



بررسی اثر بهسازی خاک به روش ریزشمع در خاک مارن: مطالعه موردی بیدبلند خوزستان

رسول عالی پور^{۱*}، حسام امین پور^۲، علی دهقان زاده^۳

۱- دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

۲- دانشکده فنی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۳- دانشکده فنی، دانشگاه آزاد آبادان، آبادان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۳

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۸/۱۱

کلمات کلیدی:

ریزشمع

بهسازی خاک

پی منفرد

مدل سازی عددی

نرم افزار اجزا محدود آباکوس

خلاصه: در این تحقیق بر مبنای یک مطالعه موردی با استفاده از ریزشمع‌های تزریقی عملیات بهسازی خاک زیر پی‌های منفرد یک سازه بتنی نشست کرده ارائه گردیده است. بر این اساس میزان تأثیر استفاده از ریزشمع‌ها در کنترل میدان تنش-تغییر شکل ایجاد شده در خاک بستر سازه بتنی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای ارزیابی وضعیت نشست‌های رخ داده، نسبت به جمع‌آوری اطلاعات لازم شامل انجام شناسایی زیر سطحی به وسیله حفر گمانه‌های ژئوتکنیکی و نیز انجام عملیات پایش نشست‌ها اقدام گردید. برداشت‌های نقشه‌برداری قبل از انجام عملیات بهسازی خاک دلالت بر نشست پی‌های منفرد و ادامه‌دار بودن نشست‌ها داشت. پس از عملیات بهسازی خاک این روند به صفر رسید. با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود Abaqus مجموعه تحلیل‌های عددی بر روی سازه بتنی احداث شده بر بستر سست که مستعد تغییر شکل‌های مخربی در اعضای باربر سازه‌ای مانند ستون‌ها می‌باشند، انجام پذیرفت. در این شبیه‌سازی‌ها به منظور به دست آوردن عملکرد بهینه ریزشمع‌ها، پارامترهای عمق، قطر و تعداد ریزشمع مورد بررسی قرار گرفت. ضرورت این تحقیق در مورد تصمیم‌گیری برای بهسازی خاک یک سازه بتنی نشست کرده در مجاورت گودبرداری انجام شده بر اساس روش ریزشمع و یا تخریب سازه را در بر می‌گیرد. نتایج به دست آمده نشان داد که پارامترهای طول و تعداد ریزشمع بیشترین تأثیر را بر کنترل میدان تغییر شکل و نشست سازه دارا می‌باشد. همچنین نتایج بیانگر آن است که تأثیر پارامتر وزن سازه در اندرکنش ریزشمع و سازه قابل توجه هست.

۱- مقدمه

امروزه نیاز روزافزون به ساخت‌وساز و توسعه صنعتی موجب شده است که نیاز به انتخاب محل پروژه با در نظر گرفتن عوارض زمین و عوامل اقتصادی گوناگون به عنوان یک چالش مهم مطرح باشد. در بسیاری از موارد مهندسیین ناچار به احداث این سازه‌ها بر روی بستر سست و ضعیف جهت نیل به اهداف خود می‌باشند. با این حال در این‌گونه موارد، در صورتی که سازه‌های در دست احداث از نوع بتنی باشند، به دلیل رفتار پیچیده‌تر این نوع سازه‌ها در مقایسه با سایر سازه‌ها مشکلات بیشتری از سوی مهندسیین احساس می‌شود. لذا در این شرایط با توجه به بارهای وارده از سوی این نوع سازه‌ها به بستر و پی که منجر به بروز تغییرهای گسترده در خاک اطراف و حتی سازه‌های مجاور خواهد شد، لزوم به کارگیری تمهیدات مناسب و کارآمد جهت بهسازی و کاهش میدان تغییر شکل‌های وارده به سازه‌ها پیش و پس از احداث سازه‌ها، احساس می‌شود. یکی از روش‌های مناسب جهت نیل به

این اهداف استفاده از المان‌های ریزشمع هست. ریزشمع‌ها عناصر باربری هستند که جهت انتقال بار، افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست‌های بستر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حقیقت این المان‌های باربر امروزه به عنوان یک روش مناسب در زمینه بهسازی، اصلاح بستر و مقاوم‌سازی سازه‌ها و به طور خاص سازه‌های بتن مسلح پیش و پس از احداث سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱ و ۲].

بر پایه مطالعات صورت گرفته توسط توماسیو و همکاران^۱، استفاده از ریزشمع‌ها به عنوان یک راهکار جهت اصلاح و مقاوم‌سازی فونداسیون سازه‌های بتنی ساحلی و موج شکن‌ها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج به دست آمده به خوبی نشان می‌داد که استفاده از ریزشمع‌ها در این نوع سازه‌ها که دارای شرایط ژئوتکنیکی و ژئولوژیکی خاصی هستند، منجر به ارائه نتایج مناسب در زمینه افزایش مقاومت این نوع سازه‌ها و کاهش تغییرهای وارده خواهد شد. با این وجود محققین تأکید نمودند که عملکرد

1 Tumasio et al.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: r.alipour@sku.ac.ir



مناسب این روش‌ها به شدت تابع اطمینان از کیفیت و نحوه اجرای این روش اصلاح هست [۳]. در تحقیقات و پژوهش صورت گرفته توسط دورانه کوریا، اثر ریزشمع‌ها و تزریق تحت فشار بر مقاومت‌سازی فونداسیون سازه‌های قدیمی و سنتی در شهر لیسبون مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. به این منظور و جهت انتخاب روش مناسب مجموعه تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌هایی با استفاده از نرم‌افزار Plaxis صورت پذیرفت. نتایج به دست آمده به خوبی بیانگر عملکرد مناسب‌تر روش ریزشمع در اصلاح و بهبود رفتار پی سازه‌ها و کنترل تغییر مکان‌ها و جابه‌جایی‌هایی ایجاد شده در پی این سازه‌ها بود [۴]. همچنین در مطالعات انجام شده توسط مالدونادو و همکاران^۱، اثر روش‌های متفاوت بهسازی و مقاوم‌سازی بر کنترل میدان تنش و تغییر شکل ساختمان‌های قدیمی و بااهمیت مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه روش‌های متداول مقاوم‌سازی مانند احداث ریزشمع‌ها مورد بررسی قرار گرفت و به منظور بررسی مکانیزه رفتاری هر یک از این روش‌ها در بهسازی و مقاوم‌سازی سازه‌ها مجموعه تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌هایی با استفاده از نرم‌افزارهای اجزاء محدود SAP و Abaqus صورت پذیرفت. نتایج به دست آمده در این تحقیق به خوبی عملکرد رفتاری مناسب روش‌های مقاوم‌سازی از جمله ریزشمع‌ها در کنترل میدان تنش ایجاد شده در پی سازه و اعضای باربر سازه‌ای را نشان می‌داد [۵].

