بررسی ظرفیت باربری پی‌های سطحی مجاور شیب‌های ماسه‌ای با مدل آزمایشگاهی

علی عطارزاده*، علی قنبری، امیر حمیدی؛
دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی مهندسی، گروه عمران

تاریخ: دریافت ۹۲/۸/۱ **پذیرش** ۹۲/۱۲/۱۹

چکیده

هدف از این مقاله ارائهٔ رابطه‌ای جدید برای محاسبهٔ ضریب ظرفیت باربری پی‌های مستطیلی واقع بر نزدیکی شیب برای شرایط این تحقیق است. در این راستا در قالب بررسی آزمایشگاهی مدلی از شیبی ماسه‌ای درون جعبهٔ فولادی ساخته شده و پی مستطیلی روی آن قرار گرفته است. پس از بارگذاری با دستگاه سه‌محوری، مقدار بار اعمال شده و تغییر مکان پی ثبت شده و منحنی تنش- نشست رسم شده است. بر این اساس ظرفیت باربری نهایی پی تعیین شده است. ماسه استفاده شده در این تحقیق ماسه بابلسر است و در تمام آزمایش‌ها دانسیتهٔ نسبی ۵۰٪ است. بر اساس نتایج حاصل، تأثیر فاصلهٔ پی تا لبه شیب و نیز زاویهٔ شیب بر ظرفیت باربری نهایی پی بررسی شده و در بارهٔ روند تغییرات آن با پارامترهای مختلف بحث شده است. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که با افزایش فاصلهٔ لبه پی از شیب، ظرفیت باربری به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش زاویهٔ شیب، ظرفیت باربری به‌صورت خطی کاهش پیدا کرده است. در نهایت رابطه‌ای جدید برای برآورد ضریب ظرفیت باربری پی‌های سطحی در مجاورت شیب برای ماسه با تراکم ۵۰٪ و شرایط این تحقیق ارائه شده است.

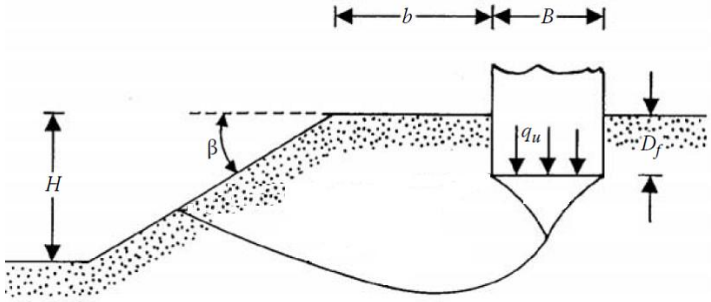
واژه‌های کلیدی: ظرفیت باربری، پی مستطیلی، اثر شیب، پی مجاور شیب، ماسه.

* **نویسندهٔ مسئول** ali_attarzadeh1987@yahoo.com

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2695]

مقدمه

یکی از شرایط یا حالت‌های مؤثر بر ظرفیت باربری پی، اتکا پی بر زمین شیب‌دار یا قرارگیری شیب در فاصلهٔ مؤثر از پی است. قرارگیری پی در مجاورت شیب تأثیر چشم‌گیری بر ظرفیت باربری داشته و موقعیت گوهٔ گسیختگی را تغییر می‌دهد. در حالت پی در مجاورت شیب، دو پارامتر فاصلهٔ پی از لبه شیب و زاویهٔ شیب در کاهش ظرفیت باربری پی، در برابر عوامل دیگر تأثیر چشم‌گیری دارند. اگر فاصلهٔ لبه شیب تا پی از مقدار مشخصی بیش‌تر باشد دیگر شیب اثری بر ظرفیت باربری نداشته است و ظرفیت باربری مانند پی روی زمین افقی محاسبه می‌شود. در شکل ۱ شکل شماتیکی از پی در مجاورت شیب نشان داده شده است.



شکل ۱. شکل شماتیک پی در مجاورت شیب

امروزه روش معمول در تعیین ظرفیت باربری پی‌های سطحی، استفاده از ضرایب تجربی در معادلات ظرفیت باربری پی است که محققان برجسته‌ای مانند ترزاقی(۱۹٤۳)، مایرهوف (۱۹٦۳)، هانسن(۱۹۷۰)، وسیک (۱۹۷۳)، ساران و همکاران (۱۹۸۹) ارائه شده است. این روش‌ها به‌دلیل تجربی بودن ضریب‌ها (اعم از ضریب‌های شکل پی، عمق پی، شیب بار و شیب زمین) تقریب زیادی دارند. این تقریب در بسیاری از موارد اقتصادی بودن طرح را تحت تأثیر قرار داده و گاهی اوقات ممکن است حاشیهٔ ایمنی مورد نیاز را تأمین نکند.

