

اثر نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن 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 پلی پروپیلن به‌عنوان موادی که ممکن است تأثیری در مقاومت سایشی بتن داشته باشند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اندازه‌گیری مقاومت سایشی براساس روش آزمایش ASTM C 1138 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 پلی پروپیلن 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 پلی پروپیلن کاهش می‌یابد.

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۵)
دربی ۲ - ۳۲، شماره ۱/۳، ص. ۱۲۷-۱۳۰، (پادداست نشی)

monirabbasi@pnu.ac.ir

واژگان کلیدی: مقاومت سایشی، نانوسیلیس، الیاف پلی پروپیلن.

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^[۱] 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.^[۲-۴] 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.^[۵]

تعدادی از مطالعات نشان داده‌اند که اضافه‌کردن الیاف پلی پروپیلن می‌تواند مقاومت سایشی بتن را بهبود بخشد. بسیاری از نتایج قبلی نشان داده است که مقاومت سایشی بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن می‌تواند با توجه به مقادیر مختلف الیاف پلی پروپیلن بین ۲۰ تا ۶۰ درصد افزایش یابد.^[۶-۸] همچنین در مطالعه‌ی کاربردی در سال ۲۰۰۹^[۹] 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 سایشی به مقدار ۱۵٪ شده است.

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

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 قرار گرفته 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 کم‌کم 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 C779 استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که کاربرد ۱۰٪ میکروسیلیس موجب افزایش مقاومت سایشی به مقدار ۱۵٪ شده است.

تاریخ: دریافت ۲۲/۶/۱۳۹۳، اصلاحیه ۱۰/۱/۱۳۹۳، پذیرش ۱۱/۸/۱۳۹۳.

است، اما در هیچ کدام مقایسه‌ی اثر نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن از بابت اثر بخشی 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

۲.۱. مصالح و نسبت مخلوط

سیمان مورد استفاده، سیمان پرتلند نوع دو کارخانه‌ی سیمان تهران و ماسه‌ی مصرفی از نوع رودخانه‌ی بوده است. شن مصرفی نیز از نوع رودخانه‌ی با درصد شکستگی حدود ۶٪ 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 پلی پروپیلن مصرفی نیز در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. نسبت آب به مواد سیمانی برای تمام مخلوط‌ها 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 پلی پروپیلن، به ترتیب شن، مقداری از آب، ماسه، سیمان و باقیمانده‌ی آب که فوق روان‌کننده (با پایه‌ی پلی کریکسیلات) در آن حل شده است، درون مخلوط‌کن بتن ریخته شده و پس از مخلوط‌شدن به مدت ۳ دقیقه، الیاف به تدریج 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 استوانه‌ی بی به قطر و ارتفاع به ترتیب برابر ۳۰ و ۱۰۰ میلی‌متر برای انجام آزمایش سایش ریخته شده است. پس از بتن ریزی، تراکم با میز لرزان انجام و در نهایت، عمل‌آوری نمونه‌ها تا ۲۴ ساعت ابتدایی درون محفظه‌ی

جدول ۱. خواص شیمیایی سیمان.

SO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
۱٫۹۳	۶۳٫۱۶	۳٫۴۳	۳٫۰۳	۴٫۱۲	۲۱٫۸۵

جدول ۲. خواص فیزیکی سنگ‌دانه.

سنگ‌دانه‌ی درشت		سنگ‌دانه‌ی ریز	
جرم حجمی اشباع	درصد	جرم حجمی اشباع	درصد
با سطح خشک جذب		با سطح خشک جذب	
(Kg/m ³)	آب	(Kg/m ³)	آب
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 پلی پروپیلن.

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 زerkردن قالب‌ها، نمونه‌ها تا سن ۲۸ روز درون حوضچه‌ی عمل‌آوری قرار داده شده‌اند.

۳.۲. روش‌های آزمایش

آزمایش مقاومت فشاری مطابق BS 1881 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 نمونه) گرفته شده است.

