Archive of SID

مهندسی عمران شریف (پاییز ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۲ - ۳۲، شماره‌ی ۳/۱، ص. ۱۲۷-۱۳۰، (یادداشت فنی)

Research Note

اثر نانوسیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن در مقاومت سایشی بتن

آرمین منیرعباسی (استادیار)
گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور

در برخی از کاربردهای بتن نظیر روسازی‌ها و یا برخی سازه‌های هیدرولیکی، مقاومت سایشی بتن به‌عنوان یک ویژگی مهم مطرح است. در این خصوص کاربرد برخی از افزودنی‌ها می‌تواند به افزایش این مقاومت کمک کند. در این پژوهش ذرات نانوسیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن به‌عنوان موادی که ممکن است تأثیری در مقاومت سایشی بتن داشته باشند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اندازه‌گیری مقاومت سایشی براساس روش آزمایش ASTM C۱۱۳۸ انجام شده، که در آن مقاومت سایشی بتن در برخورد گلوله‌های فولادی معلق در آب مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقاومت سایشی بتن در صورت داشتن نانوسیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. با این حال، مقاومت سایشی بتن حاوی نانوسیلیس بسیار بیشتر از بتن حاوی الیاف بوده است. نرخ افزایش مقاومت سایشی بتن با افزایش مقدار نانوسیلیس و یا الیاف پلی‌پروپیلن کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: مقاومت سایشی، نانوسیلیس، الیاف پلی‌پروپیلن.

monirabbasi@pnu.ac.ir

۱. مقدمه

بتن روسازی علاوه بر تحمل بارهای ثقلی و دینامیکی همواره در معرض تهدیدهای دوامی نظیر سایش، ضربه، نفوذ یون‌های مضر و چرخه‌های یخ‌زدگی و ذوب‌شدن است. در این میان مقاومت سایشی یکی از ویژگی‌های مهم و حیاتی در دوام بتن مذکور است. مطالعات متعددی در مورد مقاومت سایشی بتن انجام شده است. نتایج نشان داده است که مقاومت سایشی بتن به مقاومت فشاری بتن، خواص سنگ‌دانه‌ها، نحوه‌ی پرداخت سطح و شرایط انجام آزمایش،[۱و۲] وابسته است.

مطالعات بسیاری نشان داده‌اند که علاوه بر روش‌های پرداخت سطح، کاربرد برخی مواد افزودنی می‌تواند تأثیر زیادی در مقاومت سایشی بتن داشته باشد.[۳-۶] پژوهش‌ها نشان داده است که روش‌های مختلف پرداخت سطح، ساختارهای منافذ و سختی را در سطح بتن اصلاح می‌کند و مقاومت سایشی بتن نیز تا حد زیادی وابسته به این ساختار سطحی است.[۷]

تعدادی از مطالعات نشان داده‌اند که اضافه‌کردن الیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند مقاومت سایشی بتن را بهبود بخشد. بسیاری از نتایج قبلی نشان داده است که مقاومت سایشی بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند با توجه به مقادیر مختلف الیاف پلی‌پروپیلن بین ۲۰ تا ۶۰ درصد افزایش یابد.[۸و۹] همچنین در مطالعه‌ی کاربردی در سال ۲۰۰۹،[۱۰] برای تهیه‌ی طرح اختلاط بتن سرریز در نیروگاه برق آبی Vrhovo کاربرد الیاف در بتن جهت افزایش مقاومت سایشی در سازه‌های هیدرولیکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که کاربرد الیاف موجب افزایش مقاومت سایشی بتن شده است. لازم به ذکر است که در مطالعه‌ی مذکور، نتایج واقعی با نتایج آزمایشگاهی همخوانی بسیار خوبی از خود نشان داده‌اند.

