



## مقاومت در برابر ساییدگی روسازی بتنی حاوی مواد نانو

دکتر محمد شکرچی زاده<sup>۱</sup>، حمید رضا باباپور<sup>۲</sup>، بهمن حاجی سامی<sup>۳</sup>

۱- استادیار دانشکده عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

\*\*تلفن: ۰۲۱-۸۸۹۷۳۶۳۱، همراه: ۰۹۱۲۲۱۴۸۵۸۲، پست الکترونیک: [shekarch@ut.ac.ir](mailto:shekarch@ut.ac.ir)

۲- کارشناسی ارشد آب و فاضلاب، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

\*\*تلفن: ۰۲۱-۷۷۷۰۴۱۶۴، همراه: ۰۹۱۲۶۴۷۲۸۴۰، پست الکترونیک: [h.babapoor@gmail.com](mailto:h.babapoor@gmail.com)

۳- کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

تلفن: ۰۲۱-۴۴۴۲۹۸۹، همراه: ۰۹۱۲۴۰۴۸۵۷۰، پست الکترونیک: [bahman\\_sami@alum.sharif.edu](mailto:bahman_sami@alum.sharif.edu)

### چکیده:

استفاده از نانو ذرات در ساخت مواد و مصالح جدید روز به روز در حال افزایش است. تاثیر قابل ملاحظه این مواد در بهبود کیفیت و خصوصیات مواد ساخته شده، باعث شده تا تحقیقات در مورد مصالح ساخته شده با این مواد روزافزون گردد. نانو  $SiO_2$  و نانو  $TiO_2$  دو نوع از این نانو مواد هستند که کاربرد فراوانی در ساخت مواد و مصالح جدید دارند.

در این پژوهش تحقیقات انجام شده بر روی مقاومت ساییدگی روسازی بتنی ساخته شده با این دو نوع ذرات نانو گردآوری شده است. برای مقایسه، مقاومت سایشی بتن ساده و بتن حاوی الیاف پلی پروپیلین (PP) نیز در این تحقیق اندازه گیری شده است. نتایج تحقیق نشان می دهد که مقاومت سایشی بتن های حاوی نانو مواد و الیاف پلی پروپیلین به طور قابل ملاحظه ای افزایش یافته است. شاخصهای مقاومت سایشی بتن دارای ذرات نانو خیلی بیشتر از بتن حاوی الیاف پلی پروپیلین است. در ضمن مقاومت سایشی بتن حاوی نانو  $TiO_2$  از بتن دارای نانو  $SiO_2$  با همان مقدار ذرات نانو بیشتر است. در نهایت ارتباط بین شاخص های مقاومت سایشی و مقاومت فشاری بتن هم بدست آمده است که نشان می دهد مقاومت سایشی بتن با افزایش مقاومت فشاری، افزایش می یابد.

کلید واژه: مقاومت سایشی، روسازی بتنی، ذرات نانو، نانو  $TiO_2$ ، نانو  $SiO_2$ ، الیاف پلی پروپیلین

### ۱. مقدمه

اغلب روسازی بتنی برای پوشش سطح راهها، پل ها، باند فرودگاهها و پارکینگها به کار می رود. روسازی بتنی بارهای دینامیکی را تحمل می کند و در معرض اثرات مخرب زیست محیطی قرار دارد. روسازی بتنی با کیفیت بالا، نه تنها نیازمند مقاومت مطلوب است بلکه دوام خوبی نیز باید داشته باشد. دوام روسازی بتنی شامل مقاومت سایشی، مقاومت در برابر ضربه، مقاومت فشاری، نفوذ پذیری و چرخه های ذوب و انجماد است. مقاومت سایشی یکی از مواردی است که در افزایش دوام روسازی بتنی بسیار مؤثر خواهد بود. تحقیق های بسیاری بر روی مقاومت سایشی بتن انجام شده است. نتایج نشان داده است که مقاومت سایشی بتن تحت تاثیر مقاومت فشاری، تکنیک عمل آوری سطح بتن، نوع گیرش، عمل آوری، خصوصیات سنگدانه ها و شرایط آزمایش (یعنی تر و خشک بودن) است [۱] و [۲].

