

بررسی تأثیر کاربرد دوده سیلیسی در کاهش نفوذپذیری

بتن‌های پلاستیک دیوارهای آب‌بند

علیرضا باقریⁱ، مهدی علی باباییⁱⁱ، مهدی باباییⁱⁱⁱ

چکیده

از الزامات اصلی بتن‌های پلاستیک مورد استفاده در ساخت دیوار آب بند سدها، مدول ارتجاعی پایین برای سازگاری در عملکرد با پی، مقاومت کافی برای تحمل بارهای وارده و نفوذپذیری کم بمنظور حفظ آب بندی سد است. از این رو بررسی روش‌های کاهش نفوذپذیری بتن‌های پلاستیک بدون افزایش قابل توجه در مدول ارتجاعی آنها از نیازهای اصلی تحقیقات در این حوزه است.

با توجه به این‌که کاربرد دوده سیلیسی در بتن‌های معمولی و توانمند تاثیر بسیار مهمی در کاهش نفوذپذیری این نوع بتن‌ها از طریق گسسته سازی سیستم منافذ دارد، در این تحقیق امکان کاهش نفوذپذیری بتن‌های پلاستیک از طریق کاربرد دوده سیلیسی مطالعه شده است. نتایج نشانگر تاثیر بسیار زیاد دوده سیلیسی در کاهش نفوذپذیری بتن‌های پلاستیک است و در نسبت مساوی آب به مواد سیمانی، امکان کاهش ضریب نفوذپذیری تا ۸۰ برابر وجود دارد. در عین حال کاربرد دوده سیلیسی منجر به افزایش مقاومت و مدول ارتجاعی بتن‌های پلاستیک شده است. لیکن اثر کاهش نفوذپذیری به مراتب بیشتر است؛ به طوری که می‌توان با استفاده از دوده سیلیسی و به کارگیری نسبت آب به سیمان بالاتر به ازای مقاومت و مدول ارتجاعی مشابه به ضریب نفوذپذیری تا ده برابر کمتر نسبت به بتن بدون دوده سیلیسی دست یافت.

کلمات کلیدی

بتن پلاستیک، دیوار آب‌بند، دوده سیلیسی، مدول ارتجاعی، مقاومت، نفوذپذیری

Reduction in the Permeability of Plastic Concrete for Cut-off Walls Through Utilization of Silica Fume

A.R Bagheri.; M Alibabaie.; M. Babaie

ABSTRACT

Principal requirements for plastic concretes used in construction of cut off walls of dams, are a low enough elastic modulus compatible with the surrounding soil, adequate strength for loads sustained and adequate water tightness. Therefore means of reducing permeability without unduly increasing elastic modulus are important areas of research needed in this field.

Considering the effectiveness of silica fume in reducing the permeability of normal and high performance concretes, in this research the extent of improvement in impermeability of plastic concrete through utilization of silica fume was investigated. The results obtained showed the substantial effect of incorporation of silica fume in reducing permeability and at the 15 percent replacement level of cement by silica fume, the coefficient of permeability was reduced 80 times. The utilization of silica fume also increased the strength and elastic modulus of plastic concretes. However the improvement in impermeability was more dominant

ⁱ استادیار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی عمران bagheri@kntu.ac.ir

ⁱⁱ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی عمران

ⁱⁱⁱ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی عمران

and by increasing the water to cementitious materials ratio of plastic concrete containing silica fume it was possible to maintain the strength and elastic modulus at the level of control plastic concrete but achieve a 10 times reduction in permeability.

KEYWORDS

Plastic concrete, cut-off wall, silica fume, elastic modulus, strength, permeability

با توجه به اینکه نفوذپذیری ماتریس‌های سیمانی عمدتاً به نسبت آب به سیمان بستگی دارد، نفوذپذیری مخلوط‌های بتن پلاستیک به میزان قابل توجهی بیشتر از بتن‌های معمولی است. بر اساس بحث فوق مشخص است که در مواردی که بتن پلاستیک با مدول الاستیسیته پایین و در عین حال نفوذپذیری کم مدنظر باشد، دستیابی هم‌زمان به این خواص با مشکل روبرو خواهد بود. بدیهی است دستیابی به روشی که بتواند نفوذپذیری بتن‌های پلاستیک را کاهش دهد در بهبود کیفیت دیوارهای آب‌بند بتن پلاستیک مؤثر خواهد بود. بررسی منابع فنی نشانگر این است که کاربرد دوده‌ی سیلیسی در بتن‌های معمولی تأثیر عمده‌ای در کاهش نفوذپذیری از طریق گسسته‌سازی و ریزتر نمودن ابعاد منافذ خمیر سیمان و بهبود ناحیه انتقال بین سنگدانه و خمیر سیمان دارد [۴] - [۶]. در این تحقیق امکان کاهش قابل توجه در نفوذپذیری بتن‌های پلاستیک از طریق کاربرد دوده‌ی سیلیسی مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به اهمیت پارامترهایی نظیر مقاومت و خصوصاً مدول ارتجاعی در مخلوط‌های بتن پلاستیک، تأثیر کاربرد دوده سیلیسی روی این پارامترها نیز بررسی شده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

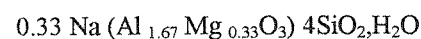
هدف برنامه مطالعاتی بررسی تأثیر کاربرد درصد‌های مختلف دوده‌ی سیلیسی شامل ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد‌های مواد سیمانی روی خواص مقاومتی، مدول ارتجاعی و نفوذپذیری بتن‌های پلاستیک بوده است. برای مشخص کردن اینکه آیا نتایج حاصل از تحقیق به بتن‌های پلاستیک در رده‌های مختلف مقاومتی قابل تعمیم است، مطالعات فوق برای بتن‌های پلاستیک با نسبت‌های آب به مواد سیمانی ۱/۸، ۲/۲ و ۲/۶ تکرار شد. در تمامی مخلوط‌ها نسبت آب به بنتونیت ۱۲ در نظر گرفته شد. طرح‌های ساخته شده در جدول ۱ آورده شده است. مخلوط‌ها با نسبت آب به مواد سیمانی ۲/۶ و ۲/۲ و ۱/۸ به ترتیب با کد M و H و L مشخص شده‌اند. درصد‌های دوده‌ی سیلیسی به کار رفته با کدهای (۱۰، ۵، ۰) می باشد. لذا منظور از مخلوط M۱۰ مخلوط بتن پلاستیک با نسبت آب به مواد سیمانی متوسط (M) و کاربرد دوده سیلیسی به میزان ۱۰ درصد مجموع مواد سیمانی است.

آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها به شرح زیر می-

۱- مقدمه

کنترل تراوش و آب‌بندی در پی از مسائل بسیار مهم در طراحی و احداث سدها است. روش‌های مختلفی برای کنترل تراوش مورد استفاده قرار می‌گیرد. اجرای دیوار آب‌بند بتن پلاستیک یکی از روش‌های مؤثر برای آب‌بندی پی سدها بر روی بسترهای آبرفتی است. الزامات اصلی بتن‌های پلاستیک مدول ارتجاعی کم و شکل‌پذیری زیاد برای سازگاری با پی، مقاومت کافی برای تحمل بارهای وارده و نفوذپذیری کم بمنظور کنترل تراوش و دستیابی به آب‌بندی مورد نظر است [۲]، [۱].

با توجه به روانی زیاد مورد نیاز در بتن‌های پلاستیک بمنظور امکان اجرا به روش قیف و لوله ترمی و همچنین لزوم دستیابی به نسبت‌های بسیار بالای آب به مواد سیمانی برای امکان کاهش مدول ارتجاعی، مقدار آب در این نوع بتن‌ها بسیار زیاد بوده و مقادیر از ۲۵۰ تا ۴۵۰ لیتر در متر مکعب متعارف است. برای حفظ انسجام و جلوگیری از ته نشینی و جداشدگی ذرات سیمان و سنگدانه‌ها در مخلوط بتن پلاستیک، کاربرد بنتونیت در اینگونه بتن‌ها ضروری است. بنتونیت مورد مصرف در بتن پلاستیک عموماً از نوع سدیم مونت‌موریلونیت با فرمول شیمیایی زیر است:



شایان ذکر است اگر مقدار بنتونیت مصرفی در بتن پلاستیک زیاد باشد، مخلوط بیش از حد سفت شده و کارایی کافی نخواهد داشت. اگر مقدار آن کم باشد لزجی حاصل کم شده و انسجام کاهش، و نفوذپذیری گل بنتونیت افزایش می‌یابد [۱].

همانطور که ذکر شد با توجه به لزوم متناسب بودن مدول ارتجاعی دیواره آب‌بند بتن پلاستیک با خواص خاک پیرامون آن، مدول ارتجاعی این نوع بتن‌ها از بتن‌های معمولی بسیار کمتر است و مقادیر متفاوت کمتر از ۱۰۰۰۰ تا بیش از ۵۰۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع گزارش شده‌اند. از این رو، نسبت آب به سیمان در مخلوط‌های بتن پلاستیک بسیار بالا بوده و به‌طور متعارف در محدوده‌ی ۱/۵ الی ۳ و در برخی موارد تا ۴ است [۱] حال آنکه، محدوده‌ی متعارف برای بتن‌های معمولی ۰/۴ تا ۰/۶ است [۳].

باشند:

- تعیین مقاومت فشاری

طبق استاندارد ASTM C39 بر روی نمونه استوانه‌ای 15×30 در سنین ۲۸ و ۹۰ روز تعیین گردید. هر نتیجه میانگین تست ۲ استوانه می‌باشد. قابل توجه است با توجه به مقاومت بسیار کمتر نمونه‌های بتن پلاستیک نسبت به بتن‌های معمولی سرعت بارگذاری کاهش داده شد تا مقاومت نهایی نمونه‌ها در مدت 65 ± 15 ثانیه حاصل گردد [۸]، [۷].

- تعیین مدول الاستیسیته

این آزمایش طبق استاندارد ASTM C469 بر روی نمونه استوانه‌ای 15×30 در سن ۹۰ روز با سرعت اعمال بار کاهش یافته و بر اساس اندازه گیری کرنش ۱۵ cm وسط نمونه‌ها

تحت بار معادل ۴۰٪ بار نهایی تعیین شده است. هر نتیجه میانگین آزمون ۲ استوانه است.

- ضریب نفوذپذیری

طبق استاندارد USBR-4913-92 و بر روی نمونه استوانه‌ای 15×30 در سن ۹۰ روز انجام شد [۹]. هر نتیجه، میانگین آزمایش ۲ نمونه است. به منظور جلوگیری از خطای ناشی از مخلوط شدن هوای فشرده با آب ورودی به نمونه‌ها، که در مراجع مورد اشاره قرار گرفته [۱۰]، در تجهیزات به کار گرفته شده در این تحقیق دستگاه اعمال فشار اصلاح شده و فشار آب ورودی عاری از هوای فشرده به نمونه وارد شده است.

