

# بررسی عملکرد خاکستر لجن فاضلاب با و بدون نانو ذرات سیلیس در خواص مصالح پایه سیمانی خود تراکم

امین خوشروش<sup>۱</sup>

هادی بهادری<sup>۲</sup>

علیرضا مناف پور<sup>۳</sup>

(دریافت ۹۱/۷/۱ پذیرش ۹۲/۵/۴)

## چکیده

امروزه استفاده از مواد پوزولانی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی و به منظور ارتقای خواص مصالح پایه سیمانی و صرفه جویی در هزینه‌ها امری مهم است. از طرفی لجن فاضلاب به عنوان یک پسماند خطرناک برای محیط زیست و سلامتی انسان مطرح است. در همین راستا در این پژوهش از خاکستر لجن فاضلاب به عنوان یک پوزولان مصنوعی برای ساخت مصالح پایه سیمانی خودتراکم که به عنوان انقلابی در صنعت بتن مطرح می‌باشند، استفاده شد. هدف از این پژوهش، تسریع در عملکرد خاکستر لجن فاضلاب با استفاده از نانو ذرات سیلیس در جهت به کارگیری صنعتی این ماده در تولید مصالح پایه سیمانی خودتراکم بود. در این پژوهش ۱۰ طرح اختلاط با درصدهای مختلف جایگزینی خاکستر لجن (+، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) و نانوسیلیس (+ و ۱ درصد) برای تولید نمونه‌های دو جزئی و سه جزئی ملات و بتن خودتراکم، طراحی شده و خواص آنها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که با افزودن خاکستر لجن فاضلاب، خواص رئولوژیک و مکانیکی نمونه‌ها افت پیدا کرده و خواص دوامی آنها در حضور درصدهای پایین این پوزولان بهبود می‌یابد. با افزودن نانوسیلیس نیز خواص مکانیکی و دوامی نمونه‌ها بهبود می‌یابد. همچنین حضور نانوسیلیس در کنار ذرات خاکستر لجن باعث افزایش واکنش پذیری این پوزولان شده و عملکرد این ماده را بهبود می‌بخشد.

**واژه‌های کلیدی:** بتن خودتراکم، ملات خود تراکم، مواد پایه سیمانی، خاکستر لجن فاضلاب، نانوسیلیس

## The Effect of Using Sewage Sludge Ash with and without Nano Silica Particles on Properties of Self-compacting Cement Based Materials

A. Khoshrovesh<sup>1</sup>

H. Bahadori<sup>2</sup>

A.R. Manafpour<sup>3</sup>

(Received Sep. 22, 2012 Accepted July 26, 2013)

### Abstract

The use of pozzolanic materials as a replacement for cement is nowadays of great significant due to the improvements gained in the properties of cement-based materials and the costs it saves. On the other hand, sewage sludge is harmful to both the environment and the human health and its safe disposal is highly desirable. Based on these considerations, this study investigates the use of sewage sludge ash as an artificial pozzolan to produce self-compacting cement-based materials, an initiative that has come to be evaluated as a revolution in the concrete industry. The objective of the study is to accelerate the performance of sewage sludge ash by utilizing nano-silica particles. For this purpose, 10 mix designs were employed for self-compacting mortar and concrete made up of binary and ternary cementitious blends of sewage sludge ash (0%, 5%, 10%, 15%, and 20%) and nano-silica (0% and 1%). The results show that the rheological and mechanical properties of the samples declined as a result of adding sewage sludge ash, but their durability characteristics improved with only small percentage volumes of sewage sludge ash addition. Moreover, nano-silica addition was observed to improve the mechanical properties and durability of self-compacting mortar and concrete. Finally, the reactivity of sewage sludge ash increased and its performance was improved in the presence of nano-silica.

**Keywords:** Self Compacting Concrete, Self Compacting Mortar, Cement Based Materials, Sewage Sludge Ash, Nano Silica.

1. MSc Student of Civil Eng., Dept. of Eng., Urmia University, Urmia  
2. Assist. Prof. of Civil Eng., Dept. of Eng., Urmia University, Urmia  
(Corresponding Author) (+98 441) 2972862 h.bahadori@urmia.ac.ir  
3. Assist. Prof. of Civil Eng., Dept. of Eng., Urmia University, Urmia

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه  
۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه (نویسنده مسئول)  
h.bahadori@urmia.ac.ir (۰۴۴۱) ۲۹۷۲۸۶۲  
۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه

دمای مختلف پرداخته‌اند [۱۳]. این محققان که خاکسترهای تحقیق خود را از لجن‌های یکی از بزرگ‌ترین ایستگاههای تصفیه آب برزیل انتخاب کرده بودند، در مقاله خود قابلیت استفاده از آنها به عنوان مواد خام سرامیک‌ها را مورد بحث قرار داده‌اند. نتایج آزمایش‌های XRD و XRF نمونه‌های مورد آزمایش نشان می‌دهد که این ماده قابلیت استفاده به عنوان مواد خام سرامیک‌ها را داراست. محققان دیگری نیز در تحقیقات خود به بررسی تأثیر خاکستر لجن فاضلاب به همراه نانو ذرات سیلیس در زمان گیرش خمیر سیمان، ریزساختار و مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با این ماده پرداخته‌اند [۱۹-۱۴].

از سوی دیگر، بتن‌های خودتراکم به عنوان انقلابی در صنعت بتن مطرح هستند و در سالهای اخیر، تحقیقات بخش اعظمی از محققان دانش بتن، بر روی این نوع بتن متمرکز شده است. بتن‌هایی که تحت اثر وزن خود در قالب جای می‌گیرند، نیاز به لرزاندن را مرتفع می‌سازند. از طرفی ساخت المان‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای با اشکال مختلف و دلخواه از مزیت‌های دیگر این نوع بتن است. حذف یکی از عوامل آلودگی صوتی در پروژه‌های بتنی (عملیات تراکم) نیز از مزایای دیگر به کارگیری این نوع بتن در ساخت سازه‌های بتنی است. علاوه بر این، حذف عامل انسانی در بتن ریزی، عملیات تراکم و نیاز به پرداخت سطح حداقلی، موجب کاهش هزینه پروژه می‌شود؛ همچنین از بروز خطای انسانی در بتن ریزی و عملیات تراکم جلوگیری می‌کند که می‌تواند به ساخت المان‌های سازه‌ای یکنواخت و همگن منجر شود. لذا تمرکز بر ساخت مصالح پایه سیمانی خودتراکم شونده (ملات تعمیری و بتن) به تنهایی می‌تواند راهگشای دستیابی به توسعه پایدار صنعت بتن باشد [۲۰ و ۲۱].

