بررسی تأثیر عوامل مختلف بر ظرفیت باربری پی‌های مجاور هم

مریم حق‌بین؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر، گروه عمران

تاریخ: دریافت ۹۱/۸/۲۰ **پذیرش** ۹۲/۶/۱۶

چکیده

انتخاب ظرفیت باربری خاک مسئلهٔ مهمی است که در شرایط مختلف باید بررسی شود. در این مقاله، روش تحلیلی برای ارزیابی ظرفیت باربری نهایی پی‌های اجرا شده در مجاورت یک‌دیگر در فواصل مختلف پی‌ها از هم ارائه شده است. ظرفیت باربری پی‌های نزدیک هم بر اساس روش دیوار حائل مجازی و معادل قرار دادن نیروهای فعال و مقاوم وارد بر دیوار به‌دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت باربری نهایی هر پی در نتیجه تداخل سطوح گسیختگی ایجاد شده زیر پی‌ها که به فاصلهٔ آن‌ها بستگی دارد، تغییر می‌کند. در تحقیق حاضر، تأثیر نوع خاک، عمق پی‌های اجرا شده در مجاورت هم و خاک مسلح شده بر ظرفیت باربری پی‌های مجاور هم بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت باربری پی‌های اجرا شده در مجاورت هم نسبت به پی‌های منفرد با توجه به شرایط، افزایش یا کاهش می‌یابد. هم‌چنین خاک مسلح شده، ظرفیت باربری پی‌های اجرا شده در مجاورت هم را نسبت به پی‌های منفرد واقع شده روی خاک‌های غیرمسلح افزایش می‌دهد و میزان افزایش به فاصلهٔ پی‌ها از هم بستگی دارد. در پایان، نتایج به‌دست آمده با نتایج تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی که محققان دیگر ارائه کرده‌اند مقایسه شده و نتایج قابل قبولی به‌دست می‌آید.

واژه‌های کلیدی: روش تحلیلی، عمق پی‌های مجاور هم، فاصلهٔ پی‌ها، خاک مسلح، تداخل سطوح گسیختگی

* نویسنده مسئول m.haghbeen@gmail.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.3.1]

مقدمه

در نهایت زمین همهٔ سازه‌های اجرا شده را در مجاورت یک‌دیگر نگه می‌دارد. و بارهای سازه از طریق پی‌ها به زمین منتقل می‌شوند. بنا بر این مهندس پی بر دو مطلب متمرکز می‌شود که عبارت است از ارزیابی توانایی زمین برای انتقال بارها و طراحی دقیق پی برای انتقال بارهای سازه به زمین، ظرفیت باربری پی از روش‌های مختلف تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی تعیین می‌شود. ویژگی‌های خاک، موقعیت سطح آب زیرزمینی، نوع پی و موقعیت پی عواملی هستند که بر ظرفیت باربری پی تأثیر می‌گذارند. در شرایطی که پی‌ها در نزدیکی هم اجرا شوند، تداخل حباب فشار و سطوح گسیختگی خاک واقع زیر پی‌های اجرا شده در مجاورت هم بر ظرفیت باربری و نشست پی‌ها تأثیر می‌گذارد.

برخی تحقیقات نشان دادند که در اثر نزدیکی پی ساختمان‌ها به هم‌دیگر با شرایط خاک یک‌سان، ظرفیت باربری نهایی هر پی در اثر تداخل سطوح گسیختگی ممکن است کاهش پیدا کند. استوارت در سال ۱۹٦۲ در نتایجی که ارائه کرد نشان داد که ظرفیت باربری پی‌های نزدیک هم با کم شدن فاصلهٔ آن‌ها تا ۱/۵ برابر عرض پی افزایش می‌یابد [۱]. هندسهٔ سطح گسیختگی فرض شده به‌وسیلهٔ استوارت مشابه سطح گسیختگی فرض شده توسط ترزاقی است. به‌همین ترتیب ماندل در سال ۱۹٦۳ از روش تحلیلی نتایجی مشابه استوارت به‌دست آورد [۲]. ساران و همکاران در سال ۱۹۷٤ آزمایش‌هایی برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های نزدیک هم واقع شده بر خاک ماسه‌ای انجام دادند و نتیجه گرفتند که با افزایش فاصلهٔ پی‌ها تا ٤/۵ برابر عرض پی، ظرفیت باربری پی‌های نزدیک هم کاهش می‌یابد و به ظرفیت باربری پی‌های منفرد نزدیک می‌شود[۳]. داس و همکاران در سال ۱۹۸۳ مدل‌های آزمایشگاهی برای تعیین تأثیر تداخل سطوح گسیختگی زیر پی‌های واقع بر خاک‌های ماسه‌ای ارائه دادند و نتایج با نمودارهای کاربردی ارائه شدند [٤]. نتایج نشان می‌دهد که با وجود این‌که روند تغییرات ضرایب آزمایشگاهی و تحلیلی مشابه‌اند، مقادیر ضرایب آزمایشگاهی و تئوری تفاوت زیادی با هم دارند. قضاوی و همکاران در سال ۲۰۱۲ روش آزمایشگاهی برای ارزیابی ظرفیت باربری نهایی و نشست دو نوع پی اجرا شده در مجاورت هم در خاک‌های مسلح و غیرمسلح ارائه دادند [۵]، [٦]. نتایج آن‌ها نشان داد که ظرفیت باربری نهایی پی‌های اجرا شده در مجاورت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.3.1]

هم نسبت به پی‌های منفرد ۲۵ تا ٤٠ درصد افزایش می‌یابد و نشست پی‌های اجرا شده در مجاورت هم ٦٠ تا ١٠٠ درصد افزایش می‌یابد. کومار و همکاران در سال ۲۰۱۰ از روش حد پایین آنالیز حدی و المان محدود برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های اجرا شده در مجاورت هم استفاده کردند [۷]–[۱۲]. طبق گزارش آن‌ها عامل مؤثر ξ_γ که در نتیجهٔ مؤلفهٔ وزن مخصوص خاک به‌دست می‌آید و با توجه به رابطهٔ کلی ظرفیت باربری پی، $q_u = cN_c + \gamma DN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma$، نسبت N_γ در شرایط پی‌های مجاور هم به N_γ در شرایط پی‌های منفرد است، با کاهش فاصلهٔ پی‌ها از هم افزایش می‌یابد. محققان دیگر نیز تحقیقات چشم‌گیری بر تأثیر تداخل پی‌های مجاور هم بر ظرفیت باربری انجام دادند [۱۳]– [۱۹]. در عمل اکثر پی‌ها به‌صورت انفرادی رفتار نمی‌کنند و پی‌های مجاور بر ظرفیت باربری و نشست پی‌ها تأثیر می‌گذارند. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ظرفیت باربری پی‌های نزدیک هم عبارت است از فاصلهٔ مرکز به مرکز پی‌ها، نوع خاک، عمق پی‌های نزدیک هم که در این مقاله بررسی می‌شود.

در تحقیق حاضر، روش تحلیلی برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های اجرا شده در مجاورت هم در فواصل مختلف پی‌ها ارائه شده است. ظرفیت باربری پی‌های نزدیک هم بر اساس روش دیوار حائل مجازی و معادل قرار دادن نیروهای فعال و مقاوم وارد بر دیوار به‌دست آمده است. در این تحقیق تأثیر نوع خاک (چسبنده و غیرچسبنده)، عمق پی‌های اجرا شده در مجاورت هم، مسلح کردن خاک و هم‌چنین فاصلهٔ پی‌ها بر ظرفیت باربری پی‌های اجرا شده در مجاورت هم بررسی می‌شود. در پایان نتایج به‌دست آمده با نتایج تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی ارائه شده در گذشته مقایسه می‌شود. در واقع در مقالهٔ حاضر به این سوال پاسخ داده می‌شود، که ظرفیت باربری پی‌های اجرا شده در مجاورت هم نسبت به پی‌های منفرد در شرایط مختلف چگونه تغییر می‌کند؟

روش تحقیق

در روش تحلیلی ارائه شده در تحقیق حاضر، برای تعیین ظرفیت باربری پی منفرد، چنان‌که در شکل ۱ دیده می‌شود، یک دیوار حائل مجازی از لبهٔ پی مورد نظر می‌گذرد. این دیوار نیروی فعال P_a را در نتیجهٔ بارگذاری پی و خاک زیر پی تحمل می‌کند. هم‌چنین خاک

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.3.1]

