Archive of SID

اثر دوده سیلیسی بر مقاومت و نفوذپذیری مخلوط‌های بتن غلتکی سدسازی با خمیر سیمان کم تامتوسط*

علیرضا باقری(۱) مجتبی محمودیان(۲)

چکیده عدم تولید خاکستر بادی در کشور و ابهامات موجود درخصوص میزان فعالیت و یکنواختی پوزولان‌های طبیعی ایران، موانعی در دستیابی به مخلوط‌های بتن غلتکی می‌باشند. جایگزینی دیگری که به عنوان ماده افزودنی معدنی می‌تواند مد نظر قرار گیرد، سوپر پوزولانی به نام دوده سیلیسی است،که به‌صورت محصول جانبی صنایع فروسیلیسیم در کشور تولید می‌شود. در این مقاله، نتایج تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده برای ارزیابی اثر کاربرد درصدهای مختلف دوده سیلیسی در ارتقاء کیفیت بتن غلتکی با موادسیمانی کم تا متوسط ($110 kg/m^3$ و ۸۰) ارائه می‌گردد. نتایج بدست آمده نشانگر تأثیر قابل ملاحظه در افزایش مقاومت‌های فشاری وکششی مخلوط‌های بتن غلتکی می‌باشد. بهبود مقاومت بین ۲۵ تا ۶۰ درصد با جایگزینی دوده سیلیسی به میزان ۵ تا ۱۵ درصد مواد سیمانی صورت گرفت. همچنین آزمایش‌های نفوذپذیری انجام شده روی نمونه‌ها، نشانگر کاهش قابل ملاحظه نفوذپذیری در اثر کاربرد دوده سیلیسی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی بتن غلتکی، دوده سیلیسی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، نفوذپذیری.

The Effect of Silica Fume on Strength and Permeability of RCC Mixes with Low and Medium Paste Content

A. Bagheri M. Mahmoodian

Abstract *Non production of PFA and the non uniform quality of natural pozzolans is a potential obstical in production of concrete mixes for RCC dam construction in Iran. Another option that can be considered is utilization of a super pozzolan called silica fume, which is available in the country as a byproduct of ferrosilicon industries. A laboratory investigation to evaluate the effect of incorporating various dosages of silica fume on enhancing the quality of RCC mixes of low to medium pastes (80 and 110 Kg/m^3 cementitious materials contents), was carried out. The results show that incorporation of silica fume causes significant improvements in compressive and tensile strength of RCC mixes. The improvements observed in strength, Ranged from 25 to 60 percent for 5 to 15 percent cement replacement by silica fume. Permeability tests carried out also show that, a significant reduction in permeability is achieved by utilization of silica fume in RCC mixes.*

Key Words RCC, Silica Fume, Compressive Strength, Tensile Strength, Permeability.

---

* نسخه اولیه مقاله در تاریخ ۸۱/٤/۸ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۸۱/۱۰/۲۵ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

(۲) کارشناس ارشد مهندسی عمران، شرکت تابلیه

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

بتن غلتکی یک روش نسبتاً جدید در سدسازی با استفاده از مخلوط‌های بتن بسیار سفت و با قابلیت تراکم با غلتک ویبره‌ای می‌باشد. مزایای فنی و اقتصادی قابل توجه این روش باعث رشد روز افزون تعداد و ارتفاع سدهای بتن غلتکی در دودهه اخیر شده است. مقدار سیمان در مخلوط‌های بتن غلتکی سدسازی عموماً به منظور کاهش مسائل ناشی از تولید حرارت در بتن وجلوگیری از ایجاد ترک‌های حرارتی، در حداقل ممکن نگه داشته می‌شود. کاهش مقدار سیمان نیز کاهش مقاومت و افزایش نفوذپذیری را در بتن غلتکی به همراه خواهد داشت؛ از این‌رو به منظور تأمین مقاومت و نفوذناپذیری مطلوب و همچنین کاهش پتانسیل ترک‌خوردگی حرارتی در بتن، کاربرد پوزولان، به ویژه خاکستر بادی (PFA)، در مخلوط‌های بتن غلتکی متداول است[1].

در ایران به علت عدم تولید خاکستر بادی (Fly ash) و همچنین ابهامات موجود در یکنواختی یا میزان فعالیت پوزولان‌های طبیعی، کاربرد آنها در سدهای بتن غلتکی و حتی دیگر سدهای بتنی با بتن حجیم معمولی به عنوان یک گزینه عملی در نظر گرفته نمی‌شود. گزینه دیگری که می‌تواند مدنظر قرار گیرد کاربردسوپر پوزولانی به نام دوده سیلیسی است، که به‌عنوان محصول جانبی صنایع فروسیلیسیوم از سال ۱۳۷۲ در کشور تولید می‌شود. دوده سیلیسی به عنوان یک پوزولان بسیارفعال در جهان شناخته شده است و بطور عمده در تولید بتن‌های با مقاومت بالا (HSC) و یا با عملکرد برتر (HPC) بکار می‌رود [2,3].