علی‌رغم محاسن بتن‌های خودتراکم از یک‌سو و دارا بودن خاصیت پوزولانی توسط خاکستر لجن فاضلاب از سوی دیگر، تاکنون بررسی تأثیر کاربرد خاکستر لجن فاضلاب در خواص بتن خودتراکم مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا در این مقاله ضمن پرداختن به این مسئله، برای ایجاد تسریع در عملکرد خاکستر لجن فاضلاب از دو روش عملیات حرارتی و به کارگیری نانو ذرات سیلیس بهره گرفته شد، تا به کارگیری صنعتی خاکستر لجن فاضلاب در تولید مصالح پایه سیمانی خودتراکم در پروژه‌های گوناگون ساختمانی نیز ارزیابی شود. در این تحقیق با انجام فرایندهای مختلف حرارتی و امتحان روشهای مختلف بر روی لجن فاضلاب، بهینه‌ترین روش تولید خاکستر لجن، مورد استفاده قرار گرفت و نیز با ساخت طرح اختلاط‌های مختلف، بهینه‌ترین درصد‌های جایگزینی انتخاب شدند. در ضمن در تحقیق حاضر به تأثیر خاکستر و نانوذرات سیلیس در تمامی خواص بتن خودتراکم از جمله خواص

لجن فاضلاب، یک پسماند خطرناک برای محیط زیست و سلامتی انسان است، لذا نیاز به اتخاذ یک استراتژی مناسب برای جلوگیری از بروز معضلات محیط‌زیستی و سلامتی ناشی از این لجن کاملاً احساس می‌شود. روشهای عمده دفع لجن را می‌توان به دو بخش اساسی روشهای مناسب (کاربرد در زمین‌های کشاورزی، دفن بهداشتی، کمپوست کردن، سوزاندن و استفاده در تولید مصالح ساختمانی) و روشهای نامناسب (دفن غیربهداشتی، کاربرد نامناسب در زمین‌های کشاورزی، تزریق به چاههای جذبی و دفع سطحی به رودخانه‌ها و دریاها تقسیم بندی نمود [۱ و ۲].

در بعضی از کشورها که تولید لجن فاضلاب در آنها بسیار زیاد است و به سبب روند رو به رشد افزایش جمعیت، نیاز به تولید مصالح پایه سیمانی بیشتری است، فعالیت‌های دیگری برای به کارگیری این لجن در ساخت بتن صورت پذیرفته و با سوزاندن این لجن (که دارای مقادیر بالایی آب است) اقدام به تولید خاکستر لجن فاضلاب به عنوان جایگزین بخشی از سیمان شده است [۹-۳]. موارد مختلف استفاده از خاکستر لجن فاضلاب وجود دارد که از جمله می‌توان به استفاده به عنوان ماده پرکننده در کارهای بتنی آسفالتی، آجرها و کاشی‌ها، مواد خام کلینکر سیمان و یا در ساخت سنگدانه و سنگدانه سبک نام برد. در چند تحقیق نیز این خاکستر را به عنوان جایگزینی برای سیمان و حتی سنگدانه ریز به کار برده‌اند [۱۰].

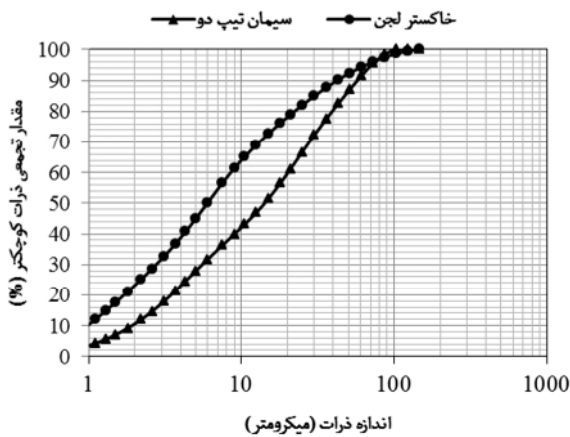
اما مشکل اساسی، عملکرد پوزولانی ضعیف این خاکستر در ساختار مصالح پایه سیمانی است که با آب آهک ناشی از هیدراتاسیون سیمان واکنش سریع و پایداری نمی‌دهد. در همین راستا، امروزه محققان، سعی در بررسی روشهای مختلف برای بهبود خواص پوزولانی این ماده نموده و توانسته‌اند خواص این محصول را بهبود بخشند [۵-۳]. در تحقیق علوی مقدم، میزان فعالیت پوزولانی خاکستر مورد آزمایش طبق استاندارد ASTM C311 بررسی شده است و نتیجه آزمایش‌ها نشان می‌دهد که خاکستر لجن تصفیه‌خانه فاضلاب می‌تواند به عنوان پوزولان در تولید بتن به کار رود، لکن باید میزان جذب آب بالای آن و کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها مورد توجه قرار گیرد [۲]. جرگارد و همکاران در مطالعه خود بر روی خاکسترهای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به بررسی ریز ساختارهای این مواد و مقایسه آنها با خاکستر بادی پرداخته‌اند که نتایج این تحقیق نشان می‌دهد عملکرد خاکستر لجن نیز در حد قابل قبول است [۱۱]. در تحقیق دیگری، نتایج آزمایش ریزساختار نمونه‌ها نشان از نامنظمی و زبر بودن سطح دانه‌های خاکستر داشته است [۱۲]. موریس و همکاران نیز در مقاله خود به بررسی ریزساختار خاکستر لجن فاضلاب بعد از سوزاندن در دو

فیزیکی، مکانیکی و ریزساختار آن پرداخته شد.

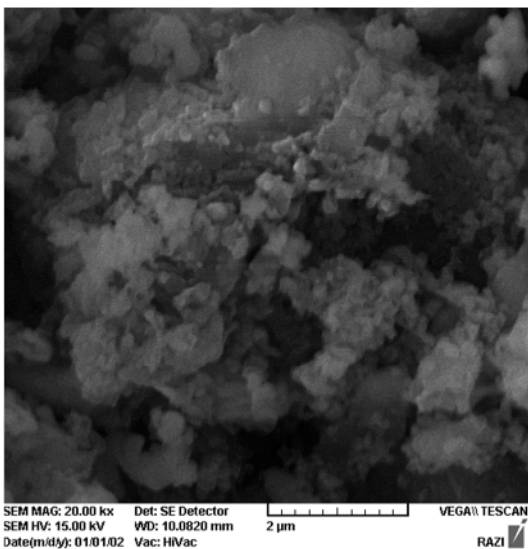
## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۱-۲- مواد و مصالح

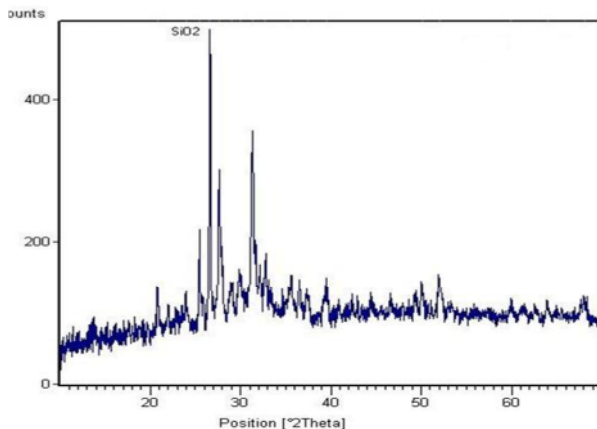
بر اساس تحقیقات صورت گرفته، در اکثر موارد دمای سوزاندن لجن در کوره، ۸۰۰ درجه سلسیوس عنوان شده است [۳-۸]. در تمامی موارد، یک مرحله اولیه گرمایش برای حذف حجم بالایی از آب موجود در لجن صورت می‌پذیرد و سپس لجن خشک شده تحت عملیات حرارتی قرار می‌گیرد. در بعضی از تحقیقات، دمای اولیه برای خشک کردن لجن ۱۰۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است [۳-۵]. در تحقیق فونتس و همکاران به بررسی اثرات دماهای پایین‌تر از ۸۰۰ درجه بر خواص خاکستر لجن حاصل پرداخته شده است [۹]. با توجه به تحقیقات گذشته و آزمایش روشهای مختلف، در این تحقیق مناسب‌ترین روش برای تولید خاکستر لجن فاضلاب انتخاب شد. به این ترتیب که ابتدا لجن مرطوب در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس درون آن خشک شده و سپس به مدت ۳ ساعت درون کوره تحت دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس عملیات حرارتی شد و پس از آن، مواد حاصله آسیاب شد و مورد استفاده قرار گرفت. سیمان مورد استفاده نیز، سیمان تیپ ۲ تهران بود. جدول ۱ مشخصات فیزیکی و شیمیایی و شکل ۱ دانه‌بندی خاکستر لجن و سیمان مصرفی را نشان می‌دهند. همچنین تصویر میکروسکوپی و کریستالوگرافی خاکستر لجن در شکل‌های ۲ و ۳ قابل مشاهده است.



