

## بهبود عملکرد پی نواری مستقر بر ماسه سست بابلسر در حالت‌های خشک و اشباع با به کارگیری پد سیمان- ژئولیتی: مطالعه فیزیکی

سینا سلامت پور، دانشجوی دکتری، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد،

ایران

یاسر جعفریان\*، دانشیار، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و

مهندسی زلزله، تهران، ایران

البرز حاجیان نیا، استادیار، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

Email: yjafarianm@iiees.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۱۷ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۲۶

### چکیده

با توجه به رشد روزافزون جمعیت شهری و افزایش تقاضای مسکن، 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 سست، رقابت شدیدی را بین مهندسان عمران ایجاد کرده است. یکی از روش‌های نوین جهت بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست‌پذیری پی‌های نواری، استفاده از پدهای سیمان-ژئولیتی در زیر این‌گونه پی‌ها می‌باشد. در همین ارتباط، یک سری آزمایش مدل‌سازی فیزیکی کوچک‌مقیاس جهت ارزیابی رفتار پی‌های نواری بهسازی شده با پد سیمان-ژئولیتی مستقر بر ماسه سست بابلسر در شرایط خشک و اشباع صورت پذیرفته است. نتایج نشان می‌دهد که به کارگیری پد با ضخامت کمتر از یک سوم عرض پی در زیر پی‌های نواری، نسبت ظرفیت باربری را برای حالت خشک و اشباع به ترتیب بین ۳۰ الی ۹۱ درصد و ۲۳ الی ۶۷ درصد افزایش و همچنین نسبت کاهش نشست را بین ۱۸ الی ۵۲ درصد و ۱۶ الی ۴۹ درصد افزایش خواهد داد.

واژه‌های کلیدی: پی‌های نواری، ماسه سست، سیمان، ژئولیت، مدل‌سازی فیزیکی

## ۱. مقدمه

مسلح سازی افزایش خواهد یافت. سلامت پور و همکاران (۲۰۱۸) به مطالعه آزمایشگاهی رفتار نمونه های ماسه سیمان- ژئولیتی تحت آزمون های مقاومت فشاری محصور نشده و مدل سازی فیزیکی پرداختند. آنها نشان دادند که به کارگیری ۴۰٪ ژئولیت جایگزین سیمان در نمونه های ماسه سیمانی شاهد بیشترین مقاومت در بین نمونه ها خواهد بود. همچنین، با به کارگیری این مقدار ژئولیت در نمونه های ماسه سیمانی، به تثبیت خاک زیر پی های سطحی مستقر بر ماسه اشباع پرداختند. لال و همکاران (۲۰۱۷) با بررسی آزمایشگاهی رفتار یک پی مربعی مستقر بر بستر خاک ماسه ای که با یک پد ژئوستتیک (به صورت دو لایه ژئوسل و یک لایه ژئوتکتایل در وسط آن) تقویت شده است، نشان دادند که زمانی که نشست پی به ۱۵٪ عرض پی می رسد شاخص بهبود ظرفیت باربری به میزان ۷/۹۲ برابر نسبت به پی بدون پد افزایش می یابد.

در مطالعه حاضر، جهت بهبود عملکرد پی های نواری مستقر بر خاک های ماسه ای سست خشک و اشباع با استفاده از مسلح کننده ای به نام پد سیمان- ژئولیتی، یک سری آزمایش های مدل سازی فیزیکی کوچک مقیاس ۱g صورت پذیرفته است. ابعاد این پدها، که به طور مستقیم در زیر پی های نواری قرار می گیرند، هم اندازه با ابعاد پی بوده و با ضخامت های مختلف استفاده می شوند. نتایج نشان می دهد که استفاده از این پد می تواند به عنوان یک تقویت کننده بسیار مناسب و کاربردی جهت افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پذیری، که نتیجه فعل و انفعالات شیمیایی بین سیمان و ماسه و ژئولیت است، استفاده شود.

## ۲. مطالعات آزمایشگاهی

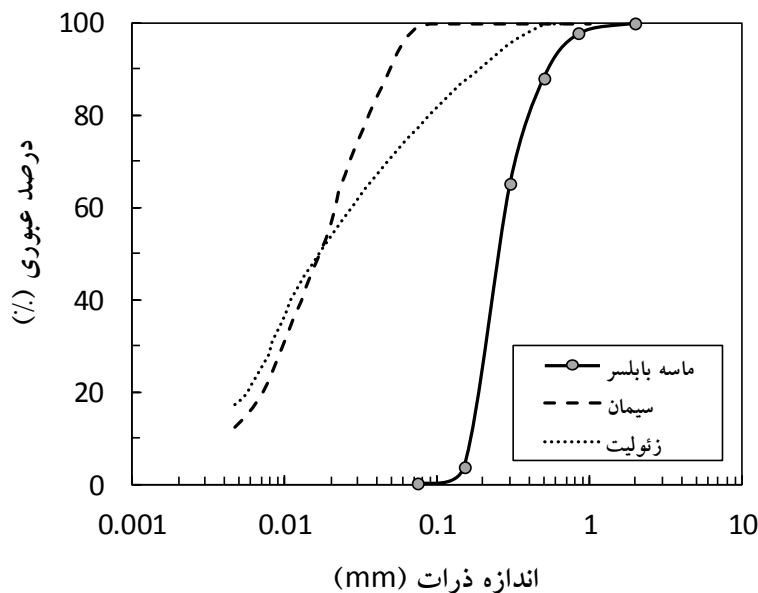
### ۲-۱. معرفی مصالح مورد استفاده

در این مطالعه، از ماسه سواحل شهرستان بابلسر به عنوان خاک پایه استفاده شده است. نمودار دانه بندی و