آزمایش مقاومت سایشی نیز مطابق استاندارد ASTM C 1138 انجام شده است. در این روش نمونه‌ی استوانه‌ی بتن به قطر ۳۰ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر در کف محفظه‌ی فولادی قرار داده و روی آن آب ریخته می‌شود. در آب ذکرشده، ۷۰ گلوله‌ی فولادی به قطرهای مختلف ریخته می‌شود، سپس پره‌ی 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.

۳.۳. نتایج آزمایش‌ها

۳.۳.۱. مقاومت فشاری

جدول ۶، مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی طرح‌های اختلاط مختلف را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که افزودن الیاف، اثرکمی در افزایش مقاومت فشاری داشته است، در حالی که مقاومت مخلوط‌های حاوی نانوسیلیس به مراتب بیشتر افزایش یافته‌اند. افت جزئی مقاومت در مخلوط IF^۵/۵ ممکن است به دلیل خطاهای آزمایشگاهی باشد، اما چیزی که مشخص است کاربرد الیاف پلی پروپیلن اثری زیادی در مقاومت فشاری بتن ندارد، اگرچه براساس مشاهدات چشمی در زمان شکست نمونه، کرنش قابل تحمل بتن الیافی قبل از گسیختگی چندین برابر بتن معمولی است. مخلوط‌های حاوی نانوسیلیس اگرچه براساس مشاهدات چشمی تأثیری در افزایش کرنش قابل تحمل بتن قبل از گسیختگی نداشته‌اند، اما براساس مقادیر مختلف نانوسیلیس، بین ۱۰ تا ۳۵ درصد موجب افزایش مقاومت فشاری بتن شده‌اند.

۳.۳.۲. 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

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

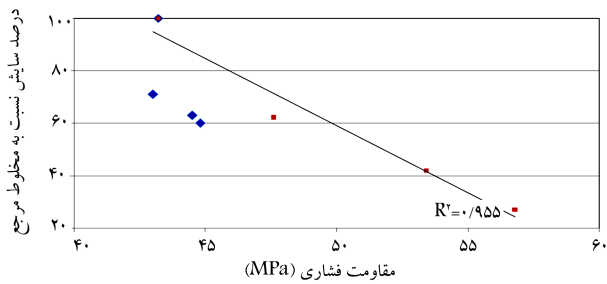
معرف مخلوط	آب	سیمان	شن	ماسه	الیاف پلی پروپیلن	نانوسیسیس	فوق روان‌کننده	اسلامپ
	(سانتی متر)	(لیتر)	(کیلوگرم)	(کیلوگرم)	(کیلوگرم)	(کیلوگرم)	(کیلوگرم)	(کیلوگرم)
I	۱۶۵	۳۵۰	۱۰۰۰	۹۰۰	-	-	۲,۳۵	۸
IF ^{۰/۵}	۱۶۵	۳۵۰	۱۰۰۰	۹۰۰	۰,۴۵	-	۳,۰۰	۳
IF ^۱	۱۶۵	۳۵۰	۱۰۰۰	۹۰۰	۰,۹۰	-	۳,۳۵	۲
IF ^{۱/۵}	۱۶۵	۳۵۰	۱۰۰۰	۹۰۰	۱,۳۵	-	۳,۷۰	۱
IS ^۱	۱۶۵	۳۴۶,۵	۱۰۰۰	۹۰۰	-	۳,۵	۴,۵۰	۳
IS ^۲	۱۶۵	۳۴۳	۱۰۰۰	۹۰۰	-	۷	۵,۵۰	۱
IS ^۳	۱۶۵	۳۳۹,۵	۱۰۰۰	۹۰۰	-	۱۰,۵	۷,۰۰	۱

جدول ۶. مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها.