شکل ۱- دانه‌بندی ذرات سیمان و خاکستر لجن



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی<sup>۱</sup> از ذرات خاکستر لجن



شکل ۳- کریستالوگرافی ذرات خاکستر لجن

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سیمان تیپ ۲ و خاکستر لجن

| ترکیب شیمیایی (%) |            | اجزاء                              |
|-------------------|------------|------------------------------------|
| سیمان             | خاکستر لجن |                                    |
| ۲۰/۴              | ۳۶/۰       | SiO <sub>2</sub>                   |
| ۶۳/۰              | ۲۶/۳       | CaO                                |
| ۴/۹               | ۱۱/۰       | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     |
| ۳/۹               | ۳/۸        | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     |
| ۱/۷               | ۹/۹        | MgO                                |
| ۲/۰               | ۲/۰        | SO <sub>3</sub>                    |
| -                 | ۶/۰        | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>      |
| ۰/۹               | ۳/۷        | Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O |
| ۱/۵               | ۴/۱        | افت ناشی از سرخ شدن                |
| خصوصیات فیزیکی    |            |                                    |
| ۳/۱۲              | ۲/۱۰       | وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )    |
| ۲۹۵               | ۴۱۰        | سطح ویژه بلین (m <sup>2</sup> /kg) |
| ۲۶                | ۱۰         | میانگین اندازه دانه‌ها (میکرون)    |

<sup>۱</sup> SEM

نوع پلی کربوکسیلات بهینه شده با وزن مخصوص ۱/۰۷ گرم بر سانتی متر مکعب بود.

## ۲-۲- طرح های اختلاط

در راستای مشاهده اثرات خاکستر لجن فاضلاب بر رفتار ملات و بتن خودتراکم و نیز عملکرد سیستم ترکیبی خاکستر لجن-نانو ذرات سیلیس در ساختار آنها، مقادیر مختلفی از خاکستر لجن (۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد نسبت به وزن کل مواد سیمانی) جایگزین سیمان گردید. این جایگزینی بر اساس نسبت های وزنی بود. همچنین نانو ذرات سیلیس نیز در مقادیر ۰ و ۱ درصد نسبت به وزن کل مواد سیمانی جایگزین سیمان شدند. در نتیجه ده طرح اختلاط در هر کدام از بخش های ملات خود تراکم و بتن خود تراکم با ترکیب دو جزئی سیمان-خاکستر لجن و سیمان-نانوسیلیس و ترکیب سه جزئی سیمان-خاکستر لجن-نانوسیلیس طراحی و ساخته شد. به دلیل جذب آب بالای ذرات خاکستر لجن و نانو ذرات سیلیس، نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۴۵ و کل مواد سیمانی در ملات ۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و در بتن ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب تعیین شد. در ادامه طرح های اختلاط ملات و بتن خودتراکم بیان شده است (جدول های ۳ و ۴).

## ۲-۳- روند اختلاط و آزمایش ها

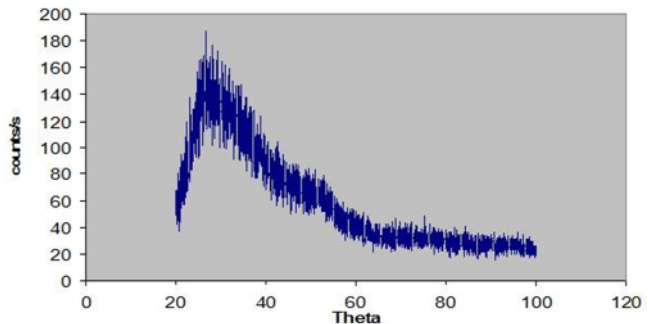
### ۲-۳-۱- ملات خودتراکم

برای ساخت ملات خودتراکم، ابتدا تمامی مواد پودری و ماسه، درون میکسر مخصوص ملات ریخته شد و به مدت یک دقیقه اختلاط یافت. سپس سه چهارم آب مورد نیاز و نانوسیلیس (در صورت وجود) با هم مخلوط شده و درون میکسر ریخته شد و به مدت یک دقیقه دیگر اختلاط یافت. پس از آن، فوق روان کننده و باقیمانده آب به مخلوط اضافه شد و به مدت سه دقیقه دیگر اختلاط یافت. طرح های اختلاط ملات خودتراکم به گونه ای طراحی شده اند که میزان اسلامپ تمامی طرحها بین ۲۴ تا ۲۶ سانتی متر باشند. این هدف توسط سعی و خطا و کاربرد مقادیر مختلف فوق روان کننده حاصل شده است [۲۳]. بعد از اینکه مراحل اختلاط به پایان رسید، آزمایش های جریان اسلامپ کوچک<sup>۳</sup> و قیف V کوچک<sup>۴</sup> بر روی ملات تازه بر اساس آیین نامه EFNARC و آزمایش های مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه بر روی نمونه های پنج سانتی متری بر اساس آیین نامه ASTM C109 و

نانو ذرات سیلیس مورد استفاده از نوع کلئیدی و دارای ۴۰ درصد وزنی مقدار خشک ذرات نانوسیلیس و ۶۰ درصد آب بود. ویژگی های فیزیکی و شیمیایی و کریستالوگرافی نانو ذرات سیلیس در جدول ۲ و شکل ۴ قابل مشاهده است.

