



Investigation of Some Durability Properties of Concrete Pavements Containing Nanoparticles

F. Ghadim Tekmehdash, A. Mohammadjafari Sadeghi* , H. Afshin

Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

ABSTRACT: Mechanical and durability properties of concrete structures, including concrete pavements, have been a focus of attention. In this regard, the potential of nanomaterials needs to be discussed more. Water permeability, abrasion, and compressive strength are assessed in this study. So far, the incorporation of diverse types of nanomaterials with different methods has caused the enhancement of some mechanical and durability properties of concrete. In the present study, five types of nanoparticles as nanoSiO₂, nanoTiO₂, nanoAl₂O₃, nanoFe₂O₃, and nanoFe₃O₄ in different amounts were uniformly dispersed and added to the concrete. To reduce the cost and decrease the required nanomaterials, specimens were made in two layers. The surface layer of specimens was made from self-compacting concrete containing nanoparticles with 1 cm depth, which was placed over the bottom layer from conventional concrete with different depths depending on the tests. The test results indicated that the properties of concrete pavements containing nanoparticles are improved comparing to the control specimen. For instance, in specimens containing nanoTiO₂ as much as 3% by the weight of cement, the water permeability improved by 84.6%. Furthermore, the abrasion resistance of specimens containing nanoSiO₂ at an amount of 1% was enhanced by 88.1%, and the addition of 3% of nanoSiO₂ raised compressive strength by 88%.

Review History:

Received: Feb. 09, 2020
Revised: Apr. 17, 2020
Accepted: May, 08, 2020
Available Online: May. 28, 2020

Keywords:

Concrete pavements
Abrasion
Permeability
Compressive strength
Nanoparticles

1. INTRODUCTION

The durability of concrete pavements is an important issue. They are exposed to external detrimental factors such as abrasion and freezing of permeated water. Some nanomaterials are incorporated in concrete to enhance its mechanical strengths and improve its water permeability. Incorporation of oxide of some metals in the form of nanoparticles such as nano-silica, nano-titania, nano-alumina, nano-hematite, and nano-magnetite has led to positive effects on the mechanical and duration properties of concrete [1-7].

Uniform dispersion of nanomaterials in a composite plays a pivotal role in its effectiveness in improving the expected properties of the composite. Otherwise, the formed agglomerates hinder the anticipated enhancements through the formation of weak zones. Different methods of dispersing nanomaterials in cementitious matrices are discussed in the literature [8, 9].

In the present study, water permeability, abrasion resistance, and compressive strength of concrete pavements containing five different nanoparticles have been investigated. The tested specimens are made of two layers to reduce the cost of nanomaterials and the amount used. The top layer consists of self-compacting concrete incorporating nanoparticles with a depth of one centimeter, which is cast over a layer of normal concrete placed

*Corresponding author's email: mohammadjafari@sut.ac.ir

underneath. The proposed method in this paper could be applied both in the construction of new concrete pavements and in the retrofit of existing ones. Comparing mechanical and duration properties of specimens containing different amounts of nanoparticles in an identical experimental condition provides useful information on optimum amounts and improvement rates, which could be a supplement to the previous literature.

2. METHODOLOGY

The nanoparticles used in this study are five types of metal oxides with the specifications, as shown in Table 1. The maximum aggregate size in self-compacting and normal concrete is 2.38 mm and 19 mm, respectively. The fineness modulus of the sand used in the mentioned concrete types is 3 and 3.4, respectively. Type II Portland cement and a poly carboxylic superplasticizer with a pH of 6.5, as well as potable water, are used in concrete mixes.

Mix proportions, according to Table 2, are selected after investigating some mixes. All specimens were demolded after 24 hours and then cured in water at a temperature of 24°C until the age of 28 days.

Cubic specimens of self-compacted concrete with 5 cm dimensions were tested according to the ASTM C109 standard to evaluate their compressive strength. Water permeability tests were conducted on two-layered cubic specimens, cast



Table 1. Specifications of incorporated nanomaterials

Nano Particles	Diameter (nm)	Specific surface area (m ² /gr)	Used amounts (wt.% of cement)
NanoSiO ₂	20-30	180-600	1,3,5
NanoTiO ₂	20	10-45	1,2,3
NanoAl ₂ O ₃	50	>19	1.5,2,3
NanoFe ₂ O ₃	20-40	20-60	1,3,4
NanoFe ₃ O ₄	20-30	40-60	1,3,4

as mentioned in the previous section, with 15 cm dimensions in accordance with BS EN 12390-8 standard. For evaluating abrasion resistance, two-layered 3×15×15 cm specimens were used in a way that agrees with the ASTM C944 standard.

Each test was conducted on a group consisting of three specimens and the average of three measured values was reported as a result. Furthermore, for each of the three tests mentioned above, a group of control specimens is prepared without any nanoparticles to measure the improvement rates. Overall, 144 specimens were prepared and tested in this study, taking into account five types of nanoparticles at three different amounts.

Self-compacting concrete on the top layer of specimens contains five types of nanoparticles at three different amounts, which are considered as weight percentages of cement, as shown in Table 2.

Superplasticizer as a surfactant in combination with mechanical stirring was used to reach a uniform dispersion of nanoparticles in the water, which was added to the concrete subsequently.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Results of the water permeability, abrasion resistance, and compressive strength tests are shown in Table 3. The increase of compressive strength in specimens containing nanoTiO₂ and nanoFe₂O₃ was accompanied by improvement in abrasion resistance and permeability, and maximum values were measured in those with higher nanoparticle content. This trend was observed in the specimens containing nanoAl₂O₃ and nanoSiO₂ to some extent, although the best results are almost associated with the medium content of nanoparticles. The incorporation of nanoFe₃O₄ raised the porosity due to foam formation, which consequently diminished the compressive strength.

In the case of uniform dispersion of nanoparticles in the concrete, if a suitable amount and distance are provided, nanoparticles can be placed in cement hydration products as a core, and limit the growth of Ca(OH)₂ crystals and make a homogeneous and dense cement matrix, which leads to higher mechanical properties. On the other hand, an increased amount of nanoparticles by impeding enough growth of Ca(OH)₂ crystals lessens their ratio against

Table 2. Mix proportions of self-compacting and normal concrete

Mix	self-compacting concrete	normal concrete
Cement	564.6	345
Water	179	189
Micro Silica	77	--
Limestone powder	185	--
Superplasticizer	13	--
Sand	1304	1064
Coarse aggregate	--	867
Specific weight	2320	2517

All values are in (kg/m³).

Table 3. Results of the compressive strength, permeability, and abrasion resistance tests (improvement percentages)

Nanoparticles	Amount (wt.%)	Permeability	Abrasion resistance	compressive strength
NanoSiO ₂	1	39.8	88.1	65.4
	3	73.8	81.1	88.1
	5	73.8	80.4	68.6
NanoTiO ₂	1	34.6	58.9	4.2
	2	71.3	62.8	56.8
	3	84.6	67.2	85.8
NanoAl ₂ O ₃	1.5	2	59.9	8.8
	2	69.2	86.6	77
	3	23.1	84	85.8
NanoFe ₂ O ₃	1	13.8	-20.7	3.3
	3	18.5	84	54.1
	4	29.2	87.1	59.5
NanoFe ₃ O ₄	1	-13.3	-347	-51.4
	3	56.9	29.5	-65.9
	4	23.1	29.5	-60.3

Calcium-silicate-hydrate, which results in a porous matrix. It should be noted that rising the content of nanoparticles declines the workability of concrete. Moreover, dispersion of higher amounts of nanoparticles is difficult, which increases the probability of agglomeration and diminishing mechanical properties.

4. CONCLUSION

The effect of five different nanoparticles in some mechanical and durability properties of concrete pavements was investigated in this study.

According to the results, the compressive strength, permeability, and abrasion resistance can be enhanced by the incorporation of nanoparticles as they can improve the structure of concrete both by pozzolanic activity and filling the pores.

REFERENCES

- [1] H. Li, M.-h. Zhang, J.-p. Ou, Abrasion resistance of concrete containing nanoparticles for pavement, *Wear*, 260(11) (2006) 1262-1266.
- [2] A. Nazari, S. Riahi, Abrasion resistance of concrete containing SiO₂ and Al₂O₃ nanoparticles in different curing media, *Energy and Buildings*, 43 (2011) 2939-2946.
- [3] M. Oltulu, R. Şahin, Effect of nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ and nano-Fe₂O₃ powders on compressive strengths and capillary water absorption of cement mortar containing fly ash: A comparative study, *Energy and Buildings*, 58 (2013) 292-301.
- [4] A. Shekari, M. Seyed Razzaghi, Influence of Nano Particles on Durability and Mechanical Properties of High Performance Concrete, *Procedia Engineering*, 14 (2011) 3036-3041.
- [5] M.-h. Zhang, H. Li, Pore structure and chloride permeability of concrete containing nanoparticles for pavement, *Construction and Building Materials*, 25(2) (2011) 608-616.
- [6] M. Oltulu, R. Şahin, Single and combined effects of nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ and nano-Fe₂O₃ powders on compressive strength and capillary permeability of cement mortar containing silica fume, *Materials Science and Engineering: A*, 528(22) (2011) 7012-7019.
- [7] A. Rashad, A synopsis about the effect of nano-Al₂O₃, nano-Fe₂O₃, nano-Fe₃O₄ and nano-clay on some properties of cementitious materials – A short guide for Civil Engineer, *Materials & Design*, 52 (2013) 143–157.
- [8] A.H. Korayem, N. Tourani, M. Zakertabrizi, A.M. Sabziparvar, W.H. Duan, A review of dispersion of nanoparticles in cementitious matrices: Nanoparticle geometry perspective, *Construction and Building Materials*, 153 (2017) 346-357.
- [9] S. Parveen, S. Rana, R. Fanguero, A Review on Nanomaterial Dispersion, Microstructure, and Mechanical Properties of Carbon Nanotube and Nanofiber Reinforced Cementitious Composites, *Journal of Nanomaterials*, (2013).

HOW TO CITE THIS ARTICLE

F. Ghadim Tekmehdash, A.R. Mohammadjafari Sadeghi, H. Afshin, *Investigation of Some Durability Properties of Concrete Pavements Containing Nanoparticles*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(8) (2021) 735-738.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17893.6705](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17893.6705)





بررسی برخی از خصوصیات دوام رویه های بتنی حاوی نانو مواد

فرزین قدیم تکمه داش^۱، علیرضا محمدجعفری صادقی^{۲*}، حسن افشین^۳

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۰
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۱/۲۹
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۳/۰۸

کلمات کلیدی:

رویه های بتنی
سایش
نفوذپذیری
مقاومت فشاری
نانو مواد

خلاصه: بهبود مشخصات مکانیکی و دوام سازه های بتنی از جمله رویه های بتنی همواره مورد توجه محققین بوده است. در این راستا استفاده از ظرفیت نانو مواد نیازمند بررسی های بیشتری است. نفوذپذیری، مقاومت در برابر سایش و مقاومت فشاری رویه های بتنی در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. تاکنون، استفاده از انواع نانو مواد به روش های مختلف، بهبود ویژگی های مکانیکی و دوام بتن را در پی داشته است. در همین راستا در این تحقیق از پنج نوع نانو ماده به صورت اکسید فلزات سیلیسیوم، تیتانیوم، آلومینیوم و آهن با درصد های مختلف استفاده شده است که به صورت یکنواخت پخش و به مخلوط اضافه شده اند. برای کاهش هزینه ی تمام شده و استفاده ی کمتر از نانو مواد، نمونه ها در دو لایه ساخته شده اند. به این صورت که از یک لایه بتن خودتراکم حاوی نانو مواد به ضخامت ۱ سانتی متر بر روی نمونه های بتنی معمولی که ضخامت آن بسته به آزمون های مختلف متفاوت می باشد، استفاده شده است. نتایج نشانگر بهبود مشخصه های رویه بتنی حاوی نانو مواد در مقایسه با نمونه کنترل است. برای مثال، در نمونه های حاوی نانو تیتانیا به مقدار ۳ درصد وزنی سیمان، مقاومت در برابر نفوذپذیری به میزان ۸۴/۶ درصد افزایش یافته است. همچنین مقاومت در برابر سایش برای نمونه ی حاوی ۱ درصد نانو سیلیکا به مقدار ۸۸/۱ درصد و مقاومت فشاری نمونه ی حاوی ۳ درصد نانو سیلیکا به میزان ۸۸ درصد افزایش یافته است.