بررسی ظرفیت باربری پی‌های سطحی در گذشته به‌صورت گسترده، به‌روش‌های عددی و تحلیلی انجام شده و روش‌های حل متعددی در این زمینه ارائه شده است. تحلیل ظرفیت باربری پی‌های سطحی در مجاورت شیب به‌عوامل مختلفی بستگی دارد و ارائه تحلیلی که همهٔ پارامترهادر آن لحاظ شده باشد کار مشکلی است. با توجه به تأثیر پارامترهای مختلف در

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2695]

ظرفیت باربری پی‌های سطحی و مشکلات موجود در زمینهٔ استفاده از روش‌های حل تحلیلی و عددی، اهمیت تحقیقات انجام شده با استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی در این زمینه روشن می‌شود. در این بین استفاده از روش‌های تجربی شامل ساخت مدل‌های واقعی یا مدل‌های با مقیاس کوچک، محققان مختلف مناسب‌ترین راه را برای بررسی صحت و میزان دقت نتایج روش‌ها و تئوری‌ها، ارائه کردند. از طرف دیگر عدم قطعیت در نوع و مقدار پارامترهای دخیل در روش‌های تحلیلی و عددی همواره محققان را به‌سوی استفاده از مدل‌سازی فیزیکی پدیده‌های مختلف سوق داده است. در مورد بررسی‌های آزمایشگاهی محققان پیشین، می‌توان به پژوهش‌های که ییتم‌اوقلو[۱] (۱۹۹٤)، چول‌شین[۲] و داس[۳] (۱۹۹۸)، یو[٤] (۲۰۰۱)، مصطفی[٥] و ساواف[٦] (۲۰۰۷)، برنس‌بای[۷] و دیویدسون[۸] (۲۰۰۸)، شودهاری[۹] و همکاران (۲۰۰۹)، علم‌شاهی و هاتف (۲۰۰۹)، بهره‌مندجوی(۱۳۹۰) و پنج‌تنی(۱۳۹۱) اشاره کرد.

برنس‌بای و دیویدسون در تحقیق خود ظرفیت باربری پی در کنار سطح شیب‌دار و تأثیر ثابت بودن پی بر عمل‌کرد آن را بررسی کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که ظرفیت باربری پی در کنار سطح شیب‌دار علاوه بر خصوصیات خاک و فاصلهٔ پی از لبهٔ شیب و زاویهٔ شیب به ثابت بودن ساختار پی (عدم حرکت افقی و یا چرخشی)، هم بستگی دارد. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان داد که: با افزایش زاویهٔ شیب ظرفیت باربری کاهش می‌آبد. هم‌چنین ظرفیت باربری پی در حالت آزاد کم‌تر از حالت گیرداری است که هرچه زاویهٔ شیب بیش‌تر باشد، این اختلاف کم‌تر است.

بررسی آزمایشگاهی پنج‌تنی(۱۳۹۱)، بر روی یک شیب ماسه‌ای که یک پی مستطیلی در بالای آن قرار داده شده، انجام گرفته است و سپس روی آن بارگذاری شده و پارامترهایی مانند: تراکم نسبی خاک، فاصلهٔ لبه پی تا شیب و زاویهٔ شیب بررسی شده است. نتایجی که در انجام این تحقیق به‌دست آمده است نشان می‌دهد که: با افزایش فاصلهٔ پی از لبه شیب ظرفیت باربری پی در تراکم و زاویهٔ شیب‌های مختلف افزایش پیدا کرده و با توجه به نمودارهای حاصل، مشاهده شده است که وقتی فاصلهٔ پی از لبه شیب به سه برابر عرض پی (3B) افزایش

۱. Yetimoglu ۲. Chul Shin ۳. Das ٤. Yoo ٥. Mostafa
٦. Sawwaf ۷. Bransby ۸. Davidson ۹. Choudhary

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2695]

یابد، می‌توان از تأثیر شیب صرف‌نظر کرد و ظرفیت باربری پی را معادل پی قرار گرفته بر زمین مسطح بررسی کرد. هم‌چنین با افزایش تراکم نسبی خاک، ظرفیت باربری پی در زاویهٔ شیب‌های مختلف افزایش پیدا کرده و روند این افزایش تقریباً خطی است. از طرف دیگر با افزایش زاویهٔ شیب ظرفیت باربری مدل کاهش پیدا کرده و هرچه زاویهٔ اصطکاک داخلی بیش‌تر باشد اثر زاویهٔ شیب بر ظرفیت باربری بیش‌تر است و روند کاهش ظرفیت باربری با افزایش زاویهٔ شیب در اکثر موارد وضعیت خطی دارد.

در تحقیق حاضر پژوهش‌هایی در زمینهٔ بررسی عوامل مؤثر بر ظرفیت باربری پی‌های واقع بر روی شیب با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی انجام شده و نتایج حاصل با نتایج مایرهوف (۱۹٦۳) مقایسه شده است. برای این منظور از خاک دانه‌ای با دانسیته نسبی ۵۰٪ استفاده شده و به‌ازای زاویه‌های شیب مختلف، ظرفیت باربری پی محاسبه شده است.