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی نانو ذرات سیلیس

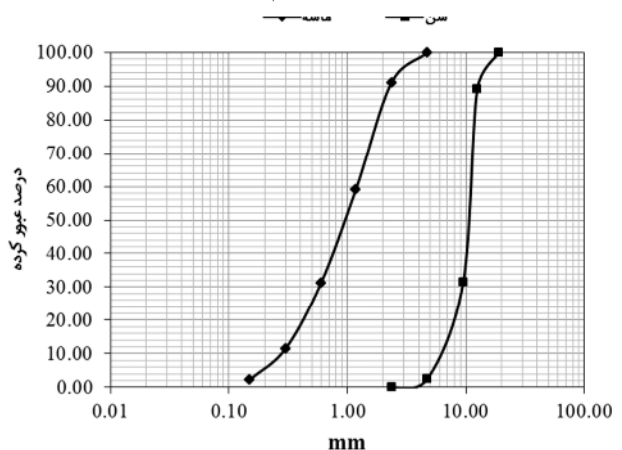
| نوع    | میانگین اندازه ذرات (nm) | سطح ویژه BET (m <sup>2</sup> /gr) | مقدار سیلیس آمورف (% در فاز جامد) | چگالی کلئید |
|--------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------|
| کلئیدی | ۳۴                       | ۱۳۵                               | ۹۹/۷                              | ۱/۳۲        |



شکل ۴- کریستالوگرافی نانو ذرات سیلیس

ماسه مورد استفاده از نوع گرد گوشه رودخانه ای بوده و دارای وزن مخصوص اشباع با سطح خشک<sup>۱</sup> برابر با ۲/۶ بود. دانه بندی ماسه به کار گرفته شده مطابق با ASTM C33 بود [۲۲]. شن مورد استفاده نیز از نوع گرد گوشه طبیعی بود و دارای وزن مخصوص اشباع با سطح خشک برابر با ۲/۷، دانه بندی شن به کار گرفته شده نیز مطابق با ASTM C33 بود. در شکل ۵ دانه بندی شن و ماسه مصرفی نشان داده شده است.

فوق روان کننده مورد استفاده با نام تجاری سوپر ویسکوز<sup>۲</sup> و از



شکل ۵- دانه بندی شن و ماسه

<sup>3</sup> Mini Slump

<sup>4</sup> Mini V funnel

<sup>1</sup> SSD

<sup>2</sup> Super Iscos

جدول ۳- طرحهای اختلاط ملات خودتراکم

| طرح   | نسبت آب به مواد پودری | ماسه | سیمان | آب    | پوزولان | نانو سیلیس | فوق روان کننده |
|-------|-----------------------|------|-------|-------|---------|------------|----------------|
| N0P0  | ۰/۴۵                  | ۱۲۹۵ | ۶۵۰   | ۲۹۵/۵ | ۰       | ۰          | ۳/۶            |
| N0P5  | ۰/۴۵                  | ۱۲۸۲ | ۶۱۷/۵ | ۲۹۵/۵ | ۳۲/۵    | ۰          | ۵/۱            |
| N0P10 | ۰/۴۵                  | ۱۲۶۹ | ۵۸۵   | ۲۹۵/۵ | ۶۵      | ۰          | ۶/۵            |
| N0P15 | ۰/۴۵                  | ۱۲۵۶ | ۵۵۲/۵ | ۲۹۵/۵ | ۹۷/۵    | ۰          | ۷/۹            |
| N0P20 | ۰/۴۵                  | ۱۲۴۳ | ۵۲۰   | ۲۹۵/۵ | ۱۳۰     | ۰          | ۹/۲            |
| N1P0  | ۰/۴۵                  | ۱۲۹۵ | ۶۴۳/۵ | ۲۹۵/۵ | ۰       | ۶/۵        | ۱۲/۳           |
| N1P5  | ۰/۴۵                  | ۱۲۸۲ | ۶۱۱   | ۲۹۵/۵ | ۳۲/۵    | ۶/۵        | ۱۴             |
| N1P10 | ۰/۴۵                  | ۱۲۶۹ | ۵۷۸/۵ | ۲۹۵/۵ | ۶۵      | ۶/۵        | ۱۵/۸           |
| N1P15 | ۰/۴۵                  | ۱۲۵۶ | ۵۴۶   | ۲۹۵/۵ | ۹۷/۵    | ۶/۵        | ۱۷/۵           |
| N1P20 | ۰/۴۵                  | ۱۲۴۳ | ۵۱۳/۵ | ۲۹۵/۵ | ۱۳۰     | ۶/۵        | ۱۹/۲           |

جدول ۴- طرحهای اختلاط بتن خودتراکم

| طرح   | نسبت آب به مواد پودری | شن  | ماسه | سیمان | آب  | پوزولان | نانو سیلیس | فوق روان کننده |
|-------|-----------------------|-----|------|-------|-----|---------|------------|----------------|
| N0P0  | ۰/۴۵                  | ۷۸۰ | ۸۵۰  | ۵۰۰   | ۲۲۵ | ۰       | ۰          | ۳/۱            |
| N0P5  | ۰/۴۵                  | ۷۷۵ | ۸۴۵  | ۴۷۵   | ۲۲۵ | ۲۵      | ۰          | ۳/۶            |
| N0P10 | ۰/۴۵                  | ۷۷۰ | ۸۴۰  | ۴۵۰   | ۲۲۵ | ۵۰      | ۰          | ۴/۲            |
| N0P15 | ۰/۴۵                  | ۷۶۵ | ۸۳۵  | ۴۲۵   | ۲۲۵ | ۷۵      | ۰          | ۴/۹            |
| N0P20 | ۰/۴۵                  | ۷۶۰ | ۸۳۰  | ۴۰۰   | ۲۲۵ | ۱۰۰     | ۰          | ۵/۵            |
| N1P0  | ۰/۴۵                  | ۷۸۰ | ۸۵۰  | ۴۹۵   | ۲۲۵ | ۰       | ۵          | ۶/۴            |
| N1P5  | ۰/۴۵                  | ۷۷۵ | ۸۴۵  | ۴۷۰   | ۲۲۵ | ۲۵      | ۵          | ۷/۱            |
| N1P10 | ۰/۴۵                  | ۷۷۰ | ۸۴۰  | ۴۴۵   | ۲۲۵ | ۵۰      | ۵          | ۷/۷            |
| N1P15 | ۰/۴۵                  | ۷۶۵ | ۸۳۵  | ۴۲۰   | ۲۲۵ | ۷۵      | ۵          | ۸/۳            |
| N1P20 | ۰/۴۵                  | ۷۶۰ | ۸۳۰  | ۳۹۵   | ۲۲۵ | ۱۰۰     | ۵          | ۱۰             |

جذب آب در سن ۲۸ روزه نیز بر روی نمونه‌های پنج سانتی‌متری بر اساس آیین نامه BS 1881: Part 122 بر روی ملات سخت شده انجام شد [۲۴، ۲۵ و ۲۶].

### ۲-۳-۲- بتن خودتراکم

برای ساخت بتن خودتراکم، ابتدا شن و ماسه درون میکسر مخصوص افقی ریخته شد و به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط شد. سپس نصف آب مورد نیاز به مخلوط اضافه شده و به مدت یک دقیقه دیگر اختلاط یافت. پس از آن، میکسر خاموش شده و سنگدانه‌ها به مدت یک دقیقه در حالت سکون باقی ماندند تا آب اضافه شده را جذب کنند. سپس تمامی مواد پودری به مخلوط اضافه شد و به مدت یک دقیقه دیگر اختلاط یافت. در نهایت فوق روان کننده و نانو سیلیس (در صورت وجود) و باقیمانده آب با هم به مخلوط اضافه شد و به مدت سه دقیقه دیگر اختلاط یافت و سپس میکسر به مدت دو دقیقه خاموش شد و در پایان به مدت دو دقیقه دیگر اختلاط یافت. طرحهای اختلاط بتن خود تراکم به گونه‌ای طراحی شده‌اند که میزان اسلامپ تمامی طرحها بین ۶۷ تا ۷۳ سانتی‌متر باشند. این هدف

توسط سعی و خطا و کاربرد مقادیر مختلف فوق روان کننده حاصل شده است [۲۷]. بعد از اینکه مراحل اختلاط به پایان رسید، آزمایش‌های جریان اسلامپ و کیف V و جعبه L و جعبه U بر روی بتن تازه بر اساس آیین نامه EFNARC و آزمایش‌های مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه بر روی نمونه‌های ۱۰ سانتی‌متری بر اساس آیین نامه BS 1881: part116 و مقاومت کششی دو نیم شدن در سنین ۷ و ۲۸ روزه بر روی نمونه‌های ۱۰×۲۰ سانتی‌متری بر اساس آیین نامه ASTM C496-04 و جذب آب در سن ۲۸ روزه بر روی نمونه‌های ده سانتی‌متری بر اساس آیین نامه BS 1881: Part 122 بر روی بتن سخت شده انجام گرفت [۲۸ و ۲۹].