بررسی منابع درخصوص سابقه کاربرد دوده سیلیسی در بتن‌های غلتکی تنها نشان دهنده کاربرد آن در مخلوط‌های بتن غلتکی روسازی راه با مقدار مواد سیمانی زیاد ($۳۵۰\ kg/m^3$) و نسبت آب به سیمان خیلی پایین می‌باشد[4]. با توجه به خلاء موجود در منابع در زمینه تأثیر کاربرد دوده سیلیسی در بتن غلتکی حجیم برای سدسازی تحقیقات آزمایشگاهی برروی مخلوط‌های بتن غلتکی با مقادیر مواد سیمانی کم تا متوسط و بادرصدهای مختلف جایگزینی سیمان با دوده سیلیسی بر مخلوط‌های بتن معمولی مختصراً شرح داده می‌شود.

اثر دوده سیلیسی برخواص مخلوط‌های بتن معمولی

دوده سیلیسی در حقیقت سیلیس (SiO_2) غیربلوری است که به‌صورت دوده از کوره‌های قوس الکتریکی در کارخانجات تولید فروسیلیسیوم خارج می‌شود. کاربرد این ماده در صنعت بتن عمدتاً از دهه ۱۹۷۰ و از منطقه اسکاندیناوی آغاز شد و هم‌اکنون به صورت گسترده در کشورهای مختلف، برای بهبود خواص بتن به کار می‌رود[5].

دوده سیلیسی به دلیل درجه خلوص بالای سیلیس آمورف در آن و نیز داشتن ذرات بسیار ریز (حدود ۰/۲ μm) ماده‌ای بسیار فعال محسوب می‌شود. به عنوان مقایسه ضرایب تولید مقاومت به ازای واحد جرم (Strength efficiency factors) برای دوده سیلیسی در مقایسه با سیمان بین ۳ تا ۵ برابر گزارش شده، در صورتی که این مقدار برای سایر پوزولان‌ها و روباره‌ها، حدود یک می‌باشد[6]. علاوه بر بهبود مقاومت، دوده سیلیسی باعث کاهش تخلخل خمیر سیمان و همچنین کاهش میزان اتصال بین منافذ و در نتیجه کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود. به علت سطح ویژه بسیار زیاد ذرات دوده سیلیسی، کاربرد این ماده آثار قابل ملاحظه‌ای بر خواص بتن تازه داشته و مقدار آب اختلاط برای رسیدن به کارآیی مطلوب را به طور محسوسی افزایش می‌دهد. از این‌رو عموماً مواد

www.SID.ir

Archive of SID

کاهنده آب ممتاز (فوق روان‌کننده‌ها) نیز به همراه دوده سیلیسی در بتن بکار می‌رود. به دلیل واکنش‌زدایی زیاد و ریز بودن دوده سیلیسی، درصدهای کمتری از این ماده نسبت به سایر پوزولان‌ها در بتن استفاده می‌شود. درصدهای گزارش شده از مقدار کاربرد دوده سیلیسی عمدتاً بین ۵ تا ۱۵ درصد با مقدار بهینه‌ای در حدود ۱۰ درصد بوده است [2,6,12] .

برنامه آزمایشگاهی

برنامه‌ریزی مطالعات آزمایشگاهی با هدف بررسی تأثیر کاربرد دوده سیلیسی بر خواص بتن غلتکی تازه و سخت شده، صورت گرفت. با توجه به تأثیر منفی قابل توجهی که دوده سیلیسی روی کارآیی و آب اختلاط مخلوط‌های بتن معمولی دارد، بررسی تأثیر آن بر کارآیی بتن غلتکی از طریق تعیین مقدار رطوبت بهینه مخلوط‌های RCC بادرصدهای مختلف این پوزولان انجام شد.

همچنین بررسی‌هایی درخواص بتن غلتکی سخت شده، شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، و ضریب نفوذپذیری از دیگر اهداف برنامه آزمایشگاهی بود. بتن‌های غلتکی مورد مطالعه در این تحقیق شامل دو گروه مخلوط با مقادیر مواد سیمانی ۱۱۰kg/m^3 و ۸۰kg/m^3 بوده‌اند و محدوده در نظر گرفته شده برای جایگزینی مواد سیمانی با دوده سیلیسی از ۵ تا ۱۵ درصد بوده است.

مصالح مصرفی

سیمان . سیمان مورد استفاده در این تحقیق، سیمان پرتلند نوع II محصول کارخانه سیمان تهران مطابق با مشخصات استاندارد ASTM-C150 [7]، می‌باشد.