۱- مقدمه

بتن علاوه بر مزایایی مانند مقاومت فشاری بالا، مقاومت در برابر آتش سوزی و حرارت، ارزان و در دسترس بودن مصالح، معایبی نیز دارد. به عنوان مثال، پایین بودن مقاومت های کششی و خمشی از جمله ضعف های مکانیکی بتن می باشد. علاوه بر آن، نفوذپذیری بتن در برابر آب و دیگر مواد شیمیایی مهاجم، همچنین عملکرد ضعیف در مقابل سایش و سیکل های ذوب و یخ بندان نیز از جمله ضعف های دوام بتن محسوب می شوند. رویه های بتنی که در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته اند،

بیشتر در معرض عوامل خارجی مهاجم بوده و موضوع دوام در آن ها بسیار مورد توجه می باشد. به دلیل عبور پیچی وسایل نقلیه سبک و سنگین در کارگاه ها و کارخانه ها و عبور افراد، کف سازی های بتنی در معرض سایش قرار می گیرند. همچنین در برخی از مکان ها به دلیل قرارگیری کف سازی ها در محیط باز، یخ زدن و ذوب شدن های متوالی در آنها رخ می دهد که این موضوع سبب ایجاد ترک های کوچک می شود و این ترک های کوچک به مرور زمان با نفوذ آب و دیگر عوامل خورنده و همچنین سایش همزمان، گسترده تر و بزرگ تر شده و منجر به تخریب کل کف سازی می شود.

استفاده از نانو مواد برای غلبه بر نقاط ضعف مذکور نتایج قابل قبولی به همراه داشته است. بدین منظور نانو موادی مانند نانو

* نویسنده عهده دار مکاتبات: mohammadjafari@sut.ac.ir



همچنین نتایج نمونه های عمل آوری شده در آب آهک بهبود بهتری از خود نشان دادند [۷]. از نانو سیلیکا و میکرو سیلیکا نیز در مطالعه دیگری با درصدهای ۱، ۳، ۵ و ۷ در بتن متخلخل^۷ استفاده شد و تأثیر نانو سیلیکا به مراتب بهتر بوده است؛ به طوری که بهبود ۴۸ درصدی مقاومت فشاری در نمونه ی حاوی ۷ درصد نانو سیلیکا به دست آمده است [۸]. استفاده از Nano Fe₂O₃ با درصدهای ۱ تا ۵ نشانگر بهترین بهبود در مقاومت فشاری (۷۲٪ افزایش) در مقدار ۴ درصد وزنی بوده است [۹]. از نانو دی اکسید سیلیسیم و آلومینیوم در بتن معمولی استفاده شده است که درصد بهینه ی این نانو مواد برای بهبود حداکثری مقاومت فشاری بتن، ۳ درصد وزنی سیمان نانو اکسید آلومینیوم و ۵ درصد وزنی سیمان نانو دی اکسید سیلیسیم (به ترتیب ۸٪ و ۳۰٪ بهبود) می باشد [۱۰]. در تحقیقی دیگر در کنار نانو دی اکسید سیلیسیم و نانو اکسید آلومینیوم از الیاف پلی پروپیلن (PP) نیز استفاده شده است که بالاترین بهبود مربوط به نانو دی اکسید سیلیسیم ۵ درصدی می باشد که در آن ۲ درصد حجمی بتن، الیاف PP استفاده شده است و مقدار این بهبود ۳۱ درصد می باشد که کمی بیشتر از بهبود نانو دی اکسید سیلیسیم ۵ درصد بدون الیاف می باشد [۱۱]. افزودن نانو دی اکسید سیلیسیم با مقادیر ۰/۳ و ۰/۹ درصد وزنی مواد سیمانی، به ترتیب باعث بهبود ۹ و ۱۲ درصدی در مقاومت فشاری شده است [۱۲]. در مطالعه دیگری از ۱۰ درصد وزنی مواد سیمانی نانو دی اکسید سیلیسیم استفاده شده است که بهبودی در حدود ۳۰ درصد در مقاومت فشاری نشان داده است [۱۳]. همچنین با بکار بردن ۱ و ۲ درصد نانو دی اکسید سیلیسیم بالاترین مقاومت فشاری مربوط به بتن حاوی ۲ درصد نانو سیلیکا با نسبت آب به سیمان ۰/۳۹ می باشد که ۱۱ درصد بهبود داشته است [۱۴]. در یک مقاله مروری [۱۵] به تحقیقات گوناگونی در مورد کاربرد نانو سیلیس اشاره شده است. از جمله استفاده از نانو سیلیکا در بتن HPC حاوی خاکستر بادی^۸ در درصدهای صفر، ۱، ۳، ۵، ۷ و ۹ بوده است که نشان دهنده ی بهبود مقاومت فشاری نمونه ها با افزایش مقدار نانو سیلیکا تا ۵ درصد است (۲۲٪ بهبود برای نمونه ی با سن ۳ روز) و با گذر از ۵ درصد و استفاده از ۷ و ۹ درصد نانو سیلیکا میزان این بهبود کاهش می یابد [۱۶].

سیلیکا^۱، نانو تیتانیا^۲، نانو آلومینا^۳ و نانو اکسید آهن (هماتیت^۴ و مگنتیت^۵) جزو نانو مواد پرکاربردی می باشند که استفاده از آنها نتایج مثبتی را در پی داشته است. درباره ی چگونگی استفاده از نانو مواد در مخلوط سیمانی، نحوه ی پخش یکنواخت و روش های مختلف آن، همچنین مقدار و روش بهینه، مطالعاتی انجام گرفته است [۱، ۲]. در صورت عدم پخش یکنواخت، کلوخه های ریز تشکیل شده (آگلومره) در حد میکرومتر باعث ایجاد ناحیه ی ضعیف و عدم دستیابی به خواص و ویژگی های منحصر به فرد این مواد می شود. نانو مواد را می توان در کل حجم بتن بکار برد و یا این که بصورت محلول درآورده و با هدف مشخص روی سطح مورد نظر افشانش کرد [۳]. در این مطالعه در جهت کاهش هزینه های ناشی از قیمت بالای نانو مواد، از این مواد به میزان مشخص در لایه بالایی نمونه ها استفاده شده است. در ادامه به برخی از مطالعات پیشین که در این زمینه انجام شده اند، اشاره شده است که بر اساس آزمایشات مختلف طبقه بندی شده اند.

۱-۱- مقاومت فشاری

بر اساس مطالعات صورت گرفته می توان گفت که نانوسیلیکا (Nano SiO₂) رایج ترین نانو ماده استفاده شده در ماتریس های سیمانی می باشد. اما از نانو مواد دیگری مانند Nano Al₂O₃، Nano TiO₂، Nano Fe₂O₃، Nano Fe₃O₄، Nano Clay و Nano ZrO₂ نیز استفاده شده است که به برخی از نتایج استفاده از آنها اشاره می شود. افزودن ۱، ۳ و ۵ درصد Nano SiO₂ و Nano TiO₂ به بتن معمولی نشانگر افزایش مقاومت فشاری به میزان ۱۲ درصد در نمونه حاوی ۱ درصد نانو سیلیکا و به میزان ۱۸ درصد در نمونه حاوی ۱ درصد نانو تیتانیا می باشد [۴، ۵]. در مطالعه دیگری از نانو اکسیدهای Fe، Ti، Zr، Al هرکدام به مقدار ۱/۵ درصد وزنی مواد سیمانی در بتن فوق توانمند^۶ استفاده شد و بهترین بهبود مقاومت فشاری برابر با ۵۵٪ در نمونه های حاوی نانو آلومینا گزارش شد [۶]. اضافه کردن نانو سیلیکا و نانو آلومینا به میزان ۰/۵ تا ۲ درصد و عمل آوری در دو حالت داخل آب و آب آهک نشان داد که در هر دو حالت نانو سیلیکا تأثیر بهتری نسبت به نانو آلومینا داشت و

- 1 Nano SiO₂ or Nano Silica (NS)
- 2 Nano TiO₂ or Nano Titania (NT)
- 3 Nano Al₂O₃ or Nano Alumina (NAL)
- 4 Nano Fe₂O₃ or Nano Hematite (NFe₂)
- 5 Nano Fe₃O₄ or Nano Magnetite (NFe₃)
- 6 High Performance Concrete (HPC)

7 Porous Concrete
8 fly ash

۲-۱- مقاومت در برابر سایش

استفاده از Nano SiO_2 و Nano TiO_2 و یاف پلی پروپیلن (PP) نشان داده که کاربرد درصد‌های کمتر این نانو مواد تأثیر بهتری روی مقاومت در برابر سایش داشته است به طوری که افزودن نانو دی‌اکسید تیتانیوم ۱ درصد بهتر از ۳ و ۵ درصد بوده است (به ترتیب ۱۸۱ و ۱۴۸ و ۹۰ درصد بهبود) و همچنین کاربرد نانو سیلیکا ۱ درصد نیز تأثیر بهتری نسبت به نانو سیلیکا ۳ درصد بر روی مقاومت سایشی داشته است (به ترتیب ۱۵۷ و ۱۰۱ درصد بهبود) [۵]. در مطالعه دیگری از $\text{Nano Al}_2\text{O}_3$ و Nano SiO_2 به مقدار ۰/۵ تا ۲ درصد وزنی استفاده شده که در آب و آب آهک عمل‌آوری شده و بهبود مقاومت سایشی نانو سیلیس بهتر از نانو آلومینا بوده است. میزان بهینه ی این مواد ۲ درصد وزنی مواد سیمانی بدست آمده است [۷]. از Nano SiO_2 بصورت کلئید با درصد‌های مختلف (۴، ۸ و ۱۲) و همچنین بصورت افشانش با مقادیر متفاوت (۲۵ و ۵۰ درصد) و تعداد دفعات مختلف (۱ تا ۳ بار) استفاده شده است. به طوری که یا در محلول کلئیدی ۲۸ روز عمل‌آوری شده و سپس مورد آزمایش قرار گرفته و یا در آب عمل‌آوری شده و بر سطح تمیز شده ی آن افشانش شده است که در تمامی موارد، مقدار بیشتر نانو دی‌اکسید سیلیسیوم (افشانش ۵۰ درصد سه بار و یا کلئید حاوی ۱۲ درصد) بهبود بهتری در آزمون سایش از خود نشان داده و مقادیر ۴۲ و ۳۲ درصد بهبود مقاومت در برابر سایش به ترتیب برای عمل‌آوری در کلئید حاوی نانو مواد و افشانش کردن به دست آمده است [۳]. افزودن Nano SiO_2 و Nano SiC در درصد‌های ۱، ۲ و ۳ به صورت مجزا و یا ترکیبی نشان می‌دهد که میزان بهینه برای ایجاد بهبود مقاومت سایشی در بتن برابر ۲ و ۳ درصد وزنی مواد سیمانی به ترتیب برای Nano SiO_2 و Nano SiC به دست آمده است (به ترتیب ۴۹ و ۶۸ درصد بهبود) و حالت ترکیبی نیز پاسخ بهتری (۷۵ درصد بهبود) نسبت به حالت مجزا نشان داده است [۱۷]. مقایسه استفاده از روبره بسیار ریز به میزان ۴۰٪ یا نانو سیلیس به میزان ۵٪ یا ترکیب ۵٪ نانو سیلیس و ۲۵٪ خاکستر بادی به صورت جایگزین سیمان نشان داد که به ترتیب مقاومت در برابر سایش بتن ۲۰، ۱۶ و ۱۳ درصد و مقاومت در برابر سایش ملات ۸۲، ۷۳ و ۶۸ درصد بهبود یافته است [۱۸].

۳-۱- مقاومت در برابر نفوذپذیری و جذب آب

استفاده از نانو ذرات سیلیس و تیتانیا و یاف (پلی پروپیلن) در بتن نشان‌گر بهبود ۳۱ و ۱۸ درصدی مقاومت در برابر نفوذ کلراید در نمونه‌های حاوی ۱ درصد نانو دی‌اکسید تیتانیوم و ۱ درصد نانو سیلیکا بوده است و یاف PP تأثیر منفی بر روی مقاومت در برابر نفوذ کلراید داشتند؛ همچنین در این مطالعه نمونه‌های حاوی درصد‌های پایین نانو مواد (۱ درصد) بهبود بهتری نسبت به نمونه‌های حاوی درصد بالاتر (۳ و ۵ درصد) در برابر نفوذ کلراید نشان دادند [۴]. نانو ذرات NTiO_2 ، NFe_3O_4 ، NZrO_2 و NAL_2O_3 به میزان ۱/۵ درصد در بتن HPC استفاده شدند. در جذب آب نمونه‌های حاوی NTiO_2 و NFe_3O_4 ۸۰٪ بهبود داشتند و در نفوذ کلراید NZrO_2 به همراه NAL_2O_3 تأثیر بهتری نسبت به سایر نانو مواد داشتند (۷۰٪ بهبود) [۶]. در یک مطالعه بر روی بتن متخلخل از نانو سیلیکا با مقادیر ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد و از میکرو سیلیکا به میزان ۳، ۵ و ۸ درصد به صورت جداگانه استفاده شده است که میکرو سیلیکا تأثیر بهتری از نانو سیلیکا بر روی مقاومت نفوذپذیری داشته است؛ به طوری که افزودن ۸ درصد میکرو سیلیکا بهبود حدود ۲۵ درصد و افزودن ۷ درصد نانو سیلیکا نیز بهبود حدود ۲۰ درصد در مقاومت نفوذپذیری نشان داده اند [۸]. با کاربرد $\text{Nano Fe}_2\text{O}_3$ به میزان ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد در بتن خودتراکم فوق توانمند، میزان بهینه ی نانو هماتیت برابر ۴ درصد بدست آمده، که حدود ۷۴ درصد بهبود در جذب آب نشان داده است [۹]. نانو اکسیدهای Al_2O_3 ، Fe_2O_3 ، Fe_3O_4 و Nano Clay تأثیرات مثبتی روی جذب آب مصالح سیمانی نشان داده‌اند و مقادیر بهینه ی مختلفی برای نویسندگان متفاوت بیان شده است (از ۰/۵ درصد تا ۴ درصد) که به نوع عمل‌آوری و همچنین دیگر مواد استفاده شده در اختلاط بتن بستگی دارد [۱۹]. نانو سیلیکا، نانو آلومینا و نانو هماتیت در دو نوع ملات حاوی خاکستر بادی و سیلیکا فوم به صورت مجزا و ترکیبی استفاده شده و نفوذپذیری و جذب آب آن‌ها بررسی شده است. افزودن ۱/۲۵ درصد نانو اکسید آلومینیوم در ملات حاوی سیلیکا فوم ۲۹ درصد بهبود در نفوذپذیری ایجاد کرده است [۲۰]. همچنین استفاده از ۱/۲۵ درصد ترکیب سه نانو ماده مذکور، در ملاتی که حاوی خاکستر بادی می باشد بهبود ۱۴ درصدی در جذب آب ملات ایجاد کرده است