دو نگاه می توان به ارتباط بین مقاومت فشاری و مقاومت سایشی بتن داشت. یکی اینکه مقاومت فشاری فاکتور حاکم بر مقاومت سایشی بتن است یعنی هرچه مقاومت فشاری افزایش یابد، مقاومت سایشی نیز افزایش خواهد داشت [۳]. به عنوان مثال Naik و همکارانش [۱] و نیز Gjorv و همکارانش [۴ و ۵] نشان دادند که ارتباط بین این دو مقاومت خطی است یا اینکه Cengiz [۲] دریافت که این ارتباط از نوع هیپربولیک است. در حالی که دید دوم این است که مقاومت سایشی مستقل از مقاومت فشاری عمل می کند [۶ و ۷].

1- Nano-SiO<sub>2</sub>  
2- Nano-TiO<sub>2</sub>  
3- Polypropylene Fibers



بسیاری از پژوهشها نشان داده‌اند که تکنیک عمل‌آوری سطح بتن و نوع عمل‌آوری، هر دو تاثیر بسزایی در مقاومت سایشی بتن دارند. به طور کلی، عمل‌آوری مناسب و گیرش درست، شناخته شده‌ترین عوامل بالا بردن مقاومت سایشی هستند.

Sadegzadeh و همکارانش تحقیقاتی راجع به ارتباط بین ریزبافت سطح بتن و مقاومت سایشی بتن انجام داده‌اند [۸]. نتایج نشان داده که تکنیکهای مختلف عمل‌آوری نهایی سطح بتن باعث ایجاد خلل و فرج‌هایی در حدود چند میلی‌متر و با سختی مشخص در سطح بتن خواهد شد. مقاومت فرسایشی بتن به طور گسترده ای وابسته به ساختمان خلل و فرج‌ها و سختی میکروسکوپی ناحیه سطحی بتن است [۸]. تحقیقات متعدد نشان داده‌اند که استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن (PP) مقاومت سایشی بتن را بهبود می‌بخشد. بیشتر نتایج آزمایشگاهی بیانگر آن است که استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن (PP) می‌تواند مقاومت سایشی بتن را ۲۰ تا ۶۰ درصد (با توجه به نوع الیاف مصرفی در تحقیقات مختلف) افزایش دهد [۹ و ۱۰]. نتایج آزمایش‌های مشابه توسط لابراتور ملی بزرگراه‌های نروژ تاثیر ۵۲ درصدی افزایش مقاومت سایشی با استفاده از الیاف PP را نشان داده است [۱۱]. از طرفی نتایج آزمایشات انجمن مهندسين آمريکا با به کارگیری روش CRD-C52-54، حاکی از افزایش ۱۰۵ درصدی مقاومت سایشی بتن با استفاده از الیاف PP است [۱۱].

اخیراً استفاده از ذرات نانو (SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>) برای روسازی‌ها توسط Lui Li و همکارانش مورد آزمایش قرار گرفته است [۱۲]. برای مقایسه، مقاومت سایشی بتن معمولی و بتن دارای الیاف PP نیز در این تحقیق اندازه‌گیری شده است. نتایج آزمایشها نشان می‌دهد که مقاومت سایشی بتن با ذرات نانو و الیاف PP به طور محسوسی افزایش می‌یابد. از طرفی شاخص‌های مقاومت سایشی بتن با ذرات نانو خیلی بالاتر از بتن دارای الیاف PP است. ضمناً مشخص شد که اگر در بتن از ذرات نانو استفاده شود، عمر مفید بهره برداری روسازی نیز افزایش می‌یابد [۱۲]. در زیر آزمایشهای انجام شده توسط Lui Li و همکارانش آمده است.

## ۲. آزمایش

### ۱. مواد و نسبتهای اختلاط

سیمان مصرفی پرتلند (P.O42.5) است. ریزدانه با مدول نرمی ۲/۴ و از ماسه رودخانه‌ای طبیعی و درشت‌دانه آن از سنگهای شکسته با قطر بین ۲۵-۵ mm است. روان کننده (UNF) مورد استفاده از نوع کاهش دهنده آب (یک نوع از اسید سولفوریک نفتالین-β و فرمالدئید غلیظ شده، ساخت چین) بود. روان کننده برای کمک به پخش شدن بهتر ذرات نانو در بتن و رسیدن به کارایی قابل قبول بتن مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین از کف زدا، فسفات تری بوتیل (ساخت چین)، برای کاهش حبابهای هوا استفاده شده است [۱۲].

