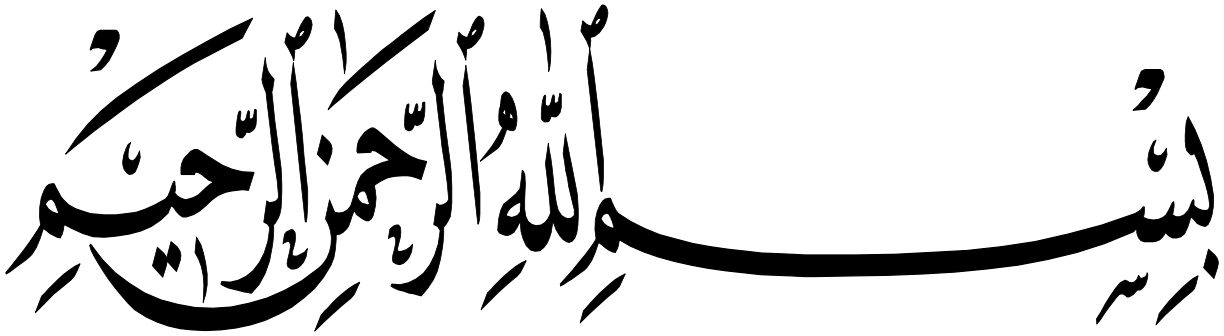

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَٰنِ الرَّحِيمِ

**دانشگاه صنعتی اصفهان**

دانشکده مهندسی عمران

# تحلیل عددی ظرفیت باربری پی‌های پاجداری

پایان‌نامه کارشناسی ارشد عمران، گرایش خاک و پی

**حسن حبیبیان**

استاد راهنما

دکتر محمد علی روشن ضمیر

**۱۳۸۸**

**کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.**

**تقدیم به همسرم**

**تشکر و قدردانی**

پروردگار منان را که همیشه و در همه حال حاضر و ناظر است و به بنده حقیر توفیق کسب علم و دانش بیشتر را عطا فرمود شکرگذارم. بر خود لازم می‌دانم که از خانواده عزیزم که از بزرگترین نعمت‌های الهی می‌باشند به خاطر تشویق‌ها و حمایت‌های دلگرم‌کننده‌شان در کلیه مراحل زندگی و تحصیل تشکر و قدردانی نمایم؛ بویژه از فداکاری، همدلی و همراهی بیدریغ همسرم بینهایت سپاسگذارم.

از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر محمد علی روشن ضمیر به خاطر هر آنچه در طول دوران تحصیل و زمان انجام این پایان‌نامه در مقام استاد راهنما سخاوتمندانه به من آموختند، تشکر و قدردانی می‌نمایم. همچنین از اعضای محترم هیات داوران، جناب آقای دکتر کاظم فخاریان و جناب آقای دکتر بهروز کوشا که قبول زحمت نموده و بررسی این پایان‌نامه را به عهده داشتند قدردانی و تشکر می‌نمایم.

از کلیه مسوولین محترم سایت کامپیوتر دانشکده مهندسی عمران، به خاطر همکاری‌های صمیمانه ایشان سپاسگذاری می‌نمایم.

در پایان از کلیه دوستان و عزیزانی که به هر نحو مرا در امر تهیه این پایان‌نامه یاری نمودند تشکر و قدردانی می‌نمایم.