جدول (۱): مقادیر اجزاء مخلوط‌های ساخته شده

نم مخلوط	نسبت آب به مواد سیمانی	درصد دوده سیلیسی	آب (kg/m^3)	سیمان (kg/m^3)	دوده سیلیسی (kg/m^3)	بتنویت (kg/m^3)	شن ۱۹ (kg/m^3)	شن ۹ (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	اسلامپ (cm)
H۰	۲/۶	۰	۳۹۷	۱۵۲/۷	۰	۳۰/۵	۴۷۵/۸	۲۷۹/۴	۶۱۷/۹	۲۰
H۵	۲/۶	۵	۳۹۷	۱۴۵	۷/۶	۳۰/۵	۴۷۴/۸	۲۷۸/۸	۶۱۶/۶	۱۹.۵
H۱۰	۲/۶	۱۰	۳۹۷	۱۳۷/۴	۱۵/۳	۳۰/۵	۴۷۳/۸	۲۷۸/۳	۶۱۵/۳	۱۹
H۱۵	۲/۶	۱۵	۳۹۷	۱۲۹/۸	۲۲/۹	۳۰/۵	۴۷۱/۶	۲۷۷/۷	۶۱۴	۱۸.۵
۰M	۲/۲	۰	۳۹۷	۱۸۰/۴	۰	۳۰/۵	۴۶۷/۶	۲۷۴/۶	۶۰۷/۴	۲۰.۵
۵M	۲/۲	۵	۳۹۷	۱۷۱/۴	۹/۰.۲	۳۰/۵	۴۶۶/۵	۲۷۳/۹	۶۰۵/۹	۲۰
۱۰M	۲/۲	۱۰	۳۹۷	۱۶۲/۴۱	۱۸/۰.۵	۳۰/۵	۴۶۵/۳	۲۷۳/۲	۶۰۴/۳	۱۹.۵
۱۵M	۲/۲	۱۵	۳۹۷	۱۵۳/۴	۲۷/۰.۷	۳۰/۵	۴۶۴/۱	۲۷۲/۵	۶۰۲/۸	۱۹
L۰	۱/۸	۰	۳۹۷	۲۲۰/۶	۰	۳۰/۵	۴۵۶/۱	۲۶۷/۹	۵۹۲/۳	۲۱
۵L	۱/۸	۵	۳۹۷	۲۰۹/۵	۱۱	۳۰/۵	۴۵۳/۵	۲۶۷	۵۹۰/۵	۲۰.۵
۱۰L	۱/۸	۱۰	۳۹۷	۱۹۸/۵	۲۲/۱	۳۰/۵	۴۵۳/۲	۲۶۶/۲	۵۸۸/۶	۲۰
۱۵L	۱/۸	۱۵	۳۹۷	۱۸۷/۵	۳۲/۱	۳۰/۵	۴۵۱/۸	۲۶۵/۳	۵۸۶/۸	۱۹.۴

است.

۳- مشخصات مصالح

- سنگدانه‌های مصرفی شامل شن با دو گروه اندازه‌ای ($9/5-19$ mm) و ($5-9/5$ mm) و ماسه شکسته با اندازه حداکثر ۵ mm بوده است. دانه بندی گروه‌های مختلف مصالح سنگی در جداول ۵ و ۶ ارائه شده است.

- دوده‌ی سیلیسی مصرفی تولید کارخانه فروآلیاز ایران می‌باشد که آنالیز شیمیایی مطابق جدول ۷ می‌باشد

مصالح مورد استفاده در ساخت مخلوط‌های بتن پلاستیک شامل آب، سیمان، بتنویت، دوده‌ی سیلیسی و مصالح سنگی بوده‌اند که خواص آنها، به شرح ذیل می‌باشد:
- آب مصرفی آب شرب تهران بوده است.

- سیمان مصرفی نوع دو کارخانه سیمان تهران بود که آزمایش‌ها تعیین مقاومت فشاری و زمان گیرش و تجزیه شیمیایی بر روی آن انجام شد که خواص آن با استاندارد ASTM C 150 مطابقت داشت. نتایج آزمایش‌های سیمان در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است.

- بتنویت مصرفی تولید شرکت باریت فلات ایران واقع در سلفچگان می‌باشد. آنالیز شیمیایی بتنویت در جدول ۴ ارائه شده

جدول (۲): نتایج آزمایشهای تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی سیمان

مقاومت فشاری kg/cm^2		جرم حجمی gr/cm^3	زمان گیرش نهایی (دقیقه)	زمان گیرش اولیه (دقیقه)	سطح ویژه cm^2/gr	ویژگی مورد آزمایش
۲۸ روزه	۷ روزه					
۲۸۵	۱۸۵	۳/۰۵	۱۶۴	۱۳۰	۲۸۷۰	نتیجه حاصله

جدول (۳): نتایج آزمایش تجزیه شیمیایی سیمان

اکسید	K_2O	Na_2O	SO_3	MgO	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2
(%)	۰/۹۵	۰/۳۱	۱/۶	۳/۶۳	۶۲/۳۱	۳/۲۵	۴/۰۹	۲۰/۷۱

جدول (۴): نتایج آنالیز شیمیایی بنتونیت

اکسید	K_2O	Na_2O	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2
(%)	۲	۳	۳	۹	۱۴	۶۰

جدول (۵): نتایج دانه بندی شن

اندازه الک (mm)	درصدهای عبوری شن ۹/۵ mm	درصدهای عبوری شن ۱۹ mm	درصدهای عبوری شن مخلوط ۹/۵ و ۱۹ mm
۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۹	۱۰۰	۹۴/۲	۹۷/۵
۱۲/۵	۹۹/۳	۴۳/۷۱	۷۹/۱
۹/۵	۶۷/۷	۱۰/۰۶	۴۴/۶
۴/۷۵	۵/۱۸	۰/۲۴	۲/۸

جدول (۷): تجزیه شیمیایی دوده سیلیسی مورد مصرف در

پروژه

آنالیز شیمیایی دوده سیلیسی	
SiO_2	۹۲/۶
SiC	۰/۵
C	۰/۳
Fe_2O_3	۰/۸۷
Al_2O_3	۱/۳۲
CaO	۰/۴۹
MgO	۰/۹۷
Na_2O	۰/۳۱
K_2O	۱/۰۱
P_2O_5	۰/۱۶
SO_3	۰/۱
Cl	۰/۰۴
سطح ویژه	$۲۰/۲ \text{ m}^2/\text{g}$

جدول (۶): نتایج دانه بندی ماسه

درصد عبوری ماسه	اندازه الک (mm)
۱۰۰	۹/۵
۹۲/۶	۴/۷۵
۶۵/۷	۲/۳۶
۴۲/۵	۱/۱۸
۲۳	۰/۶
۱۶/۲۶	۰/۳
۷	۰/۱۵
۴/۱	۰/۰۷۵

۴- نحوه ساخت مخلوط بتن پلاستیک

۴-۱- ساخت دوغاب بنتونیت

برای ساخت دوغاب (گل) بنتونیت با استفاده از دستگاه همزن با دور بالا (براساس توصیه ICOLD با حداقل سرعت ۱۴۵۰ rpm) بنتونیت با آب مخلوط می‌گردد. بمنظور عمل‌آوری و اشباع دوغاب بنتونیت، بر اساس توصیه مراجع مختلف به مدت ۲۴ ساعت در مخزن عمل‌آوری نگهداری شد [۱۲]، [۱۱].