ذرات نانو از شرکت ژوشان ۳ خریداری شده و خصوصیات آن در جدول (۱) آمده است. الیاف اصلاح شده PP از کارخانه ژانگ‌جی‌گانگ ۴ فراهم شده است و خصوصیات آن در جدول (۲) آمده است [۱۲].

#### جدول (۱): خصوصیات ذرات نانو

نوع	قطر ذرات به نانومتر (nm)	سطح ویژه (m <sup>2</sup> /g)	وزن مخصوص (g/cm <sup>3</sup> )	خلوص (%)
SiO <sub>2</sub>	۱۰±۵	۶۴۰±۵۰	<۰/۱۲	۹۹/۹
TiO <sub>2</sub>	۱۵	۲۴۰±۵۰	۰/۰۴-۰/۰۶	۹۹/۷

#### جدول (۲): خصوصیات الیاف PP

نوع	درصد کشیدگی (%)	نمره الیاف (D)	قطر به میکرومتر	طول (mm)
الیاف PP	۴۰±۳	۱۱±۰/۵	۸۴-۹۲	۱۵±۱

نسبت آب به سیمان (مجموع سیمان و ذرات نانو) مورد استفاده برای تمام طرح اختلاطها ۰/۴۲ و نسبت ماسه ۳۴ درصد است. نسبت اختلاط بر حسب متر مکعب بتن در جدول (۳) آمده است. در این جدول، PC بتن معمولی (Plain Concrete) است. همچنین PPC1 و PPC2 مشخص می‌کند که بتن شامل الیاف PP به ترتیب در حجم ۰/۱۶ و ۰/۰۹ کیلوگرم بر مترمکعب است. علاوه بر این NSC1 و NSC3

1- National Highway Laboratory of Norway  
 2- U.S. Army Corps of Engineering  
 3- Zhoushan Mingri Nano-phase Material Co.  
 4- Zhangjiagang Synthetic Fiber Co.



مشخص می‌کند بتن حاوی ذرات نانو  $\text{SiO}_2$  به ترتیب به میزان ۱ و ۳ درصد وزن سیمان است. و در نهایت NTC5, NTC3, NTC1 برای بتن حاوی ذرات  $\text{TiO}_2$  به میزان ۱، ۳ و ۵ درصد وزن سیمان بکار می‌رود [۱۲].

### جدول (۳): نسبت اختلاط بر حسب $(\text{kg}/\text{m}^3)$

اسلامپ (cm)	کف زدا	UNF	نانو $\text{TiO}_2$	نانو $\text{SiO}_2$	الیاف PP	شن	ماسه	سیمان	آب	نوع مخلوط
۵-۶	-	۵/۴	-	-	-	۱۲۶۰	۶۵۰	۳۶۰	۱۵۱	PC
۳-۴	-	۵/۴	-	-	۰/۶	۱۲۶۰	۶۵۰	۳۶۰	۱۵۱	PPC1
۲-۳	-	۵/۴	-	-	۰/۹	۱۲۶۰	۶۵۰	۳۶۰	۱۵۱	PPC2
۲-۳	۰/۲۱۶	۵/۴	-	۳/۶	-	۱۲۶۰	۶۵۰	۳۵۶/۴	۱۵۱	NSC1
۱-۲	۰/۲۸۸	۷/۲	-	۱۰/۸	-	۱۲۶۰	۶۵۰	۳۴۹/۲	۱۵۱	NSC3
۲-۳	۰/۲۱۶	۵/۴	۳/۶	-	-	۱۲۶۰	۶۵۰	۳۵۶/۴	۱۵۱	NTC1
۲-۳	۰/۲۸۸	۷/۲	۱۰/۸	-	-	۱۲۶۰	۶۵۰	۳۴۹/۲	۱۵۱	NTC3
۱-۲	۰/۲۸۸	۷/۲	۱۸	-	-	۱۲۶۰	۶۵۰	۳۴۲	۱۵۱	NTC5

### ۲.۲. ساخت نمونه‌ها

برای ساخت بتن با ذرات نانو، عامل کاهش دهنده آب (روان کننده) در ابتدا با آب لازم جهت اختلاط و ذرات نانو مخلوط شده و با سرعت زیاد به مدت ۵ دقیقه هم زده شد. سپس عامل کف‌زدا به مایع اضافه شد. از طرفی سیمان، ماسه و درشت‌دانه، در همزن دیگری با سرعت کم به مدت ۲ دقیقه مخلوط گردید. سپس مخلوط کف‌زدا، آب و ذرات نانو آرام به مخلوط سیمان، شن و ماسه اضافه شده و برای ۲ دقیقه دیگر به آرامی برای رسیدن به کارایی مناسب مخلوط گردید [۱۲].

