

## مطالعه آزمایشگاهی تاثیر کاربرد ژئولیت بر رفتار شالوده سطحی مستقر بر ماسه ساحل بابلسر

سینا سلامت پور<sup>۱</sup>، یاسر جعفریان<sup>۲\*</sup>، البرز حاجیان نیا<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- دانشیار، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

### چکیده

ضعف مقاومت برشی خاک‌های ماسه‌ای سست و قرارگیری تعداد قابل توجهی از سازه‌ها بر روی این خاک‌ها، لزوم بررسی رفتار پی‌های سطحی، نحوه قرارگیری و نوع آن را ایجاب می‌کند. تثبیت خاک‌های ماسه‌ای سست با استفاده از سیمان و به همراه یک ماده افزودنی یکی از رایج‌ترین روش‌های بهسازی این‌گونه خاک‌ها می‌باشد. در این مطالعه جهت ارزیابی مشخصه‌های مکانیکی ترکیبات ماسه سیمان-ژئولیتی یکسری آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده و در ادامه جهت بررسی رفتار خاک زیر پی‌های سطحی مستقر بر روی این تثبیت از آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی کوچک‌مقیاس استفاده شده است. افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پی که نتیجه فعل‌وانفعالات شیمیایی بین ترکیبات ماسه، سیمان و ژئولیت می‌باشد از اصلی‌ترین اهداف این روش بهسازی است. نتایج نشان داد که به‌کارگیری پد ژئولیتی با ضخامت  $B/6$  در زیر پی‌های نواری، نرخ ظرفیت باربری آن را نسبت به حالت بدون پد برای حالت ۳٪ و ۷٪ سیمان به مقدار ۱۱٪ و ۲۳٪ افزایش می‌دهد. این در حالی است که اگر ضخامت پد ۲ برابر گردد، نرخ ظرفیت باربری به ترتیب ۴۴٪ و ۶۷٪ افزایش می‌یابد. همچنین مقایسه‌ای بین مقدار سیمان مصرفی در تمامی نمونه‌ها، نرخ تغییرات برای ضریب افزایش مقاومت در حدود ۹٪ الی ۲۳٪ بوده اما برای ضریب کاهش نشست تقریباً ۶٪ و ثابت است. این مطلب بیانگر آن است که استفاده از این روش تسلیح، رفتارهای خاک‌های مستعد روانگرایی را بهبود می‌بخشد.

کلمات کلیدی: ژئولیت، پی سطحی، آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده، آزمایش مدل‌سازی فیزیکی

سابقه مقاله:

شناسه دیجیتال:

شناسه دیجیتال:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/JSCE.2018.143995.1630					
doi: 10.22065/JSCE.2018.143995.1630	۱۳۹۹/۱۰/۰۱	۱۳۹۹/۱۰/۰۱	۱۳۹۷/۰۸/۲۲	۱۳۹۷/۰۷/۰۱	۱۳۹۷/۰۵/۲۰

\*نویسنده مسئول: یاسر جعفریان

پست الکترونیکی: yjafarianm@iiees.ac.ir

# Experimental investigation into the influence of zeolite addition on shallow foundations behavior placed on coastal sand of Mazandaran Sea

Sina Salamatpoor<sup>1</sup>, Yaser Jafarian<sup>2\*</sup>, Alborz Hajiannia<sup>1</sup>

*1 Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran*

*2 Associate Professor, Institute of Geotechnical Engineering, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, Iran*

*3 Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran*

## ABSTRACT

*The shortcoming of loose sandy soils in terms of shear strength besides placement of a huge number of structures on them drive the critical requirement for exploring the shallow foundations treatment, their positioning and shapes. In this regard, stabilization of loose sandy soils through fabricating cement and an appropriate additive is one of a promising solution. Hence, in this study, a series of unconfined compressive strength tests have been conducted to find out the mechanical properties of zeolite cemented sand composites. Afterwards, 1g small scale tests have been performed to measure the behavior of shallow foundations placed on the stabilized ground. The main aims of this study are enhancing the bearing capacity and conversely decreasing the settlement of foundations attributed to the chemical reactions between sand, cement and zeolite particles. The results demonstrate that placing a zeolite pad with B/3 thickness underneath the shallow foundation, which contain 3% and 7% cement content, increases their bearing capacity in a range between 11% and 23% respectively compared to those of without a zeolite pad. This is followed by respectively 44% and 67% enhancement in the bearing capacity through doubling the thickness of the zeolite pad. Considering the cement content as a comparing factor between the samples, increasing in the resistant coefficient is in a range between 9% to 23%, while it is constantly 6% for the decreasing coefficient. In summary, this stabilization approach improves the behavior of shallow footing on loose soils.*

## ARTICLE INFO

**Receive Date:** 11 August 2018

**Revise Date:** 23 September 2018

**Accept Date:** 13 November 2018

### Keywords:

*Zeolite; Shallowfooting;*

*Unconfinedstrength;*

*Physicalmodeling;*

*bearingcapacity*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.143995.1630

\*Corresponding author: Yaser Jafarian

Email address: yjafarianm@iiees.ac.ir

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با توجه به رشد روزافزون جمعیت دنیا، مساحت زمین‌های مناسب برای ساخت‌وساز و احداث بنا به تدریج در حال کاهش است. در چنین شرایطی نیاز به دستیابی به روش‌های جدید و اصولی برای بهبود و اصلاح زمین‌های نامناسب رقابت شدیدی را بین مهندسان عمران کشورهای توسعه‌یافته ایجاد کرده است. روش‌های مختلفی به منظور بهسازی و اصلاح خاک ابداع گردیده، لیکن تعدادی از این روش‌ها به سبب سهولت اجرا، هزینه‌های عملیاتی و کسب تجربه به واسطه کاربرد طی سالیان متمادی بیشتر از روش‌های دیگر متداول شده است. همه این روش‌ها با استفاده از یک ماده افزودنی و یا یک عامل فیزیکی می‌تواند خواص خاک را بهبود بخشد. یکی از انواع روش‌های بهسازی که جهت مقابله با ضعف مقاومت برشی خاک‌های ماسه‌ای سست بکار می‌رود استفاده از تثبیت است. در گذشته مطالعات فراوانی بر روی خاک‌های سیمانته شده تحت آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده صورت پذیرفته است [۱-۴] و همه تأیید کردند که افزودن سیمان به نمونه‌های خاک باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌گردد.

فرآیند تولید سیمان به‌عنوان بزرگ‌ترین منبع تولید انتشار گاز در اکسید کربن منجر به تولید ۷٪ از کل گازهای گلخانه‌ای جهان می‌باشد را به خود اختصاص داده است [۵]. با توجه به گرم شدن کره زمین و پیامدهای مخاطره‌انگیز آن استفاده از ماده‌ای طبیعی که با کمترین هزینه و صرف انرژی در فرآیند تولید و علاوه بر آن کاهش مشکلات زیست‌محیطی در فرآیند چرخه بازیافت در طبیعت گردد راهکاری مناسب خواهد بود. جهت برون‌رفت از این چالش دو راهکار وجود دارد. اولی توقف کامل صنعت سیمان که این کار با توجه به گستردگی مصرف سیمان در تمامی صنایع امکان‌پذیر نخواهد بود و دومی استفاده از مواد افزودنی با نسبت‌های مختلفی از درصد سیمان جهت کاهش وابستگی به سیمان و اصلاح پارامترهای مقاومتی آن می‌باشد. یکی از این مواد جایگزین جهت کم‌رنگ کردن نقش سیمان، ژئولیت طبیعی می‌باشد. ژئولیت‌ها یک نوع مصالح پوزولانی آتش‌فشانی بوده که به‌صورت گسترده در تمامی کشورها وجود دارند. به‌عنوان مثال در کشور چین که دارای منابع غنی از ژئولیت طبیعی است، مصرف این ماده در صنعت سیمان و دیگر صنایع سالانه بیش از ۳۰ میلیون تن می‌باشد [۶].

