

## Evaluation of three-dimensional behavior of soil slopes under the influence of pore water pressure with Rosas software

Navid Ganjian\*<sup>1</sup>, Saeed HejaziRad<sup>2</sup>, Mohammad Naseri<sup>3</sup>

1- Assistant professor, Department of civil engineering, science and research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- PhD, Department of civil engineering, south branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Department of civil engineering, Hamedan branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

### ABSTRACT

Study of foundation bearing capacity and slope stability has always been a common and practical issue in geotechnical engineering. The combination of these two problems in the presence of pore water pressure adds to the complexity of the problem. In the present study, the effect of pore water pressure on the three-dimensional stability of slopes under concentrated load or the bearing capacity of rectangular foundations located in the vicinity of slopes has been investigated. Then, using a circular rupture mechanism and generalization of the program, the problem is analysed by the upper boundary limit analysis method, taking into account the pore water pressure in three dimensions. In this regard, with the expansion of the Rosas program as an infrastructure program, it has been able to consider the parameters related to water pressure. Considering that the effective variables, foundation and slope geometry, foundation distance from the sloping edge and soil strength parameters include adhesion and internal friction angle of the soil, the mentioned variables have been analysed to calculate the bearing capacity of the foundation located on the slope. In the discussion of the bearing capacity of the foundation located on the slope, as the foundation moves away from the edge of the gable, the effect of increasing the pore water pressure on the reduction of the bearing capacity of the foundation also increases.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 18 March 2021

**Revise Date:** 02 May 2021

**Accept Date:** 26 June 2021

### Keywords:

Three-dimensional stability of slopes

Rosas software

Pore water pressure

Upper boundary limit

Slope stabilization factor

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.277870.2394>

\*Corresponding author: navid ganjian  
Email address: n.ganjian@srbiau.ac.ir

## ارزیابی رفتار سه بعدی شیب های خاکی تحت تاثیر اضافه فشار آب حفره ای با نرم افزار رساس

نوید گنجیان<sup>۱\*</sup>، سعید حجازی راد<sup>۲</sup>، محمد ناصری<sup>۳</sup>

۱- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی عمران، تهران، ایران

۲- دکتری تخصصی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی عمران، تهران، ایران

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، گروه مهندسی عمران، همدان، ایران

### چکیده

همواره بررسی ظرفیت باربری پی و پایداری شیروانی‌ها جزء مسائل رایج و کاربردی در مهندسی ژئوتکنیک بوده است. ترکیب این دو مسئله در شرایط وجود فشار آب حفره ای بر پیچیدگی مسئله می‌افزاید. در تحقیق حاضر، تاثیر فشار آب حفره‌ای بر پایداری سه‌بعدی شیروانی‌های تحت اثر بار متمرکز و یا ظرفیت باربری پی‌های مستطیلی واقع در مجاورت شیروانی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه با استفاده از یک مکانیسم گسیختگی دورانی و تعمیم برنامه به تحلیل مسئله به روش آنالیز حدی مرز بالا با در نظر گرفتن فشار آب حفره‌ای بصورت سه‌بعدی پرداخته شده است. در این راستا، با گسترش برنامه رساس به عنوان برنامه زیربنایی، قابلیت در نظر گرفتن پارامترهای مربوط به فشار آب را پیدا کرده است. با توجه به اینکه متغیرهای اثر گذار، هندسه پی و شیروانی، فاصله پی از لبه شیروانی و پارامترهای مقاومتی خاک شامل چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌باشد، برای محاسبات ظرفیت باربری پی واقع بر روی شیروانی متغیرهای اشاره شده مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. در بحث ظرفیت باربری پی واقع بر روی شیروانی با دور شدن پی از لبه شیروانی، تاثیر افزایش فشار آب حفره ای بر کاهش ظرفیت باربری پی نیز بیشتر می‌شود، تاثیر فشار آب حفره‌ای بر کاهش ظرفیت باربری پی، در شیب‌های ملایم تر بیشتر خواهد بود، همچنین تاثیر فشار آب حفره‌ای در پی مربعی شکل در مقایسه با پی مستطیلی با نسبت ابعاد بزرگتر کمتر می‌باشد. تاثیرات فشار آب حفره‌ای بر روی ظرفیت باربری پی واقع بر روی شیروانی با بیشتر شدن زاویه اصطکاک داخلی خاک بیشتر می‌گردد.

کلمات کلیدی: پایداری سه‌بعدی شیروانی‌ها - برنامه رساس - فشار آب حفره‌ای - آنالیز حدی مرز بالا - ضریب پایداری شیروانی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.277870.2394">https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.277870.2394</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.277870.2394	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	۱۴۰۰/۰۴/۰۵	۱۴۰۰/۰۴/۰۵	۱۴۰۰/۰۲/۱۲	۱۳۹۹/۱۲/۲۸
نوید گنجیان					*نویسنده مسئول:	
n.ganjian@srbiau.ac.ir					پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

یکی از مسائلی که در علم مهندسی خاک و ژئوتکنیک بسیار مورد بحث قرار گرفته و سالها مورد توجه مهندسان و محققان بوده تعیین ظرفیت باربری پی‌های سطحی و تحلیل پایداری شیروانی‌های خاکی می‌باشد. ترکیب این دو مسئله، یعنی تحلیل پایداری شیروانی‌های تحت اثر بارهای متمرکز و یا تعیین ظرفیت باربری پی‌های واقع در نزدیکی لبه شیروانی‌ها، که در موارد بسیاری کاربرد دارد، بر پیچیدگی مسئله می‌افزاید و برای و شناخت بیشتر و تحقیق و بررسی رفتار آنها اعم از مقدار باری که می‌تواند تحمل کنند یا شکل گسیختگی آنها و نرخ تغییرات ظرفیت باربری و ضریب پایداری و بررسی تغییرات آنها با شکل و هندسه شیروانی پی و همچنین نرخ تغییرات آنها با پارامترهای مقاومتی خاک و ارتباط آنها با یکدیگر مستلزم شناخت مفاهیم مکانیک خاک و استفاده از روشهای تحلیلی دقیق است. در دهه‌های گذشته تحقیقات گسترده‌ای در زمینه پایداری شیروانی‌ها و یا ظرفیت باربری پی‌های نواری انجام شده است، اما دامنه تحقیقات انجام شده در مورد ترکیب این دو مسئله، حتی در حالت دویبعدی، بسیار محدود بوده است.

تحلیل و بررسی پایداری شیروانی بصورت دو بعدی و با اعمال فرض برقراری ارضای شرایط کرنش مسطح در بسیاری از مواقع به جواب صحیح و دقیقی نرسیده و جواب بدست آمده با واقعیت متفاوت بوده و لزوم بررسی سه‌بعدی در این حالات کاملاً محسوس است. اینگونه حالات معمولاً در یکی از سه گروه زیر جای دارند:

الف- شیروانی‌های تحت اثر بارهای متمرکز

ب- شیروانی‌های به شکل منحنی در پلان

ج- شیروانی‌های با نسبت طول به ارتفاع کم

محققان در سال‌های اخیر، الگوریتم‌هایی مبتنی بر روش‌های تحلیلی و یا عددی جهت بررسی پایداری شیروانی‌ها در حالت سه‌بعدی ارائه نموده اند که اغلب برای تحلیل پایداری شیروانی‌ها در شرایط خاص کاربرد دارند. ظرفیت باربری یا بار حدی پی‌های مستطیلی واقع بر زمین‌های مسطح (محیط نیمه‌بینهایت) معمولاً با اعمال ضرایب شکل حاصل از روابط نیمه‌تجربی بر بار حدی پی‌های نواری محاسبه می‌گردد. این ضرایب تابع مشخصات خاک و شکل پی (نسبت طول به عرض پی  $L/B$ ) می‌باشند.

در زمینه ظرفیت باربری پی مستطیلی واقع در نزدیکی لبه شیروانی‌ها تحقیقات اندکی انجام شده است. در این حالت بار حدی پی کاهش یافته و تعیین آن به صورت دقیق، مستلزم استفاده از تحلیل‌های سه‌بعدی است. میزان تاثیر شکل پی (ضرایب شکل) بر ظرفیت باربری آن در این حالت علاوه بر مشخصات خاک، به عواملی نظیر هندسه شیروانی، فاصله پی از لبه شیب و عمق پی نیز بستگی دارد. علاوه بر عوامل مذکور، بالا بودن تراز آب زیرزمینی و یا بعبارت دیگر، فشار آب حفره‌ای نیز از عوامل موثر بر ضریب اطمینان پایداری شیروانی‌ها و ظرفیت باربری پی‌های واقع بر آنها می‌باشد. در زمینه بررسی اثر فشار آب حفره‌ای بر پایداری شیروانی‌های تحت اثر بار متمرکز تاکنون تحقیقات بسیار محدودی انجام گرفته است.

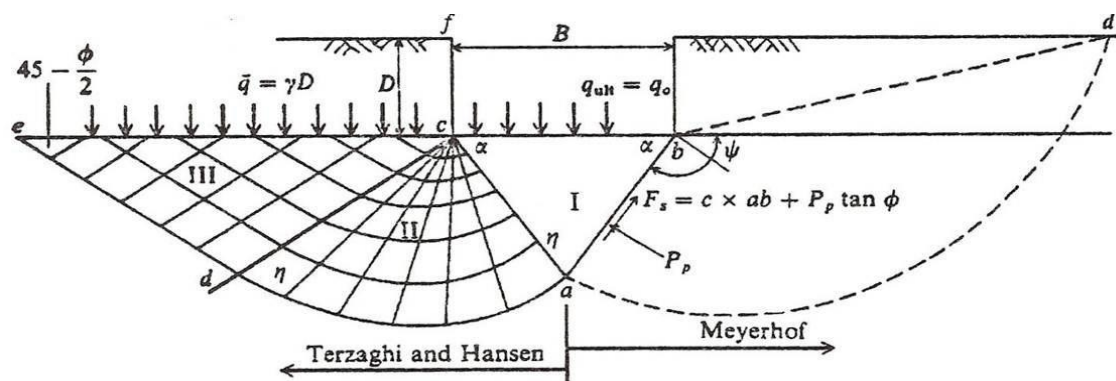
رفتار شیروانی‌های تحت اثر بارهای متمرکز در شرایط سه‌بعدی توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته و مطالعاتی در این زمینه انجام شده است که از جمله این تحقیقات می‌توان به تحقیقات انجام شده در دانشکده فنی دانشگاه تهران اشاره نمود. در تحقیق مذکور، جزئیات مکانیسم دورانی پیشنهادی متشکل از یک بلوک دارای ترکیبی از سطوح جانبی مختلف ارائه شده و الگوریتم و فرمولاسیون مبتنی بر روش تحلیل عددی مرز بالا جهت بررسی پایداری سه‌بعدی شیروانی و نیز تعیین ظرفیت باربری سه‌بعدی شیروانی‌های خطی و یا محدب در پلان شرح داده شده است [۱]. ولی نکته‌ای که در این تحقیق مجال بحث و بررسی پیدا نکرده و جای خالی آن کاملاً محسوس است، بررسی اثر فشار آب حفره‌ای در پایداری شیروانی‌ها می‌باشد. با توجه به اهمیت موضوع و احتمال بالا بودن سطح آب در مجاورت

شیروانی‌ها، در تحقیق حاضر مکانیسم دورانی دارای سطوح جانبی مختلف مورد استفاده قرار گرفته و فرمولاسیون مبتنی بر این مکانیسم برای بررسی اثر افزایش فشار آب حفره‌ای بر پایداری سه‌بعدی شیروانی تحت اثر بار متمرکز و نیز تعیین ظرفیت باربری پی‌های مستطیلی تحت اثر بار خارج از مرکز واقع در بالادست شیروانی‌ها تعمیم داده می‌شود.

