

OHN10104310292

تحلیل عددی رفتار پی نواری واقع بر خاک‌های رسی زه‌کشی  
نشده با لایه بندی مورب

رضا پور حسینی اردکانی، سید عماد ملک سعیدی

استادیار، دانشکده عمران دانشگاه یزد، [r\\_porhoseini@yazduni.ac.ir](mailto:r_porhoseini@yazduni.ac.ir)

دانشجوی ارشد، مهندسی خاک و پی، دانشگاه یزد، [emadm.saeedi@yazduni.ac.ir](mailto:emadm.saeedi@yazduni.ac.ir)

N

[emadm.saeedi@yazduni.ac.ir](mailto:emadm.saeedi@yazduni.ac.ir)

خلاصه

تحلیل ظرفیت باربری نهایی شالوده‌های سطحی از جمله مسائل رایج و مورد بحث در علم ژئوتکنیک می‌باشد. در طبیعت لایه‌های آبرفتی عمدتاً به صورت گسسته و لایه‌ای وجود دارند که می‌توانند بر روی ظرفیت باربری شالوده اثر محسوسی بگذارند. وجه اشتراک اکثر مطالعات انجام شده، در نظر گرفتن لایه‌های خاک به صورت یکنواخت و افقی است. در واقعیت ممکن است شالوده سطحی بر روی خاک‌های رسی زه‌کشی نشده با لایه بندی مورب قرار بگیرد که این اثر در هیچ یک از مطالعات انجام شده لحاظ نشده است. در این مقاله اثر شیب لایه بندی خاک بر عملکرد پی‌های نواری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. با استفاده از نتایج حاصل شده ضرایب باربری اصلاح شده و برای اطمینان از صحت نتایج بدست آمده، نتایج تحلیل با روش‌های عددی و نیمه تجربی ارائه شده در گذشته مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: پی نواری، خاک رسی زه‌کشی نشده، لایه بندی مورب، ضرایب باربری.

## 1. مقدمه

هدف از طراحی پی‌های مهندسی انتقال و توزیع بار وارده به خاک و یا سنگ زیرین پی است. هر طراحی نیازمند تأمین سه معیار طراحی است. ظرفیت باربری نهایی پی (معیار مقاومت)، نشست کلی و نسبی پی (معیار سرویس دهی) و توجیه اقتصادی مبنای طراحی یک پی هستند.

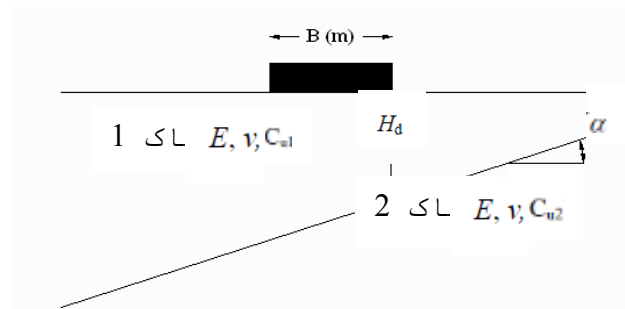
در طبیعت، نهشته‌های خاک عموماً به شکل لایه‌ای تشکیل می‌شوند. در نتیجه پی بر روی پروفیل خاک لایه‌ای قرار می‌گیرد که این امر بر عمق سطوح گسیختگی و ظرفیت باربری پی تأثیر گذار است. به طور سنتی، روش‌های تحلیلی برای ارزیابی ظرفیت باربری نهایی پی بر روی خاک‌های لایه استفاده شده است. برای مثال، برون و میرهوف [1]، چن [2]، هانا و میرهوف [3] روش‌هایی برای تعیین ظرفیت باربری پی ارائه نمودند. به مرور زمان و با پیشرفت علوم رایانه‌ای، روش اجزا محدود که قابلیت تطبیق با الگوهای رفتاری و هندسه پیچیده دارد، مورد توجه قرار گرفتند. گریفیتس [4]، برد و فریدمن [5]، مریفید و همکارانش [6]، ژو [7] از جمله کسانی بودند که با کمک روش اجزا محدود سعی در ارزیابی ظرفیت باربری نهایی پی سطحی در خاک‌های لایه‌ای کردند. روش‌های تحلیلی با فرض یکنواختی توده خاک بنا شده‌اند. به تعبیر دیگر مشخصات هر لایه خاک یکنواخت و همگن فرض شده‌اند. در این مقاله، با استفاده از نرم افزار FLAC 2D، اثر شیب دو لایه خاکی بر عملکرد پی‌های نواری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و سپس برای اطمینان از صحت نتایج بدست آمده، نتایج تحلیل با روش‌های عددی و نیمه تجربی ارائه شده در گذشته مقایسه شده است.

