«یادداشت فنی»

مطالعه تأثیر دوده سیلیس بر نفوذ پذیری و مقاومت فشاری نمونه‌های بتن غلتکی

ابوالفضل حسني[1*]، عابدين آزادي[2]

۱- دانشیار بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

*** تهران، صندوق پستی ۱۴۳- ۱۴۱۱۵**

hassani@modares.ac.ir

(دریافت مقاله:خرداد ۱۳۸۲، پذیرش مقاله: خرداد ۱۳۸۳)

چکیده- به علت افزایش قیمت قیر استفاده از روسازیهای بتنی در بیشتر کشورها رو به رشد است. از میان انواع روسازیهای بتنی، روسازی بتن غلتکی با توجه به اهمیت مسائل زیست محیطی به‌دلیل مصرف سیمان کمتر نسبت به سایر انواع روسازی بتنی متداول، عدم نیاز به تجهیزات خاص و امکان استفاده از مصالح سنگی با کیفیت پایین‌تر از استاندارد روسازی‌های بتنی معمولی، اکنون از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. ویژگیهای فوق، همچنین به کاهش هزینه‌ها و امکان اجرای آن در مناطق مختلف با توجه به مصالح موجود منجر می‌شود. در این مقاله دوده سیلیسی به عنوان ماده‌ای پوزولانی، به‌عنوان جایگزین سیمان در مخلوط بتن غلتکی معرفی و تاثیر آن بر نفوذپذیری و مقاومت فشاری بررسی می‌شود. بدین منظور هشت نوع مخلوط بتنی با درصدهای مختلف دوده سیلیس تحت آزمایش نفوذپذیری و مقاومت فشاری قرار گرفت. به طور کلی نتایج به‌دست آمده نشانگر کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن غلتکی بر اثر جایگزینی دوده سیلیس به جای سیمان است.

کلید واژگان: روسازی، روسازی بتن غلتکی، پوزولان، دوده سیلیس، نفوذپذیری، مقاومت فشاری.

۱- مقدمه

بتن غلتکی اساساً در دو بخش مهم در سازه‌های مهندسی یعنی سدها و روسازی‌ها استفاده می‌شود. به طور کلی این نوع بتن در راهسازی به صورت زیر تعریف شده است:

مخلوطی نسبتاً خشک از مصالح سنگی (معمولاً حداکثر اندازه مصالح سنگی کمتر از سه چهارم اینچ (۱۹mm) است)، مواد سیمانی و آب که با غلتکهای لرزاننده متراکم می‌شود[۱].

وقتی از بتن غلتکی به عنوان لایه رویه راه استفاده شود، حداقل مقاومت فشاری ۴۰۰۰ Psi (معادل ۲۷/۶ Mpa) تعیین می‌شود. مصالح مورد استفاده برای بتن غلتکی، در دستگاه اختلاط ترکیب می‌شوند، به طوری که روانی بتن، مشابه با شن مرطوب یا بتن با اسلامپ صفر باشد [۱].

این نوع روسازی غالباً به ضخامت کمتر از ۱۰ اینچ (۲۵۴mm) توسط دستگاههای مرسوم در ساخت روسازی

Archive of SID

www.SID.ir

بتن آسفالتی اجرا می‌شود.

در این تحقیق با ثابت نگاه داشتن مقدار مصالح سنگی و آب و تغییر میزان دوده سیلیس به‌عنوان جایگزین سیمان (بدون تغییر مقدار کل مواد سیمانی در مخلوط) اثر استفاده از این ماده در بتن غلتکی بررسی شده است.

۲- تاریخچه

روسازی بتن غلتکی (RCCP)[1]، به دنبال بحران نفتی دهه ۷۰ میلادی که موجب افزایش هزینه‌های اجرای روسازی آسفالتی در سطح جهان شد، توسعه یافت. برخی کشورها مانند ایالات متحد، انگلستان، فرانسه، اسپانیا و کانادا استفاده از آن را برای راههای نظامی و نواحی صنعتی، فرودگاهها و نیز جاده‌ها آغاز کردند. این فناوری جدید سبب صرفه‌جویی در هزینه‌ها به میزان ۳۰ درصد شده است. پژوهشهای متعددی در زمینه روسازیهای بتن غلتکی در نقاط مختلف دنیا انجام شده، اما تحقیقات بیشتری در زمینه استانداردها و روشهای طرح اختلاط آن مورد نیاز است [۲].