جدول ۱. خلاصه مطالعات پیشین
Table 1. Summary of literature review

توضیحات	نوع عمل آوری	نوع بتن	درصد		نانو مواد	ویژگی‌های مورد بررسی	مرجع			
			درصد بهبود	وزنی بهینه نانو ماده						
از ماده‌ی کفزدا و الیاف پلی پروپیلن نیز استفاده شده است	اتاق رطوبت استاندارد	معمولی	۱۲	۱	۳ و ۱	NSiO ₂	مقاومت	Li & Zhang 2006,2011 [۵,۴]		
			۱۸		۵ و ۳ و ۱	NTiO ₂	فشاری			
			۱۵۷		۳ و ۱	NSiO ₂	سایش			
			۱۸۰		۵ و ۳ و ۱	NTiO ₂	نفوذپذیری			
			۱۸		۳ و ۱	NSiO ₂	کلر			
از متاکائولین و NZrO ₂ نیز استفاده شده است	آب	فوق توانمند (HPC)	۲۹	۱/۵	۱/۵	NFe ₃ O ₄	مقاومت	Shekari 2011 [۶]		
			۲۳			NTiO ₂	فشاری			
			۵۵			NAl ₂ O ₃	جذب آب			
			۸۲			NFe ₃ O ₄				
			۷۶			NTiO ₂				
از بازالت خورد شده نیز استفاده شده است	آب و آب آهک اشباع	معمولی	۷۱	۲	۲ و ۱/۵ و ۱ و ۰/۵	NSiO ₂	مقاومت	A. Nazari 2011 [۷]		
			۴۴			NAl ₂ O ₃	فشاری			
			۸۰			NSiO ₂	سایش			
			۷۷			NAl ₂ O ₃				
از استانداردهای ASTM و BS استفاده شده است	اتاق رطوبت استاندارد	متخلخل (PC)	۴۸	۵	۷ و ۵ و ۳ و ۱	NSiO ₂	مقاومت	Shirgir 2011 [۸]		
			۳۴			۵	۸ و ۵ و ۳		MSiO ₂	فشاری
			۲۰			۷	۷ و ۵ و ۳ و ۱		NSiO ₂	نفوذپذیری
			۲۵			۸	۸ و ۵ و ۳		MSiO ₂	
ماده‌ی کفزدا و سنگ آهک خورد شده استفاده شده است	آب	خودتراکم فوق توانمند (SCHPC)	۷۲	۴	۵ و ۴ و ۳ و ۲ و ۱	NFe ₂ O ₃	مقاومت	Khoshakhlagh 2012 [۹]		
			۷۴				۴		نفوذپذیری	
از الیاف پلی- پروپیلن نیز استفاده شده است	اتاق رطوبت استاندارد	معمولی	۳۰	۵	۷ و ۵ و ۳	NSiO ₂	مقاومت	Behfarnia & Salemi 2013 [۱۱,۱۰]		
			۸				۳		۳ و ۲ و ۱	NAl ₂ O ₃
از دستگاه اولتراسونیک برای پخش نانو ذرات استفاده شده است	آب	معمولی	۱۲	۰/۹	۰/۹ و ۰/۳	NSiO ₂	مقاومت	Hongjian Du 2014 [۱۲]		
			۴۵				۰/۳		نفوذپذیری	

ادامه جدول ۱. خلاصه مطالعات پیشین

مرجع	ویژگی‌های مورد بررسی	نانو مواد استفاده شده	درصد وزنی نانو مواد	درصد وزنی بهینه نانو ماده	درصد بهبود	نوع بتن	نوع عمل‌آوری	توضیحات
Saloma 2015 [۱۳]	مقاومت فشاری	NSiO ₂	۱۰	۱۰	۳۰	معمولی	آب	از پودر و سنگدانه‌ی کوارتز نیز استفاده شده است
Gonzalez 2016 [۱۴]	مقاومت فشاری	NSiO ₂	۱ و ۲	۲	۱۱	معمولی	اتاق رطوبت استاندارد	تعداد سیکل‌ها ۳۲۴ بوده است
P. Zhang 2014,2017 [۱۶, ۱۵]	مقاومت فشاری	NSiO ₂	۱ و ۳ و ۵ و ۷ و ۹	۵	۲۲	فوق توانمند (HPC)	اتاق رطوبت استاندارد	از خاکستر بادی نیز استفاده شده است. میزان بهبود در ۳ روز ذکر شده است
Ardalan Bani 2017 [۳]	سایش	محلول NSiO ₂	۵۰ و ۲۵	۵۰ سه بار	۳۲	معمولی	آب	نانو محلول بر روی نمونه‌ها افشانش شده است
			۱۲ و ۸ و ۴	۱۲	۴۲			نمونه‌ها در داخل محلول قرار گرفته‌اند
	۵۰ و ۲۵		۵۰ سه بار	۱۲	نانوسیلیس رقیق شده			
Yingli Gao 2017 [۱۷]	سایش	NSiO ₂	۳ و ۱ و ۲	در حالت تکی ۲	۴۹	معمولی حاوی خاکستر بادی	اتاق رطوبت استاندارد	نانو مواد یک بار به تنهایی و یک بار نیز به صورت ترکیبی استفاده شده‌اند
			۳ و ۱ و ۲	در حالت دوپل ۲	۷۵			نانو مواد یک بار به تنهایی و یک بار نیز به صورت ترکیبی استفاده شده‌اند
		NSiC	۳ و ۱ و ۲	در حالت تکی ۳	۶۸	معمولی حاوی خاکستر بادی		نانو مواد یک بار به تنهایی و یک بار نیز به صورت ترکیبی استفاده شده‌اند
			۳ و ۱ و ۲	در حالت دوپل ۲	۷۵			نانو مواد یک بار به تنهایی و یک بار نیز به صورت ترکیبی استفاده شده‌اند
Zhen He 2019 [۱۸]	سایش	NSiO ₂	۵	۵	۱۶	معمولی	اتاق رطوبت استاندارد	از روباره ریز آهن‌گذاری و خاکستر بادی نیز استفاده شده است
Rashad 2013 & Meral	نفوذپذیری	NaAl ₂ O ₃	۰/۵ و ۱/۲۵	۱/۲۵	۲۹	ملات معمولی	آب آهک اشباع	ملات حاوی سیلیکافوم
		NFe ₂ O ₃	۲/۵ و ۱/۵	۰/۵	۲۶			ملات حاوی سیلیکافوم

ادامه جدول ۱. خلاصه مطالعات پیشین

مرجع	ویژگی‌های مورد بررسی	نانو مواد استفاده شده	درصد وزنی نانو مواد	درصد وزنی بهینه نانو ماده	درصد بهبود	نوع بتن	نوع عمل‌آوری	توضیحات
oltulu 2011,2013 [۲۱-۱۹]	جذب آب	NSiO ₂	۱/۲۵	۱۵	ملات حاوی خاکستر بادی			
		NAI ₂ O ₃	۰/۵	-۳				
		NFe ₂ O ₃	۰/۵	۵				
Alireza Naji Givi 2011 [۲۲]	نفوذپذیری	NSiO ₂	۰/۵ و ۱	۲۱	برای سایز ۱۵nm ۲درصد برای سایز ۸۰nm ۰/۵درصد	معمولی	آب	در دو سایز ۱۵ و ۸۰ نانومتر استفاده شده است
			۱/۵ و ۲	۱۱				
Balapur 2018 & Quercia 2014 [۲۴, ۲۳]	نفوذپذیری	NSiO ₂	۳/۸	۳/۸	۸۸	خودتراکم (SCC)	آب	در NSiO ₂ حالت کلوئیدی و پودری استفاده شده است

مطالعه تأثیر Nano SiO₂ بر روی خواص مکانیکی و دوام بتن در تحقیقات مختلف مرور شده است [۲۳]. از نانو سیلیکا در حالت های کلوئیدی و پودری استفاده شده است که افزودن ۳/۸ درصد وزنی نانو سیلیکا باعث بهبود ۸۸ درصدی در نفوذپذیری آب شده است [۲۴]. مطالعات پیشین بررسی شده در بخش‌های ۱-۱ الی ۱-۳ جهت مقایسه در جدول ۱ دسته‌بندی شده است. در مطالعات مورد اشاره، چند مشخصه مکانیکی محدود با افزودن یک یا دو نانو ماده بررسی شده است. با توجه به عدم تطابق کامل نتایج مطالعات قبلی در میزان بهینه نانو مواد مصرفی و در میزان بهبود حاصل شده در مشخصه مکانیکی مورد بررسی، و همچنین عدم بررسی مشخصات مکانیکی مؤثر در رویه‌های بتنی بصورت همزمان و تحت شرایط یکسان آزمایشگاهی، و همین‌طور تنوع کمتر نانو مواد بررسی شده در مطالعات پیشین جهت شناخت نانو مواد مؤثرتر، لزوم پژوهش حاضر با جزئیاتی که در ادامه اشاره خواهد شد و تحقیقات بیشتر در آینده، در راستای افزودن به دانسته‌های محدود قبلی در این حوزه ضروری به نظر می‌رسد. در این مطالعه نفوذپذیری، مقاومت در برابر سایش و مقاومت فشاری بتن بررسی شده است. نمونه‌هایی که در این مطالعه مورد

[۲۱]. استفاده از ۰/۳ و ۰/۹ درصد Nano SiO₂ نیز می‌تواند بهبود مناسبی در نفوذپذیری آب نشان دهد، به طوری که افزودن ۰/۳ درصد نانو سیلیکا بهبود ۵۶ درصدی در نفوذپذیری بتن ایجاد کرده است [۱۲]. در یک تحقیق از دو نوع نانو سیلیکا، یکی با اندازه ی ذرات ریز (۱۵ نانومتر) و دیگری با اندازه ی ذرات درشت (۸۰ نانومتر)، و از هرکدام ۴ درصد متفاوت (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲) استفاده شده و نفوذپذیری آب مورد آزمایش قرار گرفته است که در طولانی مدت نانو ذرات درشت‌تر تأثیر بهتری بر روی بهبود نفوذپذیری داشته است (نزدیک به ۲۳ درصد با استفاده از ۲ درصد وزنی مواد سیمانی نانو سیلیکا درشت‌دانه)؛ ولی در کوتاه مدت تأثیر نانو مواد ریزتر بهتر بوده است [۲۲]. از کلوئید نانو دی‌اکسید سیلیسیوم به دو روش مختلف (افشانش کردن و یا عمل‌آوری در کلوئید نانو سیلیکا) برای بهبود خاصیت نفوذپذیری استفاده شده که بهترین نتیجه برای حالتی بوده که نمونه‌ها در کلوئید حاوی ۱۲ درصد نانو سیلیکا عمل‌آوری شدند و ۳۱ درصد بهبود در نفوذپذیری آب نشان داده شده است. همچنین با ۲ بار افشانش کردن محلول حاوی نانو سیلیکا با غلظت ۵۰ درصد، بهبود ۱۲ درصدی در نفوذپذیری حاصل شده است [۳]. در یک

جدول ۲. مشخصات نانو مواد مورد استفاده
Table 2. The properties of nanomaterials used

Nano Fe ₃ O ₄	Nano Fe ₂ O ₃	Nano Al ₂ O ₃	Nano TiO ₂	Nano SiO ₂	نانو مواد
۲۰-۳۰	۲۰-۴۰	۵۰	۲۰	۲۰-۳۰	قطر (نانومتر)
۴۰-۶۰	۲۰-۶۰	>۱۹	۱۰-۴۵	۱۸۰-۶۰۰	مساحت سطح ویژه (مترمربع بر گرم)
۹۸+	۹۸+	۹۹+	۹۹+	۹۹+	خلوص (%)

بر روی مشخصه های مکانیکی مذکور در شرایط یکسان آزمایشگاهی در بتن خودتراکم به ویژه در کاربرد ابتکاری بصورت یک لایه نازک از بتن خود تراکم حاوی نانو ذرات بر روی بتن معمولی است که می تواند مزایای اقتصادی و اجرایی هم در کف سازی های بتنی جدید و هم در مقاوم سازی کف سازی های بتنی موجود داشته باشد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مصالح