دوده سیلیسی . دوده سیلیسی به صورت فرآورده جنبی از یکی از کارخانجات تولید فروسیلیسیم داخل کشور تهیه شد. ویژگی‌های شیمیایی دوده سیلیسی مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است. سطح ویژه دوده سیلیسی معادل ۲۰/٤m^2/g براساس روش جذب نیتروژن، تعیین گردید. نتایج حاصله مطابقت خواص این ماده را با الزامات استاندارد دوده سیلیسی برای کاربرد در بتن و ملات، ASTM-C1240 [8]، نشان می‌دهد.

سنگدانه . درشت دانه مصرفی در سه اندازه مجزا شامل :(۳۸mm-۱۹)، (۱۹mm-۹/۵) و (۹/۵mm-۵) به‌صورت شن طبیعی تهیه گردید. درصدهای مختلف از هر گروه اندازه‌ای سنگدانه به نحوی که دانه‌بندی ترکیبی حاصله در محدوده توصیه شده توسط انجمن مهندسان آمریکا (ASCE)[9] قرار گیرد، بکار گرفته شد. ریزدانه مورد استفاده در ساخت مخلوط‌ها، شامل ماسه طبیعی بود که کمبود مقدار مواد عبوری از الک نمره ۱۰۰ (۰/۱۵mm) آن از طریق افزودن شش درصد پودرسنگ به ماسه جبران گردید. جدول (۲) دانه‌بندی نهایی درشت دانه و ریزدانه مورد استفاده را نشان می‌دهد. نسبت درشت دانه معادل ۵۸ درصد کل سنگدانه‌ها، طبق توصیه‌های ASCE[9]، براساس اندازه و نوع سنگدانه‌های مصرفی، انتخاب شد.

آب . آب مورد استفاده برای ساخت مخلوط‌ها، آب آشامیدنی شهر تهران بوده است.

جدول ۱ ترکیبات شیمیایی دوده سیلیسی مصرفی

اکسید	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	L.O.I	رطوبت (٪)
درصد	۹۰/٤	۱/۱٦	۱/٥٦	۱/۲۹	۰/٦٦	۰/۲٦	۱/۳۱	۲/۷۸	۰/٥٤

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲ دانه‌بندی درشت دانه‌ترکیبی و ریزدانه اصلاح‌شده، بکار رفته درساخت‌مخلوط‌ها (درصد عبوری از هر الک)

اندازه الک	۳۸ mm	۲۵ mm	۱۹ mm	۹/۵ mm	٤/۷۵ mm	۲/۳۸ mm	۱/۱۸ mm	۰/٦ mm	۰/۳ mm	۰/۱۵ mm
درشت دانه ترکیبی	۱۰۰	۷۹	۵۱	۲٤	۲	–	–	–	–	–
ماسه (اصلاح شده با پودر سنگ)	–	–	–	۱۰۰	۹٦	۷۵	۵٤	۳۵	۱۹	۱۰

مخلوط‌های شامل $110\ kg/m^3$ مواد سیمانی

در تحقیق انجام شده تمرکز برروی مخلوط‌های بتن غلتکی با مقدار مواد سیمانی کم تا متوسط (Low to medium paste) بوده است. از این‌رو بررسی گسترده آزمایشگاهی برروی مخلوط‌های بتن غلتکی $110 kg/m^3$ مواد سیمانی انجام گرفت. مخلوط‌های بتن غلتکی با نسبت‌های مختلف جایگزینی مواد سیمانی با دوده سیلیسی (شامل ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) ساخته شدند. همچنین به منظور بررسی تأثیر دوده سیلیسی بر مقدار آب بتن غلتکی هر سری مخلوط با مقادیر مختلف آب (۷۰، ۹۰، ۱۱۰ و $130 kg/m^3$) ساخته شد و مقدار رطوبت بهینه برای هر مخلوط بدست آمد. خاطرنشان می‌سازد مقدارهای یادشده برای آب، به عنوان آب آزاد بتن، و بدون احتساب مقدار آب برای رسیدن به حالت اشباع با سطح خشک سنگدانه‌ها (SSD)، در نظر گرفته شد.

مقدار رطوبت بهینه را می‌توان مقدار آبی که بیشترین چگالی و یا بالاترین مقاومت را نتیجه می‌دهد، منظور نمود. در مصالح دانه‌ای بدون چسباننده نظیر خاک‌ها، با فرض انرژی تراکم ثابت، دانسیته یک خاک تابعی از مقدار رطوبت آن بوده و حداکثر دانسیته که متناظر با حداکثر قابلیت باربری آن نیز می‌باشد در مقدار رطوبت بهینه آن حاصل می‌گردد. در مصالح با پایه سیمانی مانند بتن، علاوه بر تأثیر مقدار رطوبت روی دانسیته و در نتیجه مقاومت، نسبت w/c نیز نقش مهمی را در مقاومت ایفا می‌کند. از این‌رو، در این تحقیق مقادیر رطوبت بهینه براساس تأمین حداکثر مقاومت انتخاب شدند.

