

مروری بر تاثیر نانو ذرات بر دوام و خواص مکانیکی بتن

مسعود ذبیحی سامانی^۱، ناصر روحی^۲

^۱گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، واحد پرند، دانشگاه آزاد اسلامی، پرند، ایران

نام و نشانی ایمیل نویسنده مسئول:

مسعود ذبیحی سامانی

zabihi@piaou.ac.ir

چکیده

امروزه رویکرد پایداری بتن با دوام و خواص مکانیکی بهتر، به دلایل مختلفی، یکی از مباحث مهم و کاربردی مهندسی عمران به شمار می رود و با توجه به بالا بودن هزینه های ساخت و ساز و اهمیت حفظ بناهای احداث شده، از روش های نوینی در این زمینه مورد استفاده قرار می گیرد. یکی از این روش ها، استفاده از نانو ذرات در بتن می باشد. هدف این مطالعه بررسی تاثیر نانو مواد بر دوام و خواص مکانیکی بتن و در نهایت تولید بتن با عملکرد بالا می باشد. که به منظور درک میزان این تاثیر، آزمایشات مختلفی از جمله: تعیین مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، نفوذپذیری یون کلراید و ضریب انتشار و انتقال آن در آزمون های بتنی حاوی نانو مواد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجزیه و تحلیل این داده ها، نشان داد که استفاده از نانو مواد اثر مثبت قابل ملاحظه ای روی عملکرد و کارایی بتن می گذارد.

واژگان کلیدی: نانو ذرات، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، نفوذپذیری یون کلراید، کارایی بتن.

مقدمه

نانوتکنولوژی رشته جدیدی نیست بلکه به معنی رویکرد جدید در تمام رشته ها است که چشم اندازی جدید از تولید درمقیاس نانو را با خواص و چیدمان اتمی در اختیار ما قرار می دهد. یک نانو ذره، دارای یک ساختار آمورف یا نیمه بلوری است که حداقل یک بعد آن بین ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر بوده و پراکندگی ابعادی نسبتاً زیادی، مثلاً بیش از ۱۵ درصد داشته باشد. با توسعه نانوتکنولوژی در صنایع مختلف، توجه به کاربردهای این علم در قلمرو بتن هم مورد توجه قرار گرفت. نانو ذرات به دلیل اندازه بسیار کوچک دانه ها نسبت به مواد و مصالح مشابه، می توانند با پر کردن حفرات موجود در بتن، نقش بسیار موثری در بهبود خواص بتن داشته باشند [1]. تاکنون در صنعت ساختمان در حوزه های وسیعی، از تولید شیشه های هوشمند گرفته تا تولید سطوح آنتی باکتریال، سطوح خود تمیز شونده، سطوح با قابلیت خود ترمیم شوندگی و تولید بتن با عملکرد بالا کاربرد پیدا کرده است. بطور کلی بتن از مواد ساخته دست بشر ساخته می شود و به علت داشتن ساختار متخلخل در محیط های فرسایشی به ورود مایعات و یون های مهاجم آسیب پذیر است. در سال های اخیر استفاده از فناوری نانو در جهت بهبود خواص بتن سیر صعودی داشته است. امروزه از این فناوری برای تولید بتن با عملکرد بالا استفاده می شود. استفاده از این نوع بتن ها در حوزه مهندسی ساختمان به طور مستمر توسعه یافته است. هدف از پژوهش حاضر بررسی و مقایسه عملکرد بتن حاوی نانو ذرات با بتن های بدون این مواد است. در این مطالعه از چهار پژوهش استفاده گردید که به شرح زیر می باشد. سالوما و همکاران [2]، پژوهشی در زمینه ی بهبود دوام بتن بوسیله ی نانوموادها انجام دادند. نتایج تحلیل آزمایش ها نشان داد با افزودن نانوسیلیس دوام بتن افزایش می یابد. شکاری و رزاقی [3]، در مقاله ای به بررسی تاثیر نانو ذرات بر روی دوام و خواص مکانیکی بتن با عملکرد بالا پرداختند. همه ی نانوذرات بخصوص نانوالومینیوم (NA)، باعث بهبود دوام و خواص مکانیکی بتن با عملکرد بالا می گردند. انورمحمد [4]، تحقیق گسترده ای روی تاثیر نانو مواد بر رفتار خمشی و مقاومت فشاری بتن انجام داد که طی آن تاثیر نانوذرات در ۲۴ نوع طرح اختلاط مورد بررسی قرار گرفت. هونگجیان و همکاران [5] اثر نانو سیلیس بر روی دوام و کارایی بتن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشات حاکی از تاثیر مثبت نانوسیلیس بر مقاومت فشاری، خمشی و کاهش نفوذپذیری بتن می باشد.

۱. مواد و مصالح استاندارد مورد استفاده در طرح ها

طرح ۱: نانو روی (NZ)، نانواهن (NF)، نانوالومینیوم (NA)، نانوتیتان (NT)، فوق روان کننده پلی کربوکسیلات محلول، مصالح ریزدانه بااندازه حداکثر 4.75 mm، مصالح درشت دانه با اندازه 19 mm، متاکائولن به اندازه ۱۵٪، موادسیمانی، حدود مدول نرمی ماسه ۳ است.

طرح ۲: سیمان تیپ ۱، نانوسیلیس دراندازه 10-150 نانومتر، پودرکوارتز در اندازه 0.25 – 0.3 میکرومتر، ماسه ریزدانه دراندازه 50- 650 میکرومتر، مصالح درشت دانه دراندازه 11 میلیمتر، فوق روان کننده

طرح ۳: تیپ ۱ سیمان معمولی، مصالح درشت دانه با اندازه 5-9mm خشک شده دراوون با وزن واحد 1650kg/m و وزن مخصوص 2/65، ماسه با وزن مخصوص 2/65 و مدول نرمی 2/8، پودر نانوسیلیس با میانگین اندازه ذرات 13nm، فوق روان کننده بانام تجاری Darcem 100

طرح ۴: تیپ ۱ سیمان معمولی، نانوسیلیس و نانو رس

۲. نسبت های اختلاط طرح های مختلف

در هر چهار پژوهش، طرح های اختلاط مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است که به شرح ذیل می باشد.