در پژوهش دیگری در سال ۱۹۹۸، کاربرد میکروسیلیس و نانوسیلیس در تغییر مشخصات بتن مورد ارزیابی قرارگرفته و از نتایج پژوهش مذکور مشخص شده است که کاربرد نانوسیلیس می‌تواند مقاومت سایشی بتن را حدود ۲۰٪ افزایش دهد.[۱۱]

در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۲،[۱۲] مقاومت سایشی و فشاری بتن حاوی نانوسیلیس بررسی شده است. در پژوهش مذکور، ابتدا از نانوسیلیس به مقدار ۲٪ جایگزین وزن سیمان استفاده و مشخص شده است که کاربرد نانوسیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری و سایشی بتن شده است. در ادامه، با افزایش مقدار نانوسیلیس مشخص شده است که اگرچه مقاومت فشاری رشد چشم‌گیری نداشته است، اما کماکان مقاومت سایشی بتن افزایش یافته است.

همچنین در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۹،[۱۳] کاربرد الیاف و میکروسیلیس برای افزایش مقاومت سایشی بتن در سازه‌های هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج پژوهش مذکور نشان داده است که ترکیب الیاف و میکروسیلیس بهترین نوع بتن برای مقاومت در برابر سایش ناشی از آب حاوی ذرات ماسه است.

در مطالعه‌ی دیگری در سال ۲۰۰۴،[۱۴] کاربرد میکروسیلیس و پلیمر SBR در افزایش مقاومت سایشی بتن مورد بررسی قرار گرفته و در آن برای ارزیابی مقاومت سایشی از دستگاه دیسک چرخان مطابق استاندارد ASTM C۷۷۹ استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که کاربرد ۱۰٪ میکروسیلیس موجب افزایش مقاومت سایشی به مقدار ۱۵٪ شده است.

همان‌طور که عنوان شده است، مطالعات بسیاری در این زمینه انجام شده

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۶/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱۰/۱۰، پذیرش ۱۳۹۳/۱۱/۸.

www.SID.ir

Archive of SID

است، اما در هیچ‌کدام مقایسه‌ی اثر نانوسیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن از بابت اثربخشی هم‌زمان در مقاومت سایشی و فشاری انجام نشده است. ضمن اینکه با توجه به تعدد کاربردهای بتن، روش‌های مختلف ارزیابی مقاومت سایشی در استانداردها وجود دارد، که در این پژوهش هدف ارزیابی مقاومت سایشی در سازه‌های هیدرولیکی مانند سرریز سدها و یا تونل‌های انتقال آب بوده است.

۲. روش آزمایش

۱.۲. مصالح و نسبت مخلوط

سیمان مورد استفاده، سیمان پرتلند نوع دو کارخانه‌ی سیمان تهران و ماسه‌ی مصرفی از نوع رودخانه‌یی بوده است. شن مصرفی نیز از نوع رودخانه‌یی با درصد شکستگی حدود ۶۰٪ و اندازه‌ی بیشینه‌ی اسمی برابر ۱۹ میلی‌متر بوده است. مشخصات سیمان و سنگ‌دانه‌ی مصرفی به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ و خواص نانوسیلیس و همچنین الیاف پلی‌پروپیلن مصرفی نیز در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

نسبت آب به مواد سیمانی برای تمام مخلوط‌ها ۰/۴۷ در نظر گرفته شده و نسبت‌های اختلاط در جدول ۵ ارائه شده است، که در آن I بیان‌گر بتن معمولی، IF نشانه‌ی بتن الیافی و IS نماد بتن حاوی نانوسیلیس است.

۲.۲. ساخت نمونه

برای ساخت بتن حاوی نانوسیلیس، ابتدا فوق روان‌کننده با مقداری از آب در مخلوط کن ملات ریخته و سپس نانوسیلیس در سرعت بالا به مدت ۵ دقیقه اضافه و به هم زده شده‌اند. سیمان، سنگ‌دانه و باقیمانده‌ی آب به مدت ۳ دقیقه در همزن بتن مخلوط شده و سپس مخلوط آب، فوق روان‌کننده، و نانوسیلیس به آرامی به آن اضافه و به مدت ۲ دقیقه‌ی دیگر برای دست‌یابی به مخلوطی یکنواخت، به هم زده شده‌اند.