ضعف خاک های ماسه ای سست در باربری و قرارگیری تعداد قابل توجهی از سازه ها روی این خاک ها، لزوم بررسی رفتار پی های سطحی را ایجاب می کند. با پیشرفت فناوری در زمینه ی ساخت و ساز، کاهش دسترسی به مکان های مناسب و همچنین رشد جمعیت و افزایش تقاضای تهیه مسکن، همواره شاهد مرتفع شدن سازه ها و پیچیده شدن آنها هستیم و این امر باعث تغییر در رفتار پی های آنها می گردد. از طرفی، شناخت هر چه بهتر روش های بهسازی خاک های ماسه ای، که نتیجه این امر افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پی های سطحی احداث شده روی این خاک ها می باشد، احساس می گردد. تحقیقات انجام گرفته در زمینه نشست و ظرفیت باربری پی های مستقر بر خاک های ماسه ای سست، این حقیقت را به خوبی نشان می دهند که این خاک ها در هنگام زلزله و در حالت شدید آن، که منجر به روانگرا شدن خاک می شود، دچار افت مقاومت برشی قابل توجهی خواهند شد (دستی و همکاران، ۲۰۱۰a,b). بنابراین، نیاز این خاک ها به بهسازی غیر قابل چشم پوشی می باشد. جعفریان و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی ظرفیت باربری و نشست پی های سطحی در حالت تراوش رو به بالای آب در ماسه اشباع بابلسر پرداختند. آنها نشان دادند که حتی در شرایط روانگرایی استاتیک کامل، شالوده همچنان مقدار کمی بار را تحمل می کند، که این ظرفیت باربری ناشی از مقاومت پسماند خاک روانگرا می باشد. مطالعات آزمایشگاهی بسیاری در مورد بررسی رفتار پی های نواری مستقر بر خاک بهسازی شده (مسلح شده) صورت پذیرفته است. کومار و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از مدل سازی آزمایشگاهی، به بررسی رفتار پی نواری متکی بر بستر ماسه بهسازی شده با ژئوگرید پرداختند. آنها دریافتند که ظرفیت باربری پی نواری در شرایطی که از ماسه مسلح شده با ۲ الی ۴ لایه ژئوگرید استفاده شود به میزان ۳ الی ۴ برابر نسبت به حالت بدون

و افزودنی به سیمان انتخاب شده است. لازم به ذکر است که زئولیت به عنوان ماده‌ای پوزولانی به تنهایی نقش مقاومتی در نمونه‌های ماسه‌ای نخواهد داشت. در واقع، زئولیت در مجاورت سیمان و آب، با هیدروکسید کلسیم موجود در نمونه سیمانی واکنش داده که منجر به بهبود مقاومت در نمونه‌ها می‌گردد. سیمان پرتلند تیپ II کارخانه نکا (شرکت سیمان مازندران) واقع در استان مازندران به عنوان تثبیت کننده خاک پایه انتخاب گردیده است. مصرف ویژه‌ی این سیمان در محل‌هایی که حرارت هیدراتاسیون متوسط برای آنها ضرورت داشته و حمله‌ی سولفات‌ها به آنها در حد متوسط می‌باشد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۱، نمودارهای دانه‌بندی زئولیت و سیمان نشان داده شده است.

مشخصات اندیسی و مقاومتی این ماسه در شکل ۱ و جدول ۱ نشان داده شده و بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد در رده ماسه تمیز با نشانه SP (بد دانه‌بندی شده) قرار می‌گیرد (جعفریان و همکاران، ۲۰۱۳؛ سلامت پور و سلامت پور، ۲۰۱۴). زئولیت مورد استفاده در این تحقیق از نوع کلینوپتیلولیت بوده که از معدنی واقع در ۳۰ کیلومتری شمال سمنان استخراج شده است. زئولیت، بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد، در رده ML نام‌گذاری شده و رنگ آن قهوه‌ای روشن می‌باشد. بر پایه اکتشافات انجام شده، مقدار ذخیره تأیید شده زئولیت در این معدن بالغ بر ۶۰۰ هزار تن بوده و هم‌اکنون ۸۵٪ استخراج زئولیت کشور از این معدن صورت می‌پذیرد (سلامت پور و همکاران، ۲۰۱۸a). این ماده به عنوان ماده پوزولانی



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مصالح مورد استفاده در این مطالعه

جدول ۱. مشخصات اندیسی و مقاومتی ماسه بابلسر

Gs	( $\gamma_d$ )max ( $\text{kN/m}^3$ )	( $\gamma_d$ )min ( $\text{kN/m}^3$ )	D <sub>50</sub> (mm)	C <sub>U</sub>	C <sub>C</sub>	$\phi$ (degree)
۲/۷۸	۱۷	۱۵/۱	۰/۲۴	۱/۸	۰/۸۸	۳۲

## ۲-۲. آزمایش مدل سازی فیزیکی کوچک مقیاس

۱g

در این مطالعه، یک سری آزمایش مدل سازی فیزیکی کوچک مقیاس ۱g جهت ارزیابی رفتار پی های نواری مستقر بر خاک های بهسازی شده (با پد سیمان- ژئولیتی) انجام شده است. شرح دستگاه، فرآیند نمونه سازی و روش انجام آزمایش به صورت زیر می باشد.

### ۲-۲-۱. شرح دستگاه آزمایش

برای نمونه سازی و انجام آزمایش ها از یک جعبه به طول ۹۴، عرض ۴۰ و ارتفاع ۴۰ سانتی متر که در این پژوهش ساخته شده است، استفاده شد. این جعبه شامل چهار ورق شفاف پلکسی گلاس با ضخامت ۲۰ میلی متر می باشد. مزیت استفاده از ورق های شفاف پلکسی گلاس نشان دادن خاک و مدل داخل آن و امکان مشاهده تغییر شکل ها با ایجاد خطوط رنگی می باشد. روی بدنه این جعبه، پنج خروجی ریز برای اتصال پیزومترها و اندازه گیری فشار آب حفره ای تعبیه شده که این خروجی ها به فواصل مساوی ۱۵ سانتی متر از کف جعبه قرار گرفته اند. پی مورد استفاده، دارای طول ۴۰، عرض ۱۵ و ارتفاع ۱۵ سانتی متر است که از قوطی های فلزی تشکیل شده، کاملاً صلب بوده و تحت بارگذاری تغییر شکل ندارد.

در این تحقیق، برای تبدیل پارامترهای نمونه واقعی به نمونه مدل آزمایشگاهی از ضرایب مقیاس حاصل از تئوری آنالیز ابعادی ژئوتکنیک که توسط وود (۲۰۰۴) گزارش شده استفاده شده است (مدل های کوچک مقیاس با نسبت ۱/۱۰ نسبت به شرایط واقعی ساخته شده اند (N=10)). همچنین، طول پی برابر با عرض محفظه آزمایش در نظر گرفته شد تا اجازه ایجاد گوه گسیختگی در راستای پی های نواری را ندهد. بنابراین، می توان گفت که تغییر شکل خاک زیر پی فقط در دو جهت امتداد (گسترش) می یابد و شرایط کرنش صفحه ای برقرار است.