نانو مواد به کار رفته در این مطالعه، به صورت اکسید فلزات مختلف به شکل پودری با مشخصات مطابق جدول ۲ و محصول شرکت US- (US Research Nanomaterials) می باشند. نانو ذرات پودری با توجه به فراوانی تولید و استفاده ی آسان تر بیشتر مورد توجه قرار داشته اند. برخی از این نانو مواد دارای خصوصیات ممتازی هستند، مانند نانو سیلیس که علاوه بر خاصیت پرکنندگی و متراکم کردن محیط سیمانی با خاصیت پوزولانی و سطح ویژه بالاتر نسبت به مواد در مقیاس ماکرو، باعث همگنی و استحکام بیشتر محیط سیمانی می شود. از این رو و با توجه به نتایج مثبت ولی محدود گزارش شده در تحقیقات پیشین، این نانو مواد در جهت شناخت بهتر ویژگی های آنها انتخاب شده اند. همچنین مقادیر بکار رفته از هر نانو ماده در این مطالعه، با بررسی تحقیقات پیشین و بر اساس بهترین نتایج گزارش شده انتخاب شده اند. میزان بهینه هر نانو ماده در مطالعات پیشین با نانو ماده ی دیگر متفاوت بوده است. از این رو درصدهای کم، متوسط و بالای انتخاب شده برای هر نانو ماده با نانو ماده ی دیگر متفاوت بوده؛ ولی شرایط یکسان آزمایش برای تمامی نمونه ها، سبب مقایسه ی صحیحی بین مقادیر متفاوت هر نانو ماده می شود. ذکر این نکته نیز ضروری است که نانو مواد استفاده شده در این تحقیق از نانو مواد پر کاربرد در مطالعات قبلی انتخاب شده است تا از این طریق مقایسه ی درستی با نتایج تحقیقات قبلی انجام گرفته و بررسی شود که کدام یک از نانو مواد استفاده شده در تحقیقات پیشین تأثیر

جدول ۳. مشخصات فوق روان کننده مورد استفاده
Table 3. The properties of superplasticizer used

ظاهر	مایع زرد روشن متمایل به قرمز
pH	۶/۵
جرم حجمی	۱/۱ کیلوگرم بر لیتر، در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد
میزان کلراید	کمتر از ۰/۱ درصد
میزان مواد قلیایی	کمتر از ۱/۵ گرم Na ₂ O در هر لیتر

آزمایش قرار گرفته اند دارای دو بخش رویی و زیرین می باشند. لایه بالایی از ۱ سانتی متر بتن خودتراکم^۱ حاوی مقادیر مختلف نانو ذرات و بخش زیرین از بتن معمولی^۲ ساخته شده که ضخامت آن در هر آزمایش متفاوت است. برای هر کدام از سه آزمون مورد بررسی یک سری نمونه کنترل تهیه شده که بتن خودتراکم نمونه های کنترل حاوی نانو ماده نیست. در مجموع ۱۴۴ نمونه در این مطالعه تهیه شده و مورد بررسی قرار گرفته و بدین ترتیب تأثیر افزودن مقادیر متفاوت از ۵ نوع نانو ماده مختلف با یکدیگر و با نمونه های کنترل مقایسه شده است. این پنج نوع نانو ماده به صورت پودری و شامل اکسید فلزات سیلیسیوم، تیتانیوم، آلومینیوم و آهن هستند. اثر افزودن مقادیر متفاوت نانو ذرات مذکور در لایه بتن خودتراکم رویه، بر بهبود مشخصات مکانیکی مورد اشاره، بحث و مقایسه شده و مقدار بهینه هر کدام بدست آمده است. با توجه به هزینه بالای نانو مواد در حال حاضر، روش پیشنهادی برای استفاده از آنها فقط در لایه رویه، می تواند صرفه اقتصادی قابل توجهی به همراه داشته باشد. همچنین این ایده در مقاوم سازی کف سازی های بتنی موجود قابل بررسی است. هدف از مطالعه حاضر مقایسه تأثیر مقادیر متفاوت از نانو ذرات مختلف

1 Self-Compacting Concrete (SCC)

2 Conventional Concrete (CC)

بهتری بر روی مشخصه ی خاصی از بتن دارد.

حداکثر اندازه ی سنگدانه های بتن خودتراکم لایه بالایی و بتن معمولی به ترتیب ۲/۳۸ و ۱۹ میلی متر انتخاب شدند. همچنین مدول نرمی ماسه بتن خودتراکم و بتن معمولی به ترتیب برابر ۳ و ۳/۴ هستند [۲۵]. سیمان مصرفی از نوع پرتلند نوع ۲ و فوق روان کننده مورد استفاده از نوع پلی کربوکسیلیک و محصول شرکت Fosroc با نام تجاری Structuro 335 و مشخصات مطابق جدول ۳ می باشد و آب مصرفی، آب شرب محلی است.

۲-۲- طرح های اختلاط

پس از بررسی چند طرح اختلاط برای بتن خودتراکم و معمولی، طرح اختلاط نهایی مطابق جدول ۴ انتخاب شد. نمونه ها پس از ۲۴ ساعت از قالب بیرون آورده شدند و به مدت ۲۸ روز در داخل آب با دمای ۲۴ درجه ی سانتیگراد عمل آوری شدند. اسلامپ بتن معمولی (CC) برابر با ۷ سانتی متر بوده است و برای تعیین روانی بتن خودتراکم (SCC) از آزمایش میز سیلان بر اساس استاندارد ASTM C1437 [۲۶] استفاده شده است که میزان روانی آن نیز در حد استاندارد به دست آمده است.

برای آزمون مقاومت فشاری نمونه های مکعبی با بعد ۵ سانتی متر، برای آزمون نفوذپذیری نمونه های مکعبی با بعد ۱۵ سانتی متر و برای آزمون مقاومت در برابر سایش نمونه های با ابعاد ۳×۱۵×۱۵ سانتی متر استفاده شده است. نمونه های مقاومت فشاری از بتن خودتراکم حاوی نانو مواد تهیه شده ولی در سایر نمونه ها فقط یک سانتی متر لایه بالایی از بتن خودتراکم حاوی نانو مواد بوده و قسمت زیرین نمونه ها از بتن معمولی ساخته شده است. طرح های اختلاط بتن خودتراکم حاوی انواع نانو مواد با درصد های مختلف در جدول ۵ قابل مشاهده است. نانو مواد معمولاً به صورت درصد وزنی از سیمان یا مواد سیمانی به مخلوط بتن افزوده می شود. در بتن خودتراکم برای نمونه های مختلف به جز نمونه ی کنترل، نانو مواد جایگزین بخشی از سیمان شده است. در جدول ۵ تنها به طرح های اختلاط بتن خودتراکم مورد استفاده در لایه بالایی نمونه ها اشاره شده است و طرح اختلاط بتن معمولی لایه زیرین مطابق جدول ۴ می باشد. در نام گذاری نمونه ها از نام نانو ماده موجود در آن طرح و میزان آن نانو ماده استفاده شده است. مثلاً در نمونه ی NFe_3MP از نانو مگنتیت (NFe_3) با درصد متوسط (MP) استفاده شده است.

۲-۳- پخش نانو مواد

پخش یکنواخت عامل بسیار مؤثری در ایجاد تأثیرات مثبت نانو مواد در ماتریس سیمانی می باشد. روش های مختلفی برای پخش نانو مواد وجود دارد که به روش های فیزیکی و شیمیایی تقسیم بندی می شوند. از جمله این روش ها می توان به همزن با نیروی برشی بالا^۱، همزن مکانیکی^۲، همزن اولتراسونیک^۳ و استفاده از ماده فعال سطحی^۴ اشاره کرد. همچنین می توان از روش های فیزیکی و شیمیایی به صورت ترکیبی نیز استفاده کرد که در این صورت تأثیر بهتری نیز بر روی پخش خواهند داشت [۱، ۲]. در اکثر مطالعات صورت گرفته از فوق روان کننده که جزو مواد فعال سطحی محسوب می شود، برای پخش نانو مواد استفاده شده است. ماده فعال سطحی جذب شده در سطح نانو مواد، توسط قسمت آب دوست خود، انحلال پذیری در آب را فراهم می کند. معمولاً ماده فعال سطحی را در آب حل کرده و سپس نانو ماده به این محلول افزوده و بعد به مخلوط سنگدانه ها و سایر مواد بتن اضافه می شود. استفاده از همزن مکانیکی به تنهایی منجر به ته نشینی سریع نانو ذرات در محلول آبی می شود، از این رو، برای رسیدن به پخش یکنواخت و پایدار در مطالعه حاضر از فوق روان کننده در کنار همزن مکانیکی استفاده شده است.

بر اساس مطالعات موجود در ادبیات فنی، درصد بهینه فوق روان کننده که در جهت ایجاد روانی و کارآیی لازم در بتن و دستیابی به توزیع مناسب نانو مواد به کار گرفته می شود، در محدوده ۰/۵ تا ۲ درصد وزنی مواد سیمانی معرفی شده است [۵، ۶، ۹]. لذا در این مطالعه نیز، مقدار ۲ درصد فوق روان کننده استفاده شده است. در این بخش از مطالعه، تأثیر فوق روان کننده استفاده شده بر روی پخش نانو مواد و پایداری پخش در مدت زمان مورد نیاز طی آزمایشی بررسی شده است. بدین صورت که یکبار نانو مواد به آب اضافه شده و توسط همزن مکانیکی مخلوط شد و بار دیگر همان مقدار نانو مواد در آبی که حاوی فوق روان کننده بود مخلوط شد و از سوسپانسیون های حاصل پس از گذشت ۰، ۵، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه عکس برداری شده و مشاهده شد که محلول بدون فوق روان کننده به سرعت و در مدت کمتر از ۵ دقیقه کاملاً ته نشین شده، ولی محلول حاوی فوق روان کننده (مطابق شکل ۱) حتی پس از گذشت ۶۰ دقیقه

- 1 High shear mixing
- 2 Mechanical stirring
- 3 Ultrasonication
- 4 Surfactant

دقیقه با سرعت متوسط مخلوط شده و در انتها بتن SCC حاوی نانو مواد در یک سانتی‌متر بالای قالب‌هایی که از قبل لایه زیرین آن‌ها با بتن معمولی پر شده‌اند، ریخته شده و به مدت ۲۴ ساعت در قالب نگهداری شده‌اند. ذکر این نکته ضروری است که مراحل اختلاط بتن معمولی نیز همزمان با بتن خودتراکم انجام شده است و چند دقیقه مانده به اتمام اختلاط بتن خودتراکم، بتن معمولی تا یک سانتی‌متر مانده به سطح قالب‌ها، در آن‌ها ریخته و متراکم شده است. برای

همچنان پایداری خود را حفظ کرده است. روش اختلاط به این صورت می‌باشد که آب و فوق‌روان‌کننده با هم مخلوط شده و سپس نانو مواد به این مخلوط افزوده شده است و این سه ترکیب به مدت ۵ دقیقه در همزن مخصوص با دور تند مخلوط شده‌اند، همزمان مصالح خشک بتن خودتراکم در مخلوط کن دیگری با سرعت متوسط مخلوط شده‌اند. پس از این مدت، آب حاوی فوق‌روان‌کننده و نانو ماده به مصالح خشک افزوده شده و به مدت ۳۰

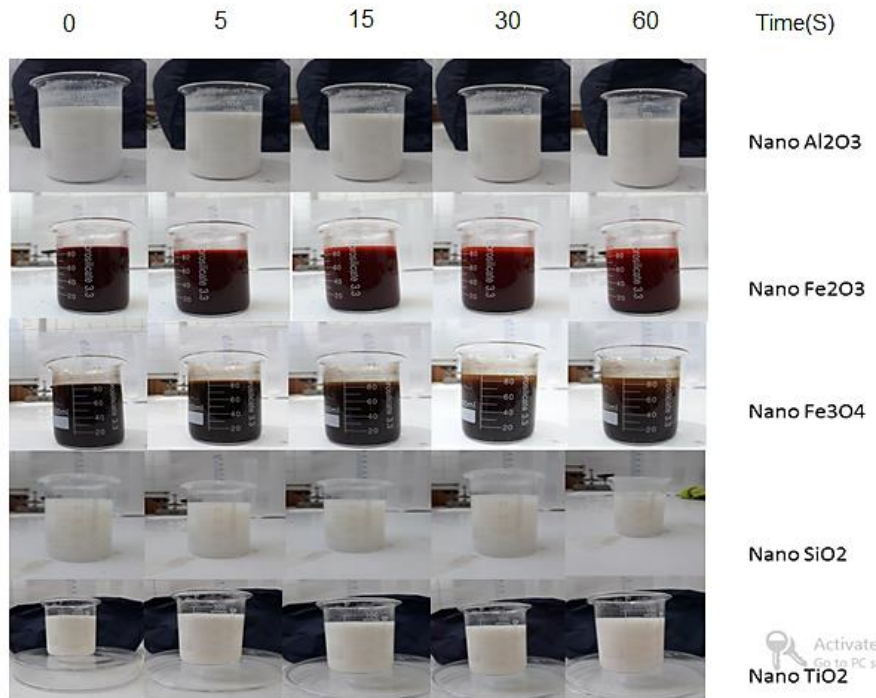
جدول ۴. طرح اختلاط نهایی بتن معمولی و بتن خودتراکم
Table 4. Final mix proportions of normal and self-compacting concrete