اطراف دیوار در شرایط مقاوم قرار گرفته و نیروی P_p را به دیوار وارد می‌کند. نیروهای فعال و مقاوم با روش فشار جانبی کولمب تعیین می‌شود. هم‌چنین رفتار خاک بر اساس معیار موهر- کولمب در نظر گرفته شده است. در این روش برای تعیین ظرفیت باربری، نیروهای فعال و مقاوم با هم برابر قرار داده می‌شوند. با توجه به‌روش دیوار حائل مجازی ظرفیت باربری پی منفرد مطابق با این رابطه محاسبه می‌شود:

$$q_i = \frac{۱}{K_a H}(۰/۵\gamma H^۲(K_p(۱-k_v)-K_a(۱-k_v))+(K_p(۱-k_v)H)\gamma D+ c(K_{pc}H+K_{ac}H)+l_{activerein}(c+\gamma H\tan(\frac{۲}{۳}\phi))+l_{passiverein}(c+\gamma H\tan(\frac{۲}{۳}\phi))) \quad (۱)$$

که q_u: ظرفیت باربری پی و H ارتفاع دیوار حائل مجازی و B عرض پی مورد نظر و مطابق شکل ۱ ارتفاع دیوار حائل مجازی معادل $B\tan(\eta_{ae})$ است و K_a, K_p: ضریب مقاوم و رانش (روش کولمب) و $l_{activerein}$: طول مسلح کننده در منطقهٔ فعال خاک و $l_{passiverein}$: طول مسلح کننده در منطقهٔ مقاوم خاک و D: عمق پی مورد نظر و k_v: ضریب لرزه‌ای عمودی و K_{pc}, K_{ac}: ضریب مقاوم و رانش چسبندگی خاک (روش کولمب) و ϕ: زاویهٔ اصطکاک خاک و c: چسبندگی خاک و γ: وزن مخصوص خاک و η_{ae}: زاویهٔ منطقه رانش با جهت افقی (روش کولمب، شکل ۱) و η_{pe}: زاویهٔ منطقهٔ مقاوم با جهت افقی (روش کولمب، شکل ۱). لازم به ذکر است که با توجه به رابطهٔ کولمب مقدار دو زاویه η_{pe} و η_{ae} به زاویهٔ اصطکاک خاک بستگی دارند.

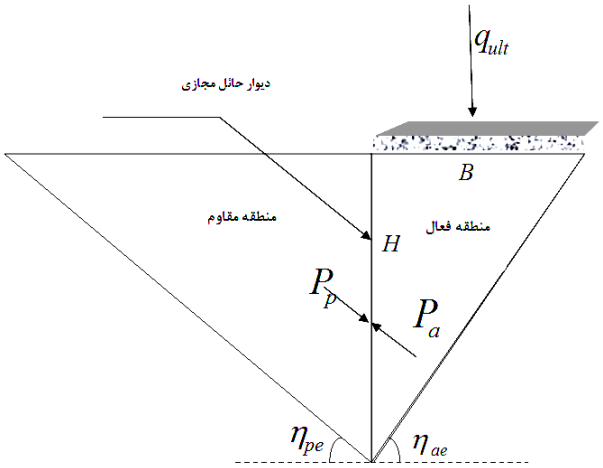
رابطهٔ ۱ را بدین‌صورت نیز می‌توان نوشت:

$$q_i = cN_c + \gamma DN_q + ۰/۵\gamma BN_\gamma + (l_{passiverein} + l_{activerien})(c+\gamma H tan(\frac{۲}{۳}\phi)) / K_a H \quad (۲)$$

که $N_\gamma = \frac{\tan(\eta_{ae})}{K_a}(۱-k_v)(K_p - K_a)$ و $N_q = \frac{K_p(۱-k_v)}{K_a}$ و $N_c = \frac{K_{pc}+K_{ac}}{K_a}$.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.3.1]



شکل ۱. مدل تعیین ظرفیت باربری پی از روش دیوار حائل مجازی

ذکر این نکته لازم است که در اثر تداخل سطوح گسیختگی ناحیهٔ مقاوم و فعال ایجاد شده زیر پی‌های مجاور هم، نیروهای فعال و مقاوم مربوط به هر پی نسبت به شرایط پی‌های منفرد، با کسر نواحی تداخل با سطوح گسیختگی پی‌های مجاور، با توجه به فاصله پی‌ها از هم تعیین می‌شوند (شکل ۲). نیروهای فعال و مقاوم به فاصله و عمق و عرض پی‌های نزدیک هم، نوع خاک و ضریب لرزه‌ای بستگی دارد. هم‌چنین وقتی که خاک مسلح شود، با توجه به طول مسلح‌کننده در منطقه مقاوم و فعال و مقاومت خاک، نیروی رانش کاهش و نیروی مقاوم افزایش پیدا می‌کند. چنان‌که در شکل ۲ دیده می‌شود، با توجه به این‌که سطح گسیختگی پی مجاور از ناحیهٔ فعال پی مورد نظر عبور کند یا نه، دو حالت برای محاسبهٔ ظرفیت باربری وجود دارد.

در این قسمت تأثیر وزن خاک، سربار ناشی از عمق پی، چسبندگی خاک و مسلح کننده خاک برنیروی فعال و مقاوم وارد بر دیوار حائل مجازی و در نتیجه ظرفیت باربری پی‌های نزدیک هم بررسی می‌شود:

۱. تأثیر وزن خاک بر نیروی فعال و مقاوم وارد بر دیوار حائل مجازی

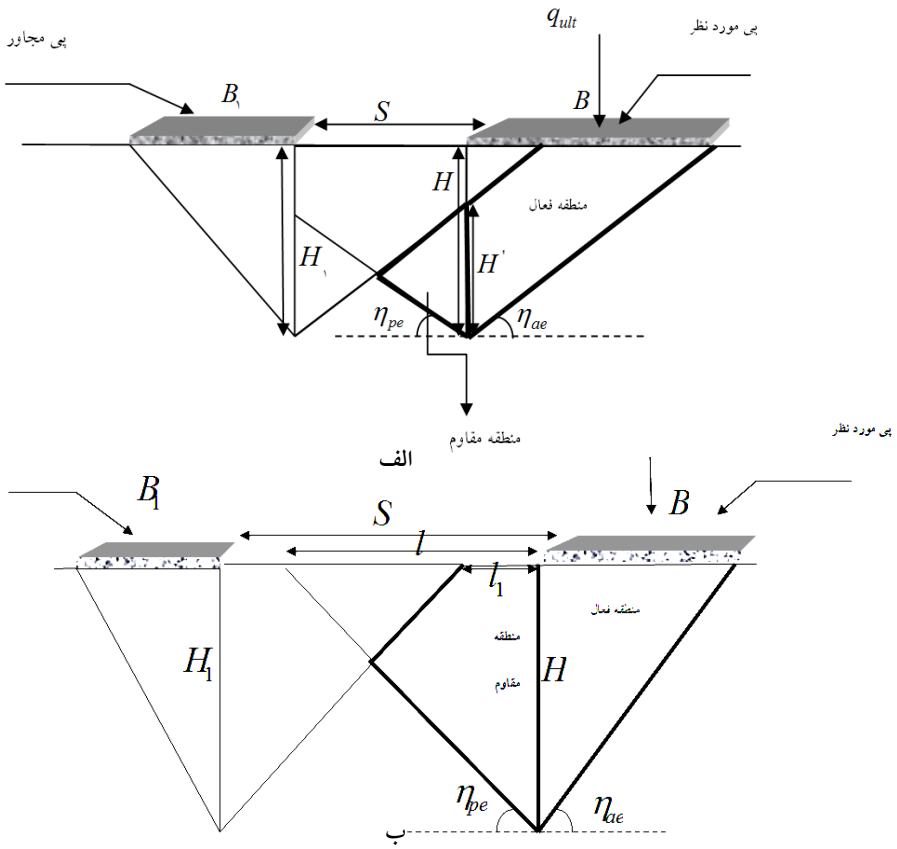
در شرایطی که پی منفرد بررسی می‌شود، برای محاسبهٔ نیروی فعال ناشی از وزن خاک تعادل ناحیهٔ فعال با استفاده از قانون سینوس‌ها (مثلث حاصل از ۳ نیرو) مطابق این روابط تعیین می‌شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.3.1]

$$\frac{W}{\sin(۹۰+\delta-\beta+\varphi)}=\frac{p_a}{\sin(\beta-\varphi)} \quad (۳)$$

$$p_a = g_{af}W \quad (٤)$$



شکل ۲. تداخل سطوح گسیختگی خاک زیر پی‌های مجاور هم، الف) سطح گسیختگی پی مجاور از ناحیهٔ فعال پی مورد نظر عبور می‌کند ب) سطح گسیختگی پی مجاور از ناحیه فعال پی مورد نظر عبور نمی‌کند)

که δ: اصطکاک بین دیوار حائل و خاک که ضریبی از زاویهٔ اصطکاک خاک است و β: زاویهٔ گوه گسیختگی با جهت افقی (شکل ۳) و W: وزن خاک در گوه گسیختگی فعال و $g_{af}=\frac{\sin(\beta-\varphi)}{\sin(۹۰+\delta-\beta+\varphi)}$ و p_a: نیروی فعال وارد بر دیوار حائل است.