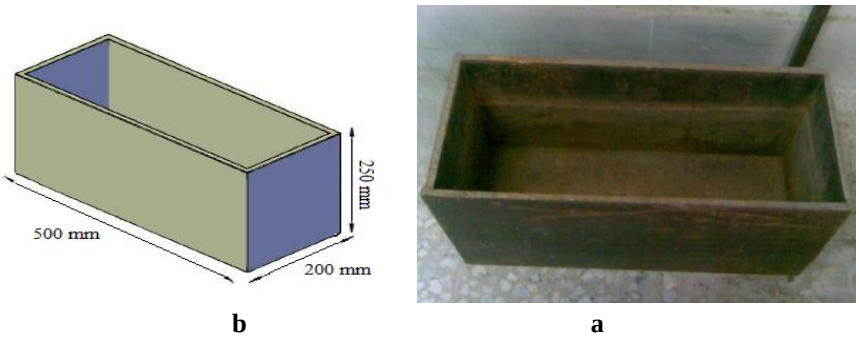
نحوهٔ انجام آزمایش

برای انجام آزمایش احتیاج به جعبه‌ای است که شیروانی خاکی در آن مدل گردد. بدین‌منظور چنان‌که در شکل ۲ نشان داده شده است، جعبه‌ای فولادی به‌ابعاد ۲۰×۵۰ سانتی‌متر و به ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر ساخته شده است. علت به‌کار نبردن جعبهٔ طلقی شفاف که مکانیسم گسیختگی خاک آزمایش شده در آن مشاهده گردد، این است که برای رسیدن به تراکم۵۰٪ در آزمایش‌ها، باید خاک در لایه‌های مختلف کوبیده شود، جعبهٔ طلقی در هنگام کوبش خاک تغییر حجم داده و قادر به تحمل ضربه برای تراکم خاک نیست و از درزها شکننده است. از این رو، جعبهٔ آزمایش از جنس فولاد ساخته شده و تمام درزهای آن با جوش الکتریکی محکم شده است تا در هنگام متراکم کردن خاک قادر به تحمل ضربه باشد. از عیب‌های جعبهٔ فولادی، وزن زیاد آن و دیده نشدن مکانیسم گسیختگی خاک است.

آزمایش‌ها در سه شیب مختلف با زاویه‌های ۳۰، ٤۵ و ٦۰ درجه انجام شده است. چنان‌که در شکل ۳ دیده می‌شود، بارگذاری با قاب بارگذاری دستگاه سه‌محوری بزرگ انجام گرفته است. سرعت بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه است که این میزان با دستگاه قابل تنظیم است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2695]

جابه‌جایی قائم نیز با یک گیج که روی دستگاه سه‌محوری نصب است اندازه‌گیری شده است و داده‌های به‌دست آمده از اعمال نیرو و تغییر مکان به‌صورت خودکار بر روی سیستم ضبط شده است.

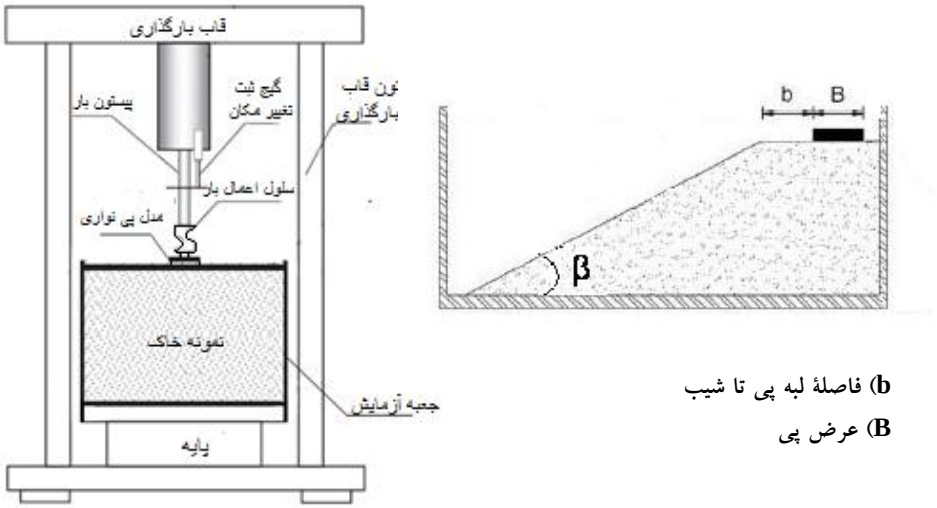


b **a**

شکل ۲. جعبهٔ فولادی به‌کار رفته در آزمایش، a) نمای واقعی، b) شکل شماتیک

مدل پی مستطیلی ساخته شده از جنس فولاد با ضخامت ۱۰ میلی‌متر و طول ۱۶۵ میلی‌متر و پهنای ۴۰ میلی‌متر است. مدل پی بر بالای شیب در فاصله‌های مختلف ۰/۵B، B، ۲B و ۳B آزمایش شده است.

در جدول ۱ تعداد و مشخصات نمونه‌های آزمایش شده در این تحقیق آورده شده است.



b) فاصلهٔ لبه پی تا شیب
B) عرض پی

شکل۳. شکل شماتیک دستگاه و جعبه آزمایش استفاده شده در این تحقیق

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2695]

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های آزمایش شده در این تحقیق

شمارهٔ نمونه	تراکم نسبی	زاویهٔ شیب شیروانی (درجه)	فاصلهٔ لبه پی تا شیب
U1	٪ ۵۰	۳۰	۰/۵B
U2	٪ ۵۰	۳۰	B
U3	٪ ۵۰	۳۰	۲B
U4	٪ ۵۰	٤۵	۰/۵B
U5	٪ ۵۰	٤۵	B
U6	٪ ۵۰	٤۵	۲B
U7	٪ ۵۰	٤۵	۳B
U8	٪ ۵۰	٦۰	۰/۵B
U9	٪ ۵۰	٦۰	B
U10	٪ ۵۰	٦۰	۲B
U11	٪ ۵۰	٦۰	۳B
F1	٪ ۵۰	-	-

مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک مورد آزمایش

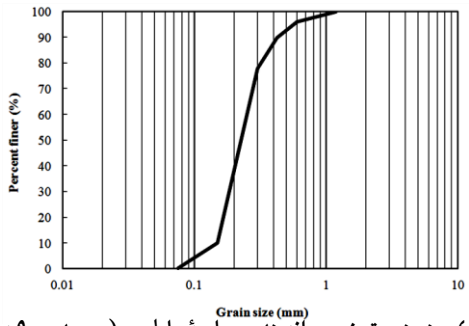
ماسه استفاده شده در این تحقیق ماسه بابلسر است. این ماسه در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکدهٔ فنی و مهندسی دانشگاه خوارزمی و در جریان چند تحقیق دیگر نیز استفاده شده است. ماسهٔ مذکور شکسته با دانه‌بندی یک‌نواخت در سواحل بابلسر است. منحنی دانه‌بندی ماسهٔ بابلسر در شکل ٤ نشان داده شده است. یک‌نواختی دانه‌بندی خاک آزمایش شده این مزیت را دارد که می‌توان مدل‌های فیزیکی همگنی در هر آزمایش به‌دست آورد. آماده‌سازی شیب درون دستگاه با استفاده از سیستم کوبش خاک و در سه لایه ۵ سانتی‌متری صورت گرفته است.

زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک از مهم‌ترین پارامترهای تعیین کننده ظرفیت باربری است که در این تحقیق دقت خاصی بر تعیین این پارامتر صورت گرفته است. این پارامتر با آزمایش برش مستقیم در ابتدای کار تعیین شده است. زاویهٔ اصطکاک داخلی چنان‌که در جدول ۲

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2695]

مشخص است برای تراکم نسبی ۳۰ درصد، ۳۱ درجهٔ و برای تراکم نسبی ۵۰ درصد، ۳۳ درجه و برای تراکم نسبی ۷۰ درصد، ۳٤ درجه به‌دست آمده است. در جدول ۳ نیز خصوصیات ماسه بابلسر آورده شده است.

لازم به ذکر است آزمایش‌های انجام گرفته در این تحقیق، در تراکم نسبی ٪۵۰ بوده است و برای رسیدن به این تراکم، خاک مدل باید در یک رطوبت بهینه کوبیده شود که این رطوبت بهینه با بررسی‌های آزمایشگاهی معادل ٪۱۰ به‌دست آمده است.



شکل٤. منحنی توزیع دانه‌بندی ماسهٔ بابلسر (حمیدی ۲۰۰۹)

جدول ۲. زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک آزمایش شده در تراکم‌های مختلف

تراکم نسبی (%)	۳۰	۵۰	۷۰
زاویه اصطکاک داخلی (φ)	۳۱°	۳۳°	۳٤°

جدول ۳. مشخصات ماسهٔ بابلسر (حمیدی ۲۰۰۹)

Soil name	G_s	e_{max}	e_{min}	$\gamma_{d\,max}\,(kN/m^3)$	$\gamma_{d\,min}\,(kN/m^3)$	C_u	C_c
SP	۲/۷٤	۰/۷۵	۰/۵۰	۱۸ /۳	۱۵/۷	۱/۷۵	۰/۸۹

نتایج حاصل از بررسی‌های آزمایشگاهی

با مروری که بر تاریخچهٔ تعیین ظرفیت باربری پی‌های مجاور شیب صورت گرفته است، مشخص شده است که هنوز بین محققان، درتعیین ضرایب ظرفیت باربری اختلاف نظر وجود دارد که علت آن هم همان فرضیات ساده کننده مختلف و روش‌های متفاوت برای محاسبه این ضرایب است. در این بین استفاده از روش‌های تجربی شامل ساخت مدل‌های واقعی و یا مدل‌های

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2695]

کوچک مقیاس مناسب‌ترین راه برای بررسی صحت و میزان دقت نتایج روش‌ها و تئوری‌های ارائه شده است. روش ایده‌آل برای بررسی مسائل مهندسی پی شامل روش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی با مقیاس واقعی است. با این حال این روش‌ها مشکلات عملی و اقتصادی خود را دارند. این مشکلات استفاده از این روش‌ها را محدود و کم می‌کند. برای رفع این مشکلات مدل‌های با مقیاس کوچک به‌عنوان جای‌گزین به‌کار گرفته می‌شود، که این مدل‌ها نیز محدودیت‌هایی مانند شرایط مرزی جعبه آزمایش، اندازه پی، دست‌خوردگی نمونه و تنظیم و راه‌اندازی دستگاه آزمایش را دارند.

در شکل ۵ نمونه‌ای از نتایج آزمایشگاه ارائه شده است. در این شکل تغییرات تنش بر حسب نشست برای شرایطی که زاویهٔ شیب ٤٥ درجه و فاصلهٔ پی از لبه شیب بین ۰,۵b تا ۳b بوده است، ارائه شده است. نظیر این نمودارها برای سایر نمونه‌ها نیز استخراج شده و در این تحقیق استفاده شده است.

۱. بررسی اثر فاصلهٔ لبه پی تا شیب بر روی ظرفیت باربری

در شکل ٦ تغییرات ظرفیت باربری پی در برابر نسبت فاصله (b/B) برای سه شیب مختلف نمایش داده شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش فاصلهٔ پی از لبه شیب، ظرفیت باربری پی به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که برای شیب ٦۰ درجه، وقتی فاصلهٔ پی تا لبه شیب از ۰/۵B به ۳B افزایش می‌یابد ظرفیت باربری پی به‌میزان سه برابر افزایش می‌یابد. برای شیب‌های ٤٥ و ۳۰ درجه و با کاهش شیب همین افزایش مقدار کم‌تری خواهد داشت و به‌میزان ۲ تا ۳ برابر به‌دست خواهد آمد.