## ۲-۲-۲. روش انجام آزمایش

انجام آزمایش ها به دو گروه حالت خاک خشک و اشباع تقسیم شدند. برای نمونه سازی در حالت اشباع، در ابتدا جعبه آزمایش تا ارتفاع ۸۰ سانتی متر از آب پر شده و ماسه که به صورت کاملاً خشک شده بود از فاصله ۲ سانتی متری از سطح آب به صورت بارشی در داخل جعبه آزمایش ریخته شد و اجازه رسوب گذاری به ماسه داده شد. علت این فرآیند آن است که ماسه پس از رسوب گذاری، کمترین دانسیته نسبی ممکن را داشته باشد. میزان تراکم نسبی بر اساس روابط وزنی-حجمی برابر ۳۰ درصد به دست آمده است. پس از ریختن ماسه تا ارتفاع حدود ۷۰ سانتی متر از کف جعبه آزمایش، پد سیمان- ژئولیتی با توجه به مشخصات آزمایش ها (جدول ۲) روی توده خاک قرار گرفت. این پد، هم اندازه با پی سطحی بوده و ضخامت آن به نسبت های مختلفی از عرض پی، به صورت مستقیم در زیر مدل پی قرار گرفت. پس از قرارگیری پد، ریختن ماسه ادامه یافته تا سطح خاک هم تراز با سطح بالایی پد گردد. سرانجام، پی نواری دقیقاً روی پد قرار گرفته و ارتفاع نهایی توده خاک در محفظه دستگاه حدود ۸۰ سانتی متر می باشد. میزان نیروی وارد شده به پی توسط یک نیروسنج که روی مرکز پی و مابین پی سطحی و جک نیرو قرار دارد اندازه گیری شد. همچنین، جهت ارزیابی میزان نشست پی، از سه عدد گیج تغییر مکان سنج که توسط پایه های مغناطیسی نگهداری شده و در گوشه انتهایی پی نواری نصب شدند استفاده شد. مدت زمان لازم جهت نمونه سازی، انجام آزمایش و خالی کردن مصالح حدود ۸ ساعت بود (سلامت پور و همکاران، ۲۰۱۸). در مرحله دوم، که برای نمونه سازی در شرایط خشک می باشد، تمامی فرآیند نمونه سازی مشابه حالت اشباع بوده، اما وجود آب جهت اشباع شدن ماسه حذف گردیده است. مدت زمان لازم جهت انجام آزمایش در این حالت حدود ۴ ساعت

پوزولانی بین زئولیت و سیمان و کندتر کردن فرآیند هیدراتاسیون، بیشترین مقاومت فشاری تک‌محوری زمانی حاصل می‌شود که مقدار بهینه زئولیت در ترکیبات نمونه‌های ماسه-سیمانی ۴۰٪ باشد. بر همین اساس، در این مطالعه، از ۴۰٪ زئولیت در نمونه‌های ماسه-سیمانی به‌عنوان ترکیبی مناسب جهت ساخت نمونه‌های پد سیمان-زئولیتی استفاده شده است.

در ابتدا، مصالح خشک‌شده پس از توزین و تقسیم‌بندی هر طرح بر اساس ابعاد و نسبتی از خاک پایه، به‌طور یکنواخت مخلوط می‌شود. آب به مقدار ۱۰٪ وزن کل پایه خاک به هر نمونه اضافه گردیده و پس از اختلاط، مصالح در قالب‌های آزمایش به طول ۴۰ سانتی-متر، به عرض ۱۵ سانتی‌متر و با ضخامت‌های مختلف (مطابق جدول ۲) قرار داده می‌شود. پس از ریختن مصالح در قالب و سپری شدن مدت‌زمان ۷ ساعت و ایجاد گیرش اولیه در مخلوط، قالب نمونه‌ها باز شده و هر یک از نمونه‌ها به‌طور جداگانه در کیسه‌های نایلونی سر بسته‌ای قرار داده می‌شود. با توجه به برنامه زمان‌بندی انتخاب‌شده برای نمونه‌های پد که شامل مدت‌زمان ۲۸ روز عمل‌آوری می‌باشد، نمونه‌ها در اتاق مرطوب که دارای دمای  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  و رطوبت نسبی بیش از ۹۵٪ بود، باز شده و مستقیماً بدون هیچ ضربه و لرزشی، در دستگاه بارگذاری قرار می‌گیرند.

می‌باشد. شکل ۲، نمایی از دستگاه آزمایش مدل‌سازی فیزیکی ۱g و ابزار و تجهیزات دقیق به‌کار گرفته شده روی پی را نشان می‌دهد.

### ۲-۲-۳. آماده‌سازی پد سیمان-زئولیتی

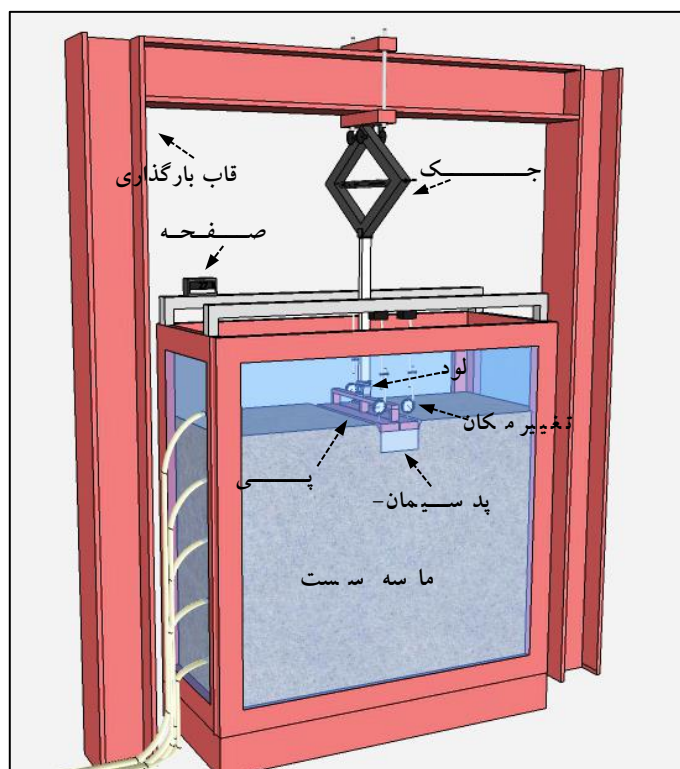
جهت ساخت نمونه‌های پد سیمان-زئولیتی، از ماسه به همراه ۳ و ۷ درصد سیمان (نسبت به وزن خشک مصالح) و همچنین ۴۰٪ زئولیت جایگزین سیمان استفاده شده است. به عبارتی، زئولیت مورد استفاده در هر نمونه، جایگزین ۴۰٪ از وزن سیمان مصرفی شد. انتخاب این اعداد جهت ساخت نمونه‌های پد و عمل‌آوری آنها بر اساس انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده روی ترکیبات ماسه-سیمان-زئولیت بوده است. به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های ماسه-سیمان-زئولیتی و تعیین مقدار بهینه زئولیت در ترکیبات ماسه سیمانی، سلامت پور و همکاران (۲۰۱۸a) به انجام یک‌سری آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده روی نمونه‌های ماسه-سیمان-زئولیتی پرداختند. آنها اثر افزودن مقادیر مختلف افزودنی زئولیت و سیمان بر مقاومت نمونه‌های ماسه با توجه به طرح‌های اختلاط مختلف (شامل ۳ و ۷ درصد سیمان، میزان زئولیت جایگزین شده با سیمان برابر صفر، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد و مدت‌زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز) را بررسی کردند. آنها نشان دادند که به دلیل فعالیت