ساخت نمونه‌ها

پس از مخلوط کردن مصالح در مخلوط کن آزمایشگاه، نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵×۳۰cm در ٤ لایه و با کوبیدن ۹۰ ضربه توسط کوبه پراکتور به هر لایه، ساخته شدند. کوبه پراکتور شامل یک چکش ٤/۵ کیلوگرمی است که از ارتفاع ٤۵ سانتیمتری روی سطح بتن رها می‌شود. براین اساس کل انرژی تراکم وارد شده به هر نمونه معادل $1320 kJ/m^3$ خواهد بود. این مقدار انرژی تراکم براساس توصیه Hansen و Reinhart برای شبیه‌سازی انرژی تراکم اعمال شده توسط غلتک ویبره‌ای روی بتن و در عین حال برای جلوگیری از خردشدن سنگدانه‌ها، انتخاب گردید[10] . جزئیات مربوط به نسبت‌های اجزاء هر سری مخلوط به همراه نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه در جدول شماره (۳) آمده است. با توجه به زمان‌بر بودن پروسه تراکم هر نمونه که شامل تراکم در ٤ لایه و هرلایه ۹۰ ضربه بوده است، برای جلوگیری از ایجاد اختلاف زمانی زیاد بین

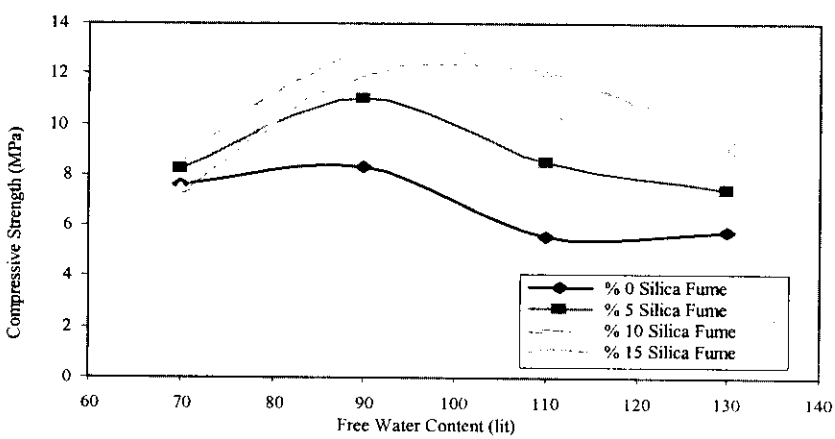
www.SID.ir

Archive of SID

ساخت نمونه‌های اول و آخر در هر مخلوط، تعداد آزمونه‌ها برای هر سن و هر مشخصه دوآزمونه بوده است.

تعیین مقدار رطوبت بهینه

شکل (۱) مقاومت فشاری به ازای مقادیر مختلف آب را برای هر گروه از مخلوط‌ها با مقادیر مختلف دوده سیلیسی نشان می‌دهد. نتایج حاصله برای مخلوط‌های شاهد (بدون دوده سیلیسی)، مقدار آب $۹۰\ kg/m^3$ را متناظر با حداکثر مقاومت نشان می‌دهد. همچنین نتایج بتن‌های حاوی درصدهای مختلف جایگزینی سیمان با دوده سیلیسی، نشانگر افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت نمونه‌ها به ازای کلیه مقادیر آب می‌باشد.میزان افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای مخلوط‌های حاوی $۹۰\ kg/m^3$ آب، بین ۳۰ تا ۵۵ درصد (بسته به مقدار دوده سیلیسی) بوده است. مقدار آب بهینه برای مخلوط‌های حاوی دوده سیلیسی، چنانکه در شکل (۱) دیده می‌شود، تفاوت محسوسی با بتن‌های بدون دوده سیلیسی نداشته و مقاومت حداکثر برای هر چهار گروه مخلوط به ازای مقدار آب $۹۰\ kg/m^3$ بدست آمده است. این مسأله نشان می‌دهد که برخلاف بتن‌های معمولی، افزودن دوده سیلیسی افزایش محسوسی در مقدار آب لازم برای مخلوط نمی‌دهد. دلیلی که برای این مسأله می‌توان عنوان کرد آن است که به دلیل کم‌بودن مواد سیمانی در مخلوط‌های بتن غلتکی، مقدار دوده سیلیسی به ازای درصد جایگزینی برابر، در مقایسه با مخلوط‌های بتن‌های معمولی، بسیار کمتر می‌باشد. به‌عنوان مثال جایگزینی ۱۰ درصد مواد سیمانی با دوده سیلیسی در مخلوط‌های حاوی $۱۱۰kg/m^3$ مواد سیمانی، معادل $۱۱kg/m^3$ است، حال آنکه در بتن معمولی با مقدار $۳۵۰kg/m^3$ مواد سیمانی، ۱۰ درصد دوده سیلیسی، معادل $۳۵kg/m^3$ خواهد بود. همچنین دلیل دیگری که می‌تواند مطرح باشد این است که انرژی تراکم بسیار زیاد اعمال شده به