جهت بررسی دقیق ظرفیت باربری پی‌های مستطیلی واقع در مجاورت شیروانی‌ها تحت اثر بار خارج از مرکز، استفاده از مکانیسم‌های گسیختگی سه‌بعدی دورانی ضروری است. با توجه به اینکه در این زمینه تحقیقات بسیار کمی انجام شده است. در تحقیق حاضر به منظور تکمیل مطالعات پیشین انجام شده، اهدافی از جمله، ارائه و بررسی مکانیسم‌های گسیختگی مناسب جهت بررسی ظرفیت باربری پی‌های مستطیلی تحت بارگذاری مرکب واقع در لبه شیروانی‌های خاکی با در نظر گرفتن اثر فشار آب حفره‌ای، توسعه نرم افزاری مبتنی بر مکانیسم گسیختگی پیشنهادی در تحقیقات قبلی به منظور تحلیل پایداری سه‌بعدی شیروانی‌های تحت اثر بار متمرکز و یا تعیین ظرفیت باربری پی‌های مستطیلی واقع در بالادست شیروانی‌ها با اعمال اثر فشار آب حفره‌ای و ارائه نمودارهای کاربردی جهت تعیین ظرفیت باربری پی‌های مستطیلی واقع در نزدیکی لبه شیروانی‌ها که تحت تاثیر فشار آب حفره‌ای بوده و بررسی تاثیر فشار آب حفره‌ای، با بکارگیری نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده با استفاده از نرم افزار بررسی شده است.

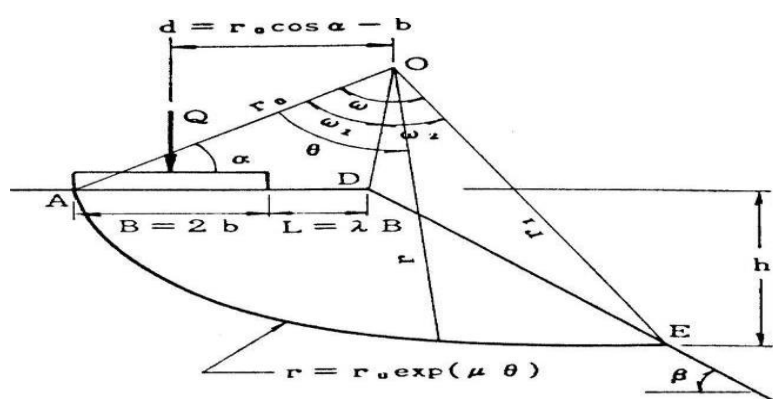
## ۲- مروری بر ادبیات و پیشینه تحقیق

با توجه به اینکه اثر روش‌های تحلیل سه بعدی ارائه شده تعمیم روش‌های دو بعدی می‌باشد و از طرف دیگر یکی از روش‌های ارزیابی تحلیل‌های سه‌بعدی، مقایسه نتایج آنها با نتایج تحلیل‌های دوبعدی (در حالت خاص) است که سابقه نسبتاً بیشتری دارند، در ابتدا به ارائه مختصری از تاریخچه روش‌های تعیین ظرفیت باربری پی‌های نواری واقع در مجاورت شیروانی‌ها پرداخته شده است تا بیشتر بر روش‌هایی که در ارتباط با پی‌های تحت اثر بار خارج از محور بوده‌اند، تاکید گردد در بررسی‌ها با استفاده نمودن از روش تعادل حدی و فرض مکانیسم گسیختگی نشان داده شده در شکل (۱) روابطی را جهت محاسبه ضرایب ظرفیت باربری استخراج شده است. این روابط برای تعیین ضرایب ظرفیت باربری  $N_c$ ،  $N_q$  و  $N_\gamma$  مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲]. همچنین با استفاده از روش خطوط مشخصه و فرض منحنی گسیختگی با هدف مشابه با مایرهورف روابطی را جهت تعیین ضرایب ظرفیت باربری ارائه گردیده است. برای تعیین ضرایب  $N_c$  و  $N_q$ ، با توجه به مقدار بحرانی  $(\frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{4})$  برای زاویه  $\alpha$  نشان داده شده در شکل (۱)، شروع به استخراج روابط جدیدی گردیده است [۳]. اصول روش پیشنهادی و سیک نیز مشابه با روش هانسن است. ضرایب  $N_c$  و  $N_q$  همانند ضرایب مورد استفاده در روش هانسن بوده و تنها ضریب  $N_\gamma$  اندکی متفاوت است. ضرایب اصلاحی پیشنهادی ایشان نیز متفاوت از روش هانسن می‌باشد [۴]. در حالت که پی در بالادست شیروانی‌ها قرار گرفته است، بار حدی پی ممکن است تحت تاثیر گسیختگی برشی خاک زیر پی و یا ناپایداری کلی شیروانی قرار گیرد. بنابراین در اغلب اوقات ترکیب شدن دو حالتی که ذکر شد منجر به پیچیده‌تر شدن تحلیل‌ها در بررسی مسئله می‌شود، بنابراین دانشمندان روش‌های مختلفی را جهت تحلیل این نوع مسائل پیشنهاد نموده‌اند که اغلب مبتنی بر روش‌های خطوط مشخصه و یا تعادل حدی می‌باشند. جواب‌های تحلیلی مرز بالا و پایین این مسئله نیز توسط دیویس و جواب‌های تحلیلی مرز بالا توسط کوزاکابه ارائه شده است [۵و۶].



شکل (۱): شکل کلی مکانیسم های گسیختگی مورد استفاده توسط محققان مختلف

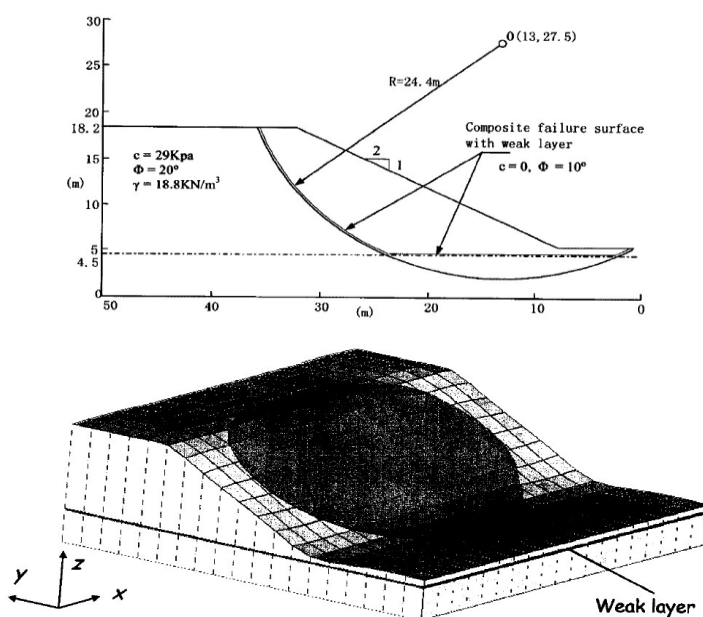
همچنین مطالعاتی با استفاده کردن از روش خطوط مشخصه ضرایب ظرفیت باربری پی صورت گرفته است که در این روش ضرایب  $N_c, N_q$  و  $N_\gamma$  با در نظر گرفتن اثر شیب اصلاح گردیده و بصورت جداول و نمودارهایی ارائه شده اند [۷]. همچنین با در نظر گرفتن مکانیسم گسیختگی دورانی شکل (۲) به بررسی ظرفیت باربری پی‌های واقع بر روی شیروانی و با استفاده از روش تحلیل حدی مرز بالا پرداخته شده است. در این تحقیق توجه به اینکه تشکیل یک مکانیسم گسیختگی متناظر با میدان سرعت قابل قبول در روش تحلیل حدی مرز بالا، مستلزم رعایت قانون جریان همراه است [۸].



شکل (۲): مکانیسم گسیختگی مورد استفاده

در پژوهشی دیگر با در نظر گرفتن سطوح گسیختگی استوانه ای در روش تعادل حدی، روابطی را برای تعیین ضرایب ظرفیت باربری  $N_c$  برای پی مستطیلی (با کف زبر و یا صاف) واقع بر رس عادی تحکیم یافته (دارای چسبندگی زیاد شونده با عمق) پیشنهاد شده است [۹]. یوگای با بهبود روش پیشنهادی شیلد و دراکر، ظرفیت باربری پی‌های مربعی و یا مستطیلی واقع بر رس عادی تحکیم یافته را مورد بحث و بررسی و تحلیل قرار داده‌اند [۱۰]. همچنین با استفاده از روش مرز بالا و فرض مکانیسم گسیختگی متشکل از بلوک‌های صلب چند وجهی، ظرفیت باربری پی‌های مستطیلی بررسی شده است [۱۱]. ضرایب شکل حاصل از این روش بعدها توسط ژو و میخالوفسکی با نتایج حاصل از نرم افزار مبتنی بر روش اجزاء محدود مقایسه گردید که نتیجه این مقایسه‌ها بیانگر بیشتر بودن قابل ملاحظه نتایج تحلیل مرز بالا نسبت به نتایج عددی، به ویژه در مصالح اصطکاکی، بوده است [۱۲]. همچنین ظرفیت باربری پی‌های نواری، مربعی، مستطیلی و دایروی با استفاده از ترکیب روش‌های مرز پایین و بالای تحلیل حدی و اجزاء محدود، مورد بررسی قرار گرفته و روابطی جهت تخمین ضرایب ظرفیت باربری و ضرایب اصلاح شکل و عمق پی پیشنهاد شده است [۱۳ و ۱۴].

در تحقیق دیگر روش سه بعدی دیگری را بر پایه تحلیل حدی مرز بالا ارائه شده است که در آن با فرض صفحه‌ای به نام صفحه خنثی و حرکت دادن خطوط هذلولی‌گون بصورت عمود بر این سطح، شکل مکانیسم گسیختگی بدست می‌آید [۱۵]. همچنین با در نظر گرفتن المان‌های صلب، فرمول‌بندی جدیدی را بر مبنای تحلیل حدی مرزبالا ارائه نموده و بعنوان یکی از کاربردهای آن به بررسی پایداری سه‌بعدی شیروانی‌ها پرداخت. با استفاده از این روش عددی، تحلیل پایداری شیروانی‌ها در حالات مختلف و در شرایط وجود فشار آب حفراهی نیز قابل بررسی است. سطوح ناپیوستگی سرعت در این روش می‌توانند بین المان‌های صلب تشکیل شده و ضریب اطمینان پایداری با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌یابی خطی و یا غیر خطی بدست می‌آید. به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، نمونه‌هایی از مسائل پایداری مورد بررسی در تحقیقات مختلف به این روش ارزیابی شده‌اند. در شکل (۳) نمونه‌ای از نحوه المان‌بندی شیروانی نشان داده شده است [۱۶].