برای ساخت بتن معمولی و بتن دارای الیاف PP، عامل کاهش دهنده آب ابتدا در آب حل گردید. پس از اینکه سیمان، درشت‌دانه، ریز-دانه و در صورت وجود الیاف PP با یکدیگر مخلوط گردید، محلول آب و روان کننده به آن اضافه شد و برای چندین دقیقه بوسیله دستگاه هم زده شد [۱۲].

در نهایت بتن تازه در قالبهای روغنکاری شده مکعبی شکل به ابعاد  $100 \times 100 \times 100$  mm برای تست مقاومت فشاری ریخته شد. همچنین منشوره‌های  $100 \times 100 \times 400$  mm برای تستهای خمشی و مکعبهای  $150 \times 150 \times 150$  mm برای تست فرسایش ساخته شدند. پس از ریختن نمونه‌ها در قالب برای تراکم بیشتر و خروج حبابهای هوا، نمونه‌ها و بیره شدند. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج و در اتاقی با رطوبت استاندارد و دمای  $20 \pm 3^\circ\text{C}$  نگهداری شد [۱۲].

### ۳.۲. روش آزمایش

مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها بر اساس استاندارد JTJ 053-94 انجام گرفت. و مقاومت سایشی بر اساس استاندارد GB/T16925-1997 انجام شده است. تست فرسایش با دستگاه بلبرینگ فرسایشی ۳ انجام شد [۱۲].

آزمایش مقاومت سایشی به این صورت است که ابتدا سطح مورد آزمایش بتن در بالا قرار گرفته و چک فرسایشی بر روی این سطح قرار داده می‌شود. سپس سر دستگاه روی این سطح شروع به چرخیدن کرده و همزمان جهت کارایی بهتر سطح با فشار آب شست و شو داده می‌شود تا دستگاه شیار دایره‌ای به قطر  $75$  mm روی سطح بتن ایجاد نماید. عمق شیار سایش یافته بعد از ۳۰ دور چرخش اندازه‌گیری می‌شود. بعد از آن دستگاه پس از هر ۱۰۰۰ دور گردش متوقف و عمق شیار اندازه‌گیری می‌شود. پس از اینکه تعداد گردشها به ۵۰۰۰ بار رسید یا عمق شیار از  $1/5$  mm گذشت، آزمایش متوقف و تعداد نهایی گردشها و عمق نهایی شیار ثبت می‌گردد. «شاخص مقاومت سایشی» از رابطه (۱) بدست می‌آید [۱۲].

1- Testing Methods of Concrete for Highway Engineering, China

2- Test Method for Abrasion Resistance of Concrete & Its Product, China

3- Ball bearing abrasion machine



$$I_a = \frac{\sqrt{R}}{P} \quad (1)$$

که در آن  $I_a$  شاخص مقاومت سایشی،  $R$  تعداد کل گردشهای دستگاه (بر حسب کیلوچرخش یعنی تعداد دورها بخش بر ۱۰۰۰) و  $P$  عمق شیار فرسایش یافته به میلیمتر (mm) (اختلاف بین عمق اولیه و نهایی شیار) است [۱۲]. در شاخص مقاومت سایشی ( $I_a$ ) که از آزمایش بدست می‌آید، اگر سطوح قالبی نمونه به عنوان سطح سایشی استفاده شود «شاخص مقاومت سایشی سطحی» و اگر سطح کناره نمونه به عنوان سطح سایشی مورد استفاده قرار گیرد، مقدار بدست آمده «شاخص مقاومت سایشی جانبی» نامیده می‌شود. مقدار شاخص سطحی اندکی پایین‌تر از شاخص جانبی است، اما در مورد روسازی بتنی به واقعیت نزدیکتر است [۱۲]. هر چه مقدار شاخص مقاومت سایشی بیشتر باشد، مقاومت سایشی بتن بیشتر است. به طور کلی وقتی شاخص مقاومت سایشی سطحی از ۱/۶ بیشتر باشد، مقاومت سایشی روسازی بتنی متقاعد کننده است [۱۲].