۴-۲- ساخت گروت

برای ساخت گروت، سیمان را که از قبل بر اساس طرح اختلاط مورد نظر توزین و با درصد مشخص از دوده سیلیسی کاملاً مخلوط شده بود به دوغاب بنتونیت اضافه و توسط همزن حدود ۵ دقیقه مخلوط گردید.

۴-۳- ساخت بتن پلاستیک

بعد از تهیه گروت مصالح سنگی در مخلوط‌کن با دوغاب سیمان و بنتونیت مخلوط شد.

۴-۴- تهیه نمونه‌ها

بعد از تهیه بتن پلاستیک آزمایش اسلامی بر اساس

استاندارد ASTM C143 انجام شد، سپس از بتن پلاستیک نمونه‌های لازم در قالب‌های استوانه‌ای ریخته و آماده شدند. بعد از اعمال ۲۴ ساعت عمل‌آوری اولیه نمونه‌ها از قالب خارج و درون حوضچه‌های عمل‌آوری قرار گرفتند.

۵- نتایج آزمایشها

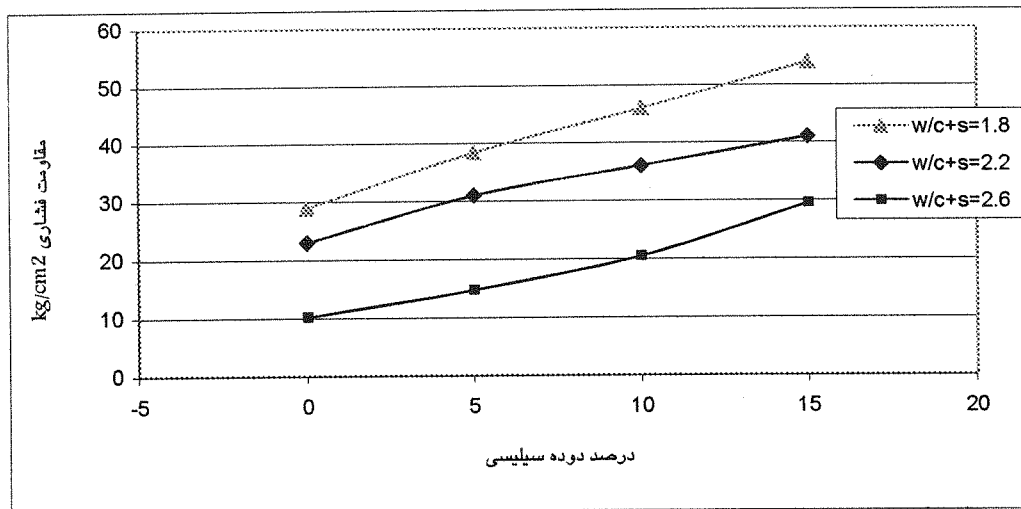
نتایج آزمایشهای تعیین مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و ضریب نفوذپذیری مخلوط‌های بتن پلاستیک در جدول ۸ ارائه شده است.

۵-۱- مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری ۹۰ روزه مخلوط‌های بتن پلاستیک با درصدهای مختلف دوده سیلیسی برای ۲ نسبت آب به مواد سیمانی مختلف مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در هر ۳ نسبت آب به سیمان با افزایش درصد دوده سیلیسی مقاومتها به میزان بسیار قابل توجهی افزایش یافته‌اند تاثیر دوده سیلیسی در افزایش مقاومت توسط محققین مختلف برای بتن‌های معمولی نیز گزارش شده است و علل اصلی آن بهبود ریز ساختار خمیر سیمان از طریق گسسته سازی و ریزتر نمودن منافذ و همچنین بهبود کیفیت ناحیه انتقالی سنگدانه و خمیر سیمان می‌باشد [۳]-[۵].

جدول (۸): نتایج آزمایشهای مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و ضریب نفوذپذیری

ضریب نفوذپذیری ۹۰ روزه (m/s)	مدول الاستیسیته ۹۰ روزه (kg/cm ²)	مقاومت فشاری (kg/cm ²)		مقدار دوده سیلیسی Kg/m ³	مقدار سیمان Kg/m ³	نسبت آب به مواد سیمانی	شماره مخلوط
		۹۰ روز	۲۸ روز				
۱۰ ^{-۹} * ۲/۴	۱۵۰۰۰	۱۰/۲	۸/۵	۰	۱۵۲/۷	۲/۶	H۰
۱۰ ^{-۱۰} * ۶	۱۶۱۰۰	۱۴/۸	۱۲/۹	۷/۶	۱۴۵	۲/۶	H۵
۱۰ ^{-۱۰} * ۳	۱۹۷۰۰	۲۰/۵	۱۸/۵	۱۵/۳	۱۳۷/۴	۲/۶	H۱۰
۱۰ ^{-۱۱} * ۴/۹	۲۷۰۰۰	۲۹/۵	۲۰	۲۲/۹	۱۲۹/۸	۲/۶	H۱۵
۱۰ ^{-۱۰} * ۹	۲۰۰۰۰	۲۳	۱۲/۷	۰	۱۸۰/۴	۲/۲	۰M
۱۰ ^{-۱۰} * ۳/۵	۲۹۰۰۰	۳۱	۱۵/۷	۹/۰۲	۱۷۱/۴	۲/۲	۵M
۱۰ ^{-۱۱} * ۸/۵	۳۹۸۰۰	۳۶	۱۸	۱۸/۰۵	۱۶۲/۴۱	۲/۲	۱۰M
۱۰ ^{-۱۱} * ۲	۵۴۰۰۰	۴۱	۲۳/۸	۲۷/۰۷	۱۵۳/۴	۲/۲	۱۵M
۱۰ ^{-۱۰} * ۵/۸	۳۲۰۰۰	۲۹	۲۲/۵	۰	۲۲۰/۶	۱/۸	L۰
۱۰ ^{-۱۰} * ۱/۴	۴۳۶۰۰	۳۸/۴	۳۱/۲۳	۱۱	۲۰۹/۵	۱/۸	۵L
۱۰ ^{-۱۱} * ۵/۲	۷۰۰۰۰	۴۶	۴۰/۳	۲۲/۱	۱۹۸/۵	۱/۸	۱۰L
۱۰ ^{-۱۲} * ۷/۲	۸۸۰۰۰	۵۴	۴۸/۷	۳۳/۱	۱۸۷/۵	۱/۸	۱۵L