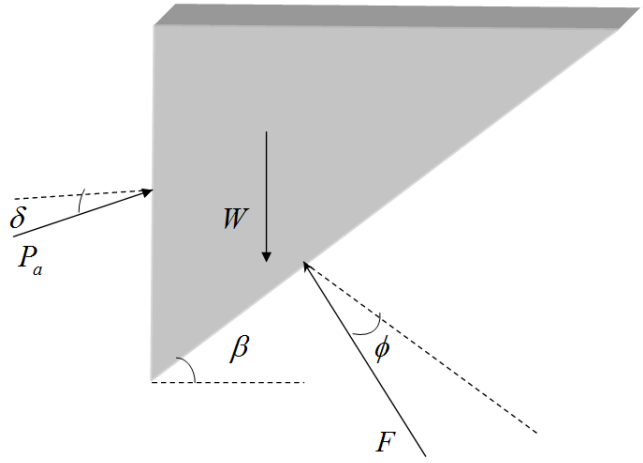
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.3.1]

از این رو با بررسی تعادل گوه گسیختگی مقاوم پی منفرد و استفاده از قانون سینوس‌ها (مثلث نیروها) نیروی مقاوم ناشی از وزن خاک بدین‌صورت تعیین می‌شود.

$$p_p = g_{pf} W_p \qquad (۵)$$

که W_p: وزن خاک در گوه گسیختگی مقاوم و $g_{pf} = \frac{\sin(\beta+\varphi)}{\sin(90+\delta-\beta+\varphi)}$ و p_p: نیروی مقاوم وارد بر دیوار حائل است.



شکل ۳. تعادل ناحیهٔ فعال ایجاد شده پشت دیوار حائل

در بررسی تعادل گوه گسیختگی در شرایط پی‌های مجاور یک‌دیگر برای تعیین نیروی فعال و مقاوم ناشی از وزن خاک از قانون سینوس‌ها (مثلث نیروها) استفاده شده است. با در نظر گرفتن تداخل سطوح گسیختگی خاک زیر پی‌ها با استفاده از روش دیوار حائل مجازی، ناحیهٔ فعال و مقاوم ایجاد شده در زیر پی مورد نظر با توجه به فاصلهٔ پی‌های مجاور هم، مطابق شکل ۲، تغییر می‌کنند. به این ترتیب تعادل ناحیهٔ فعال و مقاوم به‌دست آمده در شکل ۲ بررسی شده و نیروی فعال و مقاوم وارد بر دیوار حائل مجازی ناشی از وزن خاک به‌دست می‌آید. بر حسب این‌که سطوح گسیختگی پی مجاور از ناحیهٔ فعال پی مورد نظر عبور کند یا نه، دو حالت پیش می‌آید که در شکل ۲ الف و ب نشان داده شده است و نیروی افقی فعال و مقاوم ناشی از وزن خاک وارد بر دیوار حائل مجازی در این دو حالت بدین‌صورت محاسبه می‌شوند:

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.3.1]

۱. در حالت اول شرایطی بررسی می‌شود که فاصلهٔ پی‌ها به اندازه‌ای باشد که ناحیهٔ مقاوم پی مجاور از ناحیهٔ فعال پی مورد نظر عبور کند، $S < \frac{H}{\tan(\eta_{pe})}$، (شکل ۲ االف): در روابط زیر، تعادل ناحیهٔ فعال و مقاوم با استفاده از قانون سینوس‌ها مربوط به مثلث نیروها تعیین شده است. تنها وزن خاک در گوه گسیختگی در شرایط پی‌های مجاور یک‌دیگر با شرایط پی منفرد متفاوت است. با در نظر گرفتن تداخل سطوح گسیختگی پی مجاور با پی مورد نظر مطابق شکل ۲ االف، نیروی فعال و مقاوم ناشی از وزن خاک مطابق این روابط تعیین می‌شوند:

$$p_a = g_{af} W_۱ \quad (٦)$$

$$p_p = g_{pf} W_۲ \quad (۷)$$

که در روابط مذکور W_1, W_2 معادل وزن خاک در ناحیهٔ گسیختگی فعال و مقاوم، با کسر ناحیهٔ تداخل پی مورد نظر با پی مجاور، است. در روابط زیر W_1, W_2 محاسبه و در روابط (٦) و (۷) جای‌گزین شده‌اند:

$$p_p = g_{af}(۰/۵BH_۱\gamma - ۰/۵\gamma(\frac{H}{\tan(\eta_{pe})} - S)(H - S\tan((\eta_{pe})) \quad (۸)$$

$$p_p = g_{pf}(۰/۵\gamma y_c(S - x_c) + ۰/۵\gamma(S - x_c)(S\tan((\eta_{pe}) + (H_۱ - H) - y_c) \quad (۹)$$

S: فاصلهٔ بین پی‌های مجاور هم (شکل ۲) و $H_۱$ معادل ارتفاع دیوار حائل مجازی پی مجاور و H ارتفاع دیوار مجازی پی مورد نظر و x_c, y_c مختصات محل برخورد گوه مقاوم پی مورد نظر و پی مجاور است که دراین روابط نشان داده می‌شود :

$$x_c = (H_۱ - H - S\tan((\eta_{pe})) / (-۲\tan(\eta_{pe})) \quad (۱۰)$$

$$y_c = \left|x_c \tan((\eta_{pe})\right| + (H - H_۱) \quad (۱۱)$$

۲. در حالت دوم شرایطی بررسی می‌شود که ناحیهٔ مقاوم پی مجاور از ناحیهٔ فعال پی مورد نظر عبور نکند (شکل ۲ ب)، $S > \frac{H}{\tan(\eta_{pe})}$، با توجه به این‌که در این حالت تداخل سطح گسیختگی بر ناحیهٔ فعال پی مورد نظر تأثیر نمی‌گذارد، نیروی فعال ناشی از وزن خاک مشابه پی منفرد از روش کولمب به‌دست می‌آید و نیروی مقاوم ناشی از وزن خاک

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.3.1]

وارد بر دیوار حائل مجازی با در نظر گرفتن تعادل ناحیهٔ مقاوم، با کسر ناحیهٔ تداخل پی مورد نظر با پی مجاور، و استفاده از قانون سینوس‌ها (مثلث نیروها) به‌دست می‌آید. نیروی فعال و مقاوم وارد بر دیوار حائل مجازی در این شرایط در این روابط نشان داده شده‌اند:

$$p_p = g_{pf}\gamma(0.5y_c(S-x_c)+(H-y_c)((S-x_c)+(S-(\frac{H_1}{\tan(\eta_{pe})})))0.5 \quad (۱۲)$$

$$p_a = \frac{1}{2}K_a\gamma H^2 \quad (۱۳)$$

۲. تأثیر چسبندگی خاک بر نیروی فعال و مقاوم وارد بر دیوار حائل مجازی

در این مرحله نیروی افقی فعال و مقاوم وارد بر دیوار حائل مجازی، ناشی از چسبندگی، مطابق روش کولمب تعیین می‌شود:

$$p_a + p_p = cK_{pc}H' + cK_{ac}H' \quad (۱۴)$$

H' ارتفاع دیوار حائل مجازی با کسر ضخامتی از دیوار است که با گوه گسیختگی پی مجاور تداخل دارد (به فاصلهٔ پی‌ها از هم بستگی دارد). ذکر این نکته لازم است که H' در شرایطی که سطح گسیختگی پی مجاور از ناحیهٔ فعال پی مورد نظر عبور کند کم‌تر از H می‌شود ولی در شرایطی که سطح گسیختگی پی مجاور از ناحیهٔ فعال پی مورد نظر عبور نکند $H = H'$ است.