در تحقیقات و پژوهش صورت گرفته توسط استرنیک و بلجارسکی^۲، مقاوم‌سازی یک سازه بتنی که تحت نشست‌های غیریکنواخت قرار گرفته بود، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. در این مطالعه رفتار سازه با در نظرگیری اعضای باربر ریزشمع به عنوان روش مقاوم‌سازی طی مجموعه شبیه‌سازی‌های عددی اجزا محدود، تحلیل و بررسی گردید. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی به خوبی تأثیر بالقوه استفاده از ریزشمع‌ها در کنترل نشست زیر سازه و در نتیجه آن خرابی اعضای باربر سازه‌ای را نشان می‌داد، به گونه‌ای که به عنوان روش اجرایی مقاوم‌سازی و بهسازی سازه مورد مطالعه از سوی مهندسين انتخاب گردید [۶]. همچنین در تحقیقات صورت گرفته توسط هامدا^۳، اثر روش‌های نوین مقاوم‌سازی و بهسازی (شمع و ریزشمع) بر کنترل و اصلاح تغییر شکل‌های موجود در سازه‌های قدیمی و تاریخی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. به این منظور پس از تعریف شرایط سازه‌ای و ژئوتکنیکی محل احداث سازه، روش‌های اصلاح و مقاوم‌سازی

- 1 Duarte Correia
- 2 Maldonado et al.
- 3 Sternik & Blejarski
- 4 Hemeda

مورد نظر (شمع و ریزشمع) به طور کامل مورد بررسی قرار گرفت و در انتها به منظور بررسی تأثیر هر یک از این روش‌ها بر کنترل نشست و تغییرهای سازه‌ای مجموعه تحلیل‌های عددی صورت پذیرفت. نتایج به دست آمده در این تحقیق به خوبی برتری استفاده از روش ریزشمع را نسبت به گزینه شمع در اصلاح بستر و کنترل تغییر شکل‌های سازه‌ای نشان می‌داد. در نهایت گزینه اجرای ریزشمع به عنوان روش برتر جهت اجرای عملیات بهسازی خاک انتخاب گردید [۷].

کارایی استفاده از ریزشمع‌های تزریقی برای پایدارسازی شیب توسط محققان مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. المان‌های تسلیح ریزشمع باعث افزایش ضریب ایمنی پایداری شیب می‌گردد [۸-۱۰]. همچنین استفاده از ریزشمع‌ها توانایی کاهش پتانسیل روانگرایی و بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های می‌شود [۱۱-۱۳].

با این وجود و همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مطالعات کم و محدودی به بررسی عملکرد این روش‌ها در اصلاح و مقاوم‌سازی پی سازه‌های بتن مسلح مستقر بر بسترهای سست پس از احداث پرداخته‌اند. به عبارت دیگر بخش قابل توجه و عمده‌ای از تحقیقات صورت گرفته در طی سالیان اخیر و به طور ویژه در دو دهه گذشته به بررسی عملکرد این روش‌ها پیش از احداث سازه بر بستر سست پرداخته‌اند و در نتیجه در مطالعات محدودی اثر ریزشمع‌ها پس از ساخت مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

در این مقاله برای یک سازه بتنی در حال ساخت که تحت اثر گودبرداری در مجاورت آن دچار نشست‌ها و تغییر شکل‌های زیادی شده است اقدام به بررسی استفاده از روش ریزشمع برای کنترل نشست‌ها گردیده است. ابتدا توسط عملیات پایش نسبت به برداشت تغییر شکل‌ها اقدام گردید. پس از آن به وسیله انجام مطالعات ژئوتکنیک و حفر گمانه‌های شناسایی نسبت به بررسی شرایط زیرسطحی اقدام گردید. در نهایت با استفاده از مدل‌سازی‌های عددی اجزا محدود گزینه‌های مختلف از لحاظ چیدمان ریزشمع‌ها بررسی گردید. پس از آن مجدداً عملیات پایش پس از اجرای عملیات بهسازی خاک انجام پذیرفت و موثر بودن روش بهینه به کار گرفته شده تأیید گردید. نوآوری این مقاله کارایی موثر روش ریزشمع مسلح به همراه تزریق تماسی زیر پی‌های منفرد و تزریق تحکیمی در خاک مارن بهبهان (منطقه بیدبلند) با پتانسیل رمبش اشباعی را در یک مطالعه موردی نشان می‌دهد.

۲- روش تحقیق و نتایج

۲-۱- هندسه سازه مورد مطالعه و مشکل نشست

در این مطالعه، فونداسیون یک سازه بتنی واقع در یک ناحیه صنعتی



شکل ۱. ساختمان بتنی در حال ساخت در مجاورت گودبرداری دچار نشست شده است.

Fig. 1. The concrete building under construction in the vicinity of excavation has suffered subsidence.

اجرای گمانه‌های تزریق تحکیمی بوده‌اند.

در جدول ۱، نتایج پایش نقشه‌برداری از پی‌های منفرد در قسمت‌های مختلف نشان داده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود بیشترین میزان نشست قائم در اثر گودبرداری در فونداسیون E1 و به میزان ۱۲۰ میلی‌متر ایجاد شده است. علاوه بر جابه‌جایی و نشست پی‌ها، ستون‌های سازه بتنی نیز دچار دوران شده‌اند. بیشترین میزان دوران در ستون گوشه سمت گودبرداری (ستون F1) به وضوح و به صورت چشمی قابل مشاهده می‌باشد. نشست تغییر مکان در راستای قائم یا Δ_z می‌باشد. بقیه تغییر مکان‌ها جابه‌جایی در راستای X و Y می‌باشد.

۲-۲- شرایط ژئوتکنیکی خاک محل پروژه

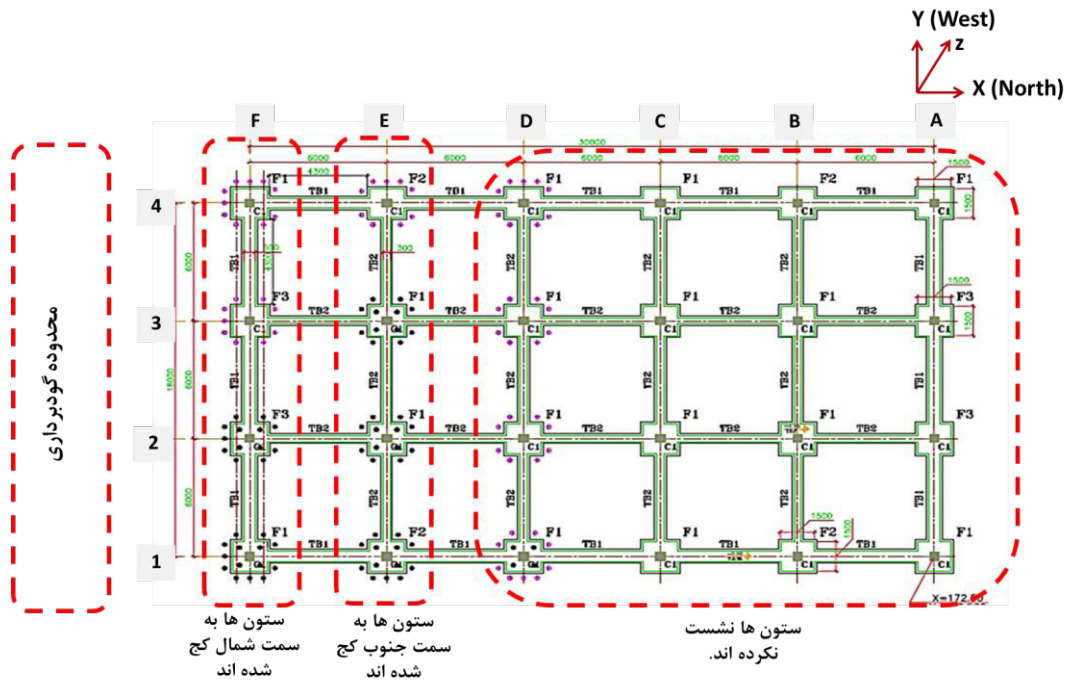
به منظور شناسایی شرایط ژئوتکنیکی دو گمانه حفاری گردید و آزمایشات آزمایشگاهی و آزمایشات برجا انجام شدند. زمین مورد ساخت سازه اسکلت بتنی در قسمت‌هایی خاکریزی شده زیرا قبلاً محل عبور آبرو یا دره طبیعی بوده است. ضخامت خاکریزی انجام شده در زیر و مجاورت این سازه حداکثر حدود ۷ متر می‌باشد. این خاکریزی شامل ذرات خاک رس به همراه سنگ‌های درشت دانه است ولیکن بافت کلی خاک دست ریز را خاک رس با تراکم کم تشکیل می‌دهد.