شکل (۱) : تاثیر دوده سیلیسی بر روی مقاومت فشاری بتن پلاستیک با نسبت‌های آب به مواد سیمانی مختلف

افزایش درصد دوده سیلیسی تا ۱۵ درصد وزنی مواد سیمانی مدول الاستیسیته مخلوط‌های بتن پلاستیک به میزان قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. همانطور که در بخش ۵-۱ ذکر شد کاربرد دوده سیلیسی باعث بهبود مقاومت بتن از طریق گسسته سازی و ریزتر نمودن منافذ و بهبود کیفیت ناحیه انتقالی سنگدانه و خمیر سیمان و به تبع آن افزایش در مدول الاستیسیته می‌شود [۳]-[۵].

میزان افزایش در مدول الاستیسیته مخلوط‌های بتن پلاستیک با نسبت آب به مواد سیمانی ۱/۸ برای مخلوط حاوی ۱۵٪ دوده سیلیسی حدود ۱۸۰٪ نسبت به مخلوط کنترل این گروه بوده است، برای مخلوط‌های بتن پلاستیک با نسبت آب به مواد سیمانی ۲/۶ افزایش ناشی از جایگزینی ۱۵٪ دوده سیلیسی در مواد سیمانی نسبت به مخلوط کنترل این گروه حدود ۷۰٪ بوده است، با توجه به اینکه مدول الاستیسیته بتن‌های پلاستیک از پارامترهای مهم مکانیکی آن خصوصاً در سازگاری عملکرد دیوار آب بند بتن پلاستیک با خاک اطراف آن می‌باشد، ارتباط بین مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری و تاثیر دوده سیلیسی بر آن حائز اهمیت است.

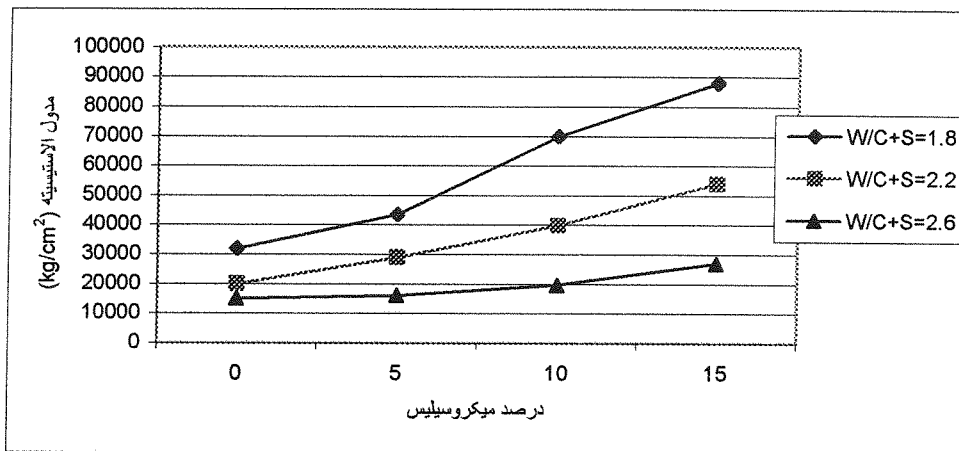
تحقیقات انجام شده در خصوص تاثیر کاربرد دوده سیلیسی روی خواص مکانیکی بتن‌های معمولی نشانگر آن است که برای بتن‌های حاوی دوده سیلیسی رابطه بین مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری مشابه بتن‌های بدون دوده سیلیسی می‌باشد و یا به عبارت دیگر می‌توان انتظار داشت که به ازای مقاومت برابر، بتن حاوی دوده سیلیسی و بتن بدون آن دارای مدول الاستیسیته مشابه باشند [۵]، [۱۴].

برای مخلوط با نسبت آب به مواد سیمانی ۲/۶ حاوی ۱۵٪ دوده سیلیسی مقاومت از $10/2 \text{ Kg/cm}^2$ به $29/0 \text{ Kg/cm}^2$ افزایش یافته که نشانگر ۱۸۹٪ افزایش نسبت به مخلوط بدون دوده سیلیسی (مخلوط کنترل) می‌باشد. هر چند برای مخلوط‌های بتن پلاستیک با نسبت‌های کمتر آب به مواد سیمانی شدت تاثیر دوده سیلیسی در ارتقا مقاومت، در حد فوق الذکر نمی‌باشد، لیکن کماکان شاهد عملکرد بسیار موثر دوده سیلیسی هستیم. به طور مثال برای مخلوط بتن پلاستیک با نسبت آب به مواد سیمانی ۱/۸ با جایگزینی ۱۵٪ مواد سیمانی با دوده سیلیسی، میزان افزایش در مقاومت نسبت به مخلوط کنترل ۸۶٪ تعیین شد. شایان توجه است که تاثیر دوده سیلیسی در ارتقا خواص مقاومتی بتن‌های معمولی با نسبت‌های آب به مواد سیمانی متعارف (۰/۴ تا ۰/۶) عمدتاً در حد ۳۰ تا ۴۰ درصد گزارش شده است [۴]، [۱۳].

