

## بررسی خواص مکانیکی و جذب آب بتن‌های با مقاومت بالا حاوی نانوسیلیس، میکروسیلیس، متاکائولن و پودر شیشه

شیوا توکلی<sup>۱</sup>، علی حیدری<sup>۲\*</sup>، محمدنوید مقیم<sup>۳</sup> و محمدرضا نیلفروشان<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> انشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهرکرد

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

<sup>۴</sup> دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهرکرد

heidari@eng.sku.ac.ir

**چکیده:** با توجه به کاربرد روز افزون بتن و سازه‌های بتنی و همچنین گسترش استفاده از افزودنی‌ها در بتن، انجام تحقیقات بر روی آنها از اهمیت خاصی برخوردار است. در این تحقیق با طراحی و ساخت بتن با مقاومت بالا حاوی نانو سیلیس، میکرو سیلیس، متاکائولن و پودر شیشه ضایعاتی، اثرات و خواص این مواد در بتن دارای سیمان تیپ ۲ مورد نقد و بررسی قرار گرفته است. خواص مکانیکی از قبیل مقاومت کششی و مقاومت خمشی در سن ۲۸ روز، مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز و جذب آب ۹۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج بدست آمده حاکی از بهبود مقاومت خمشی در اکثریت طرح‌ها و بهبود مقاومت فشاری بتن در طرح‌های حاوی نانوسیلیس و متاکائولن نسبت به نمونه شاهد می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که نانوسیلیس، میکروسیلیس، متاکائولن و پودر شیشه در تمامی درصدهای استفاده باعث کاهش جذب آب نسبت به نمونه شاهد شده‌اند. ضمناً با توجه به مسائل زیست محیطی و اقتصادی مرتبط با پودر شیشه، می‌توان از اثرات منفی این ماده در مقاومت فشاری بلند مدت بتن در موارد خاص صرف نظر کرد.

**کلمات کلیدی:** بتن با مقاومت بالا، نانوسیلیس، میکروسیلیس، متاکائولن، پودر شیشه ضایعاتی.

## Study of Mechanical Properties and Water Absorption of High-Strength Concretes Containing Nano-Silica, Micro-Silica, Metakaolin and Glass Powder

SH. Tavakoli, A. Heidari, M.N. Moghim and M.R. Nilforoushan

**Abstract:** Due to the wide spread using of concrete and concrete structures, as well as developing the use of additives in concrete, investigation in such area is very important. In this paper with the design and manufacture of high-strength concrete containing nano-silica, micro-silica, metakaolin and glass waste powder, the properties and effects of these materials when participate with cement type 2 reactions have been analyzed and criticized. Mechanical properties such as tensile strength and flexural strength at the age of 28 days, compressive strength at ages of 7, 28, 56 and 90 days and water absorption at the age of 90 days, have been examined. The obtained results indicate an improvement in the flexural strength of the majority of mix designs and also promote the compressive strength of mix designs containing nano-silica and metakaolin compared with control samples. The nano-silica, micro-silica, metakaolin and glass powder in all percentages caused to reduce water absorption relative to control sample. Due to the environmental and economic considerations associated with using glass powder in the aspect of long-term negative effects of this material on the compressive strength of concrete, its disadvantage is negligible.

**Keywords:** High Strength Concrete, Nano-Silica, Micro-Silica, Metakaolin, Waste Glass Powder.

## ۱ - مقدمه

خواص، کارایی و ویسکوزیته برای بتن با عملکرد بالا مفید واقع می‌شود [۲].

یکی از دلایل استفاده از میکروسیلیس در بتن، دستیابی به مقاومت‌های فشاری بالاتر است. تحقیقات گوناگون نشان‌دهنده آن است که متناسب با هر نسبت آب به مواد سیمانی، کاربرد میکروسیلیس بیش از یک مقدار مشخص، نه تنها باعث افزایش مقاومت فشاری بتن نخواهد شد، بلکه به عکس، کاهش مقاومت فشاری را نیز به همراه خواهد داشت. خاصیت پرکنندگی میکروسیلیس نیز باعث توزیع یکنواخت محصولات بدست آمده از هیدراتاسیون در مخلوط می‌گردد. در نهایت ترکیب دو خاصیت پرکنندگی و پوزولانی میکروسیلیس، در ایجاد یک جسم بسیار متراکم و کم تخلخل، خود را نشان می‌دهد [۳].

متاکائولن یک سیلیکات آلومینیوم فعال شده بصورت حرارتی است که از آگیری خاک رس کائولین در بازه دمای ۷۰۰-۸۵۰ درجه سانتیگراد حاصل می‌شود [۴-۶].

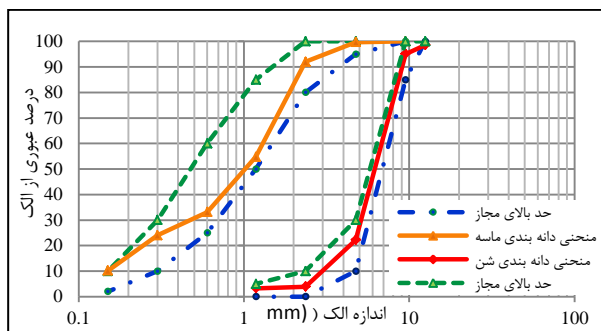
متاکائولن بیشترین تاثیر را در بتن و سیمان از طریق فعالیت بالای پوزولانی و قابلیت واکنش سریع با پرتلندایت آزاد شده طی واکنش‌های هیدراتاسیون سیمان و تشکیل ژل‌های C-S-H مانند می‌گذارد [۷-۹]. دلیل سرعت بالای واکنش‌های پوزولانی متاکائولن، ریزساختار غیر کریستاله و عملکرد ذرات متاکائولن بعنوان مراکز یا هسته‌های بلورهای پرتلندایت ذکر شده است. ظرفیت پوزولانی متاکائولن بدلیل نیاز زیاد این ماده به C-H برای تشکیل ژل‌های C-A-H بالا است. ذرات متاکائولن با توجه به اندازه کوچک در مقایسه با ذرات سیمان، فاصله بین ذرات سیمان و دیگر ذرات را پر کرده و باعث انسجام و چگال‌تر شدن ساختار خمیر و ناحیه انتقال و بهبود ساختار حفرات خواهند شد [۷-۱۰].

