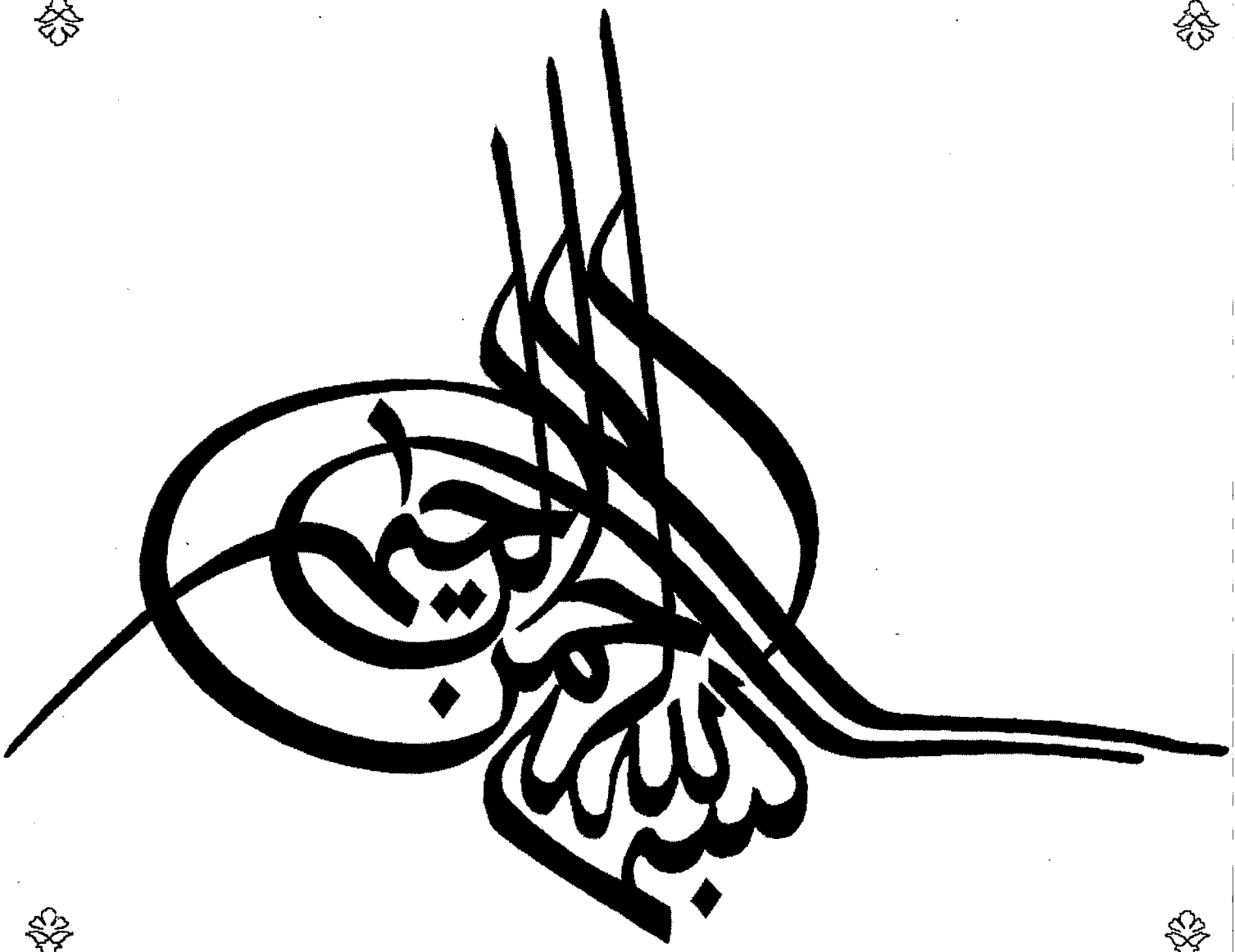

بسم الله الرحمن الرحيم

۴۶۷۱۳

دانشگاه تربیت معلم تهران
دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد
رشته و گرایش
مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی

