



## اثر تداخلی پی‌های نواری مجاور قرار گرفته بر روی شیروانی خاک

احمد شریفی<sup>۱</sup>، عرفان نادری<sup>۲\*</sup>، محسن غلامی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد گروه عمران، واحد نورآباد ممسنی، دانشگاه آزاد اسلامی، نورآباد ممسنی

<sup>۲\*</sup> مربی، گروه عمران، واحد نورآباد ممسنی، دانشگاه آزاد اسلامی، نورآباد ممسنی

<sup>۳</sup> استادیار گروه عمران، واحد نورآباد ممسنی، دانشگاه آزاد اسلامی، نورآباد ممسنی

(e.naderi@mamasaniiau.ac.ir)

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۰۴)

### چکیده

مهندسان به علت‌های مختلفی مانند کمبود زمین مناسب یا ملاحظات معماری ممکن است پی را در مجاورت یا داخل بدنه‌ی شیب احداث کنند. از اینرو مساله ظرفیت باربری پی‌های نواری قرار گرفته بر روی سطوح شیروانی و ضریب اطمینان پایداری این شیب‌ها مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. از طرف دیگر بخصوص در محیط‌های شهری احتمال قرار گرفتن پی‌ها در مجاورت یکدیگر بسیار زیاد است و به همین دلیل اثر تداخلی پی‌های مجاور چالش دیگری است که پژوهشگران به آن پرداخته‌اند. در این پژوهش این دو چالش با هم ادغام شده و اثر تداخلی پی‌های مجاور قرار گرفته بر بدنه‌ی شیروانی حاکی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود پلکسیس مورد بررسی قرار گرفته است. بدین صورت که یک پی چسبیده به لبه‌ی بالایی شیب و پی دیگر در داخل بدنه‌ی شیب در نظر گرفته شده است. پارامترهای مورد بررسی در این مطالعه زاویه شیب، زاویه اصطکاک و چسبندگی خاک می‌باشد که تمامی این پارامترها در حالت پی تکی و دو پی متداخل مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نتایج حاکی از آن است که افزایش در زاویه و طول شیب باعث کاهش ظرفیت باربری پی و کاهش ضریب اطمینان پایداری شیروانی می‌شود. همچنین با افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک، ظرفیت باربری پی و ضریب اطمینان پایداری شیروانی افزایش یافت. اثر تداخلی موجب افزایش ظرفیت باربری و کاهش ضریب اطمینان پایداری در سطوح شیروانی شد و با افزایش طول شیب به میزان بیشتر از 5B در زاویای مختلف شیب، اثر تداخلی از بین رفت.

### کلمات کلیدی

اثر تداخلی، ظرفیت باربری، ضریب اطمینان، شیب، پی نواری.



# Interference Effect of Adjacent Strip Footings Placed on Soil Slope

Ahmad Sharifi<sup>1</sup>, Erfan Naderi<sup>2\*</sup>, Mohsen Gholami<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ms.c. Student, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Nourabad Mamasani Branch

<sup>2\*</sup> Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Nourabad Mamasani Branch

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Nourabad Mamasani Branch

(e.naderi@mamasaniiau.ac.ir)

(Date of received: 01/01/2024, Date of accepted: 23/02/2024)

## ABSTRACT

For various reasons, such as lack of suitable land or architectural considerations, engineers may construct the foundation adjacent to or inside the slope body. Therefore, the problem of the bearing capacity of strip foundations placed on the slope and the safety factor of these slopes has been the focus of many researchers. On the other hand, especially in urban environments, the possibility of foundations being placed adjacent to each other is very high, and for this reason, the interference effect of nearby foundations is another challenge that researchers have investigated. In this research, these two challenges have been integrated and the interference effect of adjacent foundations placed on the body of the slope has been investigated using PLAXIS finite element software. In this way, one foundation is attached to the upper edge of the slope and the other foundation is considered inside the body of the slope. The parameters examined in this study are slope angle, slope length, soil friction angle, and soil cohesion. All of these parameters have been studied in the case of single footing and two interfering footings. The results indicate that an increase in the angle and length of the slope causes a decrease in the bearing capacity of the footing and a decrease in the safety factor of the slope. Also, with the increase of cohesion and friction angle, the bearing capacity of the footing and the safety factor of the slope increased. The interference effect caused an increase in the bearing capacity and a decrease in the safety factor, and by increasing the length of the slope more than 5B at different angles of the slope, the interference effect disappeared.

## Keywords:

Interference effect, Bearing capacity, Factor of safety, Slope, Strip footing.



با توجه به کمبود زمین در شهرها، سازه‌ها را در بسیاری مواقع در مجاورت و با فاصله کم از یکدیگر احداث می‌کنند. این سازه‌ها به دلیل فاصله کمی که از یکدیگر دارند بر روی یکدیگر تاثیر می‌گذارند که این تاثیرات را اثر تداخلی می‌گویند. از طرف دیگر بنا به دلایل مختلفی از جمله کمبود زمین یا مزایای معماری احتمال ساخت سازه‌ها در مجاورت شیب یا بر روی بدنه‌ی شیب‌ها وجود دارد. قرار گرفتن پی در مجاورت شیب یا در دامنه‌ی شیب تاثیر بسیار زیادی بر رفتار پی می‌گذارد. حال می‌توان ترکیب این دو حالت را نیز محتمل دانست و اثر تداخلی دو پی مجاور که یکی در بالای شیب و دیگری در دامنه‌ی شیب قرار دارد را مورد بررسی قرار داد. در این مقاله دو پی نواری که یکی در بالای شیب و دیگری در بدنه‌ی شیب واقع شده باشد مورد مطالعه قرار گرفته است که تا به حال در مطالعات سایر محققین به این موضوع چندان توجهی نشده است. داس<sup>۱</sup> و لاربی‌چرف<sup>۲</sup> در سال ۱۹۸۳ ظرفیت باربری دو پی نواری سطحی و صلب مستقر بر شن و ماسه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌داد که ظرفیت باربری با نزدیک شدن پی‌ها افزایش می‌یابد [۱]. در ادامه، پژوهشگرانی نیز به ارائه روابط تئوریک پرداختند. کومار<sup>۳</sup> و ساران<sup>۴</sup> با استفاده از تئوری سطح گسیختگی و به کار بردن اصل سازگاری، یک سری روابط تئوریک جهت بررسی رفتار بار-نشست و بار-چرخش برای پی نواری مستقر بر ماسه ارائه کردند [۲]. کومار و گوش<sup>۵</sup>، کارایولف<sup>۶</sup> و لوکیدس<sup>۷</sup> و سالگادو<sup>۸</sup> ظرفیت باربری پی‌های نواری و دایره‌ای را به صورت آزمایشگاهی و تئوریک مورد بررسی قرار دادند [۳]. [۴] [۵]. وجود پی‌ها در مجاورت یکدیگر و اثر تداخلی نیز از پارامترهای تاثیرگذار بر ظرفیت باربری پی‌هاست. نتایج پژوهش قضاوی و لواسان نشان داد که اثر تداخلی باعث افزایش ظرفیت باربری دو پی مجاور تقویت شده با ژئوگرید نسبت به پی تکی تقویت شده با ژئوگرید می‌شود [۶]. سرینیواسن<sup>۹</sup> و گوش و همچنین نادری و هاتف اثر تداخلی پی‌های حلقه‌ای و دایره‌ای را با روش آزمایشگاهی و ارزیابی عددی مورد مطالعه قرار دادند [۷] [۸]. نتایج این پژوهش‌ها نشان داد که اثر تداخلی با کاهش فاصله میان پی‌ها باعث افزایش ظرفیت باربری می‌شود. تا بدین جا پژوهش‌هایی که به آن‌ها اشاره شد در مورد ظرفیت باربری و اثر تداخلی در زمین‌های مسطح بود. شیب زمین اثر مستقیم بر میزان ظرفیت باربری گذاشته و از اهمیت ویژه‌ای در مبحث ظرفیت باربری پی برخوردار است. علاوه بر این در این شرایط با چالش جدیدی به نام پایداری شیروانی مواجه می‌شویم. چودری<sup>۱۰</sup> و همکاران نتایج آزمایشگاهی در مورد رفتار ظرفیت باربری پی نواری واقع در بالای یک شیب تقویت شده با ژئوگرید را ارائه دادند. تحقیقات نشان داد که با حضور لایه‌های تقویت کننده، ظرفیت باربری تقویت می‌شود [۹]. لواسان و قضاوی ظرفیت باربری، نشست و شیب دو پی با فاصله کم، که یکی به شکل مربع و دیگری دایره بود را بر روی خاک مسلح و غیر مسلح بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که ظرفیت باربری با مسلح سازی و عدم تداخل پی‌ها حدود ۲۵-۴۰ درصد افزایش می‌یابد، در حالی که این ظرفیت با در نظر گرفتن تداخل پی‌ها حدود ۶۰ تا ۱۰۰ درصد افزایش یافت [۱۰]. عبدالابو<sup>۱۱</sup> و همکاران فهمی‌فر و همکاران رفتار پی‌های نواری بر روی شیروانی مسلح و غیر مسلح را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که مسلح سازی باعث افزایش ظرفیت باربری و پایداری شیروانی می‌شود [۱۱] [۱۲]. آچاریا<sup>۱۲</sup> و دای<sup>۱۳</sup> اثر تداخل دو پی نواری واقع بر بالای شیب را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک باعث افزایش ظرفیت باربری شد [۱۳].