حسن حبیبیان

بهار ۸۸

# فهرست مطالب

**عنوان** **شماره صفحه**


فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ..... ۱

**فصل اول کلیات ..... ۲**

۱-۱- مقدمه ..... ۲

۱-۲- مزایای استفاده از جداره در پی‌های سطحی ..... ۳

۱-۲-۱- افزایش ظرفیت باربری قائم ..... ۳

۱-۲-۲- افزایش ظرفیت باربری تحت بار مرکب ..... ٤

۱-۲-۳- انتقال بار به خاک متراکم‌تر زیرین ..... ٤

۱-۳- پی های پاجداری و رابطه ظرفیت باربری ..... ٥

۱-٤- اهداف پایان نامه ..... ۸

۱-٥- ساختار پایان نامه ..... ۸

**فصل دوم پیشینه علمی موضوع ..... ۱۰**

۲-۱- مقدمه ..... ۱۰

۲-۲- انواع پی‌های پاجداری ..... ۱۱

۲-۲-۱- پی‌های پاجداری رایج در سازه‌های دریایی ..... ۱۱

۲-۲-۲- پی‌های پاجداری موجود در خشکی ..... ۲۳

۲-۳- جمع بندی ..... ۲۸

**فصل سوم مسائل مورد بررسی و مدل سازی آنها ..... ۲۹**

۳-۱- مقدمه ..... ۲۹

۳-۲- کلیاتی در مورد حل مسائل پایداری ..... ۲۹

۳-۳- روش کلی انجام تحقیق ..... ۳۲

۳-۴- مشخصات تحلیل های انجام شده ..... ۳۳

۳-٤-۱- خواص مشترک ..... ۳۳

۳-٤-۲- پی‌های بدون جداره ..... ۳٦

۳-٤-۳- پی‌های پاجداری ..... ۳۸

۳-٥- نحوه مدل‌سازی ..... ٤٤

۳-۵-۱- انتخاب نرم افزار ..... ٤٤
۳-۵-۲- انتخاب تحلیلگر ..... ٤٥
۳-۵-۳- انتخاب نوع مدل رفتاری برای اجزاء مدل ..... ٤٥
۳-۵-٤- انتخاب نوع المان ..... ٥٣
۳-۵-٥- گام‌های انجام تحلیل ..... ٥٣
۳-۵-٦- بارگذاری و شرایط مرزی ..... ٥٥
۳-۵-۷- تعیین زمان گام مناسب برای انجام تحلیل ..... ٥٦
۳-۵-۸- تعیین اندازه و تراکم شبکه المان‌ها ..... ٥٧
۳-۵-۹- تعیین ابعاد مدل ..... ٥٧
۳-۶- صحت سنجی مدل پی های واقع بر سطح بدون جداره ..... ٥٧
۳-٦-۱- بررسی نتایج تحلیل حساسیت پی‌های واقع بر سطح به پارامترهای مقاومتی خاک ..... ٥٨
۳-۷- نحوه تعیین نقطه گسیختگی از روی نمودار های - جابجایی تنش ..... ٦٤

**فصل چهارم ارائه و بررسی نتایج حاصل از تحلیل‌ها ..... ۶۵**
۴-۱- مقدمه ..... ٦٥
٤-۲- تحلیل‌های بررسی پارامترهای مقاومتی خاک ..... ٦٥
۴-۲-۱- زاویه اصطکاک داخلی ..... ٦٦
۴-۲-۲-چسبندگی ..... ٦٨
۴-۲-۳- وزن واحد حجم خاک ..... ۷۲
۴-۲-۴- مدول الاستیسیته خاک ..... ۷۳
٤-۳- تحلیل‌های بررسی شکل پی ..... ۷٤
۴-۳-۱- پی‌های دایره‌ای ..... ۷٤
۴-۳-۲- پی‌های مربعی ..... ۷۷
۴-۳-۳- پی‌های نواری ..... ۸۰
۴-۴- تحلیل‌های بررسی عرض پی ..... ۸٥
۴-۴-۱- پی‌های دایره‌ای ..... ۸٥
۴-۴-۲- پی‌های نواری ..... ۸۷
۴-۵- تحلیل‌های بررسی زبری کف پی ..... ۸۹
۴-۶- تحلیل‌های بررسی اثر زبری جداره ..... ۹۰
۴-۶-۱- پی‌های دایره‌ای ..... ۹۱
۴-۶-۲- پی‌های نواری ..... ۹۸

۴-۷- تحلیل‌های بررسی اثر ضخامت جداره ۱۰۳
۴-۷-۱- پی‌های دایره‌ای ۱۰۳
۴-۷-۲- پی‌های نواری ۱۰۴
۴-۸- تحلیل‌های بررسی اثر سختی جداره ۱۰۵
۴-۸-۱- پی دایره‌ای ۱۰۵
۴-۸-۲- پی نواری ۱۰۷
۴-۹- تحلیل‌های بررسی اثر مدل رفتاری خاک محصور درون پی ۱۰۹
۴-۱۰- تحلیل‌های بررسی نحوه آرایش جداره ۱۱۱
۴-۱۰-۱- پی‌های دایره‌ای ۱۱۲
۴-۱۰-۲- پی های نواری ۱۱۳
۴-۱۰-۳- پی‌های مربعی ۱۱۴
۴-۱۱- ارائه رابطه ظرفیت باربری برای پی‌های پاجداری ۱۱۷
۴-۱۲- جمع بندی ۱۲۰

**فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۲۱**
۵-۱- مقدمه ۱۲۱
۵-۲- نتایج ۱۲۱
۵-۲-۱- تحلیل‌های بررسی پارامترهای مقاومتی و سختی خاک ۱۲۲
۵-۲-۲- تحلیل‌های بررسی شکل پی ۱۲۲
۵-۲-۳- تحلیل‌های بررسی عرض پی ۱۲۳
۵-۲-۴- تحلیل‌های بررسی زبری کف پی ۱۲۳
۵-۲-۵- تحلیل‌های بررسی اثر زبری جداره ۱۲۳
۵-۲-۶- تحلیل های بررسی اثر ضخامت جداره ۱۲۴
۵-۲-۷- تحلیل‌های بررسی اثر سختی جداره ۱۲۴
۵-۲-۸- تحلیل‌های بررسی اثر مدل رفتاری خاک محصور درون پی ۱۲۴
۵-۲-۹- تحلیل‌های بررسی اثر نحوه آرایش جداره‌ها ۱۲۴
۵-۳- ارائه رابطه ظرفیت باربری برای پی‌های پاجداری ۱۲۵
۵-۴- پیشنهادات ۱۲۵
**پیوست ۱ ۱۲۶**
**پیوست ۲ ۱۲۷**
**مراجع ۱۳۱**