نمونه‌های خاک اخذ شده در جعبه‌های چوبی در شکل ۳ نشان داده

که در مجاورت آن گودبرداری انجام گرفته است، مورد بررسی واقع شده است. انتخاب این سازه به این دلیل هست که در اثر گودبرداری و اعمال بارهای سازه‌ای، فونداسیون‌های منفرد به همراه شناژهای رابط ساختمان دچار نشست و کاهش ظرفیت باربری شده است. شکل ۱، ساختمان بتنی نشست کرده به همراه گودبرداری مجاور آن را نشان می‌دهد.

این ساختمان بتنی دارای یک طبقه بوده و دارای شش محور A تا F در راستای شمالی-جنوبی و ۴ محور در راستای شرقی غربی می‌باشد. شکل ۲، پلان این سازه به همراه پی‌های منفرد و شناژهای بتنی رابط را نشان می‌دهد. در قسمت جنوبی این ساختمان یک گودبرداری به عمق ۷ متر انجام پذیرفت. پس از انجام عملیات گودبرداری، پی‌ها و شناژهای رابط ساختمان در محورهای E و F دچار جابه‌جایی و تغییر شکل شدند.

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است فاصله بین پی منفرد تا لبه گود ۰/۵ متر می‌باشد. در هنگام گودبرداری از روش‌های پایدارسازی گود استفاده نگردید ولی با مشاهده نشست‌ها و تغییر شکل‌های ایجاد شده در سازه بتنی به سرعت نسبت به اجرای دیواره بتنی بین ستون F1 و F2 اقدام گردید. همچنین با پاشیدن دوغاب بر جداره گود تلاش گردید از هوازگی خاک جلوگیری به عمل آید. ستون‌های F1، F2، E1، E2، E3 و D1 هر کدام دارای چهار عدد ریزشمع می‌باشند و اطراف پی‌ها از تزریق تحکیمی استفاده شده است. آرایش متفاوت بر اساس دسترسی و امکان



شکل ۲. هندسه سازه مورد مطالعه

Fig. 2. The geometry of the studied structure

جدول ۱. تغییر مکان‌های ایجاد شده در پی‌های منفرد سازه بتنی

Table 1. Changes in the places created in the individual foundations of the concrete structure

ردیف	مکان پی	Δ_x , mm	Δ_y , mm	Δ_z , mm	توضیحات
۱	F3 and F4	۰	۰	۰	ستون‌ها به سمت شمال کج شده‌اند.
۲	F2	+۳۰	۰	۰	
۳	F1	+۶۰	-۶۰	-۸۰	
۴	E4	۰	۰	۰	ستون‌ها به سمت جنوب کج شده‌اند.
۵	E3	۰	۰	-۲۰	
۶	E2	-۸۰	-۳۰	-۸۰	
۷	E1	۰	۰	-۱۲۰	
۸	سایر پی‌ها	۰	۰	۰	



شکل ۳. نمونه‌های خاک دست خورده و دست نخورده تا عمق ۱۰ متر

Fig. 3. Disturbed and undisturbed soil samples up to a depth of 10 meters

جدول ۲. مشخصات خاک

Table 2. soil characteristics

مقاومت برشی Ø	C, kN/m ²	وزن مخصوص، kN/m ³	خواص خمیری	عدد نفوذ استاندارد	شرح	ضخامت لایه
۲۶	۱۴	۱۶/۵	LL=۳۶, PI=۱۳	۲ (در عمق ۲ متری)	رس با خاصیت خمیری کم همراه ماسه (CL)	۰ تا ۵ متر
۳۲	۱۰۵	۱۹/۴	LL=۳۹, PI=۱۹	۵۰ (در عمق ۵ متری)	رس با خاصیت خمیری کم همراه ماسه (CL)	۵ تا ۷ متر
۳۹	۱۴۴۲	۲۲/۴	LL=۳۸, PI=۱۹	۵۰ ضربه میلی متر نفوذ	توده رس سنگ (Claystone)	۷ تا ۱۰ متر

پیشنهاد گردید. همچنین به منظور جلوگیری از فرآیند هوازدگی مصالح در زیر پی پاشیدن دوغاب به جداره گود انجام شد. علاوه بر آن، سبک‌سازی در سازه بتنی شامل برداشتن قلوه سنگ‌های موجود در کف‌سازی و نیز برداشتن بلوک‌های سقف در دهانه جنوب شرقی انجام پذیرفت. در قسمت دوم، طرح نهایی تثبیت شامل سه فرآیند انجام پذیرفت. مرحله اول انجام تزریق تماسی قلوه‌ریزی زیر پی‌ها به عمق ۰/۵ متر صورت گرفت. در مرحله بعد گمانه‌های تزریق معمولی به عمق ۵ متر در اطراف پی‌های سه محور E, F, D انجام پذیرفت. سپس در مرحله نهایی و برای تثبیت دائم، ریزشمع‌های تزریقی با عمق ۸ متر و با آرماتور به قطر ۳۲ میلی‌متر در پی‌های F1, F2, E1, E2, E3 انجام گردید. شکل ۴، انجام عملیات بهسازی خاک به روش

شده‌اند. همچنین جدول ۲ شرایط لایه‌های خاک شامل طبقه‌بندی نوع خاک، عدد نفوذ استاندارد و خواص خمیری لایه‌های مختلف خاک را نشان می‌دهد.

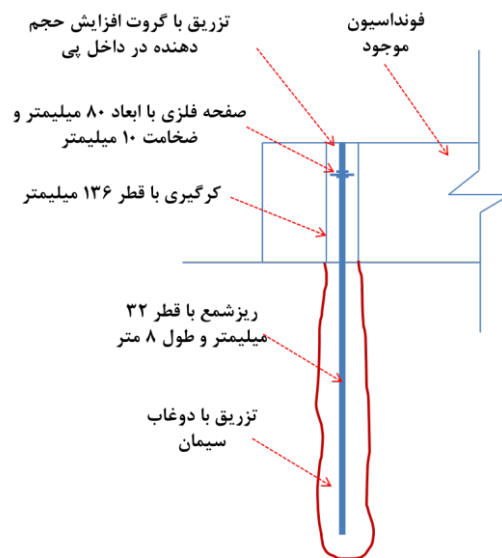
۲-۳- بهسازی خاک به روش ریزشمع

بر اساس پایش نقشه‌برداری و جابه‌جایی‌های پیش رونده ایجاد شده مطالعات به منظور بهسازی خاک زیر و اطراف پی‌ها صورت پذیرفت. اقدامات لازم به منظور جلوگیری از فرآیند جابه‌جایی‌های پیش‌رونده شامل دو مرحله اقدامات اولیه و طرح تثبیت نهایی می‌گردید. در اقدامات اولیه ساخت یک دیوار حائل بتنی در محدوده گودبرداری و پر کردن فضای گودبرداری شده



شکل ۴. انجام عملیات بهسازی خاک به روش ریزشمع، الف) حفاری و نصب ریزشمع، ب) مغزه گیری از پی

Fig. 4. Performance of soil improvement operation by micropile method, a) drilling and installation of micropile, b) core extraction from the foundation



شکل ۵. جزئیات اجرایی مربوط به ریزشمع تزریقی به همراه جزئیات نحوه اتصال ریزشمع به پی منفرد

Fig. 5. Executive details related to the injected micropile along with the details of how to connect the micropile to the single foundation

حجم دهنده در داخل پی انجام گیرد.