## 2. تعریف مسئله و مدل عددی

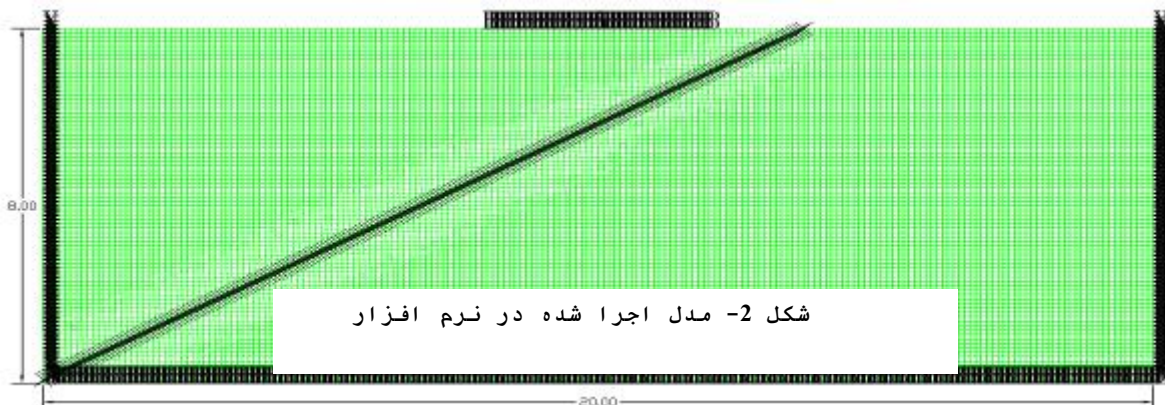
شکل 1 شالوده نواری با عرض  $B$  که بر روی لایه رس زهکشی نشده قرار دارد را نشان می‌دهد. به منظور بررسی اثر شیب بندی لایه‌های رسی، مطابق تعریف هان و جیانگ [8] از نسبت  $H_d/B$  استفاده شده است که در آن  $H_d$  حداقل فاصله از لبه شالوده تا روی لایه مورب است. در این شکل شیب لایه خاک با  $\alpha$  نمایش داده شده است.

برای مدل سازی، ابتدا دو مش بندی 180 در 80 و 200 در 80 مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. از آنجایی که اختلاف نتایج بدست آمده از دو تحلیل کمتر از 5% است در مدل سازی نهایی مسئله از مش بندی زیرتر استفاده شده است. شکل 2 مدل اجرا شده در نرم افزار را نشان می‌دهد.

همچنین برای تعریف صحیح مسئله، مرزهای عمودی مدل در راستای افقی گیر دار در نظر گرفته شده‌اند و مرز پایین مدل در دو راستای افقی و عمودی گیر دار شده است.