اولین روسازی بتن غلتکی، در سال ۱۹۷۶ در محوطه تخلیه بار کایکوس واقع در جزیره ونکوور بریتیش کلمبیا ساخته شده که تاکنون به طور مداوم مورد استفاده قرار دارد و در سال ۱۹۸۷ مساحت آن به ۹ جریب (۳/۶ هکتار) توسعه یافته است[۱].

۳- نسبت اختلاط مصالح و روش ساخت نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌های بتن غلتکی در این تحقیق از نسبتهای مخلوط مرسوم در کشور اسپانیا استفاده شده که به صورت جدول ۱ است:

۳-۱- مصالح سنگی

مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق از نوع طبیعی شکسته و دانه‌بندی شده است که در جدول ۲ دانه‌بندی شن و ماسه‌های مورد استفاده به طور مفصل ارائه شده است.

جدول ۱ نسبت اختلاط مصالح [۲]

شن با اندازه ۱۰ تا ۲۰ میلیمتر	۲۰۹	kg/m^3
شن با اندازه ۰ تا ۱۰ میلیمتر	۱۴۷۲	kg/m^3
ماسه با اندازه ۰ تا ۵ میلیمتر	۲۱۴	kg/m^3
پوزولان	۸۰	kg/m^3
سیمان	۱۵۵	kg/m^3
آب	۹۹	kg/m^3

جدول ۲ دانه‌بندی شن و ماسه [۳]

اندازه (شماره الک)	درصد تجمعی مانده	درصد مانده	وزن در m^3 ۱ (kg)
$\frac{3}{4}$ اینچ	۱۰۰	۰	۰
$\frac{1}{2}$ اینچ	۸۰	۲۰	۳۷۹
$\frac{3}{8}$ اینچ	۶۶	۱۴	۲۶۵/۳
نمره۴	۵۰	۱۶	۳۰۳/۲
نمره۸	۴۰	۱۰	۱۸۹/۵
نمره۱۶	۳۲	۸	۱۵۱/۶
نمره۳۰	۲۵	۷	۱۳۲/۶۵
نمره۵۰	۲۰	۵	۹۴/۷۵
نمره۱۰۰	۱۶	۴	۷۵/۸
نمره۲۰۰	۸	۸	۱۵۱/۶
زیر الکی	۰	۸	۱۵۱/۶

مدول نرمی ماسه FM= ۴/۱۷

جدول ۳ ترکیبات مختلف پودر میکرو سیلیس[۳]

ترکیب	مقدار (درصد)
اکسید سیلیسیم SiO_2	۸۵-۹۵
اکسید آهن Fe_2O_3	۰/۴-۲/۰
اکسید کلسیم CaO_2	۲/۰-۲/۳
اکسید آلومینیم Al_2O_3	۰/۵-۱/۷
اکسید منیزیم MnO	۰/۱-۰/۹
کربن C	۰/۶-۱/۵

1. Roller Compacted Concrete Pavement

Archive of SID
www.SID.ir

۳-۲- دودهٔ سیلیس

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی دوده سیلیس مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها که از نوع صنعتی و محصول شرکت فرو سیلیس ایران بوده به شرح زیر است.

الف) خصوصیات فیزیکی

ساختار : بی شکل

شکل ذرات : کروی

دانه‌بندی : ۰/۳-۰/۲ میکرون

چگالی فله‌ای : ۲۰۰ کیلوگرم در هر متر مکعب

ب) ویژگیهای شیمیایی

ترکیبات شیمیایی و مقادیر مواد تشکیل دهنده دوده سیلیس مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها مطابق جدول ۳ است.

