

## تحلیل عددی برای پیش‌بینی نشست پی‌های سطحی بر اساس نتایج آزمایش بارگذاری صفحه در خاک ماسه‌ای

سجاد توکلی<sup>۱</sup> و محمد ملکی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد خاک و پی، دانشگاه بوعلی سینا، عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد ایلام

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

### چکیده

در کار حاضر یک مجموعه تحلیل اجزاء محدود غیرخطی، با بکارگیری یک مدل ارتجاعی خمیری سخت‌شونده برای تعیین میزان و توزیع نشست پی‌های سطحی صورت گرفت. وجه مشخصه این کار علاوه بر بکارگیری مدل رفتاری مناسب برای خاک و تعیین پارامترهای این مدل بر اساس نتایج آزمایش بارگذاری صفحه است. کالیبره کردن مدل بر اساس آزمایش بارگذاری صفحه با توجه به شباهت آن به پی واقعی و انجام شدن آن در محل قابلیت اطمینان به نتایج تحلیل اجزاء محدود را افزایش می‌دهد. پس از کالیبره کردن مدل رفتاری، تحلیل‌های مختلف با هدف بررسی چگونگی تأثیر عرض پی و عمق استقرار آن در میزان و توزیع نشست پی‌ها و نیز توزیع عکس‌العمل زمین انجام گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که اولاً تغییرات نشست بر حسب عرض پی به شدت غیرخطی است که روابط کلاسیک موجود این جنبه رفتاری را به خوبی لحاظ نمی‌کنند. ثانیاً توزیع نشست و عکس‌العمل زمین برای پی‌های گسترده علاوه بر بستگی به عرض پی به عمق (یا تنش محصور کننده) نیز بستگی داشته که چنین وابستگی بایستی در تخمین مقدار و توزیع مدول عکس‌العمل بستر مورد استفاده در محاسبات معمول پی‌های گسترده لحاظ شود. همچنین اثرات اندرکنش خاک-سازه موجب تغییر در توزیع نشست پی و نیروهای داخلی اعضای سازه می‌گردد.

**واژگان کلیدی:** تحلیل عددی، پی سطحی، مدول عکس‌العمل بستر، نشست، آزمایش بارگذاری صفحه، اندرکنش خاک-سازه.

### ۱- مقدمه

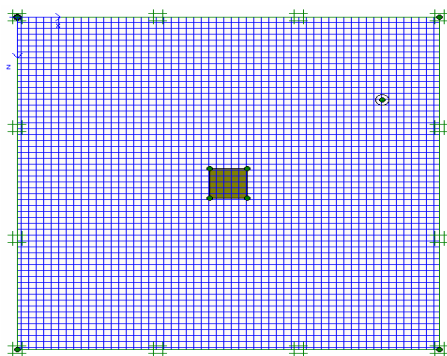
بسیار پراکنده هستند و اختلافات زیادی با هم دارند. مطالعات تجربی و عددی متنوع و بعضاً پراکنده‌ای در خصوص ملاحظات ژئوتکنیکی در طرح و محاسبه پی‌های گسترده صورت گرفته است. از آن جمله می‌توان به کارهای Brian و همکاران [۱]، Tong و همکاران [۲]، Nabil [۳] و Ping-Sien [۴] اشاره نمود. از مجموعه این مطالعات چنین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که علی‌رغم کارهای انجام گرفته، موضوع مورد بحث نیازمند تحقیقات بیشتری است که بتواند منجر به کاربردهای عملی برای مهندسی شود.

در همین راستا در کار حاضر جهت مطالعه عوامل مؤثر در رفتار پی‌های گسترده یک مجموعه تحلیل اجزاء محدود صورت گرفته است. وجه مشخصه این تحلیل‌ها این است که سعی شده است نااطمینانی در بیان رفتار خاک با انتخاب مدل رفتاری مناسب و نحوه انتخاب مقادیر پارامترهای آن تا حد امکان کاهش داده شود. مدل رفتاری مورد استفاده یک مدل ارتجاعی خمیری با سخت‌شوندگی که رفتار غیرخطی خاک را به صورت هذلولی ارائه داده و معیار خرابی آن معیار معروف کولمب است. مدول ارتجاعی و مدول سخت‌شوندگی آن وابسته به تنش محصور کننده است؛ به عبارت دیگر، بستگی رفتار خاک به تنش‌های همه جانبه در آن به خوبی لحاظ می‌گردد.

پیش‌بینی نشست پی‌ها یکی از مهم‌ترین و مشکل‌ترین مسائل پیش روی مهندسی ژئوتکنیک است. میزان و توزیع نشست پی بستگی به عوامل مختلفی چون عرض و عمق پی، نوع خاک، سختی پی، سختی روسازه و غیره دارد. روابط کلاسیک زیادی در ادبیات فنی وجود دارد که هر یک در حالات خاص و در محدوده کاربرد ویژه‌ای استفاده می‌شوند. غالب این روش‌ها مبتنی بر تئوری ارتجاعی برای نشست آنی و تئوری تحکیم یک بعدی برای نشست تابع زمان می‌باشند. متأسفانه به دلیل عدم در نظرگیری رفتار مناسب مصالح، هندسه و شرایط مرزی و بارگذاری، این روابط نتایج خوبی را در تخمین نشست و توزیع آن در اختیار قرار نمی‌دهند.