نمونه	سیمان+متاکانولن (kg/m ³)	فوق روان کننده (%)	W/C	نانوروی (%)	نانوتیتان (%)	نانوآلومینیوم (%)	نانوآهن (%)
شاهد	580	1.5	0.25				
نانوروی (NZ)	580	1.5	0.25	1.5			
نانوتیتان (NT)	580	1.5	0.25		1.5		
نانوآلومینیوم (NA)	580	1.5	0.25			1.5	
نانوآهن (NF)	580	1.5	0.25				1.5

شکل ۱: نسبتهای اختلاط طرح ۱

ترکیبات مخلوط بتن	ماسه	مصلح دانه ای باقطر 10mm	سیمان	مصلح دانه ای باقطر 5mm	پودر کوارتز	آب	نانوسیلیس	مواد افزودنی
مقدار استفاده (%)	31	21	22	9.00	8	5	3	1

شکل ۲: نسبتهای اختلاط طرح ۲

شناسه مخلوط	آب	سیمان	نانوسیلیس	مصلح درشت دانه	ماسه	فوق روان کننده	اسلامپ (mm)
شاهد	185	380	0	825	960	2.6	40
نانوسیلیس 0.3%	185	380	1.14	825	948	5.6	40
نانوسیلیس 0.9%	185	380	3.42	825	936	6.7	35

شکل ۳: نسبتهای اختلاط طرح ۳ (kg/m³)

شناسه مخلوط	سیمان (g)	دولومیت (g)	ماسه (g)	سیلیس (g)	آب (g)	افزودنی (g)	نانوسیلیس (g)	نانورس (g)
S1-control (شاهد)	500	740	550	100	180	12.5	0	0
S2-0.5 NS-0 NC (W)	497.5	740	550	100	180	12.5	2.5	0
S3-0.75 NS-0 NC (W)	496.25	740	550	100	180	12.5	3.75	0
S4-1 NS-0 NC (W)	495	740	550	100	180	12.5	5	0
S5-1.25 NS-0 NC (W)	493.75	740	550	100	180	12.5	6.25	0
S6-1.5 NS-0 NC (W)	492.5	740	550	100	180	12.5	7.5	0
S7-0 NS-1 NC (D)	495	740	550	100	180	12.5	0	5
S8-0 NS-3 NC (D)	485	740	550	100	180	12.5	0	15
S9-0 NS-5 NC (D)	475	740	550	100	180	12.5	0	25
S10-0 NS-7 NC (D)	465	740	550	100	180	12.5	0	35
S11-0 NS-10 NC (D)	450	740	550	100	180	12.5	0	50
S12-0 NS-1 NC (W)	495	740	550	100	180	12.5	0	5
S13-0.25 NS-0.75 NC (W)	495	740	550	100	180	12.5	3.75	1.25
S14-0.75 NS-2.25 NC (W)	485	740	550	100	180	12.5	11.25	3.75
S15-1.25 NS-3.75 NC (W)	475	740	550	100	180	12.5	18.75	6.25
S16-0.5 NS-0.5 NC (W)	495	740	550	100	180	12.5	2.5	2.5
S17-1.5 NS-1.5 NC (W)	485	740	550	100	180	12.5	7.5	7.5
S18-2.5 NS-2.5 NC (W)	475	740	550	100	180	12.5	12.5	12.5
S19-0.75 NS-0.25 NC (W)	495	740	550	100	180	12.5	1.25	3.75
S20-2.25 NS-0.75 NC (W)	485	740	550	100	180	12.5	3.75	11.25
S21-3.75 NS-1.25 NC (W)	475	740	550	100	180	12.5	6.25	18.75
S22-0.5 NS-0.5 NC (D)	495	740	550	100	180	12.5	2.5	2.5
S23-1.5 NS-1.5 NC (D)	485	740	550	100	180	12.5	7.5	7.5
S24-2.5 NS-2.5 NC (D)	475	740	550	100	180	12.5	12.5	12.5

شکل ۴: نسبتهای اختلاط طرح ۴ (kg/m³)

۳. ساخت و عمل آوری آزمون‌ها

برای طرح‌های مختلف آزمون‌ها ساخته شده و با شرایط خاصی عمل آوری گردیده است، که در زیر توضیح داده شده است. آزمون‌های طرح ۱ در دمای $20 \pm 1^\circ\text{C}$ به مدت ۲۸ روز در داخل آب عمل آوری گردیدند؛ آزمون‌های طرح ۲ در سنین ۲۱، ۲۸ و ۳۱ روز ارزیابی گردیده و برای تست مقاومت فشاری آزمون‌ها از ماشین (UTM) با ظرفیت 2000KN استفاده گردید. برای آزمایش عمق نفوذ آب در طرح ۳، آزمون به مدت ۷ روز زیر فشار آب تحت فشار 0.75Mpa قرار گرفت؛ همچنین برای آزمایش ضریب انتشار کلراید آزمون‌ها در (185g/l) سدیم کلراید محلول به مدت ۵۶ روز قرار گرفتند؛ همچنین آزمون‌های طرح ۴ در دمای $20 \pm 1^\circ\text{C}$ و رطوبت ۹۰٪ به مدت ۲۴ ساعت نگهداری و پس از یک روز از قالب خارج و تا سنین ۲۸، ۹۰ روز عمل آوری گردیدند. در طرح ۴ برای ساخت مخلوط خشک، نانوذرات با سیمان و دوده سیلیس به مدت ۵ دقیقه و مصالح دانه ای با آب و مواد افزودنی به مدت ۲ دقیقه توسط مخلوط کن اتوماتیک مخلوط می گردند. برای ساخت مخلوط تر، سیمان، دوده سیلیس، مصالح ریزدانه و درشت دانه با یکدیگر به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط گردیده و سپس ۵۰٪ آب به ترکیب فوق اضافه شده و دوباره مخلوط می گردند. شکل ۵ الی ۸ مربوط به طرح ۴ می باشد.



