن شامل سیلیکافوم چگالیده شده

پوزولان ها به عنوان مصالح سیلیسی با اندازه ذرات ریز که دارای قدرت واکنش پذیری شیمیایی با آهک را در دمای عادی برای تولید مصالح چسباننده (هیدرات های سیلیکات کلسیم) دارند، تعریف می شوند. از این رو عبارت واکنش پوزولانی برای مشخص کردن واکنش آهکی-سیلیسی در سیستم های سیمانی مورد استفاده قرار می گیرد. وقتی پوزولان به عنوان یک افزودنی به بتن اضافه می شود به عنوان منبعی از سیلیس واکنش پذیر عمل می کنند.

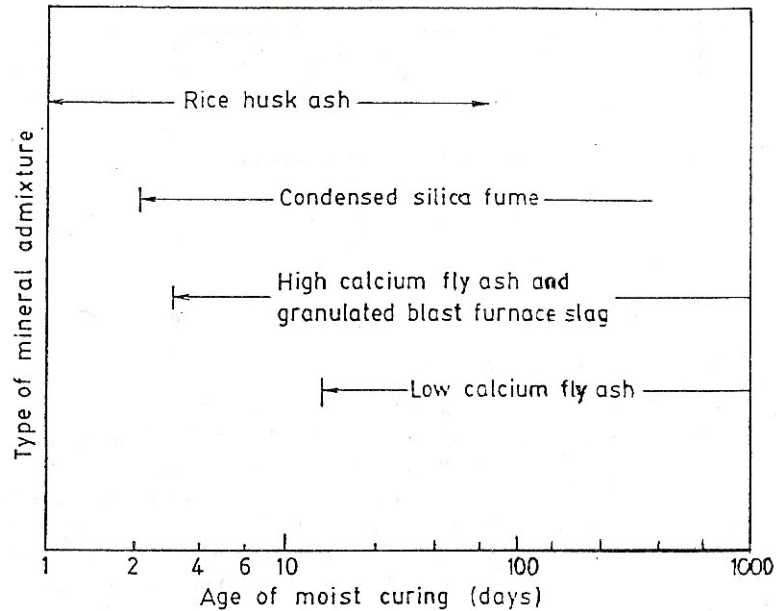
آهک لازم برای واکنش های پوزولانی از واکنش های هیدراسیون سیلیکات های تری کلسیم و دی کلسیم که ترکیبات اصلی سیمان پرتلند هستند، در دسترس می باشد. براساس RILEM کمیته فنی (محصولات فرعی سیلیسی SBC 73 در بتن) سیلیکافوم و سبوس برنج کم دما را به عنوان مصالح پوزولانی برتر طبقه بندی کرده است. هر دو پوزولان شامل سیلیس آمورف و سطح مخصوص بسیار زیاد (ذرات بسیار زیاد) می باشند. از این رو آن ها به شدت واکنش پذیر هستند و از سایر مواد پوزولانی مانند خاکستر بادی که به آرامی واکنش می دهد، سرعت واکنش بیشتری دارند. کسب مقاومت با گذشت عمر پوزولان های مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است.

1-3- دوام

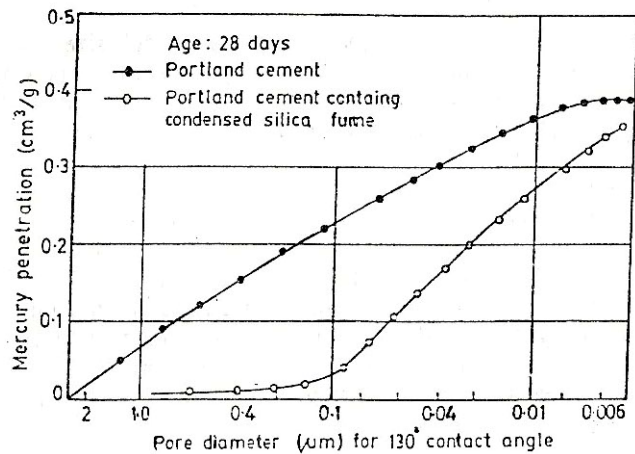
دوام بهبود یافته بتن سیلیکا فوم نشانه ای از کاهش نفوذ پذیری در نتیجه توزیع اندازه منافذ کاهش یافته، همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، می باشد. دوام بهتر در برابر حملات شیمیایی مانند آب های سولفات دار و واکنش هایی که باعث انبساط قلیایی - سنگدانه ای هستند در واقع به خاطر کاهش نفوذ پذیری بتن سیلیکا فوم که شامل توزیع اندازه منافذ کمتری در خمیر سیمان هیدراته شده می باشد، است.