به منظور مدل موجود در نرم افزار به سبب بی‌ثباتی در ریزش در راستای افقی گیر دار شده‌اند و سپس سرعت یکنواختی به میزان  $2 \times 10^{-6}$  متر در هر گام در راستای عمود به این نقاط گره ای اعمال شده است. برآوردهای انجام شده نشان می‌دهد این میزان سرعت برای حداقل کردن اثر نیروی اینرسی کافی است. در نتیجه می‌توان ادعا نمود که بارگذاری انجام شده استاتیکی بوده است. لایه خاک فوقانی و تحتانی دارای مشخصات کشسان  $E_s = 10 \text{MPa}$ ,  $\nu_s = 0.3$  هستند. همچنین برای بررسی رفتار پلاستیک دو خاک از مدل رفتاری موهر کولمب استفاده شده است. پارامترهای مقاومت برشی به کار رفته در نرم افزار برای لایه‌های فوقانی و تحتانی به ترتیب برابر با  $c_u = 20 \text{kN/m}^2$  و  $c_u = 40 \text{kN/m}^2$  و  $c_u = 80 \text{kN/m}^2$  بوده‌اند.



$c_{u1}$  مقاومت زهکشی نشده لایه فوقانی و  $N'_c$  ضریب باربری اصلاح شده است.

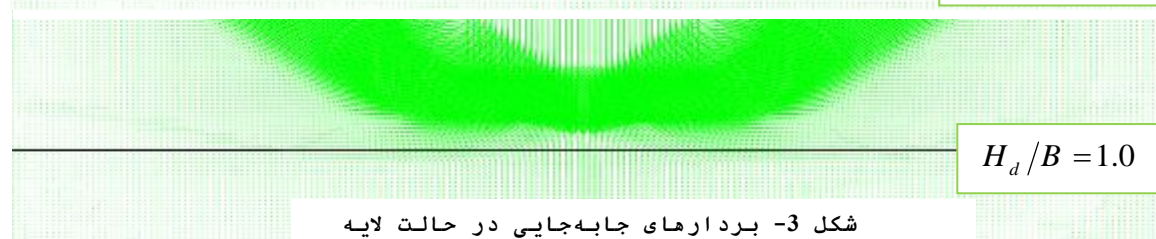
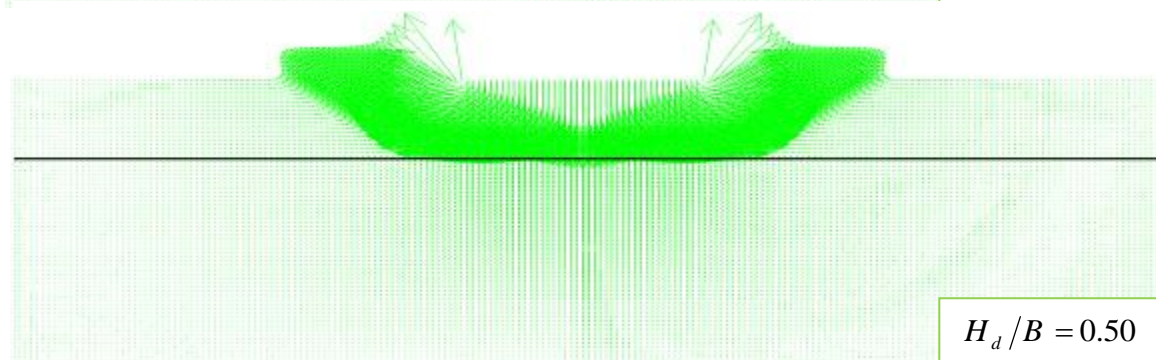
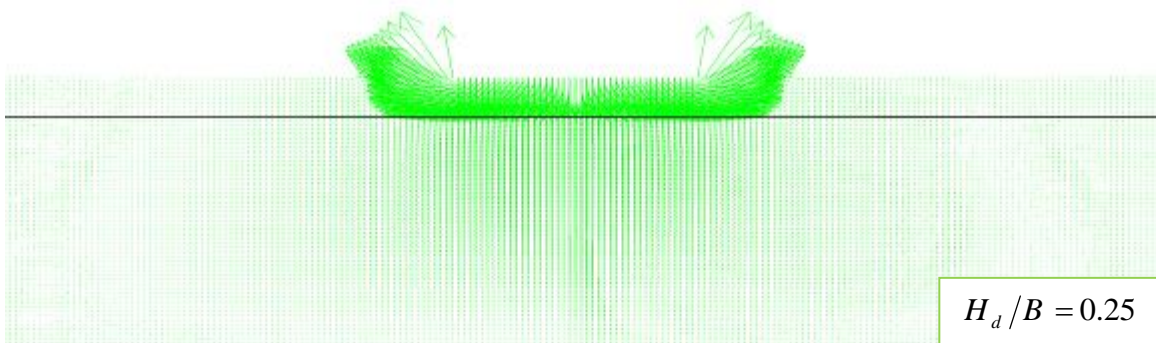
(1)