رضانیان پور و همکاران [۷] به بررسی اثر افزودن ژئولیت به نمونه‌های بتن پرداختند و نشان دادند که به‌کارگیری ژئولیت طبیعی جایگزین سیمان به میزان ۳۰ درصد منجر به بهبود پارامترهای مقاومتی می‌شود. هانگ و همکاران [۸] تأثیر افزودن ژئولیت به خاکریزهای ماسه-بنوتونیتی پرداختند و دریافته‌اند که افزودن ۱۰٪ ژئولیت، مقاومت نمونه‌ها را افزایش و در ارتباط این نفوذپذیری کاهش می‌یابد. تحقیقات انجام‌گرفته شده در زمینه ظرفیت باربری پی‌های مستقر بر خاک‌های ماسه‌ای سست این حقیقت را به‌روشنی نشان می‌دهد که این خاک‌ها در هنگام روانگرا شدن و حتی حالت نیمه روانگرا، دچار افت مقاومت برشی قابل‌توجهی خواهند شد. بنابراین نیاز این خاک‌ها به بهسازی غیرقابل‌چشم‌پوشی می‌باشد. جعفریان و همکاران [۹] به بررسی ظرفیت باربری، نشست و فشار تراوش رو به بالا برای پی‌های سطحی واقع‌شده بر ماسه اشباع بابل‌س با قابلیت روانگرا شدن پرداختند. آنها نشان دادند که در شرایط روانگرایی کامل و در صورت وجود سازه و اعمال تنش برشی، شالوده همچنان دارای ظرفیت باربری قابل‌توجهی برخوردار بوده و در واقع کرنش‌های برشی سهم بیشتری در نشست‌های کلی سازه دارند.

در این مطالعه جهت بهبود پارامترهای مقاومتی خاک‌های ماسه‌ای سست با استفاده از تثبیت سیمان و با تکنیک افزودن ماده طبیعی به نام ژئولیت و با درصد جایگزینی‌های مختلفی به‌جای سیمان استفاده خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این ترکیبات می‌تواند به‌عنوان یک تقویت‌کننده بسیار مناسب و کاربردی جهت افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پی که نتیجه فعل‌وانفعالات شیمیایی بین سیمان و ماسه و ژئولیت است استفاده نمود.

## ۲- مطالعات آزمایشگاهی

## ۲-۱- معرفی مصالح

در این مطالعه از ماسه سواحل شهرستان بابلسر به عنوان خاک پایه انتخاب شده است. بر اساس سیستم طبقه بندی متحد در رده ماسه تمیز با نشانه SP (بد دانه بندی شده) قرار می گیرد (برای اطلاعات بیشتر در مورد خصوصیات رفتاری این ماسه به مقالات [۱۰-۱۲] رجوع شود). زئولیت مورد استفاده از نوع کلینوپتیلولیت بوده که از معدنی واقع در ۳۰ کیلومتری شمال سمنان استخراج شده است. زئولیت بر اساس سیستم طبقه بندی متحد در رده ML نام گذاری و رنگ آن قهوه ای روشن می باشد. بر پایه اکتشافات انجام شده و گواهی کشف صادره توسط اداره کل معادن و فلزات استان سمنان، مقدار ذخیره تأیید شده زئولیت در این معدن بالغ بر ۶۰۰ هزار تن بوده و هم اکنون ۸۵ درصد استخراج زئولیت کشور از این معدن صورت می پذیرد. این ماده به عنوان ماده پوزولانی و افزودنی به سیمان انتخاب شده است. سیمان پرتلند تیپ II کارخانه نکا (شرکت سیمان مازندران) واقع در استان مازندران به عنوان تثبیت کننده خاک پایه انتخاب شده است. مصرف ویژه این سیمان در محل هایی که حرارت هیدراتاسیون متوسط برای آنها ضرورت داشته و حمله سولفات ها به آنها در حد متوسط می باشد مورد استفاده قرار می گیرد [۴]. مشخصات فیزیکی و ترکیبات شیمیایی سیمان و زئولیت مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی و ترکیبات شیمیایی سیمان و زئولیت مورد استفاده در این تحقیق [۴]

جزئیات	سیمان	زئولیت
SiO <sub>2</sub>	21.90	67.79
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.86	13.66
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.30	1.44
CaO	63.32	1.68
Na <sub>2</sub> O	0.36	2.04
K <sub>2</sub> O	0.56	1.42
MgO	1.15	1.20
SO <sub>3</sub>	2.10	0.50
L.O.I (Loss on Ignition)	2.40	10.23
C <sub>3</sub> S	47.98	—
C <sub>2</sub> S	26.61	—
C <sub>3</sub> A	7.30	—
C <sub>4</sub> AF	10.04	—
Specific gravity	3.11	2.2
Blaine (cm <sup>2</sup> /gr)	3050	400
Initial setting time (min)	115	—

## ۲-۲- شرح دستگاه، آماده سازی نمونه و روش انجام آزمایش

در این مطالعه جهت بررسی اثرات افزودن زئولیت به نمونه های ماسه سیمانی دو سری آزمایش صورت پذیرفته است. در ابتدا با انجام ۳۰ آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده جهت تعیین یک نسبت بهینه زئولیت از لحاظ حداکثر مقاومت فشاری حاصل شده در بین نمونه ها صورت پذیرفته و در ادامه با به کارگیری این مقدار بهینه در نمونه های ماسه سیمانی به عنوان ترکیبی مناسب جهت تثبیت کردن خاک های ماسه (پد) تعدادی آزمایش مدل سازی فیزیکی کوچک مقیاس ۱g جهت ارزیابی رفتاری پی های نواری مستقر بر روی این پدها انجام گرفته است.

### ۲-۲-۱- آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

در این پژوهش از آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده مطابق بر استاندارد انجمن مواد و آزمایش آمریکا با شماره D2166 استفاده شده است [۱۳]. هدف از انجام آزمایش، مطالعه اثر افزودن مقادیر متغیر افزودنی زئولیت و سیمان به مقاومت نمونه های ماسه می باشد. با توجه به طرح اختلاط های مورد نظر در این مطالعه، سیمان با مقدار ۳ و ۷ درصد (بر اساس وزن خاک پایه) و محتوای زئولیت جایگزینی با سیمان برابر ۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد انتخاب شده است. درصدهای سیمان انتخاب شده در این مطالعه بر اساس تجارب بین المللی که در ارتباط با سیمان-خاک سروکار دارند می باشد و میزان ۷ درصد سیمان را به عنوان حداکثر مقدار معرفی می کند. این در حالی است که برای کارهای تحقیقاتی آزمایشگاهی محققان متعددی نرخ درصد سیمان بکار رفته جهت تثبیت خاک را بین ۱٪ الی ۱۲٪ معرفی می کنند [۴]. باید متذکر شد که استفاده از درصدهای بالا سیمان در مقاصد کارهای عملی مانند ساخت زیرساخت و اساس جاده ها، خاکریز و غیره با توجه به مصرف بالای سیمان و در ارتباط با آن، هزینه زیاد (قیمت جهانی سیمان) و حرارت هیدراتاسیون ایجاد شده از محدودیت های مقدار بالای سیمان مصرفی می باشد.