بطور کلی شیشه یک قلیایی غیرپایدار است که در محیط بتن می‌تواند باعث بوجود آمدن مشکلات ناشی از واکنش قلیایی-سیلیسی شود. در واقع شیشه به خاطر داشتن طبیعت غنی از سیلیس و ساختار غیر متبلور نسبت به حمله شیمیایی تحت شرایط قلیایی شدید حساس می‌باشد. این در حالی است که پودر شیشه می‌تواند انبساط ناشی از واکنش قلیایی-سیلیسی را در سنگدانه‌های حساس و شیشه‌های دانه‌ای متوقف کند. بنابراین شیشه می‌تواند به

هزینه‌های بالای انرژی مصرفی در تولید سیمان و آلاینده‌های ناشی از تولید این ماده که CO<sub>2</sub> از مهم‌ترین آنهاست، موجب تلاش‌های فراوانی برای کاهش میزان تولید سیمان و در نتیجه یافتن موادی برای جایگزینی هر چه بیشتر آن شده است؛ از طرفی گوناگونی سازه‌های بتنی و شرایط مختلف بهره‌برداری این سازه‌ها منجر به تولید بتن‌هایی با گستره وسیعی از مواد و مصالح شده است و تلاش بشر را برای یافتن مواد افزودنی و مواد جایگزین کارتر افزایش داده است. پوزولان‌ها گروهی از این مواد هستند که بسیاری از این تلاش‌ها بر روی آنها متمرکز شده است. امروزه پیشرفت شتابان و فزاینده تکنولوژی و دستیابی به نوآوری‌های روز افزون در زمینه مصالح ساختمانی، تولید "بتن توانمند" را میسر ساخته است. تولید این نوع بتن با استفاده از ماده افزودنی به همراه فوق روان کننده‌ها، استفاده از نسبت آب به مواد سیمانی و استفاده از پوزولان‌ها امکان پذیر است.

پوزولان به مواد سیلیسی یا سیلیسی آلومیناتی که به خودی خود ارزش چسبندگی ندارند، اما به شکل ذرات بسیار ریز و در مجاورت رطوبت در درجه حرارت معمولی با هیدروکسید کلسیم (در مجاورت آهک یا سیمان) واکنش شیمیایی ایجاد می‌کنند و ترکیباتی را به وجود می‌آورند که خاصیت سیمانی و چسبندگی دارند، می‌گویند [۱]. در این تحقیق از نانوسیلیس، میکروسیلیس و متاکائولن بعنوان ماده پوزولانی و پودر شیشه بعنوان افزودنی حاوی مقادیر بالای سیلیس جهت بررسی خاصیت پوزولانی و مقایسه این ماده با سایر پوزولان‌ها استفاده شده است.

نانوسیلیس یک پوزولان فعال محسوب می‌شود. نانوسیلیس به واسطه شکل و اندازه ذراتش یک پوزولان خیلی فعال و پرکننده‌ای بسیار موثر در بتن می‌باشد. سیلیس آمورف (غیر بلوری) موجود در نانوسیلیس می‌تواند با محصولات هیدراتاسیون وارد فعل و انفعالات شیمیایی شده و ساختار خمیر سیمان را اصلاح کند. در جریان هیدراتاسیون سیمان پرتلند، بخش زیادی از فعالیت پوزولانی نانوسیلیس باعث تبدیل کریستال‌های هیدروکسید کلسیم (که از هیدراتاسیون سیمان بوجود می‌آید) به ژل C-S-H (کلسیم سیلیکات هیدراته) می‌شود. این ماده از نقطه نظر



شکل ۱: منحنی دانه بندی مصالح سنگی مورد استفاده مطابق با استاندارد ASTM C33

جدول ۱: ترکیبات شیمیایی و خصوصیات فیزیکی سیمان تیپ ۲ شهرکرد

ترکیبات شیمیایی	<i>L.O.I</i>	$\leq 1.30$
	<i>SiO<sub>2</sub></i>	21.2–21.8
	<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	4.9–5.2
	<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	3.9–4.1
	<i>CaO</i>	64.6–64.9
	<i>MgO</i>	$\leq 1.7$
	<i>SO<sub>3</sub></i>	$\leq 2.0$
	<i>Cl</i>	$\leq 0.03$
	<i>C<sub>3</sub>A</i>	$\leq 7.5$
خواص فیزیکی	انبساط اتوکلاو، %	$\leq 0.15$
	بلین $cm^2/g$	$\geq 2900$

آب مورد استفاده در این مطالعه آب شرب شهر شهرکرد است. میزان pH، سولفات و کلرید این آب به ترتیب ۷/۸،  $29\text{ mg/lit}$ ،  $40\text{ mg/lit}$  می باشد. فوق روان کننده مورد استفاده نیز از یک شرکت داخلی خریداری شد که بر پایه پلی کربوکسیلات بوده و برخی از مشخصات آن عبارتند از: زرد رنگ، مایع، pH حدود ۵/۶، وزن مخصوص  $1/1\text{ g/cm}^3$  در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد، ماده یاد شده قابلیت انحلال در آب را دارد و کمتر از ۰/۱ درصد حاوی یون کلر است. نانوسیلیس مورد استفاده در ساخت نمونه های بتنی از شرکت آلمانی Degussa تهیه شده و محدوده اندازه ذرات آن در آزمایشگاه مواد و توسط آنالیز SEM تایید شده و مشخصات آن در جدول ۲ ارائه شده است.

سه صورت در بتن استفاده شود: درشت دانه، ریزدانه و پودر شیشه. استفاده از شیشه بصورت درشت دانه می تواند باعث واکنش قلیایی-سیلیسی در بتن شود. اما پودر شیشه می تواند اثر واکنش قلیایی-سیلیسی آن ها را کاهش دهد. در بعد تجاری بسیار به صرفه است که پودر شیشه به جای سیمان استفاده شود تا اینکه شیشه به عنوان سنگدانه در بتن مصرف گردد (پودر شیشه یک ماده با ارزش است که از شیشه هایی که برای بازیافت مناسب نیستند به دست می آید). [۱۱].