جدول ۲. لیست آزمایش‌ها و مشخصات فیزیکی پد سیمان-زئولیتی مورد استفاده در این مطالعه

شماره	ردیف	وضعیت	ضخامت	سیمان (%)
۱	A	اشباع	B/6	۳٪
۲	A	اشباع	B/6	۷
۳	A	خشک	B/6	۳
۴	A	خشک	B/6	۷
۵	B	اشباع	B/3	۳
۶	B	اشباع	B/3	۷

۳	B/3	خشک	B	۷
۷	B/3	خشک	B	۸
۳	B/2	اشباع	C	۹
۷	B/2	اشباع	C	۱۰
۳	B/2	خشک	C	۱۱
۷	B/2	خشک	C	۱۲
۳	2B/3	اشباع	D	۱۳
۷	2B/3	اشباع	D	۱۴
۳	2B/3	خشک	D	۱۵
۷	2B/3	خشک	D	۱۶
۳	B	اشباع	E	۱۷
۷	B	اشباع	E	۱۸
۳	B	خشک	E	۱۹
۷	B	خشک	E	۲۰
-	پی بدون پد	اشباع	F	۲۱
-	پی بدون پد	خشک	F	۲۲

B: عرض پی برابر ۱۵ سانتی متر است.



شکل ۲. تصویر شماتیک دستگاه آزمایش مدل سازی فیزیکی ۱g مورد استفاده در این پژوهش

## ۳. تحلیل نتایج

## ۳-۱. نمودار تنش- نشست

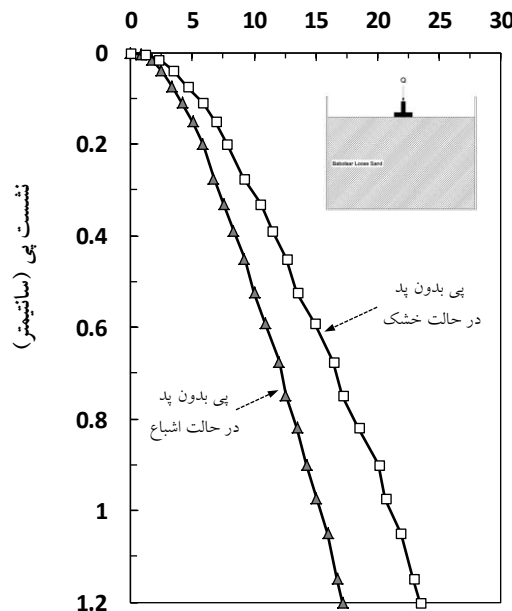
شکل ۳- الف منحنی‌های تنش- نشست برای پی غیرمسلح (بدون پد سیمان- ژئولیتی) در دو حالت ماسه خشک و اشباع را نشان می‌دهد. جهت تعیین میزان ظرفیت باربری روش‌های مختلفی وجود دارد (وسیک، ۱۹۷۳؛ دی بیر، ۱۹۷۰؛ داس، ۲۰۰۹). داس (۲۰۰۹) ظرفیت باربری نهایی را برابر با بار پی متناظر با نشست پی بین ۱۵ الی ۲۵ درصد عرض پی در نظر گرفته است. بنابراین، در این پژوهش، ظرفیت باربری با استفاده از روش داس (۲۰۰۹) با در نظر گرفتن نشست به میزان ۲۰٪ عرض پی تعیین شده است. مطابق شکل ۳- الف، مقادیر ظرفیت باربری شالوده واقع شده روی ماسه اشباع و خشک که در شرایط بدون پد قرار دارند برابر ۱۵ و ۲۰/۶ کیلوپاسکال به دست آمده است. تفاوت در شرایط نمونه‌سازی از حالت ماسه اشباع به حالت ماسه خشک، ظرفیت باربری را ۳۷٪ افزایش می‌دهد.

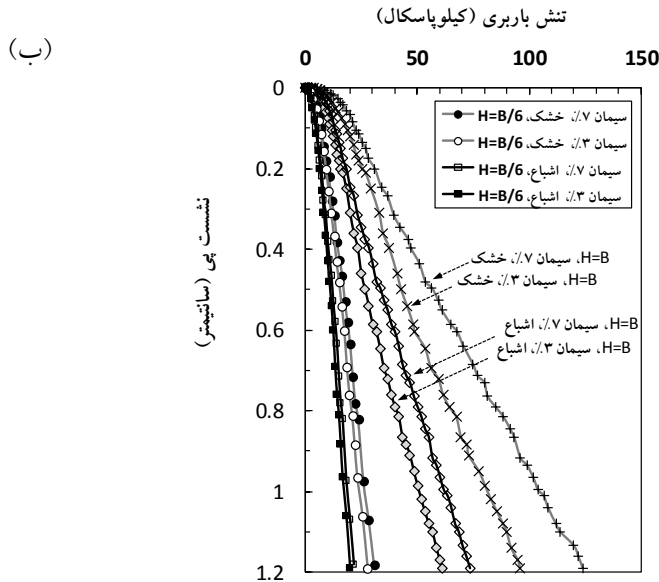
همان‌طور که در شکل ۳- ب مشاهده می‌شود، با به‌کارگیری پد سیمان- ژئولیتی (که در آن B برابر عرض

پی است) در زیر شالوده نواری، ظرفیت باربری نهایی برای مقدار سیمان ۳٪ در حالت اشباع به مقدار ۱۶/۷ کیلوپاسکال و برای حالت خشک ۲۳/۲ کیلوپاسکال به دست آمده است. این در حالی است که برای پد با ضخامت B/6 که در آن به میزان ۷٪ سیمان استفاده شده است، ظرفیت باربری نهایی پی در حالت اشباع و خشک به اندازه ۱۸/۴ و ۲۶ کیلوپاسکال خواهد رسید. بنابراین، افزایش در مقدار سیمان از ۳ به ۷ درصد، ظرفیت باربری نهایی را در حدود ۹٪ برای حالت اشباع و ۱۲٪ برای حالت خشک افزایش خواهد داد. قابل ذکر است که در تمامی نمونه‌های پد سیمان- ژئولیتی، مقدار ۴۰٪ ژئولیت جایگزین شده با سیمان استفاده شده است.

همان‌طور که در شکل ۳- ب دیده می‌شود، افزایش در میزان ضخامت پد، ظرفیت باربری را افزایش و نشست شالوده را کاهش می‌دهد. در همین ارتباط، افزایش شش برابری در ضخامت پد (مقایسه سری E نسبت به A) ظرفیت باربری را برای نمونه ۳٪ سیمان در حالت ماسه اشباع و خشک به ترتیب به اندازه ۳۱۰ و ۳۶۳ درصد و برای ۷٪ سیمان به اندازه ۳۴۵ و ۴۲۱ درصد افزایش می‌دهد.