### ۳- نتایج و تحلیل‌ها

#### ۳-۱- رفتار ملات و بتن خودتراکم تازه

نتایج آزمایش‌های ملات و بتن خودتراکم تازه در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود که با افزایش میزان جایگزینی خاکستر لجن و نانو ذرات سیلیس، روانی و کارایی ملات و بتن خودتراکم کاهش و لزجت افزایش می‌یابد.

لزجت ملات زیاد بوده و زمان عبور از قیف V از محدوده استاندارد کمی تجاوز کرده است. با توجه به نتایج آزمایش جعبه L مشاهده می‌شود که نتایج تمامی طرح اختلاطها به جز طرح NIP20 در محدوده استاندارد است. در نتایج آزمایش جعبه U نیز مشاهده می‌شود که حضور ذرات خاکستر لجن باعث جذب آب موجود در مخلوط بتن خودتراکم و افزایش لزجت آن شده و در حضور ۲۰ درصد خاکستر لجن، نتیجه این آزمایش از محدوده استاندارد تجاوز کرده است، همچنین این خاصیت در حضور نانو ذرات سیلیس به شدت افزایش یافته است.

### ۳-۲- مقاومت فشاری و کششی

نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری ملات خودتراکم و مقاومت فشاری و کششی بتن خودتراکم در شکل‌های ۶ تا ۸ نشان داده شده است. در این آزمایش‌ها برای هر طرح اختلاط در سنین مختلف (۷ و ۲۸ روزه) مقاومت سه نمونه اندازه‌گیری شده و میانگین آنها ثبت شده است. با توجه به نتایج جدول، مشاهده می‌شود که کارگیری خاکستر لجن موجب کاهش مقاومت فشاری در هر دو فاز ملات و بتن و همچنین کاهش مقاومت کششی در فاز بتن در تمامی سنین می‌شود. بر همین اساس، یکی از مهم‌ترین اهداف این پژوهش، کاربرد نانو ذرات سیلیس در جهت افزایش توان پوزولانی ذرات خاکستر لجن در ماتریس مصالح پایه سیمانی بود تا از این طریق بتوان مقادیر بیشتری از آن را در ساخت مصالح پایه سیمانی خودتراکم به کار گرفت. با توجه به نتایج، با افزودن نانو ذرات سیلیس به ماتریس ملات و بتن خودتراکم، مقاومت فشاری هم در سنین اولیه و هم در سنین نهایی بهبود می‌یابد. اما با افزایش مقدار

به نظر می‌رسد علت این موضوع، مکانیسم عملکرد یکسان ذرات خاکستر لجن و نانو ذرات سیلیس مورد استفاده در این پژوهش، در ساختار انواع مصالح پایه سیمانی است. علت این رفتار ذرات خاکستر لجن می‌تواند ناشی از دو عامل اصلی باشد: اول آنکه جذب آب ذرات خاکستر لجن به سبب دارا بودن ساختاری متخلخل، بالاست؛ و دوم آنکه بیشتر بودن سطح ویژه ذرات این پوزولان نسبت به ذرات سیمان به سبب ریزتر بودن و زبری بیشتر ذرات آن، به افزایش میزان آب جذب شده در سطح خارجی ذرات خاکستر لجن می‌انجامد [۵]. به همین علت، افزودن این خاکستر لجن در ساختار مصالح پایه سیمانی به علت جذب آب آزاد موجود در ماتریس، منجر به کاهش کارپذیری مخلوط‌ها می‌شود. نانو ذرات سیلیس نیز به سبب دارا بودن سطح ویژه بسیار بالا و نیز پیوندهای غیر اشباع زیاد در سطح خود، مولکول‌های آب را در اطراف خود جذب سطحی می‌نمایند [۳۰]. این موضوع می‌تواند مقداری از آب آزاد را که انتظار می‌رود برای روانی مخلوط به کار گرفته شود، تحت تأثیر قرار دهد و مانع از عملکرد مثبت این مقدار آب برای روان‌تر نمودن مخلوط شود. لذا افزودن نانو ذرات سیلیس منجر به افت روانی و کارپذیری و افزایش لزجت مخلوط‌های سیمانی می‌شود.

همانطور که در جدول ۵ نیز مشاهده می‌شود، در هر دو فاز ملات و بتن، زمان عبور از قیف V در بعضی از طرح اختلاطها از محدوده استاندارد خارج شده است که به دلیل نسبت آب به مواد پودری زیاد است. قابل ذکر است اگر نسبت آب به مواد پودری، زیاد در نظر گرفته نمی‌شد، در طرح‌های حاوی درصد بالای خاکستر لجن، کارایی و روانی قابل قبول به دست نمی‌آمد، چنانچه در فاز ملات در طرح اختلاط NIP20 با وجود شرایط ذکر شده، باز هم

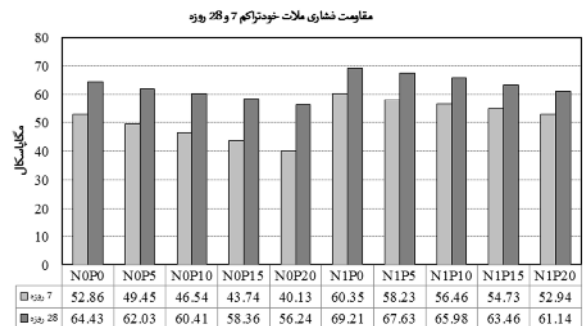
جدول ۵ - نتایج آزمایش‌های ملات و بتن خودتراکم تازه و مقایسه با مقادیر استاندارد