هدف از این تحقیق بررسی و مقایسه برخی خصوصیات مکانیکی و جذب آب نمونه های بتنی حاوی نانوسیلیس، میکروسیلیس، متاکائولن و پودر شیشه ضایعاتی در مقایسه با نمونه شاهد، فاقد این مواد، در بلند مدت می باشد.

## ۲- مصالح مورد استفاده

شن و ماسه مصرف شده در این طرح به ترتیب از نوع نخودی و ملاتی، تهیه شده از معادن شهر شهرکرد می باشد که برای جلوگیری از تغییر دانه بندی در حین انجام کار، کلیه مصالح مورد نیاز طرح در ابتدا، و بصورت یکجا دپو شده و آزمایش های مربوط به دانه بندی درشت دانه و ریزدانه روی آن ها انجام گرفت. با رسم منحنی دانه بندی ماسه مورد استفاده مشاهده شد که ماسه مصرفی در محدوده مجاز شناخته شده توسط استاندارد ASTM-C33 قرار می گیرد اما شن مصرفی در محدوده مجاز قرار نگرفت. بنابراین دانه بندی شن مصرفی ابتدا با توجه به استاندارد مذکور اصلاح و سپس مورد استفاده قرار گرفت. ماسه ملاتی دارای جذب آب ۱/۵ درصد و مدول نرمی ۲/۹ و شن نخودی دارای جذب آب ۰/۵ درصد می باشد. شکل ۱ منحنی دانه بندی شن و ماسه مصرفی را نشان می دهد. سیمان مورد استفاده در این پروژه، سیمان تیپ ۲ کارخانه سیمان شهرکرد می باشد که از بهترین محصولات کارخانه بوده، و بصورت یکجا تهیه و دپو شده است. ترکیبات شیمیایی و خصوصیات فیزیکی این سیمان در جدول ۱ ذکر شده است. این سیمان الزامات استاندارد ۳۸۹ ایران و ASTM را دارا است.

جدول ۴: آنالیز شیمیایی و خصوصیات فیزیکی متاکائولن خریداری شده از شرکت بین المللی آسان سرام

آنالیز شیمیایی	<i>L.O.I</i>	3.53
	<i>SiO<sub>2</sub></i>	52.8
	<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	36.3
	<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	4.21
	<i>CaO</i>	π 0.1
	<i>MgO</i>	0.81
	<i>K<sub>2</sub>O</i>	1.41
	<i>Na<sub>2</sub>O</i>	π 0.1
	<i>SO<sub>3</sub></i>	-
خواص فیزیکی	<i>SSA</i>	16.3 m <sup>2</sup> /g
	چگالی	2.629 g/cm <sup>3</sup>

برای پودر شیشه نیز از ضایعات شیشه‌های ساختمانی استفاده شده است. این شیشه‌ها توسط آسیاب‌های پیش رفته جت میل، آسیاب و بصورت ذرات ریزتر از الک ۲۰۰ در آورده شده‌اند. قسمتی از پودر شیشه‌های آماده شده به روش تر از الک ۳۲۵ عبور داده شدند و مشخص گردید که حدود ۹۰٪ این پودر شیشه‌ها از این الک نیز عبور می‌کنند. مشخصات شیمیایی پودر شیشه مصرفی در جدول ۵ قابل مشاهده است.

جدول ۵: آنالیز شیمیایی پودر شیشه مصرفی

آنالیز شیمیایی	<i>SiO<sub>2</sub></i>	72.42
	<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	1.44
	<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	0.07
	<i>CaO</i>	11.5
	<i>MgO</i>	0.32
	<i>K<sub>2</sub>O</i>	0.35
	<i>Na<sub>2</sub>O</i>	13.64
	<i>SO<sub>3</sub></i>	0.21
	<i>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	0.002

جدول ۲: آنالیز شیمیایی و خصوصیات فیزیکی نانوسیلیس ساخت شرکت Degussa آلمان

آنالیز شیمیایی	<i>SiO<sub>2</sub></i>	φ 99%
	<i>Ti</i>	π 100 ppm
	<i>Ca</i>	π 77 ppm
	<i>Na</i>	π 63 ppm
	<i>Fe</i>	π 20 ppm
خواص فیزیکی	<i>APS</i>	11-14 nm
	<i>SSA</i>	190-685 m <sup>2</sup> /g
	چگالی ظاهری	π 0.11 g/cm <sup>3</sup>
	چگالی واقعی	2.2 g/cm <sup>3</sup>

میکروسیلیس و متاکائولن مورد استفاده در ساخت نمونه‌های بتنی تولید داخل کشور می‌باشند و به ترتیب از کارخانه فروآلیاژ اژنا و شرکت بین المللی آسان سرام تهیه شدند. مشخصات آنها بترتیب در جدول ۳ و ۴ ارائه شده است.

جدول ۳: آنالیز شیمیایی و خصوصیات فیزیکی میکروسیلیس تولید کارخانه فروآلیاژ اژنا

آنالیز شیمیایی	<i>SiO<sub>2</sub></i>	93.6%
	<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	1.32%
	<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	0.37%
	<i>CaO</i>	0.49%
	<i>MgO</i>	0.97%
	<i>K<sub>2</sub>O</i>	1.01%
	<i>Na<sub>2</sub>O</i>	0.31%
	<i>SO<sub>3</sub></i>	0.1%
	<i>Cl</i>	0.04%
	<i>C</i>	0.3%
خواص فیزیکی	<i>SiC</i>	0.5%
	<i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i>	0.16%
	<i>APS</i>	0.15 micron
	<i>SSA</i>	20 m <sup>2</sup> /g
	چگالی	0.3-0.7 g/cm <sup>3</sup>

بررسی خواص مکانیکی و جذب آب ...

لازم به ذکر است که آزمایش تعیین مقاومت کششی نمونه-های استوانه‌ای بصورت تست برزیلی صورت می‌پذیرد.