$$N'_c = \frac{q_u}{c_{u1}}$$

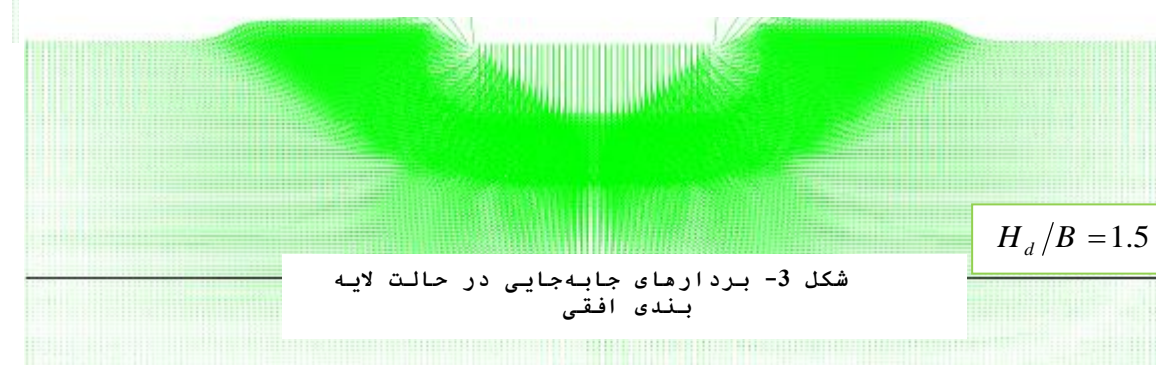
2. نتایج حاصل شده

در این بخش نتایج مطالعات پارامتری انجام شده بر روی مدل ارائه شده است. ضریب باربری اصلاح شده خاک برای نسبت‌های  $H_d/B = 0.25, 0.5, 1, 1.5$  و زوایای  $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  محاسبه شده است. برای اطمینان از صحت نتایج بدست آمده ضرایب باربری اصلاح شده با مقادیر موجود در ادبیات برای  $\alpha = 0^\circ$  مقایسه شده‌اند. شکل 3 بردارهای جابه‌جایی خاک زه‌کشی نشده ای را نشان می‌دهد که بر روی لایه‌ای افقی از خاک رسی قرار دارد. مشاهده می‌شود برای حالتی که خاک رسی ضعیف بر روی خاک رسی قوی قرار گرفته باشد  $(c_{u1}/c_{u2} p 1)$ ، ضریب باربری اصلاح شده  $(N'_c)$  با افزایش نسبت  $H_d/B$  کاهش می‌یابد. اگر خاک رسی قوی بر روی خاک ضعیف واقع شده باشد  $(c_{u1}/c_{u2} f 1)$ ، ضریب باربری اصلاح شده با افزایش نسبت  $H_d/B$  افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت  $H_d/B$  برای هر دو حالت، ضریب باربری اصلاح شده به مقدار حدی  $N_c = 2 + \pi$  نزدیک می‌شود. این امر نشان می‌دهد که رفتار مکانیسم