۳-۳- سیمان

در این تحقیق برای ساخت نمونه‌های بتن غلتکی از سیمان پرتلند نوع ۱ استفاده شده است.

۳-۴-آب

آب مورد استفاده درتهیه مخلوطهای بتن غلتکی این پروژه آب آشامیدنی بوده است.

۴- دستگاهها و روش ساخت

در تهیه مخلوطها از دستگاه مخلوط‌کن برقی استفاده شده و نمونه‌ها در قالبهای فلزی مکعبی با ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ سانتیمتر قالبگیری شد. برای ایجاد تراکم بتن از چکش استاندارد به کار رفته در آزمایش پروکتور اصلاحی [۴] با وزن ۴/۵ کیلوگرم و ارتفاع سقوط ۴۵/۷ سانتی متر استفاده شد. قالبها در سه لایه بتن‌ریزی شد که در هر لایه۱۵۰ ضربه بر سطح بتن وارد شده و ضخامت آن قبل از متراکم شدن حدود ۷ سانتیمتر بود [۳].

نمونه‌های هر گروه مخلوط، با ثابت نگاهداشتن مقدار مصالح سنگی و آب و مقدار کل مواد سیمانی (شامل سیمان و دوده سیلیس) و فقط با تغییر درصد جایگزینی دوده سیلیس با سیمان، ساخته شد. برای اختلاط بهتر ابتدا کلیه مصالح سنگی و موادسیمانی بدون آب در مخلوط کن ریخته و به مدت ۳ دقیقه مخلوط شد. سپس آب مخلوط به‌طور تدریجی اضافه شد و مخلوط کن به مدت ۷ دقیقه کار می‌کرد. پس از تهیه بتن و قالبگیری، سطح نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت با کرباس خیس پوشانده و بعد از باز کردن قالبها، نمونه‌های بتنی به داخل مخزن عمل آوری منتقل شد و پس از ۴۲ روز برای انجام آزمایشها از مخزن آب خارج شد [۳].

۵- برنامه آزمونها

آزمایش نفوذپذیری نمونه‌ها مطابق استاندارد آلمان [۵] و آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها برطبق استاندارد انگلستان انجام شد [۶].

آزمایشها بر روی ۸ گروه مخلوط بتن غلتکی ـ که به ترتیب حاوی صفر تا شصت درصد وزنی دوده سیلیس جایگزین سیمان بودند ـ (در سن ۴۲ روز) انجام شد. نتایج آزمونهای نفوذپذیری و مقاومت فشاری و وزن مخصوص نمونه‌ها در جدول ۴ ارائه شده است [۳].

جدول ۴ نتایج آزمونهای مقاومت فشاری، نفوذپذیری و وزن مخصوص نمونه‌ها (در سن ۴۲ روز)

شماره مخلوط	درصد دوده سیلیس	مقاومت فشاری (kg/cm^2)	عمق نفوذ آب در نمونه (mm)	وزن مخصوص (kg/m^3)
۱	۰	۲۲۳	۳۰	۲۵۱۵
۲	۵	۲۴۸	۲۵	۲۵۲۸
۳	۱۰	۲۷۵	۱۸	۲۵۴۱
۴	۱۵	۲۹۳	۱۵	۲۵۴۶
۵	۲۰	۳۲۷	۱۲	۲۵۵۴
۶	۲۵	۳۵۲	۱۰	۲۵۵۷
۷	۴۰	۲۱۰	۴۵	۲۵۱۲
۸	۶۰	۱۶۲	۵۶	۲۵۰۷