۳. تأثیر سربار γD، ناشی از عمق پی بر نیروی مقاوم وارد بر دیوار حائل مجازی

در این مرحله نیروی مقاوم افقی ناشی از سربار γD وارد بر دیوار حائل مجازی با در نظر گرفتن تداخل سطوح گسیختگی پی‌های مجاور یک‌دیگر تعیین می‌شود. توجه به این نکته لازم است که فاصلهٔ پی‌های مجاور هم بر نیروی افقی ناشی از سربار γD تأثیر گذار است. در صورتی‌که سطح گسیختگی پی مجاور از ناحیهٔ فعال پی مورد نظر عبور کند (شکل ۲ الف)، نیروی مقاوم افقی ناشی از سربار وجود ندارد ولی در شرایطی که سطح گسیختگی پی مجاور فقط از ناحیهٔ مقاوم پی مورد نظر عبور کند (شکل ۲ ب)، نیروی افقی ناشی از سربار ایجاد می‌شود. به این صورت که فشار ناشی از سربار γD در نسبت طول ناحیهٔ مقاوم پی مورد نظر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.3.1]

با کسر ناحیهٔ تداخل (l_1) به همهٔ طول ناحیهٔ مقاوم پی مورد نظر ($l = \frac{H}{\tan\eta_{pe}}$) ضرب شده (شکل ۲ ب) و به این ترتیب با افزایش فاصلهٔ پی‌های مجاور هم، l_1 تغییر کرده و تأثیر فاصلهٔ پی‌ها بر نیروی افقی ناشی از سربار دیده می‌شود. در نهایت نیروی افقی مقاوم ناشی از سربار وارد بر دیوار حائل مجازی با در نظر گرفتن تداخل ناحیهٔ گسیختگی پی مورد نظر با پی‌های مجاور بدین‌صورت به‌دست می‌آید:

$$p_p = \gamma D \frac{l_1}{l} K_p H \qquad (۱۵)$$

که پارامترهای l_1, l, H در شکل ۲ ب نشان داده شده‌اند.

٤. تأثیر وجود مسلح کننده بر نیروی فعال و مقاوم وارد بر دیوار حائل مجازی

در این مرحله نیروی افقی ناشی از مسلح کننده خاک (وارد بر دیوار حائل مجازی) در ناحیهٔ فعال و مقاوم محاسبه می‌شود. به این ترتیب که مقاومت برشی خاک در طولی از مسلح کننده که در ناحیهٔ مقاوم و فعال (با کسر نواحی که با سطح گسیختگی پی مجاور تداخل دارد) وجود دارند، ضرب می‌شود و نیروی افقی مقاوم و فعال ناشی از مسلح کننده خاک مطابق این رابطه به‌دست می‌آید:

$$p_a + p_p = (c + \gamma H' \tan(\frac{۲}{۳}\phi))(l_{actrein} + l_{passiverein}) \qquad (۱٦)$$

به این ترتیب با استفاده از روش دیوار حائل مجازی و برابر قرار دادن نیروی فعال و مقاوم ناشی از وزن خاک و چسبندگی خاک و سربار ناشی از عمق پی و مسلح کننده و بار سازه ، ظرفیت باربری پی‌های مجاور یک‌دیگر در دوحالت بدین‌صورت به‌دست می‌آید:

(۱) اگر $S < \frac{H}{\tan(\eta_{pe})}$ باشد (شکل ۲ الف):

(۱۷)

$$q_g = \frac{۱}{K_a H'}(p_p - p_a + cK_{pc}H' + cK_{ac}H' + \gamma D \frac{l_1}{l} K_p H + (l_{activerein} + l_{passiverein})(\gamma H' \tan(\frac{۲}{۳}\varphi) + c))$$

(۲) اگر $S > \frac{H}{\tan(\eta_{pe})}$ باشد (شکل ۲ ب):

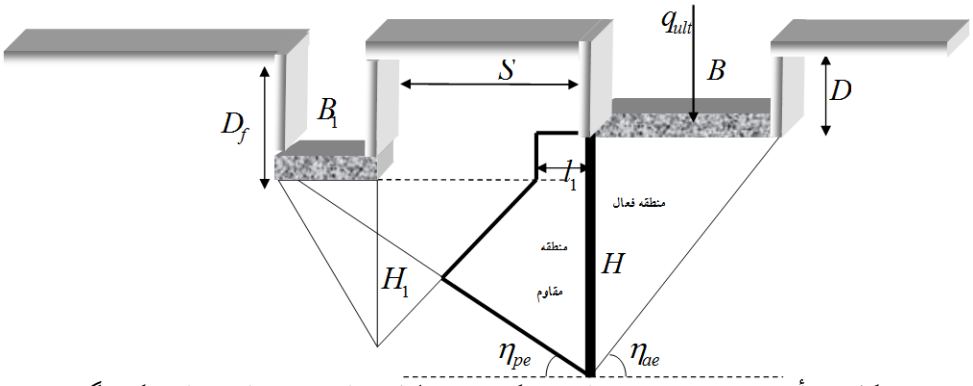
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.3.1]

$$q_g = \frac{1}{K_a H}(p_p - 0.5\gamma K_a H^2 + cK_{pc}H + cK_{ac}H + \gamma D\frac{l_1}{l}K_p H + (l_{activerein} + l_{passiverein})(\gamma H \tan(\frac{2}{3}\varphi) + c)) \quad (۱۸)$$

که p_a, p_p نیروی فعال و مقاوم ناشی از وزن خاک است که در روابط (۸)، (۹)، (۱۲) و (۱۳) معرفی شده‌اند.

باید توجه شود که اگر عمق و عرض پی‌های نزدیک هم یک‌سان نباشد، وزن خاک در نواحی مقاوم و فعال و در نتیجه p_p, p_a تغییر می‌کند و بنا بر این ظرفیت باربری پی‌های نزدیک هم با توجه به عمق و عرض پی‌ها متفاوت می‌شود (شکل ٤). در تحقیق حاضر، نتایج حاصل از روش تحلیلی، برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های مجاور یک‌دیگر، از طریق برنامه‌نویسی در محیط متلب[1] به‌دست آمده است و با استفاده از این برنامه تأثیر فاصلهٔ پی‌ها، عمق پی، نوع خاک و مسلح کننده در این تحقیق بررسی شده است.



شکل ٤. تأثیر عمق و عرض پی‌های نزدیک هم بر ظرفیت باربری پی‌های مجاور یک‌دیگر

نتایج و مباحث

۱. مقایسهٔ روش ارائه شده در تحقیق حاضر با روش‌های دیگر

در این بخش، روش تحلیلی ارائه شده در مقالهٔ حاضر برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های مجاور هم، با استفاده از رابطهٔ (۱۹) با روش‌های ارائه شده در گذشته مقایسه می‌شود. در تمام موارد بررسی شده در این تحقیق عرض پی‌های مجاور هم یک‌سان در نظر گرفته شده است.

۱. Matlab

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.3.1]

ذکر این نکته لازم است که روش دیوار حائل مجازی برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های منفرد واقع بر زمین مسطح و شیبدار در تحقیقات قبلی نویسنده، بررسی شده است و نتایج حاصل از این روش با نتایج روش‌های ارائه شده در گذشته از قبیل مایرهوف وهانسن و ... مقایسه شده و در نتایج هم‌خوانی روش دیوار حائل مجازی با روش‌های دیگر برای پی منفرد مشخص شده است.