شکل ۶: قالب گیری بتن به شکل منشور



شکل ۵: آزمون‌های نگهداری شده در اتاق مرطوب



شکل ۸: ساخت مخلوط به روش خشک



شکل ۷: ساخت مخلوط به روش تر

۴. بررسی آزمون‌های طرح‌های مختلف

برای آزمون‌ها در طرح اختلاط‌های مختلف آزمون‌های متفاوتی صورت گرفت. نتایج آن در شکل‌های ۹ الی ۱۲ ارائه گردیده است.

نوع آزمون	شکل قالب	ابعاد قالب (mm)	سن آزمایش (روز)	نوع استاندارد
مقاومت فشاری	مکعب مربع	150	28	ASTM C 39
مقاومت کششی	استوانه	300*150	28	
نفوذپذیری یون کلراید	استوانه	300*150	28	ASTM C 1202-97
میزان جذب آب (%)	استوانه	300*150	28	ASTM C 642

شکل ۹: ابعاد، شکل و زمان انجام آزمون های بتن سخت شده برای طرح ۱

نوع آزمون	شکل قالب	ابعاد قالب (mm)	سن آزمایش (روز)	نوع استاندارد
مقاومت فشاری	استوانه	100*200	3,7,14,21	ASTM C 39
مقاومت در برابر حمله سولفاتی	استوانه	100*200	28,56,90,120,150,180	

شکل ۱۰: ابعاد، شکل و زمان انجام آزمون های بتن سخت شده برای طرح ۲

نوع آزمون	شکل قالب	ابعاد قالب (mm)	سن آزمایش (روز)	نوع استاندارد
مقاومت فشاری	استوانه	100*200	1,7,28,91	ASTM C 39
عمق نفوذ آب تحت فشار	استوانه	100*200	28,91	BS EN 12390-8
انتقال یون کلراید به روش تسریع شده	استوانه	100*50	91	NT BUILD 492
ضریب انتشار یون کلراید	استوانه	100*100	91	NT BUILD 492
تخلخل سنجی به روش نفوذ جیوه	استوانه	100*50	28,91	ASTM 642

شکل ۱۱: ابعاد، شکل و زمان انجام آزمون های بتن سخت شده برای طرح ۳

نوع آزمون	شکل قالب	ابعاد قالب (mm)	سن آزمایش (روز)	نوع استاندارد
مقاومت فشاری	استوانه	100*200	3,7,14,21	EN-BS-1881-119-2011
مقاومت خمشی	استوانه	100*200	28,56,90,120,150,180	EN-196-1-2005

شکل ۱۲: ابعاد، شکل و زمان انجام آزمون های بتن سخت شده برای طرح ۴

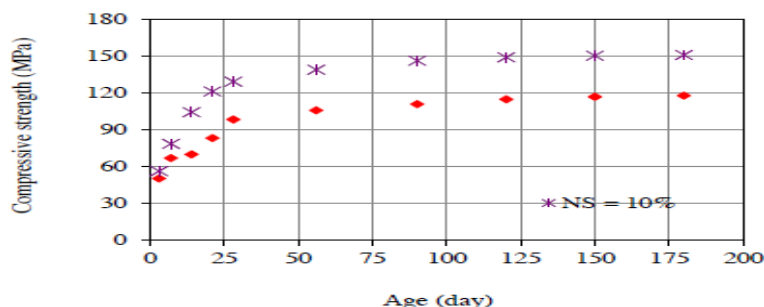
۱-۴. تعیین مقاومت فشاری

برای هر ۴ طرح آزمون های مختلفی انجام گرفت و نتایج آن در ذیل ارائه گردیده است.

شناسه مخلوط	مقاومت فشاری (Mpa)
شاهد (C)	92.3
نانو روی (NZ)	110.9
نانو تیتان (NT)	113.3
نانو آلومینیوم (NA)	143.1
نانو آهن (NF)	119

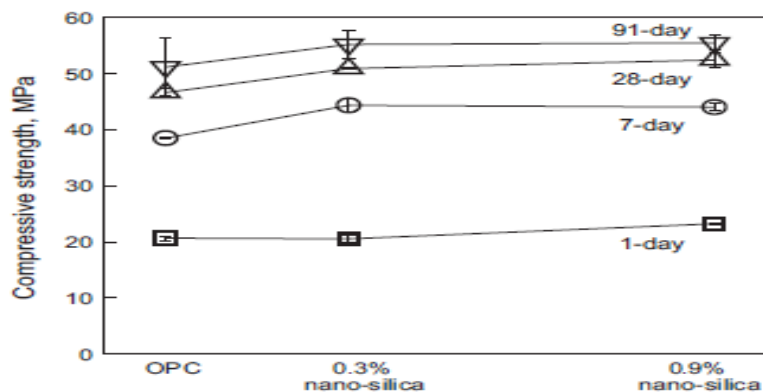
شکل ۱۳: نتایج آزمون مقاومت فشاری طرح ۱

با توجه به شکل ۱۳، مقاومت فشاری بتن حاوی نانوذرات آلومینیوم (NA)، 50.8MPa، بیشتر از بتن شاهد (C) است، که قابل توجه می باشد.



شکل ۱۴: نمودار نتایج آزمون مقاومت فشاری (طرح ۲)

باتوجه به شکل ۱۴، مقاومت فشاری بتن حاوی نانوسیلیس در سن ۲۸ روز برابر ۱۲۹.۴۸ MPa است که ۳۰ MPa بیشتر از بتن شاهد است. نانوسیلیس آزادانه با کلسیم اکسید آزاد مخلوط شده و در نتیجه باعث تسریع واکنش های پوزولانی و تشکیل خمیرسیمان جدید می گردد.