Archive of SID
www.SID.ir

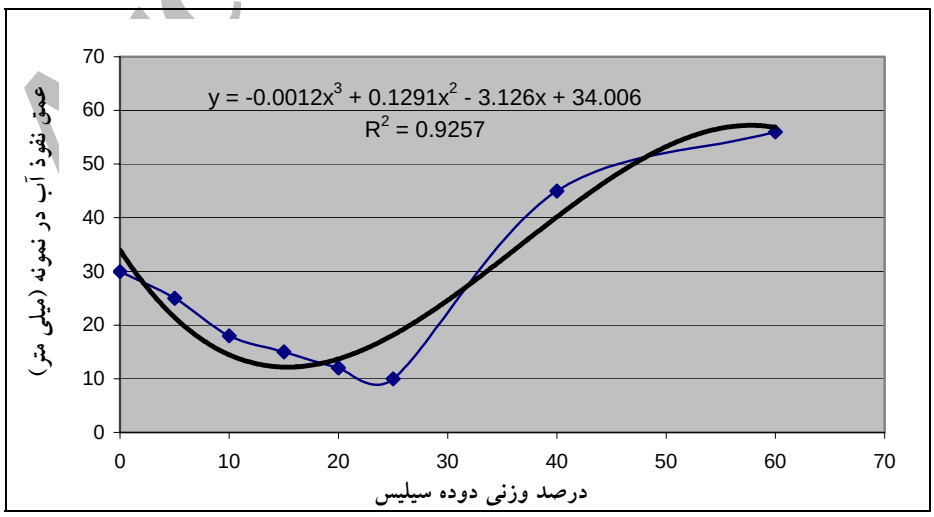
تاثیر مقدار دوده سیلیس بر عمق نفوذ آب در نمونه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

در شکل ۲ رابطه مقاومت فشاری نمونه‌ها و میزان دوده سیلیس مورد استفاده در مخلوط ارائه شده، همچنین در شکل ۳ رابطه میزان سیلیس در مخلوط و وزن مخصوص نمونه‌ها مشخص شده است.

همانطور که از شکل ۱ پیداست، با افزایش مقدار دوده سیلیس در مخلوطهای بتن غلتکی، میزان نفوذ آب در نمونه‌ها کمتر می‌شود به طوریکه در صورت استفاده از ۲۵ درصد وزنی دوده سیلیس جایگزین سیمان عمق نفوذ آب از ۳۰ میلی متر (در حالت بدون مصرف دوده سیلیس) به مقدار۱۰ میلی‌متر می‌رسد. این مطلب را می‌توان چنین توجیه نمود که دوده سیلیس به عنوان مکمل ریزدانه‌ها در مخلوط، منافذ سنگدانه‌ها و فضاهای خالی را پرکرده و سبب ایجاد بتنی همگن و متراکم می‌شود. این مسأله موجب کاهش نفوذپذیری (به سبب کاهش حفره‌ها و مجراهای مویینه) از طرفی و افزایش مقاومت فشاری (به سبب اتصال بهتر دانه‌های سنگی با ملات و همچنین اتکای سنگدانه‌ها به یکدیگر) از طرف دیگر می‌شود که این مسأله در شکل ۲ نشان داده شده است. ضمنا همانطور که از شکل ۳ مشخص شده، افزایش مقدار دوده سیلیس در مخلوط، منجر به تراکم بهتر نمونه‌ها و بهبود غلتک‌پذیری شده که نهایتا این عوامل سبب می‌شوند، وزن مخصوص نیز افزایش یابد [۳].

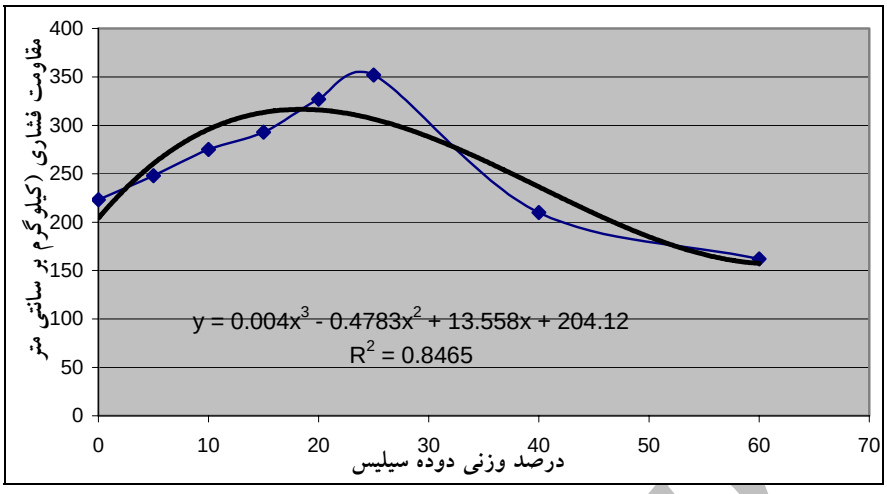
با بررسی اجمالی آماری منحنی شکل ۱ که با یک معادله درجه سوم برازش شده، ضریب همبستگی دو پارامتر (میزان دوده سیلیس و عمق نفوذ آب در نمونه) R=۰/۹۶ به‌دست آمده است که نشان می‌دهد در پارامتر مذکور به نحو قابل ملاحظه‌ای همبستگی معکوس دارند.