3-2- کارایی

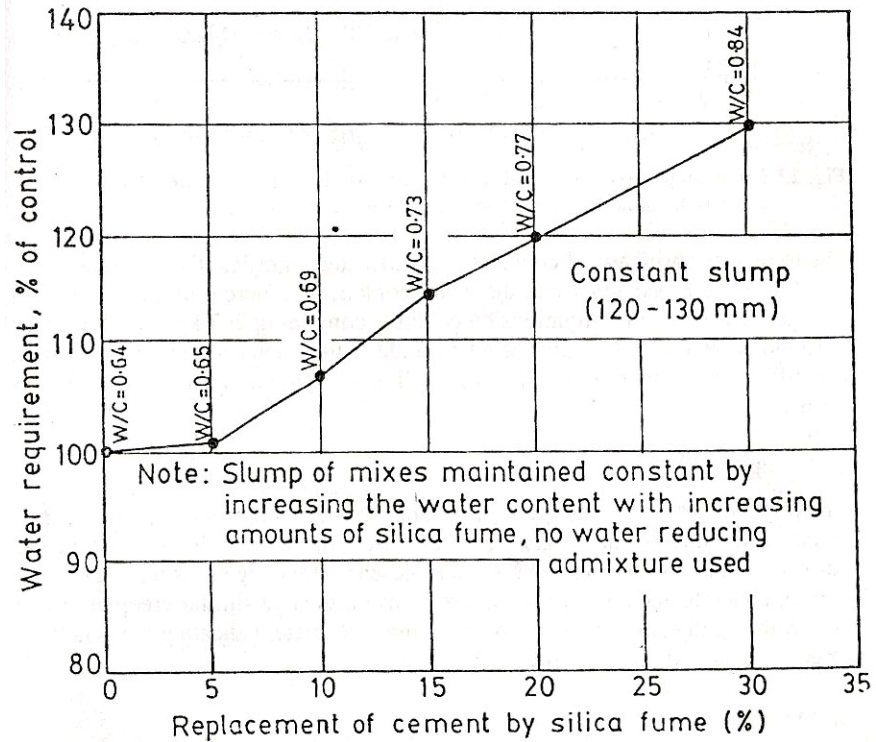
تأثیر سیلیکا فوم بر روانی بتن تازه، چسبندگی مخلوط بتن در نتیجه اندازه ریز ذرات سیلیکا فوم می باشد. جداشدگی و شیره دهی کم شده و قابلیت جاری شدن بتن افزایش می یابد. برای یک کارایی ثابت مقدار آب مورد نیاز با افزایش میزان سیلیکا فوم بیشتر می شود. شکل های ۴ و ۵ مقدار آب مورد نیاز برای یک اسلامپ معین با افزایش مقدار سیلیکا فوم در مخلوط را نشان می دهند. مقدار آب زیاد شده به تراکم بهتر کمک می کند و به خاطر خصوصیات روانی بتن بهتر، برای پمپاژ و پاشیدن بتن ایده ال است.



شکل ۲- دوره زمانی مؤثر کسب مقاومت از افزودنی های معدنی مختلف



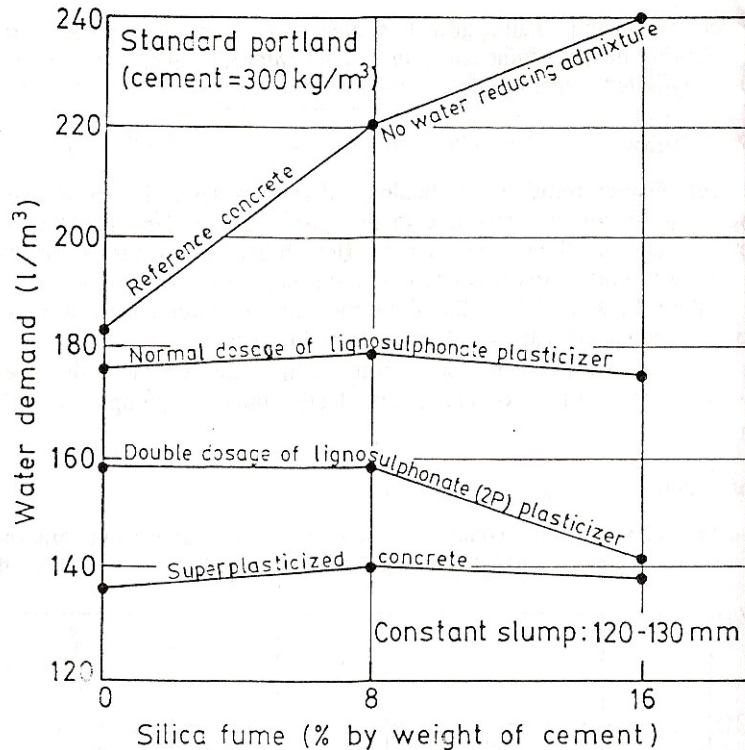
شکل ۳- تأثیر افزودن سیلیکا فوم بر توزیع اندازه منافذ خمیر سیمان خوب هیدراته شده