عنوان

بررسی عددی تاثیر حفره بر ظرفیت باربری پی‌های سطحی مستقر بر خاک دانه‌ای

اساتید راهنما

دکتر علی قنبری
و
دکتر سید ناصر مقدس تفرشی

نگارنده
امین شریف‌پور

۱۳۸۷ /۲/ ۱۱۱

تیرماه ۱۳۸۶

۴۶۷۱۳

تقدیر وتشکر

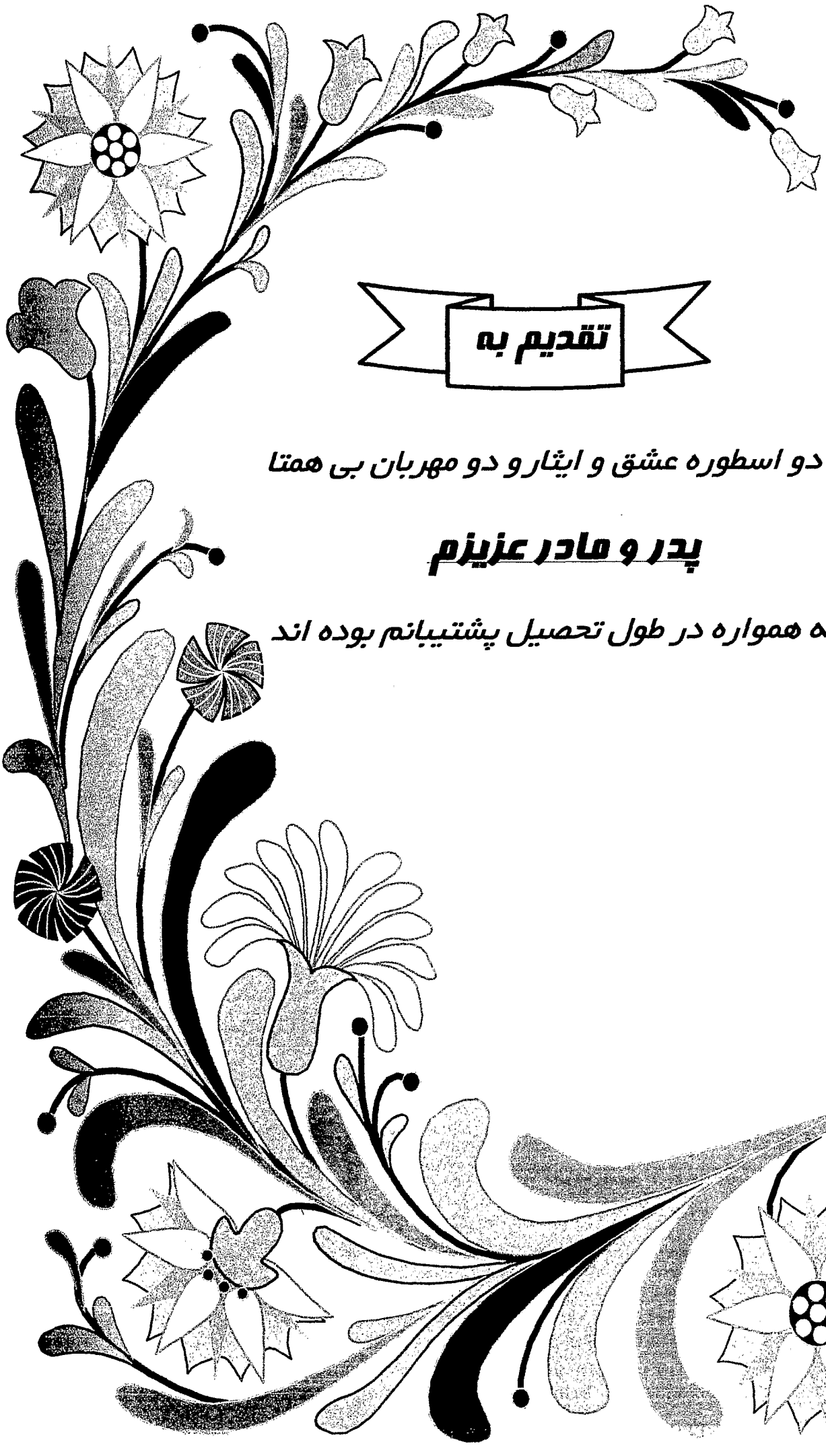
حمد و سپاس خداوندی را سزاست که همه گویندگان از مدح و ثنای او عاجزند و شمارندگان و حسابگران از شمارش نعمت‌ها و بخشش‌های او درمانده و کوشندگان نمی‌توانند حق نعمت او را ادا کنند. او را سپاس می‌گویم که زیادتخواه اویم، گردن نهاده به عزت اویم، پناه‌خواه از معصیت اویم و نیازمند کفایت اویم.

بدین وسیله از زحمات همه کسانی که مرا در تمام مراحل مختلف تحصیلی‌ام یاری داده‌اند، تشکر و قدردانی می‌کنم.

پدر و مادر عزیز و گرامی‌ام که همواره پشتیبان و دلسوز من بودند؛

اساتید محترم و بزرگوار جناب آقایان دکتر سید ناصر مقدس تفرشی(استاد راهنما)، دکتر علی قنبری (استادراهنما)، دکتر عادل عساکره و تمام دوستانی که مرا در انجام این پایان نامه یاری و راهنمایی نمودند.