<sup>1</sup> Das

<sup>2</sup> Larbi-Cherif

<sup>3</sup> Kumar

<sup>4</sup> Saran

<sup>5</sup> Ghosh

<sup>6</sup> Karaulov

<sup>7</sup> Loukidis

<sup>8</sup> Salgado

<sup>9</sup> Srinivasan

<sup>10</sup> Choudhary

<sup>11</sup> Abdrabbo

<sup>12</sup> Acharyya

<sup>13</sup> Dey



دای و همکاران ظرفیت باربری پی‌های سطحی در شیب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که با فاصله گرفتن پی از لبه شیب، افزایش عمق پی، افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه شیب از ظرفیت باربری کاسته می‌شود [۱۴]. آچاریا<sup>۱۴</sup> و همکاران مکانیسم تعامل و ظرفیت باربری پی‌های نواری مستقر بر شیب را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد با دو برابر شدن عرض پی ظرفیت باربری افزایش می‌یابد، اما با افزایش زاویه شیب از ظرفیت باربری کاسته می‌شود [۱۵]. قضاوی و دهکردی به مرور پژوهش‌های انجام شده بر روی اثر تداخلی پی‌های سطحی پرداختند. در این مقاله به بررسی اجمالی مطالعات تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی انجام شده بر روی اثر تداخلی پی و کاربردهای آن پرداخته شد. همچنین با استفاده از بهینه سازی نتایج مطالعات گذشته و الگوریتم آماری روابطی برای تخمین ضریب کارایی<sup>۱۵</sup> و توسعه روابط کلاسیک گذشته ارائه دادند [۱۶]. اشمودریخ<sup>۱۶</sup> و همکاران با استفاده از مدل سازی اجزای محدود به بررسی تاثیر وجود یک پی موجود بر روی ظرفیت باربری نهایی یک پی دیگر که به تازگی و در فاصله کم از پی قبلی ساخته شده پرداختند و اثرات ابعاد پی‌ها، فاصله بین پی‌ها، زاویه اصطکاک خاک تحتانی و بار اعمال شده به پی‌ها را بر روی رفتار آن‌ها مطالعه کردند. نتایج نشان داد که دو نوع مکانیزم گسیختگی می‌تواند بوجود بیاید که در یکی خط گسیختگی تا لبه‌ی جلو پی موجود ادامه می‌یابد و در دیگری خط گسیختگی از زیر پی موجود عبور می‌کند [۱۷].

## ۲- مدلسازی عددی

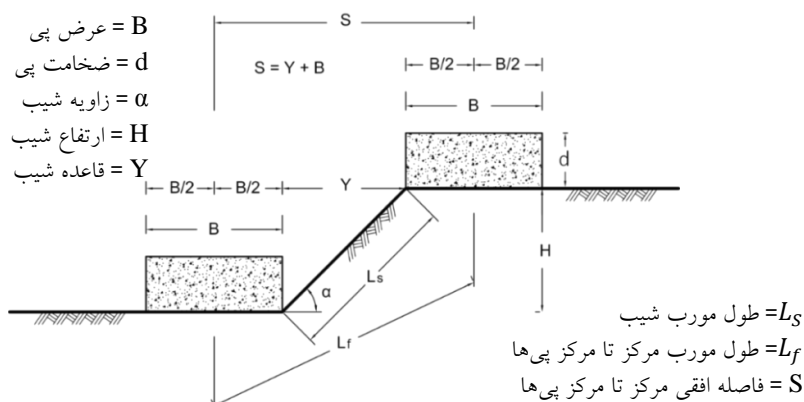
این پژوهش اثر تداخلی پی‌های نواری مجاور مستقر بر ابتدا و انتهای یک سطح شیروانی را مورد مطالعه قرار داده است. پارامترهای مطالعه شده در این مقاله در شکل ۱ بصورت شماتیک تعریف شده است. در گام نخست با استفاده از نرم افزار اجزای محدود Plaxis دو بعدی، با مدل رفتاری موهر-کولمب پی‌ها به صورت تکی مدل شد (پی مستقر در بالای شیب) و اثر تغییر زاویه در میزان ظرفیت باربری و پایداری شیروانی را مورد مطالعه قرار گرفت. چالش دوم بررسی تأثیر تداخل میان پی‌ها در زوایای شیب مختلف بر ظرفیت باربری و ضریب اطمینان پایداری شیروانی بود. در گام سوم با افزایش چسبندگی، میزان تغییرات در ظرفیت باربری و ضریب اطمینان پایداری شیروانی برای پی‌های تکی و متداخل را در زوایای شیب مختلف بررسی نمودیم. گام چهارم همانند گام سوم اما با تغییر در زاویه اصطکاک انجام شد. در گام‌های یک تا چهار همه مدل‌ها در ارتفاع یک متر بررسی شد. ولی در گام پنجم طول شیب را در پنج مرحله به میزان 1B، 2B، 3B، 4B و 5B افزایش دادیم و با تغییر در ارتفاع و قاعده شیروانی اثر تغییر طول شیب بر ظرفیت باربری و ضریب اطمینان پایداری شیروانی مورد مطالعه قرار دادیم. برای سنجش و تحلیل ظرفیت باربری از روی نمودارها و شکل‌ها از ضریبی به نام ضریب تداخل ( $IF^{17}$ ) استفاده شد. ضریب تداخل از نسبت ظرفیت باربری نهایی پی‌های متداخل مجاور  $Q_{int}$  بر ظرفیت باربری نهایی یک پی تک با همان ابعاد  $Q_{single}$  بدست آمده است.

<sup>14</sup> Acharyya

<sup>15</sup> Efficiency factor

<sup>16</sup> Schmüdderich

<sup>17</sup> Interference factor



شکل ۱: شکل شماتیک دو پی نواری مجاور واقع بر ابتدا و انتهای یک سطح شیب دار.

### ۳- مشخصات خاک و پی

ابعاد و مصالح پی‌های قرار گرفته در بالا و پایین شیروانی در تمام مدل‌سازی‌ها یکسان در نظر گرفته شد. مشخصات مصالح پی‌های نواری و خاک شیروانی در جدول ۱ ارائه شده است. از فرضیات این تحقیق می‌توان به همگن بودن خاک شیروانی، صلب بودن پی و همچنین زبر بودن سطح بین خاک و پی اشاره کرد.