روش‌های عددی جهت تحلیل پی‌های گسترده عموماً با معادل کردن محیط خاک با یک مجموعه فنر ارتجاعی صورت می‌گیرد. در این خصوص نکات (مشکل) مهمی پیش روی مهندسی است. از جمله این موارد تخمین میزان و توزیع سختی فنرها است. روابط تجربی موجود در این زمینه بر اساس پارامترهای ارتجاعی چون مدول عکس‌العمل بستر (حاصله از آزمایش بارگذاری صفحه) و یا ضریب ارتجاعی و ضریب پواسون ارائه گردیده‌اند. تفاوت اصلی این روابط در چگونگی تأثیر عرض پی بوده و بررسی‌ها نشان می‌دهند که نتایج حاصل از این روابط

داشتن دقت بالا، زمان محاسبه نیز در حد زمان بهینه باشد. بدین ترتیب با انجام یک مجموعه تحلیل اولیه برای انواع ابعاد پی، زمینی به عرض ۱۱B، طول ۱۱B و عمق ۱۰B در زیر پی مدل شد. مش اجزاء محدود سه بعدی در پلان افقی در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱- مش اجزاء محدود در پلان افقی

### ۳- مدل رفتاری مورد استفاده

کد محاسباتی Plaxis یک مجموعه مدل رفتاری را به کاربر ارائه می‌دهد که مناسب‌ترین آن برای مطالعه حاضر مدل ارتجاعی-خمیری با سخت‌شوندگی است. این مدل توسعه‌ای از مدل مور-کولمب غیرمتحد است. در واقع معایب عمده مدل مور-کولمب را با اضافه کردن یک سطح کلاهی برای مدل کردن جریان خمیری تحت تنش‌های همسان و نیز بیان جریان خمیری قبل از خرابی با اعمال قانون سخت‌شوندگی همسان، برطرف می‌سازد. پارامتر سخت‌شوندگی به وسیله کرنش انحرافی کنترل کننده سطح تسلیم انحرافی و همچنین کرنش حجمی خمیری کنترل کننده ناحیه کلاهی است. مدل سخت‌شوندگی و مدل‌های ارتجاعی تابع تنش محدود کننده در نظر گرفته شده‌اند. ویژگی‌های اساسی این مدل عبارت است از:

- مدل‌های سخت‌شوندگی خمیری و ارتجاعی وابسته به تنش بر طبق قانون توان (وابستگی توانی سختی به تنش)
- رابطه سهمی بین کرنش و تنش انحرافی برای مسیر تنش در آزمایش سه محوری
- تفکیک بارگذاری اولیه نسبت به باربرداری- بارگذاری مجدد
- سطح خرابی منطبق بر معیار کولمب

با این همه این مدل صرفاً در مسائل استاتیکی کاربرد داشته و برخی جنبه‌های مهم رفتاری چون وابستگی سطح خرابی به تنش محصور کننده و نیز مفهوم حالت بحرانی را در نظر نمی‌گیرد.

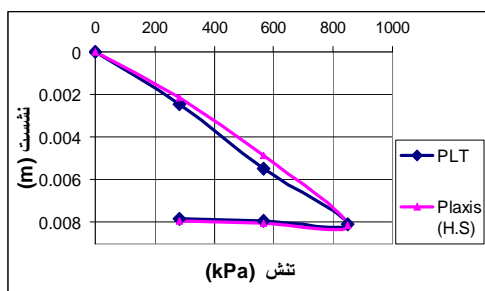
در کار حاضر مدل رفتاری بر اساس نتایج آزمایش بارگذاری صفحه اجرا شده در ناحیه‌ای از شهر تهران کالیبره گردیده و مبنای پیش‌بینی رفتار پی قرار گرفت. زیرا این آزمایش یک آزمایش صحرایی غیرهمگن و شکل آن مانند پی واقعی است. آزمایش بارگذاری صفحه در واقع آزمایش روی یک پی کوچک است. تعمیم نتایج آن برای پی‌های واقعی منوط به شناخت کافی از چگونگی وابستگی نشست و ظرفیت باربری پی‌ها به عرض و عمق پی است. این موضوع از همان بدو ظهور علم مکانیک خاک مدنظر محققین و دانشمندان بوده است و در ادبیات روابط تجربی و تئوری متنوعی برای تخمین نشست پی‌ها با توجه به نتایج این آزمایش و بخصوص پارامتر مدول عکس‌العمل بستر موجود است. متأسفانه نتایج حاصل از این روابط به دلایل مختلف چون لحاظ نکردن جنبه‌های رفتاری خاک‌ها و همچنین عدم توانایی در لحاظ کردن انواع بارگذاری و هندسه چندان مناسب نبوده و متضمن نااطمینانی‌های زیادی است مشکل عمده در کاربرد مستقیم (روابط تجربی) نتایج این آزمایش نحوه تأثیر عرض و عمق پی (این آزمایش عموماً در سطح انجام می‌شود) است. این مشکل با بکارگیری محاسبه اجزاء محدود و با انتخاب مدل رفتاری مناسب برای خاک مرتفع می‌گردد.

جهت مطالعه اثر اندرکنش خاک-سازه بر توزیع نشست بهترین روش استفاده از یک کد محاسباتی است که هم‌زمان قادر به تحلیل سازه (اسکلت ساختمان) از یک طرف و تحلیل محیط خاک با در نظر گیری جنبه‌های مختلف رفتاری آن از طرف دیگر باشد که متأسفانه چنین نرم‌افزاری فعلاً در دست نمی‌باشد. لذا در این تحقیق از تقابل دو کد Plaxis (قدرتمند در تحلیل مسائل ژئوتکنیکی) و Sap (قدرتمند در تحلیل مسائل سازه‌ای) با ارضاء شرط سازگاری میدان تغییرمکان در فصل مشترک محیط خاکی و سازه استفاده گردید. مراحل مختلف کار حاضر علاوه بر مقدمه عبارتند از: انتخاب هندسه و شرایط مرزی، مدل رفتاری مورد استفاده، تعیین پارامترهای مدل رفتاری، مطالعه اثر عرض پی در تخمین نشست، بررسی اثر عمق پی در تخمین نشست، مقایسه با نتایج حاصل از روابط کلاسیک، بررسی وابستگی مدول عکس‌العمل بستر به عرض پی، توزیع نشست و عکس‌العمل زمین در فصل مشترک پی و خاک و بررسی اثر اندرکنش خاک-سازه بر توزیع نشست.