شکل (۳): نمونه ای از المان بندی سه بعدی مسئله پایداری شیروانی

تحقیقاتی نیز در زمینه بررسی اثر عامل ناهمسانی خاکهای ریزدانه بر پایداری سه‌بعدی شیروانی‌های خاکی تحت اثر بارهای متمرکز است که در آزمایشگاه سانتریفوژ دانشگاه کلرادو بررسی شده است [۱۷]. از سال‌های ۱۳۷۸ تاکنون، تحقیقات و بررسی‌های متعددی در قالب رساله کاشناسی ارشد و دکترا در ارتباط با مسایل و تحلیل سه‌بعدی پایداری شیروانی‌ها در دانشکده فنی دانشگاه تهران انجام یافته است، که تحقیق حاضر می‌تواند بعنوان ادامه این تحقیقات مورد ارزیابی قرار گیرد. فرزانه و عسکری روش میخالوفسکی را اصلاح و آنرا برای شیروانی‌های ناهمگن تعمیم داده‌اند. مکانیسم مورد استفاده متشکل از بلوک‌هایی پنج و شش وجهی با وجوه مستوی بوده که صرفاً حرکت انتقالی دارند و تعداد آنها را می‌توان تغییر داد. بار خارجی به صورت محوری بر روی شالوده‌ای مستطیل شکل و صلب وارد شده است [۱۸]. با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در حالت خاص، ظرفیت باربری دینامیکی پی‌های نواری بررسی شده است. نتایج تحلیل‌های صورت گرفته با استفاده برنامه تراس بیانگر کاهش ظرفیت باربری پی‌های واقع بر شیروانی‌های محدب با افزایش انحنای شیروانی و نیز کاهش ظرفیت باربری پی‌های واقع بر شیروانی‌های گوشه دار با کاهش زاویه گوشه بوده است [۱۹ و ۱۰].

هدف از تحقیق صورت گرفته، بررسی مکانیسم‌های گسیختگی مناسب جهت بررسی ظرفیت باربری پی‌های مستطیلی تحت بارگذاری مرکب واقع در لبه شیروانی‌های خاکی با در نظر گرفتن اثر فشار آب حفره‌ای و توسعه نرم افزاری مبتنی بر مکانیسم گسیختگی پیشنهادی در تحقیقات قبلی می‌باشد.

### ۳- تئوری تحلیل حدی

برای حل دقیق مسائل مرزی در علم مکانیک جامدات باید بطور همزمان به تحلیل معادلات زیر پرداخت:

الف) معادلات تعادل

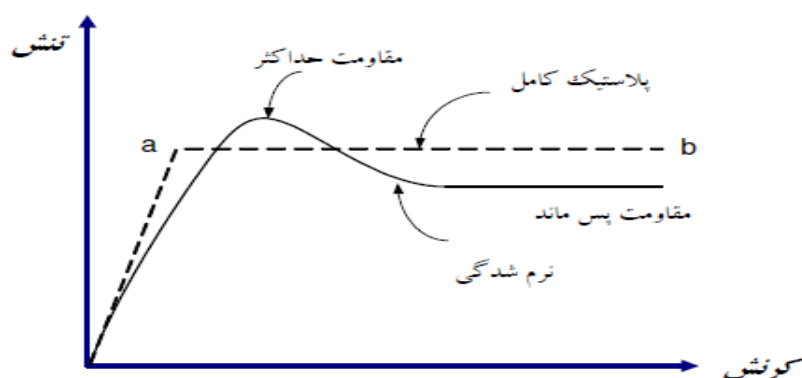
ب) معادلات رفتاری

ج) معادلات سازگاری

در اکثر مواقع رسیدن به مقدار بارحدی در مسائل پایداری با حل سه سری معادلات اشاره شده بسیار دشوار و زمان گیر می‌باشد. به همین دلیل، محققین مجبور به استفاده از روش‌هایی تقریبی شده‌اند تا بتوانند به تخمین بارهای حدی در اینگونه مسائل بپردازند. این روش‌ها به روش‌های حدی معروف و شناخته شده‌اند. در بین این روش‌ها روش تحلیل حدی بیش از روش‌های دیگر دارای کاربرد و دقت می‌باشد.

استفاده از تئوری تحلیل حدی در مسائل پایداری مستلزم بررسی یکسری فرضیات اساسی و مهم در مورد رفتار مصالح است. بدیهی است که باید پیش از استفاده از این روش مفاهیم پایه مورد استفاده در آن، مانند ایده‌آل سازی رفتار خاک به عنوان مصالحی با رفتار صلب-خمیری کامل، بررسی گردد. بعلاوه، همانگونه که در ادامه بیان می‌شود، تئوری‌های مرتبط با روش‌های مرز بالا و مرز پایین تنها در مورد مصالح با قانون رفتاری وابسته و سطح تسلیم محدب منجر به حصول جواب‌هایی با جایگاه مشخص نسبت به جواب دقیق مسئله می‌گردند.

شکل (۴) مربوط به نمونه‌ای از منحنی تنش- کرنش مصالح تغییر شکل پذیر می‌باشد. این نمودار رفتار ماسه متراکم و یا رس پیش تحکیم یافته، تحت شرایط برش مستقیم را نشان می‌دهد که رفتار آنها معمولاً بصورت یک ناحیه تقریباً خطی، یک تنش حداکثر و یک ناحیه نرم‌شدگی تا رسیدن به تنش‌های پسماند می‌باشد. در تحلیل مسائل پایداری بر اساس تئوری پلاستیسیته، از نواحی نرم‌شدگی یا سخت‌شدگی در منحنی تنش-کرنش صرف‌نظر شده و رفتار مصالح با خط چین نشان داده می‌شود که در شکل (۴) تخمین زده می‌شود.



شکل (۴): شکل شماتیک منحنی رفتاری مصالح واقعی و ایده‌آل سازی شده

توجه به این مطلب به نظر لازم می‌رسد که مقدار پارامترهای مقاومتی مصالح، که در تحلیل حدی استفاده می‌شود، می‌تواند به نحوی تعیین شود که میانگین مقاومت مصالح واقعی را در محدوده رفتار پلاستیک آن در نظر بگیرد. این امر نزدیکی فرض رفتار پلاستیک کامل مصالح به واقعیت را بیشتر نموده و جواب‌ها را به واقعیت نزدیک‌تر می‌کند.

با استفاده از این تعریف زیر برای مصالح تحت تنش تک‌محوری، مفهوم مصالح پایدار طبق تعریف در اگر به شکل زیر بیان می‌گردد:

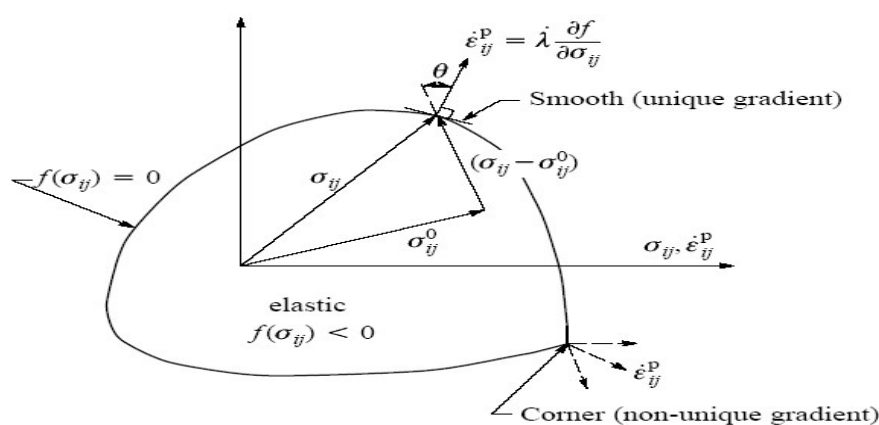
$$(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^0) * \varepsilon_{ij}^p \geq 0 \quad (1)$$

که  $\sigma_{ij}$  تانسور تنش‌های اولیه در تعادل با سیستم نیروهای اعمالی،  $\sigma_{ij}$  تنش‌های نهایی پس از اعمال نیروهای خارجی اضافه و  $\varepsilon_{ij}^p$  نرخ کرنش خمیری می‌باشد.

در نظریه پلاستیسیته، برای مشخص کردن رفتار مصالح تحت تنش‌های مختلف، سطحی متناظر با تابع تسلیم (یا معیار تسلیم) تعریف می‌شود، به شکلی که اگر نقطه متناظر با یک حالت تنش در داخل این سطح قرار گیرد، تغییر شکل الاستیک و اگر بر روی این سطح واقع شود، تغییر شکل پلاستیک خواهد بود.

برای یک مصالح خمیری کامل، تابع تسلیم، تابع  $f$ ، تنها به مجموعه عناصر تنش  $\sigma_{ij}$  بستگی دارد (نه کرنش). بنابراین تابع تسلیم در فضای تنش‌ها ثابت بوده و اگر شرط  $f(\sigma_{ij})=0$  بزرگتر باشد جریان خمیری رخ می‌دهد. با این تعریف، حالت تنشی که در آن  $f(\sigma_{ij}) < 0$  باشد، امکان پذیر نیست و وقتیکه  $f(\sigma_{ij}) > 0$  باشد، رفتار مصالح الاستیک خواهد بود. در مصالحی که رفتار سخت‌شونده یا نرم‌شونده دارند، سطح تسلیم با وقوع تغییر شکل‌های خمیری تغییر می‌کند. در اینگونه مصالح سطوح تسلیم در مراحل مختلف بارگذاری با یکدیگر متفاوتند و سطح تسلیم بر سطح متناظر با حالت گسیختگی منطبق نیست.

در شکل (۵) نمایش سطح تسلیم و قانون جریان مشاهده شده است.



شکل (۵) نمایش سطح تسلیم و قانون جریان

در مصالحی که رفتار آنها در حالت حدی به صورت خمیری کامل بررسی می‌شود، پس از آنکه حالت تنش به سطح تسلیم رسید تغییر شکل‌های خمیری بطور نامحدود ادامه می‌یابند. بدین ترتیب با توجه به در نظر نگرفتن ویژگی‌های وابسته به زمان (نظیر ویسکوزیته)،



فرایند جریان پلاستیک در اینگونه مصالح را نمی توان براساس مقادیر مطلق کرنشهای خمیری ( $\epsilon_{ijp}$ ) مشخص نمود. لیکن مقدار سرعت یا نمو این کرنشها ( $\dot{\epsilon}_{ij}$ ) می تواند معیار مناسبی جهت بررسی رفتار مصالح پس از وقوع جریان پلاستیک باشد.

قانون جریان رابطه ای است که تانسورهای تنش و نمو کرنشهای خمیری را با یکدیگر مرتبط می سازد. نمو کرنشهای خمیری می تواند با تعریف تابع پتانسیل خمیری  $G(\sigma_{ij})$  به شکل زیر بدست آید:

$$\left| \dot{\epsilon}_{ij}^p \right| = \lambda \cdot \frac{\delta G(\sigma_{ij})}{\delta \sigma_{ij}} \quad (2)$$

که در آن  $\lambda$  بعنوان ضریب پلاستیک، عددی غیر منفی است. تابع پتانسیل خمیری  $G$  تابعی اسکالر از تانسور تنش است. بنابراین نمو کرنش خمیری وابسته به تانسور تنش موجود است نه نمو تنش. کرنش خمیری مستقل از تاریخچه بارگذاری بوده و جهت بردار نمو کرنش خمیری در فضای تنش های  $\sigma_{ij}$  در یک نقطه از سطح پتانسیل خمیری با جهت گرادیان تابع پتانسیل خمیری ( $\partial G / \partial \sigma_{ij}$ ) در آن نقطه یکسان است.