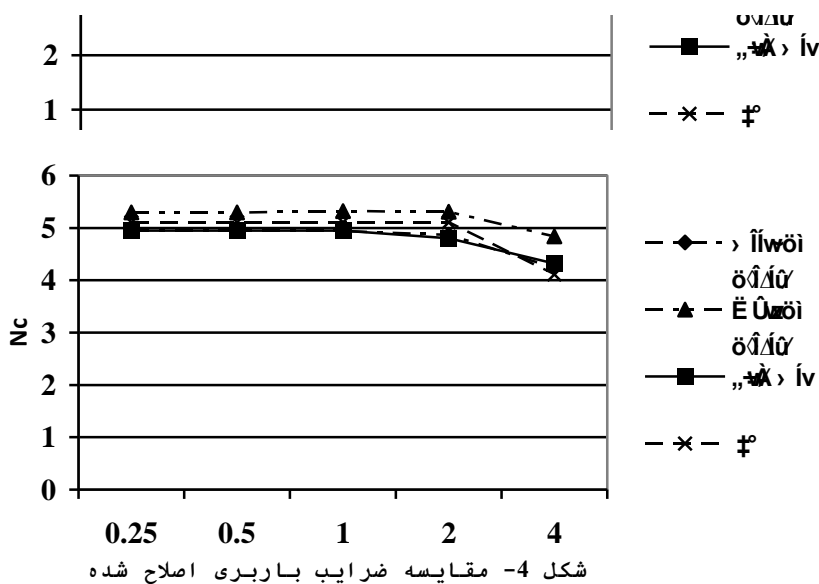
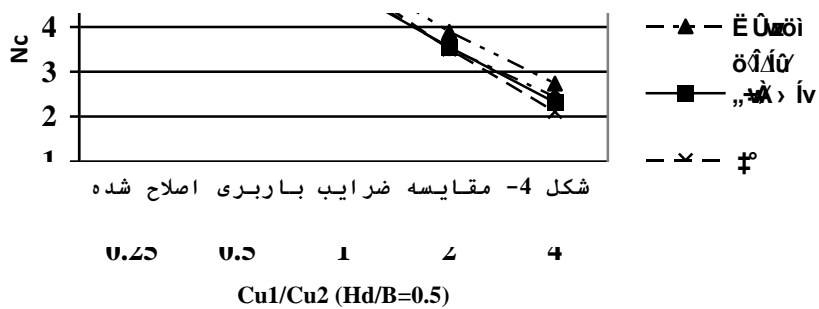
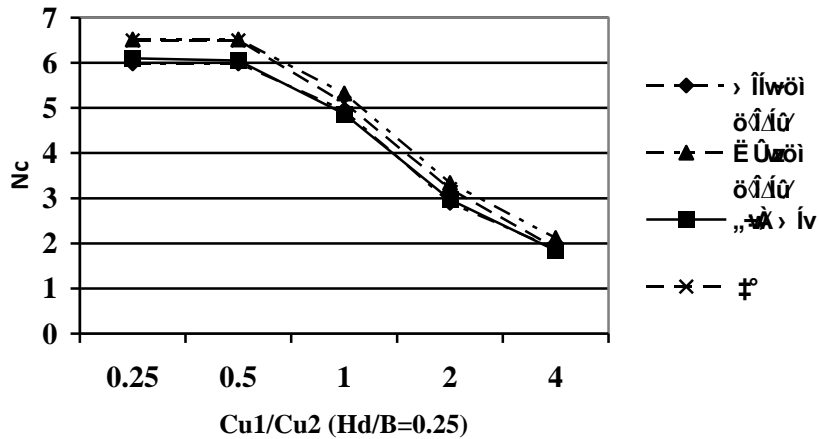
گس  
 بح  
 به