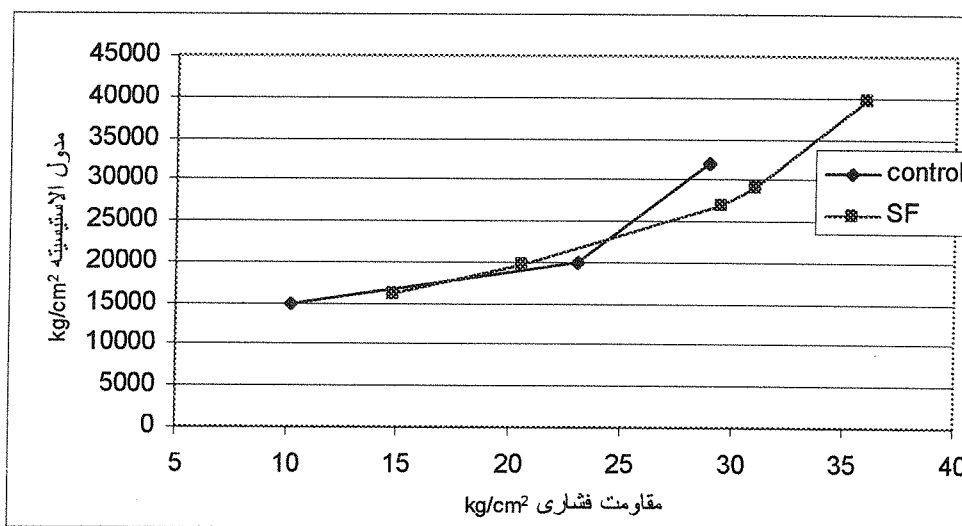
نکته دیگری که در اینجا قابل توجه می‌باشد این است که در بتن‌های پلاستیک مورد مطالعه کاربرد دوده سیلیسی برای جایگزینی مواد سیمانی حتی در حد ۱۵٪، تاثیر قابل توجهی در کاهش کارایی مخلوط نداشته است. لیکن در بتن‌های معمولی کاربرد دوده سیلیسی عموماً منجر به کاهش قابل توجه کارایی می‌گردد که بایستی توسط مواد روانساز جبران گردد.

۵-۲- مدول الاستیسیته

در شکل ۲ تاثیر کاربرد درصد‌های مختلف دوده سیلیسی به عنوان بخشی از مواد سیمانی روی مدول الاستیسیته مخلوط‌های بتن پلاستیک با نسبت‌های آب به مواد سیمانی ۲/۶، ۲/۲ و ۱/۸ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با



شکل (۲): تاثیر دوده سیلیسی بر روی مدول الاستیسیته بتن پلاستیک با نسبت‌های آب به سیمان مختلف



شکل (۳): رابطه مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری برای بتن‌های پلاستیک با و بدون دوده سیلیسی

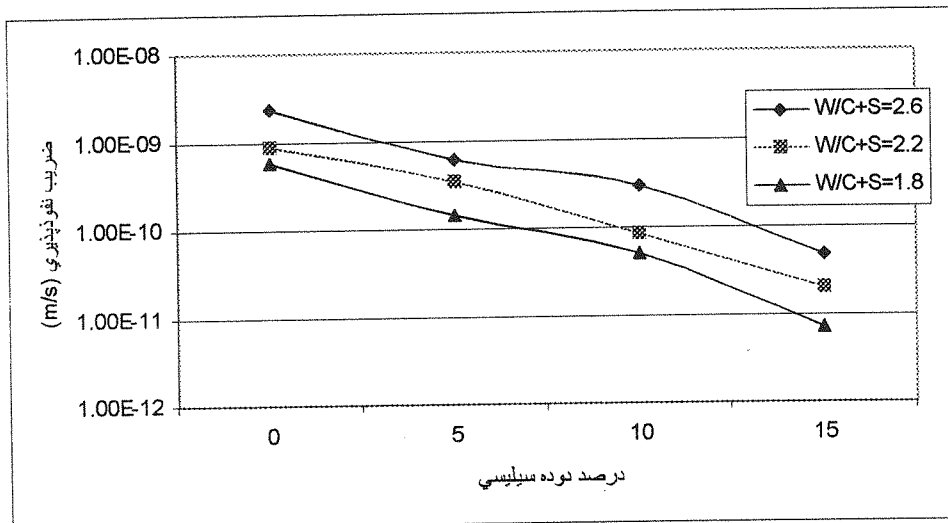
الاستیسیته دست یافت.

۵-۳- نفوذپذیری

به علت نسبت‌های بالای آب به سیمان در بتن‌های پلاستیک ضریب نفوذپذیری اینگونه بتن‌ها بالا می‌باشد. مقادیر گزارش شده توسط مراجع برای این نوع بتن‌ها عموماً در محدوده m/s 10^{-8} تا 10^{-10} بوده‌اند [۱]، [۷]، [۱۰]. شایان ذکر است که ضریب نفوذپذیری برای بتن‌های معمولی با نسبت آب به سیمان $0/5$ حدود 10^{-12} m/s می‌باشد [۲].

نتایج حاصله از آزمایش‌های تعیین ضریب نفوذپذیری برای بتن‌های پلاستیک مورد مطالعه در این تحقیق در جدول ۸ و شکل ۴ ارائه شده‌اند.