نام طرح	سیمان	آب	میکرو سیلیس	پودر سنگ آهک	فوق‌روان‌کننده	ماسه	شن	وزن واحد حجم
SCC	۵۶۴/۶	۱۷۹	۷۷	۱۸۵	۱۳	۱۳۰۴	----	۲۳۲۰
CC	۳۴۵	۱۸۹	----	----	----	۱۰۶۴	۸۶۷	۲۵۱۷

می‌باشند (kg/m^3) تمامی مقادیر بر حسب

جدول ۵. طرح اختلاط بتن خودتراکم استفاده شده لایه بالایی نمونه‌ها
Table 5. Mix proportions of self-compacting concrete used in the top layer of specimens

نام طرح	نوع نانو مواد	مقدار مواد (درصد وزنی سیمان)	مقدار نانو مواد (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	سیمان (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	پودر سنگ آهک (kg/m^3)	میکرو سیلیس (kg/m^3)	فوق‌روان‌کننده (kg/m^3)
SCC	----	----	----	۱۷۹	۵۶۴/۶	۱۳۰۴	۱۸۵	۷۷	۱۳
NTLP	۱	۵/۶	۱۷۹	۵۵۹/۰	۱۳۰۴	۱۳۰۴	۱۸۵	۷۷	۱۳
NTMP	Nano TiO_2	۲	۱۱/۳	۱۷۹	۵۵۳/۳	۱۳۰۴	۱۸۵	۷۷	۱۳
NTHP		۳	۱۶/۹	۱۷۹	۵۴۷/۷	۱۳۰۴	۱۸۵	۷۷	۱۳
NAILP		۱/۵	۸/۵	۱۷۹	۵۵۶/۱	۱۳۰۴	۱۸۵	۷۷	۱۳
NAIMP	Nano Al_2O_3	۲	۱۱/۳	۱۷۹	۵۵۳/۳	۱۳۰۴	۱۸۵	۷۷	۱۳
NAIHP		۳	۱۶/۹	۱۷۹	۵۴۷/۷	۱۳۰۴	۱۸۵	۷۷	۱۳
NFe ₂ LP		۱	۵/۶	۱۷۹	۵۵۹/۰	۱۳۰۴	۱۸۵	۷۷	۱۳
NFe ₂ MP	Nano Fe_2O_3	۳	۱۶/۹	۱۷۹	۵۴۷/۷	۱۳۰۴	۱۸۵	۷۷	۱۳
NFe ₂ HP		۴	۲۲/۶	۱۷۹	۵۴۲/۰	۱۳۰۴	۱۸۵	۷۷	۱۳
NFe ₃ LP		۱	۵/۶	۱۷۹	۵۵۹/۰	۱۳۰۴	۱۸۵	۷۷	۱۳
NFe ₃ MP	Nano Fe_3O_4	۳	۱۶/۹	۱۷۹	۵۴۷/۷	۱۳۰۴	۱۸۵	۷۷	۱۳
NFe ₃ HP		۴	۲۲/۶	۱۷۹	۵۴۲/۰	۱۳۰۴	۱۸۵	۷۷	۱۳
NSLP		۱	۵/۶	۱۷۹	۵۵۹/۰	۱۳۰۴	۱۸۵	۷۷	۱۳
NSMP	Nano SiO_2	۳	۱۶/۹	۱۷۹	۵۴۷/۷	۱۳۰۴	۱۸۵	۷۷	۱۳
NSHP		۵	۲۸/۲	۱۷۹	۵۳۶/۴	۱۳۰۴	۱۸۵	۷۷	۱۳



شکل ۱. مقایسه‌ی زمان پایداری سوسپانسیونهای حاوی نانو مواد
Fig. 1. Comparison of the stability time of suspensions containing nanomaterials

به مدت ۷۲ ساعت تحت فشار آب به میزان ۵ bar قرار گرفته و پس از این مدت، میزان آب مصرفی که بر حسب میلی‌لیتر روی دستگاه مشخص می‌باشد، ثبت شده است. سپس نمونه‌ها از دستگاه خارج و مطابق با آزمون برزیلی (کشش غیر مستقیم) شکسته شده تا نمونه به دو نیم شود و عمق نفوذ آب به داخل بتن بر حسب میلی‌متر اندازه گرفته و ثبت شده است. در نهایت میانگین داده‌های حاصل از سه آزمون هر یک از اختلاط‌ها محاسبه و به عنوان نتیجه نهایی ثبت گردیده است.

۲-۵- آزمایش سایش

آزمون سایش بر اساس استاندارد ASTM C944 انجام شده است [۲۸]. برای این آزمون از نمونه‌هایی با طول و عرض ۱۵ سانتی‌متر و ضخامت ۳ سانتی‌متر استفاده شده است. به نحوی که ابتدا نمونه بر روی دستگاه به وسیله گیره ثابت شده است، سپس بخش ساینده دستگاه با اهرم دستی به پایین آورده شده تا بر روی سطح نمونه قرار گیرد و بعد دستگاه بکار انداخته شده است تا به مدت ۲ دقیقه بخش ساینده دستگاه بطور دورانی بر روی نمونه چرخیده و سطح نمونه را سایش دهد، که این کار برای سه بار متوالی در قسمت‌های مختلف سطح نمونه انجام شده و در نهایت، میانگین



شکل ۲. دستگاه سایش و نحوه‌ی کار آن
Fig. 2. Abrasion resistance test machine

پیوستگی بهتر بین دو لایه بتن، بر روی بتن معمولی زیرین شیارهایی ایجاد شد. پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از قالب خارج و داخل حوضچه‌ی آب با دمای ۲۴ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شده و سپس مورد آزمایش‌های مختلف قرار گرفتند.

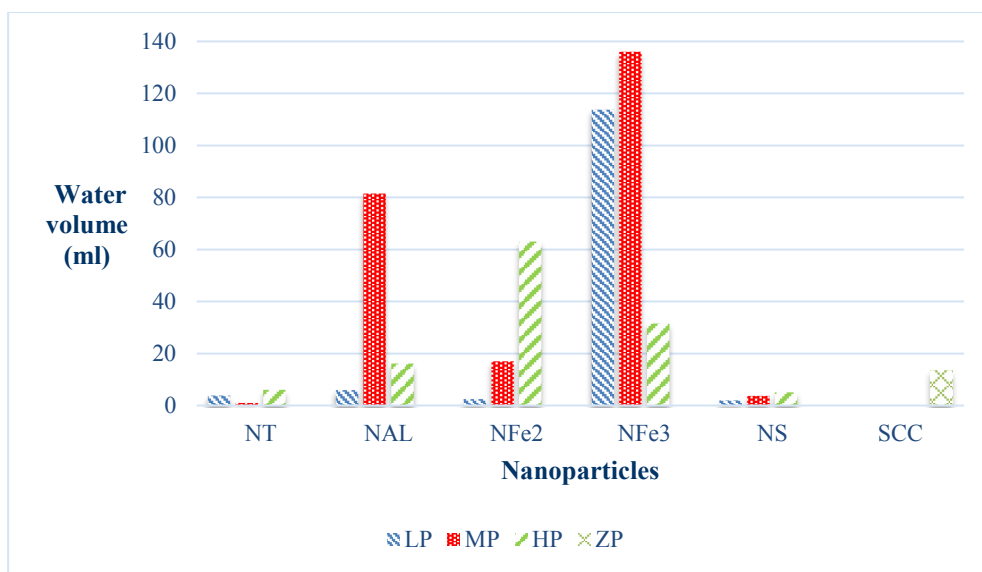
۲-۴- آزمایش نفوذپذیری آب

آزمون نفوذپذیری طبق استاندارد BS EN 12390-8 انجام شده است [۲۷]. هر سری از نمونه‌ها در دستگاه سنجش نفوذپذیری

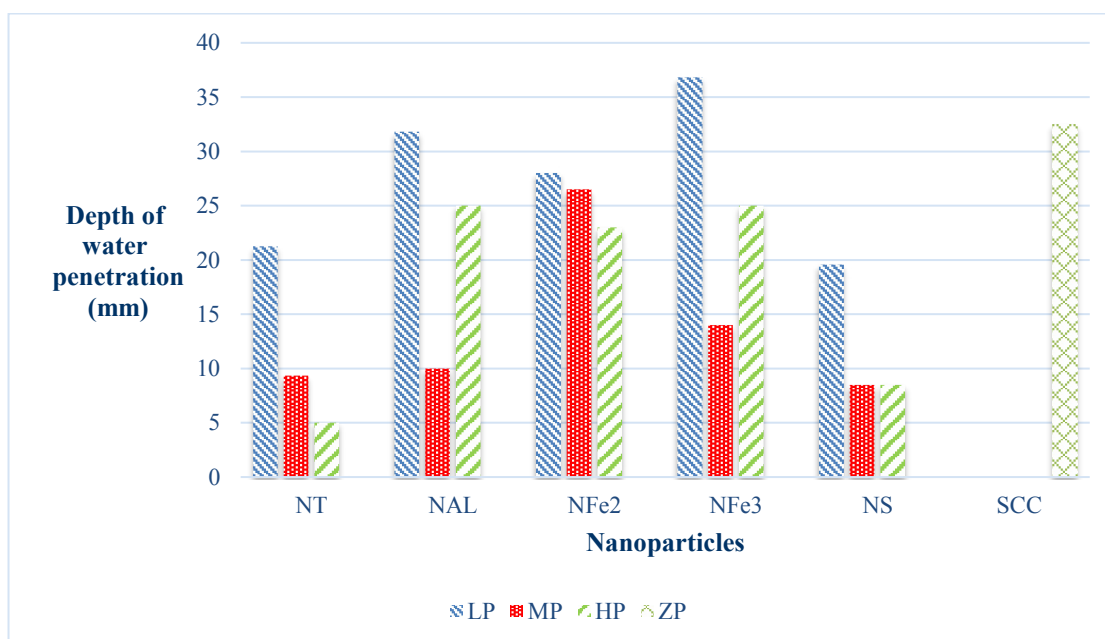
۲-۶- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری طبق استاندارد ASTM C109 انجام شده است [۲۹]. نمونه های مورد استفاده برای این آزمون، نمونه های مکعبی به بعد ۵ سانتی متر بتن خودتراکم می باشند. این آزمون برای ۵ نانو ماده انجام شده است که برای هر نانو ماده ۳ سری (برای سه درصد متفاوت) و هر سری شامل ۳ آزمون می باشد، این نمونه ها بعد

جرم های از دست رفته در هر سه مرحله ثبت شده است. بخش ساینده در هنگام چرخش به وسیله ی وزنه هایی که در قسمت بالای دستگاه تعبیه شده است بر سطح نمونه ها فشرده شده است که مقدار این وزنه ها بر اساس استاندارد برابر ۲۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده است (شکل ۲).



شکل ۳. میزان آب مصرفی دستگاه تحت آزمایش نفوذپذیری
Fig. 3. The amount of water consumed in the permeability test



شکل ۴. عمق نفوذ آب تحت آزمایش نفوذپذیری
Fig. 4. Depth of water penetration in the permeability test

بهبود نفوذپذیری و NFe_3MP با ۵۷٪ بهبود نفوذپذیری، میزان آب مصرفی دستگاه، متناسب با عمق نفوذ نیست. بالا بودن آب مصرفی دستگاه نفوذ پذیری و کم بودن عمق نفوذ آب نشانگر احتمال نشت آب از کناره‌های نمونه و عدم اعمال فشار آب مورد نظر بر روی نمونه مورد آزمایش می‌باشد. لذا در نمونه‌هایی که عمق نفوذ آب کاهش پیدا کرده و مقدار آب مصرفی دستگاه نفوذپذیری متناسب با آن مقدار کمی می‌باشد، با اطمینان بالاتری می‌توان به اثر مناسب نانو ماده افزوده شده در بهبود نفوذپذیری نمونه اشاره کرد. برای مثال نمونه‌های حاوی نانو اکسیدهای تیتانیوم و نانو سیلیس بالاترین بهبود نفوذپذیری بتن در برابر آب را نشان دادند.

همان‌طور که از شکل ۴ مشخص می‌باشد، مقادیر نانو مواد بکار رفته در رویه بتن خود تراکم نمونه‌ها که بهترین اثر را در کاهش عمق نفوذ داشته‌اند در نانو ذرات تیتانیا، آلومینا، هماتیت، مگنتیت و

از ۲۴ ساعت از قالب خارج و تا سن ۲۸ روزه در داخل آب عمل‌آوری شده‌اند و سپس تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. میانگین مقاومت فشاری سه آزمون در هر سری، محاسبه شده است.