شکل 3- بردارهای جابه‌جایی در حالت لایه بندی افقی



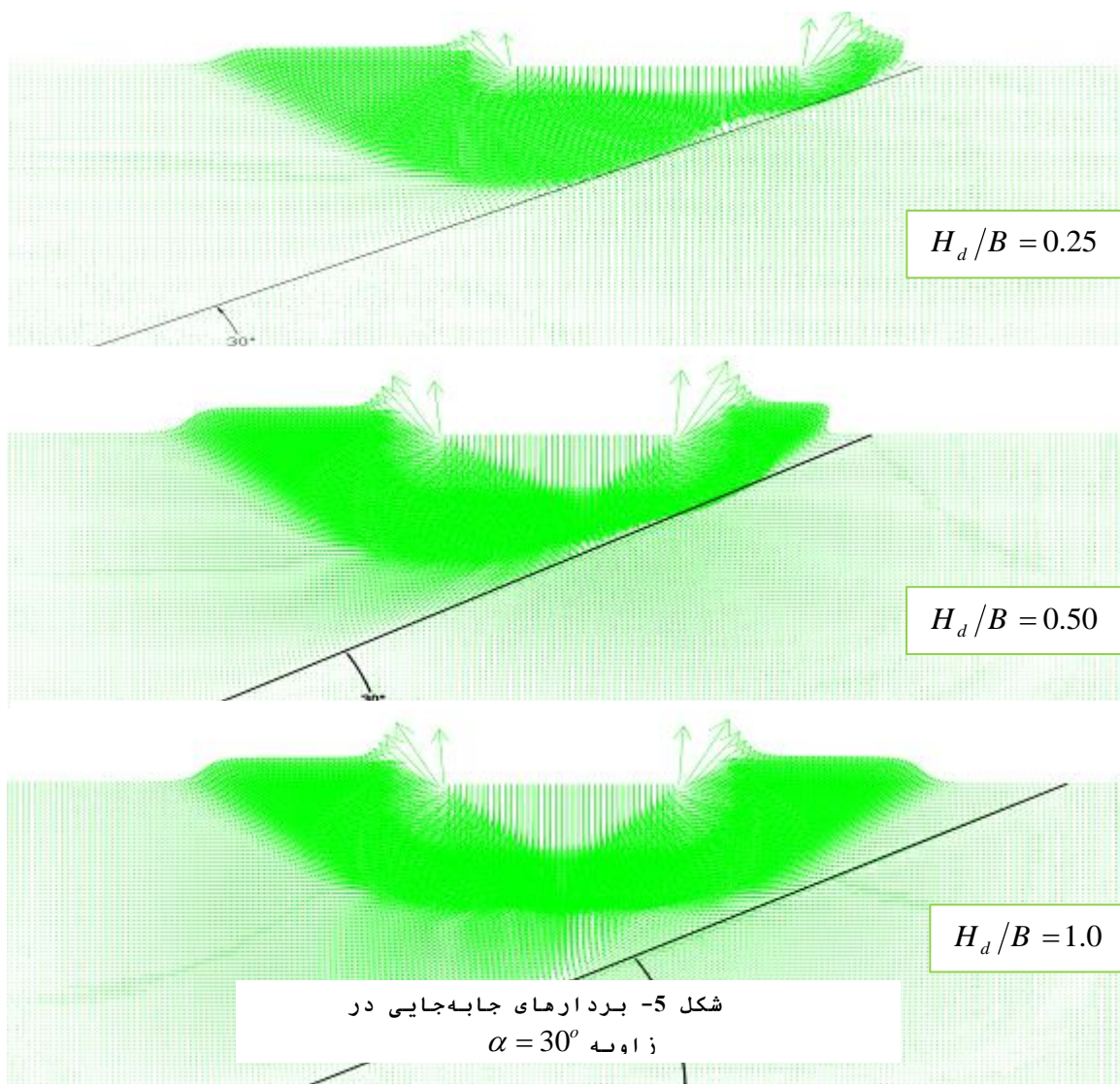
نتایج بدست آمده در این مقاله با نتایج حاصل شده توسط محققین دیگر مطابقت دارد. برای مثال مریغیلد و همکارانش حد بالا و پایین و میشلوفسکی [9] حد بالای ظرفیت باربری خاک لایه بندی شده افقی را بدست آوردند. همچنین ژو با به کار گیری روش اجزا محدود به بررسی ضرایب باربری اصلاح شده برای خاکهای رسی لایه بندی شده افقی پرداخت. شکل 4 مقایسه ای از نتایج بدست آمده در این مقاله با نتایج موجود در ادبیات را برای حالت لایه بندی افقی نشان می دهد.