### ۲- انتخاب هندسه و شرایط مرزی

ابعاد مش سه‌بعدی و تعداد المان‌های محدود با توجه به قابلیت‌های کد Plaxis 3D به گونه‌ای انتخاب گردید که ضمن

استاندارد از روابط همبستگی تعیین گردید. همچنین برای تخمین پارامتر  $\psi$  از رابطه  $\psi = \phi - 30$  پیشنهاد شده در [۶] استفاده گردید. لازم به ذکر است که رفتار قبل از خرابی یعنی نشست و توزیع آن مدنظر است لذا پارامترهای خرابی نقش کمتری بازی می‌کنند. در شکل (۲) نتایج شبیه‌سازی و در جدول (۱) مقادیر پارامترها ارائه شده‌اند.



شکل ۲- شبیه‌سازی آزمایش بارگذاری صفحه برای تعیین پارامترهای مدل رفتاری

#### ۵- مطالعه اثر عرض و عمق پی در تخمین نشست

با توجه به کالیبراسیون انجام گرفته برای کد اجزاء محدود Plaxis3D در این قسمت یک مجموعه تحلیل برای مطالعه اثر عرض پی بر نشست انجام گرفت. بدین منظور پی‌های مربعی با عرض‌های ۲/۵، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ متر که مشخصات هندسی و مصالح آنها در جدول (۲) آمده است، انتخاب گردیدند. میزان بارگذاری مطابق با آن چیزی است که در آزمایش بارگذاری صفحه اعمال گردیده است. هندسه و ابعاد شبکه‌های اجزاء محدود بر اساس بند (۲) این تحقیق انتخاب شدند. تغییرات تنش اعمال شده در مقابل نشست برای پی‌های مختلف در شکل (۳) آمده است. همان‌طور که از این شکل برمی‌آید، تحت بار یکسان، با افزایش عرض پی، مقدار نشست نیز افزایش پیدا می‌کند. با مقایسه نتایج حاصله مشاهده می‌شود، تحت شرایط بارگذاری ثابت، با توجه به عرض پی، با دو برابر شدن عرض، نشست آن‌ها نسبت به هم از ۱/۲ تا ۱/۷ برابر تغییر پیدا کرده که نشان دهنده وابستگی غیرخطی نشست به عرض پی است. برای بررسی اثر عمق در میزان نشست، یک پی مربعی به عرض ۱۰ متر در اعماق ۱/۵، ۳، ۶ و ۱۲ متر تحلیل گردید. نتایج تحلیل‌های اجزاء محدود در شکل (۴) آمده است.

این مدل دارای هشت پارامتر است که خوشبختانه اکثر آن‌ها دارای تعبیر فیزیکی بوده و با انجام آزمایش‌ها در آزمایشگاه به راحتی قابل تخمین هستند. پارامترهای مدل به شرح زیر هستند:

- C : چسبندگی خاک
- $\phi$  : زاویه اصطکاک داخلی حداکثر خاک
- $\psi$  : زاویه اتساع خاک
- $E_{ref}^{50}$  : سختی مکانتی در آزمایش سه‌محوری استاندارد در تنش محصور کننده مرجع  $\sigma_3 = p^{ref}$
- $E_{oed}^{50}$  : سختی مماسی حاصله از آزمایش تحکیم
- $E_{ur}^{ref}$  : سختی خاک در حالت باربرداری- بارگذاری مجدد
- m : پارامتر بیان کننده میزان وابستگی سختی خاک به سطح تنش محصور کننده
- $V_{ur}$  : نسبت پواسون در حالت باربرداری- بارگذاری مجدد
- $R_f$  : نسبت خرابی، برابر  $q_r/q_m$  (خودکار برنامه ۰/۹) را در نظر می‌گیرد). جزئیات روابط مدل در مرجع [۶] و [۷] آمده است.

#### ۴- تعیین پارامترهای مدل

همان‌گونه که در بخش مقدمه گفته شد در تحقیق حاضر از نتایج آزمایش بارگذاری صفحه جهت تخمین نشست و رفتار پی استفاده می‌شود. در این روش مدل رفتاری یا به عبارت کلی‌تر کد اجزاء محدود با توجه به نتایج آزمایش بارگذاری صفحه کالیبره گردیده و سپس برای پیش‌بینی رفتار پی تحلیل انجام می‌شود. برای این منظور، نتایج آزمایش بارگذاری صفحه مربوط به خاک ناحیه‌ای از شهر تهران مورد استفاده قرار گرفت. با مدل سازی اجزاء محدود (کد Plaxis) برای یک صفحه مربعی صلب به بعد ۳۰ سانتی‌متر واقع بر محیط خاکی و با انجام سعی و خطا بهترین انطباق ممکن بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایش حاصل گردید. برای برخی از پارامترها از روابط پیش‌فرض کد Plaxis استفاده گردید. نتایج آزمایش‌های شناسایی نشان می‌دهد که خاک دانه‌ای بوده و به عبارت دیگر چسبندگی آن ناچیز می‌باشد. تخمین پارامتر  $\phi$  با توجه به نتیجه آزمایش نفوذ

جدول ۱- مقادیر پارامترهای مدل رفتاری

$E_{50}^{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$E_{oed}^{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$E_{ur}^{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	m	C (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$	$\psi$	$V_{ur}$	$R_f$
۱۱۵۰۰۰	۱۱۵۰۰۰	۹۲۰۰۰۰	۰/۶	۰/۵	۳۵°	۵°	۰/۲	۰/۹