| U box (cm) | بتن خودتراکم |                |            | ملات خودتراکم       |                 | طرح اختلاط       |
|------------|--------------|----------------|------------|---------------------|-----------------|------------------|
|            | L box        | V funnel (sec) | Slump (cm) | Mini V funnel (sec) | Mini Slump (cm) |                  |
| ۱۲/۴       | ۰/۹۱۴        | ۳/۹            | ۷۱/۲       | ۴/۵                 | ۲۵/۲            | N0P0             |
| ۱۵/۲       | ۰/۸۹۶        | ۵/۱            | ۶۸/۳       | ۵/۷                 | ۲۴/۵            | N0P5             |
| ۱۹/۸       | ۰/۸۸۴        | ۵/۸            | ۶۷/۲       | ۶/۷                 | ۲۵/۴            | N0P10            |
| ۲۷/۵       | ۰/۸۷۲        | ۷/۱            | ۷۰/۱       | ۷/۸                 | ۲۴/۶            | N0P15            |
| ۳۳/۵       | ۰/۸۱۳        | ۸/۸            | ۶۹/۴       | ۸/۶                 | ۲۴/۴            | N0P20            |
| ۱۴/۳       | ۰/۹۰۱        | ۵/۶            | ۷۰/۸       | ۶/۱                 | ۲۵/۳            | N1P0             |
| ۲۰/۵       | ۰/۸۶۴        | ۶/۹            | ۷۰/۲       | ۷/۳                 | ۲۵/۱            | N1P5             |
| ۲۴/۶       | ۰/۸۵۹        | ۸/۱            | ۶۷/۵       | ۸/۹                 | ۲۴/۴            | N1P10            |
| ۲۹/۴       | ۰/۸۲۴        | ۹/۸            | ۶۸/۱       | ۱۰/۱                | ۲۴/۲            | N1P15            |
| ۳۵/۳       | ۰/۷۸۹        | ۱۱/۴           | ۶۹/۳       | ۱۱/۵                | ۲۴/۵            | N1P20            |
| <۳۰        | ۱-۰/۸        | ۱۲-۶           | ۷۵-۶۶      | ۱۱-۷                | ۲۶-۲۴           | محدوده استاندارد |

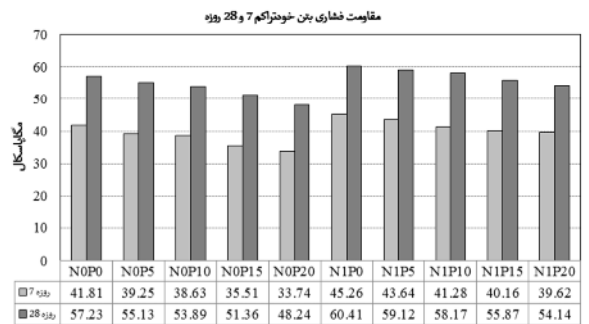
### ۳-۳- جذب آب

نتایج آزمایش جذب آب نمونه‌های ملات و بتن خودتراکم در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به این موضوع که روند جذب آب و میزان آن به نحوه توزیع حفرات در ساختار مصالح پایه سیمانی وابسته است، لذا ساختار حفرات به‌عنوان عامل اصلی در جهت افزایش و یا کاهش روند جذب آب در ساختار ملات و بتن خودتراکم مطرح است. از آنجا که خاکستر لجن، پوزولان ضعیفی است، لذا نمی‌تواند ساختار نمونه‌های ملات و بتن خودتراکم را در سنین میانه (۲۸ روزه) به سرعت بهبود بخشد، در نتیجه این موضوع، ساختار حفرات در نمونه‌ها به‌طور مؤثر بهبود نمی‌یابد زیرا حضور مقدار کمتر سیمان بین سنگدانه‌ها (با افزایش میزان جایگزینی خاکستر لجن)، علاوه بر عدم پرمودن فضاهای خالی، باعث می‌شوند محصولات واکنش‌های هیدراتاسیون، چسبندگی مناسبی را با سنگدانه‌ها برقرار نماید. به این ترتیب حضور ذرات خاکستر لجن نخواهند توانست بهبود چندانی را در ساختار نفوذپذیری نمونه‌های ملات و بتن خودتراکم ایجاد نمایند. در نتیجه این موضوع و مباحث مطرح شده در بالا، با توجه به عملکرد پوزولانی و پرکننده ذرات خاکستر لجن، بهبود نسبی ساختار تخلخل و کاهش روند جذب آب نمونه‌های ملات و بتن خودتراکم در جایگزینی کم مشاهده می‌شود. اما در مقادیر بالاتر، این روند تغییر می‌کند و به روندی افزایشی در جذب آب تبدیل می‌شود؛ زیرا سیستم بهینه خاکستر لجن - سیمان در مقادیر کمتر

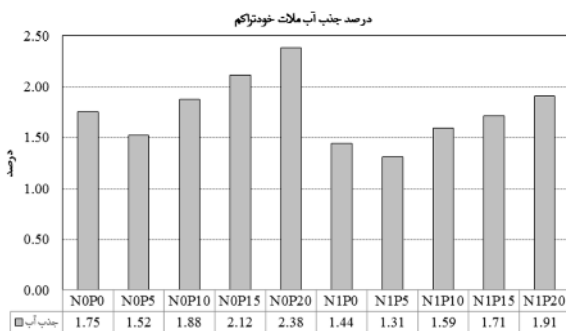
خاکستر لجن در کنار نانو ذرات سیلیس، همچنان روند نزولی در مقاومت مشاهده می‌شود. این موضوع در تمامی سنین مشاهده می‌شود. اما در حضور نانو ذرات سیلیس، شدت افت مقاومت با افزایش مقدار جایگزینی خاکستر لجن کاهش یافته است، زیرا نانو ذرات سیلیس علاوه بر بهبود ریزساختار و ناحیه انتقالی بین خمیر و سنگدانه‌ها با عملکرد پوزولانی فوق‌العاده خود، با قرار گرفتن در حفرات و روی سطح ذرات خاکستر لجن به بهبود عملکرد این ماده در ماتریس خمیر نیز کمک فراوانی می‌نمایند. در نتیجه این موضوع، توان پوزولانی ذرات خاکستر لجن به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد و عملکرد مناسب سیستم ترکیبی نانو ذرات سیلیس - خاکستر لجن در افزایش مقاومت‌های اولیه و نهایی مشاهده می‌شود.



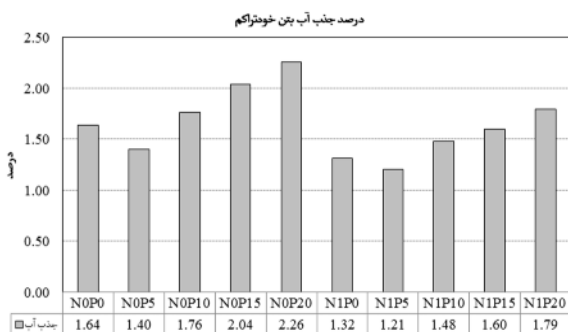
شکل ۶- مقاومت فشاری ملات خودتراکم 7 و 28 روزه



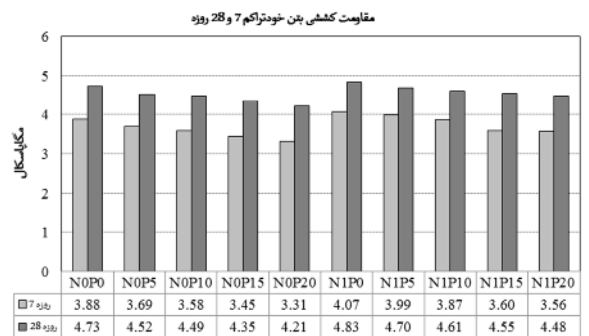
شکل ۷- مقاومت فشاری بتن خودتراکم 7 و 28 روزه



شکل ۹- نحوه تغییرات درصد جذب آب ملات‌های خودتراکم



شکل ۱۰- نحوه تغییرات درصد جذب آب بتن‌های خودتراکم



شکل ۸- مقاومت کششی بتن خودتراکم 7 و 28 روزه

جایگزینی رخ داده است. با حضور نانو ذرات سیلیس در ماتریس ملات و بتن خودتراکم، روند جذب آب نمونه‌ها کاهش مؤثری می‌یابد، زیرا نانو ذرات سیلیس بر اساس عملکردهای متفاوت خود در ساختار محصولات پایه سیمانی، سبب بهبود ساختار تخلخل در آن‌ها می‌شود. در نمونه‌های دارای سیستم ترکیبی نانو ذرات سیلیس - خاکستر لجن - سیمان، مقادیر جذب آب نسبت به طرح‌های بدون نانو ذرات کمتر است. لذا اثر هم افزایی سیستم نانو ذرات سیلیس - خاکستر لجن، در بهبود ساختار تخلخل اثر بارزی داشته است.