برای ساخت بتن ساده و بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن، به ترتیب شن، مقداری از آب، ماسه، سیمان و باقیمانده‌ی آب که فوق روان‌کننده (با پایه‌ی پلی کربوکسیلات) در آن حل شده است، درون مخلوط‌کن بتن ریخته شده و پس از مخلوط‌شدن به مدت ۳ دقیقه، الیاف به‌تدریج به آن اضافه شده است. پس از اتمام افزودن الیاف، به مدت ۲ دقیقه‌ی دیگر برای همگن‌شدن کامل اختلاط، بتن به هم زده شده است.

در نهایت، بتن تازه در قالب‌های مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر برای انجام آزمایش مقاومت فشاری و قالب استوانه‌یی به قطر و ارتفاع به ترتیب برابر ۳۰۰ و ۱۰۰ میلی‌متر برای انجام آزمایش سایش ریخته شده است. پس از بتن‌ریزی، تراکم با میز لرزان انجام و درنهایت، عمل‌آوری نمونه‌ها تا ۲۴ ساعت ابتدایی درون محفظه‌ی

جدول ۱. خواص شیمیایی سیمان.

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	SO_3
۲۱/۸۵	۴/۱۲	۳/۰۳	۳/۴۳	۶۳/۱۶	۱/۹۳

جدول ۲. خواص فیزیکی سنگ‌دانه.

سنگ‌دانه‌ی درشت		سنگ‌دانه‌ی ریز		
جرم حجمی اشباع با سطح خشک (Kg/m^3)	درصد جذب آب	جرم حجمی اشباع با سطح خشک (Kg/m^3)	درصد جذب آب	مدول نرمی
۲۴۷۰	۱/۱	۲۴۲۰	۲/۸	۳/۳۰

جدول ۳. خواص نانوسیلیس.

نوع ماده‌ی افزودنی معدنی	قطر (نانومتر)	سطح ویژه (مترمربع بر کیلوگرم)	درصد خلوص
SiO_2	۱۰ ± ۵	۶۰۰۰۰۰	۹۹

جدول ۴. خواص الیاف پلی‌پروپیلن.

نوع الیاف	قطر (میکرون)	طول (mm)	جرم حجمی (Kg/m^3)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)
پلی پروپیلن	۵۰	۱۲	۹۰۰	۳۰

عمل‌آوری (رطوبت نسبی بیش از ۹۵٪) صورت گرفته و پس از آن با بازکردن قالب‌ها، آزمونه‌ها تا سن ۲۸ روز درون حوضچه‌ی عمل‌آوری قرار داده شده‌اند.

۳.۲. روش‌های آزمایش

آزمایش مقاومت فشاری مطابق BS۱۸۸۱ انجام شده است. در این روش قالب‌های مکعبی به ابعاد ۱۵ سانتی‌متر در سه لایه بتن‌ریزی می‌شوند و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، با سرعت بارگذاری ۰/۲ تا ۰/۴ مگاپاسکال در ثانیه تحت بارگذاری قرار می‌گیرند. در این پژوهش، ۷ مخلوط استفاده شده است، که برای انجام آزمایش مقاومت فشاری، از هر مخلوط یک نمونه (شامل ۳ آزمونه) گرفته شده است.

آزمایش مقاومت سایشی نیز مطابق استاندارد ASTM C۱۱۳۸ انجام شده است. در این روش نمونه‌ی استوانه‌یی بتن به قطر ۳۰ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر در کف محفظه‌یی فولادی قرار داده و روی آن آب ریخته می‌شود. در آب ذکرشده، ۷۰ گلوله‌ی فولادی به قطرهای مختلف ریخته می‌شود، سپس پره‌یی درون آب قرار می‌گیرد و آب و گلوله‌ها را با سرعت تقریبی ۱۲۰۰ دور در دقیقه می‌چرخاند. این فرایند در ۶ دوره‌ی ۱۲ ساعتی تکرار و نتیجه‌ی آزمایش از تغییر جرم بتن در اثر سایش مشخص می‌شود.