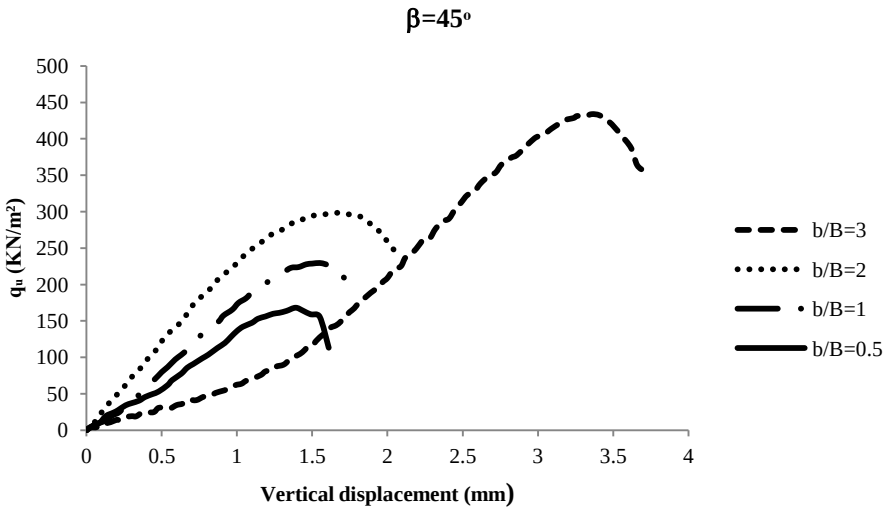
حال بر اساس نتایج به‌دست آمده و ایجاد هم‌بستگی بین داده‌ها، می‌توان رابطهٔ ظرفیت باربری را بدین‌صورت تعریف کرد:

$$q_u = c_1\left(\frac{b}{B}\right) + c_2 \qquad (۱)$$

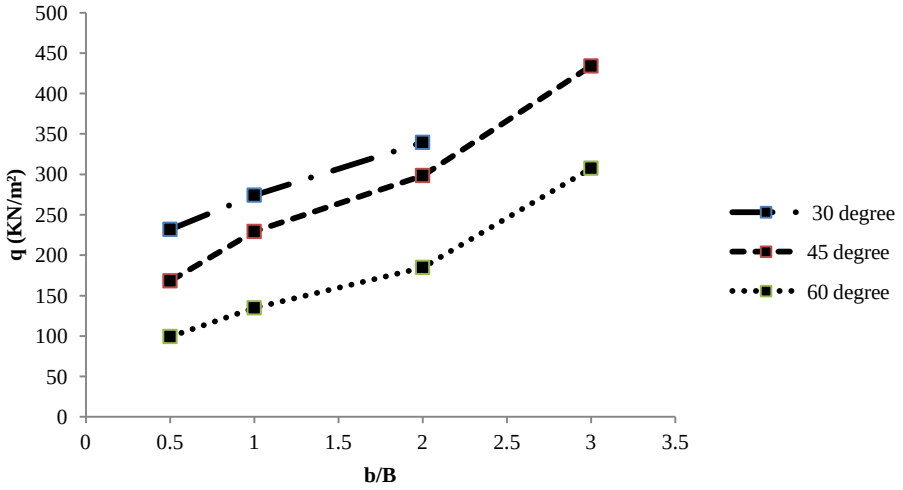
برای به‌دست آوردن ثابت‌های c_1 و c_2 می‌توان از برازش خط بر نتایج شکل٦ استفاده کرد. در این صورت داریم:

$$۳۰^\circ \rightarrow q_u = ۷۰/۸۱\left(\frac{b}{B}\right) + ۱۹۹/۲۵ \qquad (۲)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2695]



شکل ۵. نمودار تغییرات تنش در برابر نشست برای شیب با زاویهٔ ٤٥ درجه



شکل٦. تأثیر فاصلهٔ لبه پی تا شیب بر روی ظرفیت باربری به‌ازای زاویه‌های مختلف برای شیب

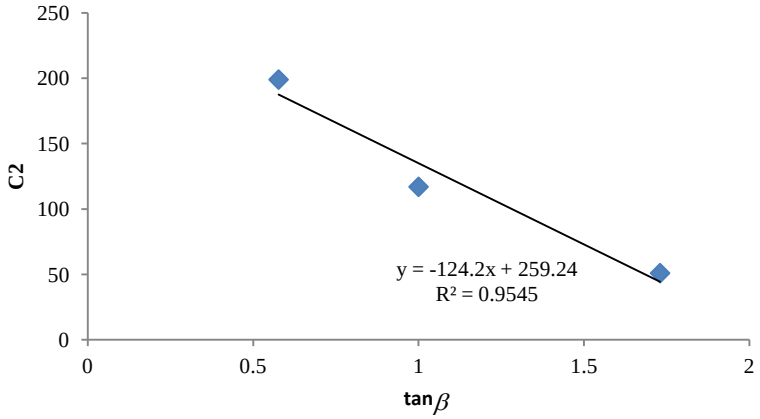
$$۴۵^{\circ} \rightarrow q_u = ۱۰۲/۰۱\left(\frac{b}{B}\right) + ۱۱۶/۷۴ \qquad (۳)$$

$$۶۰^{\circ} \rightarrow q_u = ۸۰/۳۵\left(\frac{b}{B}\right) + ۵۱/۰۵ \qquad (٤)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2695]