۳- بررسی نتایج

۳-۱- آزمایش نفوذپذیری آب

نتایج آزمایش نفوذپذیری آب در اشکال ۳ و ۴ و جدول ۶ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در تمامی موارد به غیر از نمونه NFe_3LP ، بهبود در مقاومت نفوذپذیری رخ داده است؛ ولی این بهبود در برخی نانو مواد و برخی درصدها بسیار مشهود می‌باشد. برای مثال نمونه‌های $NSMP$ و $NTHP$ به ترتیب با ۸۴/۶٪ و ۷۳/۸٪ بالاترین بهبود نفوذپذیری را در بین سایر نمونه‌ها داشتند که میزان آب مصرفی دستگاه نیز متناسب با این مقدار نفوذ و مقدار کمی می‌باشد. با این وجود در نمونه‌هایی مانند $NAIMP$ با ۶۹/۲٪

جدول ۶. نتایج آزمون نفوذپذیری آب
Table 6. Results of water permeability test

نام طرح	نوع نانو مواد	مقدار نانو مواد (درصد وزنی سیمان)	آب مصرفی دستگاه (ml)			عمق نفوذ آب (mm)			بهبود نفوذپذیری (%)		
			آزمون اول	آزمون دوم	آزمون سوم	میانگین	آزمون اول	آزمون دوم		آزمون سوم	
SCC	----	----	۱۱/۵	۱۴/۹	۱۳/۵	۱۳/۳	۳۱/۵	۳۶	۳۰	۳۲/۵	----
NTHP	۱	۱	----	۴	۳/۷	۳/۸۵	----	۲۰	۲۲/۵	۲۱/۲۵	۳۴/۶
NTMP	۲	۲	۱	۱	۱	۱	۸	۹/۳	۱۰/۷	۹/۳۳	۷۱/۳
NTHP	(۳)	(۳)	۵/۴	۵/۸	۶/۸	۶	۵/۵	۵/۲	۴/۳	۵	۸۴/۶
NAILP	۱/۵	۱/۵	۶/۱	۵/۵	۶	۵/۸۷	۳۰/۸	۳۳	۳۱/۷	۳۱/۸۳	۲
NAIMP	(۲)	(۲)	۸۱/۴	۹۳/۶	۶۹/۵	۸۱/۵	۱۱	۹	۱۰	۱۰	۶۹/۲
NAIHP	۳	۳	۱۶	۱۴	۱۸/۵	۱۶/۱۷	۲۷	۲۳	۲۵	۲۵	۲۳/۱
NFe_2LP	۱	۱	۲/۱	۲/۷	۲/۵	۲/۴۳	۲۴	۲۴	۳۰	۲۸	۱۳/۸
NFe_2MP	۳	۳	۱۹	----	۱۵	۱۷	۲۴	----	۲۹	۲۶/۵	۱۸/۵
NFe_2HP	(۴)	(۴)	۷۲	۶۰	۵۷	۶۳	۱۹/۶	۲۴/۴	۲۵	۲۳	۲۹/۲
NFe_3LP	۱	۱	۱۲۰	۹۸	۱۲۳	۱۱۳/۷	۳۹	۳۴	۳۷/۵	۳۶/۸۴	-۱۳/۳
NFe_3MP	(۳)	(۳)	۱۴۱	۱۳۱	----	۱۳۶	۱۵	۱۳	----	۱۴	۵۶/۹
NFe_3HP	۴	۴	۳۶	۲۷	----	۳۱/۵	۲۲	۲۸	----	۲۵	۲۳/۱
NSLP	۱	۱	۱/۸	۲/۲	۲	۲	۱۸	۱۸/۲	۲۲/۵	۱۹/۵۷	۳۹/۸
NSMP	(۳)	(۳)	۳/۲	۳/۷	۴	۳/۶۵	۹/۵	۸/۷	۷/۳	۸/۵	۷۳/۸
NSHP	۵	۵	۴/۴	۵/۱	۵/۵	۵	۷/۵	۹	۹	۸/۵	۷۳/۸

*مقادیر داخل پرانتز، مقادیر بهینه در آزمون نفوذپذیری آب می‌باشند.

که بهبود ۸۰ درصدی در جذب آب نشان داده است (در ترکیب آن ۱۵ درصد وزنی مواد سیمانی متاکائولین نیز بکار رفته است). میزان استفاده بهینه از نانو اکسید آلومینیوم جهت بهبود نفوذپذیری در این مطالعه برابر ۲ درصد بدست آمده است (با ۶۹% بهبود)؛ ولی در مطالعه [۳۱]، میزان بهینه نانو اکسید آلومینیوم برای بتن SCC که از افزودنی روباره آهن گذاری (GGBFS) در آن استفاده شده است برابر ۳ درصد به دست آمده است. همچنین میزان بهینه نانو اکسید آلومینیوم برای بهبود جذب آب در مطالعه [۱۱]، برابر ۳ درصد به دست آمده که بهبود ۲۳ درصدی در آن ایجاد کرده است. همچنین میزان بهینه نانو آلومینا برای ملات حاوی سیلیکافیوم برابر ۱/۲۵ درصد بدست آمد که بهبود ۲۹ درصدی در نفوذپذیری آب حاصل شد [۲۰]. میزان استفاده ی بهینه نانو سیلیکا برای بهبود نفوذپذیری در این مطالعه، ۳ و ۵ درصد بدست آمده (با ۷۴% بهبود) که تا حدودی مشابه مطالعه [۲۴] می باشد که با ۳/۸ درصد نانو سیلیکا، بهبود ۸۸ درصدی در نفوذپذیری آب برای بتن خودتراکم به دست آمده است؛

سیلیکا به ترتیب برابر ۳%، ۲%، ۴%، ۳% و ۳% می باشند. مقادیر نانو مواد مورد استفاده در این تحقیق بر اساس درصد های بهینه بدست آمده از مطالعات پیشین انتخاب شده است که تفاوت در نوع بتن و نوع عمل آوری و روش آزمایش در این تحقیق با سایر مطالعات پیشین می تواند باعث مشاهده برخی تفاوت ها در نتایج باشد.

۳-۱-۱- مقایسه ی نتایج این مطالعه با مطالعات پیشین

میزان استفاده ی بهینه از نانو هماتیت جهت بهبود نفوذپذیری در این تحقیق برابر ۴ درصد وزنی سیمان بدست آمده است (با ۲۹% بهبود) که با نتیجه مطالعات [۹، ۳۰] مشابه است که در آن ها نیز مقدار بهینه ۴ درصد بدست آمده است. البته با این تفاوت که در آن تحقیقات جذب آب بررسی شده است و مانند این مطالعه بتن SCC بکار برده شده است. همچنین در مطالعه پیش رو ۵۷% بهبود نفوذپذیری با استفاده از نانو مگنتیت به میزان ۳ درصد وزنی سیمان به دست آمده است. این در حالی است که در مطالعه [۶]، از ۱/۵ درصد نانو مگنتیت در بتن HPC (فوق توانمند) استفاده شده است

جدول ۷. نتایج آزمون سایش
Table 7. Results of abrasion resistance test

نام طرح	نوع نانو مواد	مقدار نانو مواد* (درصد وزنی سیمان)	کاهش وزن (گرم)			بهبود مقاومت در برابر سایش (%)
			آزمون اول	آزمون دوم	آزمون سوم	
SCC	---	---	۳/۸	۴/۴	۳/۴	---
NTP		۱	۱/۵	۱/۸	۱/۴۷	۵۸/۹
NTMP	Nano TiO ₂	۲	۱/۳۶	۱/۳۶	۱/۴۴	۶۲/۸
NTHP		(۳)	۱/۴۵	۱/۲۷	۱/۲۷	۶۷/۲
NAILP		۱/۵	۱/۴۸	۱/۶	۱/۵۵	۵۹/۹
NAIMP	Nano Al ₂ O ₃	(۲)	۰/۶	۰/۵	۰/۵۲	۸۶/۶
NAIHP		۳	۰/۶	۰/۵۶	۰/۶۲	۸۴
NFe ₂ LP		۱	۴/۷۳	۴/۸۷	۴/۶۷	-۲۰/۷
NFe ₂ MP	Nano Fe ₂ O ₃	۳	۰/۶۷	۰/۶۳	۰/۵۷	۸۴
NFe ₂ HP		(۴)	۰/۵۳	۰/۴۷	۰/۵	۸۷/۱
NFe ₃ LP		۱	۱۷/۹	۱۹/۲	۱۴/۸	-۳۴۷
NFe ₃ MP	Nano Fe ₃ O ₄	(۳)	۲/۶	۳/۱	۲/۵	۲۹/۵
NFe ₃ HP		۴	۲/۵۳	۲/۸۷	۲/۸	۲۹/۵
NSLP		(۱)	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۴۶	۸۸/۱
NSMP	Nano SiO ₂	۳	۰/۸	۰/۷	۰/۷۳	۸۱/۱
NSHP		۵	۰/۷۷	۰/۷	۰/۷۶	۸۰/۴

*مقادیر داخل پرانتز، مقادیر بهینه در آزمون سایش می باشند.

ایجاد کرده اند که در میان آن‌ها نمونه‌های حاوی یک درصد نانو سیلیکا، چهار درصد نانو هماتیت، دو درصد نانو آلومینا و سه درصد نانو تیتانیا به ترتیب با ۸۸٪، ۸۷٪، ۸۶٪، ۶۷٪ بالاترین بهبود را در مقاومت در برابر سایش بتن ایجاد کردند.

۳-۲-۱- مقایسه‌ی نتایج این مطالعه با مطالعات پیشین

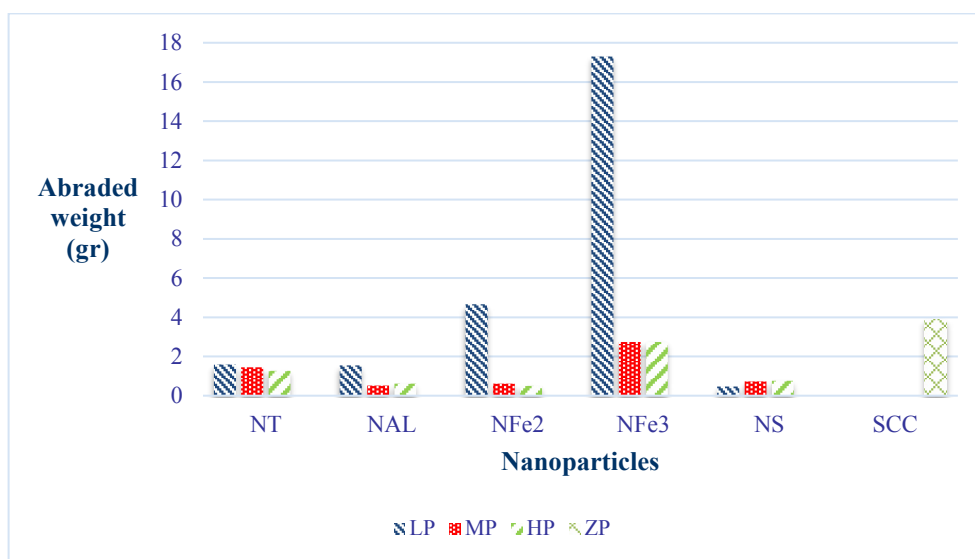
میزان استفاده‌ی بهینه از نانو آلومینا جهت بهبود مقاومت در برابر سایش برابر ۲ درصد وزنی سیمان به دست آمده که بهبود ۸۶/۶ درصدی نسبت به نمونه‌ی کنترل ایجاد کرده است. در مطالعه [۷] نیز میزان بهینه نانو آلومینا برابر ۲ درصد وزنی مواد سیمانی بوده است (در این تحقیق نانو آلومینا در درصدهای ۰/۵ تا ۲ بررسی شده است) که بهبود حدود ۷۰ تا ۸۰ درصدی در مقاومت سایشی بتن ایجاد کرده است و منطبق بر نتیجه مطالعه حاضر می باشد. در این تحقیق افزودن نانو سیلیس به مقدار ۱ درصد وزنی سیمان، افزایش ۸۸/۱ درصدی در مقاومت سایشی بتن ایجاد کرده است. در مطالعه [۵]، با افزودن ۱ درصد نانو سیلیکا، بهبود ۱۵۷ درصدی در مقاومت سایشی بتن معمولی ایجاد شده است. در مطالعه [۱۷]، مقادیر ۱، ۲ و ۳ درصد نانو سیلیکا در بتن جاده‌ای حاوی خاکستر بادی بکار برده شده است که افزودن ۲ درصد نانو سیلیکا باعث ۴۹٪ بهبود مقاومت در برابر سایش شده است. تفاوت نتایج می تواند ناشی از نوع بتن‌ها و سایر افزودنی‌های بتن باشد.

که نانو سیلیکا هم در حالت خشک و هم به صورت کلوئیدی استفاده شده است. ولی در مطالعه [۸] که از نانو سیلیکا در بتن متخلخل و در درصدهای ۱، ۳، ۵ و ۷ استفاده شده است، بهبود حدود ۱۵ درصد در نفوذپذیری ایجاد شده است که بسیار ضعیف‌تر از بهبود حاصل شده از این تحقیق می باشد. در نهایت مقدار بهینه‌ی استفاده از نانو تیتانیا برای افزایش نفوذپذیری در این تحقیق برابر ۳ درصد بدست آمده که ۸۵٪ بهبود ایجاد کرده است. در مطالعه [۶]، با استفاده از ۱/۵ درصد نانو تیتانیا در بتن HPC، بهبود ۷۶ درصدی در جذب آب به دست آمده است.