بر اساس اصل کار مجازی، نمو کار خارجی انجام شده توسط نیروهای حجمی  $F_i$  و سطحی  $T_i$  تحت اثر میدان سرعت مفروض  $v_i^*$  برابر با توان داخلی مستهلک شده توسط حالت تنش متناظر  $\sigma_{ij}$  است که در تعادل با نیروهای خارجی  $F_i$  و  $T_i$  خواهد بود. به عبارت دیگر  $T_i$  و  $F_i$  عناصر یک میدان تنش استاتیکی قابل قبول می باشند. بر اساس اصل کار مجازی، معادله زیر برقرار خواهد بود:

$$\int_A T_i \cdot v_i^* \cdot dA + \int_V F_i \cdot v_i^* \cdot dV = \int_V \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^* \cdot dV \quad (3)$$

که در آن  $A$  و  $V$  به ترتیب سطح مرزی و حجم محیط مورد مطالعه،  $v_i^*$  سرعت تغییرمکان مرزی واقعی یا مجازی و  $\dot{\epsilon}_{ij}^*$  تانسور سرعت کرنش خمیری سازگار با این میدان سرعت است. بدین ترتیب  $v_i^*$  و  $\dot{\epsilon}_{ij}^*$  نیز عناصر یک میدان سرعت سینماتیکی قابل قبول هستند.

میدان تنش استاتیکی قابل قبول میدان تنشی است که معادلات تعادل و شرایط مرزی تنش را در محیط مورد بررسی ارضا کند و حالت تنش در هیچ نقطه ای فراتر از سطح تسلیم نباشد. میدان سرعت قابل قبول سینماتیکی نیز میدان سرعتی است که معادلات سازگاری و شرایط مرزی سرعت را ارضا نماید. در حالت کلی، تعداد میدانهای تنش استاتیکی یا سرعت سینماتیکی قابل قبول (هر یک به تنهایی) در مسائل مقدار مرزی بی نهایت است. پاسخ واقعی یک مسئله و جواب یکتا زمانی حاصل می گردد که ارتباط میدانهای تنش و سرعت براساس معادلات رفتاری باشد که البته یافتن این پاسخ غالباً دشوار است.

در تئوری حدی مرز بالا که در این تحقیق استفاده شده است، میدان سرعت مجازی قابل قبول  $u_i^u$  و میدان سرعت کرنش  $\dot{\epsilon}_{ij}$  سازگار با آن در نظر گرفته می شوند. با توجه به برقرار بودن قانون جریان وابسته، می توان متناظر با میدان سرعت مذکور حداقل یک میدان تنش مجازی تعریف نمود. اگر این میدان تنش  $\sigma_{ij}$  باشد، تنشهای سطحی  $\mu_u T_i^0$ ، تنشهایی در نظر گرفته می شوند که از رابطه ذیل بدست می آیند:

$$\mu_u \int_{AT} T_i^0 \cdot u_i^u \cdot dA + \int_V F_i \cdot u_i^u \cdot dV = \int_V \sigma_{ij}^u \cdot \dot{\epsilon}_{ij}^{pu} \cdot dV \quad (4)$$

اگر اصل توان مجازی برای میدان سرعت فوق و میدان تنش واقعی در حالت حدی نوشته شود:

$$\mu_c \int_{AT} T_i^0 \cdot u_i^u \cdot dA + \int_V F_i \cdot u_i^u \cdot dV = \int_V \sigma_{ij}^c \cdot \dot{\epsilon}_{ij}^{pu} \cdot dV \quad (5)$$

با کم کردن دو رابطه اخیر از یکدیگر و استفاده از اصل نرمالیت و تحدب سطح تسلیم خواهیم داشت:

$$(\mu_u - \mu_c) \iint_{A_T} T_i^0 u_i^u \cdot dA = \iint_V (\sigma_{ij}^u - \sigma_{ij}^c) \cdot \varepsilon_{ij}^{pu} \cdot dV \quad (6)$$

نهایتاً با مثبت فرض نمودن توان تنش‌های سطحی در حین تغییر شکل‌های خمیری نتیجه میشود:

$$\mu_u - \mu_c \geq 0 \quad (7)$$

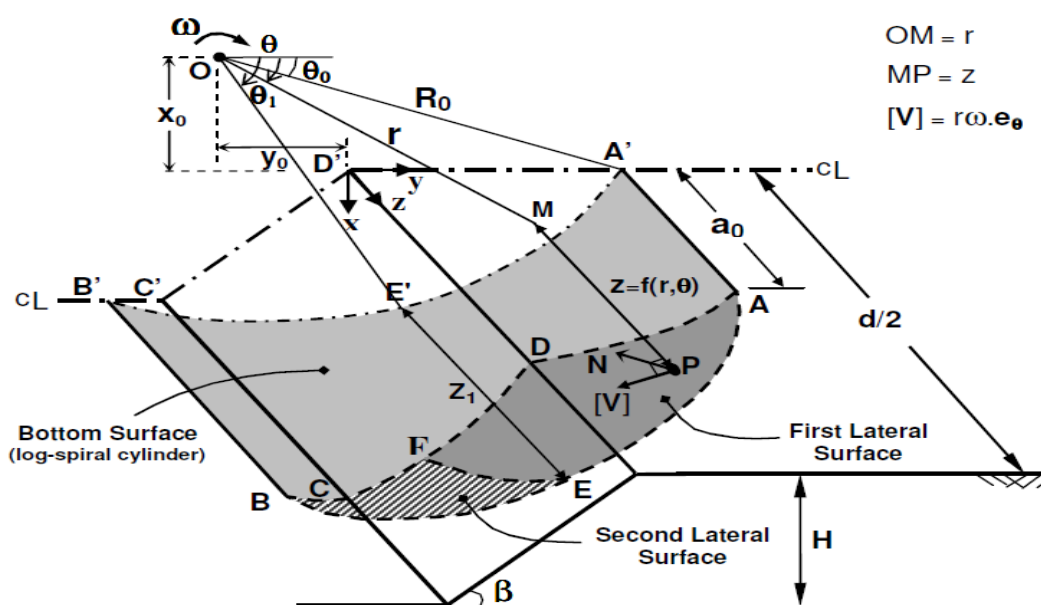
$$\mu_u \geq \mu_c \quad (8)$$

با توجه به آنچه گفته شد، قضیه مرز بالا به صورت زیر بیان می‌شود:

در هر میدان سرعت سینماتیکی قابل قبول، اگر کار نیروهای خارجی مثبت باشد، بار حاصل از مساوی قرار دادن نمو کار نیروهای خارجی و داخلی از بارحدی واقعی بیشتر است.

موضوع تحقیق صورت گرفته بررسی ظرفیت باربری پی‌های مربعی در لبه شیروانی با حضور فشار آب حفره ای و بررسی ضریب پایداری شیروانی به صورت سه‌بعدی و با استفاده از روش تحلیل حدی مرز بالا می‌باشد. برای رسیدن به این منظور و هدف ابتدا در برنامه رساس توسعه و تغییراتی داده شده که این تغییرات به این منظور بوده که برنامه بتواند پارامترهای مورد نیاز را برای تاثیر دادن اثر فشاره آب حفره‌ای در برنامه را دریافت نماید، که در ادامه نحوه دادن پارامترها به برنامه و نحوه تاثیر آن توضیح کامل داده شده است. بعد از ایجاد تغییرات در برنامه رساس شروع به مدل‌سازی در برنامه کرده که مدل شامل یک پی روی شیروانی می باشد. که فاصله آن از لبه شیروانی در چند مرحله بیشتر خواهد شد. لازم است ذکر شود که در مدل‌سازی این تحقیق ابعاد پی یکبار ۲\*۲ و بار دیگر ۲\*۸ می‌باشد و سپس پی در فاصله‌های صفر، نیم متر و یک متر از لبه شیروانی قرار گرفته است. برای دیدن اثر آب با شیب‌های مختلف در برنامه رساس شیروانی را با زاویه‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه تحلیل شده است. در این تحقیق اقدام به تغییرات پارامترهای مقاومتی خاک شده و با مقادیر متفاوتی از زاویه‌های اصطکاک داخلی خاک و همچنین چسبندگی‌های مختلف برنامه رساس اجرا شده و به منظور دیدن اثر فشار آب حفره‌ای در برنامه سطح آب را در تمامی مدل‌ها در چندین مرحله تغییر داده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است.

جهت تعریف و شناسایی و استفاده از یک مکانیسم گسیختگی سه‌بعدی، در ابتدا باید سطوح گسیختگی جداکننده توده لغزنده از محیط اطراف با در نظر گرفتن شرایط مفروض در روش تحلیل حدی مرز بالا بدست آید. در شکل (۶) مکانیسم گسیختگی تحقیق نشان داده شده است.



شکل (۶): مکانیسم گسیختگی چرخشی سه بعدی مورد استفاده در تحقیق

در تحقیق مذکور از ترکیب دو روش الگوریتم ژنتیک و سعی و خطای محلی استفاده شده است.

#### ۴- معرفی نرم افزار رساس

هندسه شیروانی، ابعاد، ترکیب بارگذاری و موقعیت قرارگیری پی، عمق سنگ بستر در صورت وجود، مشخصات مقاومتی و وزن مخصوص توده خاک، ضریب شتاب افقی زلزله (در محاسبات شبه استاتیکی)، ضرایب فشار آب حفره‌ای شامل روش تعیین سطح قرارگیری آب (Hw) و ضریب فشار آب حفره ای (Ru) مقادیر اولیه برای ۹ متغیر تعریف کننده شکل مکانیسم و پارامترهای مرتبط با نحوه بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک از جمله پارامترهایی هستند که باید بعنوان ورودی، قبل از آغاز تحلیل، توسط کاربر به برنامه داده می‌شوند. البته در مسائل تعیین ضریب اطمینان پایداری شیروانی، حداکثر پهنا مکانیسم (d) نیز به دیگر پارامترهای ورودی افزوده می‌شود. پس از تعریف پارامترهای ورودی، برنامه ضریب اطمینان پایداری شیروانی یا بار حدی را با تشکیل یک مکانیسم اولیه مبتنی بر مقادیر اولیه متغیرها محاسبه می‌کند. سپس با تغییر پارامترهای معرف مکانیسم گسیختگی (۹ متغیر بیان شده) مکانیسم متناظر با کمترین ضریب اطمینان و یا کمترین بار حدی را جستجو نموده و شکل مکانیسم گسیختگی بحرانی را، از سه نمای جلو، بالا و کنار، همراه با مقادیر بهینه متغیرها نمایش می‌دهد. شایان ذکر است که شکل مکانیسم های گسیختگی حاصل در طول روند بهینه‌یابی نیز بطور پیوسته توسط برنامه ترسیم می‌گردد. در ابتدا کاربر باید نوع تحلیل مورد نظر، اعم از تحلیل دو یا سه بعدی و همچنین محاسبه ظرفیت باربری شالوده یا ضریب اطمینان پایداری شیروانی، را از طریق منوهایی که در سمت چپ و بالای اولین پنجره این برنامه شکل وجود دارد، مشخص کند. بسته به گزینه‌های انتخابی، پارامترهای ورودی لازم در فرم ورودی ظاهر می‌شوند. مقادیر پارامترها و متغیرهای مشخص کننده مسئله مورد نظر به نرم افزار داده شده و سپس با زدن دکمه Run اجرای برنامه و انجام محاسبات آغاز می‌شود. اطلاعات ورودی برنامه عبارتند از: پارامترهای مشخصه هندسه مساله: این پارامترها شامل ابعاد پی (B\*L)، فاصله پی تا لبه شیروانی (a)، ارتفاع شیروانی (H) و زاویه شیب شیروانی (β) می‌باشد. مشخصات خاک: پارامترهای مقاومتی خاک تشکیل دهنده شیروانی شامل زاویه

اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) و ضریب چسبندگی ( $c$ ) و نیز وزن مخصوص آن ( $\gamma$ ) بعنوان ورودی به برنامه داده می‌شوند. ضرایب فشار آب حفره‌ای: برای وارد کردن اثر فشار آب حفره‌ای از پارامترهای روش تعیین سطح قرارگیری آب ( $H_w$ ) و ضریب فشار آب حفره‌ای ( $R_u$ ) استفاده می‌شود. پارامترهای بیانگر نحوه بارگذاری: این پارامترها شامل نسبت خروج از محوریت بار به عرض پی ( $e/B$ )، تنازانت زاویه میل بار ( $\tan\alpha$ )، مقدار سربار یکنواخت واقع در اطراف پی ( $q_0$ ) و ضریب شتاب افقی ناشی از زلزله ( $k_h$ ) می‌باشد. لازم به ذکر است که امکان اعمال شتاب افقی ناشی از زلزله بصورت تابع خطی، وجود دارد.

شکل (۷): پنجره ورودی اطلاعات و پارامترهای مورد نیاز در نرم افزار

پارامترهای مرتبط با نحوه بهینه یابی: برخی از پارامترهای اصلی مربوط به مشخصات الگوریتم ژنتیک مورد استفاده، از جمله حداکثر تعداد تولید نسل‌های مورد نظر (NG)، تعداد اعضای هر نسل (NP) و نیز ضریب انتخاب (SP) به عنوان ورودی برای برنامه تعریف می‌شوند.

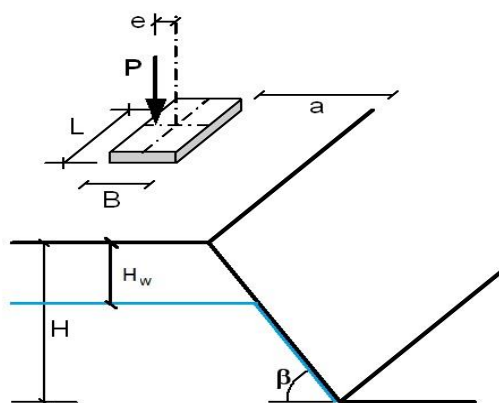
متغیرهای تعیین مکانیسم گسیختگی: مقادیر اولیه فرضی برای متغیرهای تعریف کننده شکل مکانیسم گسیختگی (۹ متغیر) نیز در پنجره ورود اطلاعات به نرم افزار داده می‌شوند. سایر پارامترها: در صورتیکه هدف از تحلیل سه بعدی مورد نظر تعیین ضریب اطمینان پایداری شیروانی باشد.

حداکثر پهنای مکانیسم گسیختگی (d) نیز باید مشخص گردد. در حالتی که بار متمرکز بر شیروانی اعمال نگردد، پهنای مکانیسم تمایل به افزایش دارد که با تعیین حداکثر پهنای مکانیسم می‌توان میزان گسترش آنرا محدود نمود.

همچنین وارد نمودن میزان بار قائم وارد بر پی ( $q_v$ ) نیز جهت تعیین ضریب اطمینان پایداری شیروانی تحت اثر بار پی ضروری است. بمنظور وارد کردن اثر فشار آب حفره روش تاثیر فشار آب حفره ای با استفاده از پارامتر  $H_w$  معرفی کردن خط تراز آب استفاده شده است.

## ۴- بررسی نتایج حاصل از تحلیل‌ها

شکل (۸) شماتیک مسئله مورد بررسی و پارامترهای مورد استفاده در تعیین ظرفیت باربری را با ابعاد مربوط به طول و عرض پی روی شیروانی که با فاصله‌های مختلف از لبه شیروانی در مجاورت آن قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهد. ابعادی که در مدلسازی استفاده شده است، پی‌هایی با ابعاد  $B*L=2*2$  و  $B*L=2*8$  می‌باشد.



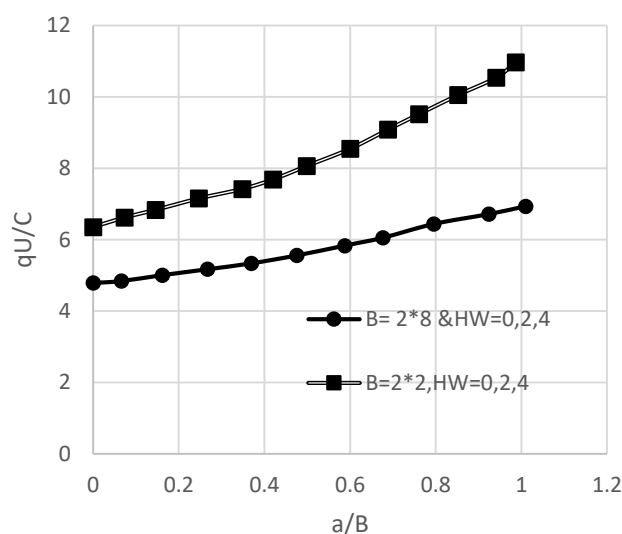
شکل (۸) : شکل شماتیک مسئله مورد بررسی و پارامترهای مورد استفاده در تعیین ظرفیت باربری

فواصل پی از لبه شیروانی عبارتست از ۴ متر، ۲ متر و ۰، شیب شیروانی ۳۰، ۴۵، و ۶۰ درجه در نظر گرفته شده است. همچنین زاویه اصطکاک داخلی خاک را تغییر داده و مقادیر آن برابر ۰، ۱۵ و ۳۰ درجه قرار داده شده است. مقدار چسبندگی در برنامه مورد بحث برابر با مقادیر  $C=20,25,50,100$  در نظر گرفته شده است. مقادیر مختلف برای پهنای شیروانی ( $d=10,20,40$ ) در نظر گرفته شده است.

در این قسمت نمودارهای مربوط به نتایج تحلیل برنامه با شرایط هندسی و پارامترهای مقاومتی مختلف مطرح و سپس به تغییرات ظرفیت باربری پی‌های روی شیروانی در مقابل افزایش فشار آب حفره‌ای پرداخته و نرخ این تغییرات در شرایط مختلف (نظیر هندسه پی، شیروانی و پارامترهای مقاومتی خاک) مقایسه می‌گردد.

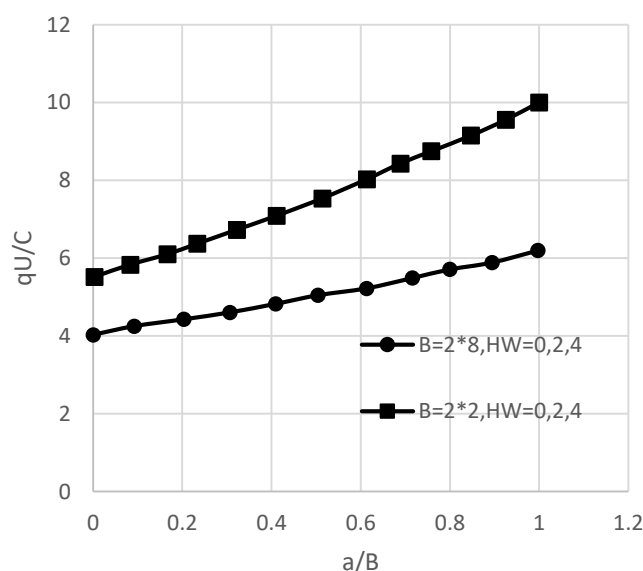
در شکل (۹) نتایج تحلیل نرم افزار رساس برای یک شیروانی با ارتفاع ۱۲ متر، و زاویه شیب شیروانی  $\beta=30$  نشان داده شده است. این نمودار نشان‌دهنده ظرفیت باربری پی‌های با ابعاد  $B*L=2*2$  و  $B*L=2*8$  واقع بر روی شیروانی می‌باشد. برای بررسی تاثیر فشار آب حفره‌ای، از روش تعریف تراز آب ( $H_w$ ) استفاده شده است که مقادیر آن بر حسب متر به ترتیب برابر با  $H_w = 0, 2, 4$  در نظر گرفته شده است.

طبق نتایج در شرایط خاک کاملاً چسبنده ( $\phi=0^\circ$ ) فشار آب حفره‌ای اثری بر ظرفیت باربری نداشته است. دلیل این امر صفر بودن زاویه اصطکاک داخلی خاک و در نتیجه عدم تاثیر فشار آب حفره‌ای بر نمو کار نیروهای داخلی و بالطبع عدم تاثیر تراز آب زیرزمینی بر ظرفیت باربری پی بوده است. همچنین با توجه به نتایج حاصل، مشاهده می‌شود که با دور شدن پی از لبه شیروانی ظرفیت باربری پی افزایش یافته و با افزایش نسبت ابعاد پی، ظرفیت باربری کاهش یافته است.



شکل (۹): نتایج ظرفیت باربری شیروانی ۳۰ درجه ( $\phi=0^\circ$  و  $C=100 \text{ Kpa}$ )

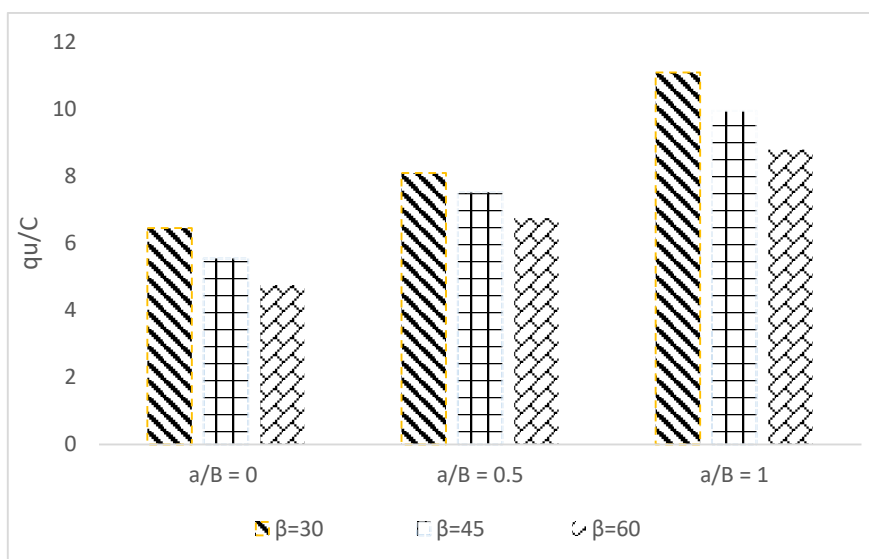
شکل (۱۰) به ارائه نتایج مشابه حاصل برای شیروانی با زاویه شیب  $\beta=45^\circ$  می‌پردازد. این نمودار نشان دهنده تغییرات ظرفیت باربری پی‌های با ابعاد  $B*L=2*8$  و  $B*L=2*2$  واقع بر روی شیروانی می‌باشد که برای بررسی تاثیر فشار حفره‌ای آب از روش تراز سطح آب استفاده شده است ( $HW = 0, 2, 4 \text{ m}$ ). در نمودار (۱۰) نیز همانند نمودار (۹) منحنی‌های رسم شده سه به سه بر هم منطبق می‌باشند. همانطور که در نمودار قبلی هم اشاره گردید این انطباق به این دلیل اتفاق افتاده است که زاویه اصطکاک داخلی خاک صفر در نظر گرفته شده و در خاک‌هایی که زاویه اصطکاک داخلی آنها صفر و یا بسیار کم می‌باشد، تاثیر فشار آب حفره‌ای نیز صفر یا بسیار کم می‌باشد.