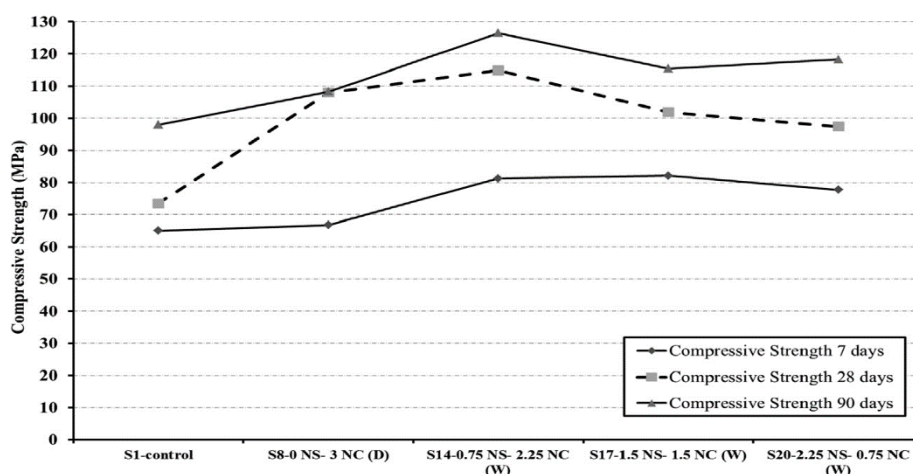


شکل ۱۵: نمودار نتایج آزمون مقاومت فشاری (طرح ۳)

باتوجه به شکل ۱۵، مقاومت فشاری مخلوط حاوی ۰.۳ درصد نانوسیلیس، ۹ درصد و مقاومت فشاری مخلوط حاوی ۰.۴ درصد نانوسیلیس، ۱۲ درصد نسبت به بتن شاهد (OPC) افزایش یافته است. دلیل اصلی این افزایش مقاومت فشاری اثر پرکنندگی و واکنش های پوزولانی ذرات نانودر بتن است. نانو سیلیس در واکنش های پوزولانی با مصرف کلسیم هیدروکسید کریستاله نه تنها می تواند اندازه کریستالها را بکاهد بلکه باعث تولید بیشتر C-S-H همگن تر می گردد.

مقاومت خمشی (Mpa)			مقاومت فشاری (Mpa)			شناسه مخلوط
90 روز	28 روز	7 روز	90 روز	28 روز	7 روز	
13.70	11.25	11.31	97.97	73.43	65.03	S1-control
13.93	11.96	11.70	105.80	79.79	74.27	S2-0.5 NS-0 NC (W)
14.19	12.22	11.86	115.67	91.31	78.33	S3-0.75 NS-0 NC (W)
13.27	12.08	11.78	90.50	86.61	74.09	S4-1 NS-0 NC (W)
13.79	11.86	11.57	89.33	86.03	73.38	S5-1.25 NS-0 NC (W)
13.78	10.50	11.29	85.57	60.34	54.60	S6-1.5 NS-0 NC (W)
11.53	11.72	9.14	97.50	82.18	65.85	S7-0 NS-1 NC (D)
14.81	13.52	10.20	108.29	107.99	66.84	S8-0 NS-3 NC (D)
11.89	10.81	9.82	97.08	84.09	68.94	S9-0 NS-5 NC (D)
11.82	10.20	11.01	90.78	82.42	50.39	S10-0 NS-7 NC (D)
10.30	9.13	10.31	103.34	72.22	51.07	S11-0 NS-10 NC (D)
15.25	15.71	12.07	120.81	91.80	76.66	S12-0 NS-1 NC (W)
15.30	14.87	10.99	123.58	85.61	78.99	S13-0.25 NS-0.75 NC (W)
15.12	14.84	13.36	126.44	114.91	81.25	S14-0.75 NS-2.25 NC (W)
13.88	13.70	11.87	113.25	88	70.70	S15-1.25 NS-3.75 NC (W)
13.18	12.71	10.55	116.64	109.87	66.60	S16-0.5 NS-0.5 NC (W)
14.59	13	9.62	115.43	101.84	82.19	S17-1.5 NS-1.5 NC (W)
14.72	14.45	12.75	114.60	111.97	56.94	S18-2.5 NS-2.5 NC (W)
14.78	14.29	10.85	114.43	96.20	59.60	S19-0.75 NS-0.25 NC (W)
14.68	13.35	10.46	118.26	97.34	77.71	S20-2.25 NS-0.75 NC (W)
13.54	12.07	11.26	119.05	100.42	81.27	S21-3.75 NS-1.25 NC (W)
16.92	14.89	10.35	110	107.18	73.74	S22-0.5 NS-0.5 NC(D)
22.16	13.36	10.77	113.80	101.50	89.38	S23-1.5 NS-1.5 NC(D)
13.22	12.43	11.59	107.88	95.25	85.15	S24-2.5 NS-2.5 NC(D)

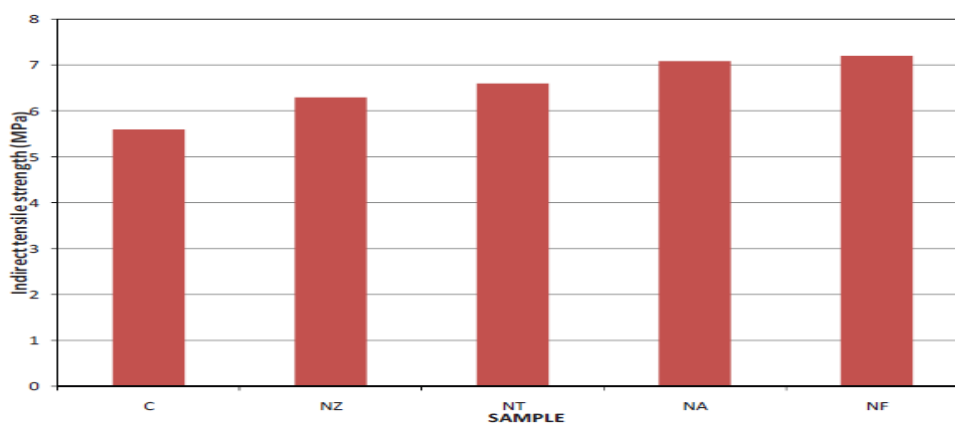
شکل ۱۶: جدول نتایج آزمون مقاومت فشاری و خمشی (طرح ۴)



شکل ۱۷: نمودار نتایج تاثیر ۳٪ هیبرید نانوسیلیس و نانو رس بر مقاومت فشاری (طرح ۴)

باتوجه به شکل ۱۷، ۳٪ هیبرید نانو با ترکیب ۲۵٪ نانو سیلیس (NS) و ۷۵٪ نانو رس (NC) مقاومت فشاری بتن را در سن ۷ روز، ۲۵٪ و در سن ۲۸ روز ۵۶/۵٪ و در سن ۹۰ روز ۲۹،۱٪ بیشتر از بتن شاهد افزایش می دهد. استفاده از ۳٪ نانوذرات، شامل ۲۵٪ نانوسیلیس و ۷۵٪ نانو رس بالاترین خواص مکانیکی (مقاومت فشاری و مقاومت خمشی) در میان دیگر ترکیبات ایجاد می کند.