شکل ۱ تاثیر مقدار آب روی مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف دوده سیلیسی

www.SID.ir

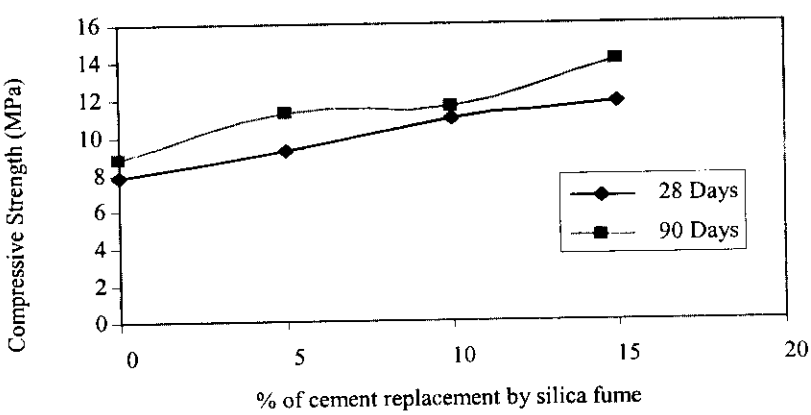
Archive of SID

نمونه‌های بتن غلتکی در روش تراکم کوبه‌ای باعث می‌شود که آب اختلاط بهینه این مخلوط‌ها نسبت به افزودن مقادیر کم مصالح بسیار ریز، حساس نباشد.

براساس نتایج بدست آمده، سری دوم مخلوط‌های حاوی $110 kg/m^3$ مواد سیمانی، با مقدار آب بهینه $90 kg/m^3$ و با درصدهای مختلف دوده سیلیسی جهت بررسی گسترده‌تر خواصی شامل مقاومت‌های فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه و مقاومت کششی ساخته شدند. همچنین برای تعیین اثر دوده سیلیسی روی نفوذپذیری بتن غلتکی، نمونه‌هایی از مخلوط شاهد و از مخلوط حاوی ۱۰ درصد دوده سیلیسی جهت انجام آزمایش تعیین ضریب نفوذپذیری به روش USBR4913[11] ، ساخته شد. جزئیات مخلوط‌های مورد مطالعه در این مرحله نیز مشابه موارد یاد شده در جدول (۳) برای مخلوط‌های حاوی $90 kg/m^3$ آب می‌باشد. نتایج آزمایشات انجام شده برروی نمونه‌ها در جدول شماره (٤) ارائه شده است. همچنین شکل (۲) اثر درصدهای مختلف دوده سیلیسی در افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

همانطور که نتایج مخلوط‌های ساخته شده با مقدار آب بهینه نشان می‌دهد، جایگزینی بخشی از سیمان با دوده سیلیسی، اثر قابل توجهی در بهبود مقاومت فشاری نمونه‌ها داشته است. افزایش مقاومت فشاری بین ۲۰ تا ٦۰ درصد نسبت به مخلوط شاهد بوده است. همچنین نتایج نشانگر آن است که استفاده از دوده سیلیسی تأثیر مشابهی بر افزایش مقاومت کششی نمونه‌ها دارد.

ضریب نفوذپذیری نمونه‌ها با استفاده از روش و تجهیزات شرح داده شده در USBR4913[11] ، اندازه‌گیری شد. روش مذکور شامل قرار دادن یک نمونه استوانه‌ای بتن غلتکی داخل یک سلول ویژه فولادی است که بین نمونه و جداره داخلی سلول، با ماده‌ای نفوذناپذیر پر می‌شود. پس از بستن درپوش و آماده‌سازی دستگاه، آب با فشار معین روی سطح



شکل ۲ تاثیر دوده سیلیسی بر مقاومت فشاری مخلوط‌های حاوی $110 kg/m^3$ مواد سیمانی

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳ نسبت‌های اجزای مخلوط برای اختلاط‌های حاوی ۱۱۰kg/m^3 مواد سیمانی