$$q_u = qN_qE_q + \frac{۱}{۲}\gamma BN_\gamma E_g \qquad (۱۹)$$

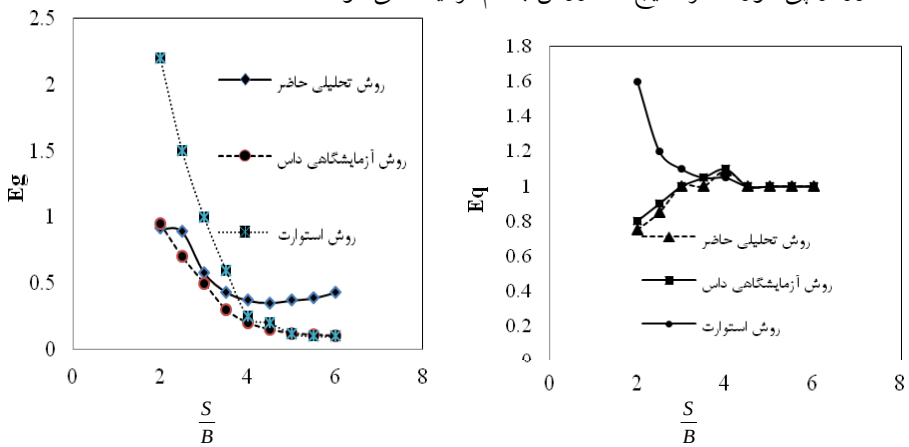
E_q, E_g ضریب‌هایی هستند که تأثیر وجود پی‌های نزدیک هم نسبت به شرایط پی‌های منفرد را نشان می‌دهند. هم‌چنین در رابطه بالا جملهٔ اول تأثیر عمق پی و جمله دوم تأثیر وزن خاک را نشان می‌دهد که در تعیین رابطه ظرفیت باربری پی‌های مجاور هم بررسی شدند. در مطالعه موردی خاک غیرچسبنده فرض شده و زاویهٔ اصطکاک آن برابر ۳۹ درجه در نظر گرفته شده است. در روش ارائه شده در مقالهٔ جاضر، چنان‌که در شکل ۵ ب دیده می‌شود با افزایش فاصلهٔ بین پی‌ها و با توجه به افزایش سهم سربار γD در ناحیهٔ مقاوم، پس E_q افزایش می‌یابد و با افزایش فاصلهٔ پی‌ها تا جایی که تداخل سطح گسیختگی وجود ندارد، این ضریب ثابت می‌شود و در واقع شرایط پی منفرد برقرار می‌شود. در مورد ضریب E_g با توجه به این‌که در فواصل نزدیک پی‌ها سطح گسیختگی مربوط به ناحیهٔ مقاوم پی مجاور از ناحیه فعال پی مورد نظر عبور می‌کند، پس هم بر نیروی فعال و هم نیروی مقاوم ناشی از وزن خاک تأثیر می‌گذارد. با افزایش فاصلهٔ پی‌ها از هم سطح گسیختگی ناحیهٔ مقاوم پی مجاور به‌تدریج از ناحیهٔ فعال پی مورد نظر خارج شده و به‌این‌ترتیب هر دو نیروی فعال و مقاوم افزایش می‌یابند. میزان افزایش این دو نیرو و تأثیر بر کاهش و افزایش ضریب E_g به شرایط موجود بستگی دارد. در این مورد، در روش تحلیلی حاضر، با افزایش فاصلهٔ پی‌ها از هم، ضریب E_g کاهش پیدا می‌کند (شکل ۵ الف).

چنان‌که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، نتایج آزمایشگاهی که داس ارائه کرده با نتایج تحلیلی استوارت و نتایج تحلیلی ارائه شده در تحقیق حاضر مقایسه شده است[۱]، [٤]. نتایج نشان می‌دهد که E_q روش حاضر و روش داس به‌هم نزدیکند. با کاهش نسبت فاصلهٔ پی‌ها به

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.3.1]

عرض (S/B)، S/B<٤، E_q مربوط به‌روش حاضر و Dos کاهش می‌یابند و کم‌تر از ۱ می‌شوند، ولی E_q روش استوارت افزایش می‌یابد و بیش‌تر از ۱ می‌شود. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که E_g مربوط به‌روش حاضر و روش داس به هم نزدیکند. چنان‌که در شکل ۵ الف دیده می‌شود، E_g روش حاضر وداس در شرایطی که S/B=۲ باشد، تقریبا برابر ۱ است و با افزایش S/B ، E_g کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که در روش استوارت وقتی S/B=۲ باشد مقدار E_g برابر ۲/۲ می‌شود و با نتایج داس و نتایج حاضر تفاوت چشم‌گیری دارد، ولی با افزایش فاصله پی‌ها بیش‌تر از ٤ برابر عرض پی و خروج تدریجی سطح گسیختگی پی مجاور از پی مورد نظر نتایج سه روش به‌هم نزدیک می‌شوند.



الف ب

شکل ۵. بررسی تأثیر فاصلهٔ بین پی‌های مجاور هم بر ضرایب E_q و E_g از روش استوارت و داس و روش ارائه شده در تحقیق حاضر [۱]، [٤]

در شکل ۷ تأثیر مسلح کردن خاک در شرایط پی‌های واقع شده در مجاورت هم، در فواصل مختلف پی‌ها، از روش تحلیلی ارائه شده در تحقیق حاضر با روش آزمایشگاهی قوش و کومار در سال ۲۰۰۷ و روش عددی قضاوی در سال ۲۰۰۸ مقایسه شده است [٦]، [۱۰]. روش عددی که قضاوی و همکاران ارائه کردند بر پایه تفاضل محدود است و از برنامه Flac۳D استفاده شده و هم‌چنین رفتار خاک بر پایه معیار موهر- کولمب در نظر گرفته شده است. هم‌چنین مدل آزمایشگاهی که قوش و کومار بررسی کردند در شکل ٦ نشان داده شده است. در این مدل آزمایشگاهی یک لایهٔ ژئوگرید برای مسلح کردن خاک در فواصل مختلف

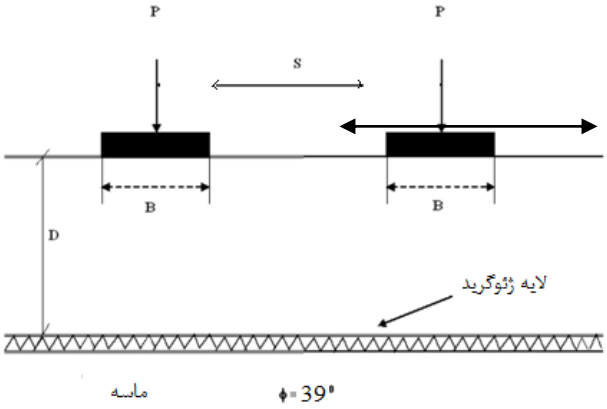
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.3.1]

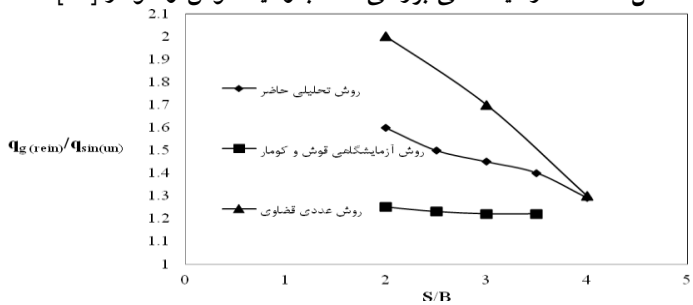
از سطح زمین در نظر گرفته شده است. خاک در نظر گرفته شده در هر دو مدل عددی و آزمایشگاهی ماسه با زاویهٔ اصطکاک ۳۹ درجه است. بنا بر این در مقایسه روش تحلیلی ارائه شده با دو روش عددی و آزمایشگاهی از همین نوع خاک استفاده می‌شود و فاصلهٔ لایهٔ مسلح کننده از سطح زمین برابر عرض پی در نظر گرفته می‌شود. این فاصله در نتایج هر دو روش عددی و آزمایشگاهی ارائه شده است. ذکر این نکته لازم است که در روش آزمایشگاهی ظرفیت باربری پی از نمودار بار، جابه‌جایی در زمانی که نمودار به حداکثر مقدار رسیده و بعد از آن افت بار دیده می‌شود، تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد که نسبت ظرفیت باربری پی‌های مجاور هم واقع بر خاک مسلح به ظرفیت باربری پی‌های منفرد واقع بر خاک غیرمسلح، $q_{g(rein)} / q_{\sin(un)}$، از روش پیشنهاد شده در مقالهٔ حاضر بین دو روش عددی و روش آزمایشگاهی قرار دارد. چنان‌که در شکل ۷ دیده می‌شود، روش عددی بالاترین پاسخ و روش آزمایشگاهی کم‌ترین پاسخ را نتیجه می‌دهد و روش تحلیلی ارائه شده در تحقیق حاضر بین نتایج عددی و آزمایشگاهی قرار دارد و با افزایش فاصلهٔ بین پی‌ها نتایج حاصل از روش تحلیلی حاضر و روش عددی و آزمایشگاهی به‌هم نزدیک می‌شوند. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که در روش پیشنهادی در تحقیق حاضر ظرفیت باربری پی‌های نزدیک هم واقع بر خاک مسلح ۳۰-۶۰ درصد بیش‌تر از ظرفیت باربری پی‌های منفرد واقع بر خاک‌های غیرمسلح می‌شود و مقدار تأثیر خاک مسلح بر ظرفیت باربری پی‌های مجاور یک‌دیگر به فاصلهٔ پی‌ها از هم بستگی دارد. از طرف دیگر، چنان‌که در شکل ۷ نشان داده شده است، در S/B=۲، $q_{g(rein)} / q_{\sin(un)}$ روش حاضر ۲۰ درصد از روش ازمایشگاهی قوش و کومار بیش‌تر و تقریبا ۲۰ درصد از روش عددی قضاوی کم‌تر است و هم‌چنین با افزایش فاصلهٔ پی‌ها این اختلاف کاهش می‌یابد ودر S/B=٤ نتایج حاصل از سه روش تقریبا بر هم منطبق می‌شوند. به‌این ترتیب با توجه به این‌که روش دیوار حائل مجازی برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های منفرد در تحقیقات قبلی انجام شده به‌وسیلهٔ نویسنده هم‌خوانی قابل قبولی با نتایج ارائه شده در گذشته نشان داده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که روش دیوار حائل مجازی برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های واقع بر خاک مسلح، در شرایط پی‌های مجاور هم و پی‌های منفرد نتایج قابل قبولی ارائه داده و می‌تواند به‌کار برده شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.3.1]