پس از تکمیل عملیات بهسازی خاک عملیات نقشه برداری و پایش از پی سازه بتنی انجام پذیرفت. نتایج این پایش‌ها دلالت بر کیفیت مناسب و موثر عملیات ریزشمع‌های تزریقی در زیر سازه‌ها جهت جلوگیری از ادامه جابه‌جایی‌ها و نشست‌ها داشت.

ریزشمع را نشان می‌دهد.

در شکل ۵، جزئیات اجرایی مربوط به ریزشمع تزریقی به همراه جزئیات نحوه اتصال ریزشمع به پی منفرد ارائه گردیده است. جهت انتقال بار روسازه به پی، ضروری است نحوه اتصال ریزشمع به پی منفرد با استفاده از صفحات فلزی انتهایی که در داخل پی کار گذاشته می‌شوند و تزریق با گروت افزایش

جدول ۳. مشخصات مدل‌های مورد استفاده در مدل‌سازی عددی

Table 3. Specifications of models used in numerical modeling

نوع متغیر مورد بررسی	شماره مدل	نوع سقف	تعداد ریزشمع	طول ریزشمع (m)	قطر ریزشمع (m)	چینش ریزشمع
-	۱	سقف معمولی	بدون ریزشمع	-	-	-
-	۲	سقف معمولی	با ریزشمع‌های موجود	۸	۰/۰۳۲	طبق شکل ۲
طول ریزشمع	۳	سقف معمولی	با ریزشمع‌های موجود	۶	۰/۰۳۲	طبق شکل ۲
	۴	سقف معمولی	با ریزشمع‌های موجود	۱۲	۰/۰۳۲	طبق شکل ۲
قطر ریزشمع	۵	سقف معمولی	با ریزشمع‌های موجود	۸	۰/۰۳۸	طبق شکل ۲
	۶	سقف معمولی	با ریزشمع‌های موجود	۸	۰/۰۵۱	طبق شکل ۲
تعداد ریزشمع	۷	سقف معمولی	اضافه کردن ریزشمع ستون‌های محورهای C	۸	۰/۰۳۲	اضافه کردن ریزشمع به ستون‌های محور C
	۸	سقف معمولی	اضافه کردن ریزشمع به ستون‌های محورهای B و C	۸	۰/۰۳۲	اضافه کردن ریزشمع به ستون‌های محورهای B و C
تأثیر وزن سازه	۹	سقف سبک	بدون ریزشمع	-	-	-
سازه سبک	۱۰	سقف سبک	با ریزشمع‌های موجود	۸	۰/۰۳۲	طبق شکل ۲

و غیراشباع می‌باشند.

ابعاد هندسی مدل شامل ۷ متر عمق گودبرداری می‌باشد. همچنین مطابق نقشه پلان در شکل ۲ که دارای عرض ۱۸ در ۳۰ متر می‌باشد، ابعاد هندسی مدل بزرگتر انتخاب شدند تا محدوده تنش- کرنش آن تأثیری در مدل‌سازی نداشته باشد. به منظور صحت‌سنجی ابتدا مدل‌سازی عددی انجام پذیرفت و نتایج نشست ارائه شده در ابتدای امر مطابق با جدول ۱ تطبیق داده شد. نشست‌ها و تغییر شکل‌ها برای پی ستون‌های ردیف E و F حاصل شدند و در تطابق کامل با نشست‌های اندازه‌گیری شده بودند.

۳- بحث و تحلیل نتایج

در این بخش از مقاله به بررسی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های عددی انجام گرفته در نرم‌افزار ABAQUS پرداخته شد.

۲-۴- شبیه‌سازی عددی، مشخصات مدل‌سازی و صحت‌سنجی

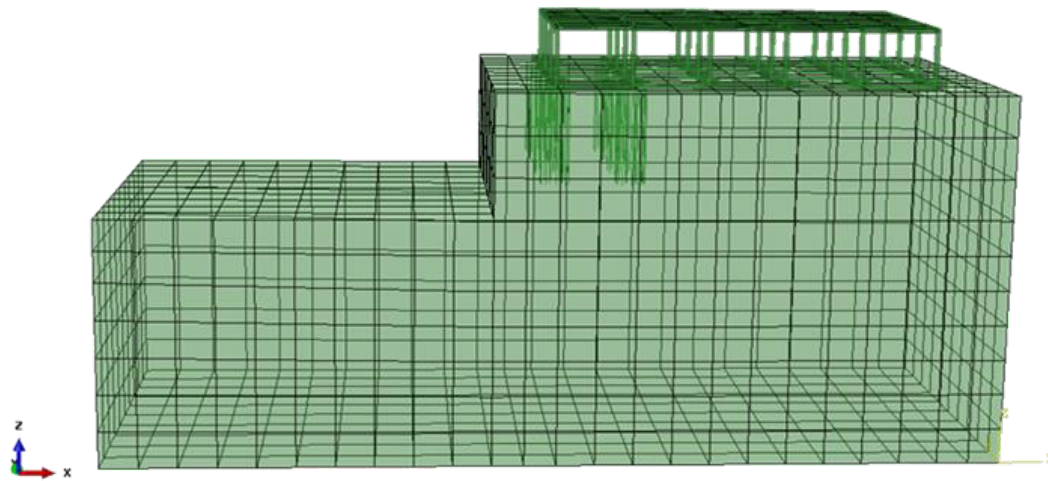
در این مطالعه به منظور انجام مقایسه و پی بردن به تأثیر ریزشمع از تعداد ۱۱ مدل استفاده شده است، که در این نوع مدل‌سازی‌ها پارامترهای قطر، طول و تعداد ریزشمع مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات مدل‌سازی‌های انجام گرفته در جدول ۳ درج گردیده است. همچنین در شکل ۶ تعدادی از این مدل‌ها همراه با توضیحات مربوطه به منظور آشنایی با مدل‌های مورد بررسی ارائه شده‌اند.

مدل‌سازی‌های انجام گرفته در نرم‌افزار ABAQUS نیازمند تعریف مشخصات مقاومتی خاک، ریزشمع و پی به جهت شبیه‌سازی گود و خاک بستر فونداسیون است، که این مشخصات در جدول ۴ نشان داده شده است. همچنین بر اساس مطالعات انجام شده، سطح آب زیرزمینی در هیچ یک از گمانه‌های حفاری شده مشاهده نگردید. لذا نمونه‌های برداشت شده خشک

جدول ۴. مشخصات فیزیکی خاک، ریزشمع و پی بتنی

Table 4. Physical characteristics of soil, micropile and concrete foundation

جنس مصالح	مدل	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته، مگاپاسکال	زاویه اصطکاک داخلی	C (kN/m ²)	γ (kN/m ³)
خاک	موهر-کولمب	۰/۳	۱۵	۲۶	۱۴	۱۶/۵
ریزشمع	الاستیک خطی	۰/۲	۶۰	-	-	۲۰
پی	الاستیک خطی	۰/۱۵	۱۰۰۰۰	-	-	۲۵