۳. نتایج آزمایش‌ها

۱.۳. مقاومت فشاری

جدول ۶، مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی طرح‌های اختلاط مختلف را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که افزودن الیاف، اثر کمی در افزایش مقاومت فشاری داشته است، در حالی که مقاومت مخلوط‌های حاوی نانوسیلیس به مراتب بیشتر افزایش یافته‌اند.

افت جزئی مقاومت در مخلوط IF۰/۵ ممکن است به دلیل خطاهای آزمایشگاهی باشد، اما چیزی که مشخص است کاربرد الیاف پلی‌پروپیلن اثری زیادی در مقاومت فشاری بتن ندارد، اگرچه براساس مشاهدات چشمی در زمان شکست نمونه، کرنش قابل تحمل بتن الیافی قبل ازگسیختگی چندین برابر بتن معمولی است.

مخلوط‌های حاوی نانوسیلیس اگرچه براساس مشاهدات چشمی تأثیری در افزایش کرنش قابل تحمل بتن قبل ازگسیختگی نداشته‌اند، اما براساس مقادیر مختلف نانوسیلیس، بین ۱۰ تا ۳۵ درصد موجب افزایش مقاومت فشاری بتن شده‌اند.

۲.۳. مقاومت سایشی

نتایج مقاومت سایشی ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ها در جدول ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقاومت سایشی تمامی مخلوط‌ها نسبت به بتن

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۵. نسبت‌های اختلاط نمونه‌ها (کیلوگرم بر متر مکعب).

معرف مخلوط	آب	سیمان	شن	ماسه	الیاف پلی‌پروپیلن	نانوسیلیس	فوق روان‌کننده (لیتر)	اسلامپ (سانتی‌متر)
I	۱۶۵	۳۵۰	۱۰۰۰	۹۰۰	-	-	۲٫۳۵	۸
IF۰٫۵	۱۶۵	۳۵۰	۱۰۰۰	۹۰۰	۰٫۴۵	-	۳٫۰۰	۳
IF۱	۱۶۵	۳۵۰	۱۰۰۰	۹۰۰	۰٫۹۰	-	۳٫۳۵	۲
IF۱٫۵	۱۶۵	۳۵۰	۱۰۰۰	۹۰۰	۱٫۳۵	-	۳٫۷۰	۱
IS۱	۱۶۵	۳۴۶٫۵	۱۰۰۰	۹۰۰	-	۳٫۵	۴٫۵۰	۳
IS۲	۱۶۵	۳۴۳	۱۰۰۰	۹۰۰	-	۷	۵٫۵۰	۱
IS۳	۱۶۵	۳۳۹٫۵	۱۰۰۰	۹۰۰	-	۱۰٫۵	۷٫۰۰	۱

جدول ۶. مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ها.

معرف مخلوط	I	IF۰٫۵	IF۱	IF۱٫۵	IS۱	IS۲	IS۳
مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	۴۳٫۲	۴۳٫۰	۴۴٫۵	۴۴٫۸	۴۷٫۶	۵۳٫۴	۵۶٫۸

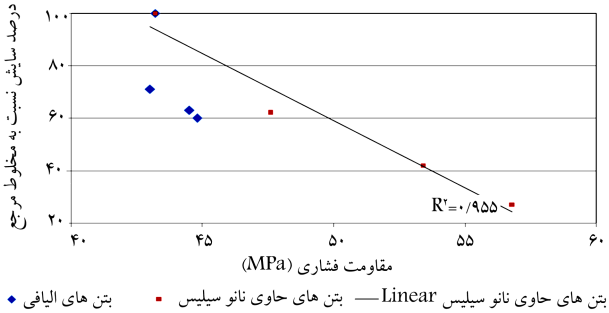
جدول ۷. نتایج حاصل از مقاومت سایشی نمونه‌ها.