پس از وزن و تقسیم بندی مصالح خشک هر طرح بر اساس ترکیب و نسبتی از خاک پایه به طور یکنواخت مخلوط می شود. سپس آب به مقدار ۱۰ درصد وزن کل خاک پایه به هر مخلوط اضافه می گردد. پس از ریختن مصالح در قالب آزمایش تک محوری و سپری شدن مدت زمان ۷ ساعت و ایجاد گیرش اولیه در مخلوط، قالب نمونه ها باز شده و هر یک از نمونه ها به طور جداگانه در کیسه های نایلونی سر بسته ای قرار داده می شود. با توجه به برنامه زمان بندی انتخاب شده شامل ۷، ۱۴، ۲۸ روز عمل آوری، نمونه ها در اتاق مرطوب که دارای درجه حرارت  $23 \pm 2^{\circ}C$  و رطوبت نسبی بالای ۹۵٪ می باشد، باز شده و مستقیماً بدون هیچ ضربه و لرزشی در دستگاه بارگذاری قرار می گیرد. نرخ بارگذاری با سرعتی برابر ۱ میلی متر در دقیقه اعمال شده و گسیختگی در نمونه ها زمانی اتفاق خواهد افتاد که تغییر شکل نمونه به ۱۵ درصد کرنش محوری خود می رسد. مدت زمان انجام آزمایش برای هر نمونه در حدود ۱۵ دقیقه می باشد.

### ۲-۲-۲- آزمایش مدل سازی فیزیکی کوچک مقیاس ۱g

در بخش دوم این مطالعه، یک سری آزمایش مدل سازی فیزیکی کوچک مقیاس ۱g جهت ارزیابی رفتاری پی های نواری مستقر بر روی خاک های تثبیت شده (پد) انجام شده است. برای نمونه سازی و انجام آزمایش ها از یک محفظه (جعبه) با ابعاد ۹۴ سانتی متر طول، ۹۴ سانتی متر ارتفاع و ۴۰ سانتی متر عرض ساخته شده است. این جعبه شامل چهار ورق شفاف پلگسی گلاس با ضخامت ۲ سانتی متر می باشد. مزیت استفاده از ورق های شفاف پلگسی گلس نشان دادن خاک و مدل داخل آن و امکان مشاهده تغییر شکل ها با ایجاد خطوط رنگی می باشد. این جعبه بر روی بدنه خود دارای پنج خروجی ریز برای اتصال پیژومترها و اندازه گیری فشار آب حفره ای تعبیه شده که این خروجی ها به فواصل مساوی ۱۵ سانتی متری از کف آن قرار گرفته اند. پی مورد استفاده دارای ابعاد ۴۰ سانتی متر طول، ۱۵ سانتی متر عرض و ۱۵ سانتی متر ارتفاع که از قوطی های فلزی تشکیل شده و تحت بارگذاری تغییر شکل ساختاری نداشته و کاملاً صلب است.

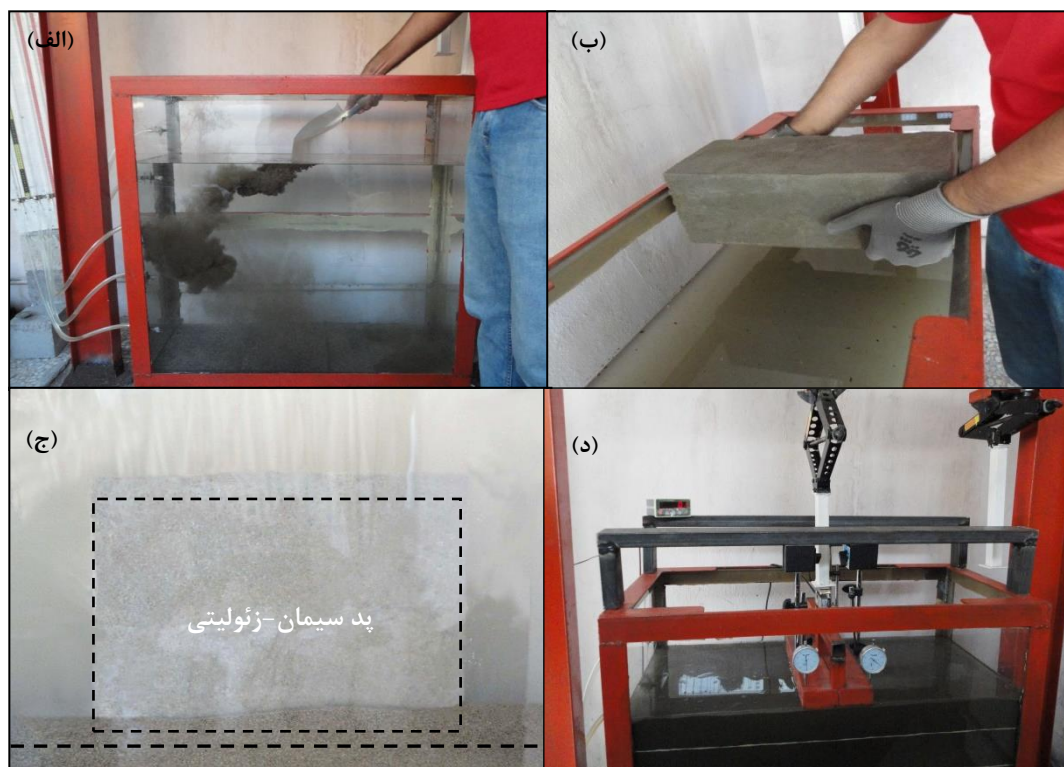
در ابتدا جعبه آزمایش تا ارتفاع ۸۰ سانتی متر از آب پر کرده و ماسه که به صورت کاملاً خشک شده را از روی سطح آب به صورت بارشی در داخل جعبه آزمایش ریخته و اجازه رسوب گذاری به ماسه داده می شود. علت این فرآیند آن است که ماسه پس از رسوب گذاری

کمترین تراکم نسبی ممکن را داشته باشد. پس از ریختن ماسه تا ارتفاع حدود تقریبی ۷۰ سانتی‌متر از کف جعبه آزمایش، پد با توجه مشخصات جدول آزمایش ۲ بر روی توده خاک قرار می‌گیرد. نمونه‌ها شامل ماسه، به همراه ۳ و ۷ درصد سیمان و زئولیت جایگزین شده با سیمان با توجه به آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده و مقدار بهینه زئولیت به دست آمده در ترکیبات ماسه سیمان-زئولیت در این آزمایش‌ها مقدار ۴۰ درصد و در مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روز انتخاب شده است. پس از قرارگیری پد، ریختن ماسه ادامه می‌یابد تا سطح خاک هم‌تراز با سطح بالایی پد گردد. سرانجام پی نواری دقیقاً بر روی پد قرار گرفته و ارتفاع نهایی توده خاک در محفظه دستگاه حدود ۷۵ سانتی‌متر می‌باشد. شکل ۱ نمایی از دستگاه آزمایش و ابزار و تجهیزات دقیق مورد استفاده بر روی پی را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مشخصات فیزیکی پد مورد استفاده در این مطالعه

شماره	ردیف	ضخامت	سیمان	زئولیت
۱	A	B/6	٪۳	۴۰
۲	A	B/6	٪۷	۴۰
۳	B	B/3	٪۳	۴۰
۴	B	B/3	٪۷	۴۰
۵	C	B/2	٪۳	۴۰
۶	C	B/2	٪۷	۴۰
۷	D	2B/3	٪۳	۴۰
۸	D	2B/3	٪۷	۴۰
۹	E	B	٪۷	۴۰
۱۰	E	B	٪۳	۴۰