شکل ۶. نمونه‌ای از مدل مورد استفاده در مدل‌سازی عددی، مدل شماره ۵

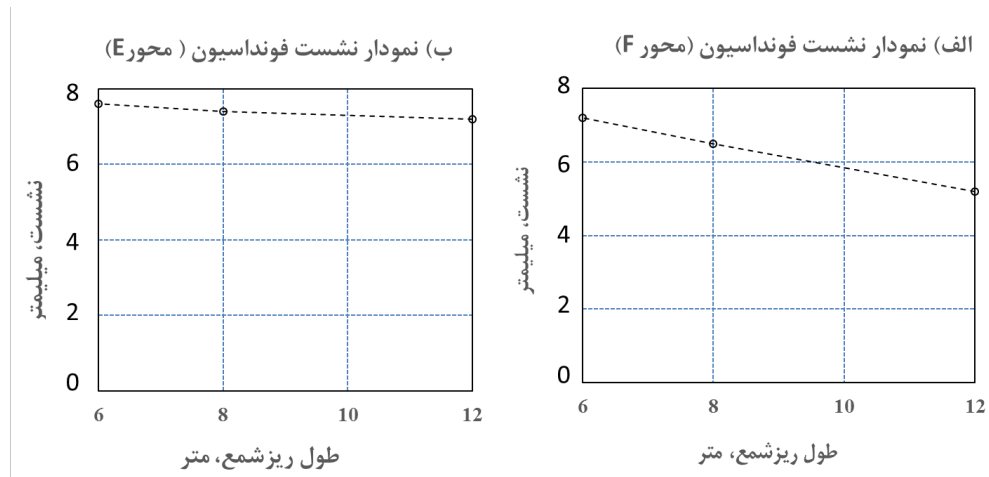
Fig. 6. An example of the model used in numerical modeling, model number 5

شماره‌ی ۴ دارای بیشترین طول ریزشمع یعنی ۱۲ متر هست. به منظور بررسی تأثیر طول ریزشمع‌ها بر نشست فونداسیون و سازه، میزان نشست سازه در قسمت جنوبی ساختمان یا محور F و محور E در شکل ۷ برای مدل‌های با طول ریزشمع‌های متفاوت نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، میزان اختلاف مربوط به نشست در طول‌های مختلف قابل دسترس است. نتایج حاصل از این تحلیل بیانگر آن است که میزان نشست با افزایش طول ریزشمع از ۸ متر به ۱۲ متر به میزان ۱۸ درصد در قسمت جلو و مجاور گودبرداری و به میزان ۰/۸ درصد در قسمت عقب نسبت به گودبرداری کاهش می‌یابد. همچنین میزان نشست با افزایش طول ریزشمع از ۶ متر به ۱۲ متر به میزان ۲۵ درصد

همان‌گونه که پیشتر عنوان گردید به جهت بررسی تأثیر ریزشمع‌ها در ظرفیت باربری پی، طول ریزشمع، قطر ریزشمع و تعداد ریزشمع‌ها به عنوان پارامترهای طراحی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند که در ذیل نتایج به دست آمده برای هر یک از این پارامترها ارائه شده است.

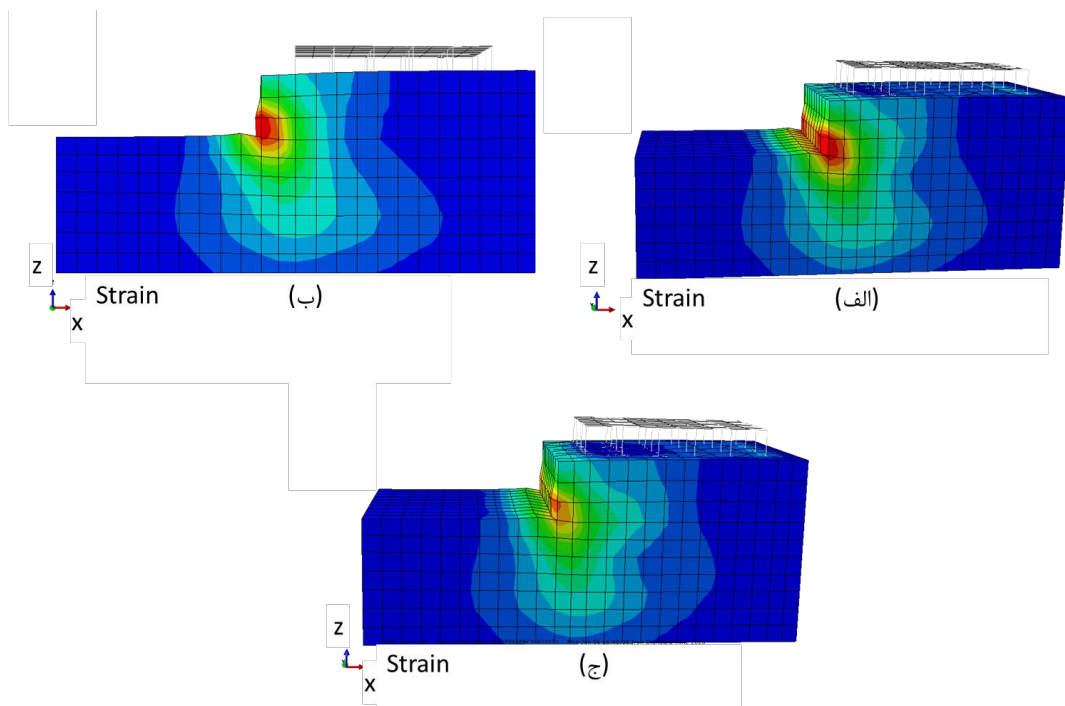
۳-۱- تأثیر طول ریزشمع

به منظور بررسی تأثیر طول ریزشمع بر اندرکنش خاک-سازه، همان‌گونه که در جدول ۳ نشان داده شده است، از سه نوع مدل با طول ریزشمع‌های متفاوت استفاده شده است. مدل شماره ۲ مدل شماره ۳ و مدل شماره ۴ دارای تمامی شرایط مشابه بوده، اما دارای طول ریزشمع متفاوت می‌باشند. طول ریزشمع در مدل شماره ۳ با مقدار طول ۶ متر کمترین بوده و مدل



شکل ۷. تغییرات نشست پی در طول‌های متفاوت ریزشمع، الف) مجاور گودبرداری محور F، ب) محور E

Fig. 7. Changes of foundation settlement in different lengths of the micropile, a) adjacent to excavation of axis F, b) axis E

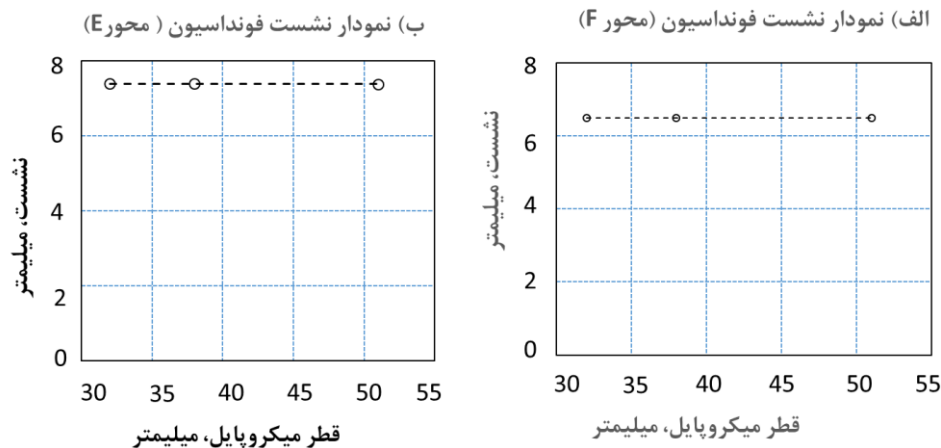


شکل ۸. کانتورهای کرنش در تحلیل تأثیر طول ریزشمع، الف) طول ریزشمع ۸ متر، ب) طول ریزشمع ۶ متر، ج) طول ریزشمع ۱۲ متر

Fig. 8. Strain contours in the analysis of the influence of the length of the micropile, a) length of the micropile 8 meters, b) length of the micropile 6 meters, c) length of the micropile 12 meters