معرف مخلوط	I	IF۰٫۵	IF۱	IF۱٫۵	IS۱	IS۲	IS۳
متوسط ارتفاع ساییده‌شده در انتهای آزمایش (میلی‌متر)	۵٫۲	۳٫۷	۳٫۳	۳٫۱	۳٫۲	۲٫۲	۱٫۴
درصد سایش نسبت به مخلوط مرجع	۱۰۰	۷۱	۶۳	۶۰	۶۲	۴۲	۲۷

معمولی افزایش یافته است. اما رشد مقاومت سایشی مخلوط‌های حاوی نانوسیلیس به مراتب بیشتر از مخلوط‌های حاوی الیاف است. به‌عبارت دیگر، الیاف پلی‌پروپیلن مصرفی با توجه به مقدار مصرف آن در بتن در حدود ۲۹ تا ۴۰ درصد توانسته‌اند سایش بتن را کاهش دهند، اما این مقدار کاهش در بتن‌های حاوی نانوسیلیس وابسته به مقدار مصرف آن بین ۴۸ تا ۷۳ درصد بوده است. افزایش مقاومت سایشی بتن حاوی نانوسیلیس به دلیل کاهش تعداد و ابعاد بلورهای $Ca(OH)_2$ و جایگزینی آن با ژل C-S-H است. از نتایج جدول ۷ می‌توان دریافت که افزایش مقدار الیاف پلی‌پروپیلن و همچنین نانوسیلیس در مخلوط‌های بتنی باعث افزایش مقاومت سایشی بتن می‌شود، اگرچه اثربخش کاربرد نانوسیلیس از کاربرد الیاف پلی‌پروپیلن به مراتب بیشتر است. علت احتمالی این خاصیت، پراکنده‌شدن بهتر ذرات نانوسیلیس در داخل بتن و ایجاد یکنواختی بهتر در بتن است، در حالی که در بتن الیافی بهبود خواص به شکل نسبتاً غیریکنواخت است.

۳.۳. رابطه‌ی بین مقاومت سایشی و مقاومت فشاری

نمودار مقاومت فشاری در برابر درصد سایش نسبت به مخلوط مرجع در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در مخلوط‌های حاوی نانوسیلیس و مخلوط مرجع بین مقاومت فشاری و درصد سایش نسبت به مخلوط مرجع، رابطه‌ی نسبتاً خطی برقرار است. به طوری که ضریب همبستگی در ۴ مخلوط مذکور بیش از ۹۵٪ بوده است. در حالی که این رابطه بین مخلوط‌های الیافی صادق نیست. علت احتمالی این پدیده، اثر نانوسیلیس در افزایش هم‌زمان مقاومت فشاری و سایشی بتن است، در حالی که الیاف پلی‌پروپیلن با وجود افزایش مقاومت سایشی، تأثیر چندانی در مقاومت فشاری بتن ندارد. مطابق شکل ۱،



شکل ۱. رابطه‌ی مقاومت فشاری و درصد سایش نسبت به مخلوط مرجع.

افزایش مقدار نانوسیلیس در بتن موجب افزایش مقاومت فشاری و سایشی آن می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

براساس موارد عنوان‌شده، این نتایج از پژوهش حاضر استخراج شده است:

- مقاومت سایشی بتن را می‌توان با اضافه‌کردن نانوسیلیس و یا الیاف پلی‌پروپیلن به نحو مطلوبی افزایش داد. با این حال، اثر نانوسیلیس در افزایش مقاومت سایشی به مراتب از اثر الیاف پلی‌پروپیلن بیشتر است.
- افزایش مقدار مصرف نانوسیلیس در بتن موجب افزایش هم‌زمان مقاومت فشاری و سایشی آن می‌شود. مقاومت سایشی بتن حاوی نانوسیلیس، با افزایش مقاومت فشاری افزایش می‌یابد، که این رابطه نسبتاً خطی است.