### ۳-۴- تحلیل اقتصادی

در این بخش به بیان توضیحاتی راجع به تحلیل اقتصادی پرداخته می‌شود. با توجه به اینکه تولید محصولات نانویی، از فناوری‌های پیشرفته به حساب می‌آید، بنابراین نیازمند داشتن زیرساخت‌های مناسب است تا این محصولات با توجه اقتصادی قابل قبولی تولید شده و بتوان آنها را در صنایع مورد استفاده قرار داد. لازمه چنین رویکردی، تولید انبوه مواد نانویی در داخل کشور است که چنین امری نیازمند سرمایه‌گذاری زیادی در این زمینه است. در حال حاضر رویکرد نانو فناوری در کشور در مرحله تحقیقات دانشگاهی و ترویجی است و تا مرحله تجاری شدن به زمان نیاز است. از این رو در صورتی که استفاده از نانو ذرات سیلیس در بتن با رویکرد کاربرد خاکستر لجن و فعال‌سازی آن مد نظر باشد، برای تأمین نانو ذرات سیلیس مورد نیاز، مرحله اول تأمین آن از منابع خارجی و پس از آن، تولید انبوه آن است.

در مورد خاکستر لجن فاضلاب نیز در هیچ یک از تحقیقات انجام شده در زمینه کاربرد این ماده در بتن، تحلیل اقتصادی مناسبی ارائه نشده است، زیرا این تحقیقات در مرحله بررسی عملکرد این ماده بوده تا مشخص شود که این ماده به‌عنوان یک پوزولان مصنوعی آیا قابلیت استفاده در بتن را دارد یا خیر. در این تحقیق نیز مهم‌ترین هدف این بوده است که بتوان بهترین روش تولید خاکستر لجن را توسط فرایندهای مختلف حرارتی به‌دست آورد و با استفاده از نانو ذرات سیلیس، روند هیدراتاسیون این پوزولان را

سرعت بخشید و به طرح‌های اختلاط مناسبی از ترکیب سیمان و خاکستر لجن و نانو ذرات سیلیس دست یافت. در این مطالعه به دلیل اینکه تولید خاکستر لجن در اشل آزمایشگاهی انجام شد، هزینه تولید زیاد بود و در نگاه اول به نظر می‌رسد توجه اقتصادی ندارد ولی اگر بتوان این خاکستر را در مقیاس بسیار بزرگ‌تر تولید نمود و هزینه آن را محاسبه کرد، آنگاه می‌توان یک تحلیل اقتصادی دقیق در مورد کاربرد آن در ساخت بتن ارائه نمود و به صراحت در مورد اقتصادی بودن یا غیر اقتصادی بودن آن اظهار نظر کرد. به این دلیل در این قسمت تلاش شد در خصوص ارزش اقتصادی محصول، بحث شود. در جدول ۶ قیمت مصالح خام به‌کار رفته در بتن

جدول ۶- قیمت مصالح خام به‌کار رفته در بتن

| ماده         | هر تن سیمان | هر کیلو محلول نانو ذرات سیلیس | هر کیلو فوق روان کننده | هر تن شن و ماسه |
|--------------|-------------|-------------------------------|------------------------|-----------------|
| قیمت (تومان) | ۱۰۰،۰۰۰     | ۱،۶۰۰                         | ۹۰۰                    | ۱۲،۰۰۰          |

در جدول ۷، هزینه تولید هر متر مکعب بتن خودتراکم در دو طرح اختلاط NOP0 و NIP10 که مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها در آنها به یکدیگر نزدیک است، ارائه شده است.

با توجه به جدول‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که، در طرح اختلاط NIP10، افزایش جزئی هزینه تولید بتن در اثر حضور نانو ذرات سیلیس و مقداری نیز (X) در اثر حضور خاکستر لجن است که اگر بتوان شرایط تولید ذرات نانو سیلیس را در داخل کشور مهیا کرد، افزایش قیمت ناشی از حضور نانو ذرات سیلیس بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی خواهد بود. ضمناً در مورد خاکستر لجن اگر حمایت‌های مالی از تولید انبوه آن به‌وجود آید، مسلماً افزایش هزینه تولید بتن در اثر حضور این ماده نیز زیاد نخواهد بود.

در مجموع اگرچه هزینه تولید بتن در حضور نانو ذرات سیلیس و خاکستر لجن چند درصدی افزایش خواهد یافت، ولی با توجه به اینکه از طرف دیگر باعث دفع لجن فاضلاب شده و دیگر هزینه‌ای

جدول ۷- قیمت بتن حاصله (هر متر مکعب)

| ماده                     | سیمان  | خاکستر لجن | نانو ذرات سیلیس | فوق روان کننده | شن و ماسه | قیمت تمام شده هر متر مکعب بتن (تومان) |
|--------------------------|--------|------------|-----------------|----------------|-----------|---------------------------------------|
| قیمت در طرح اختلاط NOP0  | ۵۰،۰۰۰ | ۰          | ۰               | ۲،۷۹۰          | ۱۹،۵۶۰    | ۷۲،۳۵۰                                |
| قیمت در طرح اختلاط NIP10 | ۴۴،۵۰۰ | X          | ۸،۰۰۰           | ۶،۹۳۰          | ۱۹،۳۲۰    | ۷۸،۷۵۰ + X                            |



برای دفع آن لازم نخواهد بود و پسماندی باقی نخواهد ماند که دفع آن در دسرساز و هزینه بر و برای محیط زیست نیز مضر باشد، لذا می‌توان ابراز داشت در صورت تولید انبوه خاکستر لجن فاضلاب و استفاده آن در ساخت بتن به همراه نانو ذرات سیلیس، به احتمال زیاد توجیه اقتصادی وجود خواهد داشت. بدیهی است تحلیل کامل و دقیق اقتصادی مستلزم انجام تحقیقات گسترده‌تری خواهد بود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد با افزایش مقدار جایگزینی خاکستر لجن و نیز نانو ذرات سیلیس به جای سیمان، کارپذیری ملات و بتن خودتراکم افت می‌کند. بر اساس نتایج آزمایش مقاومت فشاری و کششی، با افزایش مقدار خاکستر لجن، مقاومت نمونه‌های ملات و بتن خودتراکم کاهش می‌یابد. اما به‌کارگیری نانو ذرات سیلیس در کنار ذرات خاکستر لجن، سبب بهبود مقاومتی ترکیب حاصله می‌شود. علت اصلی این موضوع، بهبود ریزساختار خمیر سیمان موجود در بین سنگدانه‌ها و نیز ناحیه انتقالی داخلی