شکل (۱۰): ظرفیت باربری شیروانی ۴۵ درجه ( $\phi=0^\circ$  و  $C=100 \text{ Kpa}$ )

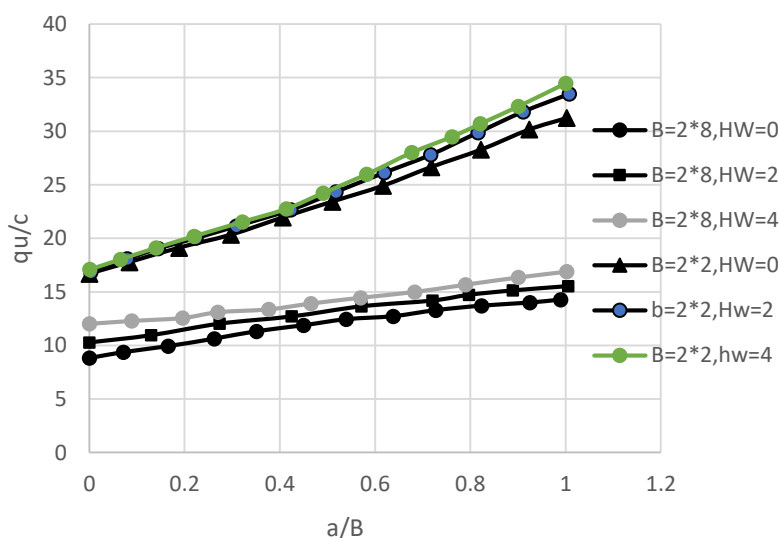
همانند دو نمودار قبلی در حالت ۶۰ درجه نیز تاثیر دور شدن پی از لبه شیروانی منطبق با حالت قبلی بوده و هر چه پی از لبه شیروانی دورتر شده ظرفیت باربری پی نیز افزایش می‌یابد. یکی از مواردی را که می‌توان با مقایسه نتایج فوق مشاهده کرد، ظرفیت باربری

شیروانی که شیب آن سی درجه بوده از ظرفیت باربری شیروانی ۴۵ و ۶۰ درجه بیشتر است و همچنین ظرفیت باربری شیروانی ۴۵ درجه از شیروانی‌های با زاویه شیب ۶۰ درجه بیشتر می‌باشد. شکل (۱۱) نشان دهنده مطلب ذکر شده است.



شکل (۱۱): ظرفیت باربری پی روی شیب‌های مختلف ( $H_w=0$ )

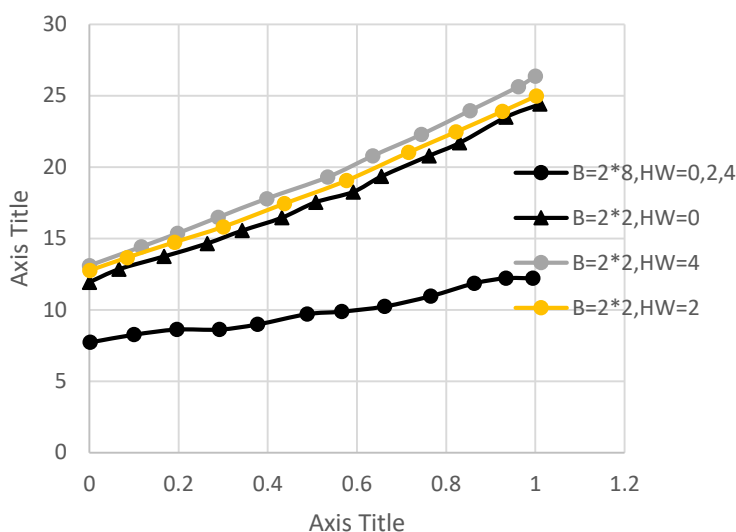
شکل (۱۲) نتایج حاصل از برنامه را برای یک شیروانی به ارتفاع ۱۲ متر و زاویه شیروانی (شیب شیروانی)  $\beta=30$  را نشان می‌دهد. این نمودار نشان دهنده ظرفیت باربری شیروانی برای پی‌هایی با ابعاد  $B*L=2*2$  و  $B*L=2*8$  می‌باشد، که برای بررسی تاثیر فشار حفره‌ای آب از روش تراز سطح آب استفاده شده است ( $H_w = 0, 2, 4$  m).



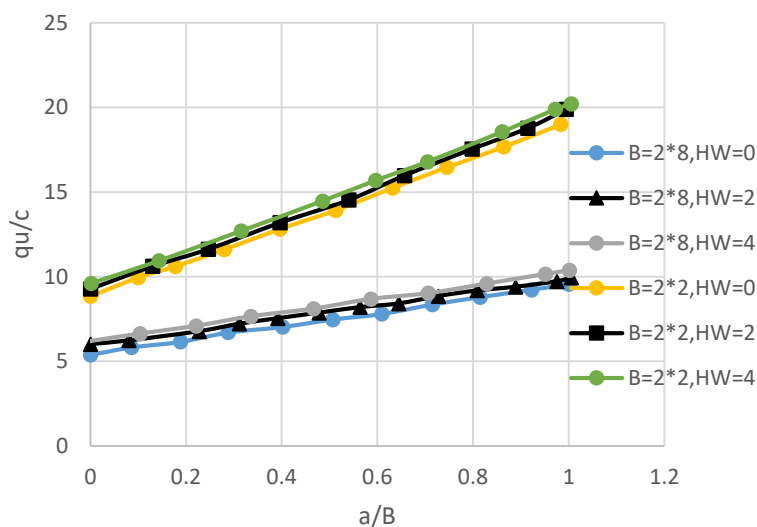
شکل (۱۲): ظرفیت باربری شیروانی ۳۰ درجه ( $C=50$  Kpa و  $\phi=15^\circ$ )

با توجه به اینکه زاویه اصطکاک داخلی خاک عددی غیر صفر می‌باشد، فشار آب حفره‌ای بر ظرفیت باربری اثر داشته و با پایین آمدن سطح آب ظرفیت باربری شیروانی افزایش پیدا خواهد کرد. علت این پدیده افزایش تنش موثر و در نتیجه افزایش نمو کار نیروهای داخلی می‌باشد.

شکل (۱۳) و (۱۴) به ترتیب نتایج حاصل از برنامه برای یک شیروانی به ارتفاع ۱۲ متر و زاویه شیروانی (شیب شیروانی)  $\beta=45^\circ$  و (شیب شیروانی)  $\beta=60^\circ$  را نشان می‌دهد.



شکل (۱۳): نتایج ظرفیت باربری برای شیروانی  $45^\circ$  درجه ( $C=50 \text{ Kpa}$  و  $\phi=15^\circ$ )

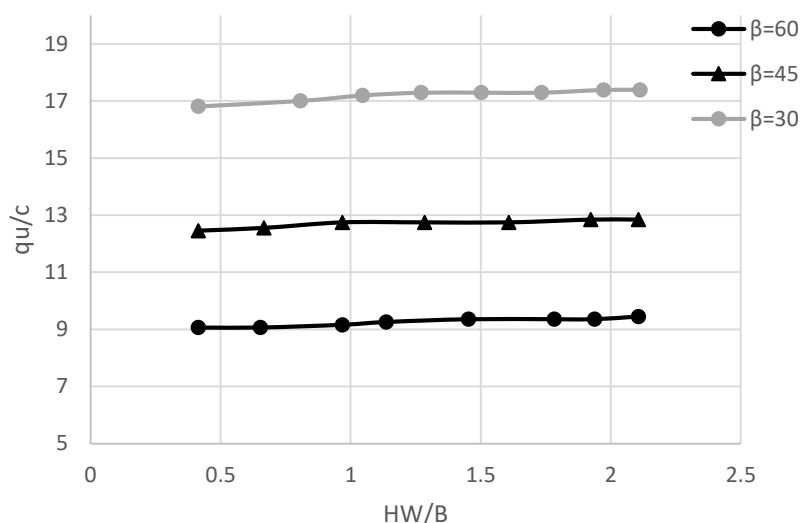


شکل (۱۴): ظرفیت باربری شیروانی  $60^\circ$  درجه ( $C=50 \text{ Kpa}$  و  $\phi=15^\circ$ )

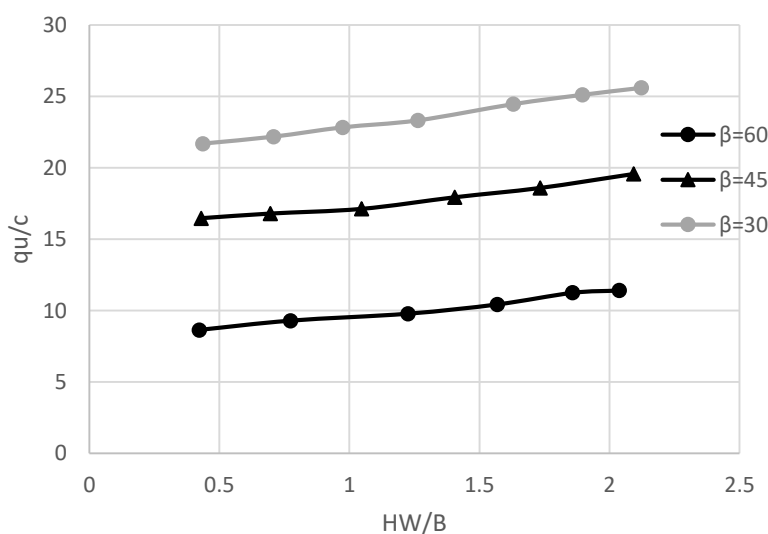
همانند نمودارهای قبل کاهش تراز سطح آب (پایین رفتن سطح آب) داخل شیروانی در برنامه رساس منجر به افزایش ظرفیت باربری پی واقع بر روی شیروانی می‌گردد، و با افزایش تراز سطح آب (بالا آمدن سطح آب) داخل شیروانی ظرفیت باربری پی واقع بر مجاورت شیروانی کاهش می‌یابد. بررسی تاثیر فشار آب حفره‌ای روی ظرفیت باربری پی‌های واقع بر لبه شیروانی و نرخ تغییرات آن در مقابل تغییرات پارامترهای دیگر و مقادیر ظرفیت باربری پی در حالتی که پی روی شیروانی با شیب  $30^\circ$  درجه قرار گرفته است با نتایج ظرفیت باربری پی در زمانی که روی شیروانی با زاویه  $45^\circ$  درجه و  $60^\circ$  درجه قرار دارد مقایسه شده تا نرخ تغییرات برای هر سه حالت مشاهده گردد. شکل (۱۵) نمودار مقایسه‌ای مربوط به نرخ تغییرات ظرفیت باربری پی روی شیروانی در مقابل شیب آنها بر اثر تغییرات



فشار آب حفره‌ای را نشان می‌دهد. شکل (۱۵) ظرفیت باربری را پی‌های  $۲ \times ۲$  واقع در مجاورت شیروانی ( $a=0$ ) و شکل (۱۶) ظرفیت باربری را برای یک پی به ابعاد  $۲ \times ۸$  واقع در مجاورت شیروانی ( $a=0$ ) نشان می‌دهد.