جدول ۱: مشخصات و پارامترهای خاک و فونداسیون مورد پژوهش

فونداسیون	خاک	علامت اختصاری	واحد	پارامتر
۷۲-۶۳-۵۶-۴۵-۳۴-۲۷-۱۸		$\alpha$	Degree ( $^{\circ}$ )	زاویه شیب
-	۳۵-۳۰	$\phi$	Degree ( $^{\circ}$ )	زاویه اصطکاک
-	۱۵-۱۰	C	KN/m <sup>2</sup>	چسبندگی
-	۲۰	$\Psi$	Degree ( $^{\circ}$ )	زاویه اتساع
۰/۱۵	۰/۳۵	$\nu$	KN/m <sup>2</sup>	ضریب پواسون
۲۰,۰۰۰,۰۰۰	۱۰,۰۰۰	E	KN/m <sup>2</sup>	مدول یانگ
۷,۰۰۰,۰۰۰	-	EA	KN/m	سختی محوری
۷۱,۵۰۰	-	EI	KN/m <sup>2</sup>	سختی خمشی
۴/۹	-	w	KN	وزن
۰/۳۵	-	d	m	ضخامت
۲۴	۲۰	$\gamma$ unsat	KN/m <sup>3</sup>	وزن مخصوص اشباع
-	۲۱	$\gamma$ sat	KN/m <sup>3</sup>	وزن مخصوص اشباع
۱	-	B	m	عرض پی
۰	-	L	m	فاصله از لبه شیروانی
-	متغیر	H	m	ارتفاع شیروانی
-	متغیر	Y	m	قاعده شیروانی
-	متغیر	Ls	m	طول مورب شیروانی
متغیر	-	S	m	فاصله افقی مرکز تا مرکز پی‌ها
متغیر	-	Lf	m	فاصله مورب مرکز تا مرکز پی‌ها
۰	-	Df	m	عمق پی در زمین



#### ۴- صحت سنجی

برای صحت سنجی نتایج مدلسازی عددی از مقاله عیسی شوش‌پاشا و امیر کرد استفاده شد [۱۸]. ایشان پژوهش مذکور را با نرم‌افزار SIGMA/W نسخه 6.02 که از خانواده نرم‌افزار Geostudio2004 است به اتمام رساندند. نتایج پژوهش آن‌ها برای صحت سنجی نرم‌افزار پلکسیس مورد استفاده در این مقاله به کار گرفته شد. پارامترهای مقاله عیسی شوش‌پاشا و امیر کرد که در مدل صحت سنجی انجام شده با نرم‌افزار پلکسیس مورد استفاده قرار گرفت در جدول ۲ آورده شده است. برای اطمینان بیشتر از نتایج، این صحت سنجی در دو حالت و با پارامترهای مختلف انجام پذیرفت. در جدول ۳ نتایج مربوط به ظرفیت باربری بدست آمده از مدلسازی نرم‌افزار Plaxis و نتایج مشابه حاصل از نرم‌افزار SIGMA/W جهت مقایسه ارائه شده است.

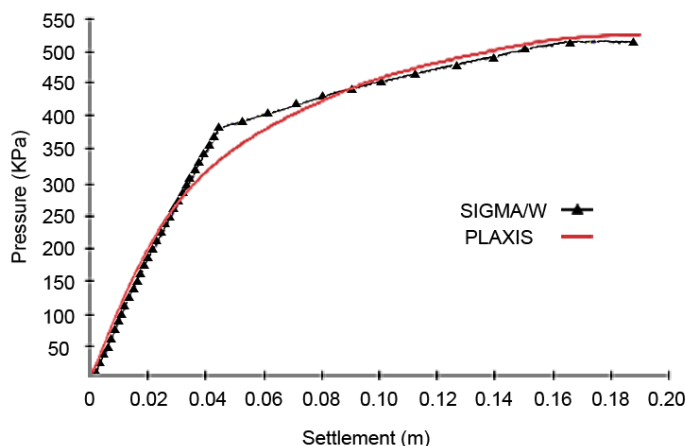
جدول ۲: مشخصات و پارامترهای پژوهش عیسی شوش‌پاشا و امیر کرد

پارامتر	واحد	علامت اختصاری	حالت اول	حالت دوم
زاویه شیب	Degree (°)	$\beta$	۱۵	۵۰
زاویه اصطکاک	Degree (°)	$\varphi$	۳۰	۳۰
چسبندگی	KN/m <sup>2</sup>	C	۰	۱۰
ضریب پواسون	KN/m <sup>2</sup>	$\nu$	۰/۳۵	۰/۳۵
مدول یانگ	KN/m <sup>2</sup>	E	۱۵۰۰۰	۱۵۰۰۰
فاصله از لبه شیروانی	m	L	۰	۰
وزن مخصوص خاک	KN/m <sup>3</sup>	$\gamma$	۲۰	۲۰
عرض پی	m	B	۱	۱
عمق پی در زمین	m	$D_f$	۰	۰

جدول ۳: مقایسه مقادیر ظرفیت باربری نرم‌افزار Plaxis با نرم‌افزار SIGMA/W

پارامتر	واحد	علامت اختصاری	حالت اول	حالت دوم
SIGMA/W	KN/m <sup>2</sup>	$q_{ult}$	۱۱۵	۱۸۵
Plaxis	KN/m <sup>2</sup>	$q_{ult}$	۱۲۵	۱۹۴

در مقاله مذکور برای حالت  $\beta=30^\circ$ ,  $\varphi=20^\circ$ ,  $C=40 \text{ KN/m}^2$  و  $L=2\text{m}$  نمودار بار-نشست ارائه داده است که در شکل ۲ این نمودار در کنار نمودار حاصل از Plaxis، جهت مقایسه و صحت سنجی نشان داده شده است. آن گونه که مشاهده می‌شود انطباق خوبی میان مدل‌های صحت سنجی این پژوهش با مدل‌های انجام شده توسط عیسی شوش‌پاشا و امیر کرد وجود دارد. با این تفاسیر می‌توان نتیجه گرفت که نرم‌افزار Plaxis برای آنالیز پی‌ها مناسب است.



شکل ۲: مقایسه نمودارهای حاصل از SIGMA/W و Plaxis

## ۵- نتایج و بحث

### ۵-۱- تأثیر تغییر زاویه شیب بر ضریب اطمینان پایداری شیروانی و ظرفیت باربری پی‌ها

جدول ۴ ظرفیت باربری، اثر تداخلی و ضریب اطمینان پی‌ها در چسبندگی، زاویه اصطکاک و زوایای مختلف را نشان داده است. شکل ۳ ترکیبی از نمودار خطی و ستونی است. دارای یک محور افقی که زاویه شیب را در پایین و دو محور عمودی که ظرفیت باربری را در سمت چپ و ضریب اطمینان پایداری شیروانی و اثر تداخلی را در سمت راست برای پی‌های تکی و مجاور در زوایای مختلف با چسبندگی ۱۰ کیلونیوتن بر مترمربع و زاویه اصطکاک ۳۰ درجه نشان داده است. نمودار خطی بیانگر ضریب تداخل است که با خط خاکستری و نقطه‌های قرمز نشان داده شده است. نمودار ستونی نیز ترکیبی از نمودارهای رنگی هاشور خورده و بدون هاشور است. ستون‌های هاشور خورده بیانگر ضریب اطمینان و ستون‌های بدون هاشور ظرفیت باربری را نشان داده است. رنگ آبی ستون‌ها مربوط به پی‌های تکی و رنگ صورتی مربوط به پی‌های متداخل مجاور است. شکل ۴ نیز نمایش گرافیکی از توزیع تنش و جابجایی خاک در پی‌های تکی و متداخل مجاور است که در زوایای مختلف، با چسبندگی ۱۰ کیلونیوتن بر مترمربع و زاویه اصطکاک ۳۰ درجه نشان داده شده است. برای اینکه جای کمتری در صفحه اشغال شود برخی از شیب‌های شکل گرافیکی بصورت برعکس نشان داده شده است. از نتایج جدول ۴ و نمودار شکل‌های ۳ و ۴ مشخص شد که هرچه زاویه شیروانی نسبت به سطح زمین بیشتر شود، از ضریب اطمینان پایداری شیروانی و ظرفیت باربری پی تکی و پی‌های متداخل مجاور، کاسته می‌شود. به طور مثال در مقادیر ثابت خاک با چسبندگی ۱۰ کیلونیوتن بر مترمربع و زاویه اصطکاک ۳۰ درجه، با افزایش شیب از ۱۸ به ۲۷ درجه، شاهد کاهش ظرفیت باربری پی‌های تکی و متداخل مجاور به ترتیب از ۴۳۳ و ۵۹۶ کیلونیوتن بر مترمربع به ۴۰۱ و ۵۸۳ کیلونیوتن بر مترمربع و کاهش ضریب اطمینان از ۶/۲۶ و ۳/۴۱ به ۵/۷۸ و ۲/۹۳ بودیم.