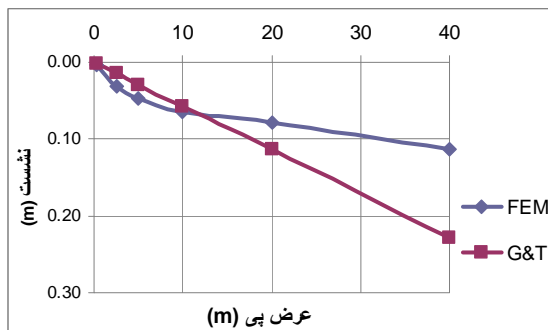
علاوه بر روابط فوق ترزاقی و پک پیشنهاد کردند که نشست پی‌های تحت بار گسترده یکنواخت  $q$  برای خاک های ماسه‌ای از رابطه زیر به نشست حاصل از آزمایش بارگذاری صفحه قابل ارتباط است [۵].

$$S_f = S_p \left( \frac{2B_f}{B_f + B_p} \right)^2 \quad (2-الف)$$

که در آن:  $B_p$  عرض صفحه آزمایش بارگذاری به اندازه ۰/۳ متر، و  $B_f$  عرض پی است. شکل کلی تری برای رابطه ترزاقی و پک به صورت زیر پیشنهاد شده است:

$$S_f = S_p \left( \frac{B_f}{B_p} \right)^n \quad (2-ب)$$

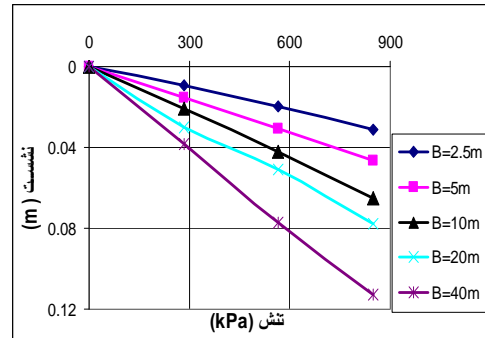
برای نمای  $n$  اغلب مقادیر ۰/۴ تا ۰/۷ پیشنهاد شده است [۵]. ابتدا با در نظر گرفتن شدت بار معادل ۸۰۰ کیلو پاسکال و انتخاب ضریب ارتجاعی و نسبت پواسون مطابق جدول (۱) مقادیر نشست برای عرض های مختلف پی از رابطه (۱) محاسبه گردید که نتایج آن با نتایج حاصل از تحلیل های اجزاء محدود در شکل (۵) با هم مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل (۵) کاملاً مشخص است که رابطه (۱) ارتباط نشست و عرض را به صورت خطی ارائه می‌دهد، در حالی که طبق محاسبات اجزاء محدود این ارتباط به شدت غیر خطی است. نتیجه دیگری که می‌توان گرفت این است که در محدوده عرض‌های کوچک‌تر تحلیل اجزاء محدود نشست‌های بیشتری را بدست داده است. در مرحله بعد عملکرد رابطه (۲-الف) و (۲-ب) مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور به ازای مقادیر مختلف نمای  $n$  نسبت نشست‌های پی به صفحه محاسبه گردید که نتایج حاصله با نتایج تحلیل‌های اجزاء محدود در شکل (۶) با هم مقایسه شده‌اند.



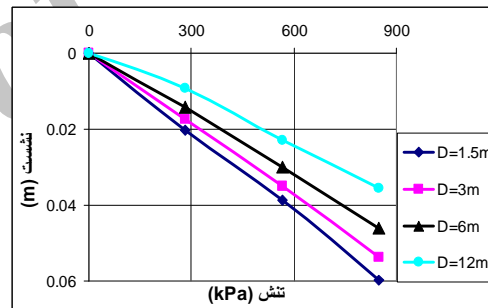
شکل ۵- مقایسه نمودار عرض- نشست حاصله از تحلیل اجزاء محدود و رابطه (۱)

جدول ۲- مشخصات هندسی و مصالح پی‌ها

B(m)×B(m)	t(m)	E(kPa)	$\mu$
۲/۵×۲/۵	۰/۸	۲×۱۰ <sup>۷</sup>	۰/۲
۵×۵	۱		
۱۰×۱۰	۱		
۲۰×۲۰	۱/۵		
۴۰×۴۰	۱/۵		



شکل ۳- نمودار نشست- تنش پی با عرض‌های مختلف



شکل ۴- نمودار نشست- تنش پی به عرض ۱۰ متر در اعماق مختلف

از شکل (۴) می‌توان نتیجه گرفت هر اندازه عمق استقرار پی‌ها بیشتر باشد، نشست آن کمتر است. این کاهش برای اعماق بزرگتر بیشتر بوده و روند کاهش نیز به صورت غیر خطی است.

#### ۶- مقایسه با نتایج حاصل از روابط کلاسیک

در این قسمت نتایج حاصل از تحلیل‌های اجزاء محدود با برخی روابط کلاسیک محاسبه نشست مقایسه می‌شوند. بر اساس رابطه معروف حاصل از نظریه الاستیسیته (تیموشنکو و گودیر) ارتباط نشست ارتجاعی و عرض پی مطابق زیر است [۵].

$$S_f = \frac{qB}{E_s} (1 - \nu^2) I_s I_f \quad (1)$$

که در آن  $I_s$  و  $I_f$  به ترتیب ضریب تأثیر مربوط به عمق و ضریب تأثیر مرکب مربوط به شکل پی و ضخامت لایه زیر پی می‌باشند.