: عرض پی برابر ۱۵ سانتی‌متر است. B

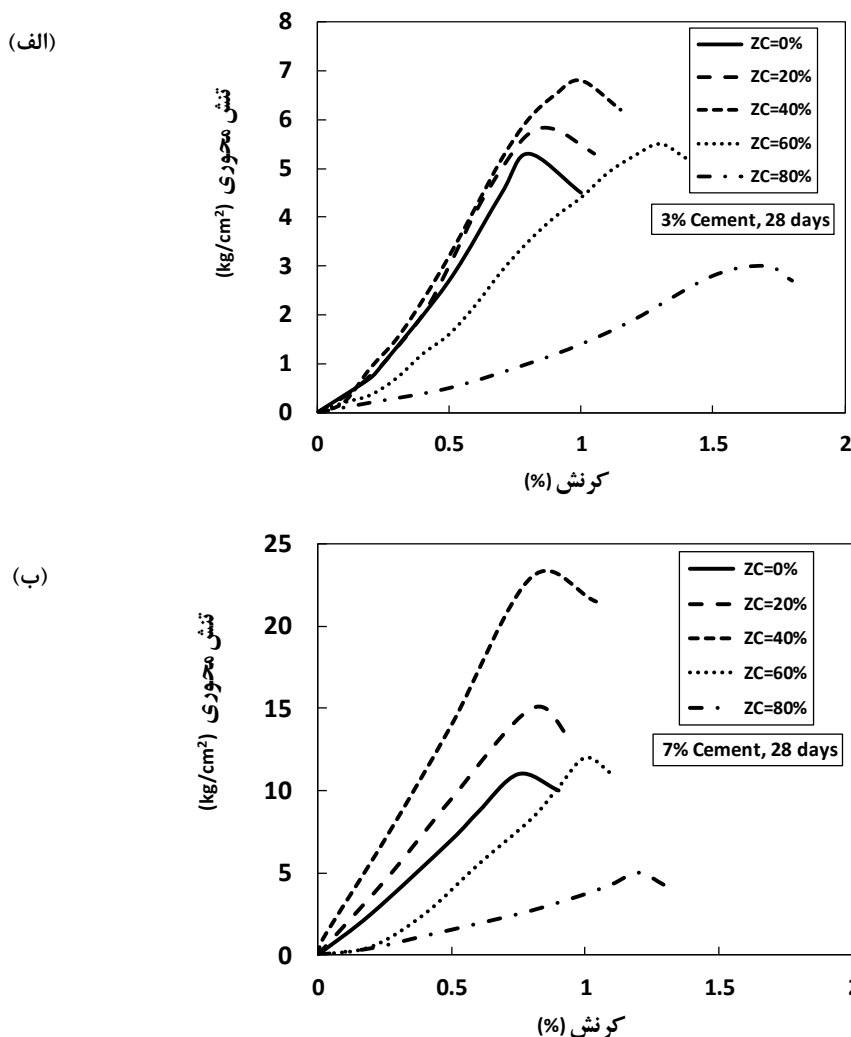


شکل ۱: (الف) نمایی از ریختن ماسه به درون تانک آزمایش به روش بارش ماسه (ب) جایگذاری پد در تانک و (ج) ریختن ماسه در اطراف پد و هم سطح کردن با آن (د) نمایی از ابزار و تجهیزات دقیق بکار گرفته شده بر روی پی سطحی

### ۳- تحلیل نتایج

#### ۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

شکل ۲ منحنی‌های تنش-کرنش برای نمونه‌های دارای محتوای سیمان ۳ و ۷ درصد و مقادیر مختلف زئولیت جایگزین سیمان که در مدت زمان ۲۸ روز عمل‌آوری شده‌اند را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود، افزایش در مقدار سیمان و زمان عمل‌آوری نمونه‌ها، بیشینه تنش تک‌محوری افزایش یافته و کرنش متناظر با آن کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده رفتار ترد و شکننده نمونه‌های ماسه سیمانی است. علاوه بر آن، با افزایش درصد زئولیت جایگزین به جای سیمان، گسیختگی نمونه‌ها در کرنش‌های بالاتری رخ داده که بیانگر کاهش در رفتار شکنندگی (تردی) نمونه‌های ماسه سیمان-زئولیتی نسبت به نمونه‌های ماسه سیمانی می‌باشد (افزایش رفتار پلاستیک در نمونه‌ها).



شکل ۲: منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های ماسه سیمان در مقادیر مختلف ژئولیت با ۳٪ و ۷٪ سیمان در ۲۸ روز عمل‌آوری

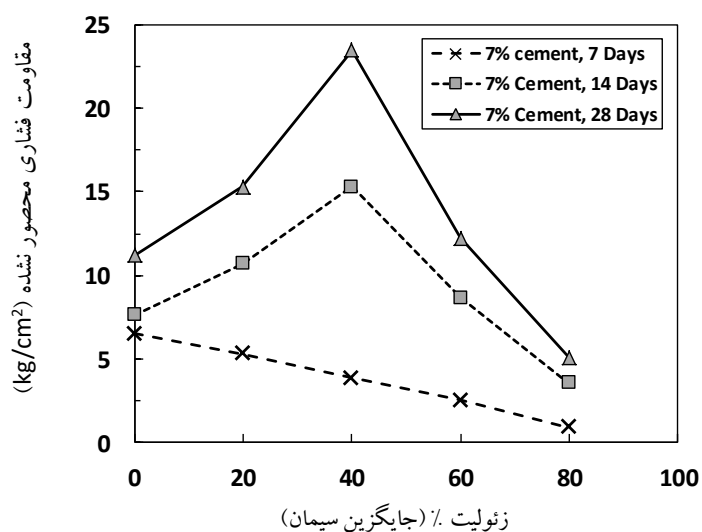
### ۲-۳- اثر ژئولیت بر مقاومت ماسه سیمان

تأثیر افزودن مقدار ژئولیت جایگزین با سیمان بر مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت‌شده در شکل ۳ نشان می‌دهد. نمودار شامل حداکثر تنش محوری برای تمامی نمونه‌ها شامل ۳ و ۷ درصد سیمان و مدت‌زمان ۷، ۱۴ و ۲۸ روز عمل‌آوری می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود برای نمونه‌های ۷ روزه در هر دو مقدار سیمان، افزایش در مقدار ژئولیت جایگزینی سیمان مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. علت این امر کامل نشدن واکنش پوزولانی در این ترکیبات می‌باشد. از طرفی دیگر برای نمونه‌های ۱۴ و ۲۸ روزه، با افزایش درصد ژئولیت جایگزین سیمان، مقاومت فشاری در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. بیشترین مقاومت فشاری در مقدار بهینه ۴۰٪ ژئولیت جایگزین سیمان به‌دست آمده است. مقایسه‌ای بین مقاومت نمونه‌های تثبیت‌شده ۳٪ با ۷٪ درصد سیمان در میزان ۴۰٪ ژئولیت جایگزین سیمان که در مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شده نرخ افزایش مقاومت ۲۳۸٪ افزایش می‌یابد. علت این امر می‌تواند به خاطر واکنش بیشتر ژئولیت با هیدروکسید کلسیم موجود در نمونه سیمانی و کاهش در مقدار خلل و فرج نمونه باشد که موجب بهبود مقاومت نمونه می‌شود.