تنش باربری (کیلوپاسکال) (الف)

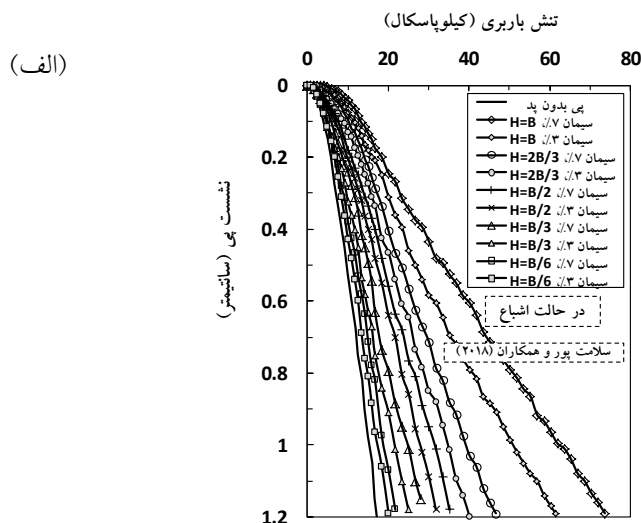




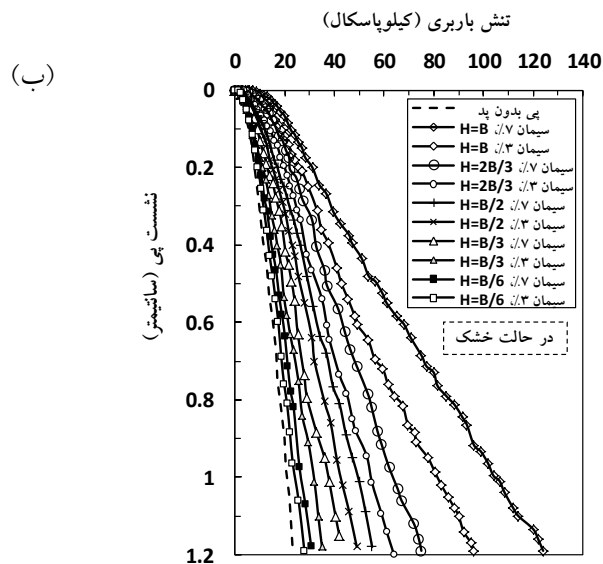
شکل ۳. منحنی های تنش - نشست (الف) دو پی بدون پد سیمان-زئولیتی متکی بر ماسه خشک و اشباع و (ب) تأثیر افزودن سیمان بر رفتار پی بهسازی شده با پد سیمان- زئولیتی به ضخامت های متفاوت  $B$  و  $B/6$  در حالت ماسه خشک و اشباع

در برابر بار وارده در سربارهای کم باشد. در این حالت، شکل منحنی ظرفیت باربری همانند منحنی های متداول به صورت غیرخطی نمایان می شود. در ادامه، با افزایش بار، پی دچار فرورفتگی از نوع پانچ شده و شکل منحنی به صورت خطی در می آید. با مقایسه تغییرات ظرفیت باربری پی در تمامی نمودارها، در حالت خشک نسبت به حالت اشباع، نرخ پی بین ۳۷ الی ۷۲ درصد افزایش مقاومت مشاهده می شود.

منحنی های تنش - نشست برای تمامی حالت های پد سیمان- زئولیتی در شرایط اشباع (سلامت پور و همکاران، ۲۰۱۸) در شکل ۴- الف و در شرایط خشک در شکل ۴- ب نشان داده شده است. به طور کلی، برای مقادیر کم بار ارتباط بین تنش و نشست برای حالت اشباع کمتر از ۱۵ کیلو پاسکال و برای حالت خشک کمتر از ۲۰ کیلو پاسکال به صورت غیرخطی بوده؛ در حالی که برای نرخ های بیشتر بارگذاری، رفتاری به صورت خطی از خود نشان می دهد. این رفتار می تواند به دلیل مقاومت خاک







شکل ۴. منحنی‌های تنش-نشست در مقادیر مختلف ضخامت پد سیمان-زئولیتی و محتوای سیمان ۳ و ۷ درصد (الف)

در حالت اشباع (سلامت پور و همکاران، ۲۰۱۸) و (ب) در حالت خشک

شکل ۵- الف ارتباط بین نسبت ظرفیت باربری در

برابر نسبت‌های  $H/B$  در دو شرایط خشک و اشباع (سلامت پور و همکاران، ۲۰۱۸) را نشان می‌دهد که در آن  $H/B$  به صورت نسبتی از ضخامت پد ( $H$ ) به عرض پی ( $B$ ) تعریف می‌گردد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقدار نسبت ظرفیت باربری در حالت  $H/B=0$  برابر صفر بوده (شالوده بدون پد سیمان-زئولیتی) و در ادامه با افزایش  $H/B$  این مقدار افزایش می‌یابد. نسبت ظرفیت باربری برای نمونه‌های پد سیمان-زئولیتی در شرایط اشباع که دارای ۷٪ سیمان می‌باشند به ترتیب برای نمونه A2 (مطابق جدول ۲)، ۲۳٪، برای B6، ۶۷٪ برای C10، ۱۱۱٪، برای D14، ۱۶۰٪، E18، ۳۱۱٪ افزایش را نشان می‌دهد. این در حالی است که این شاخص افزایش مقاومت برای نمونه‌های خشک و ۷٪ سیمان به ترتیب ۳۰٪، ۹۱٪، ۱۵۰٪، ۲۲۰٪ و ۴۴۰٪ افزایش بوده است. همچنین، با افزایش در مقدار سیمان از ۳ به ۷ درصد، نسبت ظرفیت باربری با افزایش در نسبت‌های  $H/B$  افزایش یافته و این مقدار برای حالت خشک و حالت اشباع به میزان تقریبی ۲۶٪ ثابت می‌باشد.