بمنظور مشخص نمودن وضعیت در بتن‌های پلاستیک، در شکل ۳ بر اساس نتایج حاصله در این تحقیق رابطه بین مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری برای بتن‌های پلاستیک با و بدون دوده سیلیسی ارائه شده است، همانطور که از شکل مشخص است کاربرد دوده سیلیسی تأثیر محسوس روی این رابطه ندارد و بر اساس نتایج حاصله می‌توان انتظار داشت به ازای مقاومت برابر، بتن پلاستیک حاوی دوده سیلیسی دارای مدول الاستیسیته مشابه و یا حتی کمتر از بتن پلاستیک بدون دوده سیلیسی باشد. این موضوع از آن نظر حائز اهمیت می‌باشد که اگر مشخص گردد کاربرد دوده سیلیسی باعث کاهش نفوذپذیری بتن پلاستیک در مقاومت برابر می‌گردد آنگاه می‌توان به این مزیت بدون اثرات منفی افزایش در مدول



شکل (۴): تاثیر دوده سیلیسی روی ضریب نفوذپذیری بتن‌های پلاستیک با نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی

همانطور که در بخش‌های ۱-۵ و ۲-۵ مشخص گردید، در بتن‌های پلاستیک نیز همانند بتن‌های معمولی کاربرد دوده سیلیسی تاثیری محسوس روی روابط بین مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری ندارد و لذا برای یک مقاومت یکسان می‌توان مدول الاستیسیته یکسانی را برای بتن‌های پلاستیک با دوده سیلیسی و یا بدون آن در نظر گرفت. حال با فرض مقاومت فشاری مورد نظر 30 kg/cm^2 برای بتن پلاستیک، بر اساس شکل ۱ مشخص است که می‌توان به این مقاومت با بتن پلاستیک بدون کاربرد دوده سیلیسی و با نسبت آب به مواد سیمانی $1/8$ دست یافت. در عین حال بتن پلاستیک حاوی 15% دوده سیلیسی، در نسبت آب به مواد سیمانی $2/6$ مقاومت 30 kg/cm^2 بدست می‌دهد. به عبارت دیگر می‌توان مقدار مواد سیمانی را حدود 45% کاهش داد و کماکان مقاومت مورد نظر را حاصل نمود. البته باید توجه داشت که قیمت دوده سیلیسی زیادتر از سیمان است و کاهش در مقدار سیمان لزوماً منجر به کاهش در قیمت تمام شده نخواهد شد.

با توجه به یکسان بودن مقاومت‌های دو نوع مخلوط بتن پلاستیک فوق‌الذکر مدول الاستیسیته آنها نیز مشابه خواهد بود. در خصوص نفوذپذیری، طبق نتایج جدول ۸، ضریب نفوذپذیری بتن پلاستیک بدون دوده سیلیسی و با نسبت آب به مواد سیمانی $1/8$ برابر $0.8 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ تعیین شده است در صورتی که بتن پلاستیک با نسبت آب به مواد سیمانی $2/6$ ، حاوی 15% دوده سیلیسی دارای ضریب نفوذپذیری $11 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ می‌باشد. به عبارت دیگر می‌توان با کاربرد دوده سیلیسی در مقاومت برابر و مدول الاستیسیته مشابه، ضریب نفوذپذیری بتن پلاستیک را بیش از 10 برابر کاهش داد.

برای تعمیم بحث فوق، نتایج ضریب نفوذپذیری بتن‌های پلاستیک به ازای مقاومت فشاری در شکل ۵ ارائه شده است.

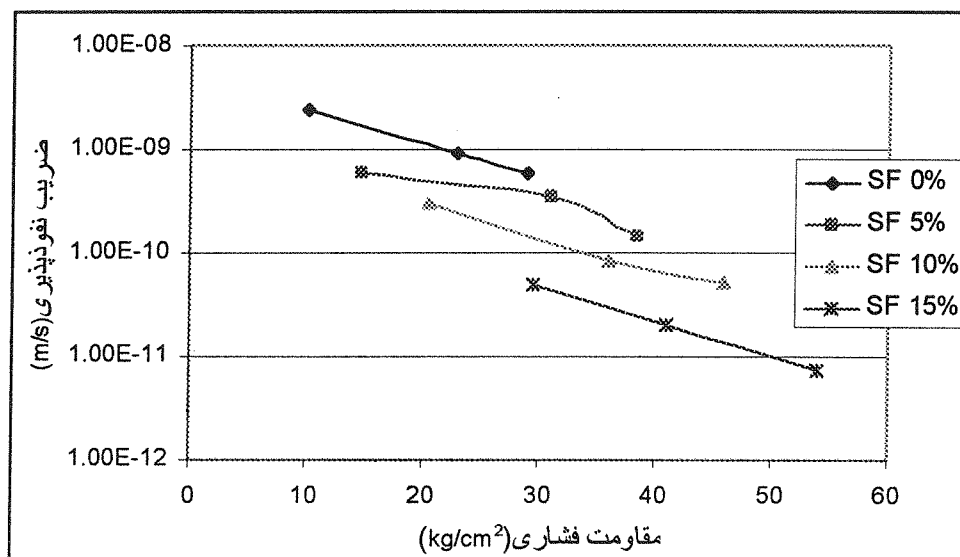
همانطور که مشخص است کاربرد دوده سیلیسی تاثیر بسیار مهمی در کاهش ضریب نفوذپذیری بتن‌های پلاستیک دارد، به طور مثال برای بتن پلاستیک با نسبت آب به مواد سیمانی $1/8$ کاربرد 15% دوده سیلیسی باعث کاهش ضریب نفوذپذیری از $0.8 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ به $0.7 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ شده است (قریب به هشتاد برابر کمتر). مکانیزم‌های اصلی کاهش در نفوذپذیری، گسسته سازی و ریزتر نمودن منافذ خمیر سیمان و همچنین بهبود کیفیت ناحیه انتقالی بین سنگدانه‌ها و خمیر سیمان می‌باشد که توسط محققین مختلف برای بتن‌های معمولی نیز گزارش شده است [۲]-[۵]. شایان ذکر است که علارغم کاهش بسیار زیاد نفوذپذیری، همانطور که در بخش‌های قبلی مشخص شد کاربرد دوده سیلیسی باعث افزایش مقاومت و به تبع آن افزایش در مدول الاستیسیته بتن پلاستیک می‌گردد. با توجه به اینکه افزایش در مدول الاستیسیته می‌تواند مشکلاتی را در خصوص سازگاری تغییر شکلهای دیوار آب بند و پی اطراف ایجاد نماید، بمنظور مشخص کردن امکان کاربرد دوده سیلیسی برای کاهش نفوذپذیری بتن‌های پلاستیک بدون افزایش در مدول الاستیسیته برآیند تاثیرات دوده سیلیسی برای بتن‌های پلاستیک در ادامه بررسی شده است.