۲-۴. تعیین مقاومت کششی

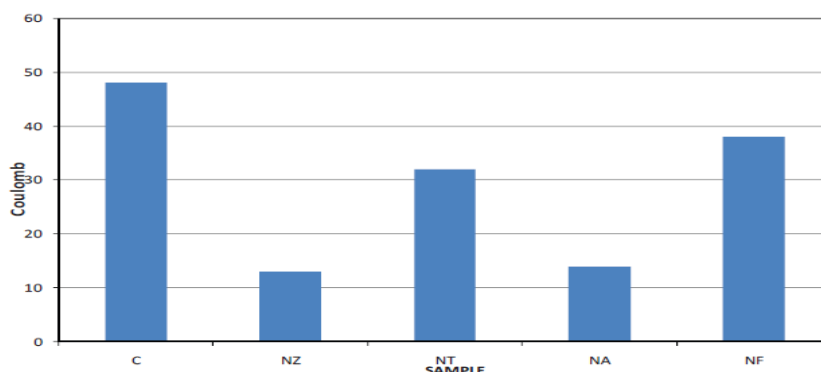


شکل ۱۸: نمودار نتایج آزمون مقاومت کششی (طرح ۱)

باتوجه به شکل ۱۸، مخلوط محتوی نانو سیلیس دارای مقاومت کششی بهتری نسبت به مخلوط شاهد (C) است.

۳-۴. تعیین نفوذپذیری یون کلراید

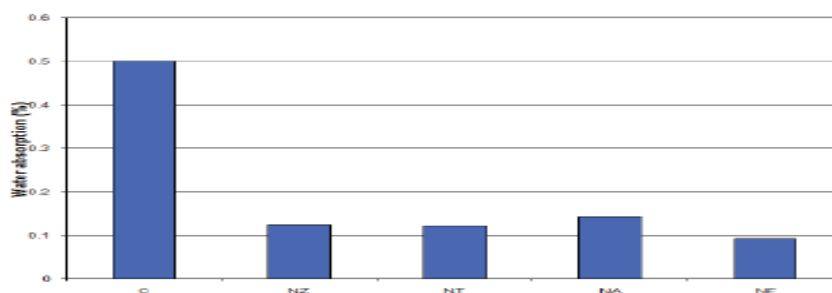
بهبود پارامترهای نفوذپذیری بتن در افزایش دوام آن بسیار حائز اهمیت می باشد. آزمایش نفوذپذیری کلرید، به منظور طراحی و بررسی عمر مفید بتن در مقابل نفوذ یون کلرید مناسب می باشد.



شکل ۱۹: نمودار نتایج نفوذپذیری یون کلراید (طرح ۱)

باتوجه به شکل ۱۹، مقدار شارعبوری (Coulomb) یون کلراید برای مخلوط های حاوی نانوالومینیوم (NA) و نانو روی (NZ) بسیار کمتر از نمونه شاهد (C) می باشد. کاهش نفوذ پذیری یون کلراید در نمونه های مختلف از ۲۰٪ تا ۸۰٪ می باشد.

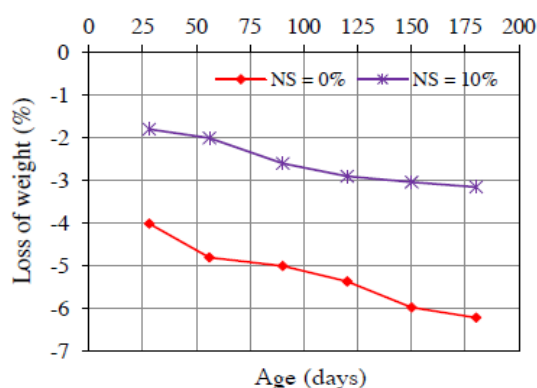
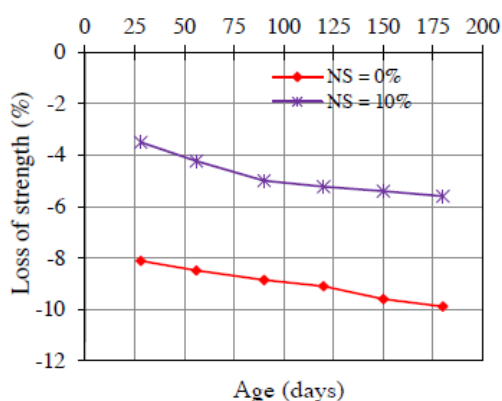
۴-۴. تعیین میزان جذب آب



شکل ۲۰: نمودار نتایج درصد جذب آب (طرح ۱)

با توجه به شکل ۲۰، درصد جذب آب در نمونه های حاوی نانو ذرات ۰.۴ درصد کمتر از نمونه شاهد (C) است.