شکل ۳: عمل آوری نمونه‌های بتنی در شرایط محیط غرقاب و خشک

پس از تهیه مصالح و تعیین مشخصات مورد نیاز، طرح اختلاط بتن شاهد (بتن بدون افزودنی با نسبت آب به سیمان  $(W/C=0.37)$  در نظر گرفته شد. در بتن‌های طرح‌های بعدی که با افزودنی می‌باشد، نانوسیلیس با سه درصد  $0/5$ ،  $0/8$  و  $1/2$  و میکروسیلیس، متاکائولن و پودر شیشه ضایعاتی با سه درصد  $5$ ،  $10$  و  $15$  جایگزین سیمان گردیده است. درصد‌های جایگزینی بر اساس مطالعات پیشین سایر محققین در این زمینه صورت گرفته است. در تمامی موارد فوق روان کننده به جهت افزایش روانی بتن به طرح اضافه شده است. شرح ویژگی‌های طرح‌های ساخته شده در این پژوهش در جدول ۶ ارائه شده است.

#### ۴- نتایج آزمایش‌ها

در جدول ۷ نتایج مربوط به اسلامپ و وزن مخصوص بتن تازه برای کلیه طرح‌ها ارائه شده است. همچنین نتایج آزمون‌های مقاومت کششی و خمشی به ترتیب در شکل ۴ و ۵ ارائه شده است. نحوه نامگذاری طرح‌ها نیز دارای ترتیب خاصی است، عدد اول نوشته شده برای هر طرح نشانه‌ی سن نمونه بوده است. حرف میانی نشان‌دهنده‌ی



شکل ۲: ساخت انواع نمونه‌های مکعبی، منشوری و استوانه‌ای

#### ۳- ساخت، عمل آوری و آماده‌سازی نمونه‌ها

به منظور تعیین مقاومت فشاری، نسبت به ساخت نمونه-های مکعبی به ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  سانتی‌متر (برای سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز) اقدام می‌گردد. همچنین برای انجام آزمایش مقاومت خمشی طبق استاندارد ASTM D790، نمونه‌های منشوری به ابعاد  $4 \times 4 \times 16$  سانتی‌متر (برای سن ۲۸ روز) و برای انجام آزمایش مقاومت کششی بر اساس استاندارد ASTM C496، نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر (برای سن ۲۸ روز) مورد استفاده قرار می‌گیرند. جهت انجام آزمایش جذب آب مطابق با استاندارد ASTM C642 نیز از نمونه‌های مکعبی مشابه (برای سن ۹۰ روز) استفاده می‌گردد. شکل ۲ ساخت انواع نمونه‌های مکعبی، منشوری و استوانه‌ای را جهت انجام آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهد.

برای کلیه طرح‌ها پس از ساخت مخلوط بتن، میزان اسلامپ و وزن مخصوص بتن تازه اندازه‌گیری می‌شود. مخلوط‌های بتنی بر طبق استاندارد ASTM C192 در میکسر ۱۲۰ لیتری مخلوط می‌شوند. پس از ریختن بتن در قالب‌های از پیش تهیه شده، قالب‌ها به مدت ۲۴ ساعت در یک درجه حرارت و رطوبت ثابت در مکانی نگهداری شده و پس از گذشت زمان مذکور نمونه‌های سخت شده در حوضچه آب با دمای ۲۰ درجه سانتیگراد قرار داده می‌شوند. برای کلیه نمونه‌های مکعبی، عمل آوری بمدت ۲۸ روز در شرایط محیط غرقاب انجام می‌گردد و پس از آن نمونه‌ها از آب خارج شده و در محیط خشک عمل آوری می‌شوند. نمونه‌های استوانه‌ای و خمشی نیز بمدت ۷ روز در شرایط محیط غرقاب عمل آوری می‌شوند و پس از آن از آب خارج شده و تا رسیدن زمان موعود (۲۸ روز) در محیط خشک عمل آوری می‌شوند. شکل ۳ عمل آوری نمونه‌های بتنی در شرایط محیط غرقاب و خشک را نشان می‌دهد.

جدول ۶: مشخصات طرح‌های ساخته شده این پژوهش

طرح	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	نانوسیلیس (kg/m <sup>3</sup> )	میکروسیلیس (kg/m <sup>3</sup> )	متاکائولن (kg/m <sup>3</sup> )	پودر شیشه (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )	شن (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	فوق روان کننده (% از سیمان)
SH	570	-	-	-	-	211	724	836	0.59
N0.5	567.1	2.9	-	-	-	211	724	836	0.63
N0.8	565.4	4.6	-	-	-	211	724	836	0.77
N1.2	563.2	6.8	-	-	-	211	724	836	0.97
M5	541.5	-	28.5	-	-	211	724	836	0.59
M10	513	-	57	-	-	211	724	836	0.59
M15	584.5	-	85.5	-	-	211	724	836	0.59
MK5	541.5	-	-	28.5	-	211	724	836	0.59
MK10	513	-	-	57	-	211	724	836	0.59
MK15	484.5	-	-	85.5	-	211	724	836	0.59
G5	541.5	-	-	-	28.5	211	724	836	0.59
G10	513	-	-	-	57	211	724	836	0.59
G15	484.5	-	-	-	85.5	211	724	836	0.59

جدول ۷: نتایج مربوط به آزمون اسلامپ و وزن مخصوص بتن تازه برای کلیه طرح‌ها

طرح	اسلامپ (cm)	وزن مخصوص بتن تازه (kg/m <sup>3</sup> )
SH	10.5	2347
N0.5	1.4	2420
N0.8	0.8	2440
N1.2	0.5	2400
M5	10	2364
M10	9.1	2365
M15	6.1	2362
MK5	7.1	2354
MK10	2.1	2356
MK15	0.8	2350
G5	7.8	2460
G10	8	2440
G15	8.7	2400

ضمناً وزن مخصوص بتن تازه در طرح‌های حاوی نانوسیلیس و پودر شیشه بیشتر از سایر طرح‌ها است. با توجه به اینکه این مواد دارای سطح ویژه بالایی هستند و تا حدود زیادی ریز هستند، به نظر می‌رسد که توانسته‌اند با پر کردن ریز حفره‌های بتن، بتن توپرتری را تولید نمایند که این قضیه باعث بالا رفتن وزن مخصوص بتن شده است. با این حال با توجه به اینکه مقدار اختلاف کم است، نمی‌توان نتیجه‌گیری قطعی نمود.