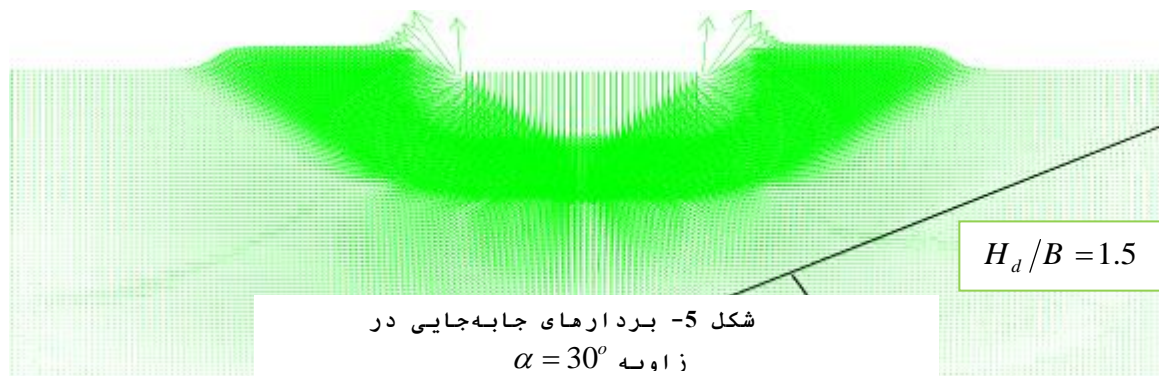


شکل 5، بردارهای جابه جایی خاک را در حالت لایه بندی شده مورب با زاویه  $\alpha = 30^\circ$  را نشان می دهد. در حالت  $c_{u1}/c_{u2} = 1$ ، به علت عدم تقارن هندسه مدل و بر

خلاف حالت افقی، بردارهای جابه‌جایی متقارن نخواهند بود. به تعبیر دیگر، وجود شیب لایه بندی، باعث می‌شود که ناحیه جابه‌جا شده در سمت چپ شالوده از ناحیه جابه‌جا شده در سمت راست آن بزرگتر باشد. با افزایش نسبت  $H_d/B$  اثر شیب لایه بندی خاک کاهش پیدا می‌کند و رفتار لایه‌های مورب با حالت افقی آن‌ها شباهت پیدا می‌کند. در حالت  $c_{u1}/c_{u2} f 1$ ، بردارهای جابه‌جایی نیز متقارن نخواهند بود. در این حالت، مکانیسم گسیختگی در لایه تحتانی گسترش پیدا می‌کند. اما به علت عدم تقارن در میزان سربار موجود بر روی لایه تحتانی و زیاد بودن مقاومت برشی در سمت چپ شالوده مدل شده نسبت به سمت راست آن، میزان گسترش ناحیه جابه‌جایی در سمت راست شالوده بیشتر است؛ لذا تورم خاک در سمت راست مدل بیشتر از سمت چپ آن مشهود خواهد بود. با افزایش نسبت  $H_d/B$  مشابه حالت قبل، اثر شیب لایه بندی کاهش پیدا می‌کند و در دو حالت مقدار ضریب باربری اصلاح شده به مقدار حدی  $2+\pi$  نزدیک می‌شود.

جدول 1، ضرایب باربری اصلاح شده را بر حسب تغییرات نسبت  $H_d/B$  و شیب لایه‌های رسی زه‌کشی نشده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اگر  $c_{u1}/c_{u2} p 1$  باشد، با افزایش شیب لایه بندی ضریب باربری اصلاح شده کاهش پیدا می‌کند و برای  $c_{u1}/c_{u2} f 1$  با افزایش شیب لایه بندی ضریب باربری اصلاح شده افزایش پیدا می‌کند. همچنین با زیاد شدن نسبت  $H_d/B$  اثر لایه بندی نامحسوس می‌شود و در نهایت ضریب باربری خاک به مقدار حدی  $2+\pi$  می‌رسد.