### ۵-۲- تأثیر اثر تداخلی بر ضریب اطمینان پایداری شیروانی و ظرفیت باربری پی‌ها

با بررسی جدول ۴ و نمودار شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده شد که اثر تداخلی پی‌های مجاور باعث افزایش ظرفیت باربری، نسبت به پی‌های تکی در تمام زوایا شده است، اما از ضریب اطمینان پایداری شیروانی کاسته است. هرچه شیب شیروانی نسبت به سطح افق بیشتر شده است، ضریب تداخل (IF) نیز افزایش یافته است. به طور مثال اثر تداخلی در خاک با زاویه شیب ۱۸ درجه و چسبندگی ۱۰ کیلونیوتن بر مترمربع و زاویه اصطکاک ۳۰ درجه، ۱/۳۸ است. با ثابت ماندن مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک و با افزایش زاویه شیب به ۲۷، ۳۴، ۴۵، ۵۶، ۶۳ و ۷۲ درجه به ترتیب مقادیر اثر تداخلی برابر با ۱/۴۵، ۱/۶۴، ۱/۸۲، ۱/۹۵، ۲/۰۷ و ۲/۳۴ است. در مقادیر مختلف چسبندگی و زاویه اصطکاک نیز با افزایش زاویه شیب شاهد افزایش ضریب تداخل بودیم. لازم به ذکر است در شکل



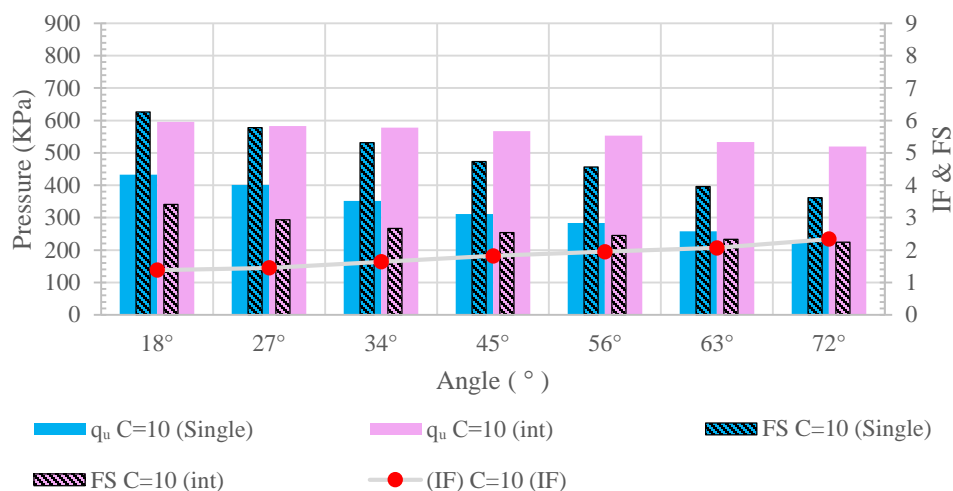
۴ برخی از شیب‌ها از راست به چپ و برخی از چپ به راست نشان داده شده‌اند. در واقع تمام این شیب‌ها شرایط مشابهی در مدلسازی داشته‌اند و جهت شیب تأثیری در نتایج ندارد. صرفاً برای اینکه فضای کمتری در شکل‌ها اشغال شود و بتوان تعداد شیب‌های بیشتری را روی یک شکل نشان داد از این تکنیک در این شکل و شکل‌های مشابه پیش رو استفاده شده است.

جدول ۴: ظرفیت باربری، اثر تداخلی و ضریب اطمینان پی‌ها در چسبندگی، زاویه اصطکاک و زوایای شیب مختلف.

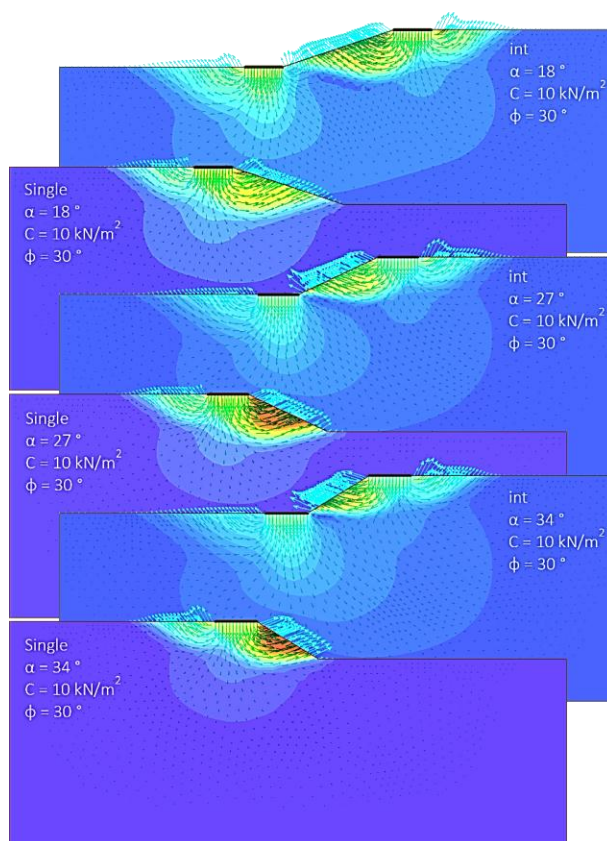
C (Cohesion) $\phi$ (Friction angle)			Q (kN/m <sup>2</sup> ) ( Bearing capacity)		FS (Safety factor)		IF (Interference factor)	
			$\Phi=30^\circ$	$\Phi=35^\circ$	$\Phi=30^\circ$	$\Phi=35^\circ$	$\Phi=30^\circ$	$\Phi=35^\circ$
18°	C=10 (kN/m <sup>2</sup> )	Single	433	716	6.26	6.96		
		int	596	881	3.41	4.32	1.38	1.23
	C=15 (kN/m <sup>2</sup> )	Single	569		8.16			
		int	724		5.70		1.27	
27°	C=10 (kN/m <sup>2</sup> )	Single	401	682	5.78	6.26		
		int	583	856	2.93	4.04	1.45	1.26
	C=15 (kN/m <sup>2</sup> )	Single	537		7.53			
		int	711		5.23		1.32	
34°	C=10 (kN/m <sup>2</sup> )	Single	352	617	5.31	5.82		
		int	578	838	2.67	3.71	1.64	1.36
	C=15 (kN/m <sup>2</sup> )	Single	483		6.88			
		int	700		4.85		1.45	
45°	C=10 (kN/m <sup>2</sup> )	Single	311	548	4.73	5.06		
		int	567	830	2.54	3.54	1.82	1.51
	C=15 (kN/m <sup>2</sup> )	Single	432		6.12			
		int	677		4.42		1.57	
56°	C=10 (kN/m <sup>2</sup> )	Single	284	504	4.56	4.65		
		int	553	769	2.45	3.46	1.95	1.53
	C=15 (kN/m <sup>2</sup> )	Single	400		5.72			
		int	656		4.15		1.64	
63°	C=10 (kN/m <sup>2</sup> )	Single	258	458	3.96	4.29		
		int	533	735	2.33	3.32	2.07	1.6
	C=15 (kN/m <sup>2</sup> )	Single	366		5.35			
		int	630		3.75		1.72	
72°	C=10 (kN/m <sup>2</sup> )	Single	222	397	3.62	3.85		
		int	520	710	2.24	3.21	2.34	1.79
	C=15 (kN/m <sup>2</sup> )	Single	323		4.84			
		int	612		3.42		1.89	



( $C=10 \text{ KN/m}^2$  ,  $\phi=30^\circ$ )



شکل ۳: نمودار ظرفیت باربری، پایداری شیروانی و اثر تداخلی پی‌های تکی و مجاور در ازای افزایش زاویه شیب.