افزودنی موجود در بتن می‌باشد. اگر این حرف N باشد، نشان‌دهنده حضور نانوسیلیس در بتن، اگر M باشد، نشان‌دهنده حضور میکروسیلیس در بتن، اگر MK باشد، نشان‌دهنده حضور متاکائولن در بتن، اگر G باشد، نشان‌دهنده حضور شیشه در بتن و چنانچه SH باشد، نشان‌دهنده طرح شاهد (بدون افزودنی) می‌باشد. عدد انتهایی نیز نشان‌دهنده درصد وزنی ماده افزودنی نسبت به وزن سیمان می‌باشد. همانطور که از جدول ۷ مشاهده می‌گردد، با وجود استفاده از فوق روان کننده در کلیه طرح‌های حاوی نانوسیلیس، میکروسیلیس و متاکائولن روانی بتن کاهش یافته است. عبارتی هر چه درصد استفاده از این سه پوزولان افزایش یافته، روانی بتن کمتر شده است. این در حالی است که استفاده از پودر شیشه در بتن باعث افزایش روانی بتن شده است. با این حال با افزایش درصد استفاده از پودر شیشه، روانی بتن به میزان ناچیزی افزایش یافته است. با این حال میزان اسلامپ در کلیه طرح‌ها کمتر از نمونه شاهد (بدون افزودنی) است. بنابراین برای استفاده از این مواد در بتن استفاده از فوق روان کننده جهت افزایش روانی و کارایی بتن توصیه می‌شود. همچنین مشاهده می‌گردد در طرح‌های حاوی نانوسیلیس اگرچه میزان فوق روان کننده مصرفی بیشتر از سایر طرح‌ها بوده، اما میزان اسلامپ همچنان کم است.

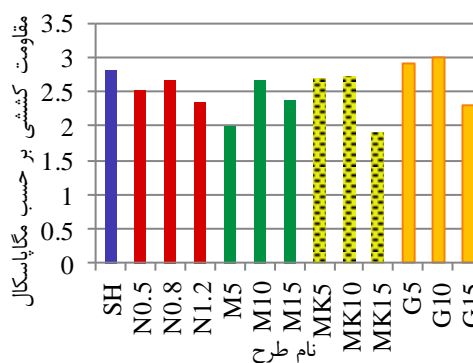
بررسی خواص مکانیکی و جذب آب ...

استفاده از نانوسیلیس، میکروسیلیس، متاکائولن و پودر شیشه در بتن، در اغلب حالات تا سن ۲۸ روز بر بهبود مقاومت کششی موثر نیستند، درحالیکه در اغلب حالات می‌توانند مقاومت خمشی را بهبود بخشند یا لااقل به نسبت نمونه شاهد، تغییرات منفی ناچیزی داشته باشند.

با توجه به اینکه اختلاف اعداد در مقاومت کششی و خمشی نسبت به طرح شاهد کم بوده است و این تفاوت ناچیز با این تعداد طرح قابل تعمیم به کل نیست، این مورد می‌تواند ناشی از خطای دستگاه و آزمایش ایجاد شده باشد. ضمناً این امکان وجود دارد که رفتار بتن در کشش و خمش متفاوت از رفتار آن در فشار بوده باشد و شکست به علت نقص در مشخصات دیگر بتن به وجود آمده باشد که باید در مطالعات آینده بررسی شود.

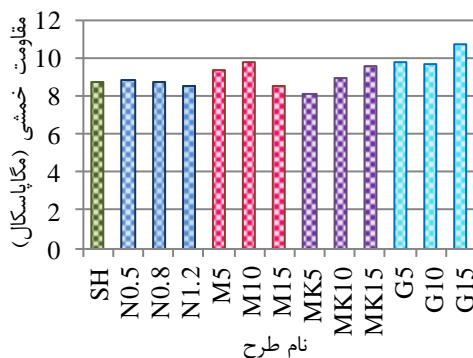
در شکل ۶ نتایج مربوط به آزمون مقاومت فشاری برای سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز ارائه شده است. همانطور که از شکل ۶ مشخص می‌باشد، طرح‌های حاوی ۰/۵ و ۰/۸ درصد نانوسیلیس و ۱۰ درصد متاکائولن نسبت به طرح شاهد و سایر طرح‌های دیگر بیشترین مقاومت فشاری را در سنین ۹۰ روز کسب کرده‌اند. نانوسیلیس یک پوزولان فعال محسوب می‌شود و به واسطه شکل و اندازه ذراتش یک پوزولان خیلی فعال و پرکننده‌ای بسیار موثر در بتن می‌باشد. تفاوت اصلی بین نانوسیلیس با سایر پوزولان‌ها در این است که فعالیت پوزولانی نانوسیلیس سریع‌تر از سایر پوزولان‌ها قابل حصول است. بنابراین در سنین پایین (۷ روزه) نانوسیلیس در طرح‌های حاوی آن، بر خلاف سایر افزودنی‌ها سریعاً وارد واکنش شده و مقاومت بیشتری را به نسبت طرح‌های دیگر در سنین پایین‌تر کسب می‌کند. با گذشت زمان از فعالیت نانوسیلیس کاسته می‌شود.

این در حالی است که در طرح‌های حاوی متاکائولن، فعالیت پوزولانی در سنین پایین‌تر کم و بتدریج در سنین بالاتر افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در پروژه‌هایی که مقاومت نهایی مهم و تعیین کننده است، استفاده از متاکائولن با توجه به هزینه کمتر آن به نسبت هزینه فعلی نانوسیلیس در کشور سودمندتر خواهد بود. به این ترتیب چنین به نظر می‌رسد که متاکائولن با مصرف بلورهای پرتلنادیت، بویژه در ناحیه انتقال، باعث بهبود ساختار بتن و در نتیجه افزایش مقاومت می‌شود.