شکل ٦. مدل آزمایشگاهی بررسی شده به‌وسیلهٔ قوش و کومار [۱۰]



شکل۷. بررسی تأثیر فاصلهٔ بین پی‌ها بر نسبت ظرفیت باربری پی‌های اجرا شده نزدیک هم واقع بر خاک مسلح به پی‌های منفرد واقع بر خاک غیرمسلح از روش‌های ارائه شده در گذشته و روش ارائه شده در تحقیق حاضر [٦]، [۱۰]

۲. پژوهش‌های پارامتریک

در تحقیق حاضر، روش تحلیلی شرح داده شده برای بررسی تأثیر نوع خاک (چسبنده و غیرچسبنده) و ویژگی‌های پی (عمق پی) بر ظرفیت باربری پی‌های مجاور یک‌دیگر در فواصل مختلف پی‌ها و با فرض عرض یک‌سان پی‌های مجاور از هم به‌کار برده می‌شود.

۲-۱. تأثیر نوع خاک

در این بخش تأثیر زاویهٔ اصطکاک و چسبندگی خاک بر ظرفیت باربری پی‌های نزدیک هم بررسی شده است. در ابتدا، ظرفیت باربری خاک‌های بدون چسبندگی در زاویه‌های اصطکاک مختلف تعیین می‌شود. چنان‌که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، تأثیر فاصلهٔ پی‌ها بر ظرفیت

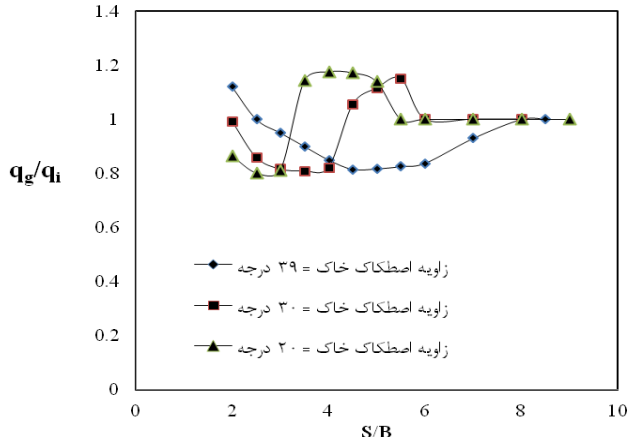
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.3.1]

باربری پی‌های نزدیک هم در خاک‌ها با زاویه‌های اصطکاک مختلف مشابه نیست. وقتی زاویهٔ اصطکاک برابر ۳۹ درجه باشد، q_g/q_i که معادل نسبت ظرفیت باربری پی‌های نزدیک هم به پی منفرد است، با افزایش فاصلهٔ پی‌ها، از مقدار ۱/۱۲، در S/B=۲، کاهش یافته و کم‌تر از ۱ می‌شود و در نهایت با افزایش بیش‌تر فاصلهٔ پی‌ها به ۱ نزدیک می‌شود. در خاک‌ها با زاویه اصطکاک پایین‌تر رفتار متفاوت می‌شود و با افزایش فاصلهٔ پی‌ها q_g/q_i در ابتدا از مقدار کم‌تر از ۱ به بیش‌تر از ۱ افزایش یافته و سپس با افزایش بیش‌تر فاصلهٔ پی‌ها از هم، کاهش می‌یابد و به ۱ نزدیک می‌شود. باید توجه شود که زاویهٔ اصطکاک خاک بر زوایای ناحیهٔ مقاوم و فعال با جهت افقی (η_{ae}, η_{pe}) تأثیر می‌گذارد و این عامل باعث تغییر ظرفیت باربری پی‌های نزدیک هم، با افزایش فاصلهٔ پی‌ها، نسبت به پی‌های منفرد در خاک‌ها با زاویهٔ اصطکاک مختلف می‌شود. در واقع در زاویهٔ اصطکاک ۳۹ درجه در فاصلهٔ نزدیک پی‌ها (S/B=۲)، سطح گسیختگی مقاوم پی مجاور به گونه‌ای است که از ناحیهٔ فعال و مقاوم پی مورد نظر عبور می‌کند و بدین‌ترتیب با افزایش فاصلهٔ پی‌ها از هم سطح گسیختگی پی مجاور به‌تدریج از ناحیهٔ فعال پی مورد نظر خارج می‌شود و نیروی فعال و مقاوم افزایش پیدا می‌کند و در نهایت میزان افزایش این دو نیرو باعث کاهش نسبت q_g/q_i با افزایش فاصلهٔ پی‌ها از هم می‌شود ولی این کاهش با افزایش بیش‌تر فاصلهٔ پی‌ها از هم و خروج سطح گسیختگی مقاوم پی مجاور از ناحیهٔ فعال پی مورد نظر به افزایش تبدیل می‌شود. زیرا با خارج شدن سطح گسیختگی پی مجاور از ناحیهٔ فعال پی مورد نظر و افزایش سطح گسیختگی مقاوم پی مورد نظر نیروی مقاوم وارد بر دیوار حائل افزایش می‌یابد و همین باعث افزایش q_g/q_i می‌شود، در نهایت با خارج شدن کامل سطح گسیختگی پی مجاور از سطح گسیختگی پی مورد نظر، q_g/q_i به ۱ نزدیک می‌شود. به‌همین ترتیب با کاهش زاویهٔ اصطکاک خاک تغییر سطح گسیختگی به‌گونه‌ای است که در S/B=۲ سطح بیش‌تری از ناحیهٔ فعال زیر پی مورد نظر با سطح گسیختگی ناحیهٔ مقاوم پی مجاور قطع می‌شود و با افزایش فاصلهٔ پی‌ها از هم نیروی فعال و نیروی مقاوم به‌تدریج افزایش می‌یابند ولی تغییر q_g/q_i به‌میزان افزایش نیروی مقاوم و فعال بستگی دارد. به این دلیل است که در شکل ۸، q_g/q_i ، با کاهش زاویهٔ اصطکاک، ابتدا کاهش می‌یابد و سپس افزایش می‌یابد تا این مرحله سطح گسیختگی پی مجاور در ناحیهٔ فعال پی مورد نظر قرار دارد. علت کاهش q_g/q_i در قسمت بعد نمودار این است که سطح گسیختگی از ناحیهٔ فعال خارج شده و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.3.1]

افزایش نیروی فعال به‌گونه‌ای است که با عث کاهش نسبت q_g/q_i می‌شود و در نهایت با خارج شدن کل سطح گسیختگی پی مجاور از سطح گسیختگی پی مورد نظر این نسبت به ۱ نزدیک می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که هر چه زاویهٔ اصطکاک خاک کم‌تر شود، در فاصلهٔ کم‌تر پی‌ها از هم سطح گسیختگی مقاوم از سطح گسیختگی پی مورد نظر خارج شده و نسبت q_g/q_i به ۱ نزدیک می‌شود. در واقع تأثیر زاویهٔ اصطکاک خاک بر سطح گسیختگی پی، باعث تغییرات q_g/q_i در فواصل مختلف پی‌ها از هم می‌شود.