امین شریف پور تیرماه ۱۳۸۶



تقدیم به

دو اسطوره عشق و ایثار و دو مهربان بی همتا

پدر و مادر عزیزم

که همواره در طول تحصیل پشتیبانم بوده اند

چکیده

وجود حفره زیر یک پی می‌تواند پایداری و باربری آن را به نحو بسزایی تحت تاثیر قرار دهد. از آنجا که انجام آزمایش‌های محلی در مقیاس بزرگ و حتی آزمایش در مقیاس کوچک آزمایشگاهی پر هزینه است و انجام آزمایش در شرایط مختلف و دسترسی به تمامی اطلاعات امکان پذیر نمی‌باشد، لذا برای بررسی اثر حفره بر ظرفیت باربری پی انجام یک تحلیل عددی مناسب در کنار نتایج تجربی حاصل از یک مدل فیزیکی می‌تواند خلاء اطلاعات را به خوبی پوشش دهد و امکان شناسایی کامل‌تری را حاصل نماید. از آنجا که روش اجزا محدود با موفقیت نسبتا قابل قبولی برای مطالعه بسیاری از مسایل ژئومکانیک بکار رفته، از این‌رو جهت تحلیل عددی باربری پی نواری واقع بر یک حفره طویل از برنامه اجزاء محدود Plaxis 7.2 در حالت دو بعدی، استفاده شده است. بدین منظور تحلیل عددی مدل خاک- حفره تحت شرایط بارگذاری استاتیکی قائم برای بررسی اثر پارامترهای اصلی نظیر عمق مدفون حفره، خروج از مرکزیت پی نسبت به حفره انجام گردید. نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی از انطباق خوبی برخوردار می‌باشند. براساس نتایج حاصل یک ناحیه بحرانی برحسب عمق مدفون حفره و خروج از مرکزیت پی نسبت به حفره در زیر پی وجود دارد، که در صورت قرارگیری حفره داخل این ناحیه، پایداری و ظرفیت باربری پی به میزان قابل توجهی تحت تاثیر قرار گرفته و باید این اثر بر ظرفیت باربری پی در نظر گرفته شود.

فصل اول

۱-۱- مقدمه ۱

۱-۲- طرح مسئله و هدف ۲

فصل دوم

۲-۱- مقدمه ۴

۲-۲- پی‌های سطحی ۴

۲-۲-۱- طبیعت گسیختگی برشی در خاک زیر پی‌ها ۴

۲-۲-۲- ظرفیت باربری نهایی پی‌ها ۷

۲-۲-۲-۱- روشهای تحلیلی ۷

۲-۲-۲-۲- مکانیزم گسیختگی ۸

۲-۲-۲-۳- محاسبه ظرفیت باربری با استفاده از روش جمع آثار قوا ۱۱

۲-۳- مطالعات انجام شده در زمینه اثر حفره بر ظرفیت باربری پی ۱۱

۲-۳-۱- مطالعات انجام شده توسط ترزاقی ۱۳

۲-۳-۲- مطالعات انجام شده توسط مکنالتی ۱۴

۲-۳-۳- مطالعات انجام شده توسط باوس و ونگ ۱۵

۲-۳-۴- مطالعات انجام شده توسط بادیه و ونگ ۲۲

۲-۳-۵- مطالعات انجام شده توسط بادیه و ونگ ۲۸

۲-۳-۶- مطالعات انجام شده توسط ونگ و هسیه ۳۱

۲-۳-۷- مطالعات انجام شده توسط داس و خینگ ۳۶

۲-۳-۸- مطالعات انجام شده توسط مقدس تفرشی و حیدری علی کمر ۴۰

۲-۳-۸-۱- نتایج آزمایشها ۴۱

۲-۳-۸-۲- تاثیر خروج از مرکزیت..... ۴۳
۲-۳-۸-۳- تاثیر عمق مدفون ۴۴
۲-۳-۸-۴- تاثیر تراکم خاک ۴۵
۲-۳-۸-۵- مکانیسم گسیختگی ۴۶

فصل سوم

۳-۱- مروری بر ویژگیهای برنامه Plaxis 7.2..... ۴۶
۳-۱-۱- ایجاد گرافیکی مدل هندسی ۴۶
۳-۱-۲-تولیدشبکه المان محدود به طور خودکار ۴۶
۳-۱-۳-المانهای مرتبه بالا ۴۷
۳-۱-۴-تیرها..... ۴۷
۳-۱-۵- المان‌های حد واسط ۴۷
۳-۱-۶-تونل ۴۷
۳-۱-۷- مدل موهر-کلمب..... ۴۸
۳-۱-۸- مدل‌های پیشرفته خاک ۴۸
۳-۱-۹- گام‌های بارگذاری خودکار ۴۸
۳-۱-۱۰- کنترل طول کمان ۴۹
۳-۱-۱۱- ساخت مرحله‌ای ۴۹
۳-۱-۱۲- ارائه نتایج ۴۹
۳-۱-۱۳- مسیر تنش..... ۴۹
۳-۲- نوع آنالیز ۴۹
۳-۳- المان‌های خاک..... ۵۰

۳-۴- المانهای سازه‌ای ۵۱
۳-۴-۱- تیرها ۵۱
۳-۴-۱-۱- المان‌های تیر ۵۲
۳-۴-۲- حد واسط‌ها ۵۳
۳-۴-۲-۱- المان‌های حد واسط ۵۴
۳-۵- آشنائی مقدماتی بامدلهای رفتاری مصالح ۵۶
۳-۵-۱- مدل الاستوپلاستیک کامل با معیار تسلیم موهر- کلمب ۵۶
۳-۵-۱-۱- پارامترهای اولیه معیار موهر-کلمب ۵۶
۳-۵-۲- مدل الاستوپلاستیک سخت شونده (سخت شوندگی همسانگرد) ۵۹
۳-۵-۴-۴- پارامترهای مدل الاستوپلاستیک سخت شونده ۵۹