متأثر از افزایش طول ریزشمع نخواهد بود. همچنین در شکل ۸ کانتورهای کرنش پلاستیک رخ داده در بستر سازه به ازای طول‌های متفاوت ریزشمع نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تأثیر طول ریزشمع‌ها منجر به کاهش کرنش پلاستیک در بستر خاک و پی می‌گردد. زیرا با

در قسمت جلو و مجاور گودبرداری و به میزان ۰/۹ درصد در قسمت عقب نسبت به گودبرداری کاهش می‌یابد. در حقیقت بر اساس نتایج نشان داده شده مشخص می‌شود که افزایش طول ریزشمع منجر به کنترل نشست در ناحیه تأثیر ریزشمع‌ها می‌شود و خارج از این ناحیه اندرکنش خاک-سازه



شکل ۹. تغییرات نشست فونداسیون در طول‌های متفاوت ریزشمع، الف) مجاور گودبرداری، ب) محور E

Fig. 9. Variations of foundation settlement in different micropile lengths, a) adjacent to excavation, b) E axis

سازه در قسمت روبه‌روی گودبرداری و قسمت عقب در شکل ۹ ریزشمع‌های با قطر متفاوت نشان داده شده است.

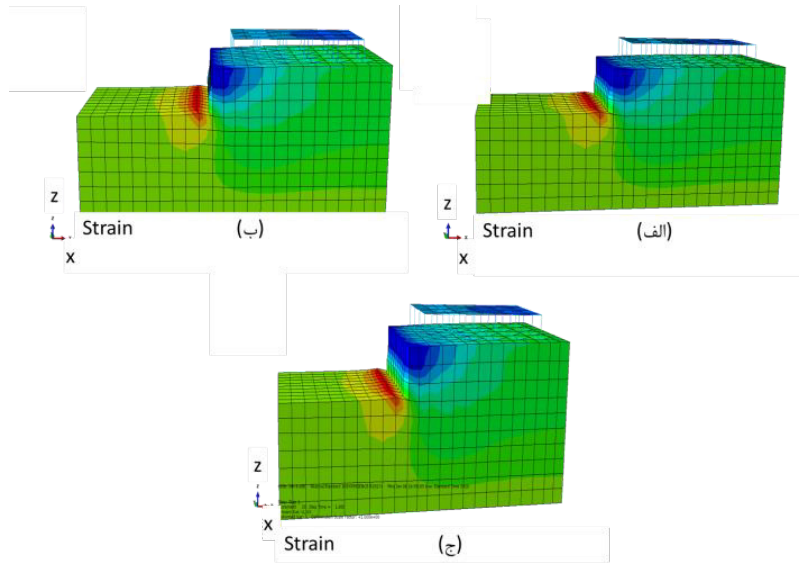
تأثیر قطر ریزشمع‌ها همانند آنچه در شکل ۹ و ۱۰ قابل مشاهده است، باعث کاهش قابل توجه نشست نمی‌گردد. به عبارت دیگر نتایج حاصل از این تحلیل بیانگر آن است که میزان نشست با افزایش قطر ریزشمع از ۰/۰۳۲ متر به ۰/۰۵۱ متر (افزایش ۶۰ درصدی قطر) تنها به میزان ۰/۱۸ درصد در قسمت جلو و مجاور گودبرداری و به میزان ۰/۱۶ درصد در قسمت عقب نسبت به گودبرداری کاهش می‌یابد. این امر در حقیقت نشان دهنده تأثیر کم پارامتر قطر نسبت به پارامتر طول ریزشمع در کنترل نشست سازه و بهسازی آن است. همچنین در شکل ۸ کانتورهای جابه‌جایی و تغییر مکان رخ داده در بستر سازه به ازای طول‌های متفاوت ریزشمع نشان داده شده است. به مانند آنچه پیشتر نشان داده شد تأثیر قطر ریزشمع، باعث کاهش قابل توجه میزان جابه‌جایی نمی‌گردد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که به منظور بهسازی سازه‌ها و کنترل تغییر مکان سازه‌ای آن‌ها در برابر بارهای وارده اعم از بارهای ناشی از بارگذاری و باربرداری استفاده از ریزشمع با قطرهای بزرگ‌تر چندان مؤثر نخواهد بود.

همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، در زیر پی ساختمان یک آبراه قدیمی وجود دارد که بیشترین عمق آن در قسمت ردیف‌های دوم پی ساختمان قرار گرفته است.

افزایش میزان طول ریزشمع، ظرفیت باربری فونداسیون افزایش یافته و در نتیجه میزان کرنش‌های پلاستیک محیط خاک و سازه به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش طول ریزشمع‌ها در بستر خاک، میزان کرنش‌های پلاستیک و به تبع آن تغییر مکان‌های سازه‌ای به میزان قابل توجهی کاهش خواهد یافت که این امر مشابه با برخی نتایج ارائه شده در پژوهش‌های پیشین هست [۱۸-۱۴]. به کارگیری ریزشمع‌ها در خاک‌های ریمبند عمده‌اثر اصطکاکی داشته و مقاومت نوک آن‌ها قابل توجه نمی‌باشد. تزریق تحکیمی در بیرون پی‌ها و سپس اجرای ریزشمع‌ها کمک می‌کند تا اجرای ریزشمع‌ها قابلیت اطمینان بیشتری داشته باشد [۲۳-۱۹]. عملیات تزریق و بهسازی خاک به طور موثری مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک اولیه را بهبود می‌بخشد [۲۵ و ۲۴].

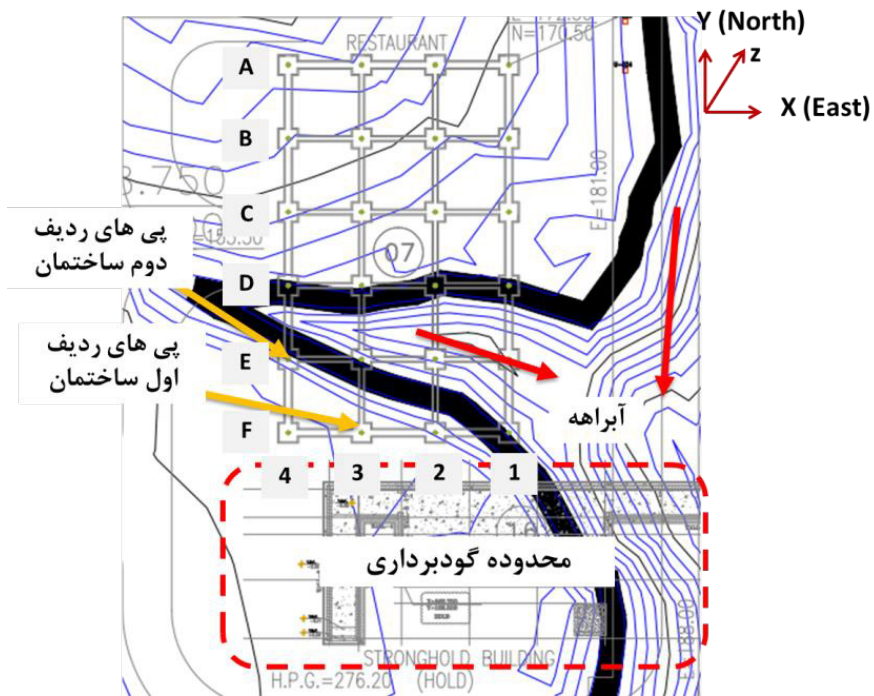
۳-۲- تأثیر قطر ریزشمع

به منظور بررسی تأثیر طول ریزشمع بر اندرکنش خاک-سازه، همان‌گونه که در جدول ۳ نشان داده شده است، از سه نوع مدل با قطر ریزشمع‌های متفاوت استفاده شده است. مدل شماره ۲، مدل شماره ۵ و مدل شماره ۶ دارای تمامی شرایط مشابه بوده، اما دارای قطر ریزشمع متفاوت می‌باشند. قطر ریزشمع در مدل شماره ۲ با مقدار ۰/۰۳۲ متر کمترین بوده و مدل شماره ۶ دارای بزرگ‌ترین قطر به میزان ۰/۰۵۱ متر هست. به منظور بررسی تأثیر قطر ریزشمع‌ها بر نشست فونداسیون و سازه، میزان نشست