معرف مخلوط	I	IF ^{۰/۵}	IF ^۱	IF ^{۱/۵}	IS ^۱	IS ^۲	IS ^۳
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	IF ^{۰/۵}	IF ^۱	IF ^{۱/۵}	IS ^۱	IS ^۲	IS ^۳
متوسط ارتفاع ساییده شده در انتهای آزمایش (میلی متر)	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



شکل ۱. رابطه‌ی مقاومت فشاری و درصد سایش نسبت به مخلوط مرجع. بتن های حاوی نانو سیسیس — Linear — بتن های الیافی

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

معمولی افزایش یافته است. اما رشد مقاومت سایشی مخلوط‌های حاوی نانوسیسیس به مراتب بیشتر از مخلوط‌های حاوی الیاف است. به عبارت دیگر، الیاف پلی پروپیلن 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 نانوسیسیس وابسته به مقدار مصرف آن بین ۴۸ تا ۷۳ درصد بوده است. افزایش مقاومت سایشی بتن حاوی نانوسیسیس 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 پلی پروپیلن و همچنین نانوسیسیس در مخلوط‌های بتنی باعث افزایش مقاومت سایشی بتن می‌شود، اگرچه اثر بخش کاربرد نانوسیسیس از کاربرد الیاف پلی پروپیلن به مراتب بیشتر است. علت احتمالی این خاصیت، پراکنده شدن بهتر ذرات نانوسیسیس در داخل بتن و ایجاد یکنواختی بهتر در بتن است، در حالی که در بتن الیافی بهبود خواص به شکل نسبتاً غیر یکنواخت 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 نانوسیسیس 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 نانوسیسیس در افزایش هم‌زمان مقاومت فشاری و سایشی بتن است، در حالی که الیاف پلی پروپیلن با وجود افزایش مقاومت سایشی، تأثیر چندانی در مقاومت فشاری بتن ندارد. مطابق شکل ۱،

۴. نتیجه‌گیری

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

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

-- کاربرد حدود ۵٪ حجمی الیاف پلی پروپیلن در بتن می تواند مقاومت سایشی را تا حدود ۳۰٪ افزایش دهد.
 -- نرخ افزایش مقاومت سایشی با افزایش مقدار نانوسیلیس و یا الیاف پلی پروپیلن کاهش می یابد.

-- با توجه به اثر جزئی الیاف پلی پروپیلن در افزایش مقاومت فشاری، افزایش مقدار الیاف پلی پروپیلن در بتن تغییر معناداری در مقاومت فشاری ایجاد نمی کند، در حالی که مقاومت سایشی بتن را به شدت افزایش می دهد. لذا در مواردی که هدف فقط بهبود خواص سطحی بتن است، کاربرد الیاف پلی پروپیلن نسبت به کاربرد نانوسیلیس به صرفه تر است. در غیر این صورت، یعنی در مواردی که هدف بهبود خواص توده ای بتن بوده و یا افزایش مقادیر زیادی در مقاومت سایشی مورد نظر باشد، کاربرد نانوسیلیس توصیه می شود.

تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه پیام نور انجام شده است و لذا در اینجا از کمک های ایشان قدردانی و تشکر می شود.

-- کاربرد نانوسیلیس به مقدار حدود ۱٪ وزن سیمان می تواند مقاومت سایشی را تا حدود ۴۰٪ افزایش دهد.

منابع (References)

- Atis, C.D. "High volume fly ash abrasion resistant concrete", *J. Mater. Civil Eng.*, **14**(3), pp. 274-277 (2002).
- 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).
- 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).
- Atis, C.D. "Abrasion-porosity-strength model for fly ash concrete", *J. Mater. Civil Eng.*, **15**(4), pp. 408-410 (2003).
- 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).
- Nanni, A. "Abrasion resistance of roller-compacted concrete", *ACI Mater. J.*, **86**(53), pp. 559-565 (1989).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- Nazari, A. and Riahi, S. "Compressive strength and abrasion resistance of concrete containing SiO₂ and Cr₂O₃ nanoparticles in different curing media", *Magazine of Concrete Research*, **64**(2), pp. 177-188 (December 2011).
- 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).
- Ramezani 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).