شکل 5- بردارهای جابه‌جایی در  
 زاویه  $\alpha = 30^\circ$

جدول 1- ضرایب باربری اصلاح شده .

$H_d/B$	$c_{u1}/c_{u2}$	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 10^\circ$	$\alpha = 20^\circ$	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 45^\circ$
0.25	0.25	6.10	5.52	5.29	5.17	5.20
	0.5	6.05	5.50	5.25	5.14	5.15
	1	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87
	2	2.97	3.10	3.33	3.45	3.60
	4	1.84	1.92	2.08	2.22	2.45
0.5	0.25	5.05	4.97	4.92	4.90	4.90
	0.5	5.03	4.97	4.92	4.90	4.90
	1	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87
	2	3.55	3.58	3.62	3.70	3.82
	4	2.32	2.34	2.45	2.61	2.78
1	0.25	5.01	5.01	5.01	5.01	5.01
	0.5	4.98	4.98	4.98	4.87	4.97
	1	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87
	2	4.51	4.25	4.26	4.27	4.27
	4	3.23	3.15	3.24	3.36	3.50
1.5	0.25	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95
	0.5	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95
	1	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87
	2	4.80	4.75	4.79	4.84	4.84
	4	4.32	4.04	4.08	4.13	4.28

### 3. نتیجه گیری

در این مقاله اثر لایه بندی مورب خاکهای رسی زه‌کشی نشده بر روی ظرفیت باربری پی‌های نواری به کمک نرم افزار FLAC مورد مطالعه قرار گرفت. ضرایب باربری اصلاح شده در حالت لایه بندی افقی و مورب تعیین شدند. نتایج تحلیل در حالت لایه بندی افقی با نتایج موجود در ادبیات مقایسه شد. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که اگر  $c_{u1}/c_{u2} \geq 1$  و  $H_d/B$  ثابت باشد، با افزایش شیب لایه بندی ظرفیت باربری کاهش پیدا می‌کند و اگر  $c_{u1}/c_{u2} < 1$  و  $H_d/B$  ثابت باشد، ظرفیت باربری با افزایش شیب لایه بندی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش  $H_d/B$  از اثر شیب لایه بندی کاسته می‌شود.

1. Brown, J.D. and Meyerhof, G.G. (1969),"Experiment Study of Bearing Capacity in Layered Clays,"Proc. Of 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil mechanics and Foundation Engineering, Mexico, pp.45-51.
2. Chen, W.F. and Davidson, H.L. (1973),"Bearing Capacity Determination by Limit Analysis"Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, **99** (6) , pp. 433-449.
3. Hanna, A.M. and Meyerhof, G.G. (1980),"Design Charts for Ultimate Bearing Capacity of Foundations on Sand Overlying Soft Clay "Canadian Geotechnical Journal, **17**, pp. 300-303.
4. Griffiths, D.V. (1982),"Computation of Bearing Capacity on Layered Soil,"Proc. Of 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Numerical Method in Geomechanics, Rotterdam, pp163-170.
5. Burd, H.J. and Frydman, S. (1997)," Bearing Capacity of Plane Strain Footings on Layered Soils " Canadian Geotechnical Journal, **34**, pp. 241-253.
6. Merifield, R.S., Sloan, S.W. and Yu, H.S. (1999),"Rigorous Plasticity Solutions for the Bearing Capacity of Two-layered Clays"Journal of Geotechnique, **49**(4) , pp. 471-490.
7. Zhu, M. (2004),"Bearing Capacity of Strip Footings on Two-layer Clay Soil by Finite Element Method,"Proc. Of ABAQUS Users, pp 777-787.
8. Han, J., Huange, J., and Parsons, R.L. (2007),"Influence of Bedrock Inclination on Elastic Settlements of Flexible Shallow Strip Foundation "Journal of Computers and Geotechnics, **34**(1) , pp. 53-56
9. Michalowski, R. L, (2002),"Collapse Load Over Two-layer Clay Foundation Soils "Journal of Soils and Foundations, **42**(1) , pp. 1-7