در تفسیر شکل ۲ که اثر افزایش میزان دوده سیلیس در مخلوط بر مقاومت فشاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد با توجه به مطالبی که در بالا ذکر شد، می‌توان گفت که دوده سیلیس ضمن پر کردن خلل وفرج بین ذرات و سنگدانه‌های بتن با آهک آزاد، ژل سیلیکاتی C-S-H را تقویت کرده و موجب افزایش قابل توجه در مقاومت فشاری می‌شود. به طوری که با افزایش دوده سیلیس، مقاومت فشاری نمونه‌ها زیاد شده است به طوری که با مصرف ۲۵ درصد دوده سیلیس، مقاومت فشاری نمونه‌ها به ۳۵۲ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع می‌رسد در حالیکه بدون استفاده از دوده سیلیس، مقاومت فشاری فقط ۲۲۳ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع است [۳].

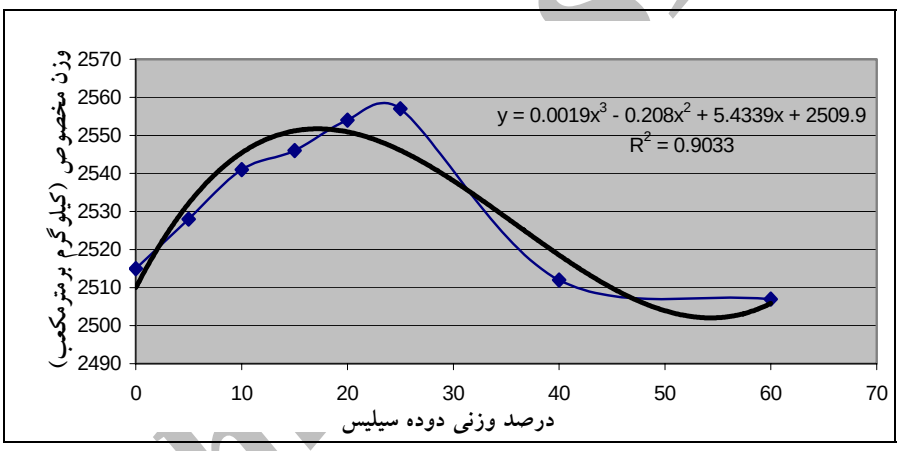


شکل ۱ رابطه عمق نفوذ آب در نمونه‌ها و میزان دوده سیلیس [۳]

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۲ رابطه مقاومت فشاری و میزان دوده سیلیس در مخلوط[۳]



شکل ۳ رابطه وزن مخصوص و میزان دوده سیلیس در مخلوط[۳]

همانطور در شکل ۲ می‌بینیم، منحنی به‌دست آمده، با معادله‌ای درجه سوم برازش شده و ضریب همبستگی آن برابر R =۰/۹۲ محاسبه شده که بخوبی نشانگر همبستگی مستقیم و نسبتا کامل بین دو پارامتر (مقاومت فشاری و میزان دوده سیلیس) است.

همچنین در تفسیر شکل ۳ که رابطه وزن مخصوص و میزان دوده سیلیس در مخلوط را نشان می‌دهد ـ می‌بینیم که افزایش دوده سیلیس در مخطوط بتن غلتکی موجب افزایش وزن مخصوص شده است که علت آن را می‌توان کاهش حفره‌ها و فضای خالی مخلوط بتن ــ به علت پرشدن آنها با مواد سیمانی (دوده سیلیس و سیمان) ــ دانست [۳].