برای پارامتر c_1، سه عدد ۷۰/۸۱ ۱۰۲/۰۰۱ و ۸۰/۳۵ به‌دست می‌آید که به‌طور میانگین و با توجه به این‌که در نمودار برای ۳۰ درجه فاصلهٔ ۳ برابر عرض پی وجود ندارد که خط برازش شده از آن بگذرد، می‌توان مقدار آن را معادل ۱۰۰ در نظر گرفت که این عدد برازش خوبی با نمودارها داشته است. هم‌چنین مقدار پارامتر c_2، نیز مانند شکل ۷ از برازش خط بین نقاط به‌دست آمده از c_2های مختلف سه معادله بالا و زاویهٔ شیب به‌صورت معادلهٔ (۵)، که معادلهٔ یک خط است به‌دست می‌آید:

$$c_2 = -124/2 \tan\beta + 259/24 \qquad (۵)$$



شکل ۷. نحوهٔ اسخراج معادلهٔ (۵) برای تعیین ضریب c_2 در رابطهٔ (۱)

حال با جای‌گذاری c_1 و c_2 در رابطهٔ ۱، که رابطهٔ هم‌بستگی بین ظرفیت باربری و فاصلهٔ پی از شیب برای ماسه با خصوصیات این تحقیق و تحت دانسیتهٔ نسبی ٪۵۰ و شرایط اعمال شده است، می‌توان این رابطه را پیشنهاد کرد:

$$q_u = ۲۵۹ + ۱۰۰\left(\frac{b}{B}\right) - ۱۲۴(\tan\beta) \qquad (٦)$$

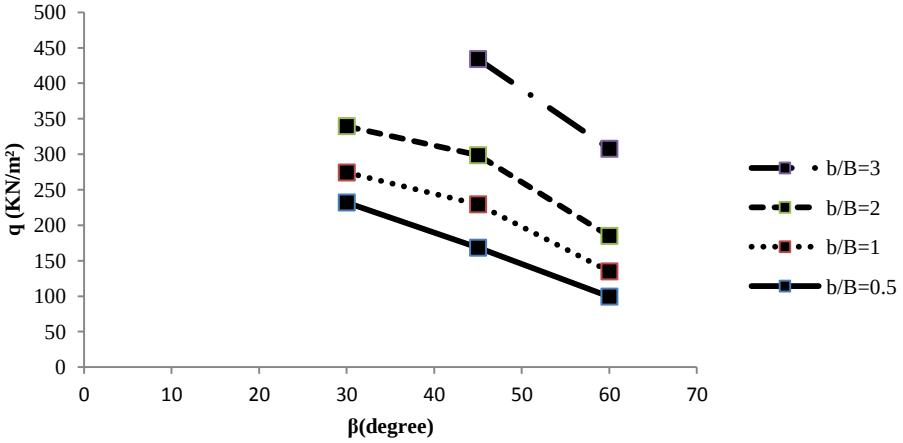
در این رابطه q_u ظرفیت باربری پی در مجاورت شیب با زاویهٔ β بر حسب کیلونیوتن بر متر مربع به‌دست می‌آید.

۲. بررسی اثر زاویه شیب با افق بر روی ظرفیت باربری

در شکل ۸ تغییرات ظرفیت باربری پی در برابر زاویهٔ شیب به‌ازای فاصله‌های مختلف پی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2695]

از لبهٔ شیب نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که با افزایش زاویهٔ شیب با محور افقی ظرفیت باربری با روند تقریباً خطی کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که در تمامی موارد با افزایش زاویهٔ از ۳۰ به ۶۰ درجه، ظرفیت باربری بیش از ۵۰ درصد کاهش یافته است.



شکل ۸. اثر زاویهٔ شیب با افق بر روی ظرفیت باربری به‌ازای مقادیر مختلف b/B

۳. بررسی اثر شیب بر روی ضریب N_γ

در شکل ۹ محور قائم نشان‌دهندهٔ پارامتر N'_γ/N_γ است، که N_γ ضریب ظرفیت باربری در حالت افقی و بدون شیب، و N'_γ ضریب ظرفیت باربری در حالت پی در مجاورت شیب است. چنان‌که مشاهده می‌شود با افزایش فاصلهٔ لبه پی تا شیب این پارامتر به یک نزدیک‌تر می‌شود که نشان‌دهندهٔ کاهش اثر شیب است.

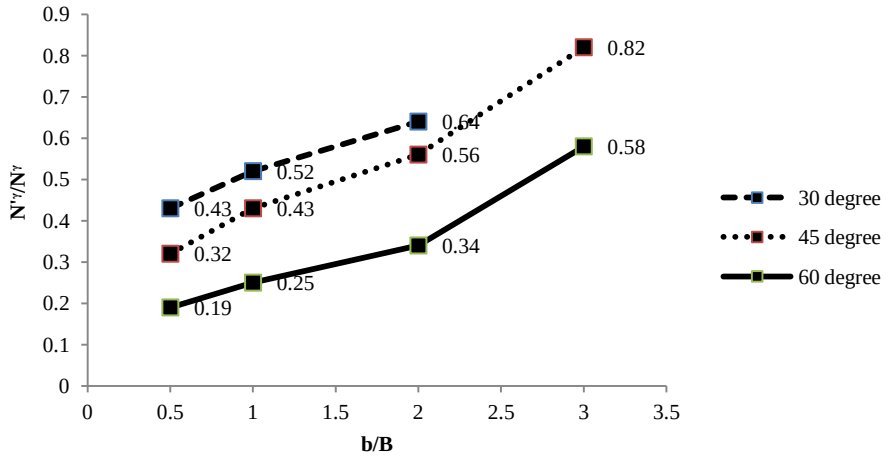
بر اساس نتایج به‌دست آمده و ایجاد هم‌بستگی بین داده‌ها، می‌توان نسبت N'_γ/N_γ را بدین‌صورت تعریف کرد:

$$\frac{N'_\gamma}{N_\gamma} = m\left(\frac{b}{B}\right)n \qquad (۷)$$

برای به‌دست آوردن ثابت‌های m و n می‌توان از برازش خط بر نتایج شکل ۹ استفاده کرد. در این صورت داریم:

$$۳۰^\circ \rightarrow \frac{N'_\gamma}{N_\gamma} = ۰/۱۳۷\left(\frac{b}{B}\right) + ۰/۳۷ \qquad (۸)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2695]