### ۳. نتایج آزمایش‌ها و بحث نتایج

#### ۳.۱. مقاومت‌های فشاری و خمشی

جدول (۴) مقاومت‌های فشاری و خمشی کلیه نمونه‌های ۲۸ روزه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود هنگامیکه ذرات نانو به مقدار کم افزوده می‌شود، هر دو مقاومت خمشی و فشاری نمونه‌ها بالا می‌رود. اما اگر میزان ذرات نانو استفاده شده در نمونه‌ها زیاد باشد، مقاومت خمشی از مقاومت بتن معمولی نیز کمتر خواهد بود. اگر چه مقاومت فشاری همچنان به مقدار کمی بالاتر می‌رود. تاثیر استفاده از نانو  $TiO_2$  در افزایش مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های بتنی به ترتیب  $NTC1 > NTC3 > NTC5$  (با کاهش مقدار نانو  $TiO_2$ ) و همین نتایج برای بتن با نانو  $SiO_2$  در جدول (۴) مشاهده می‌شود. هنگامی که مقدار الیاف PP از ۰/۶ تا ۰/۹ کیلوگرم بر مترمکعب بالا می‌رود، مقاومت فشاری بتن دارای الیاف PP به مقدار کمی افزایش می‌یابد. ولی مقاومت خمشی به طور محسوس افزایش می‌یابد [۱۲].

جدول (۴): نتایج مقاومت‌های فشاری و خمشی نمونه‌های ۲۸ روزه

مقاومت خمشی		مقاومت فشاری		نوع مخلوط
درصد بهبود مقاومت نسبت به بتن معمولی (%)	نتیجه آزمایش (Mpa)	درصد بهبود مقاومت نسبت به بتن معمولی (%)	نتیجه آزمایش (Mpa)	
۰	۵/۴۶	۰	۵۹/۰۸	PC
۹/۸۱	۵/۹۹	۳/۲۸	۶۱/۰۲	PPC1
۲۰/۸۷	۶/۶۰	۷/۱۲	۶۳/۲۹	PPC2
۴/۲۱	۵/۶۹	۱۲/۳۱	۶۶/۳۶	NSC1
-۱/۸۷	۵/۳۶	۳/۵۱	۶۱/۱۶	NSC3
۱۰/۲۸	۶/۰۲	۱۸/۰۳	۶۹/۷۳	NTC1
۳/۰۴	۵/۶۲	۱۲/۷۶	۶۶/۶۲	NTC3
-۳/۲۷	۵/۲۸	۱/۵۵	۶۰/۰۰	NTC5

اگر بتن سالم و بدون درز و ترک باشد، مقاومت فشاری و خمشی آن باید همزمان افزایش یابد. ولی در عمل مقدار افزایش مقاومت فشاری بتن بیشتر از مقاومت خمشی آن است. این امر به دلیل حضور شکافهای ریز با اندازه‌های مختلف در بتن است که تاثیر این درزها روی مقاومت خمشی بیش از مقاومت فشاری است. بهر حال، با افزایش الیاف PP، شکل و وسعت ترکهای مویی محدود می‌شود و ابعاد آنها کاهش می‌یابد. بنابراین درصد افزایش مقاومت خمشی از مقاومت فشاری افزایش بیشتری نشان می‌دهد. همچنین هنگامی که حجم ذرات نانو در بتن افزایش می‌یابد، مثلاً به مقدار ۳ درصد نانو  $SiO_2$  و ۵ درصد نانو  $TiO_2$ ، کارایی بتن کاهش یافته و مقدار ترکهای مویی بیشتر می‌شود. این امر سبب کاهش مقاومت خمشی بتن می‌شود. علاوه پخش یکنواخت و همگن ذرات نانو در ملات کار دشواری است و با افزایش درصد ذرات نانو این عدم یکپارچگی باعث ایجاد ناحیه ضعیف در بتن می‌شود، که این امر نیز مقاومت خمشی بتن را کاهش می‌دهد [۱۲].



## ۲.۳. مقاومت سایشی

جدول (۵) نتایج مقاومت سایشی کلیه نمونه های ۲۸ روزه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مقاومت سایشی نمونه‌های دارای ذرات نانو و الیاف PP به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. بویژه افزایش مقاومت سایشی نمونه های دارای ذرات نانو بسیار بیشتر از نمونه های دارای الیاف PP است. همچنین شاخص مقاومت سایشی جانبی تمام نمونه‌ها از شاخص مقاومت سایشی سطحی آنها بیشتر است [۱۲].