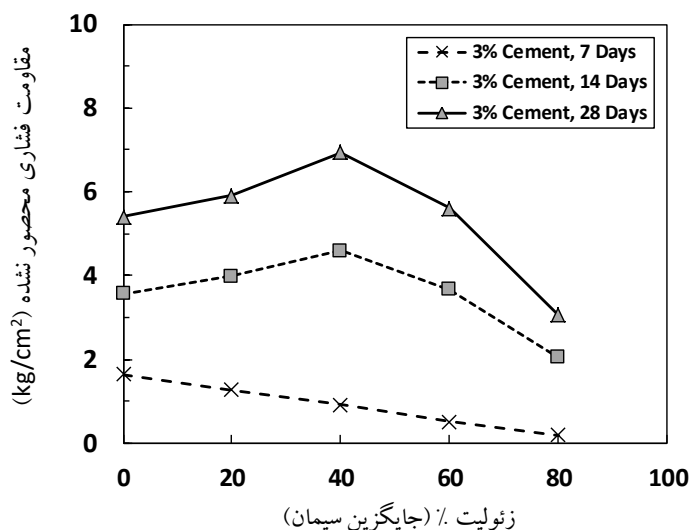
همچنین در ادامه، افزودن ۶۰٪ ژئولیت جایگزینی سیمان، نرخ تغییرات مقاومت نسبت به نمونه‌های ماسه سیمانی را برای ۲۸ روز عمل‌آوری ۹٪ و برای نمونه‌های ۱۴ روز تقریباً ۲٪ افزایش می‌دهد (به ترتیب ۷ و ۳٪ سیمان). بنابراین می‌توان گفت که افزودن ژئولیت تا مقدار ۶۰ درصد به نمونه ماسه سیمانی همچنان مقاومت فشاری در حال افزایش است. برای نمونه‌هایی با ۸۰٪ ژئولیت جایگزین سیمان



مقاومت به دست آمده کمتر از مقاومت نمونه‌ها ماسه سیمان شده است. علت این امر جایگزینی بیش از حد زئولیت نسبت به سیمان و محدود کردن واکنش پوزولانی می‌باشد.



(ب)



شکل ۳: اثر زئولیت بر مقاومت فشاری نمونه‌های ماسه سیمانی (الف) برای حالت ۷٪ سیمان (ب) برای حالت ۳٪ سیمان

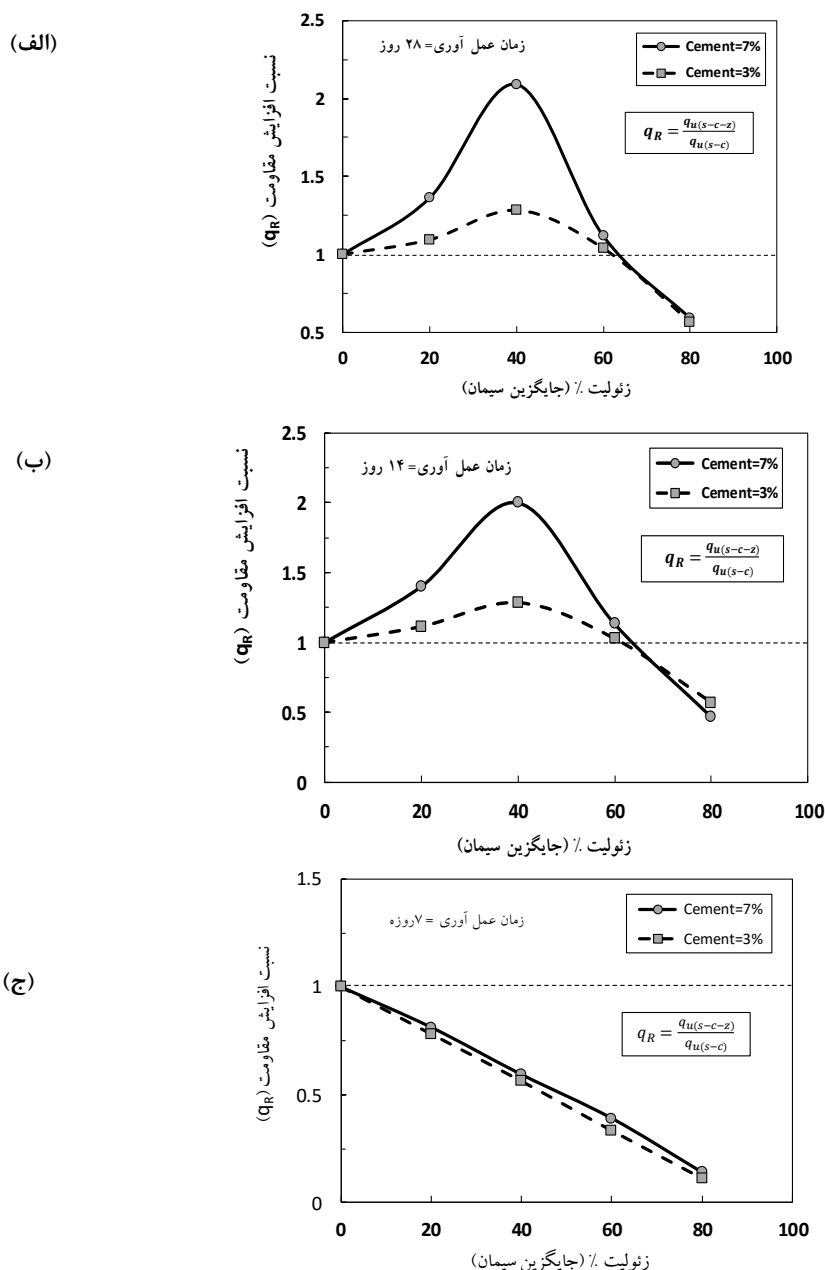
### ۳-۳- تاثیر زئولیت بر بهبود مشخصه مقاومتی

در این مطالعه جهت بهتر درک کردن اثر زئولیت جایگزین با سیمان بر نمونه‌های ماسه سیمانی و میزان نرخ بهسازی آن می‌توان از پارامتری با عنوان ضریب افزایش مقاومت ( $q_R$ ) بررسی کرد. این نسبت را می‌توان به صورت مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های تثبیت شده ماسه سیمان با زئولیت به نمونه‌های ماسه سیمانی به صورت رابطه (۱) تعریف کرد:

$$q_R = \frac{UCS_{(sand-cement-zeolite)}}{UCS_{(sand-cement)}} \quad (1)$$

نمودارهای شکل ۴ نتایج نسبت افزایش مقاومت ( $q_R$ ) را در برابر درصدهای مختلف زئولیت برای نمونه‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روز عمل‌آوری و در دو نرخ سیمان ۳ و ۷ درصد نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود برای نمونه‌های تثبیت شده با ۴۰ درصد زئولیت

جایگزین سیمان و محتوای ۷٪ سیمان میزان  $q_R$  به مقدار ۲/۰۹ برابر نمونه‌های ماسه سیمانی و برای ۳٪ سیمان این مقدار ۱/۲۸ برابر افزایش مقاومت ایجاد شده است (در مدت‌زمان ۲۸ روز عمل‌آوری). علاوه بر آن، برای نمونه‌های ۱۴ روزه با سیمان ۷٪ مقدار  $q_R=2$  و برای سیمان ۳٪، به میزان ۱/۲۸ برابر نسبت به نمونه‌های ماسه سیمانی شده افزایش مقاومت دارد. از طرفی دیگر، نرخ افزایش بهسازی برای نمونه‌هایی که دارای ۴۰٪ ژئولیت و از ۳ به ۷ درصد سیمان دارند، این نرخ به میزان ۶۳ درصد برای مدت‌زمان ۲۸ روز عمل‌آوری (شکل ۴ الف) و برای مدت‌زمان ۱۴ روز شکل (۴ ب) به میزان ۵۶ درصد افزایش مقاومت نشان می‌دهد. در ادامه، برای نمونه‌های با مقادیر بیشتر از ۴۰ درصد ژئولیت جایگزین با سیمان روند نرخ بهسازی سیر نزولی پیدا کرده به طوری که برای ژئولیت با مقدار ۸۰٪ نرخ بهسازی کمتر از نمونه‌های ماسه سیمانی شده و در زیر خط چین قرار گرفته است (کمتر از عدد یک).