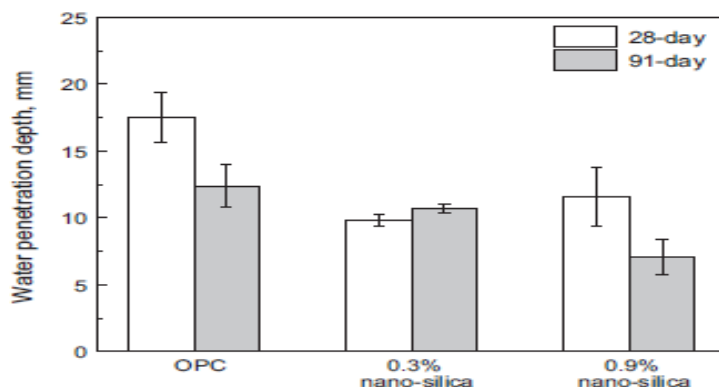
۵-۴. تعیین مقاومت در برابر حمله سولفاتی



شکل ۲۱: درصد کاهش وزن در برابر حمله سولفاتی (طرح ۲) شکل ۲۲: درصد کاهش مقاومت در برابر حمله سولفاتی (طرح ۲)

با توجه به شکل های ۲۱ و ۲۲، درصد کاهش وزن مخلوط شاهد تحت تاثیر حمله سولفاتی بسیار بیشتر از مخلوط حاوی ۱۰٪ نانوسیلیس است. نانو مواد می توانند مقدار کلسیم آلومینات را در مواد سیمانی کاهش داده و باعث افزایش مقاومت سولفاتی بتن می گردند. مقاومت سولفاتی مخلوط حاوی ۱۰٪ نانو سیلیس بسیار بهتر از مخلوط ۵٪ نانو سیلیس می باشد.

۴-۶. تعیین عمق نفوذ آب تحت فشار



شکل ۲۳: نمودار نتایج عمق نفوذ آب تحت فشار در بتن سخت شده (طرح ۳)

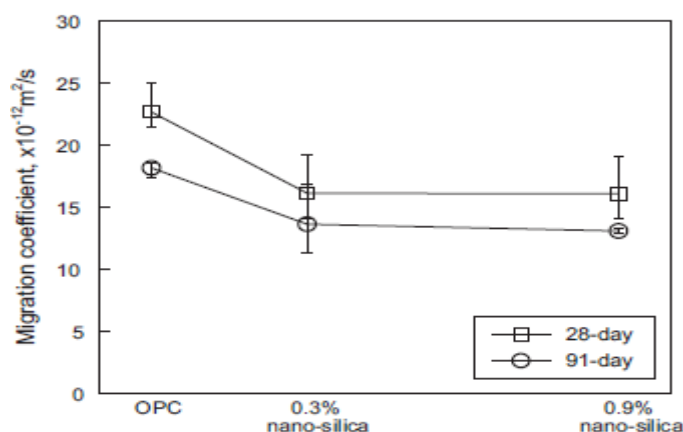
با توجه به شکل ۲۳، عمق نفوذ آب در بتن حاوی ۰٫۴ درصد نانوسیلیس در سنین ۲۸ و ۹۱ روز به ترتیب کمتر از ۱۲٫۵ میلیمتر و ۷٫۵ میلی متر می باشد و عمق نفوذ آب در بتن حاوی ۰٫۳ درصد نانوسیلیس در ۲۸ روز، ۵۶ درصد نسبت به بتن OPC کاهش یافته است. کاهش بالاتر از ۸۸ درصد در عمق نفوذ آب اخیراً با افزودن دوز ۳٫۸ درصد نانوسیلیس به بتن خودتراکم (SCC) مشاهده گردیده است.

۴-۷. تعیین ضریب انتقال یون کلراید به روش تسریع شده

برای انتقال (مهاجرت) یون های کلراید از یک طرف به طرف دیگر در نمونه های بتنی حاوی سیمان از ولتاژ ۲۰V به مدت ۲۴ ساعت استفاده گردید. برای تعیین عمق نفوذ یونهای کلراید از رابطه (۱) استفاده گردید.

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \left[X_d - 0.0238 \frac{\sqrt{(273+T)Lx_d}}{U-2} \right] \quad (1)$$

که در آن D_{nssm} ضریب انتقال یون کلراید، U ولتاژ مورد استفاده، t مدت آزمایش (۲۴ ساعت)، X_d عمق نفوذ یون کلراید، L ضخامت نفوذ کلراید می باشد.



شکل ۲۴: نمودار نتایج ضریب انتقال یون کلراید در بتن سخت شده (طرح ۳)

با توجه به شکل ۲۴، ضریب انتقال (D_{nssm}) برای نمونه حاوی ۰٫۳٪ نانوسیلیس، ۲۸٫۷٪ و برای ۰٫۹٪ نانوسیلیس ۲۹٪ کاهش یافته است. با استفاده کردن نانوسیلیس به شکل پودری ضریب انتقال (D_{nssm}) برای سنین ۲۸ و ۹۱ روز به ترتیب ۵۶٪ و ۵۱٪ کاهش می یابد.

۸-۴. تعیین ضریب انتشار یون کلراید

برای تعیین مقدار یون کلراید از رابطه ۲ که قانون دوم فیک است؛ استفاده گردید.

$$C(x, t) = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right] \quad (2)$$

که در آن $C(x, t)$ مقدار کلراید در عمق x ؛ زمان t ، C_0 مقدار کلراید سطحی؛ erf تابع خطا؛ x عمق؛ t زمان غوطه وری؛ D_a ضریب انتشار یون کلراید است که با حل این تابع خطا، می توان ضریب انتشار و مقدار کلراید سطحی را محاسبه نمود.

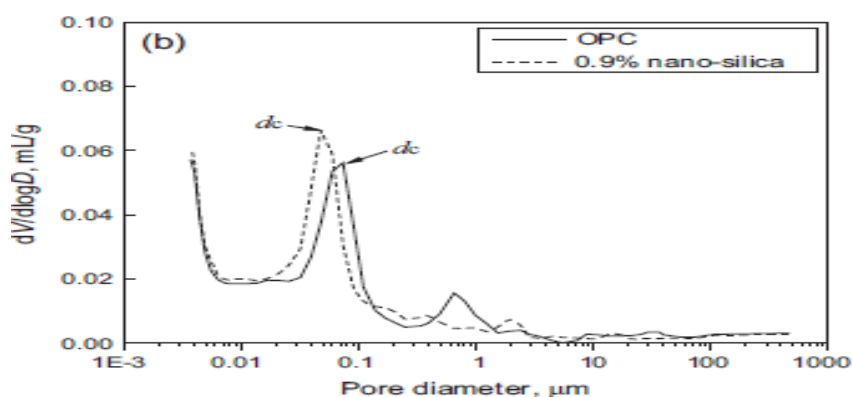
شناسه مخلوط	ضریب انتشار $D_a * 10^{-12} (m^2/s)$	مقدار کلراید سطحی (C_0)	R^2
شاهد (OPC)	20.25	1.379	0.996
نانوسیلیس ۰.۳٪	13.95	1.503	0.991
نانوسیلیس ۰.۹٪	13.54	1.233	0.997