شکل ۹. تأثیر شیب بر روی ضریب N_γ به‌ازای زاویه‌های مختلف شیب

$$۴۵^\circ \rightarrow \frac{N'_\gamma}{N_\gamma} = ۰/۱۹۲\left(\frac{b}{B}\right) + ۰/۲۲ \qquad (۹)$$

$$۶۰^\circ \rightarrow \frac{N'_\gamma}{N_\gamma} = ۰/۱۵\left(\frac{b}{B}\right) + ۰/۰۹ \qquad (۱۰)$$

برای پارامتر m، سه عدد ۰/۱۳۷، ۰/۱۹۲ و ۰/۱۵ به‌دست می‌آید که به‌طور میانگین می‌توان مقدار آن را معادل ۰/۱۵۹ در نظر گرفت. مقدار پارامتر n نیز مانند شکل ۱۰ از برازش خط بین نقاط به‌دست آمده از nهای مختلف سه معادله بالا و زاویهٔ شیب بر حسب رادیان به‌صورت معادلهٔ (۱۱)، که معادلهٔ یک خط است به‌دست می‌آید. در این رابطه β زاویهٔ شیب بر حسب رادیان است.

$$n = -۰/۵۳۵\beta + ۰/۶۴ \qquad (۱۱)$$

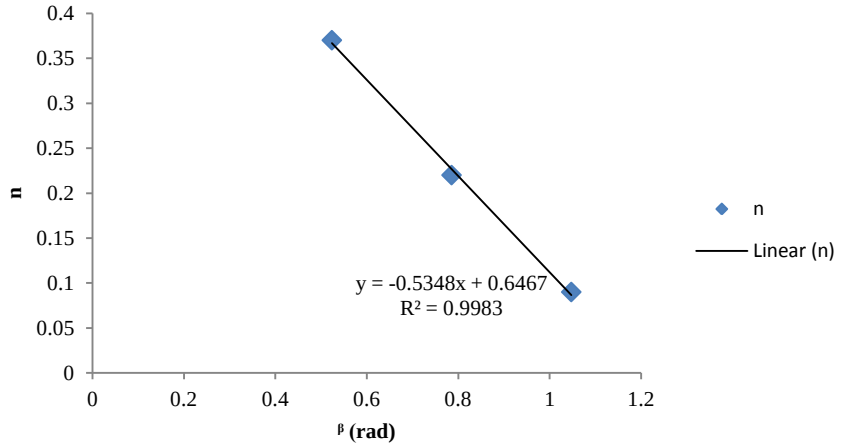
حال با جای‌گذاری n در رابطهٔ (۷) داریم:

$$\frac{N'_\gamma}{N_\gamma} = ۰/۱۵۹\left(\frac{b}{B}\right) + (-۰/۵۳۵\beta + ۰/۶۴) \qquad (۱۲)$$

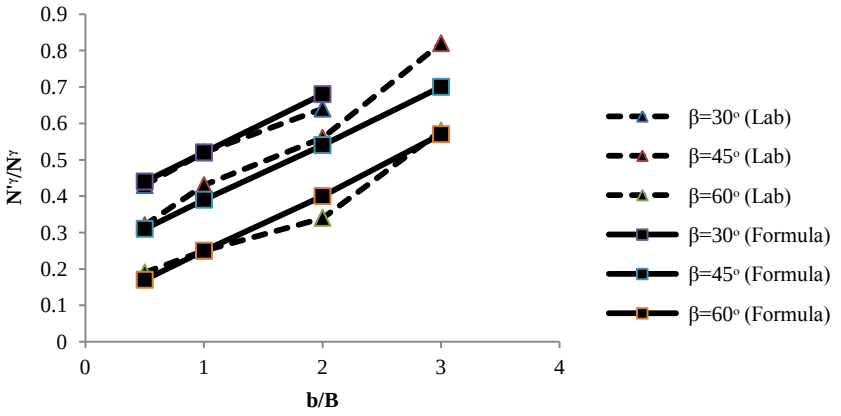
این رابطه را برای سه زاویهٔ ٤٥،۳۰،٦۰ ترسیم کرده و گراف به‌دست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد. چنان‌که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، انطباق خوبی بین نتایج ترسیم شده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2695]

وجود دارد که درصد خطا در بعضی نقاط حداکثر به ۱۲درصد میرسد و در بعضی نقاط این درصد به‌صفر می‌رسد. که b فاصلهٔ لبه پی تا شیب، B عرض پی و β زاویهٔ شیب با افق، و واحد آن رادیان است.



شکل ۱۰. نحوهٔ استخراج معادلهٔ (۱۱) برای تعیین ضریب n در رابطهٔ (۷)



شکل ۱۱. مقایسهٔ نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از رابطهٔ (۱۲)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2695]

مقایسهٔ رابطه پیشنهادی با رابطهٔ مایرهوف

در جدول ٤ نتایج رابطه پیشنهادی برای تأثیر ضریب شیب بر ظرفیت باربری با رابطهٔ مایرهف[1] (۱۹٦۳) در شرایط این تحقیق ارائه شده است.