* نام مخلوط	مواد سیمانی kg/m^3	دوده سیلیسی (٪)	سیمان kg/m^3	دوده سیلیسی kg/m^3	آب kg/m^3	ریزدانه kg/m^3	درشت‌دانه ترکیبی kg/m^3	وزن مخصوص kg/m^3	مقاومت فشاری ۲۸ روزه MPa
۱۱۰ AC ۷۰	۱۱۰	۰	۱۱۰	–	۷۰	۹۴۲	۱۳۰۰	۲۳۴۰	۷/۶۲
۱۱۰ AC ۹۰	۱۱۰	۰	۱۱۰	–	۹۰	۹۲۰	۱۲۷۱	۲۳۶۷	۸/۲۸
۱۱۰AC۱۱۰	۱۱۰	۰	۱۱۰	–	۱۱۰	۸۹۹	۱۲۴۰	۲۳۹۷	۵/۵۹
۱۱۰AC۱۳۰	۱۱۰	۰	۱۱۰	–	۱۳۰	۸۷۷	۱۲۱۲	۲۳۷۰	۵/۷۶
۱۱۰ A5M ۷۰	۱۱۰	۵	۱۰۴/۵	۵/۵	۷۰	۹۴۱	۱۳۰۰	۲۳۸۰	۸/۲۲
۱۱۰ A5M ۹۰	۱۱۰	۵	۱۰۴/۵	۵/۵	۹۰	۹۱۹	۱۲۶۹	۲۳۸۵	۱۱/۰۲
۱۱۰A5M۱۱۰	۱۱۰	۵	۱۰۴/۵	۵/۵	۱۱۰	۸۹۸	۱۲۴۰	۲۳۹۷	۸/۵
۱۱۰A5M۱۳۰	۱۱۰	۵	۱۰۴/۵	۵/۵	۱۳۰	۸۷۷	۱۲۱۱	۲۳۷۷	۷/۴
۱۱۰A10M۷۰	۱۱۰	۱۰	۹۹	۱۱	۷۰	۹۴۰	۱۲۹۹	۲۲۹۵	۷/۴۶
۱۱۰A10M۹۰	۱۱۰	۱۰	۹۹	۱۱	۹۰	۹۱۹	۱۲۶۹	۲۳۸۰	۱۱/۹۵
۱۱۰A10M۱۱۰	۱۱۰	۱۰	۹۹	۱۱	۱۱۰	۸۹۷	۱۲۴۰	۲۴۲۵	۱۲/۰۱
۱۱۰A10M۱۳۰	۱۱۰	۱۰	۹۹	۱۱	۱۳۰	۸۷۶	۱۲۰۹	۲۳۹۵	۹/۴۳
۱۱۰A15M۷۰	۱۱۰	۱۵	۹۳/۵	۱۶/۵	۷۰	۹۴۰	۱۲۹۷	۲۳۰۲	۸/۷۷
۱۱۰A15M۹۰	۱۱۰	۱۵	۹۳/۵	۱۶/۵	۹۰	۹۱۸	۱۲۶۸	۲۳۶۲	۱۲/۸۸
۱۱۰A15M۱۱۰	۱۱۰	۱۵	۹۳/۵	۱۶/۵	۱۱۰	۸۹۷	۱۲۳۹	۲۴۱۷	۱۲/۰۶
۱۱۰A15M۱۳۰	۱۱۰	۱۵	۹۳/۵	۱۶/۵	۱۳۰	۸۷۵	۱۲۰۹	۲۳۷۵	۹/۰۵

*عدد ۱۱۰ نشان دهنده مقدار مواد سیمانی برحسب کیلوگرم در متر مکعب، حرف A نشانگر سری مخلوط ساخته شده، حرف C نشان دهنده مخلوط کنترل، اعداد M ۵، M ۱۰ و M ۱۵ نشان دهنده درصد دوده سیلیسی بکار رفته در هر مخلوط و اعدا ۷۰، ۹۰، ۱۱۰ و ۱۳۰ نشان دهنده مقدار آب در مخلوط بر حسب کیلوگرم در متر مکعب می‌باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ٤ تأثیر دوده سیلیسی بر مقاومت و نفوذپذیری مخلوط‌های حاوی ۱۱۰kg/m3 مواد سیمانی

* نام مخلوط	مواد سیمانی kg/m³	دوده سیلیسی (٪)	وزن مخصوص kg/m³	مقاومت فشاری ۲۸ روزه MPa	مقاومت فشاری ۹۰ روزه MPa	مقاومت کششی برزیلی ۲۸ روزه MPa	ضریب نفوذ پذیری cm/s
۱۱۰ BC ۹۰	۱۱۰	۰	۲۳٤٥	۷/۸٦	۸/۸	۱/۱	$٤/۱\times۱۰^{-۸}$
۱۱۰ B5M ۹۰	۱۱۰	٥	۲۳٤۸	۹/۲۳	۱۱/۲٤	۱/٥۱	–
۱۱۰ B10M ۹۰	۱۱۰	۱۰	۲۳٥٥	۱۰/۹۱	۱۱/٦	۱/٦	$۱/٦۲\times۱۰^{-۸}$
۱۱۰ B15M ۹۰	۱۱۰	۱٥	۲۳٥۷	۱۱/۸	۱٤	۱/٥	–

*عدد ۱۱۰ نشان دهنده مقدار مواد سیمانی برحسب کیلوگرم در متر مکعب، حرف B نشانگر سری مخلوط ساخته شده، حرف C نشان دهنده مخلوط کنترل، اعداد M ٥، M ۱۰ و M ۱٥ نشان دهنده درصد دوده سیلیسی بکار رفته در هر مخلوط و اعداد ۷۰، ۹۰، ۱۱۰ و ۱۳۰ نشان دهنده مقدار آب در مخلوط بر حسب کیلوگرم در متر مکعب می‌باشد.