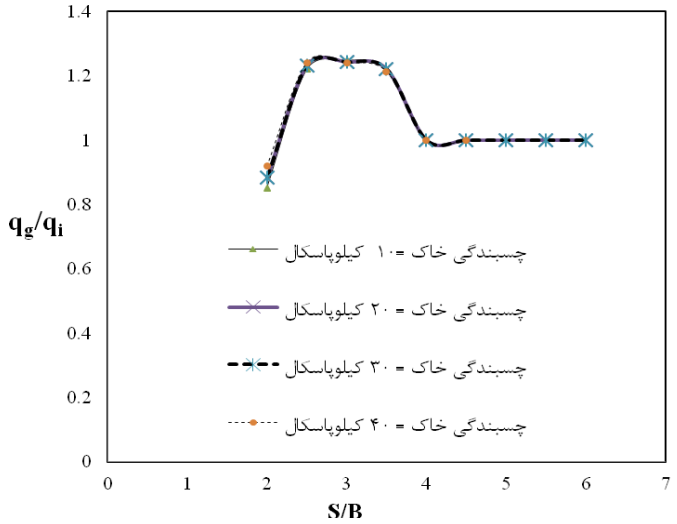


شکل۸. تأثیر فاصلهٔ پی‌ها از هم بر نسبت ظرفیت باربری پی‌های مجاور هم به ظرفیت باربری پی منفرد در زوایای اصطکاک مختلف خاک(خاک بدون چسبندگی فرض شده است)

در این بخش تأثیر چسبندگی خاک بر ظرفیت باربری پی‌های نزدیک هم بررسی می‌شود (شکل ۹). نتایج نشان می‌دهد که در زاویهٔ اصطکاک ثابت، با تغییر چسبندگی خاک نسبت ظرفیت باربری پی‌های مجاور یک‌دیگر به پی‌های منفرد در فواصل معین پی‌ها از هم تقریباً ثابت می‌ماند. در رابطهٔ ظرفیت باربری پی‌های مجاور هم، ارائه شده در پژوهش حاضر، تأثیر چسبندگی خاک بر نیروی فعال و مقاوم وارد بر دیوار حائل مجازی از روش کولمب تعیین شده است. در کل نتایج نشان می‌دهد که اثر زاویهٔ اصطکاک خاک بر نسبت ظرفیت باربری پی‌های نزدیک هم به پی‌های منفرد به‌طور چشم‌گیری بیش‌تر از چسبندگی خاک است. زیرا زاویهٔ اصطکاک خاک تأثیر چشم‌گیر بر سطوح گسیختگی مقاوم و فعال و هم‌چنین سهم خاک

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.3.1]

موجود در ناحیهٔ فعال و مقاوم دارد و به این دلیل تأثیر زاویهٔ اصطکاک خاک بر ظرفیت باربری پی‌های مجاور هم بیش‌تر از چسبندگی خاک است.



شکل۹. تأثیر چسبندگی خاک بر ظرفیت باربری پی‌های مجاور هم نسبت به پی‌های منفرد در فاصله‌های مختلف پی‌ها از هم (زاویهٔ اصطکاک خاک ۱۰ درجه فرض شده است)

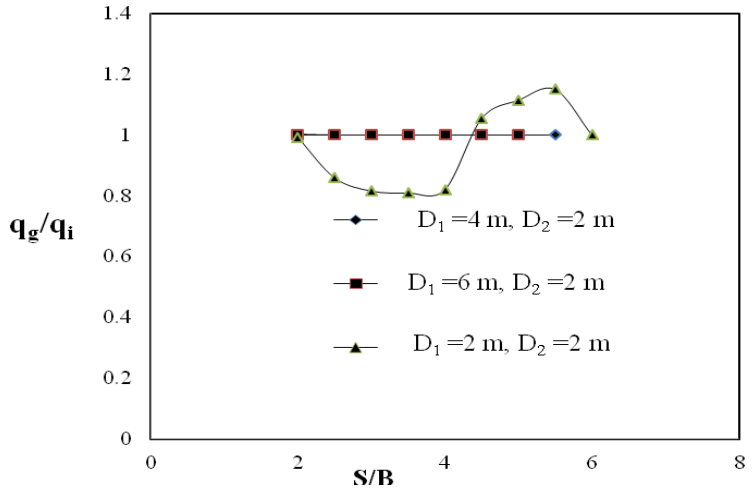
۲-۲. تأثیر عمق پی‌های مجاور هم

در این بخش تأثیر عمق‌های مختلف پی‌های نزدیک هم بر ظرفیت باربری پی‌های مجاور یک‌دیگر بررسی می‌شود، خاک بررسی شده ماسه با زاویهٔ اصطکاک ۳۰ درجه است (شکل‌های ۱۰و ۱۱). نتایج نشان می‌دهد که اگر عمق پی مورد نظر (D_1) بیش‌تر از ۲ برابر عمق پی مجاور (D_2) باشد، در شرایطی که عرض پی‌ها مشابه است، سطح گسیختگی پی مجاور تأثیری بر ظرفیت باربری پی مورد نظر ندارد و چنان‌که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، ظرفیت باربری پی‌های مجاور هم در فواصل مختلف پی‌ها از هم نسبت به پی منفرد تغییری نمی‌کند. زیرا در این شرایط سطح گسیختگی پی مجاور تداخلی با سطح گسیختگی پی مورد نظر ندارد و بنا بر این وجود پی مجاور بر ظرفیت باربری پی مورد نظر تأثیر ندارد. از طرف دیگر در شرایطی که عمق پی مورد نظر کم‌تر از پی مجاور باشد، نتایج متفاوت می‌شود و سطح گسیختگی پی‌های مجاور بر پی مورد نظر تأثیرگذار است. نتایج نشان می‌دهد که وقتی S/B=۲ باشد، q_g / q_i

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.3.1]

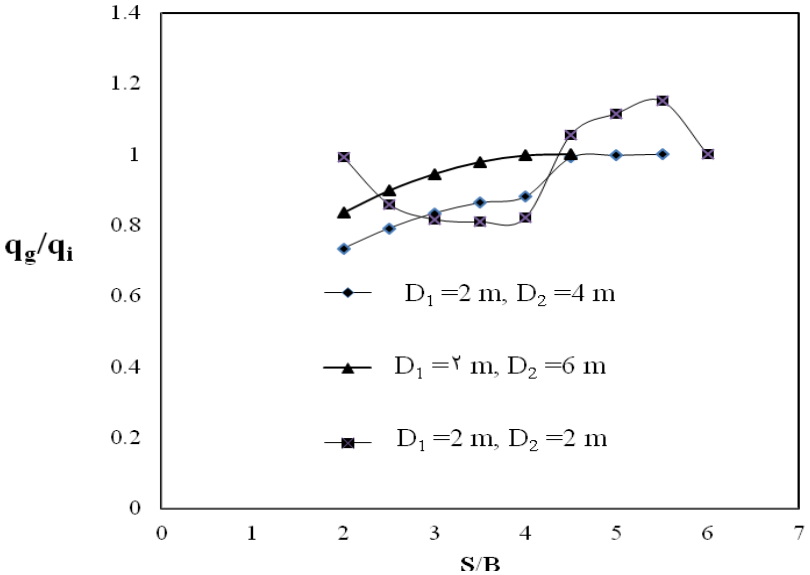
در شرایطی که عمق پی مجاور بیش‌تر از عمق پی مورد نظر باشد (شکل ۱۱) کم‌تر از ۱ و کم‌تر از شرایطی که عمق پی‌ها یک‌سان باشد، می‌شود. زیرا افزایش عمق پی مجاور باعث می‌شود که ،در فواصل نزدیک پی‌ها از هم، فضای بیش‌تری از سطح گسیختگی پی مورد نظر با سطح گسیختگی پی مجاور تداخل داشته باشد و در نتیجه نیروی مقاوم وارد بر دیوار حائل مجازی و نیز q_g / q_i کاهش پیدا کند (شکل ٤). هم‌چنین با افزایش فاصلهٔ پی‌های نزدیک هم نیروی مقاوم و در نتیجه q_g / q_i افزایش یافته و به ۱ نزدیک می‌شود. نتیجه دیگری که از شکل ۱۱ به‌دست می‌آید این است که با افزایش عمق پی مجاور، فاصله‌ای از پی‌ها که سطح گسیختگی پی مجاور از پی مورد نظر خارج شده و وجود پی مجاور تأثیری بر ظرفیت باربری پی مورد نظر نمی‌گذارد، کاهش می‌یابد. به‌این ترتیب نتایج نشان می‌دهد که تأثیر عمق پی‌های مجاور بر ظرفیت باربری پی مورد نظر مخصوصاً در شرایطی که عمق پی‌های مجاور نسبت به پی مورد نظر بیش‌تر است، باید مورد توجه قرار گیرد. لازم به ذکر است که عرض پی‌های مجاور هم که به نوع پی بستگی دارد، بر ظرفیت باربری پی‌های مجاور هم نسبت به پی‌های منفرد تأثیرگذار است و نتایج نسبت به شرایطی که عرض پی‌ها یک‌سان باشد، متفاوت می‌شود.