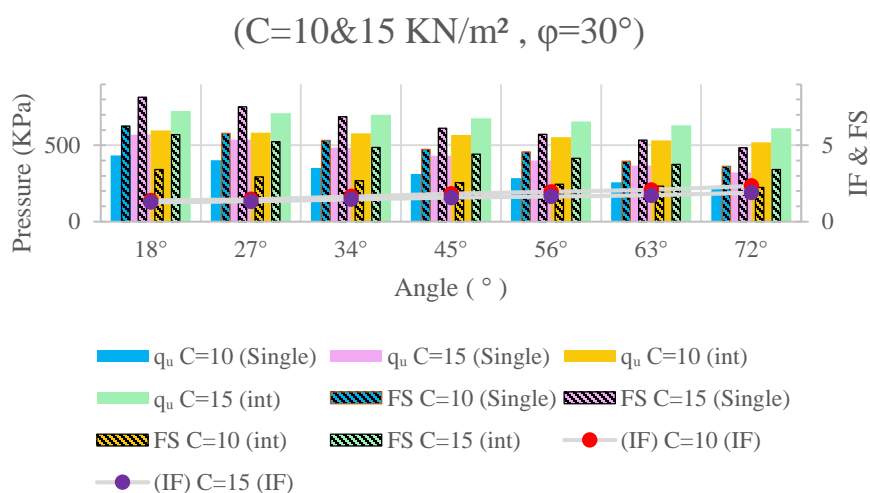


شکل ۴: نمایش توزیع تنش و جابه‌جایی خاک در ازای افزایش زاویه شیب برای پی‌های تکی و مجاور.

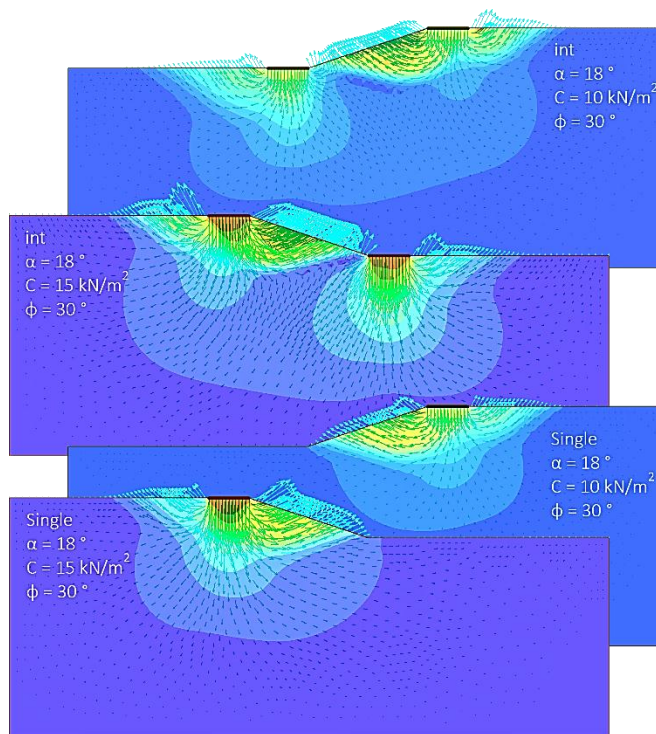


### ۵-۳- تأثیر افزایش چسبندگی بر ضریب اطمینان پایداری شیروانی و ظرفیت باربری پی‌ها

شکل ۵ ترکیبی از نمودار خطی و ستونی است. دارای یک محور افقی که زاویه شیب را در پایین و دو محور عمودی که ظرفیت باربری را در سمت چپ و ضریب اطمینان پایداری شیروانی و اثر تداخلی را در سمت راست برای پی‌های تکی و مجاور در زوایای مختلف با چسبندگی ۱۰ و ۱۵ کیلونیوتن بر مترمربع و زاویه اصطکاک ۳۰ درجه نشان داده است. نمودارهای خطی بیانگر ضریب تداخل است که با خط خاکستری و نقطه‌های قرمز و بنفش نشان داده شده است. خط خاکستری با نقاط قرمز، ضریب تداخل را با چسبندگی ۱۰ کیلونیوتن بر مترمربع و خط خاکستری با نقاط بنفش، ضریب تداخل را با چسبندگی ۱۵ کیلونیوتن بر مترمربع نشان داده است. نمودار ستونی نیز ترکیبی از نمودارهای رنگی هاشور خورده و بدون هاشور است. ستون‌های هاشور خورده بیانگر ضریب اطمینان و ستون‌های بدون هاشور ظرفیت باربری را نشان داده است. رنگ آبی ستون‌ها مربوط به پی‌های تکی با چسبندگی ۱۰ کیلونیوتن بر مترمربع، رنگ زرد مربوط به پی‌های تکی با چسبندگی ۱۵ کیلونیوتن بر مترمربع، رنگ صورتی مربوط به پی‌های متداخل مجاور با چسبندگی ۱۰ کیلونیوتن بر مترمربع و رنگ سبز مربوط به پی‌های متداخل مجاور با چسبندگی ۱۵ کیلونیوتن بر مترمربع است. شکل ۶ نیز نمایش گرافیکی از توزیع تنش و جابجایی خاک در پی‌های تکی و مجاور است که در زوایای مختلف، با چسبندگی ۱۰ و ۱۵ کیلونیوتن بر مترمربع و زاویه اصطکاک ۳۰ درجه نشان داده شده است. جدول ۴ و شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده است که افزایش چسبندگی باعث افزایش ضریب اطمینان پایداری شیروانی و ظرفیت باربری پی‌ها در تمامی حالت‌های تکی و متداخل مجاور با زوایای مختلف می‌شود. مثلاً در مقادیر ثابت زاویه اصطکاک ۳۰ درجه و زاویه شیب ۱۸ درجه، با افزایش چسبندگی از ۱۰ به ۱۵ کیلونیوتن بر مترمربع، شاهد افزایش ظرفیت باربری پی‌های تکی و متداخل مجاور به ترتیب از ۴۳۳ و ۵۹۶ کیلونیوتن بر مترمربع به ۵۶۹ و ۷۲۴ کیلونیوتن بر مترمربع بودیم. همچنین ضریب اطمینان از ۶/۲۶ و ۳/۴۱ به ۸/۱۶ و ۵/۷۰ افزایش یافت. در زوایای دیگر مانند زاویه ۲۷، ۳۴، ۴۵، ۵۶، ۶۳ و ۷۲ درجه نیز با افزایش چسبندگی شاهد افزایش ظرفیت باربری و ضریب اطمینان پایداری شیروانی بودیم. هرچه شیب شیروانی نسبت به سطح افق بیشتر شده است، ضریب تداخل (IF) نیز افزایش یافته است. اما اعداد و ارقام جدول ۴ نشان داده که اثر تداخلی در خاک با چسبندگی کمتر، افزایش بیشتری داشته است. به طور مثال در زاویه شیب ۱۸ درجه و زاویه اصطکاک ۳۰ درجه، اثر تداخلی در خاک با چسبندگی ۱۰ کیلونیوتن بر مترمربع ۱/۳۸ است اما در خاک با چسبندگی ۱۵ کیلونیوتن بر مترمربع ۱/۲۷ است. در دیگر زوایای شیب نیز اعداد به دست آمده برای اثر تداخلی در خاک با چسبندگی ۱۰ کیلونیوتن بر مترمربع بیشتر از خاک با چسبندگی ۱۵ کیلونیوتن بر مترمربع بوده است.