#### ۵- مراجع

1. Torabian, A., and Momeni, L. (1998). "Sewage sludge management plant (Ghods wastewater treatment plant)." *J. of Ecology*, 28 (30), 65-78. (In Persian)
2. Akhbari, M., and Alavi Moghadam, S.M. (2004). "Review of American EPA standards about the use of wastewater treatment plant sludge in agricultural fields." *11<sup>th</sup> Student Conf. of Civil Eng.*, Hormozgan University, Bandarabbas. (In Persian)
3. Lin, D.F., Lin, K.L., Chang, W.C., Luo, H.L., and Cai, M.Q. "Improvements of nano-SiO<sub>2</sub> on sludge/fly ash mortar." *Waste Management*, 28, 1081-1087.
4. Lin, K.L., Chang, W.C., Lin, D.F., Luo, H.L., and Tsai, M.C. (2008). Effects of nano-SiO<sub>2</sub> and different ash particle sizes on sludge ash-cement mortar." *J. of Environmental Management*, 88 (2), 708-714.
5. Kuo, W.T., Lin, K.L., Chang, W.C., and Luo, H.L. (2006) "Effects of nano-materials on properties of waterworks sludge ash cement paste." *J. of Indian Engineering Chemistry*, 12, 702-709.
6. Donatello, S., Freeman-Pask, A., Tyrer, M., and Cheeseman, C.R. (2010). "Effect of milling and acid washing on the pozzolanic activity of incinerator sewage sludge ash." *Cement and Concrete Composite*, 32, 54-61.
7. Monzo, J., Paya, J., Borrachero, M.V., and Girbes, I. (2003). "Reuse of sewage sludge ashes (SSA) in cement mixtures: the effect of SSA on the workability of cement mortars." *Waste Management*, 23, 373-381.
8. Garces, P., Perez Carrion, M., Garcia-Alcocel, E., Paya, J., Monzo, J., and Borrachero, M.V. (2003). "Mechanical and physical properties of cement blended with sewage sludge ash." *Waste Management*, 28, 2495-2502.
9. Fontes, C.M.A., Barbosa, M.C., Toledo Filho, R.D., and Goncalves, J.P. (2004). "Potentiality of sewage sludge ash as mineral additive in cement mortar and high performance concrete." *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*, Barcelona, Spain, 10 pp.
10. Cyr, M., Coutand, M., and Clastres, P. (2007). "Technological and environmental behavior of sewage sludge ash (SSA) in cement-based materials." *Cement and Concrete Research*, 37, 1278-1289.

بین خمیر و سنگدانه‌ها، در نتیجه حضور مقادیر بیشتر ژل متراکم کلسیم-سیلیکات-هیدراته و حضور مقدار کمتری از بلورهای کلسیم هیدروکسید است. در نهایت نتایج به‌دست آمده از آزمایش جذب آب بیانگر بهبود دوام (ساختار نفوذپذیری) نمونه‌های ملات و بتن خودتراکم در حضور مقادیر کم خاکستر لجن است. اما با افزایش میزان خاکستر لجن، جذب آب نمونه‌ها افزایش می‌یابد. البته نکته مهم، بهبود خواص نفوذپذیری نمونه‌های ملات و بتن خودتراکم در نتیجه حضور نانو ذرات سیلیس است. گرچه حضور نانو ذرات، روند تغییرات جذب آب در میان طرح‌های مختلف را تغییر نداده است، اما سبب بهبود جذب آب طرح‌های گوناگون می‌شود.

با عنایت به موارد بالا، از این پژوهش به‌عنوان گام مقدماتی، نتایج خوبی به‌دست آمده و به نظر می‌رسد در مجموع با توجه به ملاحظات محیط‌زیستی، دوام و نتایج مقاومتهای به‌دست آمده، پتانسیل به‌کارگیری از لجن فاضلاب در تولید بتن وجود داشته و تحقیقات بیشتر، می‌تواند بسیار مفید باشد.

11. Kjersgaard, D. (2007). "The reuse of bio ash for the production of concrete, A Danish case study." *IWA Specialist Conference on Wastewater Biosolids*, Moncton, New Brunswick, Canada, 24-27.
12. Garcés, P., Pérez M., Carrión, García-Alcocel, E., Payá, J., Monzó, J., and Borrachero, M.V. (2008). "Mechanical and physical properties of cement blended with sewage sludge ash." *J. of Waste Management*, 28, 2495-2502.
13. Morais, L.C., Dweck, J., Campos, V., and Buchler, P.M. (2009). "Characterization of sewage sludge ashes to be used as a ceramic raw material." *Chemical Engineering Transactions*, 17, 1813-1818.
14. Kuo, W.T., Lin, K.L., Chang, W.C., and Luo, H.L. (2006). "Effect of nano-materials on properties of waterworks sludge ash cement paste." *J. Ind. Eng. Chem.*, 12 (5), 702-709.
15. Tay, J.H., and Show, K.Y., (1994). "Municipal wastewater sludge as cementitious and blended cement materials." *Cement and Concrete Composites*, 16(1), 39-48.
16. Pan, S.C., Tseng, D.H., Lee, C.C., and Lee, C. (2003). "Influence of fineness of sewage sludge ash on the mortar properties." *Cement and Concrete Research*, 33, 1749-1754.
17. Wang, L. J., and Wang, B. M. (2006). "Research on effects of nano-SiO<sub>2</sub> on properties of Portland." *J. of Dalian University of Technology*, 43, 666-669.
18. Khaloo, A., and Hosseini, P. (2008). "Review of relationship between compressive strength and microstructure of cement mortars containing different pozzolans and nanoparticles." *J. of Iranian Concrete Institute*, 30, 17-22. (In Persian)
19. Khaloo, A., and Hosseini, P. (2009). "Development of low thickness structural elements by using of nanosilica particles." *Iranian 1<sup>st</sup> National Conf. of Concrete*, Iranian Concrete Institute, Tehran. (In Persian)
20. Damtoft, J.S., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D., and Gartner, E.M. (2008). "Sustainable development and climate change initiatives." *Cement and Concrete Research*, 38, 115-127.
21. Ortiz, O., Castells, F., and Sonnemann, G. (2009). "Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA." *Construction and Building Materials*, 23, 28-39.
22. ASTM C33/C33M-08. (2008). *Standard specification for concrete aggregates*, Annual Book of ASTM Standards.
23. Guneyisi, E., and Gesoglu, M. (2008). "Properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and metakaolin." *Materials and Structures*, 41, 1519-1531.
24. EFNARC. (2002). *Specification and guidelines for self-compacting concrete*, Free pdf copy downloadable from <<http://www.efnarc.org>>, (Feb, 2012).
25. ASTM C109/C109M-99. (1999). *Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortar*, Annual Book of ASTM Standards.
26. BS 1881-122. (1983). *Testing concrete - Method for determination of water absorption*, BS.
27. Gesoglu, M., Guneyisi, E., and Ozbay, E. (2009). "Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume." *Construction and Building Materials*, 23, 1847-1854.
28. BS 1881: part116. (1993). *Testing concrete - Method for determination of compressive strength of concrete cubes*, BS.
29. ASTM C496-04. (2008). *Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens*, Annual Book of ASTM Standards.
30. Senff, L., Labrincha, J.A., Ferreira, V.M., Hotza, D., and Repette, W.L. (2009). "Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars." *Construction and Building Materials*, 23, (12), 3475-3484.