فصل چهارم

۴-۱- مقدمه ۶۴
۴-۲- تفسیر مدل آزمایشگاهی مورد استفاده ۶۵
۴-۲-۱- تانک آزمایش ۶۵
۴-۲-۲- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماسه آزمایش ۶۵
۴-۲-۳- روش آماده‌سازی نمونه (روش بارش) ۶۶
۴-۲-۴- روش ایجاد حفره ۶۶
۴-۲-۵- سیستم بارگذاری ۶۶
۴-۲-۶- ابعاد پی ۶۷
۴-۲-۷- آزمایش‌های انجام شده ۶۷
۴-۳- شبیه سازی عددی مدل فیزیکی ۶۸

۴-۳-۱- معرفی مساله ۶۸
۴-۳-۲- شبکه اجزا محدود و شرایط مرزی ۶۹
۴-۴- ارزیابی مدل ۷۰
۴-۴- ۱- معرفی پارامترهای مدل ۷۱
۴-۴-۲- تحلیل حساسیت مدل ۷۱
۴-۵- تعیین پارامترهای مدل(کالیبراسیون) ۷۷
۴-۵-۱- تعیین پارامترهای مدل برای حالت بدون حفره ۷۸
۴-۵-۲- تعیین پارامترها برای حالت با حفره ۷۹
۴-۶- انتخاب مدل مناسب برای مدلسازی تحلیل (MC یا HS) ۸۰
۴-۷- اثر عوامل موثر بر رفتار پی‌های واقع بر حفره ۸۵
۴-۷-۱- تاثیر خروج از مرکزیت حفره ۸۸
۴-۷-۲- تاثیر عمق مدفون ۱۰۰

فصل پنجم

۵-۱- مقدمه ۱۱۰
۵-۲- نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها ۱۱۱
۵-۳- پیشنهادها برای تحقیقات آینده ۱۱۲

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

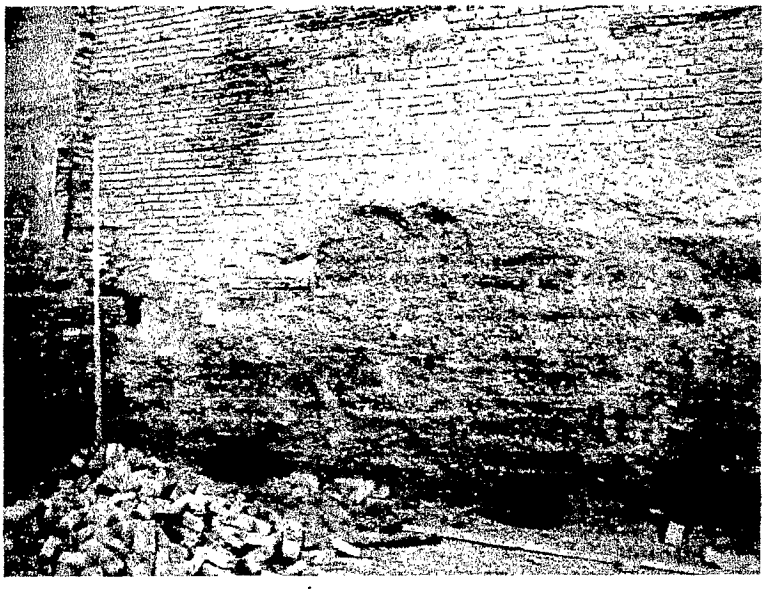
در صورت احداث یک سازه بر روی خاک، وزن ناشی از سازه بصورت اضافه بار از طریق پی به خاک اعمال می‌شود. از این‌رو باید از یک طرف فشار حاصل از بار وارده از پی به خاک از مقاومت ایمن خاک در مقابل گسیختگی تجاوز ننماید و از طرف دیگر بارهای وارده نباید باعث نشست‌های بیش از نشست مجاز برای سازه مورد نظر گردد. به عبارتی گسیختگی برشی خاک زیر پی و یا نشست‌های بیشتر از حد مجاز پی، می‌تواند منجر به تغییر شکل زیاد سازه و حتی خرابی آن گردد.

محاسبه ظرفیت باربری نهایی پی‌ها از دیرباز مد نظر بوده و در این بین عوامل و پارامترهای بسیاری از جمله پارامترهای مقاومت برشی خاک، شکل و ابعاد پی، عمق پی، شیب سطح زمین، شیب خود پی، مایل بودن و یا خروج از مرکزیت بار، سطح آب زیرزمینی، لایه لایه بودن خاک و میزان تراکم خاک بر مقدار آن موثر می‌باشند.

علاوه بر موارد مذکور عوامل دیگری نیز وجود دارند که علیرغم موارد کم برخورد با آنها، در موقع حضور تاثیر بسیاری بر ظرفیت باربری نهایی پی می‌گذارند. ازجمله این موارد می‌توان به وجود حفرات زیرزمینی و یا لوله‌های مدفون درخاک اشاره کرد که درصورت مجاورت با پی، یکی از عوامل تعیین‌کننده درظرفیت باربری نهایی پی خواهند بود.