در شکل ۳ مانند شکلهای ۲و۱، منحنی به‌دست آمده با یک معادله درجه سوم برازش شده و ضریب همبستگی دو پارامتر مذکور (وزن مخصوص و میزان دوده سیلس) R=۰/۹۵ به‌دست آمده که نشان می‌دهد این دو پارامتر به نحو چشمگیری با یکدیگر همبستگی مستقیم دارند.

به طور کلی با ملاحظه شکلهای ۱ و ۲ و ۳ می‌بینیم که افزایش مصرف دوده سیلیس در مخلوطها به بیش از ۳۰ درصد، سبب کاهش مقاومت فشاری و وزن مخصوص نمونه‌ها شده و از طرفی سبب افزایش نفوذپذیری (که به صورت عمق نفوذ آب در نمونه بیان شده) می‌شود.

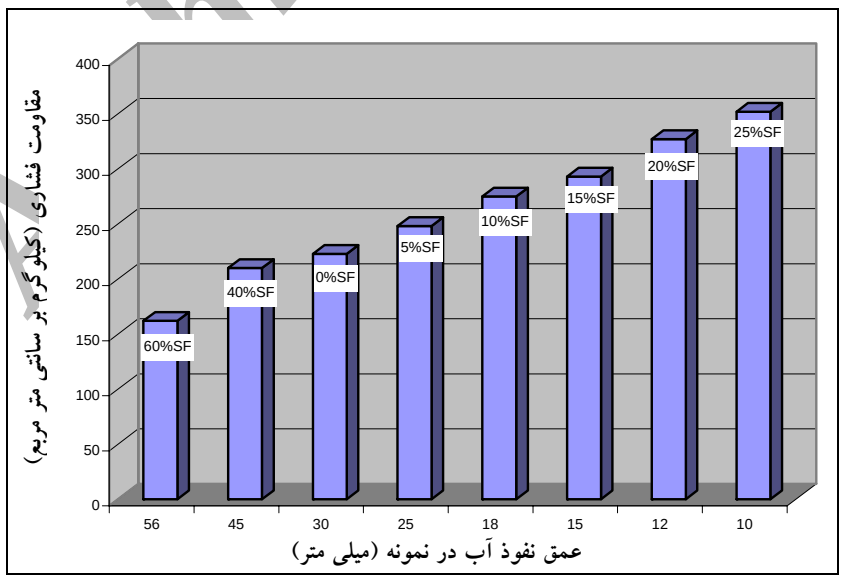
Archive of SID
www.SID.ir

علت این مسأله را می‌توان چنین عنوان کرد که با افزایش دوده سیلیس در مخلوط حفره‌ها و فضاهای خالی بین سنگدانه‌ها پر می‌شود و مقدار دوده سیلیس، اضافه بر حجم فضاهای مذکور در بین سنگدانه‌ها قرار گرفته و به صورت روان کننده عمل کرده واز تراکم کامل و نزدیک شدن دانه‌های سنگی به یکدیگر ممانعت می‌کند که عدم تراکم کافی نمونه‌ها در این حالت سبب کاهش وزن مخصوص و به تبع آن کم شدن مقاومت فشاری می‌شود. به منظور بررسی اثر متقابل نفوذپذیری، مقاومت فشاری و وزن مخصوص نمونه‌ها (با استفاده از مقادیر مختلف دوده سیلیس) نمودارهایی در شکلهای ۴ و ۵ و ۶ ترسیم شده است.

شکل ۴ رابطه بین نفوذپذیری و مقاومت فشاری، شکل ۵ رابطه وزن مخصوص و مقاومت فشاری و شکل ۶ نیز رابطه نفوذپذیری و وزن مخصوص را نشان می‌دهد[۳].