مکانیزم مشابهی در تحقیقات صورت پذیرفته توسط

### ۳-۲. ضرایب ظرفیت باربری و کاهش نشست

جهت بررسی هر چه بهتر تأثیر استفاده از پد سیمان-زئولیتی مستقر در زیر پی‌های نواری از دو پارامتر نسبت ظرفیت باربری و نسبت کاهش نشست در این مقاله استفاده شده است. این پارامترها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\text{نسبت ظرفیت باربری} = \frac{q_{u(\text{پی غیر مسلح})} - q_{u(\text{پی مسلح})}}{q_{u(\text{پی غیر مسلح})}} \quad (1)$$

$$\text{نسبت کاهش نشست} = \left| \frac{S_{(\text{پی غیر مسلح})} - S_{(\text{پی مسلح})}}{S_{(\text{پی غیر مسلح})}} \right| \quad (2)$$

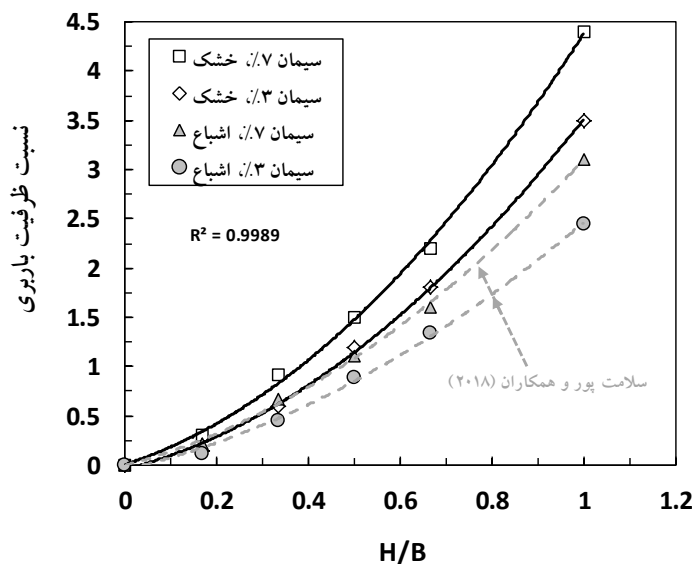
که در آن  $q_u$  (پی مسلح) و  $q_u$  (پی غیرمسلح) به ترتیب ظرفیت باربری نهایی شالوده مستقر بر پد سیمان-زئولیتی و بدون پد می‌باشد. همچنین،  $S_{(\text{پی مسلح})}$  و  $S_{(\text{پی غیرمسلح})}$  به ترتیب نشست شالوده با وجود پد و بدون پد است. این دو نسبت برای بهسازی با بازدهی بیشتر مقادیر بیشتری را به خود اختصاص می‌دهند. نسبت کاهش نشست بین صفر تا یک متغیر است. ولی نسبت ظرفیت باربری می‌تواند مقادیر بیش از یک را نیز شامل شود.

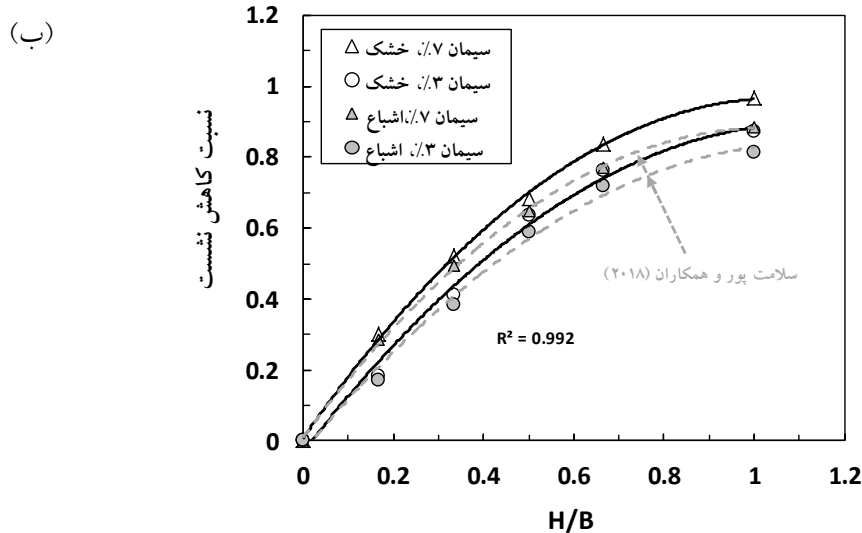
C10، D14 و E18 میزان نسبت کاهش نشست به اندازه ۴۹، ۶۴، ۷۷ و ۸۸ درصد افزایش می یابد. این در حالی است که این مقادیر برای نمونه هایی که در شرایط خشک آزمایش شده اند به ترتیب، ۵۲، ۶۸، ۸۳ و ۹۵ درصد کاهش نشست را تجربه خواهند کرد. همچنین، تفاوت بین نمونه های ۳ و ۷ درصد سیمان در حالت اشباع برای تمامی نسبت های H/B نرخ ثابت حدود ۹٪ دارد. در حالی که برای حالت خشک، تغییر در میزان سیمان با افزایش H/B، برخلاف حالت اشباع، از ابتدا روند رو به افزایش داشته است. به طوری که برای نمونه پد با ضخامت B (نمونه E19 و E20) این اختلاف به میزان ۱۱٪ می رسد. مقادیر زیاد اثبات کننده این موضوع می باشد که استفاده از پد سیمان- زئولیتی در زیر پی های نواری، میزان ظرفیت باربری و کاهش نشست پذیری را به طور چشمگیری بهبود بخشیده و می توان از آن به عنوان یک روش نوین جهت بهسازی پی های نواری مستقر بر ماسه سست دانست.

داش و همکاران (۲۰۰۱) گزارش شده است. داش و همکاران (۲۰۰۱) تأثیر به کارگیری ژئوسل بر ظرفیت باربری پی های نواری مستقر بر ماسه سست، با کمک آزمایش های مدل سازی فیزیکی، پرداختند. نتایج این تحقیق بیانگر افزایش ظرفیت باربری بسیار زیاد در هنگام استفاده از این تسلیح بوده است. آنها نشان دادند که نسبت ظرفیت باربری در بهترین حالت زمانی اتفاق می افتد که ژئوسل در عمق ۰/۱ برابر نسبت به عرض پی کار گذاشته شود، که در این حالت افزایش ظرفیت باربری ۸ برابری را نسبت به پی بدون تسلیح خواهد داشت.

تغییرات نسبت کاهش نشست در مقابل نسبت های H/B برای تمامی داده های آزمایش در حالت خشک و اشباع در شکل ۵- ب نشان داده شده است. با قرار دادن پد سیمان- زئولیتی به ضخامت B/6 در زیر پی نواری (آزمایش A2)، نرخ کاهش نشست نسبت به حالتی که پی روی پد قرار نگرفته باشد به میزان ۲۸٪ افزایش یافته است (در حالت اشباع). همچنین، برای نمونه های B6،

(الف)





شکل ۵. (الف) تغییرات نسبت ظرفیت باربری و (ب) نسبت کاهش نشست در مقابل نسبت های H/B برای تمامی

#### نمونه های پد سیمان- زئولیتی

ملی ساختمان مبحث هفتم) اعداد ۲ و ۳ بوده که جهت جلوگیری از گسیختگی برشی تعریف شده اند. شکل ۶، ارتباط بین ظرفیت باربری مجاز و نشست های خالص را برای نمونه هایی که در شرایط خشک و اشباع و با در نظر گرفتن مقدار ۷٪ سیمان و تحت ضریب اطمینان ۲ و ۳ قرار دارند نشان می دهد. نسبت نشست خالص (مطابق رابطه ۴) به صورت اختلاف نشست بین شالوده با پد سیمان- زئولیتی و بدون پد که به عرض پی نرمال می شود تعریف می گردد.

$$(۴) \quad \text{نسبت نشست خالص} = \frac{S_{\text{پی غیر مسلح}} - S_{\text{پی مسلح}}}{\text{عرض شالوده}}$$

همان طور که پیش تر اشاره گردید، ظرفیت باربری مجاز با وجود پد سیمان- زئولیتی افزایش چشمگیری نسبت به حالت بدون پد دارد. این افزایش، با تغییر ضخامت پد، رابطه مستقیم دارد. به گونه ای که بیشترین ظرفیت باربری مربوط به پد به ضخامت B (سری آزمایش E) و کمترین مقدار مربوط به ضخامت B/6 (سری آزمایش A) می باشد.