همان‌طور که مشاهده می شود تفاوت در نوع بتن مانند بتن متخلخل یا فوق توانمند (HPC) و یا خودتراکم (SCC) و یا تفاوت در افزودنی‌های مختلف مانند متاکائولین، سیلیکا فوم و پودر سنگ آهک و یا تفاوت در نوع عمل آوری (در آب یا آب آهک اشباع و یا حتی محلول حاوی نانو مواد) و نوع استفاده از نانو مواد مانند پودری، کلوئیدی و دیگر تفاوت‌های این مطالعه با سایر مطالعات می تواند از دلایل تفاوت در نتایج باشد.

۳-۲-۲- آزمایش سایش

نتایج آزمون سایش در جدول ۷ و شکل ۵ ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است به جز نمونه‌های حاوی یک درصد نانو هماتیت و نانو مگنتیت در سایر نمونه‌ها، تمامی درصدهای مورد استفاده بهبود قابل ملاحظه‌ای را در مقاومت در برابر سایش بتن



شکل ۵. نمودار میانگین کاهش وزن نمونه‌ها در آزمون سایش

Fig. 5. Average weight loss of specimens in the abrasion resistance test

۳-۳- آزمایش مقاومت فشاری

مستقیمی میان مقاومت فشاری و مقاومت در برابر سایش اشاره شده است؛ که با افزایش مقاومت فشاری، مقاومت در برابر سایش بتن نیز افزایش می یابد. در این مطالعه نیز با مقایسه نمودارهای مقاومت در برابر سایش و مقاومت فشاری این رابطه در برخی نمونه‌ها محسوس می باشد. اشاره به این نکته حائز اهمیت است که افزودن بعضی از نانو مواد به داخل بتن باعث حباب زایی حین اختلاط بتن خودتراکم شده و منجر به افزایش تخلخل گردیده است. بدیهی است، این امر اثر منفی بر روی نفوذپذیری، سایش و مقاومت فشاری داشته است.

۳-۳-۱- مقایسه ی نتایج این آزمایش با سایر مطالعات پیشین

میزان استفاده ی بهینه از نانو هماتیت جهت بهبود مقاومت فشاری برای مطالعه حاضر برابر ۴ درصد وزنی سیمان به دست آمده است که افزایش ۵۹/۵ درصدی در مقاومت فشاری بتن ایجاد کرده است. در مطالعه [۹] نیز از بتن خودتراکم با مقاومت بالا استفاده شده و نانو هماتیت در درصدهای ۱ تا ۵ اضافه شده است که با استفاده از ۴ درصد نانو هماتیت بهبود ۷۲ درصدی در مقاومت فشاری به دست

نانو مواد به دلیل خاصیت پرکنندگی خود با پر کردن منافذ ریز بتن و به دلیل خاصیت پوزولانی برخی از آن‌ها، ماتریس سیمانی متراکم‌تری ایجاد می کنند که باعث بهبود مقاومت فشاری بتن می شوند. میانگین مقاومت فشاری سه نمونه در هر سری، در جدول ۸ و شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودار شکل ۶ مشخص می باشد، تمامی نانو مواد بجز نانو مگنتیت باعث بهبود مقاومت فشاری شده اند. نمونه‌های NSMP، NTHP و NAIHP به ترتیب با ۸۸/۱٪، ۸۵/۸٪ و ۸۵/۸٪ بالاترین بهبود مقاومت فشاری را نشان داده اند. نمونه حاوی نانو سیلیس بالاترین مقاومت فشاری را نشان داده است، زیرا سیلیکا علاوه بر خاصیت پرکنندگی که دیگر نانو مواد نیز دارند، می تواند با واکنش پوزولانی باعث افزایش تولید ژل (C-S-H) شود که تأثیر مستقیم بر روی مقاومت فشاری بتن خواهد داشت. در برخی از مطالعات پیشین مانند مراجع [۴، ۵ و ۷]، به رابطه

جدول ۸. نتایج آزمون مقاومت فشاری بتن
Table 8. Results of compressive strength test

نام طرح	نوع نانو مواد	مقدار نانو مواد (درصد وزنی سیمان)	مقاومت فشاری بتن (Kg/cm ²)			بهبود مقاومت فشاری (%)
			آزمونه اول	آزمونه دوم	آزمونه سوم	
SCC	----	----	۴۷۳/۳	۴۶۹/۲	۴۰۸	۴۵۰/۱۶
NTHP	Nano TiO ₂	۱	۴۴۸/۸	۴۸۹/۶	----	۴۶۹/۲
NTMP		۲	----	۶۵۲/۸	۷۵۹	۷۰۵/۹
NTHP	Nano Al ₂ O ₃	(۳)	----	۷۸۶/۳	۸۸۶/۵	۸۳۶/۴
NAILP		۱/۵	۵۳۰/۴	۴۸۹/۶	۴۴۸/۸	۴۸۹/۶
NAIMP	Nano Fe ₂ O ₃	۲	۷۶۳	۸۱۶	۸۱۰/۸۹	۷۹۶/۶۳
NAIHP		(۳)	----	۷۷۵/۲	۸۹۷/۶	۸۳۶/۴
NFe ₂ LP	Nano Fe ₂ O ₃	۱	۴۶۹/۲	۴۳۶/۶	۴۸۹/۶	۴۶۵/۱۳
NFe ₂ MP		۳	----	۶۷۳/۷	۷۱۳/۵	۶۹۳/۶
NFe ₂ HP	(۴)	----	۷۳۹/۴	۶۹۶/۸	۷۱۸/۱	۵۹/۵
NFe ₃ LP	Nano Fe ₃ O ₄	۱	۲۲۴/۴	۲۱۲/۲	۲۲۰/۳	۲۱۸/۹۷
NFe ₃ MP		۳	۱۵۱	۱۵۹/۱	۱۵۱	۱۵۳/۷
NFe ₃ HP	۴	۱۶۲/۲	۱۸۴/۶	۱۸۸/۷۳	۱۷۸/۵۱	-۶۰/۳
NSLP	Nano SiO ₂	۱	----	۷۵۴/۸	۷۳۴/۴	۷۴۴/۶
NSMP		(۳)	----	۸۱۶	۸۷۷/۲	۸۴۶/۶
NSHP	۵	۷۲۲/۲	۷۹۵/۶	----	۷۵۸/۹	۶۸/۶

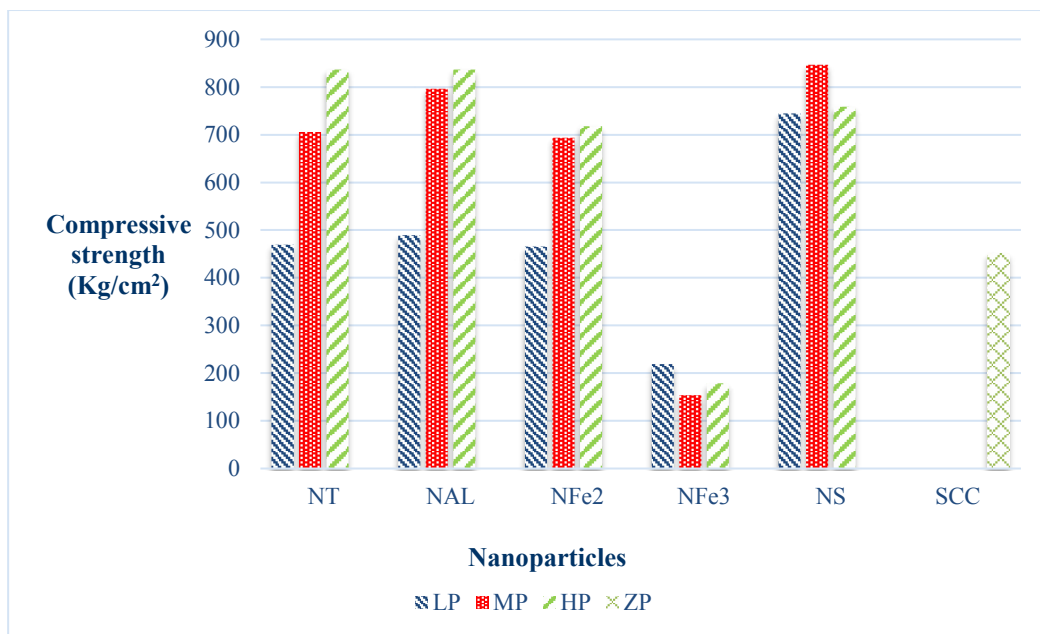
*مقادیر داخل پرانتز، مقادیر بهینه در آزمون مقاومت فشاری می باشند.

سایش و مقاومت فشاری باهم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه‌های حاوی نانو تیتانیا و نانو هماتیت کاملاً با افزایش مقاومت فشاری، مقاومت در برابر سایش و نفوذ آب نیز افزایش یافته و بیشترین مقدار بهبود در نمونه حاوی حداکثر میزان نانو مواد، حاصل شده است. این روند تقریباً در نمونه‌های حاوی نانو آلومینا و نانو سیلیس نیز مشاهده می‌شود، با این تفاوت که در این نمونه‌ها بیشترین بهبود تقریباً با افزودن مقدار متوسط نانو مواد به دست آمده است. در نمونه حاوی نانو مگنتیت، کف‌زایی در حین اختلاط در اثر افزودن نانو ماده، با ایجاد تخلخل، اثر منفی بر روی مقاومت فشاری داشته و مقاومت در برابر سایش نیز در مقایسه با افزودن سایر نانو مواد افزایش قابل توجهی نداشته است. در این نمونه، همان‌طور که در بخش ۱-۳ بحث شد، میزان آب مصرفی دستگاه، متناسب با عمق نفوذ نیست که نشانگر احتمال نشت آب از کناره‌های نمونه و عدم اعمال فشار آب مورد نظر بر روی نمونه مورد آزمایش می‌باشد و کاهش عمق نفوذ آب در این نمونه لزوماً به معنای بهبود نفوذپذیری آن نیست.

مکانیزم اثر نانو مواد بر روی مشخصات مکانیکی را می‌توان به این صورت بیان نمود. در صورت پخش یکنواخت نانو ذرات داخل بتن، نانو ذرات به صورت هسته داخل محصولات هیدراسیون سیمان قرار

آمده است. میزان استفاده ی بهینه از نانو آلومینا برای این مطالعه ۳ درصد وزنی سیمان به دست آمده است که باعث افزایش ۸۵/۸ درصد در مقاومت فشاری شده است. در مطالعه [۳۱] از ۱ تا ۴ درصد نانو آلومینا در بتن خودتراکم استفاده شده است که مقدار بهینه ۳ درصد بوده است و بهبود ۱۱۷ درصد در مقاومت فشاری ایجاد کرده است. همچنین در مطالعه [۱۰] که میزان استفاده بهینه از نانو آلومینا ۳ درصد بدست آمده، افزایش ۸ درصدی در مقاومت فشاری بتن معمولی ایجاد کرده است. میزان استفاده بهینه از نانو سیلیس جهت بهبود مقاومت فشاری در این مطالعه ۳ درصد وزنی سیمان به دست آمده است که باعث افزایش ۸۸ درصدی مقاومت فشاری شده است. در مطالعه [۱۰] افزودن ۵% نانو سیلیکا باعث افزایش ۳۰ درصدی در مقاومت فشاری بتن معمولی شده که افزودن همین مقدار در مطالعه حاضر منجر به افزایش ۶۸/۶ درصدی در مقاومت فشاری شده است. همچنین در مطالعه [۱۸]، با استفاده از ۵ درصد نانو سیلیکا در بتن به بهبود ۸۲ درصد در مقاومت فشاری دست یافته‌اند. این در حالی است که در برخی مطالعات مانند [۱۷]، افزودن ۲ درصد وزنی مواد سیمانی نانو سیلیکا، بهبود ۱۰ درصدی در مقاومت فشاری بتن حاوی خاکستر بادی ایجاد کرده است.