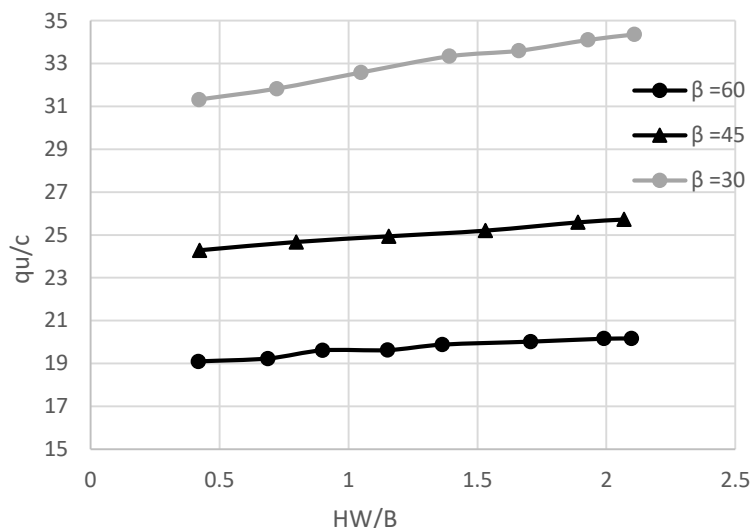
شکل (۱۵): ظرفیت باربری پی  $۲ \times ۲$  روی شیروانی ( $a=0$ )



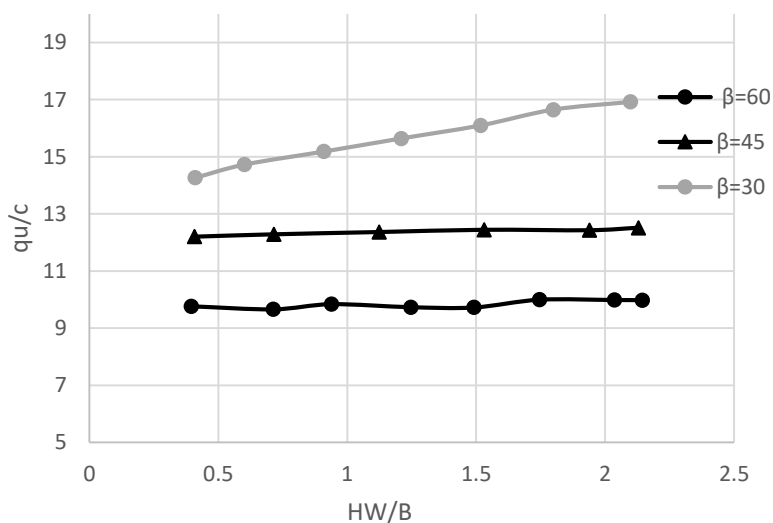
شکل (۱۶): ظرفیت باربری پی  $۲ \times ۸$  روی شیروانی ( $a=0$ )

شکل (۱۷) ظرفیت باربری پی  $۲ \times ۲$  واقع در فاصله دو متری شیروانی ( $a=2$  m) و شکل (۱۸) ظرفیت باربری را برای یک پی به ابعاد  $۲ \times ۸$  متر واقع در دو متری شیروانی ( $a=2$  m) نشان می‌دهد. نتایج حاصل از برنامه نشان دهنده این مطلب است که تاثیر فشار آب حفره‌ای بر کاهش ظرفیت باربری پی، در شیب‌های ملایم تر با توجه به ابعاد مکانیسم گسیختگی بیشتر خواهد بود. فاصله پی از لبه شیروانی در چندین مرحله تغییر کرده است، و بر اساس نتایج به دست آمده، با دور شدن پی از لبه شیروانی مکانیسم گسیختگی بزرگتر شده و در نتیجه، تاثیر افزایش فشار آب حفره‌ای بر کاهش ظرفیت باربری پی نیز بیشتر می‌شود. با دقت در نتایج ظرفیت باربری پی واقع در نزدیکی

لبه شیروانی، می‌توان گفت که تاثیر فشار آب حفره‌ای در حالتی که پی مربعی شکل باشد در مقایسه با پی مستطیلی با نسبت ابعاد بزرگتر کمتر است.

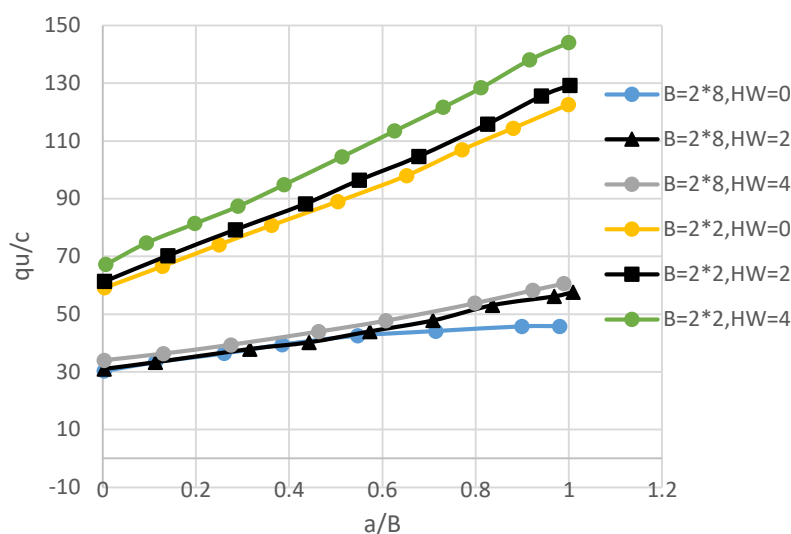


شکل (۱۷): ظرفیت باربری پی  $2 \times 2$  روی شیروانی ( $a=2\text{ m}$ )

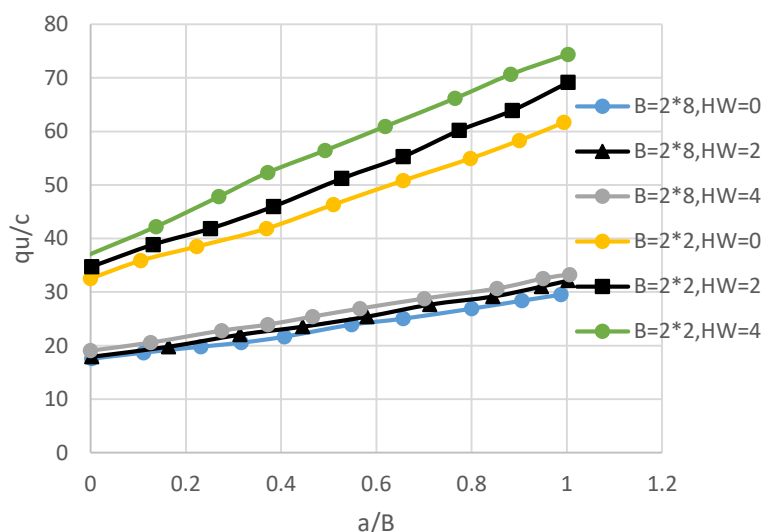


شکل (۱۸): ظرفیت باربری پی  $2 \times 8$  روی شیروانی ها ( $a=2\text{ m}$ )

شکل (۱۹)، (۲۰) و (۲۱) نتایج حاصل از برنامه رساس برای یک شیروانی به ارتفاع ۱۲ متر و زاویه شیروانی  $\beta = 30^\circ$ ،  $\beta = 45^\circ$  و  $\beta = 60^\circ$  را نشان می‌دهد. این نمودارها نشان دهنده ظرفیت باربری پی‌های واقع بر شیروانی با ابعاد  $B \times L = 2 \times 2$  و  $B \times L = 2 \times 8$  بوده و تاثیر فشار آب حفره‌ای با استفاده از روش تعیین سطح تراز سطح آب می‌باشد. ( $H_w = 0, 2, 4\text{ m}$ )

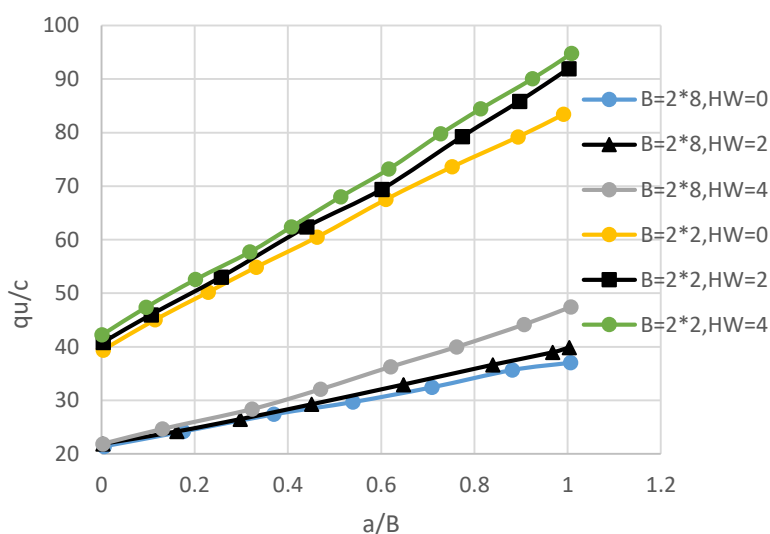


نمودار (۱۹): ظرفیت باربری شیروانی ۳۰ درجه (  $C=25 \text{ Kpa}$  و  $\phi=30^\circ$  )



شکل (۲۰): ظرفیت باربری شیروانی ۴۵ درجه (  $C=25 \text{ Kpa}$  و  $\phi=30^\circ$  )

در این نمودارها افزایش ظرفیت باربری با دور شدن پی از لبه شیروانی مشهود می‌باشد، همچنین تاثیر ابعاد پی بر روی ظرفیت باربری در این نمودارها نیز قابل مشاهده می‌باشد، سه منحنی بالا مربوط به ظرفیت باربری پی با ابعاد ۲\*۲ متر و سه منحنی پایین‌تر ظرفیت باربری برای یک پی ۲\*۸ متر واقع بر روی شیروانی را نشان می‌دهد. یکی از مواردی که با دقت روی منحنی‌های فوق میتوان یافت این است که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک میزان ظرفیت باربری پی واقع بر روی شیروانی و در مجاورت لبه آن نیز افزایش می‌یابد.