مطابق شکل ۶، ظرفیت باربری مجاز با افزایش نسبت نشست خالص افزایش می یابد. برای پدهای سیمان- زئولیتی با ضخامت بزرگ تر از B/3

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

ضریب اطمینان، پارامتری مهم در طراحی بوده که بیانگر نسبت نیروی قابل تحمل توسط پی به نیروی وارده به پی می باشد. مقدار این ضریب با توجه به نوع مکانیزم و فرآیند به کارگیری آن در آیین نامه های ساختمانی ارائه می گردد. ظرفیت باربری نهایی حداکثر باری است که پی می تواند تحمل کند. اما در شرایط واقعی، مهندسین، بار مجاز پی را مطابق رابطه (۳) با اعمال ضرایب اطمینان بر ظرفیت باربری نهایی طراحی می کنند. در واقع، ظرفیت باربری مجاز در بردارنده یک بار مطمئن و پذیرای یک کمیت کافی جهت پرهیز از خسارت های احتمالی ناشی از نشست خواهد بود. بنابراین، برای کنترل نشست ها، تعیین ضریب اطمینان مناسب در طراحی سازه ها از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود که به صورت زیر تعریف می شود:

$$(۳) \quad q_{all} = \frac{q_{ult}}{F.S.}$$

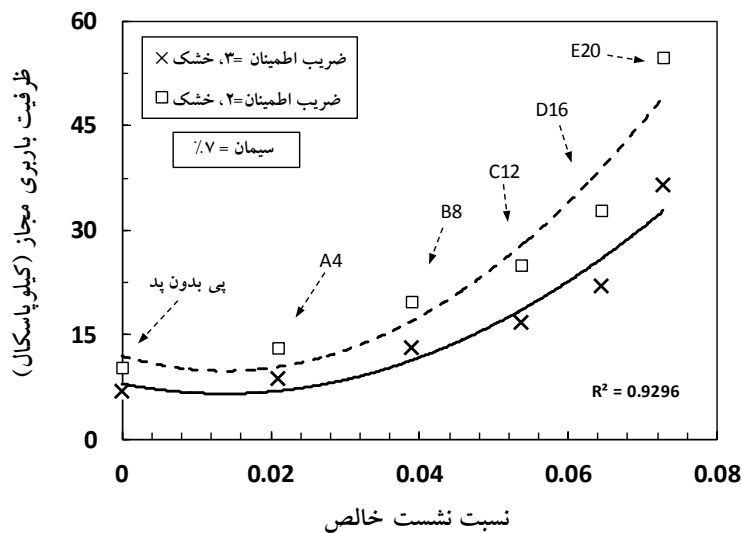
در این رابطه،  $q_{all}$  و  $q_{ult}$  به ترتیب ظرفیت باربری نهایی و مجاز و F.S. ضریب اطمینان می باشند. ضرایب اطمینان انتخاب شده در این مطالعه (بر اساس آیین نامه مقررات

افزایش می دهد، اما تأثیر نسبت نشست خالص نسبت به ضخامت های کوچک تر پد بیشتر می باشد. به هر حال، در شرایط واقعی، در نظر گرفتن پد با ضخامت های بزرگ تر از  $B/3$  از لحاظ اجرایی محدودیت های زیادی در بر خواهد داشت. از طرفی دیگر، پد با ضخامت کمتر از  $B/3$  نرخ بهبود ظرفیت باربری برای حالت اشباع بین ۲۳ الی ۶۷ درصد افزایش و نشست را بین ۱۶ الی ۴۹ درصد کاهش و برای حالت خشک به ترتیب ۳۰ الی ۹۱ درصد افزایش و ۱۸ الی ۵۲ درصد کاهش می دهد (برای میزان سیمان ۷٪). بنابراین، نتایج این تحقیق نشان می دهد که بهینه ترین مقدار ضخامت پد سیمان- زئولیتی که در شرایط واقعی ساخت و ساز قابلیت کاربردی داشته و در همین ارتباط افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست- پذیری قابل توجهی را روی پی هایی که مستقر بر خاک با مقدار مقاومت برشی کم ایجاد می کند، به کارگیری پد با ضخامت کمتر از  $B/3$  است.

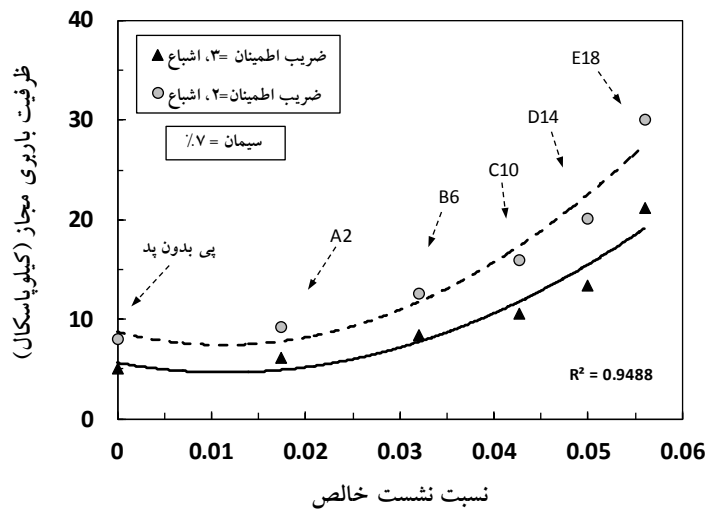
( $\Delta S/B > 0.032$ ) برای حالت اشباع و ( $\Delta S/B > 0.039$ ) برای حالت خشک) ظرفیت باربری مجاز با شتاب بیشتری (با یک شیب تند) نسبت به ضخامت کوچک تر پد افزایش می یابد. در ادامه، با افزایش ضخامت پد از  $2B/3$  به  $B$ ، یک جهش بزرگی در مقدار ظرفیت باربری مجاز در مقایسه با دیگر ضخامت های پد تجربه می کند (افزایش در نرخ مقاومت). این درحالیست که نسبت نشست خالص با افزایش پد از  $2B/3$  به  $B$ ، با شیبی به مراتب ملایم تر افزایش می یابد. بنابراین تفاوت نشست خالص بین نمونه ها با افزایش در ضخامت پد کمتر شده و بیشترین اختلاف برای نمونه های  $B/6$  و  $B/3$  نسبت به پی بدون پد را تجربه می کند.