شکل ۴. تغییرات نسبت افزایش مقاومت در برابر مقادیر مختلف ژئولیت جایگزین سیمان در مدت‌زمان‌های عمل‌آوری (الف) ۲۸ روزه (ب) ۱۴ روزه (ج) ۷ روزه

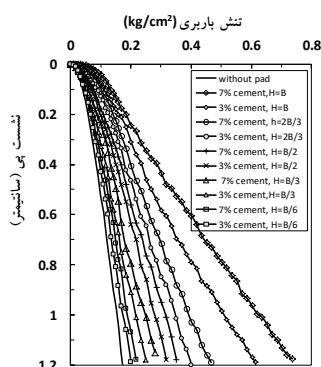
بنابراین، با توجه به تجزیه و تحلیل نمودارهای بالا می‌توان گفت که ژئولیت تأثیر به‌سزایی بر روی مقاومت نمونه‌های ماسه سیمان-ژئولیتی داشته و مقدار ۴۰ درصد ژئولیت جایگزین با سیمان کافی است تا یک افزایش قابل توجهی در مقاومت ایجاد کند. بنابراین مقدار ۴۰ درصد ژئولیت به‌عنوان بهینه و اثرگذارترین نسبت در ترکیبات نمونه‌ها انتخاب می‌گردد.

#### ۳-۴- آزمایش مدل‌سازی فیزیکی کوچک‌مقیاس ۱g

شکل ۵ منحنی‌های تنش-نشست در مقادیر مختلف ضخامت پد و در میزان سیمان ۳٪ و ۷٪ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در قبل اشاره گردید تمامی نمونه‌ها (پد) دارای مقدار بهینه ژئولیت جایگزین سیمان ۴۰٪ بوده و در طی مدت‌زمان ۲۸ روز مطابق شرایط آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده عمل‌آوری شده‌اند. داس [۱۴] میزان ظرفیت باربری نهایی پی سطحی را متناظر با نرخ نشست بین ۱۵ الی ۲۵ درصد عرض پی در نظر می‌گیرد (در محیط ماسه). بنابراین در این پژوهش ظرفیت باربری با توجه به اینکه ماسه مورد مطالعه دارای پتانسیل روانگرایی می‌باشد با اعمال یک نرخ نشست از ۲۰٪ عرض پی تعیین می‌شود.

میزان ظرفیت باربری نهایی پی نواری که در شرایط بدون پد واقع شده است برابر  $0.115 \text{ kg/cm}^2$  می‌باشد. این در حالی است که با به‌کارگیری پد با ضخامت B/6 (B برابر عرض پی) در زیر شالوده نواری، ظرفیت باربری نهایی در حالت ۳٪ سیمان (ردیف آزمایش A1 طبق جدول ۲) به‌اندازه  $0.167 \text{ kg/cm}^2$  و برای ۷٪ سیمان (A2) به‌اندازه  $0.184 \text{ kg/cm}^2$  افزایش می‌دهد. همچنین مقایسه بین دو نمونه آزمایش‌های A1 و A2 میزان ظرفیت باربری نهایی در حدود ۱۰/۱ درصد افزایش مقاومت تجربه کرده است.

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود افزایش در میزان ضخامت پد، ظرفیت باربری را افزایش و نشست شالوده را کاهش خواهد داد. افزایش ۲ برابری در ضخامت پد (مقایسه سری B نسبت به A) ظرفیت باربری را برای نمونه ۳٪ سیمان به‌اندازه ۲۹ درصد و برای ۷٪ سیمان به‌اندازه ۳۶ درصد افزایش می‌دهد.



شکل ۵: منحنی‌های تنش-نشست در مقادیر مختلف ضخامت پد و محتوای سیمان ۳ و ۷ درصد

#### ۳-۵- ضرایب افزایش مقاومت و کاهش نشست

در این مطالعه جهت بررسی هر چه بهتر تأثیر استفاده از پد سیمان-ژئولیتی مستقر در زیر پی‌های نواری از دو پارامتر اساسی استفاده شده است. این پارامترها به نام‌های ضریب افزایش مقاومت (SIR) و ضریب کاهش نشست (SRR) به‌صورت روابط (۲) و (۳) تعریف می‌شوند:

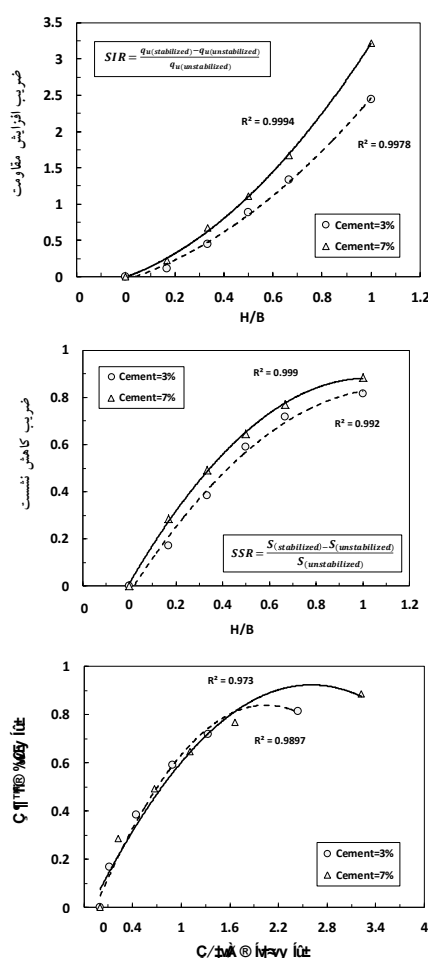
$$SIR = \frac{q_u(\text{stabilized}) - q_u(\text{unstabilized})}{q_u(\text{unstabilized})} \quad (2)$$

$$SRR = \frac{S(\text{stabilized}) - S(\text{unstabilized})}{S(\text{unstabilized})} \quad (3)$$

که در آن  $Q_{u(stabilized)}$  و  $Q_{u(unstabilized)}$  به ترتیب ظرفیت باربری نهایی شالوده مستقر بر روی پد و بدون پد و  $S(stabilized)$  و  $S(unstabilized)$  به ترتیب نشست شالوده با وجود پد و بدون پد می‌باشد.

شکل ۶ (الف) نمودار ضریب افزایش مقاومت در برابر نسبت ابعادی ( $H/B$ ) نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار ضریب افزایش مقاومت به دست آمده در حالت نسبت بعدی صفر (در این حالت شالوده بدون پد و با پد برابر است) برابر ۱ بوده و در ادامه با افزایش نسبت بعدی این مقدار افزایش می‌یابد. علاوه بر آن افزایش در مقدار سیمان، ضریب افزایش مقاومت را افزایش داده و تفاوت بین میزان ۳٪ و ۷٪ سیمان در نسبت ابعادی بزرگ نمایان تر است.

تغییرات ضریب کاهش نشست در مقابل نسبت ابعادی ( $H/B$ ) برای تمامی داده‌های آزمایش در شکل ۶ (ب) نشان می‌دهد. با قرار دادن پد به ضخامت  $B/6$  (مطابق جدول) در زیر شالوده نواری، نرخ نشست نسبت به حالتی که پی بر روی پد قرار نگرفته باشد به میزان ۲۶٪ کاهش یافته است. همچنین برای مقادیر  $B/3$ ،  $B/2$ ،  $2B/3$  و  $B$  میزان ضریب کاهش نشست به اندازه ۴۹٪، ۶۵٪، ۷۶٪ و ۸۶٪ کاهش می‌یابد (برای نمونه ۷٪ سیمان). بنابراین افزایش در نسبت ابعادی، مقدار ضریب کاهش نشست را کاهش داده و تمامی داده‌ها در محدوده کاهشی قرار می‌گیرند.