شکل ۴- تأثیر افزودن سیلیکا فوم بر مقدار آب مورد نیاز بتن بدون افزودنی های کاهنده آب

3-3- جمع شدگی

سطح بتن سیلیکا فوم باید در برابر تبخیر سطحی آب محافظت شود تا از ایجاد ترک سطحی به علت جمع شدگی پلاستیکی در هوای گرم جلوگیری کند.



شکل ۵- مخلوط های بتن با افزودنی های کاهنده آب و بدون آب - تأثیر افزودن سیلیکا فوم بر آب مورد نیاز برای یک اسلایپ معین

جمع شدگی بتن در دراز مدت، به شکل مهمی تحت تأثیر افزودن سیلیکا فوم نیست، مخصوصاً هنگامی که مقدار آب مخلوط بتن تغییری نکرده باشد. بررسی تحقیقات صورت گرفته روی بتن حاوی 297 Kg/m^3 سیمان پرتلند عادی و 24 Kg/m^3 سیلیکا فوم به همراه نسبت آب به سیمان و سیلیکا فوم ترکیب شده برابر $0/6$ ، جمع شدگی ناشی از خشک شدگی را حتی بعد از ۶۴ هفته بسیار ناچیز نشان داد.

3-4- خزش

خزش بتن با مقاومت آن نسبت معکوس دارد. از آن جایی که بتن سیلیکا فوم مقاومت نهایی بیشتری دارد، خزش آن از بتن ساخته شده با سیمان پرتلند عادی کمتر می باشد، بررسی تحقیقات روی خزش، با استفاده از بتن کنترل و بتن سیلیکا فوم، خزش مشابهی را با مقادیر کمی کمتر برای بتن سیلیکا فوم، پس از یک سال نشان داد که نشانگر اثر سودمند استفاده از سیلیکا فوم در بتن می باشد.

3-5- مقاومت

تغییرات مقاومت فشاری بتن سیلیکا فوم به مقدار سیمان و سیلیکا فوم مخلوط، نسبت آب به سیمان و سیلیکا فوم مرکب و عمر بتن بستگی دارد. تحقیقات تجربی صورت گرفته به

وسیله Malhorta بر بتن های متخلخل و نامتخلخل حاوی مقادیر متفاوت سیمان و سیلیکا فوم و نسبت های متفاوت آب به سیمان مرکب، افزایش قابل توجهی را در مقاومت فشاری بتن با افزایش درصد سیلیکا فوم، همان گونه که در شکل-۶ آمده است، نشان می دهد. برای یک عیار سیمان معین بتن نامتخلخل مقاومت بیشتری را نسبت به بتن متخلخل از خود نمایش داد.

به خاطر واکنش پذیری بتن سیلیکا فوم، توانایی سیلیکا فوم بهبود بخشیدن مقاومت، نزدیک ۲ تا ۳ برابر جرم مساوی سیمان پرتلند جایگزین شده است. عمل آوری مرطوب طولانی مدت برای بتن سیلیکا فوم نسبت به بتن ساخته شده با سیمان پرتلند عادی از اهمیت بیشتری برخوردار است. Wolsiefe با استفاده از سیلیکا فوم، یکنی با مقاومت بسیار بالا شامل داده های زیر تولید کرد:

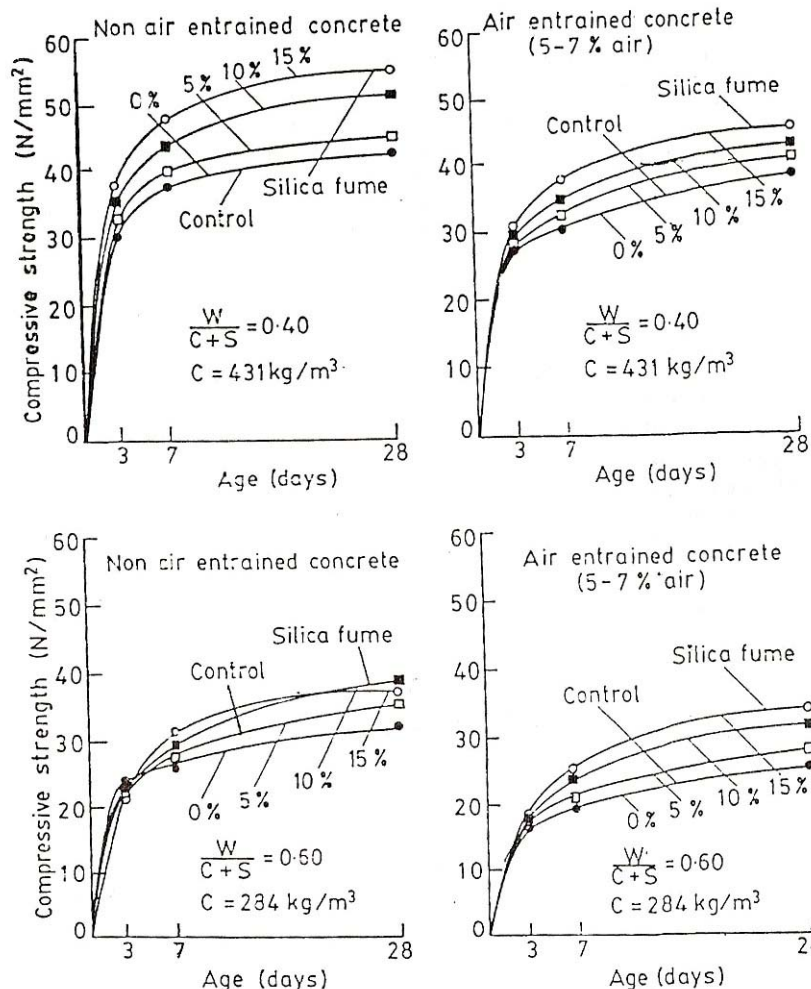
سیمان پرتلند عادی (تیپ I) : 593Kg/m3
 سنگدانه سنگ آهک با حداکثر اندازه 10mm
 سیلیکا فوم چگالیده شده : 119Kg/m3

$$\frac{W}{C+S} = 0/22$$

از فوق روانساز استفاده شد.

مقاومت فشاری ۱۴ روزه = 100N/mm2

مقاومت فشاری ۴ ماهه = 125N/mm2



شکل ۶ تأثیر سیلیکافوم بر مقاومت های بتن های متخلخل و نامتخلخل

3-6-نفوذپذیری

تحقیقات **Hustad** و **Loland** نشان داد که یک مخلوط بتن حاوی 100 Kg/m^3 سیمان پرتلند عادی 20% سیلیکا فوم چگالیده شده به همراه فوق روانساز نفوذپذیری مشابهی با بتن حاوی 250 Kg/m^3 سیمان پرتلند عادی بدون سیلیکافوم و روانساز از خود نشان داد.

ضریب نفوذپذیری اندازه گیری شده در بتن حاوی 250 Kg/m^3 سیمان پرتلند عادی با 10% سیلیکافوم چگالیده در حدود $17.5 \times 10^{-15} \text{ m/sec}$ بود در حالیکه ضریب نفوذپذیری بتن حاوی 250 Kg/m^3 سیمان پرتلند عادی $615 \times 10^{-15} \text{ m/sec}$ بود.

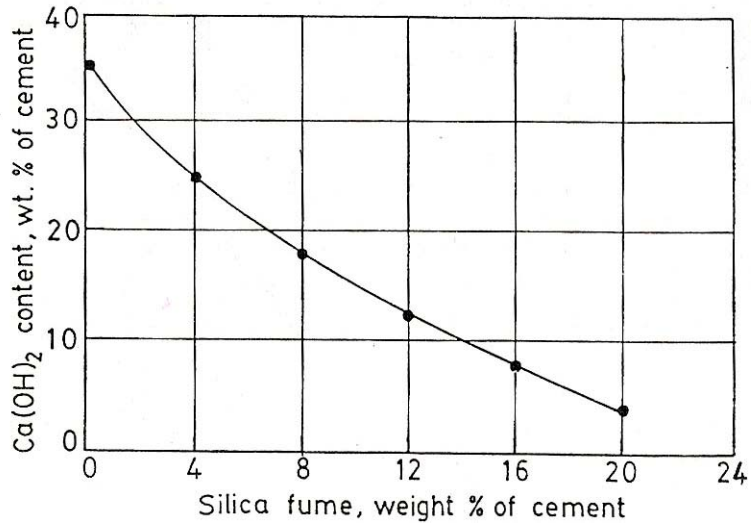
افزودن سیلیکافوم که ماده ای به شدت پوزولانی است اندازه منافذ را در خمیر سیمان هیدراته شده، کاهش می دهد و به همین علت آن را تقریباً نفوذناپذیر می سازد.