این مطالعه نشان می دهد که با اعمال یک ضریب اطمینان مناسب در طراحی ها، می توان اثرهای قابل ملاحظه ای جهت کنترل نشست های ساختمان ایجاد کرد. اگرچه ضخامت های بزرگ پد نسبت به ضخامت های کوچک تر، ظرفیت باربری را به شدت

(الف)



(ب)



شکل ۶. تغییرات ظرفیت باربری مجاز پی در مقابل نسبت نشست خالص برای تمامی نمونه‌های پد سیمان- زئولیتی با مقدار ۷٪ سیمان

می‌دهد.

۴- افزایش در نسبت بعدی  $H/B$ ، نسبت ظرفیت باربری را افزایش و در ارتباط با آن ضریب کاهش مقاومت را کاهش می‌دهد. این مطلب بیانگر آن است که استفاده از این روش بهسازی به‌عنوان یک تقویت‌کننده مناسب، می‌تواند رفتارهای پی‌های نواری مستقر بر خاک‌های ماسه‌ای سست را بهبود ببخشد.

۵- محدوده نسبت کاهش نشست برای نمونه‌های پد سیمان- زئولیتی که در شرایط اشباع آزمایش شده‌اند به میزان ۹٪ بوده و با افزایش نسبت  $H/B$  این مقدار ثابت می‌باشد. این در حالی است که برای شرایط خشک، با افزایش در میزان سیمان مصرفی، این محدوده در ابتدا به میزان ۶٪ بوده و با افزایش در نسبت  $H/B$  این مقدار به میزان ۱۱٪ خواهد رسید.

۶- بهترین مقدار ضخامت پد سیمان- زئولیتی که در زیر پی‌های نواری مستقر بر ماسه سست بابلسر قرار می‌گیرد ضخامت‌های کمتر از  $B/3$  می‌باشد. این مقدار، با توجه به افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پذیری پی (بهبود عملکرد پی نواری) و همچنین سهولت در اجرا، قابلیت کاربردی دارد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با انجام یک‌سری آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی ۱g روی پی‌های نواری بهسازی شده با پد سیمان- زئولیتی مستقر بر ماسه سست بابلسر، به بررسی عملکرد رفتار این‌گونه پی‌ها پرداخته شده است. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه عبارتند از:

۱- مقایسه بین نمودارهای تنش باربری- نشست پی برای تمامی حالت‌های صورت پذیرفته در شرایط خشک نسبت به شرایط اشباع، نرخ بین ۳۷ الی ۷۲ درصد افزایش مقاومت تجربه کرده است.

۲- استفاده از پد سیمان- زئولیتی با ضخامت نصف بُعد پی در زیر پی‌های نواری، مقدار ظرفیت باربری را در شرایط نمونه‌سازی اشباع برای ۳٪ سیمان مصرفی به مقدار ۸۹٪ و برای ۷٪ سیمان به مقدار ۱۱۱٪ افزایش می‌دهد. همچنین، در شرایط نمونه‌سازی خشک، این مقدار به میزان ۱۲۰٪ و ۱۵۰٪ افزایش خواهد یافت (به ترتیب برای ۳٪ و ۷٪ سیمان).

۳- به‌کارگیری پد با ضخامت کمتر از  $B/3$  که دارای ۷٪ سیمان می‌باشد، نسبت کاهش نشست پی‌های نواری را در شرایط نمونه‌سازی اشباع به میزان ۱۶ الی ۴۹ درصد و در شرایط خشک بین ۱۸ الی ۵۲ درصد افزایش

## ۵. مراجع

- Das, B. M. 2009. "Shallow foundations: Bearing capacity and settlement". 2<sup>nd</sup> Edition, CRC Press.
- Dash, S. K., Krishnaswamy, N. R. and Rajagopal, K. 2001. "Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand". *Geotext. Geomembranes*, 19: 235-256.
- Dashti, S., Bray, J. D., Pestana, J. M., Riemer, M. and Wilson, D. 2010a. "Mechanisms of seismically induced settlement of buildings with shallow foundations on liquefiable soil". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 136(1): 151-164.
- Dashti, S., Bray, J. D., Pestana, J. M., Riemer, M. R. and Wilson, D. 2010b. "Centrifuge testing to evaluate and mitigate liquefaction induced building settlement mechanisms". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 136(7): 918-929.
- De Beer, E. E. 1970. "Experimental determination of the shape factors and the bearing capacity factors of sand". *Géotechnique*, 20(4): 387-411.
- Jafarian, Y., Ghorbani, A., Salamatpoor, S. and Salamatpoor, S. 2013. "Monotonic triaxial experiments to evaluate steady-state and liquefaction susceptibility of Babolsar sand". *J. Zhejiang Univ. Sci.-A.*, 14(10): 739-750.
- Jafarian, Y., Haddad, A. and Mehrzad, B. 2016. "Load-settlement mechanism of shallow foundations rested on saturated sand with upward seepage". *Int. J. Geomech.*, 17(3): 1-14.
- Kumar, A., Ohri, M. L. and Bansal, R. K. 2007. "Bearing capacity tests of strip footings on reinforced layered soil". *Geotech. Geolog. Eng.*, 25(2): 139-150.
- Lal, D. Sankar, N. and Chandrakaran, S. 2017. "Effect of reinforcement form on the behaviour of coir geotextile reinforced sand beds". *Soils Found.*, 57(2): 227-236.
- Salamatpoor, S. and Salamatpoor, S. 2014. "Evaluation of Babolsar sand behaviour by using static triaxial tests and comparison with case history". *Open J. Civ. Eng.*, 4(3): 181-197.
- Salamatpoor, S., Jafarian, Y. and Hajiannia, A. 2018a. "Improvement of shallow foundations rested on saturated loose sand by zeolite-cement mixture: A laboratory study". *Sci. Iran.: Trans. Civ. Eng.*, (A), 25(4): 2063-2076.
- Salamatpoor, S., Jafarian, Y. and Hajiannia, A. 2018b. "Physical and mechanical properties of sand stabilized by cement and natural zeolite". *Eur. Phys. J. Plus.*, 133: 205.
- Vesic, A. S. 1973. "Analysis of ultimate loads of shallow foundations". *J. Soil Mech. Found. Div.*, 99(1): 45-73.
- Wood, D. M. 2004. "Geotechnical modeling". Spon Press, London.