در شکل ۴ می‌بینیم که با افزایش مصرف دوده سیلیس، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یافته و نفوذپذیری آنها کمتر می‌شود؛ یعنی با مقاومت فشاری بیشتر، نفوذپذیری کمتری به‌دست می‌آید و این روند تا وقتی دوده سیلیس در مخلوط بیشتر از ۲۵ درصد نشده باشد، ادامه دارد و لیکن پس از آنکه میزان دوده سیلیس بیش از ۲۵ درصد وزنی (جایگزین سیمان) باشد، ناگهان مقاومت فشاری کاهش یافته و به تبع آن، نفوذپذیری نیز افزایش می‌یابد.

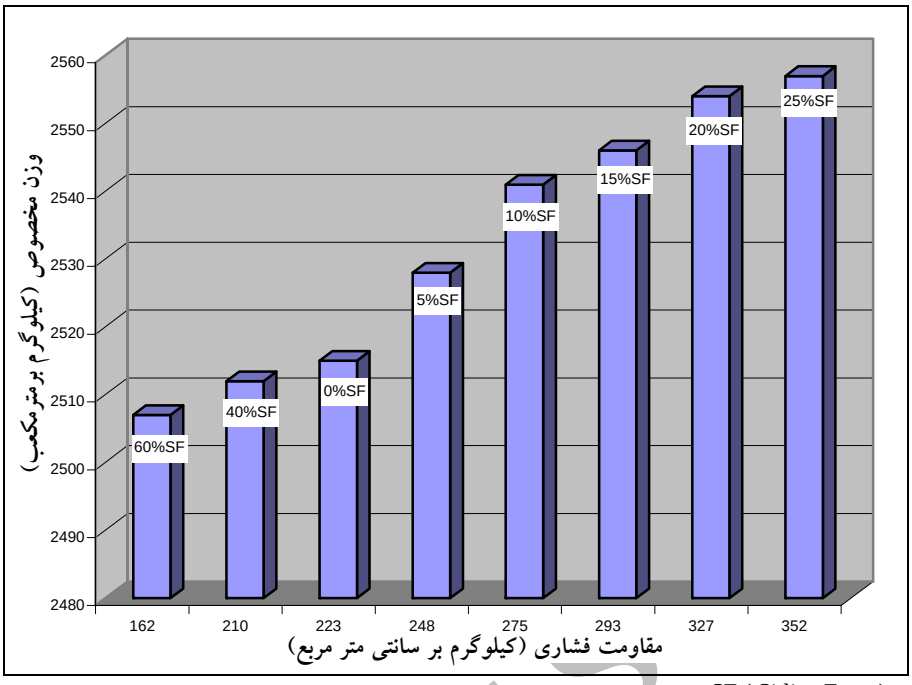
همچنین شکل ۵ بیانگر این است که وزن مخصوص و مقاومت فشاری رابطه مستقیمی دارند و با افزایش وزن مخصوص، مقاومت فشاری نیز زیاد می‌شود و پس از آنکه دوده سیلیس از ۲۵ درصد بیشتر شد، مقاومت فشاری و وزن مخصوص نمونه‌ها به طور توأم رو به کاهش می‌گذارند. به طور مشابه در شکل ۶ نیز مشاهده می‌شود که با افزایش مصرف دوده سیلیس در مخلوطهای بتن غلتکی، وزن مخصوص نمونه‌ها افزایش یافته و این افزایش وزن مخصوص، سبب کاهش نفوذپذیری شده است به طوری که در عمل دیده می‌شود با وزن مخصوص بیشتر، نفوذپذیری کمتری خواهیم داشت و لیکن پس از افزایش مقدار دوده سیلیس به بیش از ۲۵ درصد، این روند سیر نزولی می‌یابد.