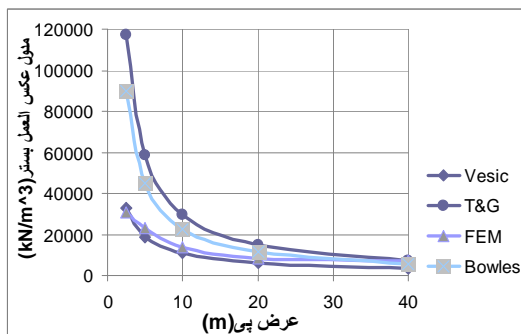
لختی و عرض شالوده هستند. با استخراج نسبت  $q/S_f$  در رابطه تیموشنکو و گودیر (رابطه (۱))، می‌توان تخمینی برای مدول عکس‌العمل بستر مطابق زیر ارائه نمود [۵]:

$$k_s = \frac{E_s}{B(1-\nu^2)I_S I_F} \quad (۴)$$

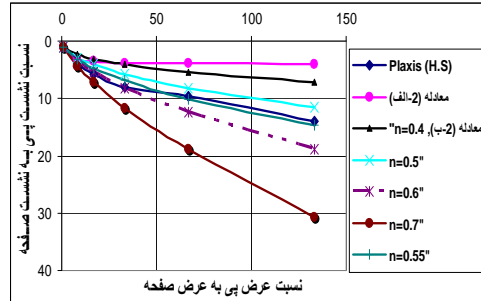
رابطه فوق یک ارتباط مستقیم میان مدول عکس‌العمل بستر و مدول ارتجاعی خاک را نشان می‌دهد. بدین ترتیب کاربرد این رابطه منوط به در دست داشتن و یا تخمین مناسبی از مدول ارتجاعی و نسبت پواسون خاک است. رابطه دیگری که مورد توجه مهندسی محاسب است رابطه‌ای است که بولز بر اساس ظرفیت باربری مجاز پی،  $q_a$ ، به صورت زیر پیشنهاد کرده است [۵]:

$$k_s = 40(SF)q_a \quad (۵)$$

در رابطه فوق با توجه به ظرفیت باربری پی با اعمال ضریب اطمینان SF و یا بر اساس مقاومت معادل نشست مجاز یک اینچ (هر کدام کمتر باشد) استوار است. لازم به ذکر است که محاسبه مدول عکس‌العمل از روابط فوق‌الذکر با فرض شده اند. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود بین نتایج حاصل از تحلیل‌های اجزاء محدود و روابط الاستیسیته و نیز رابطه پیشنهادی بولز تفاوت قابل ملاحظه‌ای وجود دارد. با این همه رابطه وسیک انطباق خوبی با نتایج روش اجزاء محدود ارائه داده است. این انطباق قبل از هر چیز مربوط به در نظرگیری  $E_s = E_{50}^{ref}$  است. به عبارت دیگر، اگر  $E_{50}^{ref}$  حاصل از کالیبراسیون کد اجزاء محدود براساس نتایج آزمایش بارگذاری صفحه در دست نباشد، تخمین  $E_s$  از سایر روش‌ها یا روابط همبستگی ممکن است منجر به نتایج پراکنده و متفاوت گردد.



شکل ۷- نمودار  $k_s$ -B در حالت‌های مختلف



شکل ۶- مقایسه نتایج به دست آمده از روابط کلاسیک (تزرافی- پک) و تحقیق حاضر

مطابق شکل (۶) مشخص است که نسبت‌های  $S_f$  به  $S_p$  محاسبه شده از فرمول اصلی تزرافی و پک (رابطه (۲-الف))، تفاوت زیادی با نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود دارند. در خصوص رابطه (۲-ب) بستگی به مقدار  $n$  نتایج متفاوت بوده و برای  $n = 0.55$  انطباق خوبی با نتایج اجزاء محدود حاصل شده است.

#### ۷- مطالعه وابستگی مدول عکس‌العمل بستر به عرض پی

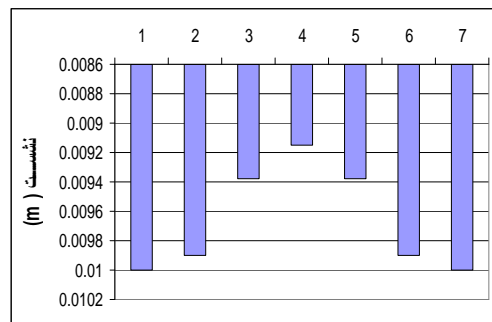
مدول عکس‌العمل بستر رابطه بین تنش و نشست ارتجاعی خاک را بیان می‌کند. این پارامتر بطور گسترده در تحلیل پی‌ها، چه در روابط کلاسیک و چه در روش‌های عددی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار آن بستگی به عوامل مختلفی چون ابعاد پی، نوع خاک و عمق پی دارد. تخمین آن برای یک پی عموماً براساس مدول عکس‌العمل حاصل از نتایج آزمایش بارگذاری صفحه و با اعمال اثرات شکل (عرض) و عمق پی و نوع خاک بدست می‌آید. در کار حاضر چگونگی وابستگی مدول عکس‌العمل بستر به عرض پی مورد بررسی قرار گرفت. با عنایت به نتایج تحلیل‌های اجزاء محدود انجام شده نسبت متوسط عکس‌العمل زمین به متوسط نشست پی در تراز بارگذاری اعمال شده معادل ۸۰۰ کیلو پاسکال برای عرض‌های مختلف تعیین گردید. علاوه بر این پارامتر فوق با استفاده از تعدادی از روابط کلاسیک جهت انجام مقایسه محاسبه گردید. قبل از ارائه نتایج به بیان تعدادی از این روابط پرداخته می‌شود. بر اساس رابطه وسیک مدول عکس‌العمل بستر با استفاده از مدول تنش- کرنش خاک و مشخصات مقطع و مصالح پی بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$k_s = \frac{1}{B} \left( 0.65_{12} \sqrt{\frac{E_s B^4}{E_f I_f} \frac{E_s}{1-\nu^2}} \right) \quad (۳)$$