در جدول ۹ نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری، مقاومت در برابر



شکل ۶. نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای نانو مواد مختلف
 Fig. 6. Compressive strength of specimens containing different nanomaterials

جدول ۹. مقایسه نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری، مقاومت در برابر سایش و مقاومت فشاری
Table 9. Comparison of the results of compressive strength, abrasion resistance and permeability tests

نام طرح	نوع نانو مواد	مقدار نانو مواد (درصد وزنی سیمان)	بهبود نفوذپذیری (%)	بهبود مقاومت در برابر سایش (%)	بهبود مقاومت فشاری (%)
NTLP		۱	۳۴/۶	۵۸/۹	۴/۲
NTMP	Nano TiO ₂	۲	۷۱/۳	۶۲/۸	۵۶/۸
NTHP		۳	(۸۴/۶)	(۶۷/۲)	(۸۵/۸)
NAILP		۱/۵	۲	۵۹/۹	۸/۸
NAIMP	Nano Al ₂ O ₃	۲	(۶۹/۲)	(۸۶/۶)	۷۷
NAIHP		۳	۲۳/۱	۸۴	(۸۵/۸)
NFe ₂ LP		۱	۱۳/۸	-۲۰/۷	۳/۳
NFe ₂ MP	Nano Fe ₂ O ₃	۳	۱۸/۵	۸۴	۵۴/۱
NFe ₂ HP		۴	(۲۹/۲)	(۸۷/۱)	(۵۹/۵)
NFe ₃ LP		۱	-۱۳/۳	-۳۴۷	-۵۱/۴
NFe ₃ MP	Nano Fe ₃ O ₄	۳	(۵۶/۹)	(۲۹/۵)	-۶۵/۹
NFe ₃ HP		۴	۲۳/۱	۲۹/۵	-۶۰/۳
NSLP		۱	۳۹/۸	(۸۸/۱)	۶۵/۴
NSMP	Nano SiO ₂	۳	(۷۳/۸)	۸۱/۱	(۸۸/۱)
NSHP		۵	۷۳/۸	۸۰/۴	۶۸/۶

*مقادیر داخل پرانتز، مقادیر حداکثر بهبود در هر آزمایش را نشان می‌دهند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر انواع مختلف نانو مواد (NanoTiO₂، NanoAl₂O₃، NanoFe₂O₃، NanoFe₃O₄ و NanoSiO₂) بر روی مقاومت فشاری، مقاومت در برابر سایش و نفوذپذیری بتن بررسی شده و نتایج کلی به دست آمده، به صورت زیر می‌باشند:

• نانو مواد می‌توانند به وسیله بهبود ریز ساختار بتن از طریق واکنش پوزولانی و همچنین با پر کردن منافذ ریز موجود در ساختار بتن تأثیر بسیار زیادی بر روی بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن داشته باشند.

• نتایج آزمایش مقاومت در برابر نفوذپذیری آب و مشخصه‌ی اصلی مورد توجه در این آزمون یعنی عمق نفوذ آب در بتن، نشان داد که نانو مواد می‌توانند تأثیر بسیار زیادی بر بهبود نفوذپذیری داشته باشند و بهبود نفوذپذیری به میزان ۸۴/۶٪، ۶۹/۲٪، ۲۹/۲٪، ۵۶/۹٪ و ۷۳/۸٪ به ترتیب برای نمونه‌های NTHP، NAIMP، NFe₂HP، NFe₃HP و NSMP به دست آمد.

• نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت در برابر سایش بتن

خواهند گرفت. اگر مقدار و فاصله نانو ذرات مناسب باشند، می‌توانند با کنترل کریستاله شدن، رشد کریستال‌های Ca(OH)₂ را محدود کرده و با ایجاد محیط سیمانی همگن و متراکم باعث بهبود مشخصات مکانیکی شوند. درحالی‌که، افزایش مقدار نانو ذرات با کاهش فاصله آن‌ها و جلوگیری از رشد کافی کریستال‌های Ca(OH)₂ می‌تواند باعث کاهش نسبت کریستال به ژل C-S-H شده و به یک ریز ساختار سست محیط سیمانی منتهی شود. از سوی دیگر، با توجه به این‌که نانو ذرات باعث افزایش نیاز خمیر سیمان به آب می‌شوند، اگر نسبت‌های طرح اختلاط ثابت نگه داشته شوند، با افزودن نانو ذرات، کارایی بتن کاهش یافته و در نهایت منجر به کاهش مقاومت‌های مکانیکی بتن می‌گردد. به علاوه، با افزایش مقدار نانو ذرات، پخش یکنواخت آن‌ها در مخلوط دشوارتر شده و افزایش احتمال تجمع نانو ذرات و ایجاد نواحی ضعیف نیز باعث زوال مشخصات مکانیکی خواهد شد [۵].

مراجع

- [1] S. Parveen, S. Rana, R. Fanguero, A Review on Nanomaterial Dispersion, Microstructure, and Mechanical Properties of Carbon Nanotube and Nanofiber Reinforced Cementitious Composites, *Journal of Nanomaterials*, (2013).
- [2] A.H. Korayem, N. Tourani, M. Zakertabrizi, A.M. Sabziparvar, W.H. Duan, A review of dispersion of nanoparticles in cementitious matrices: Nanoparticle geometry perspective, *Construction and Building Materials*, 153 (2017) 346-357.
- [3] R.B. Ardalan, N. Jamshidi, H. Arabameri, A. Joshaghani, M. Mehrinejad, P. Sharafi, Enhancing the permeability and abrasion resistance of concrete using colloidal nano-SiO₂ oxide and spraying nanosilicon practices, *Construction and Building Materials*, 146 (2017) 128-135.
- [4] M.-h. Zhang, H. Li, Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement, *Construction and Building Materials*, 25(2) (2011) 608-616.
- [5] H. Li, M.-h. Zhang, J.-p. Ou, Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement, *Wear*, 260(11) (2006) 1262-1266.
- [6] A. Shekari, M. Seyed Razzaghi, Influence of Nano Particles on Durability and Mechanical Properties of High Performance Concrete, *Procedia Engineering*, 14 (2011) 3036-3041.
- [7] Nazari, S. Riahi, Abrasion resistance of concrete containing SiO₂ and Al₂O₃ nanoparticles in different curing media, *Energy and Buildings*, 43 (2011) 2939-2946.
- [8] Shirgir, A. Hassani, A. Khodadadi, Experimental Study on Permeability and Mechanical Properties of Nanomodified Porous Concrete, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2240 (2011) 30-35.
- [9] Khoshakhlagh, A. Nazari, G. Khalaj, Effects of Fe₂O₃ Nanoparticles on Water Permeability and Strength Assessments of High Strength Self-Compacting

که یکی از مهم ترین آزمون های دوام کفپوش های بتنی محسوب می شود، نشان می دهد که نانو مواد می توانند در بهبود مقاومت سایشی بتن بسیار مؤثر باشند. نمونه های NAIMP، NTHP، NFe₂HP، NFe₃MP و NSLP به ترتیب با ۶۷/۲٪، ۸۶/۶٪، ۸۷/۱٪، ۲۹/۴٪ و ۸۸/۱٪ بهبود مقاومت در برابر سایش، نتایج قابل قبولی نشان داده اند.

• نتایج به دست آمده از آزمون مقاومت فشاری نیز نشانگر تأثیر بسزای نانو مواد در بهبود این مشخصه مکانیکی بتن بوده و نمونه های بتنی NTHP، NAIHP، NFe₂HP و NSMP به ترتیب ۸۵/۸٪، ۸۵/۸٪، ۵۹/۵٪ و ۸۸/۱٪ بهبود در مقاومت فشاری نشان داده اند. روی هم رفته، افزایش مقاومت فشاری باعث افزایش مقاومت سایشی و کاهش نفوذپذیری نمونه ها شده است.

• افزودن بعضی از نانو مواد به ویژه نانو مگنتیت به داخل بتن باعث حباب زایی حین اختلاط بتن خودتراکم شده و در نتیجه با افزایش فضاهای خالی و افزایش حجم منجر به افزایش تخلخل گردیده است. بدیهی است افزایش تخلخل باعث کاهش مقاومت فشاری، مقاومت در برابر سایش و افزایش نفوذپذیری شده است.

• در صورتی که نانو ذرات به مقدار بهینه و با فاصله مناسب و بطور یکنواخت داخل بتن پخش شوند، قرار گرفتن این مواد به صورت هسته داخل محصولات هیدراسیون سیمان، با ایجاد محیط همگن و متراکم و با پر کردن فضاهای خالی ساختار بتن باعث بهبود مشخصات مکانیکی می شوند. همچنین بعضی از نانو ذرات مانند نانو سیلیس علاوه بر خاصیت پرکنندگی، می توانند با واکنش پوزولانی باعث افزایش تولید سیلیکات کلسیم هیدراته شوند که تأثیر مستقیم بر روی بهبود مشخصه های مکانیکی بتن خواهد داشت که این واکنش پوزولانی در نانو ذرات به دلیل سطح ویژه بالاتر نسبت به مواد در مقیاس میکرو سریع تر است. درحالی که افزودن نانو مواد بیشتر از مقدار بهینه با تداخل در پخش مناسب و همچنین با کاهش کارایی بتن و از طرفی با جلوگیری از رشد کافی کریستال های هیدروکسید کلسیم و کاهش نسبت این کریستال ها به سیلیکات کلسیم هیدراته، منجر به عدم تراکم کافی ریزساختار بتن و زوال مشخصات مکانیکی می شوند.

- some properties of cementitious materials – A short guide for Civil Engineer, *Materials & Design*, 52 (2013) 143–157.
- [20] M. Oltulu, R. Şahin, Single and combined effects of nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ and nano-Fe₂O₃ powders on compressive strength and capillary permeability of cement mortar containing silica fume, *Materials Science and Engineering: A*, 528(22) (2011) 7012-7019.
- [21] M. Oltulu, R. Şahin, Effect of nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ and nano-Fe₂O₃ powders on compressive strengths and capillary water absorption of cement mortar containing fly ash: A comparative study, *Energy and Buildings*, 58 (2013) 292-301.
- [22] A. Givi, S. Abdul Rashid, F. Abdul aziz, A. Salleh, Particle size effect on the permeability properties of nano-SiO₂ blended Portland cement concrete, *Journal of Composite Materials - J COMPOS MATER*, 45 (2011) 1173-1180.
- [23] M. Balapour, A. Joshaghani, F. Althoey, Nano-SiO₂ contribution to mechanical, durability, fresh and microstructural characteristics of concrete: A review, *Construction and Building Materials*, 181 (2018) 27-41.
- [24] G. Quercia, P. Spiesz, G. Hüsken, H.J.H. Brouwers, SCC modification by use of amorphous nano-silica, *Cement and Concrete Composites*, 45 (2014) 69-81.
- [25] A. C136-06, Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. , in: *ASTM, C136*, 2006.
- [26] ASTM C1437-15, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, *ASTM International*, in, 2015.
- [27] B.E. 12390-8, Testing hardened concrete – Part 8: Depth of penetration of water under pressure in, 2009.
- [28] ASTM C944 / C944M-19, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method, *ASTM International*, in, 2019.
- [29] ASTM C109 / C109M-20, Standard Test Method Concrete, *Journal of Materials Science & Technology*, 28(1) (2012) 73-82.
- [10] K. Behfarnia, N. Salemi, The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete, *Construction and Building Materials*, 48 (2013) 580-584.
- [11] N. Salemi, K. Behfarnia, Effect of nano-particles on durability of fiber-reinforced concrete pavement, *Construction and Building Materials*, 48 (2013) 934-941.
- [12] H. Du, S. Du, X. Liu, Durability performances of concrete with nano-silica, *Construction and Building Materials*, 73 (2014) 705-712.
- [13] Saloma, A. Nasution, I. Imran, M. Abdullah, Improvement of Concrete Durability by Nanomaterials, *Procedia Engineering*, 125 (2015) 608-612.
- [14] M. Gonzalez, S.L. Tighe, K. Hui, S. Rahman, A. de Oliveira Lima, Evaluation of freeze/thaw and scaling response of nanoconcrete for Portland Cement Concrete (PCC) pavements, *Construction and Building Materials*, 120 (2016) 465-472.
- [15] P. Zhang, J. Wan, K. Wang, Q. Li, Influence of nano-SiO₂ on properties of fresh and hardened high performance concrete: A state-of-the-art review, *Construction and Building Materials*, 148 (2017) 648-658.
- [16] P. Zhang, Y.-N. Zhao, Q.-F. Li, T.-H. Zhang, P. Wang, Mechanical properties of fly ash concrete composite reinforced with nano-SiO₂ and steel fibre, *Current science*, 106 (2014) 1529-1537.
- [17] Y. Gao, B. He, Y. Li, J. Tang, L. Qu, Effects of nano-particles on improvement in wear resistance and drying shrinkage of road fly ash concrete, *Construction and Building Materials*, 151 (2017) 228-235.
- [18] Z. He, X. Chen, X. Cai, Influence and mechanism of micro/nano-mineral admixtures on the abrasion resistance of concrete, *Construction and Building Materials*, 197 (2019) 91-98.
- [19] A. Rashad, A synopsis about the effect of nano-Al₂O₃, nano-Fe₂O₃, nano-Fe₃O₄ and nano-clay on

- Materials & Design, 32(7) (2011) 3966-3979.
- [31] Nazari, S. Riahi, Effects of Al₂O₃ nanoparticles on properties of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag (GGBFS) as binder, Science China-technological Sciences - SCI CHINA-TECHNOL SCI, 54 (2011) 2327-2338.
- for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, in, 2020.
- [30] A. Nazari, S. Riahi, Computer-aided design of the effects of Fe₂O₃ nanoparticles on split tensile strength and water permeability of high strength concrete,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Ghadim Tekmehdash, A.R. Mohammadjafari Sadeghi, H. Afshin, Investigation of Some Durability Properties of Concrete Pavements Containing Nanoparticles, Amirkabir J. Civil Eng., 53(8) (2021) 3335-3354.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17893.6705](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17893.6705)