شکل ۵: نمودار ظرفیت باربری، پایداری شیروانی و اثر تداخلی پی‌های تکی و مجاور در ازای افزایش چسبندگی.



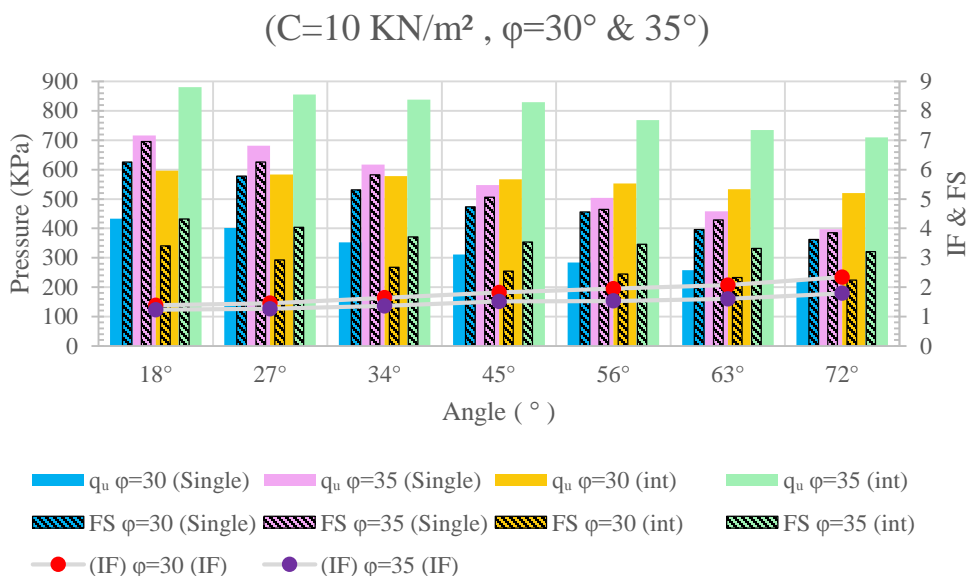
شکل ۶: نمایش توزیع تنش و جابه‌جایی خاک در ازای افزایش چسبندگی برای پی‌های تکی و مجاور.

#### ۴-۵- تأثیر افزایش زاویه اصطکاک بر ضریب اطمینان پایداری شیروانی و ظرفیت باربری پی‌ها

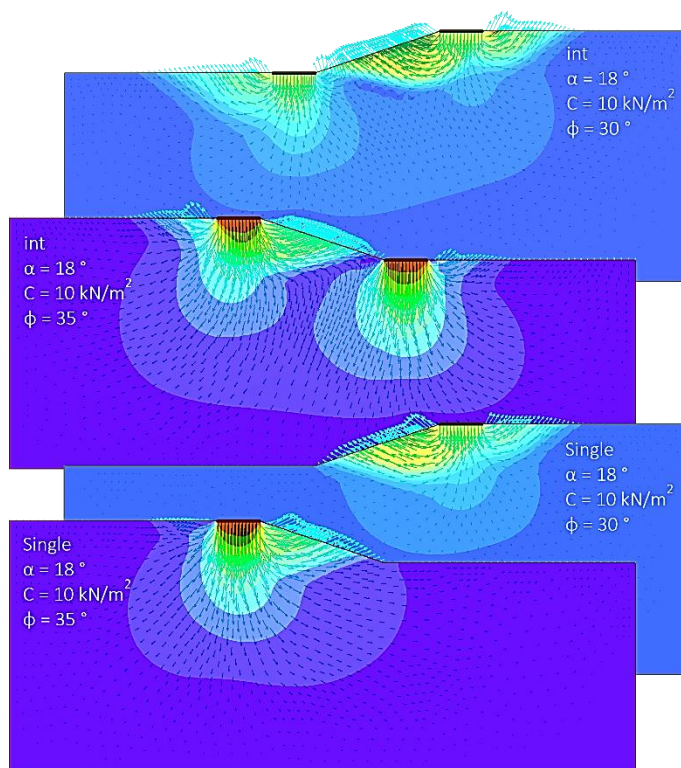
شکل ۷ ترکیبی از نمودار خطی و ستونی است. دارای یک محور افقی که زاویه شیب را در پایین و دو محور عمودی که ظرفیت باربری را در سمت چپ و ضریب اطمینان پایداری شیروانی و اثر تداخلی را در سمت راست برای پی‌های تکی و مجاور در زوایای مختلف با چسبندگی ۱۰ کیلونیوتن بر مترمربع و زاویه اصطکاک ۳۰ و ۳۵ درجه نشان داده است. نمودارهای خطی بیانگر ضریب تداخل است که با خط خاکستری و نقطه‌های قرمز و بنفش نشان داده شده است. خط خاکستری با نقاط قرمز، ضریب تداخل را با زاویه اصطکاک ۳۰ درجه و خط خاکستری با نقاط بنفش، ضریب تداخل را با زاویه اصطکاک ۳۵ درجه نشان داده است. نمودار ستونی نیز ترکیبی از نمودارهای رنگی هاشور خورده و بدون هاشور است. ستونهای هاشور خورده بیانگر ضریب اطمینان و ستونهای بدون هاشور ظرفیت باربری را نشان داده است. رنگ آبی ستون‌ها مربوط به پی‌های تکی با زاویه اصطکاک ۳۰ درجه، رنگ زرد مربوط به پی‌های تکی با زاویه اصطکاک ۳۵ درجه، رنگ صورتی مربوط به پی‌های متداخل مجاور با زاویه اصطکاک ۳۰ درجه و رنگ سبز مربوط به پی‌های متداخل مجاور با زاویه اصطکاک ۳۵ درجه است. شکل ۸ نیز نمایش گرافیکی از توزیع تنش و جابه‌جایی خاک در پی‌های تکی و متداخل مجاور است که در زوایای مختلف، با چسبندگی ۱۰ کیلونیوتن بر مترمربع و زاویه اصطکاک ۳۰ و ۳۵ درجه نشان داده شده است. جدول ۴ و شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده است که افزایش زاویه اصطکاک باعث افزایش ضریب اطمینان پایداری شیروانی و ظرفیت باربری پی‌ها در تمامی حالت‌های تکی و متداخل مجاور با زوایای مختلف می‌شود. مثلاً در مقادیر ثابت چسبندگی ۱۰ کیلونیوتن بر مترمربع و زاویه شیب ۱۸ درجه، با افزایش زاویه اصطکاک از ۳۰ به ۳۵ درجه، شاهد افزایش ظرفیت باربری پی‌های تکی و متداخل مجاور به ترتیب از ۴۳۳ و ۵۹۶ کیلونیوتن بر مترمربع به ۷۱۶ و ۸۸۱ کیلونیوتن بر مترمربع بودیم. همچنین ضریب اطمینان از ۶/۲۶ و ۳/۴۱ به ۶/۹۶ و ۴/۳۲ افزایش یافت. در زوایای دیگر مانند زاویه ۲۷، ۳۴، ۴۵، ۵۶، ۶۳ و ۷۲ درجه نیز با افزایش زاویه اصطکاک شاهد افزایش ظرفیت باربری و ضریب اطمینان پایداری شیروانی بودیم. هرچه شیب شیروانی نسبت به سطح افق بیشتر شده است، ضریب تداخل (IF) نیز افزایش یافته است. اما اعداد و ارقام جدول ۴ نشان داده که اثر تداخلی در خاک با زاویه اصطکاک کمتر، افزایش بیشتری داشته است. به طور مثال در زاویه شیب ۱۸ درجه و چسبندگی ۱۰ کیلونیوتن بر مترمربع، اثر



تداخلی در خاک با زاویه اصطکاک ۳۰ درجه ۱/۳۸ است اما در خاک با زاویه اصطکاک ۳۵ درجه ۱/۲۳ است. در دیگر زوایای شیب نیز اعداد به دست آمده برای اثر تداخلی در خاک با زاویه اصطکاک ۳۰ درجه بیشتر از خاک با زاویه اصطکاک ۳۵ درجه بوده است.