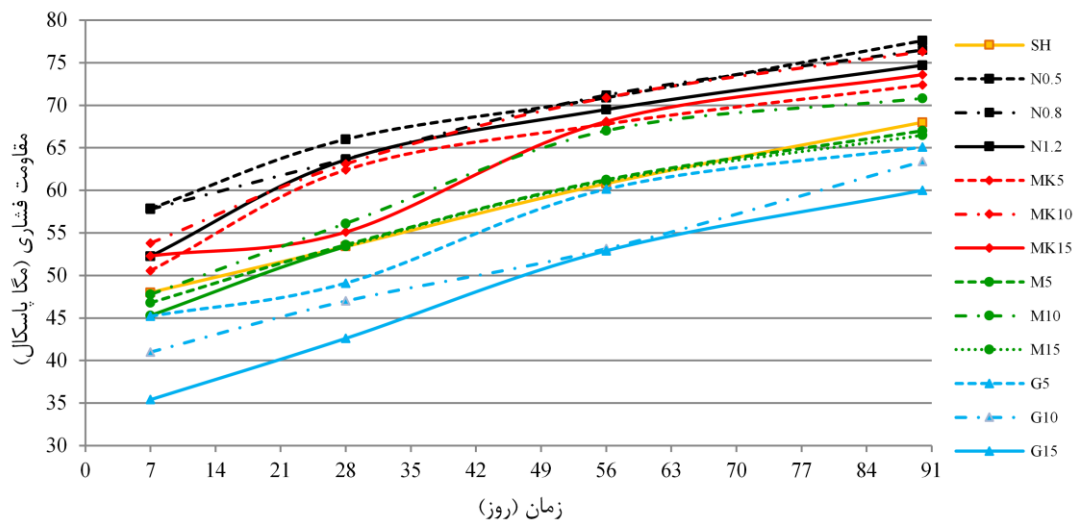
شکل ۴: نتایج آزمون‌های مقاومت کششی (MPa)

همانطور که از شکل ۴ مشخص است، کلیه مقاومت‌های کششی بدست آمده از طرح‌های همراه با نانوسیلیس، میکروسیلیس و متاکائولن کمتر از طرح شاهد (بدون افزودنی) می‌باشد. این در حالی است که در طرح حاوی ۵ و ۱۰ درصد پودر شیشه بهبود مقاومت کششی جزئی را شاهد هستیم. در طرح‌های حاوی نانوسیلیس طرح 28N0.8، در طرح‌های حاوی میکروسیلیس طرح 28M10، در طرح‌های حاوی متاکائولن طرح 28G10 بیشترین و در طرح‌های حاوی پودر شیشه طرح 28G10 بیشترین مقاومت کششی را نتیجه داده است.



شکل ۵: نتایج آزمون‌های مقاومت خمشی (MPa)

شکل ۵ نیز نشان می‌دهد که در طرح‌های حاوی نانوسیلیس طرح 28N0.5، در طرح‌های حاوی میکروسیلیس طرح 28M10، در طرح‌های حاوی متاکائولن طرح 28MK15 و در طرح‌های حاوی پودر شیشه طرح 28G15 بیشترین مقاومت خمشی را نتیجه داده است. از اطلاعات بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که



شکل ۶: نتایج آزمون‌های مقاومت فشاری (MPa)

در طرح‌های حاوی نانوسیلیس، طرح N0.5 مقاومت فشاری بیشتری را نسبت به دو طرح دیگر کسب کرده است. اگرچه مقاومت دو طرح دیگر نزدیک به مقاومت طرح N0.5 است، اما این امر نشان می‌دهد افزودن نانوسیلیس از یک محدوده‌ای به بعد در بهبود مقاومت فشاری چندان موثر نخواهد بود و حتی نتیجه عکس خواهد داشت. این موضوع با توجه عدم تولید انبوه نانوسیلیس در کشور و قیمت آن اهمیت پیدا می‌کند. در طرح‌های حاوی متاکائولن و میکروسیلیس نیز مشاهده می‌گردد که درصد جایگزینی ۱۰٪ این مواد با سیمان نتیجه بهتری را در زمینه مقاومت فشاری بدست می‌دهد و افزایش این درصد به مقادیر بالاتر تاثیرات معکوسی را در مقاومت فشاری به همراه خواهد داشت. در طرح‌های حاوی پودر شیشه نیز طرح G5 نتیجه بهتری را در زمینه مقاومت فشاری بدست داده است. اما با توجه به اینکه پودر شیشه مصرفی از ضایعات شیشه تهیه شده و به لحاظ اقتصادی و زیست محیطی سودمند می‌باشد، می‌توان از اختلاف ناچیز بین مقاومت فشاری ۹۰ روزه طرح G5 و G10 صرف نظر کرد. استفاده از پودر شیشه ضایعاتی به تنهایی به میزان ۱۰ درصد سیمان گاه تا میزان ۷/۲ درصد سبب کاهش مقاومت فشاری می‌شود، ولی با توجه به اثرات مفید زیست

اما چنانچه در پروژه‌های افزایش مقاومت در سنین کم مد نظر باشد، نانوسیلیس بعنوان یک پوزولان فعال پیشنهاد می‌گردد.

در طرح‌های حاوی میکروسیلیس، مقاومت‌های فشاری ۷ روزه کمتر از مقاومت فشاری طرح شاهد می‌باشد. این در حالی است که در نتایج مقاومت‌های ۲۸ روزه مشاهده می‌شود که طرح‌های حاوی میکروسیلیس مقاومتی برابر یا بیشتر طرح شاهد را کسب کرده‌اند. این امر بدان علت است که میکروسیلیس به نسبت متاکائولن و نانوسیلیس دیرتر وارد واکنش می‌شود. از این پس انتظار می‌رفت که روند افزایش مقاومت در طرح‌های حاوی میکروسیلیس ادامه داشته باشد و مقاومتی بهتر از مقاومت فشاری طرح شاهد را در سنین بالاتر کسب کنند. اما این امر جز در طرح M10 محقق نشد. استفاده از میکروسیلیس به میزان ۱۰ درصد وزنی سیمان سبب افزایش مقاومت فشاری تنها به میزان ۴ درصد نسبت به طرح شاهد شده است. این امر ممکن است بدلیل نامرغوب بودن میکروسیلیس مصرفی و یا عدم تطابق مشخصات ارائه شده از سوی کارخانه با مشخصات میکروسیلیس مصرفی رخ داده باشد. در طرح‌های حاوی پودر شیشه نیز مقاومت‌ها در همه سنین پایین‌تر از طرح شاهد می‌باشد.