SF (Silica Fume) : مقدار دوده سیلیس (درصد)

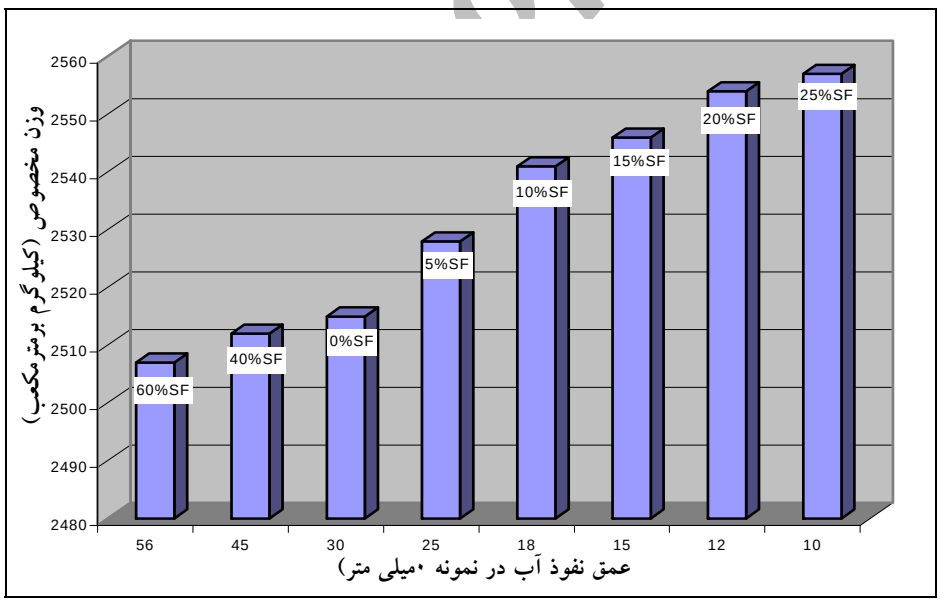
شکل ۴ رابطه نفوذپذیری و مقاومت فشاری[۳]

Archive of SID
www.SID.ir



SF (Si lica Fume): مقدار دوده سیلیس (درصد)

شکل ۵ رابطه مقاومت فشاری و وزن مخصوص[۳]



SF (Silica Fume) : مقدار دوده سیلیس (درصد)

شکل ۶ رابطه وزن مخصوص و نفوذپذیری[۳]

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به بررسیهایی (با توجه به روش آزمایشها و طرح اختلاط مورد استفاده) که در این تحقیق انجام شد، نتایج زیر به‌دست آمد.

۱- جایگزینی دوده سیلیس به جای سیمان در مخلوطهای بتن غلتکی موجب بهبود خواص مفید بتن مانند مقاومت فشاری و نفوذپذیری می‌شود. برای مثال مصرف ۲۵ درصد وزنی دوده سیلیس به جای سیمان در مخلوط،

www.SID.ir

سبب افزایش مقاومت فشاری به میزان ۵۸ درصد می‌شود و همچنین نفوذپذیری را ۳۲ درصد کاهش می‌دهد.

۲- با استفاده از دوده سیلیس، غلتک پذیری بتن غلتکی بهبود یافته و می‌توان به تراکم بهتر و در نتیجه وزن مخصوص و مقاومت فشاری بیشتر رسید.

۳- جایگزین کردن دوده سیلیس به جای سیمان در مخلوطهای بتن غلتکی به میزان بیش از ۲۵ درصد، سبب کاهش مقاومت فشاری بتن و افزایش نفوذپذیری آن می‌شود.

۷- منابع

[1] Tayabji, Shiraz. D, "State- of- Art Report on Roller Compacted Concrete Pavements", Reported by ACI Committee 325, 1995.

[2] Abdul Wahhab H.I. and ASI, I.M. "Optimization of Roller Compacted Concrete for Local Application" , Transportation Research Record 1458, 1994.

[۳] آزادی، عابدین؛ بررسی نفوذپذیری درروسازی‌های بتن غلتکی با استفاده ازپوزولان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۲.

[4] ASTM D1557-O2E1 Standard, "Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56000 ft-lb/ft^3 (2700 KN/m^3))", 2000.

[5] DIN 1048 Standard, "profverfahren fur beton" ,1989.

[6] BS 1881-116 Standard: "Testing Concrete , 14.3-Part 116, Methods for Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes", 1983.

Archive of SID

www.SID.ir