(ب)

(ج)

شکل ۶: تغییرات (الف) ضریب افزایش مقاومت و (ب) ضریب کاهش نشست در مقابل نسبت‌های  $H/B$  و (ج) ضریب کاهش نشست در مقابل نسبت بهسازی مقاومت برای تمامی آزمایش‌ها

مقایسه‌ای بین ضرایب افزایش مقاومت و کاهش نشست برای تمامی نمونه‌های آزمایش در شکل ۶ (ج) نشان داده شده است. استفاده از پد با ضخامتی تا حدود  $2B/3$  هر دو مقدار ضریب افزایش مقاومت و ضریب کاهش نشست را به صورت خطی (با یک شیب تند) افزایش داده و در ادامه با افزایش ضخامت پد از  $2B/3$  به  $B$ ، یک جهش بزرگی در مقدار ضریب افزایش مقاومت در مقایسه با دیگر

ضخامت‌های پد تجربه می‌کند (افزایش در نرخ مقاومت). این درحالیست که ضریب کاهش نشست با افزایش پد از ضخامت  $2B/3$  به  $B$ ، با شیبی به مراتب ملایم‌تر افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت، به‌کارگیری پد با ضخامت‌های بزرگ‌تر از عرض پی، نرخ ضریب افزایش مقاومت را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش داده، درحالی‌که افزایش ضخامت پد تأثیری بر میزان ضریب کاهش نشست نخواهد داشت.

### ۳-۶- ظرفیت باربری مجاز پد سیمان-زئولیتی

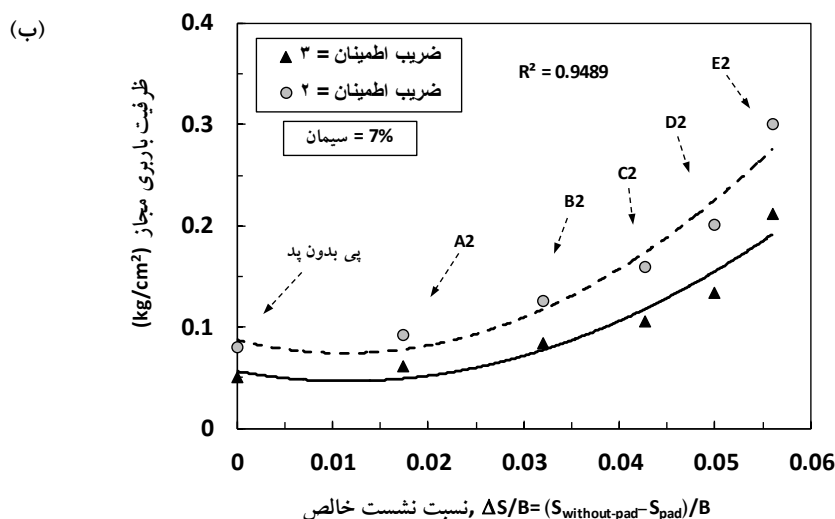
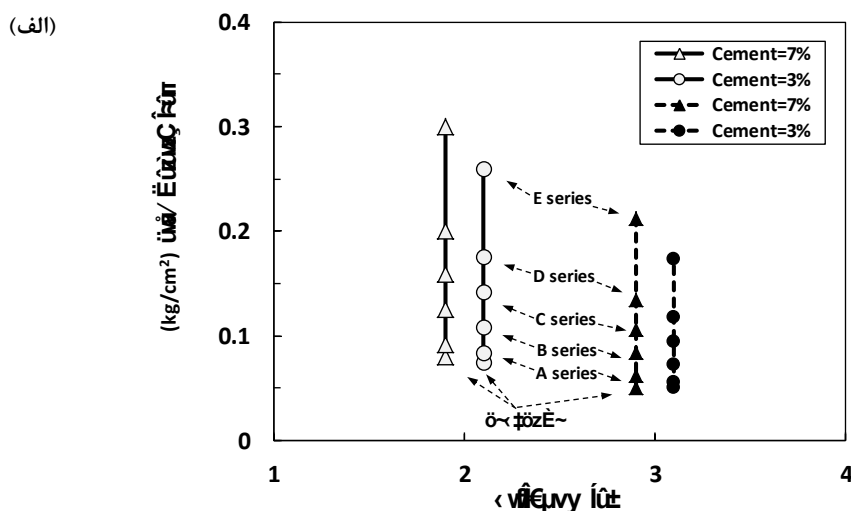
ضریب اطمینان پارامتری مهم در طراحی بوده که بیانگر نسبت نیروهای واقعی به نیروهای مورد انتظار است. مقدار این ضریب با توجه به نوع مکانیزم و فرآیند به‌کارگیری آن در آیین‌نامه‌های ساختمانی ارائه می‌گردد. ظرفیت باربری نهایی حداکثر باری است که پی می‌تواند تحمل کند. اما در شرایط واقعی مهندسين، بار مجاز پی را مطابق رابطه (۴) که با اعمال ضرایب اطمینان بر ظرفیت باربری نهایی است لحاظ می‌کنند. در واقع ظرفیت باربری مجاز در بردارنده یک‌بار مطمئن و پذیرای یک کمیت کافی جهت پرهیز از خسارت‌های احتمالی ناشی از نشست خواهد بود. بنابراین برای کنترل نشست‌ها، تعیین ضریب اطمینان مناسب در طراحی سازه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود که به‌صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$q_{all} = \frac{q_{ult}}{F.S.} \quad (4)$$

مقادیر  $q_{all}$  و  $q_{ult}$  به ترتیب ظرفیت باربری نهایی و ظرفیت باربری مجاز و  $F.S.$  ضریب اطمینان می‌باشد. ضرایب اطمینان انتخاب‌شده در این مطالعه اعداد ۲ و ۳ بوده که طبق آیین‌نامه‌ها جهت جلوگیری از واژگونی و لغزش پی سطحی در حالت گسیختگی برشی تعریف شده است [۱۴]. شکل ۷ (الف) ظرفیت باربری مجاز در برابر ظرفیت باربری را برای تمامی آزمایش‌ها مطابق جدول ۲ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است ظرفیت باربری مجاز با وجود پد افزایش قابل‌توجهی نسبت به حالت بدون پد دارد. این افزایش با تغییر ضخامت پد رابطه مستقیم داشته به‌گونه‌ای که بیشترین ظرفیت باربری مربوط به پد به ضخامت  $B$  و کمترین مقدار مربوط به ضخامت برابر  $B/6$  می‌باشد.

شکل ۷ (ب) ارتباط بین ظرفیت باربری مجاز و نشست‌های خالص را برای نمونه‌های ۷٪ سیمان تحت ضریب اطمینان ۲ و ۳ نشان می‌دهد. نشست خالص به‌صورت اختلاف نشست بین شالوده با پد و بدون پد که به عرض پی نرمال شده است تعریف می‌گردد. همان‌طور که دیده می‌شود، ظرفیت باربری مجاز با افزایش نشست خالص افزایش می‌یابد. پد با ضخامت بزرگ‌تر از  $B/3$  ( $\Delta S/B > 0.032$ ) ظرفیت باربری مجاز را با شتاب بیشتری نسبت به ضخامت کوچک‌تر پد افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر، نمونه با ضخامت  $B/6$  مقدار  $\Delta S/B$  برابر  $0.17$  و برای  $B/3$  این مقدار  $0.32$  (در سیمان ۷٪) می‌شود. بنابراین تفاوت نشست خالص بین نمونه‌ها با افزایش در ضخامت پد کمتر شده و بیشترین اختلاف برای نمونه‌های  $B/6$  و  $B/3$  نسبت به پی بدون پد را تجربه می‌کند.