جدول ٤. مقایسهٔ نتایج N'_γ/N_γ حاصل از رابطهٔ پیشنهادی و مقادیر توصیه شده سایر محققان

Dr=٥٠% , ϕ=۳۳°				
		Mayerhof (1963)	Experimental data	Proposed Formula (Eq. (4))
β=۳۰°	b/B=۰/٥	۰/۳	۰/٤۳	۰/٤٤
	b/B=۱	۰/٤۲	۰/٥۲	۰/٥۲
	b/B=۲	۰/٥۷	۰/٦٤	۰/٦۸

نتایج ارائه شده حاکی از آن است که رابطهٔ پیشنهادی همواره نتایجی بیش‌تر از رابطهٔ میرهف (۱۹٦۳) به‌دست می‌دهد. به‌عبارت دیگر رابطهٔ مذکور محافظه‌کارانه ارائه شده است.

نتیجه‌گیری

در این بررسی چندین آزمایش بارگذاری بر لبه شیب انجام شده و نهایتاً پس از تحلیل نتایج حاصل، این دست‌آوردها برای این تحقیق به‌دست آمد:

۱. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با افزایش فاصله پی از لبه شیب، ظرفیت باربری پی به‌صورت خطی افزایش یافته و این افزایش به‌میزان ۲ تا ۳ برابر خواهد بود.

۲. بین ظرفیت باربری و فاصلهٔ پی از لبه شیب برای این تحقیق می‌توان رابطهٔ (٦) را پیشنهاد کرد:

$$q_u = ۲٥۹ + ۱۰۰\left(\frac{b}{B}\right) - ۱۲۴(\tan\beta) \qquad (٦)$$

۳. با افزایش زاویهٔ شیب با محور افقی ظرفیت باربری با روند تقریباً خطی کاهش می‌یابد. به‌طوری که با افزایش زاویهٔ شیب از ۳۰ به ٦۰ درجه، ظرفیت باربری بیش از ٥۰ درصد کاهش یافته است.

۱. Mayerhof

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2695]

٤. با افزایش فاصلهٔ لبه پی تا شیب ظرفیت باربری پی افزایش می‌یابد و برای بیان بهتر این موضوع از نسبت $N'_\gamma/\mathrm{N}_\gamma$ استفاده شده است. رابطهٔ زیر که در شرایط این تحقیق به‌دست آمده است، رابطهٔ بین $N'_\gamma/\mathrm{N}_\gamma$ و فاصلهٔ لبه پی تا شیب و زاویهٔ شیب با افق را نشان می‌دهد:

$$\frac{N'_\gamma}{N_\gamma} = ۰/۱۵۹\left(\frac{b}{B}\right) + (-۰/۵۳۵\beta + ۰/۶۴) \qquad (۱۲)$$

منابع

1. Terzaghi K., "Theoretical Soil Mechanics", Wiley, New York (1943).
2. Meyerhof G. G., "The ultimate bearing capacity of foundations on slopes" Proc., 4th Int. Conf. on Soil Mech. and Found.Engng., London, Vol.1 (1957) 384-386.
3. Hansen J. B., "A revised and extended formula for bearing capacity", Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, Denmark, Bulletin 28 (1970) 5-11.
4. Vesic A. S., "Analysis of ultimate loads of shallow foundations", J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol.99, SM1 (1973) 45-73.
5. Saran S., Sud V. K., Handa S. C., "Bearing capacity of footings adjacent to slopes", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.115 (1989) 553-573.
7. Yetimoglu T., Wu J., Saglamer A., "Bearing Capacity of Rectangular Footings on Geogrid-Reinforced Sand", J. Geotech. Engrg,Vol.120 (1994) 2083-2099.
8. Chul Shin E., Das B. M., "Ultimate bearing capacity of strip foundation on geogrid-reinforced clay slope", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol.2 (1998) 481-488.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2695]

9.Yoo C., "Laboratory investigation of bearing capacity behaviour of strip footing on geogrid reinforced sand slope", Geotextiles and Geomembranes, Vol.19 (2001) 279-298.

10. EI Sawwaf M., "Behaviour of strip footing on geogrid reinforced sand over a soft clay slope", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 25 (2007) 50-60.

11. Bransby MF., Davidson C., "The effect of foundation fixity on their capacity adjacent to slopes", Proceedings of theBGA International Conference on Foundations, Dundee, Scotland (2008) IHS BRE Press.

12. Choudhary A. K., Jha J. N., Gill K. S., "Laboratory investigation of bearing capacity behavior of strip footing on reinforced flyash slope" Geotextiles andGeomembranes, Vol. 28 (2010) 393-402.

13. Alamshahi S., Hataf N., "Bearing capacity of strip footings on sand slopes rein-forced with geogrid and grid anchors", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 27 (2009) 217-226.

١٤. بهره‌مندجوی آ.، *بررسی ظرفیت باربری پی نواری در مجاورت شیب ماسه‌ای مسلح به‌روش آزمایشگاهی*، همایش ملی عمران و توسعه پایدار (۱۳۸۹).

١٥. پنج‌تنی م.، *تعیین ظرفیت باربری پی‌ها روی سطح شیب‌دار با استفاده از روش آزمایشگاهی*، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش خاک و پی، به راهنمایی دکتر علی قنبری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی (۱۳۹۱).

16. Hamidi A., Yazdanjou V., Salimi S., N., "Shear strength characteristics of sand-gravel mixtures", International Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 3 (2009) 29-38.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2695]