شکل ۷: نمودار ظرفیت باربری، پایداری شیروانی و اثر تداخلی پی‌های تکی و مجاور در ازای افزایش زاویه اصطکاک.

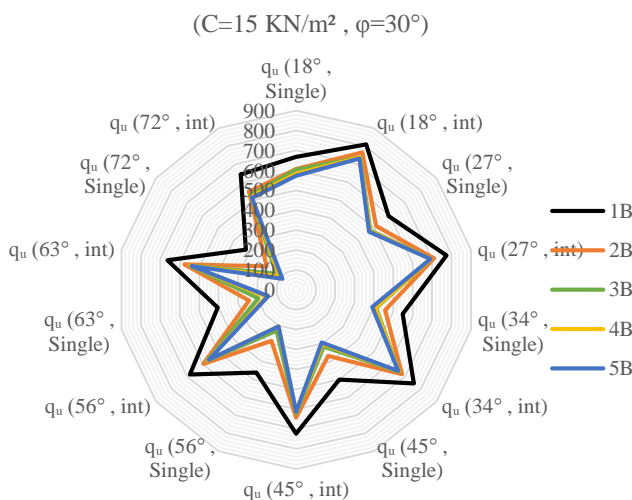


شکل ۸: نمایش توزیع تنش و جابه‌جایی خاک در ازای افزایش زاویه اصطکاک برای پی‌های تکی و مجاور.



### ۵-۵- تأثیر افزایش طول شیب بر ظرفیت باربری پی‌های متداخل مجاور و تکی

جدول ۵ ظرفیت باربری پی‌های متداخل مجاور و تکی را با چسبندگی ۱۵ کیلونیوتن بر مترمربع و زاویه اصطکاک ۳۰ درجه در زوایا و طول شیب‌های متفاوت نشان داده است. شکل ۹ معروف به نمودار راداری یا تار عنکبوتی است که ظرفیت باربری پی‌های متداخل مجاور و تکی را با چسبندگی ۱۵ کیلونیوتن بر مترمربع و زاویه اصطکاک ۳۰ درجه در زوایا و طول شیب‌های متفاوت نشان داده است. این نمودار از ۹ عدد چهارده‌ضلعی کوچک و بزرگ با خط ضخیم و تودرتو، شبیه به تار عنکبوت تشکیل شده است. اختلاف شعاع این چهارده‌ضلعی‌ها ضخیم از یکدیگر ۱۰۰ واحد است. یعنی ۹۰۰ واحد که مربوط به ظرفیت باربری است. ۵ عدد چهارده‌ضلعی با خط نازک در حدفاصل چهارده‌ضلعی‌های ضخیم وجود دارد که هر کدام بیانگر ۲۰ واحد است. هر زاویه از این چهارده‌ضلعی‌ها به ظرفیت باربری پی‌های متداخل مجاور و تکی با شیب‌های متفاوت اختصاص داده شده است. که پیرامون بزرگترین چهارده‌ضلعی نمایان است. از رنگ‌های مختلف برای طول شیب‌های متفاوت استفاده شده است. رنگ سیاه برای طول شیب 1B، رنگ نارنجی برای طول شیب 2B، سبز برای 3B، زرد برای 4B و رنگ آبی برای طول شیب 5B در نظر گرفته شده است. به طور مثال ظرفیت باربری پی متداخل مجاور با شیب ۲۷ درجه و طول شیب 1B در سمت راست، وسط نمودار بر روی دومین چهارده‌ضلعی بزرگ با رنگ سیاه مشخص شده است. از شکل‌های ۹ تا ۱۰ و جدول ۵ مشخص می‌شود که با افزایش طول شیب در یک زاویه ثابت، ظرفیت باربری برای پی‌های تکی و متداخل مجاور، کاسته می‌شود. به طور مثال ظرفیت باربری پی‌ها در زاویه ۱۸ برای پی‌های تکی در طول شیب 1B تا 5B به ترتیب ۶۶۷، ۶۰۷، ۶۰۳، ۵۸۳ و ۵۷۲ کیلونیوتن بر مترمربع و برای پی‌های متداخل مجاور نیز به ترتیب ۸۱۰، ۷۶۶، ۷۳۸، ۷۳۷ و ۷۳۲ کیلونیوتن بر مترمربع است. شکل گرافیکی ۱۰ نشان داده است که اثر تداخلی در طول شیب 5B برای زوایای مختلف از بین می‌رود. مقایسه شکل‌های گرافیکی نشان می‌دهد که اثر تداخلی باعث توزیع تنش در سطوح و عمق بیشتر برای پی‌های متداخل نسبت به پی تکی شده است. که این امر باعث شده تا مقدار ظرفیت باربری پی‌های متداخل همانند پی تکی نباشد. اثر تداخلی و سطح شیروانی باعث می‌شود تا ظرفیت باربری پی‌های متداخل مجاور در کمترین مقدار خود (در ازای افزایش طول به میزان 5B) از بیشترین مقدار ظرفیت باربری پی‌های تکی مستقر در بالای شیروانی (در ازای افزایش طول به میزان 1B) بیشتر باشد. لازم به ذکر است که ما فقط پی بالایی را به صورت تکی مدل کرده‌ایم. در سطوح شیروانی، ظرفیت باربری پی پایین بیشتر از پی بالایی است. این بدان معنا است که میانگین ظرفیت باربری پی تکی بالای شیب و پی تکی پایین شیب در طول شیب 5B تقریباً برابر با ظرفیت باربری پی‌های متداخل مجاور است.

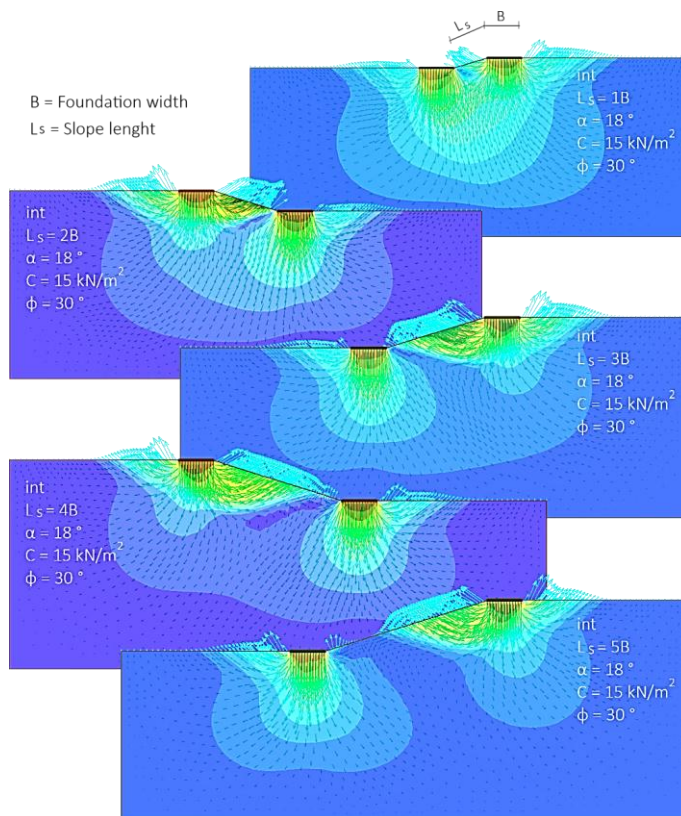


شکل ۹: نمودار ظرفیت باربری پی‌های تکی و مجاور در ازای افزایش طول شیب.