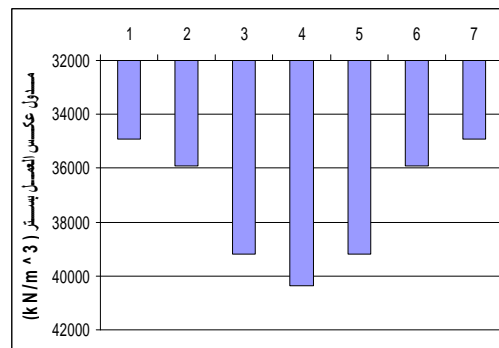
که در آن  $E_s$  و  $\nu$  به ترتیب ضریب ارتجاعی و نسبت پواسون خاک همچنین  $E_f$ ،  $I_f$  و  $B$  به ترتیب، ضریب ارتجاعی، گشتاور

## ۸- بررسی توزیع نشست و عکس‌العمل زمین در فصل مشترک پی و خاک

مقادیر نشست حاصله از تحلیل‌های اجزاء محدود در نقاط مختلف در امتداد عرض پی محاسبه گردید که نتایج آن در شکل (۸) به نمایش در آمده است. مشاهده می‌شود که نشست در نواحی مرکزی کمتر از نواحی کناری است که منطبق بر رفتار خاک‌های ماسه‌ای است. توانایی بیان چنین رفتاری صرفاً بخاطر انتخاب مدل رفتاری مناسب در این تحقیق است. همان‌گونه که در بخش مقدمه گفته شد، در مدل رفتاری مورد استفاده مدول‌های ارتجاعی و سخت‌شوندگی (در مکانیزم خمیری) به نحو مقتضی تابع تنش محصورکننده در نظر گرفته شده‌اند. از نتایج بدست آمده از تحلیل‌های اجزاء محدود همچنین می‌توان تخمینی از توزیع مدول عکس‌العمل بستر ارائه نمود. برای این منظور با استفاده از تغییرات نشست پی و تنش قائم (عکس‌العمل زمین)، با تقسیم عرض پی به تعدادی ناحیه، نسبت تنش به نشست برای آن ناحیه محاسبه گردید. نتایج حاصل در شکل (۹) نشان داده شده است که مبین این نکته است که توزیع مدول عکس‌العمل بستر در زیر پی یکنواخت نیست و در نواحی میانی بیش از نواحی کناری است. به عبارت دیگر مدول عکس‌العمل بستر تابع تنش محصورکننده است.



شکل ۸- توزیع نشست در زیر پی به عرض ۲۰ متر

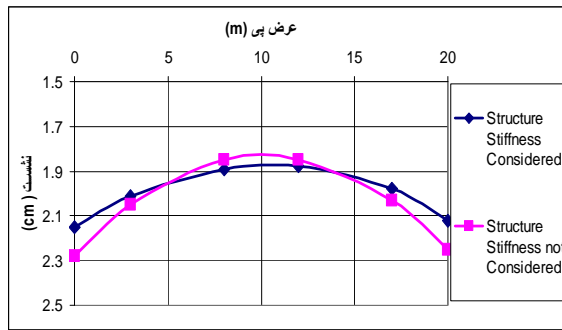


شکل ۹- توزیع مدول عکس‌العمل بستر در زیر پی به عرض ۲۰ متر

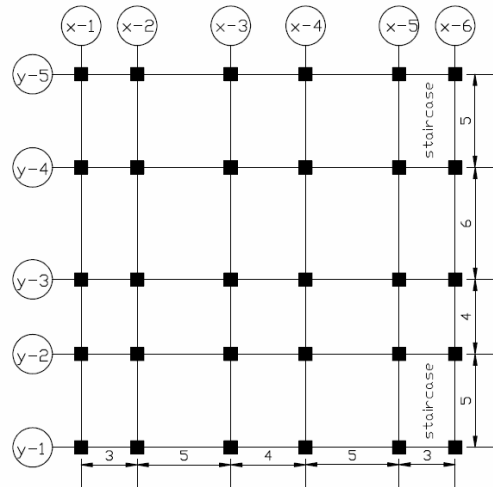
متر

۹- بررسی اثر اندرکنش خاک-سازه بر توزیع نشست پی مناسب‌ترین روش در نظریه اثر اندرکنش خاک-سازه یک تحلیل کامل است که طی آن سازه، پی و خاک زیرین با هم مدل شده و نیروهای داخلی پی، سازه و توزیع تنش- تغییرشکل در خاک مطالعه گردد. بدین منظور نیاز به یک کد محاسباتی اجزاء محدود است که نه تنها سازه را به خوبی مدل کرده و تحلیل نماید بلکه رفتار غیرخطی ارتجاعی خمیری خاک را در محاسبات لحاظ کند. در حال حاضر چنین کد محاسباتی حداقل به صورت رایج در دسترس نیست. یک روش مناسب و کاربردی برای مطالعه اندرکنش استفاده از دو کد محاسباتی سازه‌ای و ژئوتکنیکی و تقابل این دو کد با ارضاء یک شرط و یا شرایط سازگاری در فصل مشترک آنها است. در این تحقیق کد Sap (قوی در تحلیل سازه‌ای) از یک طرف و کد Plaxis 3D (قوی در تحلیل مسائل ژئوتکنیکی) از طرف دیگر جهت مطالعه اثرات اندرکنش مورد استفاده واقع گردیدند. با انجام یک پروسه سعی و خطا میدان تغییرمکان در فصل مشترک سازه و خاک حاصل از تحلیل با کدهای فوق سازگار می‌شود. بدین ترتیب تأثیر سستی سازه بر میدان تنش و تغییرشکل زمین از یک طرف و تأثیر تغییرشکل‌های زمین بر نیروهای داخلی اعضای سازه از طرف دیگر قابل مطالعه است.