3-7- مقاومت در برابر یخ زدگی

دوام بتن حاوی سیلیکافوم چگالیده در شرایط یخ زدن و آب شدن توسط کارهای تحقیقاتی متعددی مورد آزمایش قرار گرفته است. تحقیقات مهم در زیر به صورت خلاصه آمده اند: بتن نا متخلخل با سیلیکافوم مقدار دوام و مقاومت در برابر حملات یخ زدگی بسیار کمی را نشان می دهد. بتن متخلخل بدون توجه به نسبت آب به سیمان (۰/۴ تا ۰/۶) و حاوی بیش از 15% سیلیکافوم چگالیده جایگزین، وقتی به روش ASTM C 666 مورد آزمایش مقاومت در برابر یخ زدگی قرار گرفت، عملکردی رضایت بخش داشت. از این رو می توان نتیجه گرفت که هوای محبوس در بتن بسیار مهم تر از استفاده مقدار زیاد سیلیکافوم برای مقاومت در برابر یخ زدگی است.

مقاومت شیمیایی

دلیل عمده مقاومت شیمیایی بالای بتن سیلیکا فوم به خاطر کاهش نفوذپذیری در اثر منافذ کوچک و کاهش در مقدار هیدروکسید کلسیم در خمیر سیمان که با سولفات ها و اسید ها واکنش می دهد است. کاهش مقدار هیدروکسید کلسیم با افزایش مقدار سیلیکا فوم در شکل ۸-۲۲، بر اساس مشاهدات Sellevold، نشان داده شده است. بتن سیلیکا فوم مقاومتی عالی در برابر سولفات ها و اسید ها دارد. بیش از ۲۰ سال قرار گرفتن بتن در معرض آب های حاوی شیست و زاج سفید (PH 2/89) در اسلو نشان داد که بتن ساخته شده از سیمان پرتلند عادی با ۱۵% سیلیکافوم جایگزین، مقاومت بیشتری نسبت به بتن ساخته شده از سیمان ضد سولفات دارد. تحقیقات آزمایشگاهی Mather نشان داد که ملات های سیمانی حاوی سیلیکافوم مقاومت بیشتری در برابر حملات سولفاتی از ملات های کنترل بدون سیلیکافوم داشتند. نمونه های بتنی حاوی 30% سیلیکافوم تنها به ۷ روز عمل آوری برای نشان دادن دوام بالا در برابر محلول های کلریدی احتیاج داشتند.



شکل ۸- تأثیر جایگزین کردن سیمان با سیلیکافوم بر مقدار هیدروکسید کلسیم خمیر سیمان

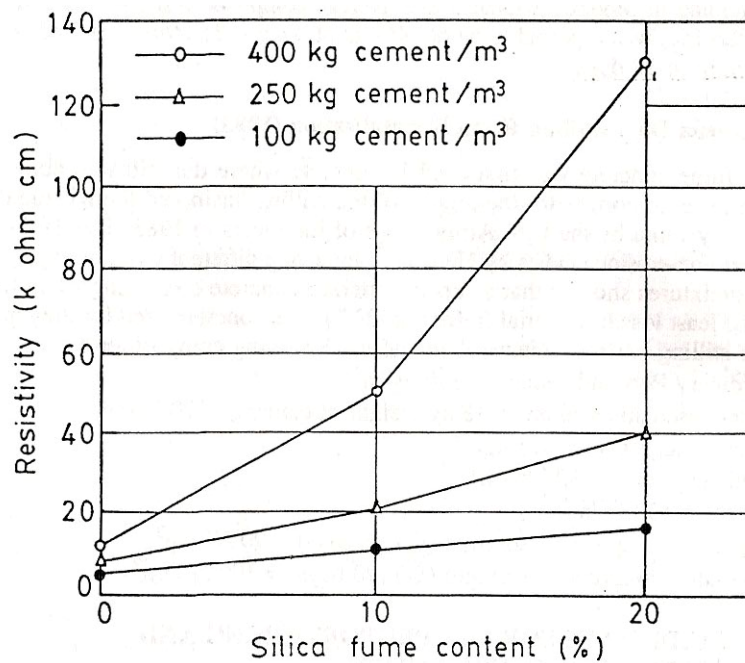
4 - مقاومت در برابر واکنش های قلیایی سنگدانه ای