www.SID.ir

Archive of SID

- با توجه به اثر جزئی الیاف پلی‌پروپیلن در افزایش مقاومت فشاری، افزایش مقدار الیاف پلی‌پروپیلن در بتن تغییر معناداری در مقاومت فشاری ایجاد نمی‌کند، در حالی که مقاومت سایشی بتن را به شدت افزایش می‌دهد. لذا در مواردی که هدف فقط بهبود خواص سطحی بتن است، کاربرد الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به کاربرد نانوسیلیس به صرفه‌تر است. در غیر این صورت، یعنی در مواردی که هدف بهبود خواص توده‌ی بتن بوده و یا افزایش مقادیر زیادی در مقاومت سایشی موردنظر باشد، کاربرد نانوسیلیس توصیه می‌شود.
- کاربرد نانوسیلیس به مقدار حدود ۱٪ وزن سیمان می‌تواند مقاومت سایشی را تا حدود ۴۰٪ افزایش دهد.
- کاربرد حدود ۰/۵٪ حجمی الیاف پلی‌پروپیلن در بتن می‌تواند مقاومت سایشی را تا حدود ۳۰٪ افزایش دهد.
- نرخ افزایش مقاومت سایشی با افزایش مقدار نانوسیلیس و یا الیاف پلی‌پروپیلن کاهش می‌یابد.

تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه پیام نور انجام شده است و لذا در اینجا از کمک‌های ایشان قدردانی و تشکر می‌شود.

منابع (References)

1. Atis, C.D. "High volume fly ash abrasion resistant concrete", *J. Mater. Civil Eng.*, **14**(3), pp. 274-277 (2002).
2. Naik, T.R., Singh, S.S. and Hossain, M.M. "Abrasion resistance of concrete as influenced by inclusion of fly ash", *Cement Concrete Res.*, **24**(2), pp. 303-312 (1994).
3. Naik, T.R., Singh, S.S. and Hossain, M.M. "Abrasion resistance of high-strength concrete made with class C fly ash", *ACI Mater. J.*, **92**(6), pp. 649-659 (1995).
4. Atis, C.D. "Abrasion-porosity-strength model for fly ash concrete", *J. Mater. Civil Eng.*, **15**(4), pp. 408-410 (2003).
5. Langan, B.W., Joshi, R.C. and Ward, M.A. "Strength and durability of concrete containing 50% Portland cement replacement by fly ash and other materials", *Can. J. Civil Eng.*, **17**, pp. 19-27 (1990).
6. Nanni, A. "Abrasion resistance of roller-compacted concrete", *ACI Mater. J.*, **86**(53), pp. 559-565 (1989).
7. Sadegzadeh, M., Page, C.L. and Kettle, R.J. "Surface microstructure and abrasion resistance of concrete", *Cement Concrete Res.*, **17**(4), pp. 581-590 (1987).
8. Shuan-fa, C., Deng-liang, Z., Jie, Z. and Feng, L. "The study of the road performance of the polypropylene fibre concrete", *Northeast Highway*, **24**(2), pp. 23-25 (2001).
9. Chen, L., Mindess, S., Morgan, D.R. and Shah, S.P., Johnston, C.D. and Pigeon, M. "Comparative toughness testing of fibre reinforced concrete", in: D.J. Stevens, et al. (Eds.), Testing of Fibre Reinforced Concrete, ACI (American Concrete Institute), pp. 47-75 (1995).
10. Kryzanowski, A., Mikos, M., Sustersic, J. and Planinc, I. "Abrasion resistance of concrete in hydraulic structures", *ACI Materials Journal*, **106**(4), pp. 349-356 (July 2009).
11. LiA, X. and Chung, D.D.L. "Improving silica fume for concrete by surface treatment", *Cement and Concrete Research*, **28**(4), pp. 493-498 (April 1998).
12. Nazari, A. and Riahi, S. "Compressive strength and abrasion resistance of concrete containing SiO_2 and Cr_2O_3 nanoparticles in different curing media", *Magazine of Concrete Research*, **64**(2), pp. 177–188 (December 2011).
13. Liu, Y.W., Lee, C.C. and Pann, K.S. "Effects of fiber and silica fume reinforcement on abrasion resistance of hydraulic repair concrete", Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II– Alexander et al (eds), Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-46850-3, pp. 323-324 (2009).
14. Ramezanian Poor, A.A., Hagh Eahi, A. " Effect of silica fume and S.B.R on abrasion/ erosion strength of concrete", 1 st National Congress of Civil Engineering, (in Persian) (2004).

www.SID.ir