امروزه ساخت بناهای زیرزمینی به شکل گسترده‌ای توسعه یافته است، به طوریکه با توجه به نیازهای روزافزون بشر و با پیشرفت دانش و تکنولوژی، دامنه فعالیت انسان به زیر خاک و حتی در زیر سازه‌های موجود در مناطق شهری رسیده است. در این خصوص نمونه‌های متعددی از سازه‌های واقع بر روی حفره‌ها و تونلها وجود دارد. نمونه‌ای از این سازه‌ها در شکل (۱-۱) آورده شده‌است. این حفره‌ها می‌توانند نتیجه فعالیت‌هایی از قبیل اکتشاف معدن و یا حفر تونل باشند. فعالیت‌های مربوط به معادن درسطح کشور از دیرباز وجود دارد و حفره‌های زیادی دراثر آنها بوجود آمده است. افزایش جمعیت باعث توسعه زندگی شهری به محل‌هایی می‌شود که از قبل حفره‌های معادن در آن مناطق وجود دارند. در سطح کشور قنات‌های زیادی نیز از زمانهای قدیم به‌جای مانده‌اند که اکنون در محدوده‌های شهری و در زیر سازه‌های سطحی واقع شده‌اند. علاوه بر اینها، در پاسخ به افزایش جمعیت، نیاز به تونلها برای تردد

شهری (متروها)، روز به روز زیادتر می‌شود. فعالیت‌های دیگری از قبیل احداث کانالهای زیرزمینی جهت فاضلاب و یا تاسیسات زیرزمینی نیز از جمله بناهای زیرزمینی در دست احداث هستند. البته ممکن است این حفره‌ها دراثر عوامل طبیعی از قبیل آب‌شستگی و یا حل شدن به دلیل قرار گرفتن در مسیر جریان آبهای زیرزمینی بوجود بیایند. در هر صورت حفره به هر نحوی بوجود آمده باشد از میزان ظرفیت باربری پی‌های نزدیک به خود خواهد کاست و این مسئله باید درمحاسبه ظرفیت باربری پی‌ها مد نظر قرار گیرد.



شکل ۱-۱- نمونه‌ای از حفره‌های واقع در زیر پی ساختمان (تهران، سال ۱۳۸۵)

۱-۲- طرح مسئله و هدف

همانطورکه ذکر شد، وجود حفره درخاک باعث کاهش در ظرفیت باربری پی‌های نزدیک به خود می‌شود که میزان این کاهش خود تحت تاثیر عوامل متعددی می‌باشد. ازجمله این عوامل می‌توان به نوع خاک و تراکم آن، شکل حفره، سطح مقطع حفره، عمق مدفون حفره، خروج از مرکزیت حفره نسبت به پی و سایر عواملی که در ظرفیت باربری پی در خاک بدون حفره موثر هستند، اشاره کرد.

تاکنون هیچ رابطه‌ای بصورت کلی برای محاسبه ظرفیت باربری پی بر روی خاک حفره‌دار ارائه نشده است که از مقبولیت عمومی برخوردار باشد. البته توسط برخی محققین روابطی ارائه شده که دامنه کاربرد این روابط (به تاکید خود آنها) محدود به زمینه مطالعات انجام شده است. به دلیل وسعت مطلب و تعدد پارامترهای موثر، کارهای آزمایشگاهی و حتی عددی انجام شده در این زمینه نیز هیچگاه نتوانسته‌اند همه پارامترهای موثر را لحاظ کنند، از این‌رو نتایج ارائه شده با محدودیت‌های زیادی همراه بوده است.

بدست آوردن روابطی برای محاسبه ظرفیت باربری نهایی پی بر روی خاکی که حفره در آن وجود دارد بدلیل تعدد پارامترهای موثر موجود در این زمینه، با استفاده از اصولی که ترزاقی[1] و دیگران به کار بسته‌اند، کار بسیار پیچیده‌ای است. به همین دلیل انجام یک سری تحقیقات آزمایشگاهی و عددی برای بررسی این مسئله ضروری به نظر می‌رسد.

در این تحقیق با به کارگیری نرم‌افزار Plaxis7.2 آزمایش‌های انجام گرفته در زمینه ظرفیت محاسبه ظرفیت باربری پی بر خاک حفره‌دار در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی با دو مدل رفتاری موهر- کولمب و سخت شونده مدل گردید که نتایج این مدل‌سازیها در فصل چهارم مورد مقایسه و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. سپس با استفاده از مدل‌های به دست آمده تاثیر پارامترهای مذکور بر ظرفیت باربری نهایی پی‌های سطحی واقع بر ترانشه خاکی حفره‌دار مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. با توجه به تعدد پارامترهای موثر، در این تحقیق بررسی اثر دو پارامتر عمق مدفون حفره و میزان خروج از مرکزیت حفره نسبت به پی مد نظر قرار گرفته است.

---

[1] Terzaghi

فصل دوم

مروری بر مطالعات انجام شده

۲-۱- مقدمه

میزان ظرفیت باربری پی‌های سطحی، مبتنی بر نوع و مکانیزم گسیختگی خاک زیر آن می‌باشد، به طوریکه نوع خاک و تراکم آن بر نوع گسیختگی، تاثیر بسزایی خواهد داشت. از طرفی قرارگیری یک حفره یا لوله مدفون در خاک می‌تواند میزان ظرفیت باربری پی‌ها را به نحو قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر قرار دهد. لذا در این فصل ضمن بررسی نحوه گسیختگی خاک زیر پی‌ها، به کارهای انجام شده توسط محققین مختلف در زمینهٔ اثر حفره بر ظرفیت باربری پی‌ها پرداخته خواهد شد.