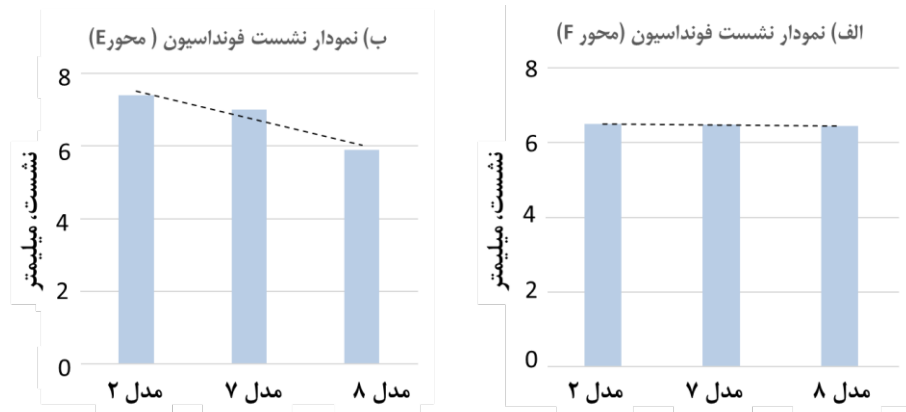
شکل ۱۰. کانتورهای کرنش در تحلیل تأثیر قطر ریزشمع، الف) مدل شماره ۲، ب) مدل شماره ۵، ج) مدل شماره

Fig. 10. Strain contours in the analysis of the influence of the diameter of the micropile, a) model number 2, b) model number 5, c) model number 6



شکل ۱۱. وضعیت آبراهه قدیمی در زیر ساختمان

Fig. 11. The condition of the old waterway under the building



شکل ۱۲. تغییرات نشست فونداسیون در تعداد متفاوت ریزشمع، الف) مجاور گودبرداری محور F، ب) محور E

Fig. 12. Foundation settlement changes in different number of micropile, a) adjacent to F axis excavation, b) E axis

جدول ۵. میزان نشست‌های پایش شده پس از عملیات بهسازی خاک

Table 5. The amount of settlements monitored after the soil improvement operation

ردیف	موقعیت	قرائت کد ارتفاعی و تاریخ				
		۱۳۹۸/۱۱/۱۷	۱۳۹۸/۱۱/۲۱	۱۳۹۸/۱۲/۱۰	۱۳۹۹/۰۲/۱۷	۱۳۹۹/۰۳/۱۹
۱	جنوب شرقی ساختمان	۲۷۷/۷۷۵	۲۷۷/۷۷۶	۲۷۷/۷۷۵	۲۷۷/۷۷۳	۲۷۷/۷۷۳
۲	شمال شرقی ساختمان	۲۷۷/۸۹۶	۲۷۷/۸۹۷	۲۷۷/۸۹۷	۲۷۷/۸۹۵	۲۷۷/۸۹۵

چهار عدد بر روی هر پی انجام شده است. تعداد کل ریزشمع‌های تسلیحی در شکل شماره ۳ در محورهای F و E و D برابر ۲۴ عدد می‌باشند. در همین شکل ستون‌های تزریقی در بیرون پی منفرد و به طول ۵ متر و تعداد ۳۴ عدد برای ردیف E و D به کار رفته است. تعداد این ستون‌های تزریقی برای محور F برابر ۳۸ عدد می‌باشد. نتایج حاصل از این تحلیل بیانگر آن است که با افزایش تعداد ریزشمع به محورهای B و C میزان نشست به میزان ۰/۸ درصد در قسمت جلو و به میزان ۲۲ درصد در قسمت عقب کاهش می‌یابد. پس از انجام بهسازی خاک به روش ریزشمع جابه‌جایی‌ها توسط پایش نقشه‌برداری اندازه‌گیری شدند. در جدول ۵ میزان این تغییر شکل‌ها نشان داده شده‌اند.

۳-۳- تاثیر تعداد ریزشمع
به منظور بررسی تاثیر تعداد ریزشمع‌ها بر اندرکنش خاک-سازه، همان‌گونه که در جدول ۳ نشان داده شده است، از سه نوع مدل با قطر ریزشمع‌های متفاوت استفاده شده است. مدل شماره ۲، مدل شماره ۷ و مدل شماره ۸، اما دارای تعداد ریزشمع‌های متفاوت می‌باشند. به عبارت دیگر می‌توان بدین شکل عنوان نمود که در مدل شماره ۸ بیشترین تعداد ریزشمع و در مدل شماره ۲ کمترین تعداد ریزشمع موجود است. به منظور بررسی تاثیر تعداد ریزشمع‌ها بر نشست فونداسیون و سازه، میزان نشست سازه در قسمت روبه‌روی گودبرداری و قسمت عقب در شکل ۱۲ به ازای تعداد ریزشمع متفاوت نشان داده شده است. ریزشمع‌های مسلح با استفاده از مغزه‌گیری بتن پی منفرد و به تعداد

است. زیرا با افزایش طول ریزشمع میزان نشست قابلیت کاهش تا ۱۸ درصد را دارد اما در اثر افزایش قطر صرفاً ۰/۱۸ درصد نشست کاهش می‌یابد. طرح بهینه نهایی شامل استفاده از روش ریزشمع به قطر ۳۲ میلی‌متر و طول ۸ متر می‌باشد. پس از اتمام عملیات بهسازی و در طول زمان جابه‌جایی‌ها پایش گردیدند و نشست اضافه‌ای در پی مشاهده نگردید.

منابع

- [1] Budhu, M., Soil Mechanics and Foundations. 3rd edn, USA: John Wiley&Sons, (2011) 761.
- [2] Byford, B., Hampton, M., Micropiles for re-support and lifting of two building under construction. International Foundations Congress and Equipment Expo. Orlando, Florida, United States, (2009) 383-389.
- [3] Tumasio, R., Pinto, A., Pernaio, J., Rehabilitation and Reinforcement of the Marina Expo Breakwaters, Lisbon, Portugal. Procedia Engineering, 143, (2016) 1511-1518.
- [4] Duarte Correia, J, N., Reinforcement of building foundations. International Journal of Engineering & Applied Sciences, , 5, (2015) 1-8.
- [5] Maldonado, N, G., Martin, P, E., Maldonado, I, A., Structural Rehabilitation studies of Masonry Building Heritage Under Near Fault Earthquake: A case study. The 15th World Conference on Earthquake Engineering, (2012).
- [6] ternik, K., Blejarski, T., Application of micropiles to the stabilization of a deflected old tenement house. The 12th International Workshop on Micropiles. Krakow, Poland, (2014).
- [7] Hemeda, S., Pali radice, Root pile, micropile) technology for preservation of historical monuments in Cairo Egypt . Mistral service sas via U. Bonino, (2015).
- [8] Sun, Z., Kong, L., & Wang, Y. Seismic behaviour of a micropile-reinforced cut slope behind a cantilever retaining wall. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 152, (2022) 107058.
- [9] Pandit, K., Singh, M., & Sahoo, J. P., Stability Analysis of a Debris Slope by Micropile Reinforcement Technique: A Case Study from the North-Western Himalayas. In A