این مطالعه نشان می‌دهد که با اعمال یک ضریب اطمینان مناسب در طراحی‌ها، می‌توان اثرات قابل‌ملاحظه‌ای جهت کنترل نشست‌های ساختمان ایجاد کرد. اگرچه ضخامت‌های بزرگ پد نسبت به ضخامت‌های کوچک‌تر، ظرفیت باربری را بشدت افزایش می‌دهد اما تأثیر نشست خالص نسبت به ضخامت‌های کوچک‌تر پد بیشتر می‌باشد. به‌رحال در شرایط واقعی در نظر گرفتن پد با ضخامت‌های بزرگ‌تر از  $B/3$  از لحاظ اجرایی محدودیت‌های زیادی در بر خواهد داشت. از طرفی دیگر پد با ضخامت کمتر از  $B/3$  نرخ ظرفیت باربری بین ۲۳ الی ۶۷٪ افزایش و نشست را بین ۱۹ الی ۴۹٪ کاهش می‌دهد (برای میزان ۷٪ سیمان). بنابراین می‌توان گفت که مقدار بهینه ضخامت پد که در شرایط واقعی ساخت‌وساز قابلیت‌های کاربردی داشته و در همین ارتباط افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست قابل‌توجهی را بر روی پی‌هایی که مستقر بر خاک با مقدار مقاومت برشی کم ایجاد کند، به‌کارگیری پد با ضخامت کمتر از  $B/3$  بوده و پیشنهاد می‌گردد.



شکل ۷: ظرفیت باربری مجاز در برابر (الف) ضریب اطمینان و (ب) نسبت نشست خالص

#### ۴- جمع بندی و نتیجه گیری

نتایج کلیدی حاصل از این مقاله به شرح زیر خلاصه می شود:

- ۱- مقاومت فشاری نمونه‌های ۱۴ و ۲۸ روزه با افزایش درصد جایگزینی زئولیت تا مقدار ۴۰٪ وزنی نسبت به سیمان، افزایش یافته و در مقادیر بیشتر آن کاهش می‌یابد. بنابراین مقدار بهینه زئولیت در ترکیبات نمونه‌ها ۴۰٪ به دست آمده است.
- ۲- با افزودن ۴۰٪ زئولیت جایگزین سیمان به نمونه‌های ماسه سیمانی نرخ بهسازی مقاومت نمونه‌های ۱۴ و ۲۸ روزه را بین ۲۸ الی ۱۱۰ درصد افزایش می‌دهد. همچنین برای نمونه‌هایی که درصد سیمان بیشتری دارند، نرخ افزایش مقاومت بیشتر می‌باشد.
- ۳- افزودن ۶۰٪ زئولیت به ترکیبات در مقایسه با ماسه سیمان مقاومت فشاری نمونه را به مقدار ناچیز ۲٪ و ۹٪ افزایش می‌دهد (در مدت زمان ۱۴ و ۲۸ روزه، به ترتیب). بنابراین به کارگیری زئولیت تا نرخ ۶۰٪ همچنان مقاومت آن بیشتر از نمونه‌های ماسه سیمانی است. این در حالی است که برای نمونه‌های ۷ روزه به دلیل کامل نشدن واکنش پوزولانی، با افزایش میزان زئولیت مقاومت فشاری به صورت خطی کاهش می‌یابد.

۴- استفاده از پد با ضخامت B/6 در زیر پی‌های نواری، نرخ ظرفیت باربری آن را نسبت به حالت بدون پد برای میزان ۳٪ سیمان، به مقدار ۱۱٪ و برای ۷٪ سیمان برابر ۲۳٪ افزایش می‌دهد. این در حالی است که اگر ضخامت پد ۲ برابر گردد، نرخ ظرفیت باربری ۴۴٪ و ۶۷٪ افزایش می‌یابد. این مطلب بیانگر آن است که استفاده از این روش تسلیح، رفتار خاک‌های مستعد روانگرایی را بهبود می‌بخشد.

۵- ضرایب افزایش مقاومت و کاهش نشست در ارتباط به هم بوده به طوری که با افزایش در نسبت ابعادی (H/B)، این ضرایب به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. علاوه بر این، مقایسه‌ای بین میزان سیمان مصرفی در نمونه‌ها نشان می‌دهد که، نرخ تغییرات افزایش مقاومت از ضخامت B/6 تا B در حدود ۹٪ تا ۲۳٪ بوده اما برای نرخ کاهش نشست در این محدوده تقریباً ۶٪ و ثابت است. به‌رحال، به‌کارگیری پد در زیر پی‌های نواری واقع‌شده بر ماسه سست اشباع، باعث بهبود در ظرفیت باربری و کاهش نشست شالوده خواهد گردید.

## مراجع

- [1] Clough, G.W. Sitar, N. Bachus, R.C. and Rad, N.S. (1981). Cemented sands under static loading. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107(6), 799–817.
- [2] Consoli, N.C. Foppa, D. Festugato, L. and Heineck, K.S. (2007). Key parameters for strength control of artificially cemented soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(2), 197–205.
- [3] Park, S. (2009). Effect of fiber reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fiber-reinforced cemented sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(2), 162–166.
- [4] Salamatpoor, S. Jafarian, Y. and Hajiannia, A. (2018). Physical and mechanical properties of sand stabilized by cement and natural zeolite. *The European Physical Journal Plus*, 133, 205.
- [5] Mehta, P.K. (2001). Reducing the Environmental Impact of Concrete. *Concrete International*, 23(10), 61–66.
- [6] Poon, C.S. Lam, L. Kou, S.C. and Lin, Z.S. (1999). A study on the hydration rate of natural Zeolite blended cement pastes. *Construction and Building Materials*, 13(8), 427–432.
- [7] Ramezani pour, A.A. Kazemian, A. Sarvari, M. and Ahmadi, B. (2013). Use of Natural Zeolite to Produce Self-Consolidating Concrete with Low Portland cement Content and High Durability. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(5), 589–596.
- [8] Hong, C.S. Shackelford, C.D. and Malusis, M.A. (2012). Consolidation and hydraulic conductivity of zeolite-amended soil-bentonite backfills. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(1), 15–25.
- [9] Jafarian, Y. Haddad, A. and Mehrzad, B. (2016). Load–Settlement Mechanism of Shallow Foundations Rested on Saturated Sand with Upward Seepage. *International Journal of Geomechanics*, 17(3), 1–14.
- [10] Jafarian, Y. Ghorbani, A. Salamatpoor, S. and Salamatpoor, S. (2013). Monotonic triaxial experiments to evaluate steady-state and liquefaction susceptibility of Babolsar sand. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 14(10), 739–750.
- [11] Salamatpoor, S. and Salamatpoor, S. (2014). Evaluation of Babolsar Sand Behaviour by Using Static Triaxial Tests and Comparison with Case History. *Open Journal of Civil Engineering*, 4(3), 181–197.
- [12] Salamatpoor, S. and Salamatpoor, S. (2017). Evaluation of adding crushed glass to different combinations of cement-stabilized sand. *International Journal of Geo-Engineering*, 8(8).
- [13] ASTM D2166. (2006). *Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [14] Das, B. M. (2009). *Shallow Foundations: Bearing Capacity and Settlement*. 2nd Edition. London: CRC Press.