۲-۲- پی‌های سطحی[1]

۲-۲-۱- طبیعت گسیختگی برشی در خاک زیر پی‌ها

شکل ۲-۱-الف، یک پی نواری به عرض B متکی برسطح یک خاک ماسه‌ای متراکم یا خاک چسبنده سفت را نشان می‌دهد. با اعمال تدریجی بار بر پی، نشست آن افزایش پیدا خواهد کرد. درسمت راست شکل ۲-۱-الف، نمودار تغییرات فشار (نیرو بر واحد سطح) q در مقابل نشست پی نیز رسم شده‌است. در یک نقطه مشخص، وقتی که فشار زیر پی مساوی q_u می‌باشد، یک گسیختگی ناگهانی درخاک زیر پی رخ داده و سطح گسیختگی تا سطح زمین ادامه پیدا می‌کند. فشار q_u ظرفیت باربری نهایی پی سطحی نامیده می‌شود. وقتی که گسیختگی نهایی همراه با توسعه سطحی گسیختگی تاسطح خاک باشد، به آن گسیختگی برشی کلی[2] می‌گویند.

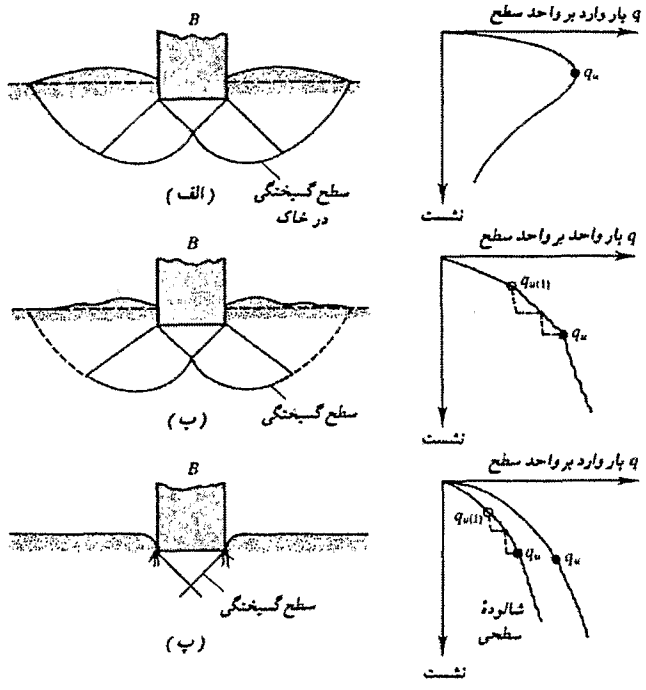
اگر پی مورد نظر برروی خاک رسی و یا خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط متکی باشد (شکل ۲-۱-ب)، در این حالت نیز افزایش بار پی همراه با افزایش نشست است. لیکن سطح گسیختگی در خاک به تدریج از پی به سمت خارج توسعه می‌یابد. وقتی که فشار پی مساوی $q_{u(1)}$ شود، نشست پی همراه با پرش‌های ناگهانی خواهد بود. ازاین به بعد برای اینکه سطح گسیختگی به سطح زمین توسعه یابد (منحنی خط چین شکل ۲-۱-ب)، احتیاج به نشست قابل توجهی می‌باشد. فشار پی درلحظه‌ای که سطح گسیختگی به سطح زمین می‌رسد، با q_u نشان داده شده و

---

[1] Shallow foundations

[2] general shear failure

ظرفیت باربری نهایی[1] خوانده می‌شود. بعد از این نقطه، هر افزایش در بار، همراه با افزایش زیادی در نشست پی خواهد بود. فشار $q_{u(l)}$ بارگسیختگی اولیه نامیده می‌شود (Vesic, 1963). توجه شود که دراین حالت هیچ قله حداکثری درنمودار فشار- نشست ملاحظه نمی‌گردد. به این نوع گسیختگی، گسیختگی برشی موضعی[2] می‌گویند.



شکل ۲-۱- طبیعت گسیختگی برشی درخاک. (الف) گسیختگی برشی کلی، (ب) گسیختگی برشی موضعی، (پ) گسیختگی برشی سوراخ کننده (Vesic, 1973)

اگر پی بروی یک خاک نسبتاً شل متکی باشد، نمودار فشار-نشست مطابق شکل ۲-۱-پ خواهد شد. دراین حالت سطح گسیختگی در خاک به سطح زمین توسعه نخواهد یافت. بعداز بار گسیختگی نهایی q_u، نمودار فشار- نشست با شیب تند و تقریباً خطی خواهد بود. به این نوع گسیختگی، گسیختگی برشی سوراخ کننده[3] می‌گویند.