در تحقیق حاضر یک ساختمان ۱۵ طبقه با اسکلت بتنی که هندسه آن در شکل (۱۰) داده شده مدنظر قرار گرفت. سازه آن به صورت قاب خمشی در دو جهت و اتصال ستون‌ها به پی از نوع مفصلی فرض شده است. محیطی به عرض ۱۱B، طول ۱۱B و عمق ۱۰B شامل خاک با مشخصات داده شده در جدول (۱) و یک پی گسترده به ابعاد ۱۵×۱۵ متر و ضخامت ۱ متر در نظر گرفته شد. ابتدا طراحی سازه تحت بارهای مرده و زنده با استفاده از کد Sap انجام و مقاطع المان‌های مختلف تعیین گردید. در قدم بعد از تقابل دو کد مذکور اندرکنش خاک-سازه مورد مطالعه قرار گرفت که در ادامه جزئیات روش و نتایج تحلیل‌ها ارائه می‌شود. ابتدا سازه مورد نظر با استفاده از برنامه Sap تحلیل می‌گردد و مقدار بار هر یک از ستون‌ها روی پی قرائت می‌گردد. مقدار بارهای پای ستون‌ها به مدل هندسی طرح شده در برنامه Plaxis بر روی پی اعمال گردیده و تحلیل انجام می‌گیرد. در انتهای تحلیل مقدار تغییرمکان‌های ایجاد شده در موقعیت پای ستون‌ها ثبت می‌گردد. این تغییرمکان‌ها سپس به کد Sap اعمال گردیده و تحلیل سازه انجام می‌شود. در انتهای تحلیل مقادیر جدید بارهای پای ستون‌ها ثبت شده و برای تحلیل کد Plaxis استفاده می‌شوند. پس از تحلیل با این کد یک مجموعه تغییرمکان جدید برای موقعیت پای ستون‌ها حاصل می‌شود.



شکل ۱۱- نمودار تغییر شکل پی در امتداد قاب ۳-x در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن سختی



شکل ۱۰- پلان ستون گذاری سازه

اعمال سختی سازه، نشست گوشه‌های پی را به ۲/۱۵ سانتی‌متر کاهش داده و نشست در مرکز را به ۱/۸۹ سانتی‌متر افزایش داده است. به عبارت دیگر اعمال اثر اندرکنش خاک-سازه نشست گوشه‌های پی را حدوداً ۶ درصد کاهش داده است و نشست مرکز را نیز حدود ۲/۱۶ درصد افزایش داده است. علت این امر در این حالت نیز این است که اعمال اثر سختی سازه باعث می‌شود که پی رفتار صلب‌تری از خود نشان دهد و اثر این صلبیت در گوشه‌های پی نسبت به مرکز آن بیشتر است. این صلبیت بیشتر در گوشه‌های پی و تا فاصله تقریباً ۵ متری از لبه‌ها اثر مثبتی دارد (یعنی باعث کاهش نشست در این محدوده شده است). همچنین با توجه به شکل فوق مشاهده می‌گردد که حجم نشست در دو حالت با و بدون اثر سختی سازه تقریباً یکسان است.

برای بررسی اثر اندرکنش خاک-سازه بر روی نیروهای داخلی اعضاء سازه، در اینجا به‌عنوان نمونه نیروهای داخلی تعدادی از تیرهای قاب‌های ۱-x و ۳-x در حالت‌های با و بدون در نظرگیری اثر اندرکنش با هم مقایسه شدند که نتایج در جداول (۳) و (۴) ارائه گردیده است.

اختلاف تغییرمکان‌های ایجاد شده در این مرحله و مرحله قبل را حساب کرده  $(\Delta u = u_1 - u_2)$  و آن را به سازه اعمال کرده و تحلیل سازه (با کد Sap) صورت می‌گیرد. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که اعمال تفاوت تغییرمکان بدست آمده از هر مرحله آنالیز با مرحله قبل از آن در کد Plaxis دیگر باعث تغییر در نیروهای داخلی (نیروی پای ستون‌ها) سازه در کد Sap نگردد. یعنی تغییرات میدان تغییرمکان در محل اتصال پی به زمین صفر گردد. تحلیل‌ها در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثر سختی سازه انجام گرفته است. نتایج حاصله را می‌توان در دو قسمت ارائه نمود. بدین منظور در قسمت اول به اثر سختی سازه بر روی توزیع نشست پی و محیط خاکی پرداخته می‌شود و در قسمت دوم اثر اندرکنش خاک-سازه بر نیروهای داخلی اعضاء سازه‌ای ارائه می‌شود.

توزیع نشست پی در محدوده محور ۳-x (مطابق پلان ستون‌گذاری)، در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثر سختی سازه در شکل (۱۱) ارائه شده است. مطابق این شکل میزان نشست گوشه‌های پی در حالت بدون اثر سختی سازه حدود ۲/۲۸ سانتی‌متر و در مرکز آن حدوداً ۱/۸۵ سانتی‌متر است.

جدول ۳- تأثیر اندرکنش خاک-سازه بر تیرهای کناری و میانی در قاب ۳-x

شماره قاب	شماره طبقه	شماره تیر	بدون اعمال سختی		با اعمال سختی	
			لنگر خمشی kN.m	نیروی برشی kN	لنگر خمشی kN.m	نیروی برشی kN
۳-x	۱	۱-۲ و ۲-۱	-۶۲/۷	-۷۰/۱	-۶۹/۶	-۷۷/۰
		۳-۲ و ۲-۳	-۵۲/۱	-۶۶/۳	-۵۴/۸	-۶۷/۶
	۸	۱-۲ و ۲-۱	-۴۳/۴	-۵۸/۱	-۴۸/۱	-۶۳/۳
		۳-۲ و ۲-۳	-۳۶/۰	-۵۲/۷	-۳۷/۸	-۵۲/۹