شکل ۲۵: جدول نتایج تعیین ضریب انتشار یون کلراید (طرح ۳)

۹-۴. تعیین تخلخل سنجی به روش نفوذ جیوه (MIP)

شناسه مخلوط	منافذ مویینه بزرگ %	منافذ مویینه متوسط %	منافذ مویینه ریز %	تخلخل ژل %	تخلخل کل
شاهد (OPC)	7	3.15	10.56	2.93	13.49
نانوسیلیس ۰.۹٪	6	4.16	10.46	3.05	13.51

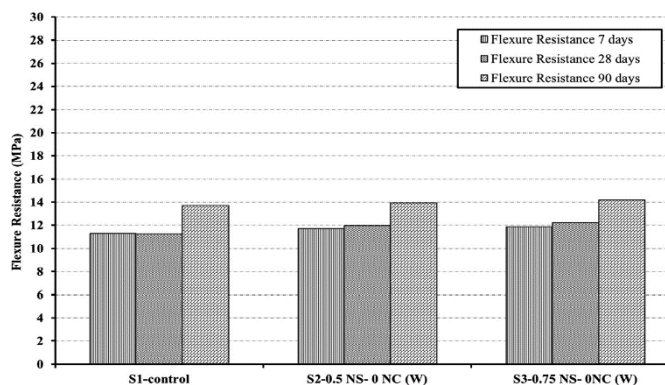
شکل ۲۶: جدول نتایج آزمایش تخلخل سنجی به روش نفوذ جیوه (طرح ۳)



شکل ۲۷: نمودار نتایج آزمایش تخلخل سنجی به روش نفوذ جیوه (طرح ۳)

با توجه به شکل ۲۷، اندازه حفرات بحرانی از 74nm برای مخلوط بتن شاهد (OPC)، به 47.8nm برای مخلوط دارای ۰.۹٪ نانو سیلیس کاهش یافته است؛ میانگین اندازه حفرات برای بتن شاهد (OPC) به ترتیب از 18 الی 56.3nm مشاهده شد در حالی که میانگین اندازه حفرات برای بتن حاوی ۰.۹٪ نانو سیلیس به ترتیب از 17 تا 44.7nm مشاهده گردید.

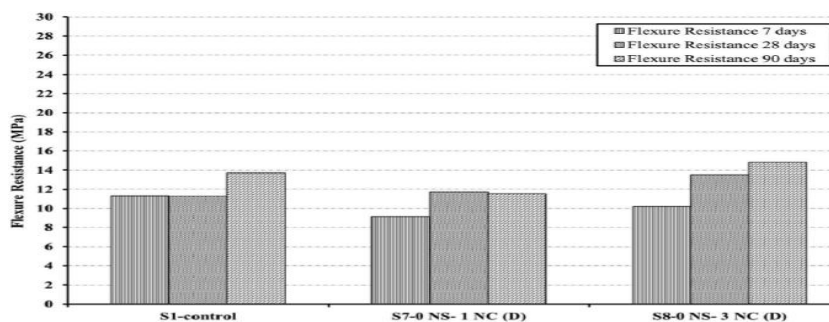
۴-۱۰. تعیین مقاومت خمشی



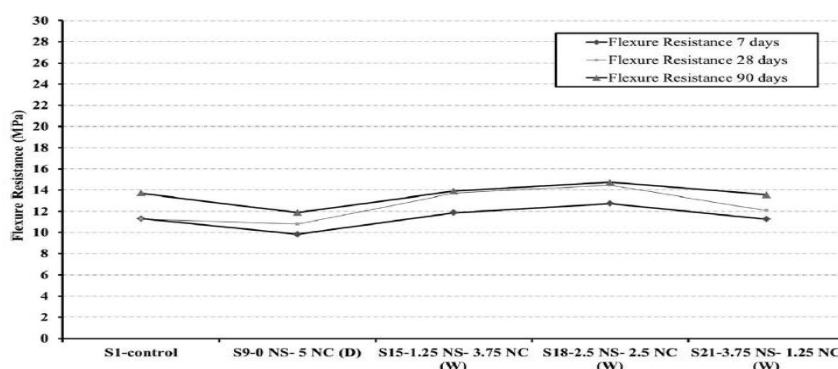
شکل ۲۸: نمودار نتایج تاثیر نانو سیلیس بر مقاومت خمشی (طرح ۴)

با افزودن ۰٫۵-۰٫۷۵ درصد نانو سیلیس در مخلوط تر مقاومت خمشی بتن در سن ۲۸ روز، ۸٫۶ درصد و در سن ۹۰ روز ۳٫۶ درصد بیشتر از مخلوط شاهد افزایش یافته است. نمودتر ۱۳ نشان می دهد، با افزودن ۱-۳٪ نانو رس در مخلوط خشک، مقاومت خمشی در سن ۹۰ روز تا ۸٫۱٪ بیشتر از مخلوط شاهد افزایش می دهد.

نمودار ۱۳: نتایج تاثیر نانو رس بر مقاومت خمشی (طرح ۴)



نمودار ۱۴: نتایج تاثیر ۳٪ هیبرید نانو سیلیس و نانو رس بر مقاومت خمشی (طرح ۴)



۵٪ هیبرید نانو با ترکیب ۲۵٪ نانو سیلیس و ۷۵٪ نانو رس مقاومت خمشی را در سن ۷ روز ۵٪ و در سن ۲۸ روز ۲۱٫۸٪ و در سن ۹۰ روز ۱٫۳٪ بیشتر از بتن شاهد افزایش می دهد. ۵٪ هیبرید نانو با ترکیب ۵۰٪ نانو سیلیس و ۵۰٪ نانو رس مقاومت خمشی را در سن ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب ۷٫۴٪، ۵٫۵٪ و ۶٫۱٪ بیشتر از نمونه های شاهد افزایش می دهد که تقریباً مشابه

مخلوط ۲۵٪ نانوسیلیس و ۷۵٪ نانو رس است. بنابراین از نظر اقتصادی و تاثیر مقاومتی ترکیب ۲۵٪ نانوسیلیس و ۷۵٪ نانو رس برای بهبود مقاومت مناسب تر است.