شاهد شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌کنید، کمترین میزان جذب آب در طرح‌های حاوی نانوسیلیس طرح N12، در طرح‌های حاوی میکروسیلیس طرح M15 (میزان جذب آب تقریباً مشابه طرح M10) در طرح‌های حاوی متاکائولن طرح MK15 و در طرح‌های حاوی پودر شیشه ضایعاتی طرح G5 می‌باشد. لازم به ذکر است که درصد جذب آب در طرح‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد پودر شیشه ضایعاتی دارای دامنه تغییرات بسیار جزئی است. تحقیقات و تجربیات اجرایی در سال‌های اخیر نشان داده است که استفاده از پوزولان‌های مختلف با توجه به واکنش‌های شیمیایی انجام شده در بتن و همچنین کاهش حرارت هیدراتاسیون و به تبع آن کاهش ترک‌های ریز سطحی باعث کاهش جذب آب در بتن می‌گردند. به طور کلی در این پژوهش نانو سیلیس توانسته است با ساختار خود و انجام واکنش در بتن و پر کردن خلل و فرج داخلی بتن مقدار کاهش جذب آب را افزایش دهد. کاهش میزان جذب آب در نمونه‌های بتنی ساخته شده سبب دوام هرچه بیشتر این نمونه‌ها در طولانی مدت می‌گردد.

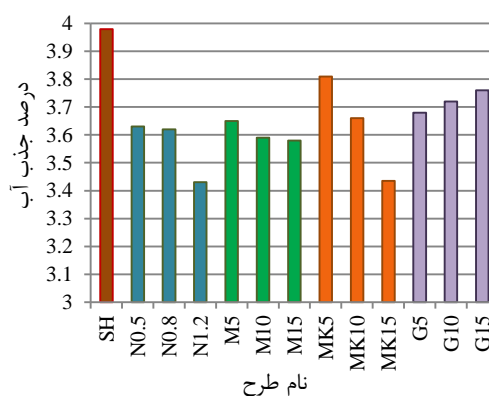
## ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق با طراحی و ساخت بتن با مقاومت بالا حاوی نانوسیلیس، میکروسیلیس، متاکائولن و پودر شیشه ضایعاتی، اثرات این مواد بر خواص مکانیکی (از قبیل مقاومت فشاری، خمشی و کششی) و جذب آب در سنین مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل گشت:

- با وجود استفاده از فوق روان کننده در کلیه طرح‌های حاوی نانوسیلیس، میکروسیلیس و متاکائولن روانی بتن کاهش یافته است. بعبارتی هر چه درصد استفاده از این سه پوزولان افزایش یافته، روانی بتن کمتر شده است. برای استفاده از این مواد در بتن استفاده از فوق روان کننده جهت افزایش روانی و کارایی بتن توصیه می‌شود.
- استفاده از پودر شیشه در بتن باعث افزایش روانی بتن شده است. با این حال با افزایش درصد استفاده از پودر شیشه، روانی بتن به میزان ناچیزی افزایش یافته است. با این حال میزان اسلامپ در کلیه طرح‌ها کمتر از نمونه شاهد (بدون افزودنی) است.

محیطی و اقتصادی می‌توان از این کاهش در موارد خاص صرف نظر کرد. اگرچه این کاهش در مقاومت فشاری را می‌توان با استفاده از افزودنی‌های دیگر به مراتب جبران نمود.

در شکل ۷ می‌توانید درصد جذب آب مربوط به کلیه طرح‌ها را مشاهده نمایید. جذب آب یکی از مشخصات بتن است که بیانگر خصوصیات ریز ساختار آن از لحاظ خلل و فرج و پیوستگی آنها با هم است. اکثر واکنش‌های مخربی که در بتن به مرور زمان اتفاق می‌افتد به علت نفوذ آب است و همواره آب یک عامل آغاز کننده یا تسریع کننده واکنش‌های مخرب در بتن بوده است. برای جذب آب بلند مدت، نمونه‌های بتنی مکعبی پس از عمل‌آوری ۹۰ روزه به مدت ۷۲ ساعت در آون با دمای  $5 \pm 10.5$  درجه سانتی‌گراد قرار داده شده‌اند. پس از گذشت این مدت، نمونه‌ها از آون خارج و پس از خنک شدن در آب تمیز قرار گرفتند. نمونه‌ها در زمان‌های ۲۴ ساعت، ۴۸ ساعت و ۷۲ ساعت از آب خارج شده و در حالت اشباع با سطح خشک وزن شده‌اند. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش و تفاضل‌های وزن خشک و مرطوب، درصد جذب آب نمونه‌ها محاسبه شده است. نتایج جذب آب ۴۸ و ۷۲ ساعته بسیار بهم نزدیک بوده‌اند، لذا پس از ۷۲ ساعت نتایج جذب این زمان برای نمونه‌ها ثبت شده است.



شکل ۷: درصد جذب آب مربوط به کلیه طرح‌ها

همان طور که از نتایج مشخص است نانوسیلیس، میکروسیلیس، متاکائولن و پودر شیشه ضایعاتی در همه درصد‌های استفاده باعث کاهش جذب آب نسبت به طرح

مقاومت فشاری می‌شود، ولی با توجه به اثرات مفید زیست محیطی و اقتصادی می‌توان از این کاهش در موارد خاص صرف نظر کرد. اگرچه این کاهش در مقاومت فشاری را می‌توان با استفاده از افزودنی‌های دیگر به مراتب جبران نمود.

• نانوسیلیس، میکروسیلیس، متاکائولن و پودر شیشه ضایعاتی در همه درصدهای استفاده باعث کاهش جذب آب نسبت به طرح شاهد شده‌اند.