جدول (۵): نتایج مقاومت سایشی نمونه‌های ۲۸ روزه

شاخص مقاومت سایشی جانبی		شاخص مقاومت سایشی سطحی		نوع مخلوط
درصد بهبود مقاومت نسبت به بتن معمولی (/.)	نتیجه آزمایش	درصد بهبود مقاومت نسبت به بتن معمولی (/.)	نتیجه آزمایش	
۰	۱/۵۵	۰	۱/۱۹	PC
۵۵/۹	۲/۴۲	۱۹/۱	۱/۴۲	PPC1
۶۹/۲	۲/۶۲	۳۴/۴	۱/۶۰	PPC2
۱۳۹/۴	۳/۷۱	۱۵۷/۰	۳/۰۶	NSC1
۸۹/۰	۲/۹۳	۱۰۰/۸	۲/۳۹	NSC3
۱۷۳/۳	۴/۲۴	۱۸۰/۷	۳/۳۴	NTC1
۱۴۰/۲	۳/۷۲	۱۴۷/۷	۲/۹۵	NTC3
۸۶/۰	۲/۸۸	۹۰/۴	۲/۲۷	NTC5

تاثیر نانو  $TiO_2$  در افزایش مقاومت سایشی به این ترتیب است که  $NTC1 > NTC3 > NTC5$  (با کاهش در مقدار نانو  $TiO_2$ ). مقاومت سایشی بتن با نانو  $TiO_2$  به مقدار ۱ درصد وزن سیمان برای شاخص مقاومت سایشی سطحی تا ۱۸۰/۷ درصد، و برای شاخص مقاومت سایشی جانبی تا ۱۷۳/۳ درصد افزایش ایجاد می‌کند. از طرفی وقتی نانو  $TiO_2$  به میزان ۵ درصد وزن سیمان به بتن اضافه شود، این تفاوتها به ترتیب ۹۰/۴ و ۸۶/۰ درصد افزایش می‌یابد. همین نتایج برای استفاده از نانو  $SiO_2$  در بتن مشاهده می‌شود.

جدول (۵) نشان می‌دهد شاخص مقاومت سایشی بتن با الیاف PP با افزایش مقدار الیاف، افزایش می‌یابد. مقدار افزایش تقریباً با نتایج سایر تحقیقات انجام شده مشابه است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش ذرات نانو برای افزایش مقاومت سایشی بتن مطلوب‌تر از الیاف PP است [۱۲].

عملکرد ذرات نانو در بهبود مقاومت سایشی بتن در ادامه توضیح داده می‌شود. فرض کنید ذرات نانو به صورت یکنواخت پخش شده و هر ذره شامل یک شکل مکعبی باشد؛ به این ترتیب فاصله بین ذرات نانو قابل تصور است. پس از اینکه هیدراتاسیون آغاز شد، محصولات هیدراته پخش شده و ذرات نانو را مانند هسته ای می‌پوشانند. اگر مقدار و فاصله ذرات نانو در بتن مناسب باشد، عمل کریستاله شدن به نحوی مطلوب کنترل می‌گردد به طوری که رشد کریستالی  $Ca(OH)_2$  با ذرات نانو محدود می‌شود. این عمل ملات سیمان را همگن‌تر و متراکم‌تر می‌کند. لذا آشکار است که مقاومت سایشی و مقاومت بتن با حضور ۱ درصد نانو  $TiO_2$  بیشتر بهبود می‌یابد. با افزایش مقدار ذرات نانو، فاصله بین آنها کاهش یافته و کریستالهای  $Ca(OH)_2$  نمی‌توانند به خوبی رشد کنند و این منجر به کاهش و کوچک شدن نسبت کریستال به ژل C-S-H شده و ریزبافت‌های ملات سیمان سست خواهد شد. به همین دلیل مقاومت سایشی و مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد [۱۲].

از طرفی چون درصد سیمان مصرفی و میزان آب در این پژوهش کم در نظر گرفته شده، اسلامپ نمونه بتنی بخصوص نمونه بتنی دارای ذرات نانو، کمتر از ۶۰ mm بود. این امر باعث وجود لایه نازکی از ملات جهت فرم دهی سطح بتن می‌شود. این لایه نازک جهت بهبود مقاومت سایشی بتن بسیار مطلوب است [۱۲].