در ایسلند، سیمان های پرتلند از نوع پرقلیا هستند ($\text{Na}_2\text{O} > 0/6\%$). بسیاری از سنگدانه ها شامل موادی واکنش پذیر مانند سیلیس می باشند. تحقیقات Olafasson که با استفاده از ملات های منشوری ساخته شده با سنگدانه های شیشه پیرکس و سیمان پرتلند پرقلیا (شامل $0/86\%$ ، 1% ، و $1/39\%$ معادل قلیایی) انجام شد، نشان داد که جایگزین کردن ۵ تا ۱۰ درصد سیمان با سیلیکافوم، انبساط ۶ ماهه را تا بیش از 75% انبساط مدت مرجع را کاهش می دهد. برای غلبه به مشکل واکنش های سنگدانه ای قلیایی Gudmundsson گزارش داد که از سال ۱۹۷۷ سیمان پرتلند عادی تولید شده به وسیله Iceland state cement works در Akranes(Iceland) با ۵ تا ۶ درصد سیلیکافوم قابل دسترسی از کارخانه فروسیلیس در نزدیکی آن، مخلوط شده اند.

5- خوردگی فولادی موجود در بتن

خوردگی فولاد فرآیندی الکتروشیمیایی است که وجود الکترولیت، رطوبت و هوا احتیاج دارد. انبساط همراه با زنگ زدگی باعث ترک خوردگی و قلوه کن شدگی بتن می شود. افزودن سیلیکافوم، مقاومت اهمی بتن را زیاد کرده و از این رو همان طور که در شکل ۲۲-۹ که بر اساس نتایج آزمایش Gjorv است نشان داده شده، مقاومت الکتریکی و خوردگی آن بیش تر می شود. افزایش مقاومت الکتریکی به

علت فرآیند پالایش منافذ، ناشی از واکنش های پوزولانی به وجود آمده به خاطر سیلیکافوم مخلوط بتن می باشد.



شکل ۹- تأثیر سیلیکافوم بر مقاومت اهمی بتن

نتیجه گیری

۱ - استفاده از سیلیکافوم در بتن فواید فراوانی مانند مقاومت و دوام بالا دارد.

۲ - هزینه سیلیکافوم چگالیده به خاطر ذرات ریز و چگالی حجمی کم آن بالاست. در ایالات متحده و کانادا، قیمت این ماده در حالت حجم خشک به زیادی قیمت سیمان در جوار کارخانه تولید آلیاژ سیلیس است. قیمت سیلیکافوم چگالیده محلول در آب، تقریباً ۲ تا ۳ برابر قیمت در حالت خشک می باشد.

۳ - علی رغم هزینه بالا، تقاضای خرید سیلیکافوم در ساختمان های مخصوص به خاطر فوایدی چون مقاومت در عمر کم، مقاومت سایشی و دوام بسیار بالا رو به افزایش است. داده های تحقیقاتی بعدی به زمینه های زیر نیازمند است:

- ۱ - دوام بلند مدت بتن حاوی بیش از 10% سیلیکافوم.
- ۲ - مطالعه روی زیر ساختار های بتن سیلیکافوم با ۱۵ تا ۳۰ درصد سیلیکافوم که به نظر می آید تفاوت مهمی دارد.
- ۳ - کار تحقیقاتی نیازمند مطالعه عامل خوردگی، هنگامی که بتن سیلیکافوم در ساختمان های بتن مسلح مورد استفاده قرار می گیرد، است.

٤ - مطالعه تحقیقاتی بر خصوصیات تغییر شکل پذیری بتن حاوی ۱۵ تا ۳۰ درصد سیلیکافوم که ممکن است باعث شکننده تر شدن بتن شود.

مراجع

[1] کتاب خواص بتن پروفیسور نویل ترجمه دکتر فامیلی

[2] کتاب concrete mix design ,N ,Krishna Raju