اعداد قرائت شده در جدول ۵ نشان می‌دهند که عملیات بهسازی خاک با روش ریزشمع به طور موثر میزان نشست‌ها را کنترل نموده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تأثیر ریزشمع‌ها در میزان تنش- کرنش، نشست و تغییر مکان بستر در یک سازه بتنی در مجاورت گود پرداخته شد. سازه بتنی دارای پی‌های منفرد بود که در کنار آن گودبرداری به عمق ۷ متر انجام پذیرفت. با شروع گودبرداری، پی‌های سازه شروع به نشست کردند که توسط عملیات پایش میزان نشست و تغییر مکان آن‌ها اندازه‌گیری شد. سپس در ترکیب روش تزریق تحکیمی، تزریق تماسی و استفاده از ریزشمع‌ها، بهسازی خاک انجام پذیرفت. در مطالعات طول ریزشمع‌ها ۶، ۸ و ۱۲ متر به صورت پیش فرض انتخاب شدند. مشخصات خاک از لحاظ عدد نفوذ استاندارد از عمق ۷ متر به بعد به صورت قابل توجهی افزایش می‌یافت. به همین دلیل و در نظر گرفتن مسائل اقتصادی از ریزشمع‌های ۸ متری به عنوان طول بهینه در اجرا استفاده گردید. از آنجا که به فاصله ۰/۵ متر زیر پی‌ها قلوه سنگ ریخته شده بود با استفاده از تزریق تماسی بین این قلوه سنگ‌ها دوغاب ریزی انجام شد تا بین آن‌ها سمنتاسیون ایجاد گردد. همچنین در اطراف پی‌های منفرد و از بیرون پی، تزریق تحکیمی با قطر ۱۳۰ میلی‌متر انجام پذیرفت. نتایج تحلیل با نرم‌افزار ABAQUS و نیز پایش پس از اجرای عملیات بهسازی به صورت زیر می‌باشند:

- میزان نشست با افزایش طول ریزشمع‌ها از ۸ متر به ۱۲ متر به میزان ۱۸ درصد در قسمت جلو سازه و به میزان ۰/۸ درصد در قسمت عقب سازه کاهش می‌یابد.

- میزان نشست با افزایش طول ریزشمع از ۶ متر به ۱۲ متر به میزان ۲۵ درصد در قسمت جلو و مجاور گودبرداری و به میزان ۰/۹ درصد در قسمت عقب نسبت به گودبرداری کاهش می‌یابد.

- نتایج حاصل از تحلیل با قطرهای مختلف ریزشمع بیانگر آن است که میزان نشست با افزایش قطر ریزشمع از ۰/۳۲ متر به ۰/۵۱ متر به میزان ۰/۱۸ درصد در قسمت جلو سازه و به میزان ۰/۱۶ درصد در محورهای عقب سازه کاهش می‌یابد.

- با افزایش تعداد ریزشمع به محورهای B و C میزان نشست به میزان ۰/۸ درصد در قسمت جلو و به میزان ۲۲ درصد در قسمت محورهای عقب کاهش می‌یابد.

- تأثیر طول ریزشمع در میزان کاهش نشست بیشتر از تأثیر قطر آن

- [18] Lee, Seokhyung, Jin-Tae Han, Hyun-Sik Jin, and Seok-Jung Kim, 3-D Numerical Analysis for the Verification of Bearing Mechanism and Bearing Capacity Enhancement Effect on the Base Expansion Micropile, *Journal of the Korean Geotechnical Society* 37, (2021) no. 2: 19-31.
- [19] Qian1a, Z. Z., Lu, X. L., Yang2b, W. Z., & Cui, Q. Behaviour of micropiles in collapsible loess under tension or compression load, (2014).
- [20] Xing, H., & Liu, L. Field tests on influencing factors of negative skin friction for pile foundations in collapsible loess regions. *International Journal of Civil Engineering*, 16(10), (2018) 1413-1422.
- [21] Momeni, M., Yazdani, H., Fakharian, K., Shafiee, A., Salajegheh, J., & Salajegheh, E. Case study of a micropiled raft foundation design in soft calcareous sandy soil in Kerman, Iran. In *Geotechnical and Geophysical Site Characterization: Proceedings of the 4th International Conference on Site Characterization ISC-4* (Vol. 1, pp. 1063-1068). Taylor & Francis Books Ltd, (2013).
- [22] Ashour, M., & Abbas, A. Axially loaded piles in inundated collapsible soils under compression and tension forces. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 48(2), (2021) 144-158.
- [23] Butenko, A. A., Mozgovyi, A. O., Butnik, S. V., & Spirande, K. V. Increasing of strength-rigidity parameters of bases of metallic silos. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1049, No. 1, p. 012049). IOP Publishing, (2022, June).
- [24] Alipour, R., Heshmati R, A. A., Karimiazar, J., Esazadefar, N., Asghari-Kaljahi, E., & Bahmani, S. H. Resistance and swelling of Tabriz marl soils stabilised using nano-silica and nano-alumina. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, (2022) 1-14.
- [25] Alipour, R., Khazaei, J., Pakbaz, M. S., & Ghalandarzadeh, A. Settlement control by deep and mass soil mixing in clayey soil. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 170(1), (2017) 27-37.
- System Engineering Approach to Disaster Resilience (pp. 459-468). Springer, Singapore, (2022).
- [10] Pei, Z. W., Zhang, Y. J., Nian, T., Song, X. L., & Zhao, W., Performance investigation of micropile groups in stabilizing unstable talus slopes via centrifuge model tests. *Canadian Geotechnical Journal*, (ja), (2022).
- [11] Kavanda, A., Haerib, S. M., Raisianzadeha, J., & Afzalsoltanib, S., Effectiveness of a vertical micropile system in mitigating the liquefaction-induced lateral spreading effects on pile foundations: 1 g large-scale shake table tests, (2022).
- [12] Mohamadi Esfahani, E., & Naderi, R., The effect of farfield and nearfield earthquakes on the seismic behavior of micropile group in loose and dense granular soils. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(4), (2022) 12-12.
- [13] Cheng, L., & Chen, G., Experimental Investigation on Dynamic Performance of Micro-Pile with Predrilled Oversize Hole on Shaking Table Test. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2148, No. 1, p. 012057). IOP Publishing, (2022).
- [14] Kumar, Jain Sanjaya, Mohammed Saleh Nusari, Dangol Purushotam, Acharya Indra Prasad, and Shrestha Rajyaswori, Effectiveness of geocell wall, geogrid and micropile anchors for mitigation of unstable slopes, *Geoenvironmental Disasters* 8, (2021) no. 1: 1-15.
- [15] Malik, Bilal Ahmad, Mohammad Yousuf Shah, and Vishwas A. Sawant, Influence of micropile parameters on bearing capacity of footings, *Environmental Science and Pollution Research* : (2021) 1-10.
- [16] Ying, Chunye, Xinli Hu, Sumi Siddiqua, Gehad Mohamed Hossam Makeen, Peng Xia, Chu Xu, and Qiang Wang. Model tests for observing the deformation characteristics of micropile boreholes during drilling in a soil-limestone mixture, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, (2021) 1-21.
- [17] Liu, Xueling, Jinkai Yan, Lei Liu, and Bing Han, Large-Scale Model Test of a Micropile Group for Landslide Control. *Advances in Civil Engineering* (2021).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Alipour, H. Aminpour, A. Dehghanzadeh, Investigating the effect of soil improvement by micropile method in marl soil: a case study of Bidboland, Khuzestan, Amirkabir J. Civil Eng., 54(12) (2023) 4573-4588.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20705.7506