---

[1] Ultimate bearing capacity

[2] local shear failure

[3] punching shear failure

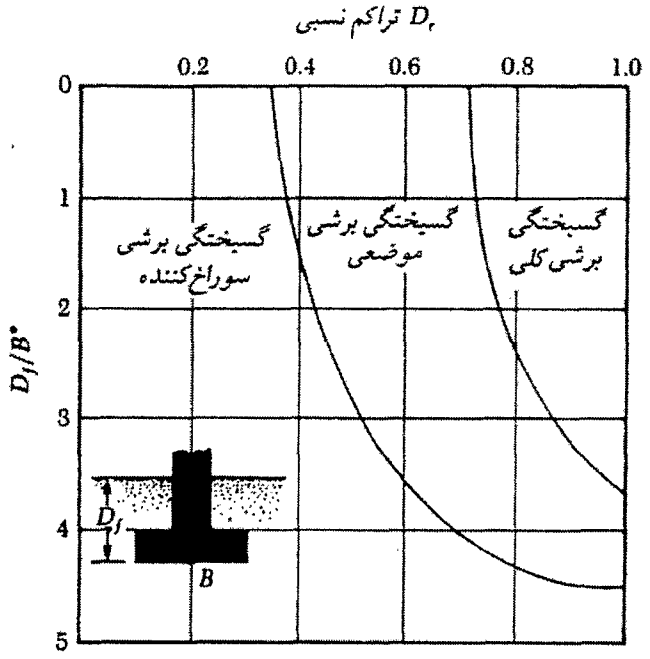
بر پایه نتایج تجربی، (Vesic, 1973) رابطه‌ای برای نوع گسیختگی برشی درپی‌های متکی بر ماسه پیشنهاد کرد. این موضوع درشکل ۲-۲ نشان داده شده که علائم به کاررفته درآن به شرح زیر است :

D_r = تراکم نسبی ماسه

D_f = عمق پی (ازسطح زمین تا کف پی)

$$B^* = \frac{2BL}{B+L} \qquad (۲\text{-}۱)$$

که در این رابطه B عرض پی و L طول پی (L همواره از B بزرگتر است) و B^* بعد معادل پی می‌باشند.



شکل ۲-۲- نوع گسیختگی برشی پی های متکی برماسه (Vesic, 1973)

برای پی‌های مربع با B = L وبرای پی‌های دایره با قطر= B = L ، مقدار B^* خواهد شد:

$$B^* = B \qquad (۲\text{-}۲)$$

برای پی‌ها با عمق کم (یعنی D_f / B^* کوچک)، بار نهایی در نشستی درحدود ۴ تا ۱۰ درصد B رخ می‌دهد. این گفته وقتی معتبر است که گسیختگی برشی کلی درپی رخ دهد. در دو حالت گسیختگی برشی موضعی و سوراخ کننده، بارنهایی در نشستی درحدود ۱۵ تا ۲۵ درصد عرض B رخ می‌دهد.

۲-۲-۲- ظرفیت باربری نهایی پی‌ها

تخمین ظرفیت باربری پی‌ها، عموما براساس اصل جمع آثار قوا که توسط ترزاقی پیشنهاد شده، پایه‌ریزی شده است. بر این اساس مشارکت نیروهای مختلف و پارامترهای مقاومتی خاک (چسبندگی، زاویه اصطکاک، اضافه بار سطحی و نیروی وزن) بصورت ضرایب بی‌بعد ظرفیت باربری N_γ, N_q, N_c جمع شده‌اند.

راه حل‌های تحلیلی متعددی برای محاسبه این ضرایب پیشنهاد شده‌اند. با وجود اینکه جمع آثار هریک از مولفه‌های منفرد موثر بر مسئله، ممکن است مقداری خطا وارد عمل کند، اما این روش به خاطر سادگی آن، به طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نتایج آزمایشگاهی متعددی هم دراین مورد گزارش شده است، اما بیشتر آنها محدود به خاکهای غیرچسبنده وتحت شرایط کرنش مسطح می‌شود.

درسالهای اخیر، روش اجزاء محدود برای محاسبه ظرفیت باربری نهایی پی‌ها و همچنین رفتار قبل از گسیختگی آنها مورد استفاده قرار گرفته است. مزیت این روش در این است که همه پارامترهای موثر را به صورت ترکیبی به مسئله واحد اعمال می‌کند.

۲-۲-۲-۱- روشهای تحلیلی

این روشها براساس تکنیک تحلیل استوار هستند. راه حلهای تحلیلی برای حل مسئله ظرفیت باربری به سه دسته خط لغزش، تعادل حدی و آنالیز حدی طبقه‌بندی می‌گردند.

الف) روش خط لغزش :

دراین روش معادلات دیفرانسیل پایه بدست آمده از شبکه خطوط لغزش درشرایط تعادل تنش‌ها و شرایط تسلیم (روانی)، حل می‌شوند. معادلات خط لغزش اولین بار توسط (Kotter, 1903) برای حالت تغییرشکل صفحه‌ای بدست آمده است. یک تحلیل بسته از این معادلات نیز برای پی روی خاک نامشخص (بدون وزن) توسط (Prandtl, 1921) انجام گرفت که این نتایج بعدها توسط (Reissner, 1924) و (Norotorsev, 1938) به بعضی از مسایل مربوط به ظرفیت باربری پی روی خاک نامشخص اعمال گردید. در هر حال وارد کردن وزن خاک در مسئله، معادلات را بسیار پیچیده می‌کند که عملا راه حلی برای تحلیل معادلات وجود ندارد، درنتیجه از روشهای تقریبی زیادی از قبیل تقریب تفاضلات محدود، روش گرافیکی، روش بسط سریها و... برای حل آنها استفاده شده است.