شکل ۱۰. تأثیر عمق پی‌های مجاور بر نسبت ظرفیت باربری پی‌های نزدیک هم به پی منفرد در فواصل مختلف پی‌ها از هم (عمق پی مورد نظر بیش‌تر از پی مجاور است)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.3.1]



شکل ۱۱. تأثیر عمق پی‌های مجاور بر نسبت ظرفیت باربری پی‌های اجرا شده در نزدیکی هم به پی منفرد در فواصل مختلف پی‌ها از هم(عمق پی مورد نظر کم‌تر از پی مجاور است)

نتایج

در این تحقیق، با استفاده از روش تحلیلی دیوار حائل مجازی تأثیر فاصلهٔ پی‌های مجاور هم، نوع خاک، عمق پی‌های مجاور هم و خاک مسلح شده بر ظرفیت باربری پی‌های نزدیک هم بررسی شده و ظرفیت باربری پی‌های مجاور هم با پی‌های منفرد مقایسه شد. در حالت کلی می‌توان گفت که ظرفیت باربری پی‌های مجاور هم با توجه به شرایط می‌تواند بیش‌تر یا کم‌تر از ظرفیت باربری پی‌های منفرد شود و در این میان نوع خاک موجود، فاصلهٔ بین پی‌های مجاور هم، ویژگی‌های پی بر این افزایش و کاهش تأثیر قابل توجه دارند. نتایج به‌دست آمده از روش تحلیلی ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی که محققان دیگر ارائه کرده‌اند، مقایسه شد و هم‌خوانی قابل قبولی، مخصوصاً با نتایج آزمایشگاهی نتیجه شد. در بررسی‌های پارامتریک این نتایج به‌دست آمد:

- هر چه زاویهٔ اصطکاک خاک کم‌تر باشد، فاصلهٔ بین پی‌ها که در آن فاصله، سطح گسیختگی پی مجاور از پی مورد نظر خارج شده و پی مجاور بر ظرفیت باربری پی مورد نظر تأثیری

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.3.1]

ندارد، کاهش یافته و تغییرات ظرفیت باربری پی‌های مجاور یک‌دیگر نسبت به پی‌های منفرد در فواصل مختلف پی‌ها از هم متفاوت می‌شود. این نتیجه به‌علت تأثیر چشم‌گیر زاویهٔ اصطکاک خاک بر سطوح مقاوم و فعال به‌دست می‌آید. از طرف دیگر نتایج نشان دادند که تغییر چسبندگی خاک بر نسبت ظرفیت باربری پی‌های مجاور هم به پی منفرد در فاصلهٔ معین پی‌ها از هم تأثیری نمی‌گذارد.

- اگر عمق پی مجاورکم‌تر از نصف عمق پی مورد نظر باشد، ظرفیت باربری پی مورد نظر دقیقاً با ظرفیت باربری پی منفرد یک‌سان می‌شود. ولی در صورتی که عمق پی مجاور بیش‌تر از پی مورد نظر باشد، در فواصل نزدیک پی‌ها، نسبت ظرفیت باربری پی‌های مجاور هم به پی منفرد کم‌تر از شرایط یک‌سان بودن عمق پی‌های مجاور هم می‌شود. هم‌چنین فاصلهٔ پی‌ها که در آن فاصله سطح گسیختگی پی مجاور از سطح گسیختگی پی مورد نظر خارج شده و پی مجاور بر ظرفیت باربری پی مورد نظر تأثیری ندارد، با افزایش عمق پی مجاور کم‌تر می‌شود. بنا بر این تأثیر پی مجاور بر ظرفیت باربری پی مورد نظر مخصوصاً در شرایطی که عمق پی مجاور بیش‌تر از پی مورد نظر است، باید بررسی شود.

- تأثیر خاک مسلح بر ظرفیت باربری پی‌های نزدیک هم به فاصلهٔ پی‌ها از هم بستگی دارد و با کاهش فاصلهٔ پی‌ها و افزایش زاویهٔ اصطکاک خاک افزایش می‌یابد. در روش تحلیلی ارائه شده، ظرفیت باربری پی‌های مجاور هم واقع بر خاک مسلح، با توجه به فاصلهٔ پی‌ها، ۳۰ تا ۶۰ درصد بیش‌تر از ظرفیت باربری پی‌های منفرد واقع بر خاک غیر مسلح است و مقایسهٔ نتایج تحقیق حاضر با تحقیقات ارائه شده در گذشته نشان داد که روش دیوار حائل مجازی برای تعیین ظرفیت باربری پی واقع بر خاک مسلح در شرایط پی‌های مجاور هم و پی‌های منفرد نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد.

- با توجه به تأثیر شرایط لرزه‌ای و نوع پی بر نیروهای فعال و مقاوم وارد بر دیوار حائل مجازی، پیشنهاد می‌شود که از روش دیوار حائل مجازی برای بررسی تأثیر پارامترهای اشاره شده بر ظرفیت باربری پی‌های مجاور هم نسبت به پی‌های منفرد استفاده شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.3.1]

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر برای حمایت مالی از این طرح پژوهشی تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

1. Stuart J. G., "Interference between foundations with special reference to surface footing on sand", Geotechnique Journal, Vol. 12, 1 (1962) 15-27.
2. Mandel J., "Interference plastique de foundations superficielles", Proceedings of International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Budapest (1963).
3. Saran S., Agarwal V. C., "Interference of surface footings on sand", Indian Geotechnical Journal, Vol. 4 (1974) 129-139.
4. Das B. M., S. Larbi-Cherif, "Bearing capacity of two closely spaced shallow foundations on sand", Soils and Foundations, Vol. 23, 1 (1983) 1-15.
5. Ghazavi M., Alimardani A., "Behavior of closely spaced square and circular footings on reinforced sand", Soils and Foundations, Vol. 52, 1 (2012) 160-167.
6. Ghazavi M., Alimardani A., "Interference effect of shallow foundations constructed on sand reinforced with geosynthetics", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 26 (2008) 404-415.
7. Kumar A., "Interaction of footings resting on reinforced earth slab", Ph.D. Thesis University of Roorkee, Roorkee, India (1997).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.3.1]

8. Kumar A., Saran S., "Closely spaced footings on geogrid reinforced sand", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 129 (2003) 660-664.

9. Kumar A., Saran S., "Closely spaced strip footings on reinforced sand", Journal of the Southeast Asian Geotechnical Society, Vol. 12 (2003) 177-186.

10. Kumar J., Ghosh P., "Ultimate bearing capacity of two interfering rough strip footings", International Journal of Geomechanics, ASCE, Vol. 7 (2007) 53-62.

11. Kumar J., Ghosh P., "Upper bound limit analysis for finding interference effect of two nearby strip footings on sand', Geotechnical and Geological Engineering,Vol. 25 (2007) 499-507

12. Kumar J., Bhattacharya P., "Bearing capacity of interfering multiple strip footings by using lower bound finite elements limit analysis", Computers and Geotechnics, Vol. 37, 5 (2010) 731-736.

13. Amir A., "Interference Effect on the Behaviour of Footings", Ph.D. Thesis, University of Roorkee, Roorkee, India (1992).

14. Bohra K. H., "Interference between circular footings placed on sand" M.E. Dissertation, University of Jodhpur, Jodhpur, Rajasthan, India (1986).

15. Graham J., Raymond G. P., Suppiah A., "Bearing capacity of three closely-spaced footings on sand", Geotechnique, Vol. 34, 2 (1984) 173-182.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.3.1]

16. Khan I. N., "Group behavior of footings on dune sand", M. E. Dissertation, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Jodhpur, Jodhpur, Rajasthan, India (1986).

17. Patankar M. V., Khadilkar B. S., "Nonlinear analysis of interference of three surface strip footings by finite element method", Indian Geotechnical J., Vol. 11,4 (1981) 327-344.

18. Selvadurai A. P. S., Rabbaa S. A. A., "Some experimental studies concerning the contact stresses beneath interfering rigid strip foundations resting on a granular stratum", Can. Geotech. J., Vol. 20, 3, (1983) 406-415.

19. West J. M., Stuart J. G., "Oblique loading resulting from interference between surface footings on sand", Proc., 6th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2 (1965) 214-217.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.3.1]