جدول ۴- تأثیر اندرکنش خاک- سازه بر اعضای سازه در طبقات، برای قاب X-۱

شماره قاب	شماره تیر	شماره طبقه	بدون اعمال سختی		با اعمال سختی	
			لنگر خمشی kN.m	نیروی برشی kN	لنگر خمشی kN.m	نیروی برشی kN
X-۱	Y-۳ و Y-۴	۱	-۱۷/۶	-۳۶/۶	-۱۹/۶	-۴۰/۸
		۸	-۱۰/۴	-۲۸/۲	-۱۱/۱	-۳۰/۱
		۱۵	-۲/۲	-۱۷/۴	-۲/۳	-۱۸/۲

۳- با توجه به نتایج حاصله در خصوص تخمین مدول عکس‌العمل بستر و توزیع آن، در کاربرد روابط کلاسیک در تخمین این مدول باید دقت کافی مبذول داشت. در واقع در این روابط وابستگی مدول عکس‌العمل به عرض و عمق پی بخوبی لحاظ نمی‌شوند. با این همه در صورت تخمین مقدار مناسب برای مدول ارتجاعی رابطه متناسب به وسیله نتیجه واقعی تری را بدست می‌دهد.

۴- در مجموعه تحلیل‌های انجام شده نشست در گوشه‌های پی واقع بر خاک ماسه‌ای، بیشتر از مرکز آن است که این منطبق بر رفتار واقعی پی‌ها در خاک‌های دانه‌ای است.

۵- تأثیر اندرکنش خاک- سازه باعث می‌شود که نه تنها توزیع نشست پی تغییر کند بلکه نیروهای داخلی اعضاء سازه نیز در معرض تغییر قرار گیرد. در این خصوص نسبت به حالت بدون در نظرگیری اندرکنش، نشست در گوشه‌ها کمتر و نشست در مرکز پی افزایش خواهد یافت. نتایج حاصله نشان می‌دهند که تأثیر پدیده اندرکنش بر المان‌های کناری سازه بیشتر از المان‌های میانی است. همچنین در طبقات بالاتر تأثیر اندرکنش خاک- سازه نسبت به طبقات پائین تر کمتر است.

موقعیت تیرهای محدود به محورهای Y-۱ و Y-۲ و محدود به محورهای Y-۳ و Y-۴ از قاب X-۳ بگونه‌ای است که با توجه به شکل توزیع نشست پی تأثیرهای متفاوتی از اعمال اندرکنش خاک- سازه بپذیرند. مطابق جدول (۳)، لنگر خمشی و نیروی برشی در تیرهای محدود به محورهای Y-۱ و Y-۲ (به عنوان تیر کناری) در طبقات ۱ و ۸ را تقریباً ۱۱ درصد افزایش داده است در حالی که در تیرهای محدود به محورهای Y-۳ و Y-۴ (به عنوان تیر میانی)، لنگر خمشی ۴ تا ۵ درصد و نیروی برشی ۱/۵ تا ۲ درصد افزایش پیدا کرده است.

نتیجه دیگری که از تحلیل‌ها حاصل گردید این است که در طبقات بالاتر اثرات اندرکنش خاک- سازه بر روی نیروهای داخلی اعضاء کمتر می‌شود. بدین منظور در اینجا تغییرات در نیروهای داخلی اعضا در تعدادی تیر در طبقات مختلف مقایسه گردیدند که نتیجه آن در جدول (۴) آمده است. همان‌گونه که از این جدول هویداست اعمال اندرکنش خاک- سازه بر تیر محدود به محورهای Y-۳ و Y-۴ واقع در طبقه اول از قاب X-۱، لنگر خمشی ۱۱ درصد افزایش یافته این در حالی است که افزایش در طبقه هشتم ۶/۵ درصد و طبقه پانزدهم ۴/۵ درصد است.

## ۹- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک مجموعه تحلیل اجزاء محدود جهت پیش‌بینی میزان و توزیع نشست پی‌های سطحی و مطالعه عوامل مؤثر در این خصوص انجام گرفت. مشخصه متمایز در این تحلیل‌ها، کالیبراسیون کد محاسباتی و مدل رفتاری بر اساس آزمایش بارگذاری صفحه از یک طرف و قابلیت مدل رفتاری در بیان رفتار وابسته به تنش محصور کننده است. در زیر نتایج اساسی که از کار حاضر بدست آمده است ارائه می‌شود:

۱- وابستگی نشست به عرض پی به شدت غیرخطی است و روابط کلاسیک موجود در کتب مهندسی پی قادر به بیان چنین رفتاری نیستند.

۲- یک ارتباط غیرخطی بین نشست پی و عمق آن وجود دارد. در واقع هرچه عمق پی بیشتر شود نشست آن کمتر می‌شود.

## ۱۰- مراجع

- [1] Brian, J. A., Townsend, M. F. C., Rahelison, L., "Load Testing and Settlement Prediction of Shallow Foundation", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133 (12), 1494-1502.
- [2] Tong, L. I., Ronald L. B., "Nonlinear Parameters for Granular Base Materials from Plate Tests", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(7), 907-913.
- [3] Nabil, F., Ismarl, "Loading Tests on Circular and Ring Plates in Very Dense Cemented Sands", Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122 (4), 281-287.
- [4] Ping-Sien, L., Li-Wen, Y., Hsein, J. C., "Subgrade Reaction and Load-Settlement Characteristics of Gravelly Cobble Deposits



[۷] توکلی، س.، "عوامل مؤثر در نشست پی‌های گسترده با نگرشی ویژه بر تخمین و توزیع سختی فنرها در تحلیل و طراحی این پی‌ها"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا، ۱۳۸۷.

by Plate-Load Tests", Department of Civil Engineering, National Chung-Hsing University, Taichung 400, Taiwan, ROC, 1998.

[5] Bowles, J. E., "Foundation Analysis and Design", 5<sup>th</sup> Edition, McGraw Hill.

[6] PLAXIS Manual, "Finite Element Code for Soil and Rock Plasticity", Delft University of Technology, Netherlands.

Archive of SID