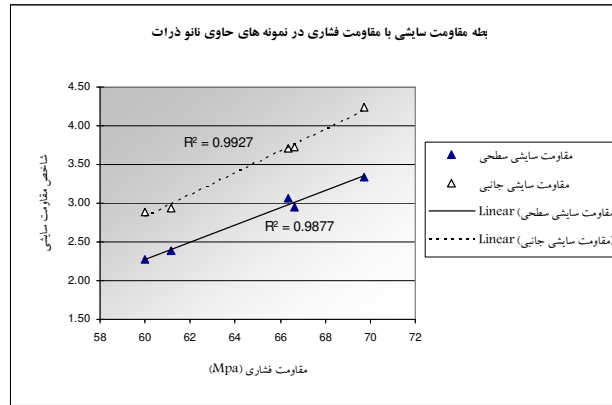
بهرحال، مقاومت سایشی و فشاری بتن با افزایش بیشتر ذرات نانو کاهش می‌یابد. تحقیقات نشان داده اند که مقدار ذرات نانو تاثیر زیادی روی نیاز به آب خمیر سیمان دارد [۱۳]. افزایش مقدار ذرات نانو، نیازمند افزایش مقدار آب مصرفی است. اگر نسبت‌های اختلاط بتن یکسان باشد، کارایی بتن با افزایش بیش از حد ذرات نانو کاهش می‌یابد که به همین دلیل از مقاومت سایشی و فشاری بتن کاسته می‌شود. از طرفی پخش صحیح ذرات نانو در مخلوط بتن با افزایش مقدار ذرات سخت‌تر شده که این نیز از مقاومت سایشی و فشاری بتن می‌کاهد.

مقاومت سایشی بتن در حضور الیاف اصلاح شده PP بهبود می‌یابد که بیشترین تاثیر را روی ترکیب مویی دارد. افزایش مقادیر الیاف در بتن باعث افزایش این تاثیرات می‌شود. بعلاوه خاصیت اصطکاکی با بیرون کشیدن الیاف PP از بتن، تحلیل می‌رود [۱۳].



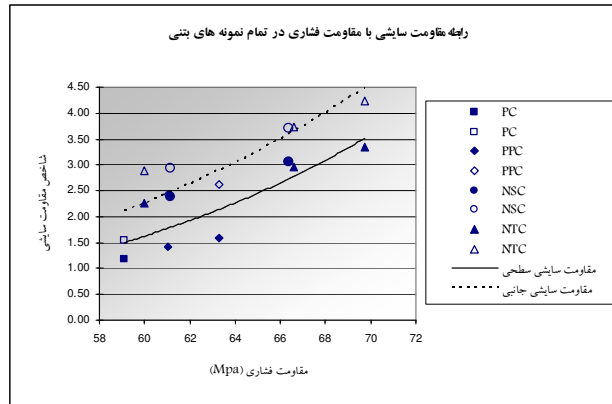
## ۳.۳. ارتباط بین مقاومت سایشی و مقاومت فشاری بتن

همانگونه که در مقدمه اشاره شد، امروزه دیدگاههای مختلفی در ارتباط با رابطه بین مقاومت سایشی و فشاری در بتن وجود دارد. ارتباط بین این دو مقاومت در این تحقیق در شکلهای (۱) و (۲) آمده است. در شکل (۱) مشاهده می شود که شاخصهای مقاومت سایشی بتن شامل ذرات نانو با افزایش مقاومت فشاری افزایش می یابد. این ارتباط خطی است و ضریب همبستگی آن نزدیک به ۱/۰ است. ضریب همبستگی شاخص جانبی کمی بزرگتر از شاخص سطحی است.



شکل (۱): ارتباط بین شاخص مقاومت سایشی با مقاومت فشاری در بتن حاوی ذرات نانو

شکل (۲) ارتباط بین شاخصهای مقاومت فشاری و سایشی برای بتن معمولی، بتن با ذرات نانو و بتن با الیاف PP را نشان می دهد. مشاهده می شود که منحنیها به هذلولی نزدیک هستند که تاییدی بر این موضوع است که مقاومت فشاری فاکتوری تاثیرگذار و بحرانی برای مقاومت سایشی بتن است.



شکل (۲): ارتباط بین شاخص مقاومت سایشی با مقاومت فشاری در کلیه نمونه های بتنی آزمایش شده

ارتباط بین شاخص مقاومت سایشی و فشاری را به صورت رابطه (۲) می توان نشان داد:

$$I_a = \frac{f_{cu}}{\theta_1 f_{cu} + \theta_2} \quad (2)$$

که در آن  $I_a$  شاخص مقاومت سایشی بتن،  $f_{cu}$  مقاومت فشاری بتن بر حسب Mpa و  $\theta_1$  و  $\theta_2$  ثابتهایی هستند که از برازش منحنیها و بر اساس آنچه در جدول (۶) آمده استخراج می گردند.