بالایی نمونه اعمال می‌گردد و مقدار آبی که از انتهای نمونه خارج می‌شود اندازه‌گیری می‌شود. این‌آزمایش بسیار حساس و زمان‌بر بوده و لازم است فرصت کافی برای تثبیت جریان و نرخ آب خروجی از نمونه داده شود. هر آزمایش تعیین ضریب نفوذپذیری روی یک آزمونه بتن غلتکی مستلزم یک تا دو هفته زمان آزمایش می‌باشد.

در شکل (۳) تجهیزات اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است. با استفاده از معادله دارسی و با توجه به نرخ جریان خروجی از نمونه، مقدار فشار و قطر نمونه، ضریب نفوذپذیری طبق رابطه (۱) قابل محاسبه می‌باشد.

$$K_p = Q.t/(h.A) \qquad (۱)$$

که در آن K_p ضریب نفوذپذیری (m/s) ، Q نرخ جریان عبوری از بتن (m^3/s) ، t ارتفاع نمونه (m) ، h بار هیدرولیکی روی نمونه (m) و A سطح مقطع نمونه (m^2) می‌باشد. همانطور که در جدول شماره (٤) دیده می‌شود، استفاده از دوده سیلیسی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش نفوذپذیری بتن غلتکی دارد.

مخلوط‌های حاوی ۸۰kg/m³ مواد سیمانی

به منظور کنترل نتایج حاصل از آزمایشات بخش قبل، مطالعه محدودی روی مخلوط‌های حاوی ۸۰kg/m³ مواد سیمانی نیز انجام شد. در این مرحله، تنها مخلوط‌های با صفر و ۱۰ درصد جایگزینی دوده سیلیسی مدنظر قرار گرفتند و مقدار آب مخلوط نیز همان مقدار آب بهینه مرحله قبل یعنی ۹۰kg/m³ انتخاب شد. جدول شماره (٥) جزئیات مخلوط‌ها و نتایج حاصله را نشان می‌دهد. نتایج، نشانگر افزایشی بین ۳۰ تا ٥٥ درصد در میزان مقاومت فشاری نمونه‌ها است که با نتایج آزمایشات بر روی مخلوط‌های حاوی ۱۱۰kg/m³ مواد سیمانی مطابقت دارد. بهبود وضعیت نفوذپذیری نمونه‌ها در اثر کاربرد دوده سیلیسی نیز بسیار قابل ملاحظه و حتی بیشتر از تأثیر مشاهده شده در مورد مخلوط‌های حاوی ۱۱۰kg/m³ مواد سیمانی بوده است. این امر به دلیل بالا بودن نفوذپذیری مخلوط شاهد در این سری آزمایشات است که در مقدار بالای نسبت آب به سیمان w/c، برابر ۱/۱۲٥، اتفاق می‌افتد.

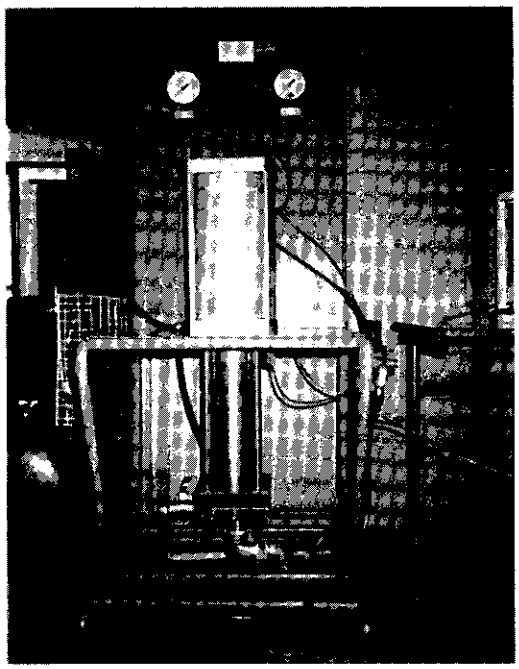
نتیجه‌گیری

براساس نتایج حاصل از تحقیق آزمایشگاهی انجام شده، نتیجه‌گیری‌های زیر قابل ارائه می‌باشند:

- جایگزینی درصدهای مختلف دوده سیلیسی به جای سیمان در مخلوط بتن غلتکی، افزایش

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳ تجهیزات اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری بتن غلتکی

جدول ۵ نسبت‌های اجزای مخلوط و نتایج آزمایشات مخلوط‌های حاوی ۸۰kg/m³ مواد سیمانی

* نام مخلوط	مواد سیمانی kg/m³	سیمان kg/m³	دوده سیلیسی (٪)	دوده سیلیسی kg/m³	آب kg/m³	ریزدانه kg/m³	درشت‌دانه ترکیبی kg/m³	مقاومت فشاری ۲۸ روزه MPa	مقاومت فشاری ۹۰ روزه MPa	ضریب نفوذ پذیری cm/s
۸۰ BC۹۰	۸۰	۸۰	۰	۰	۹۰	۹۳۰	۱۲۸۵	۵/۵	٦/۷۰	$۸/۳٤\times۱۰^{-۵}$
۸۰B۱۰M۹۰	۸۰	۷۲	۱۰	۸	۹۰	۹۲۹	۱۲۸٤	۷/۰۷	۹/۳۲	$۱/۳۹\times۱۰^{-۷}$