جدول ۵: ظرفیت باربری پی‌های متداخل مجاور و تکی با زوایا و طول شیب‌های متفاوت.

			C = 15 kN/m <sup>2</sup> ϕ = 30°				
			L <sub>s</sub> = 1B (m)	L <sub>s</sub> = 2B (m)	L <sub>s</sub> = 3B (m)	L <sub>s</sub> = 4B (m)	L <sub>s</sub> = 5B (m)
18°	Q (kN/m <sup>2</sup> )	Single	667	607	603	583	572
		int	810	766	738	737	732
27°	Q (kN/m <sup>2</sup> )	Single	594	513	477	473	467
		int	775	710	694	693	692
34°	Q (kN/m <sup>2</sup> )	Single	548	458	411	407	391
		int	756	680	660	685	655
45°	Q (kN/m <sup>2</sup> )	Single	500	368	317	301	294
		int	723	643	622	617	613
56°	Q (kN/m <sup>2</sup> )	Single	462	285	228	205	204
		int	683	598	572	569	563
63°	Q (kN/m <sup>2</sup> )	Single	404	243	195	154	144
		int	664	576	547	546	540
72°	Q (kN/m <sup>2</sup> )	Single	323	189	129	107	89
		int	642	547	526	520	513



شکل ۱۰: نمایش توزیع تنش و جابه‌جایی خاک در ازای افزایش طول شیب برای پی‌های تکی و مجاور.



## ۶- جمع بندی و نتیجه گیری

- ۱- با افزایش زاویه شیروانی نسبت به سطح افق و افزایش طول شیروانی در یک زاویه ثابت، از ظرفیت باربری و ضریب اطمینان پایداری شیروانی پی‌های متداخل مجاور و تکی کاسته می‌شود.
- ۲- افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک، باعث افزایش ظرفیت باربری و ضریب اطمینان پایداری شیروانی پی‌های مجاور و تکی در زوایای شیب مختلف می‌شود.
- ۳- اثر تداخلی باعث افزایش ظرفیت باربری و کاهش ضریب اطمینان پایداری شیروانی پی‌های مجاور نسبت به پی تکی در زوایای شیب مختلف است. در شیب‌های تند، اثر تداخلی تأثیر بیشتری بر ظرفیت باربری پی‌های مجاور نسبت به پی‌های تکی دارد. در شیب‌های ملایم این اثر کمتر است.
- ۴- اثر تداخلی در خاک با چسبندگی و زاویه اصطکاک کمتر، تأثیر بیشتری بر ظرفیت باربری پی‌های مجاور نسبت به پی‌های تکی دارد. در خاک با چسبندگی و زاویه اصطکاک بیشتر این اثر کاهش می‌یابد.
- ۵- اثر تداخلی در طول شیب 5B برای زوایای مختلف از بین می‌رود.
- ۶- اثر تداخلی نسبت به افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک به خصوص در شیب‌های تند، اثر بیشتری از خود بر ظرفیت باربری نشان داده است.
- ۷- پی‌های متداخل مجاور در طول شیب 5B به صورت تکی عمل می‌کنند، اما ظرفیت پی پایین شیب به دلیل وجود سطح شیروانی بیشتر از ظرفیت پی مستقر در بالای شیب است. این بدان معنا است که میانگین ظرفیت باربری پی تکی بالای شیب به صورت مجزا و پی تکی پایین شیب به صورت مجزا تقریباً برابر با ظرفیت باربری پی‌های متداخل مجاور است.

## ۷- مراجع

- 1-Das, B.M. and S. Larbi-Cherif, 1983, **Bearing capacity of two closely-spaced shallow foundations on sand**, Soils and foundations, 23, 1, 1-7.
- 2-Kumar, A. and S. Saran, 2003, **Closely spaced rectangular footings on sand**, Journal of the Institution of Engineers. India. Civil Engineering Division, 84, 27-32.
- 3-Kumar, J. and P. Ghosh, 2005, **Bearing capacity factor  $N_\gamma$  for ring footings using the method of characteristics**, Canadian geotechnical journal, 42, 5, 1474-1484.
- 4-Karaulov, A., 2006, **Experimental and theoretical research on the bearing capacity of ring-foundation beds**, Soil Mechanics and Foundation Engineering, 43, 2, 37-40.
- 5-Loukidis, D. and R. Salgado, 2009, **Bearing capacity of strip and circular footings in sand using finite elements**, Computers and Geotechnics, 36, 5, 871-879.
- 6-Ghazavi, M. and A.A. Lavasan, 2008, **Interference effect of shallow foundations constructed on sand reinforced with geosynthetics**, Geotextiles and Geomembranes, 26, 5, 404-415.
- 7-Srinivasan, V. and P. Ghosh, 2013, **Experimental investigation on interaction problem of two nearby circular footings on layered cohesionless soil**, Geomechanics and Geoengineering, 8, 2, 97-106.
- 8-Naderi, E. and N. Hataf, 2014, **Model testing and numerical investigation of interference effect of closely spaced ring and circular footings on reinforced sand**, Geotextiles and Geomembranes, 42, 3, 191-200.
- 9- Choudhary, A., J. Jha, and K. Gill, 2010, **Laboratory investigation of bearing capacity behaviour of strip footing on reinforced flyash slope**, Geotextiles and Geomembranes, 28, 4, 393-402.



- 10-Lavasan, A.A. and M. Ghazavi, 2012, **Behavior of closely spaced square and circular footings on reinforced sand**, Soils and Foundations, 52, 1, 160-167.
- 11-Abdrabbo, F., K. Gaaver, and E.A. Omer, 2008, **Behavior of strip footings on reinforced and unreinforced sand slope**, in GeoCongress 2008: Geosustainability and Geohazard Mitigation, 25-32.
- 12-Fahimifar, A., A. Abdolmaleki, and P. Soltani, 2014, **Stabilization of rock slopes using geogrid boxes**, Arabian Journal of Geosciences, 7, 2, 609-621.
- 13-Acharyya, R. and A. Dey, 2018, **Assessment of bearing capacity of interfering strip footings located near sloping surface considering artificial neural network technique**, Journal of Mountain Science, 15, 12, 2766-2780.
- 14-Dey, A., R. Acharyya, and A. Alammyan, 2019, **Bearing capacity and failure mechanism of shallow footings on unreinforced slopes: a state-of-the-art review**, International Journal of Geotechnical Engineering, 1-14.
- 15-Acharyya, R. and A. Dey, 2020, **Assessment of interaction mechanism and bearing capacity of strip footings located on slope face**, in SADHANA-ACADEMY PROCEEDINGS IN ENGINEERING SCIENCES, SPRINGER INDIA 7TH FLOOR, VIJAYA BUILDING, 17, BARAKHAMBHA ROAD, NEW DELHI
- 16-Ghazavi, M. and P.F. Dehkordi, 2020, **Interference influence on behavior of shallow footings constructed on soils, past studies to future forecast: A state-of-the-art review**, Transportation Geotechnics, 100502.
- 17-Schmüdderich, C., et al., 2020, **Bearing capacity of a strip footing placed next to an existing footing on frictional soil**, Soils and Foundations, (2020). 60(1): p. 229-238.

۱۸- شوش‌پاشا، ع. و کرد، ا.، ۱۳۸۷، بررسی ظرفیت باربری شالوده نواری بر روی دامنه شیب دار با استفاده از روش های عددی و کلاسیک، هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ایران.