جدول (۶): ضرایب رگرسیون رابطه (۲)



ضریب همبستگی $R^2$	$\theta_2$	$\theta_1$	شاخص مقاومت سایشی
۰/۶۷۶۲۵	۱۲۲/۸۶۷	-۱/۴۷۸۱۹	مقاومت سایشی سطحی
۰/۷۸۷۳۴	۸۱/۵۹۳۶	-۰/۹۴۳۰۹	مقاومت سایشی جانبی

#### ۴. نتایج

مقاومت سایشی بتن با افزایش ذرات نانو و الیاف PP افزایش می یابد. از طرفی شاخصهای مقاومت سایشی بتن با ذرات نانو خیلی بیشتر از بتن با الیاف PP است. بنابراین ذرات نانو جهت بالا بردن مقاومت سایشی مطلوبتر از الیاف PP هستند. افزایش میزان مقاومت سایشی بتن با ذرات نانو با افزایش بیش از حد ذرات نانو کاهش می یابد. مقاومت سایشی بتن با نانو  $TiO_2$  بهتر از بتن با همان مقدار نانو  $SiO_2$  است. مقاومت سایشی بتن با ذرات نانو با افزایش مقاومت فشاری، افزایش می یابد و این ارتباط خطی است. اساساً برای تمام بتن های مورد بررسی در این تحقیق، این ارتباط به منحنی های هذلولی نزدیک بود. بنابراین مقاومت سایشی بتن وابستگی شدیدی به مقاومت فشاری آن دارد.

#### ۵. مراجع

1. T.R. Naik, S.S. Singh, M.M. Hossain, "Abrasion Resistance of Concrete as Influenced by Inclusion of Fly Ash," *Cement Concrete Res.* 24 (2), 303-312, 1994.
2. C.D. Atis, "High Volume Fly Ash Abrasion Resistant Concrete," *J. Mater. Civil Eng.* 14 (3), 274-277, 2002.
3. T.R. Naik, S.S. Singh, M.M. Hossain, "Abrasion Resistance of High Strength Concrete Made With Class C Fly Ash," *ACI Mater. J.* 92 (6), 649-659, 1995.
4. O.E. Gjorv, T. Bearland, H.R. Ronning, "Abrasion Resistance of High Strength Concrete Pavements," *Concrete Int.* 45-48, Jan. 1990.
5. C.D. Atis, "Abrasion-Porosity-Strength Model for Fly Ash Concrete," *J. Mater. Civil Eng.* 15 (4), 408-410, 2003.
6. B.W. Langan, R.C. Joshi, M.A. Ward, "Strength & Durability of Concrete Containing 50% Portland Cement Replacement by Fly Ash and Other Materials," *Can. J. Civil Eng.* (17), 19-27, 1990.
7. A. Nanni, "Abrasion Resistance of Roller-Compacted Concrete," *ACI Mater. J.* 86 (53), 559-565, 1989.
8. M. Sadegzadeh, C.L. Page, R.J. Kettle, "Surface Microstructure and Abrasion Resistance of Concrete," *Cement Concrete Res.* 17 (4), 581-590, 1987.
9. C. Shuan-fa, Z. Deng-liang, Z. Jie, L. Feng, "The Study of the Road Performance of the Polypropylene Fiber Concrete," *Northeast Highway* 24 (2), 23-25, 2001.
10. L. Chen, S. Mindess, D.R. Morgan, et al., "Comparative Toughness Testing of Fiber Reinforced Concrete," *ACI*, pp. 47-75, 1995.
11. Z. Bing-qiang, Z. Qiang, "Study on the Application of Polypropylene Fiber Concrete in Water and Hydropower Project," *Water Res. Plan. Design* (1), 54-58, 2002.
12. H. Li, M. Zhang, J. Ou, "Abrasion Resistance of Concrete Containing Nano-Particles for Pavement," Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), Accepted 23 Aug. 2005.
13. H. Li, H.-g. Xiao, J.-p. Ou, "Microstructure of Cement Mortar with Nano-Particles," *Composites Part B: Eng.* (35) 185-189, 2004.