۶- بررسی امکان کاربرد دوده سیلیسی در کاهش نفوذپذیری بتن‌های پلاستیک بدون افزایش در مدول الاستیسیته

بمنظور مشخص کردن کلی اثر کاربرد دوده سیلیسی روی نفوذپذیری و مدول الاستیسیته بتن‌های پلاستیک در این بخش به ازای مقادیر مشخص مقاومت فشاری بتن پلاستیک، مدول الاستیسیته و نفوذپذیری قابل حصول بررسی شده است.

مقاومت برابر در صورت کاربرد دوده سیلیسی به عنوان درصدی از مواد سیمانی می‌باشد.

روند نتایج ارائه شده در این شکل نشانگر امکان کاهش بسیار قابل توجه در نفوذپذیری مخلوط‌های بتن پلاستیک به ازای



شکل (۵): رابطه بین ضریب نفوذپذیری و مقاومت فشاری برای بتن‌های پلاستیک با و بدون دوده سیلیسی

-تاثیر استفاده از دوده سیلیسی به عنوان بخشی از مواد سیمانی در کاهش ضریب نفوذپذیری بتن‌های پلاستیک بسیار زیاد بوده و نتایج حاصل نشانگر امکان کاهش نفوذپذیری تا حدود ۸۰ برابر نسبت به بتن کنترل بوده‌اند.

-منافع ناشی از کاهش نفوذپذیری بتن‌های پلاستیک زمانی مفید خواهند بود که بتوان بدون افزایش در مدول الاستیسیته به آن دست یافت. بر اساس بررسی صورت گرفته با استفاده از دوده سیلیسی و بطور همزمان کاهش قابل توجه در مقدار مواد سیمانی نسبت به مخلوط کنترل (افزایش نسبت آب به مواد سیمانی)، می‌توان با حفظ مدول الاستیسیته در حد مخلوط کنترل ضرائب نفوذپذیری را تا ۱۰ برابر کاهش داد.

۷- نتیجه‌گیری

- استفاده از دوده سیلیسی تا ۱۵٪ وزنی مواد سیمانی موجب کاهش محسوسی در کارایی مخلوط‌های بتن پلاستیک نمی‌گردد و بر خلاف بتن‌های معمولی در این نوع بتن‌ها نیازی به کاربرد مواد روانساز یا فوق روانساز برای جبران افت کارایی نیست.

- کاربرد دوده سیلیسی در ارتقاء مقاومت بتن‌های پلاستیک بسیار قابل توجه بوده و جایگزینی تا ۱۵ درصد وزنی سیمان با دوده سیلیسی باعث افزایش مقاومت از ۷۰ تا بیش از ۱۸۰ درصد نسبت به بتن کنترل می‌گردد. شایان ذکر است که بر روی بتن‌های معمولی این افزایش عمدتاً حدود ۲۰ تا ۵۰ درصد گزارش شده است.

- کاربرد دوده سیلیسی باعث افزایش مدول الاستیسیته بتن‌های پلاستیک شده است و جایگزینی تا ۱۵ درصد وزنی سیمان با دوده سیلیسی باعث افزایش از ۸۰ تا حدود ۱۷۰ درصد نسبت به مدول الاستیسیته مخلوط کنترل شده است.

-همانند آنچه برای بتن‌های معمولی گزارش شده است کاربرد دوده سیلیسی تاثیری روی رابطه بین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن‌های پلاستیک نینداشته است و به ازای مقاومت فشاری مشخص می‌توان انتظار داشت بتن‌های با و بدون دوده سیلیسی دارای مدول الاستیسیته مشابه باشند.

- International Committee on Large Dams, "Filling Materials for water tight cut off walls", Bulletin 51, 1985. [۱]
- Kahl, Thomas W [۲]
 ., Kauschinger, Joseph L., and Perry, Edwards B., *Plastic concrete cut off walls for earth dams*, US Army Corps of Engineers, Technical Report No. REMR-GT-15, Waterways Experimental station, Vicksburg, MS, P71, March 1991.
- Neville, A.M. "Properties of Concrete" McMillan Press, London, 1995. [۳]
- ACI Committee 234-R96, "Guide for the use of silica fume in concrete", American Concrete Institute Manual of concrete Practice, 2003. [۴]
- Concrete Society, "Microsilica in concrete", Technical report No 41, London 1993. [۵]
- Aitcin, p.c., "High Performance concrete", E & FN spon, London, 1999. [۶]
- Dolen, T.H, Benavidez, A.A. "properties of low strength concrete for Meeks cabin dam modification project", ASTM STP 1331, American Society for Testing and Materials, 1998. [۷]
- Ramachandran, K, Swan, C "Design and Construction of Cement Bentonite Cut off walls for S.A.Murray Hydroelectric Station", ASTM STP 1129, American Society for Testing and Materials, 1992. [۸]
- U.S.B.R-4913-92, "Procedure for Water Permeability of Concrete" United States Bureau of Reclamation, 1992. [۹]
- نقی پور، ن؛ و سرورش، ع؛ "مطالعه آزمایشگاهی نفوذپذیری بتن پلاستیک"، سومین کنفرانس بین المللی بتن، ۱۳۷۹. [۱۰]
- Drilling Fluid Materials Bentonite, OCMA Specification NO.DFCD 4, 1985. [۱۱]
- Drilling Fluid Materials, American Petroleum Institute, Spec 13A, 1998. [۱۲]
- Famili, H., Bagheri, A.R., "Effect of Iranian produced silica fume on water demand and strength of concrete", Sixth NCB International seminar on cement and building materials, New Delhi, 1998. [۱۳]
- Hewlett, P.C., "Chemistry of Portland Cement", London, Edward Arnolds, 2000. [۱۴]