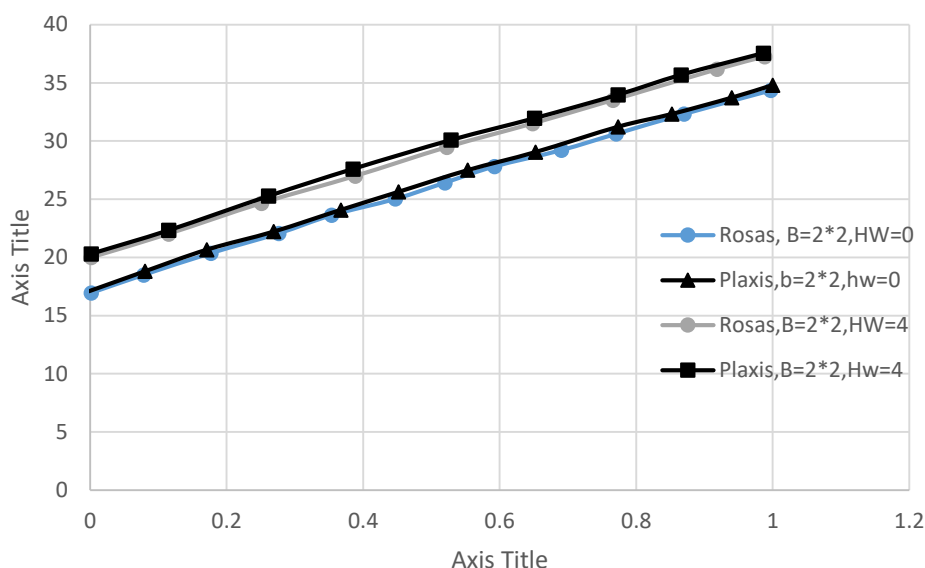
شکل (۲۱): ظرفیت باربری شیروانی ۶۰ درجه ( $\phi=30^\circ$  و  $C=25 \text{ Kpa}$ )

حال به بررسی تاثیر فشار آب حفره‌ای روی ظرفیت باربری پی‌های واقع بر لبه شیروانی و نرخ تغییرات آن در مقابل تغییرات پارامترهای دیگر پرداخته می‌شود. با بررسی نمودارهای حاصل از برنامه نتایج به دست آمده بر روی ظرفیت باربری پی‌های واقع بر روی شیروانی مجدداً در این مدل‌ها قابل مشاهده می‌باشد، این نتایج به اختصار عبارتند از: با دور شدن پی از لبه شیروانی، تاثیر افزایش فشار آب حفره‌ای بر کاهش ظرفیت باربری پی نیز بیشتر می‌شود، تاثیر فشار آب حفره‌ای بر کاهش ظرفیت باربری پی، در شیب‌های ملایم‌تر بیشتر خواهد بود، همچنین تاثیر فشار آب حفره‌ای در پی مربعی شکل در مقایسه با پی مستطیلی با نسبت ابعاد بزرگتر کمتر می‌باشد. تاثیرات فشار آب حفره‌ای بر روی ظرفیت باربری پی واقع بر روی شیروانی با بیشتر شدن زاویه اصطکاک داخلی خاک بیشتر می‌گردد.

یکی از قابلیت‌های مهم در برنامه رساس امکان تعریف بار خارج از محور می‌باشد. به منظور بررسی تاثیر فشار آب حفره‌ای بر ظرفیت باربری و اثر آن در دو حالت اعمال بار محوری و خارج از محور، یک پی  $2 \times 2$  واقع بر روی یک شیروانی به ارتفاع ۱۲ متر و شیب ۴۵ درجه با چسبندگی خاک ۲۵ کیلو نیوتن بر متر مربع و زاویه اصطکاک داخلی ۳۰ درجه مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این تحلیل‌ها بررسی یافتن تغییرات فشار آب حفره‌ای در حالتی که بار در مرکز وارد می‌شود بحرانی‌تر است یا در زمانی که بار دارای خروج از مرکزیت بوده است. با بررسی نتایج حاصل می‌توان دریافت که زمانی که بار در محور پی واقع بر روی شیروانی وارد نمی‌شود (در شرایط اعمال بار خارج از محور)، اثر فشار آب حفره‌ای بر ظرفیت باربری پی کمتر می‌شود. علت این امر کوچکتر شدن مکانیسم گسیختگی در حالت اعمال بار خارج از محور است.

در این تحقیق از نرم افزار پلکسیس سه بعدی استفاده گردیده است تا بتوان داده‌های حاصل از برنامه رساس را که در شرایط مختلف آنالیز و تحلیل شده است را با یک برنامه قابل قبول که در سطح وسیعی نیز مورد استفاده می‌باشد مقایسه نمود. این مقایسه خود دلیلی بر اثبات درستی برنامه تغییر یافته رساس برای بررسی میزان فشار آب حفره‌ای می‌باشد.

در شکل (۲۲) نتایج حاصل از مدل‌سازی در برنامه رساس و پلکسیس را برای شیروانی با ارتفاع آن ۱۲ متر و زاویه شیروانی  $\beta=30$  را نشان می‌دهد، همچنین زاویه اصطکاک داخلی خاک و چسبندگی است به ترتیب برابر با  $\phi=15^\circ$  و  $C=50 \text{ Kpa}$  در نظر گرفته شده است. این نمودار نشان دهنده ظرفیت باربری شیروانی پی‌های با ابعاد  $B*L=2*2$  می‌باشد، همچنین برای تاثیر فشار حفره‌ای آب از روش تراز سطح آب استفاده شده که مقادیر آن به ترتیب برابر با  $HW = 0, 2, 4$  در برنامه اعمال شده است.



شکل (۲۳): ظرفیت باربری پی ۲\*۲ روی شیروانی

در نمودار بالا چهار عدد منحنی دیده می‌شود که دو منحنی بالا ظرفیت باربری حاصل از پلکسیس و دو منحنی پایین نشان دهنده نتایج مربوط به ظرفیت باربری پی واقع بر روی شیروانی حاصل از برنامه رساس را نشان می‌دهد. با بررسی نتایج و نمودارهای حاصل مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از دو برنامه اختلاف ۱۵ تا بیست درصدی با یکدیگر دارند.

## ۵- نتیجه گیری

با توجه به نمودارهای مربوط به نتایج حاصل از برنامه، اثر پارامترهای تاثیر گذار بر ظرفیت باربری پی‌های واقع بر روی شیروانی به اختصار عبارتند از:

- فاصله پی از لبه شیروانی: در این تحقیق فاصله پی از لبه شیروانی در چندین مرحله تغییر کرده است و نتایج در قالب نمودارهایی نیز ارائه گردیده است. بر اساس نتایج به دست آمده، با دور شدن پی از لبه شیروانی مکانیسم گسیختگی بزرگتر شده و در نتیجه، تاثیر افزایش فشار آب حفره ای بر کاهش ظرفیت باربری پی نیز بیشتر می‌شود.
- شیب شیروانی: در تحقیق حاضر، شیب‌های مختلفی (۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه) برای شیروانی در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از برنامه نشان دهنده این مطلب است که تاثیر فشار آب حفره‌ای بر کاهش ظرفیت باربری پی، در شیب‌های ملایم‌تر بیشتر خواهد بود.
- ابعاد پی: با دقت در نتایج ظرفیت باربری پی واقع در نزدیکی لبه شیروانی، می‌توان گفت که تاثیر فشار آب حفره‌ای در حالتی که پی مربعی شکل باشد در مقایسه با پی مستطیلی با نسبت ابعاد بزرگتر کمتر می‌باشد.
- زاویه اصطکاک داخلی خاک: نتایج برنامه نشان دهنده این است که مکانیسم گسیختگی برای زاویه‌های اصطکاک بیشتر بزرگتر بوده بنابراین تاثیرات فشار آب حفره‌ای بر روی ظرفیت باربری پی واقع بر روی شیروانی با بیشتر شدن زاویه اصطکاک داخلی خاک بیشتر می‌گردد.
- خروج از مرکزیت بار وارد بر پی: از نتایج حاصل از برنامه می‌توان دریافت که زمانی که بار در محور پی واقع بر روی شیروانی وارد نمی‌شود (در شرایط اعمال بار خارج از محور)، اثر فشار آب حفره‌ای بر ظرفیت باربری پی کمتر می‌شود.

## مراجع

- [1] Ganjian, N., Farzaneh, O. and Askari, F. (2005), "Three-Dimensional Stability Analysis of Corners with Surcharge Load", Proc., 58th Canadian Geotechnical Int. Conf., Saskatoon..
- [2] Meyerhof, G.G., (1964), "Some recent research on the bearing capacity of foundations", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 1: 16-26. Michalewicz, Z. (1994), "Genetic algorithm + data structures = evolution program", 2nd ed. Springer-Verlag, New York.
- [3] Hansen, J. B., (1970), A Revised and Extended Formula for Bearing Capacity, Danish Geotech. Inst. Bulletin, No. 28, Denmark.
- [4] Vesic A.S., (1975), "Bearing capacity of shallow foundations", Foundation Engineering Handbook, Van Nostrand Reinhold, pp. 121-144.
- [5] Davis, E.H. and Booker, J.R. (1973), "The effect of increasing strength with depth on bearing capacity of clays.", Geotechnique, 23(4): 551-563.
- [6] Kusakabe, O., Kimura, T. and Yamaguchi, H., (1981), "Bearing capacity of slopes under strip loads on the top surfaces", Soils and Foundations, Vol.21(4): 29-40.
- [7] Giroud, J.P., and Tran-Vo-Nhiem, (1971), "Force portante d'une Fondation sur une pente," Theories et methodes de calcul, PP.131-140, July-August 1971.
- [8] Narita K, Yamaguchi H. (1990), "Bearing Capacity Analysis of Foundation on Slopes by Use of Log-Spiral Sliding Surface", Soils and Foundations, 30(3): 144-152.
- [9] Nakase, A., (1981), "Bearing capacity of rectangular footings on clays of strength increasing linearly with depth", Soils and Foundations, Vol. 21(4): 101-108.
- [10] Ugai, K. (1985). "Three dimensional slope stability analysis of vertical cohesive slopes", Soils and Foundations, 25(3): 41-48.
- [11] Michlowski, r. l. (2005). "slope stability: a kinematical approach." Geotechnique45, no.2,pp.283-293.
- [12] Zhu, M. and Michalowski, R.L., (2005), "Shape factors for limit loads on square and rectangular footings", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.131(2): 223-231.
- [13] Salgado, R., Lyamin, A., Sloan, S. and Yu, H.S., (2004), "Two- and three-dimensional bearing capacity of footings in clay", Geotechnique, 54(5): 297-306.
- [14] Lyamin, A., Salgado, R., Sloan, S. and Prezzi, M., (2007), "Two- and three-dimensional bearing capacity of footings in sand", Geotechnique 57, No. 8, 647-662.
- [15] Chen, Z.H., Wang, J., Wang, Y.J., Yin, J.H. and Haberfield, C. (2001b). "A three-dimensional slope stability analysis method using the upper bound theorem Part II: Numerical approaches, applications and extensions", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38(3): 379-397.
- [16] Chen, J. (2004). "Slope stability analysis using rigid elements", Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, Hong Kong Polytechnic University, Department of Civil and Structural Engineering.
- [17] Hwang, J. (2000), "Experimental and Numerical Investigation of Three-Dimensional Stability of Slopes", Ph.D. Dissertation, Uni. of Colorado.
- [18] Farzaneh, O. and Askari F., (2003), "Three-Dimensional Analysis of Nonhomogeneous Slopes.", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 129(2):137145.
- [19] Farzaneh, O., Askari F. and Ganjian, N. (2008), "Three Dimensional Stability Analysis of Convex Slopes in plan view", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 134(8):1192-1200.