*عدد ۱۱۰ نشان دهنده مقدار مواد سیمانی برحسب کیلوگرم در متر مکعب، حرف B نشانگر سری مخلوط ساخته شده، حرف C نشان دهنده مخلوط کنترل، اعداد M ۵، M ۱۰ و M ۱۵ نشان دهنده درصد دوده سیلیسی بکار رفته در هر مخلوط و اعداد ۷۰، ۹۰، ۱۱۰ و ۱۳۰ نشان دهنده مقدار آب در مخلوط بر حسب کیلوگرم در متر مکعب می‌باشد.

قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌ها دیده شد. این ارتقاء مقاومت با مقادیر بالاتر درصد جایگزینی دوده سیلیسی افزایش یافت. میزان افزایش مقاومت به ازای ۵ تا ۱۵ درصد جایگزینی مواد سیمانی با دوده سیلیسی، بین ۲۵ تا ٦۰ درصد بوده است که این نتیجه مشابه نتایج حاصل از تحقیقات انجام شده برروی بتن معمولی می‌باشد[6] .

• کاربرد دوده سیلیسی در بتن غلتکی تأثیر مشابهی در افزایش مقاومت کششی نمونه‌ها دارد.

• استفاده از دوده سیلیسی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش ضریب نفوذپذیری بتن غلتکی دارد. این تأثیر در مورد مخلوط‌های با مقدار مواد سیمانی کمتر (یعنی نسبت w/c بالاتر)، بیشتر است.

• اضافه کردن دوده سیلیسی به میزان مورد

www.SID.ir

Archive of SID

مطالعه در این تحقیق (۵ تا ۱۵ درصد)، تأثیر محسوسی بر افزایش مقدار آب بهینه مخلوط‌ها نداشته است.

• این تحقیق برروی مخلوط‌های بتن غلتکی با مقادیر مواد سیمانی کم تا متوسط و با استفاده از روش‌های تراکم خاک (پراکتور اصلاح شده) انجام شد، به منظور بسط نتایج بدست آمده از این تحقیق، لازم است مخلوط‌های بتن غلتکی با مقدار مواد سیمانی زیاد (بیش از $150 kg/m^3$) و با روش‌های ارتعاشی تراکم (مانند وی‌بی اصلاح شده) مورد تحقیق و مطالعه قرار گیرند.

قدردانی

تحقیق انجام شده با استفاده از امکانات آزمایشگاه بتن دانشکده عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی صورت گرفت. از این‌رو، ضمن تشکر از معاونت پژوهشی دانشگاه، از همکاری و تلاش‌های آقایان عباس‌زاده و میربستانی در انجام تحقیقات آزمایشگاهی قدردانی می‌گردد.

مراجع

1. Dunstan, M. R. H. "Latest developments in RCC dams", *Proceedings of International Symposium on R.C.C. dam, Chengdu, China*, pp. 14-29, April (1999).
2. Neville, A. M. "*Properties of concrete*", Fourth Edition, Longman-London, (1995).
3. Aitcin, P. C. "*High performance concrete*", London: E & FN Spon, (1998).
4. Banthia., N. K. Pigeon, M., Merchand, J., and Boisvert, "*Permeability of roller compacted concrete*", ASCE, Materials in Civil Engineering, pp. 27-40, Feb (1992).
5. Wen, H. X. and Bagheri, A. R. "Strength development of conventional and silica fume concrete", *Magazine of Concrete Research*, December (1988).
6. Famili, H., and Bagheri, A. R. "Effects of Iranian produced silica fume on water demand and strength of concrete", *Sixth NCB International Seminar on Cement and Building Materials*, New Delhi, (1998).
7. ASTM C 150, "Standard specification for Portland cement", *American Society for Testing and Materials*, (1998).
8. ASTM C 1240, "Standard specification for the use of silica fume in concrete and mortar", *American Society for Testing and Materials*, (1998).
9. "Roller compacted concrete", ASCE, (1994).
10. Hansen, K. D., and Reinhardt, W. G. "*Roller compacted concrete Dams*", Mac Graw Hill Co, New York, (1991).
11. USBR test designation 4913-92, "Procedure for determining water permeability of concrete", *United States Bureau of Reclamation*, (1992).

۱۲. گنجیان، اسماعیل، "خواص مکانیکی و فیزیکی میکروسیلیس ایران"، سمینار بین‌المللی کاربرد میکروسیلیس در ایران، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، اردیبهشت (۱۳۷٦).

www.SID.ir