ب) روش تعادل حدی :

دراین روش، چند شکل ساده از سطح گسیختگی فرض می‌شود و سطح گسیختگی بحرانی بدست می‌آید. راه‌حل‌های پیشنهاد شده توسط ترزاقی (Terzaghi) و مایرهوف (Meyerhof) براساس این روش استوار است. سطح گسیختگی فرض شده توسط ترزاقی یک اسپیرال لگاریتمی است. تئوری ترزاقی ارائه شده برای پی‌های سطحی به وسیلهٔ مایرهوف برای پی‌های مدفون نیز توسعه پیداکرد.

پ) آنالیز حدی :

به وسیله تئوری پایه آنالیز حدی، حد بالا و پائین بارهای گسیختگی را می‌توان بدست آورد. تئوری حد پائین که حد پائین بار گسیختگی را بیان می‌کند، معادلات تعادل را ارضاء می‌کند. درمقابل، بار گسیختگی از روش تئوری حد بالا و از مساوی قرار دادن نرخ کار خارجی انجام شده با نرخ مصرف انرژی جنبشی در میدان حرکت، بدست می‌آید که شرایط مرزی سرعت را ارضاء می‌کند. قانون جریان، کرنش و سرعت به عنوان شرایط سازگاری مسئله می‌باشند. برای ارزیابی پایداری پی‌ها، اغلب از تئوری حد بالا استفاده می‌شود.

۲-۲-۲-۲- مکانیزم گسیختگی

مکانیزم گسیختگی (Failure Mechanism) در واقع خط گسیختگی را تعریف می‌کند، به طوریکه جرم خاک بالای این خط، درمقایسه با جرم خاک باقیمانده درحال سکون، تحت جریان نامحدودی از گسیختگی قرار می‌گیرد.

مکانیزم‌های گسیختگی که بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند عبارتند از: مکانیزم (Hill, 1950)، مکانیزم (Prandtl, 1920) و مکانیزم (Terzaghi, 1943). لازم به ذکر است مکانیزم‌های هیل و پراندل برای خاک غیرمشخص (بدون وزن)، ظرفیت باربری یکسان بدست می‌دهند.

الف) مکانیزم هیل

مکانیزم هیل (Hill, 1950) درشکل (۲-۳-الف) نشان داده شده است. این مکانیزم نسبت به محور پی متقارن است، لذا بررسی نیمی از آن کافی می‌باشد. محدوده پلاستیک به قسمت بالای خط گسیختگی ODEF محدود می‌شود. این مکانیزم از ۳ ناحیه تشکیل شده است:

ناحیهٔ۱) گوه مثلثی صلب OCD با دو زاویهٔ $\frac{\pi}{4}+\phi/2$ که سطح تماس صاف بین گوه و زیر پی، حرکت افقی گوه را آزاد می‌گذارد.

ناحیهٔ۲) محدوده برشی بصورت اسپیرال لگاریتمی DCE با زاویه مرکزی $\pi/2$.

ناحیهٔ۳) گوه مقاوم رانکین ECF با دو زاویه $\frac{\pi}{4}-\varphi/2$.

ب) مکانیزم پراندل

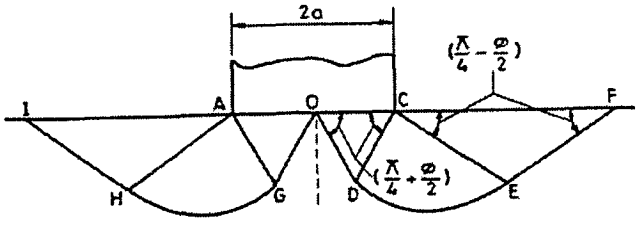
این مکانیزم نیز مطابق شکل ۲-۳-ب از ۳ ناحیه تشکیل شده است:

ناحیهٔ۱) گوه مثلثیACD با دوزایهٔ $\frac{\pi}{4}+\phi/2$ که بصورت یک جسم صلب همراه با حرکت پی به سمت پایین حرکت می‌کند (هانسن و مایرهوف هم این زاویه را $\frac{\pi}{4}+\phi/2$ گرفته‌اند).

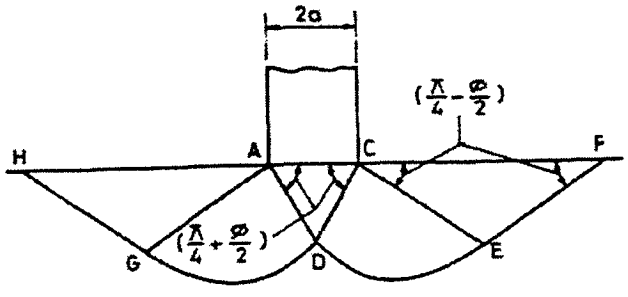
ناحیهٔ۲) محدوده برشی به صورت اسپیرال لگاریتمی با زاویه مرکزی $\pi/2$.

ناحیهٔ۳) گوه مقاوم رانکین ECF با دو زاویه $\frac{\pi}{4}-\phi/2$.

دراین مکانیزم با فرض زبری مناسب کف پی، هیچ لغزشی بین خاک و پی در نظر گرفته نمی‌شود.



الف) مکانیزم هیل (Hill, 1950)



ب) مکانیزم پراندل (Prandtl, 1920)