۵. جمع بندی

نتایج آزمایش های چهار پژوهش که در آن آزمون های مختلفی از مخلوط های بتنی حاوی نانو ذرات مختلف با نمونه فاقد نانومواد مورد مقایسه قرار گرفته بود به شرح ذیل می باشد:

با توجه به پژوهش اول، نتایج آزمایش ها نشان داد همه ی نانوذرات می توانند خواص مکانیکی بتن با کارایی بالا را بهبود دهند و نانو آلومینیوم (NA) بیشتر از بقیه نانو ذرات، این خواص را در بتن بهبود می بخشد. درمورد دوام بتن، تاثیر نانو ذرات در بهبود آن قابل توجه است.

باتوجه به پژوهش دوم، نانو سیلیس ها توانایی بالا بردن کارایی بتن را بخوبی دارند و نتایج آزمایش ها نشان داد که در سن ۲۸ روز با استفاده کردن از نانو سیلیس، مقاومت فشاری بتن به ماکزیمم حد خود یعنی 129.48 MPa می رسد. همچنین با افزودن ۱۰٪ نانو سیلیس، مقاومت بتن در برابر حمله ی سولفاتی بهتر از بتن صفر درصد نانو سیلیس می باشد.

باتوجه به پژوهش سوم، نانوسیلیس به صورت مخلوط تر و نانو رس به صورت خشک، مقاومت فشاری بتن را در سنین ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب: ۱۸ و ۱۱ درصد بهبود می بخشند که دلیل آن واکنش های نانو موادها با کلسیم هیدروکسید (Ca(OH)_2) کریستاله در منطقه انتقال (ITZ) بین ملات سیمان و مصالح دانه ای می باشد که منجر به تولید ژل C-S-H می شود که باعث عمل پرکنندگی می گردند. مقاومت خمشی بتن در سن ۹۰ روز ۴ و ۸ درصد به ترتیب با استفاده از نانوسیلیس و نانو رس اتفاق می افتد. که دلیل آن اثر پرکنندگی نانو ذرات می باشد که باعث پیوند بیشتر مصالح دانه ای و ماتریس سیمان است.

اپتیمم درصد جایگزینی سیمان با نانو ذرات برای نانو سیلیس، ۰٫۷۵ درصد و در مورد نانورس ۳ درصد می باشد. که درصد های بیشتر از این مقدار، تاثیر منفی روی مقاومت فشاری و خمشی دارد که دلیل آن انباشتگی بیشتر نانو ذرات می باشد. همچنین از نظر اقتصادی هزینه ی بیشتری بدون داشتن تاثیر بیشتر روی خواص مکانیکی دارد. مخلوط تر نانو رس، تاثیر بهتری نسبت به مخلوط خشک دارد و مقاومت فشاری را تقریباً ۲۴ درصد و مقاومت خمشی را تقریباً ۳۲ درصد در سن ۹۰ روز بهبود می بخشند. مخلوط تر هیبرید نانو ذرات تاثیر بیشتری نسبت به مخلوط خشک دارند که تقریباً ۶ درصد مقاومت فشاری را بهبود می بخشند. همچنین مخلوط خشک هیبرید نانو ذرات نسبت به مخلوط تر تاثیر بیشتری در بهبود مقاومت خمشی دارد که در ۹۰ روز تقریباً ۵۲ درصد مقاومت خمشی را افزایش می دهد.

با توجه به پژوهش چهارم، در واکنش های پوزولانی نانو سیلیس ها بخوبی بعنوان پرکننده اثر می گذارند و ریزساختارهای ملات را متراکم می کنند بخصوص در منطقه انتقال (ITZ) تراکم می بخشند. و باعث تولید ژل C-S-H مقاوم تر شده و سرعت هیدراتاسیون را افزایش می دهند.

در مشاهدات صورت گرفته بوسیله میکروسکوپ الکترونی (SEM) مشخص گردید که مورفولوژی ملات در منطقه انتقال (ITZ) در مخلوط سیمان بتن های دارای نانوسیلیس همگن تر هستند. چنین توزیع اندازه منافذ به گونه ای تغییر کرده که از نسبت ورود آب و یون های کلراید کاسته است. مطالعات صورت گرفته نشان داد کاهش ۴۵ درصد در عمق نفوذ آب، ۲۸٫۷ درصد ضریب مهاجرت کلراید و ۳۱ درصد ضریب انتشار یون کلراید در داخل بتن با استفاده کردن از نانو ذرات اتفاق می افتد. مطمئناً گام مهم در استفاده از نانوذرات در مخلوط بتن، دستیابی به پراکندگی خوب آنها در داخل ماتریس سیمان است.

منابع و مراجع

- [1]. رئیس قاسمی مازیار، پرهیزکار طیب، قبادی سعیده، نجیمی میثم، (۱۳۹۲)، تاثیر استفاده از نانو سوسپانسون های سیلیس و تیتانیوم بر خواص بتن (چاپ اول)، انتشارات مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران
- [2]. Shekari. A.H, Razzaghi. M.S, Influence of nano particles on durability and mechanical properties of high performance concrete, Procedia Eng. 14 (2011) 3036–3041.
- [3]. Saloma, Nasution. Amrinsyah, Imran. Iswandi, Abdullah. Mikrajuddin, Improvement of concrete durability by nanomaterials, Procedia Engineering 125 (2015) 608 – 612.
- [4]. M. Mohamed. Anwar, Influence of nano materials on flexural behavior and compressive strength of concrete, HBRC Journal (2016) 12, 212–225.
- [5]. Du. Hongjian, Du. Suhuan, Liu. Xuemei, Durability performances of concrete with nano-silica, Construction and Building Materials 73 (2014) 705–712.