• کمترین میزان جذب آب در طرح‌های حاوی نانوسیلیس طرح N12 با ۱۳/۸ درصد کاهش جذب آب، در طرح‌های حاوی میکروسیلیس طرح M10 و M15 به ۱۰ به ترتیب با ۹/۸ و ۱۰ درصد کاهش جذب آب، در طرح‌های حاوی متاکائولن طرح MK15 با ۱۳/۷ درصد کاهش جذب آب و در طرح‌های حاوی پودر شیشه ضایعاتی طرح G5 با ۷/۵ درصد کاهش جذب آب می‌باشد.

## مراجع

[1] ASTM C 618; *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use a mineral admixture in concrete*, 2003.

[۲] مقصودی، علی اکبر؛ احمدی مقدم، حامد؛ "کاربرد نانو ذرات و اثرات آن بر خواص سازه های بتنی آبی حاوی پوزولان"، نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه با هنر کرمان، کرمان، ایران، ۱۳۸۶.

[۳] مستوفی نژاد، داوود؛ میرطلایی، کمال؛ صادقی، مرتضی؛ "بررسی مقاومت فشاری بتن حاوی سرباره و میکروسیلیس"، مجله بین المللی علوم مهندسی، جلد ۱۳، شماره ۲، ص ۱۱۷ تا ۱۳۲، ۱۳۸۱.

[4] Kostuch, J. A.; Walters, V.; Jones, T. R.; "High Performance Concretes Incorporating Metakaolin: A Review", *Concrete 2000: Economic and Durable Concrete through Excellence*, R. K. Dhir and M. R. Jones, eds., E&FN Spon, London, 2000, p.p. 1799-1811.

[5] Sabir, B.; Wild, S.; Khatib, J.; "Workability and strength development of metakaolin concrete", *International Congress on Concrete in the service of Mankind, Concrete for Environment Enhancement and Protection, Theme 6, Waste Materials and Alternative Products*, University of Dundee (R.KDhir and D.T. Dyer, editors). Spon, London, 1996, p.p. 651-662.

• استفاده از نانوسیلیس، میکروسیلیس، متاکائولن و پودر شیشه در بتن، در اغلب حالات تا سن ۲۸ روز بر بهبود مقاومت کششی موثر نیستند درحالیکه در اغلب حالات می‌توانند مقاومت خمشی را بهبود ببخشند یا لااقل به نسبت نمونه شاهد، تغییرات منفی ناچیزی داشته باشند.

• استفاده از نانوسیلیس به میزان ۰/۵، ۰/۸ و متاکائولن به میزان ۱۰ درصد وزنی سیمان به ترتیب سبب افزایش مقاومت فشاری به میزان ۱۴، ۱۲/۵ و ۱۲/۲ درصد نسبت به طرح شاهد شده است. این طرح‌ها بیشترین مقاومت فشاری را در سنین ۹۰ روز نسبت به طرح شاهد و سایر طرح‌های دیگر کسب کرده‌اند.

• تفاوت اصلی بین نانوسیلیس با سایر پوزولان‌ها در این است که فعالیت پوزولانی نانوسیلیس سریع‌تر از سایر پوزولان‌ها قابل حصول است. بنابراین در سنین پایین (۷ روزه) نانوسیلیس در طرح‌های حاوی آن، بر خلاف سایر افزودنی‌ها سریعاً وارد واکنش شده و مقاومت بیشتری را به نسبت طرح‌های دیگر در سنین پایین ترکسب می‌کند. با گذشت زمان از فعالیت نانوسیلیس کاسته می‌شود. این در حالی است که در طرح‌های حاوی متاکائولن، میکروسیلیس و پودر شیشه فعالیت پوزولانی در سنین پایین تر کم و بتدریج در سنین بالاتر افزایش می‌یابد.

• در طرح‌های حاوی میکروسیلیس انتظار می‌رفت که روند افزایش مقاومت پس از سن ۲۸ روز ادامه داشته باشد و طرح‌های حاوی این ماده، مقاومتی بهتر از مقاومت فشاری طرح شاهد را در سنین بالاتر کسب کنند. اما این امر جز در طرح M10 محقق نشد. این امر ممکن است بدلیل نامرغوب بودن میکروسیلیس مصرفی و یا عدم تطابق مشخصات ارائه شده از سوی کارخانه با مشخصات میکروسیلیس مصرفی رخ داده باشد.

• در طرح‌های حاوی نانوسیلیس طرح حاوی ۰/۵ درصد جایگزینی نانوسیلیس با سیمان و در طرح‌های حاوی میکروسیلیس و متاکائولن جایگزینی ۱۰٪ این مواد با سیمان نتیجه بهتری را در زمینه مقاومت فشاری بدست می‌دهد و افزایش این درصد به مقادیر بالاتر تاثیرات معکوسی در مقاومت فشاری را به همراه خواهد داشت.

• استفاده از پودر شیشه ضایعاتی به تنهایی به میزان ۱۰ درصد سیمان گاه‌ها تا میزان ۷/۲ درصد سبب کاهش

- [6] Ambroise, J.; Maximillen, S.; Pera, J.; "Properties of metakaolin blended cements", *Adv Cem Mat.*, **1994**, Vol. 1, No. 4, p.p. 161-168.
- [7] Wild, S.; Khatib, J. M.; Jones, A.; "Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete", *Cement and Concrete Research*, **1996**, Vol. 26, No. 10, p.p. 1537-1544.
- [8] Zhang, M. H.; Malhotra, V. M.; "Characteristics of a thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete", *Cement and Concrete Research*, **1995**, Vol. 25, No. 8, p.p. 1713-1725.
- [9] Kim, H. S.; Lee, S. H.; Moon, H. Y.; "Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin", *Construction and Building Materials*, **2007**, Vol. 21, No. 6, p.p. 1229-1237.
- [10] Curcio, F.; DeAngelis, B. A.; Pagliolico, S.; "Metakaolin as a pozzolanic microfiller for high performance mortars", *Cement and Concrete Research*, **1998**, Vol. 28, No. 6, p.p. 803-809.
- [۱۱] رستمی، وحید؛ لطفی، کیارض؛ "بررسی تأثیر ضایعات پودر شیشه با دانه بندی مختلف بر مقاومت بتن"، سومین کنفرانس ملی عمران شهری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج، سنندج، ایران، ۱۳۹۰.