## چکیده

افزایش ظرفیت باربری پی در برابر نیروهای قائم، جانبی و لنگر، عملکرد مناسب‌تر تحت بار دوره‌ای، نصب دقیق، سریع و آسان و کم هزینه‌تر پی نسبت به گزینه‌های موجود از جمله شمع‌ها بویژه در آب‌های عمیق و در بعضی موارد قابلیت برچیدن آن برای استفاده مجدد، از جمله مزایای استفاده از پی‌های پاجداری است که استفاده از آن را در دریا گسترش داده است. با این حال تاکنون استفاده از این جداره‌ها برای پی‌های سطحی متعارف موجود در خشکی کمتر مورد توجه بوده و همچنین تاثیر این جداره‌ها در افزایش ظرفیت باربری این پی‌ها به طور کامل و مشروح بررسی نشده است. با توجه به اندک بودن تعداد تحقیقات انجام گرفته بر پی‌های پاجداری برای استفاده آن‌ها در سازه‌های موجود در خشکی و یا محدود بودن آنها به شکل خاصی از پی و یا نوع خاصی از خاک، تحقیقات گسترده‌تر و دقیق‌تر بر ظرفیت باربری این گونه از پی‌ها و عوامل موثر بر آن، جهت کاربردی کردن آنها برای استفاده در سازه‌های متعارف، لازم به نظر می‌رسد.

در این پایان نامه، نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی انجام گرفته بر پی‌های واقع بر سطح مجهز به جداره تحت بار قائم ارائه شده است. عوامل موثر بر ظرفیت باربری این دسته از پی‌ها، شامل پارامترهای مقاومتی و سختی خاک، شکل پی، عرض پی، زبری کف پی، ارتفاع جداره، زبری جانبی جداره، ضخامت جداره، صلبیت جداره، مدل رفتاری خاک محصور درون پی و نحوه آرایش جداره‌ها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و از طریق مقایسه ظرفیت باربری پی پاجداری با ظرفیت باربری پی واقع بر سطح بدون جداره، میزان تاثیر نصب جداره تعیین شده و در قالب نسبت ظرفیت باربری ارائه شده است. علاوه بر آن ظرفیت باربری پی پاجداری در شرایط متفاوت زبری جداره با ظرفیت باربری پی واقع در عمق جداره مقایسه شده است. همچنین یک رابطه ظرفیت باربری اصلاح شده برای محاسبه ظرفیت باربری پی پاجداری پیشنهاد شده است.

تحلیل‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS و به روش صریح انجام شده‌اند. المان‌های چهارگرهی مربعی در تحلیل‌های متقارن محوری و کرنش مستوی و المان‌های هشت گرهی آجری در تحلیل‌های سه بعدی استفاده شده است. تحلیل‌ها در دو مرحله شامل مرحله ایجاد تنش‌های ژئواستاتیک و مرحله اعمال بارگذاری انجام شده‌اند. بارگذاری به روش کنترل جابجایی صورت گرفته است. پی‌ها در سه شکل دایره‌ای، مربعی و نواری و با کف صلب، و جداره‌ها در دو نوع صلب و انعطاف پذیر مدل شده‌اند. به منظور مدل‌سازی زبری جداره از المان‌های اندرکنش استفاده شده است. پی‌ها در سه عرض ۰/۵ و ۱ و۲ متر مورد بررسی قرارگرفته‌اند. جداره‌ها در سه عمق ۰/۵ و ۱ و ۲ متر مدل سازی شده‌اند. با اعمال تغییر در محل اتصال جداره از لبه پی به سمت داخل و ایجاد کناره در پی‌های پاجداری دایره‌ای و نواری و با نصب جداره در درون پی‌های پاجداری مربعی، تاثیر نحوه آرایش جداره بر ظرفیت باربری پی بررسی شده است. با جایگذاری مدل رفتاری مغزه خاکی محصور در پی پاجداری با مدل‌های رفتاری کاملا الاستیک و صلب، نحوه و میزان تاثیر مغزه خاکی در ظرفیت باربری بررسی شده است. بر اساس نتایج تحلیل‌ها، نصب جداره، ظرفیت باربری پی واقع بر سطح را در شرایط مورد بررسی از ۱/۱ تا ۲ برابر، بسته به خواص خاک و پی، افزایش می‌دهد.



**کلمات کلیدی**

جداره‌های سازه‌ای، پی پاجداری، معادله ظرفیت باربری، تحلیل عددی.

# فصل اول کلیات

## ۱ ـ۱ مقدمه

نصب جداره‌های سازه‌ای، از جمله روش‌های افزایش ظرفیت باربری پی‌ها است. افزایش ظرفیت باربری پی در برابر نیروهای جانبی و لنگر، عملکرد مناسب‌تر تحت بار دوره‌ای، نصب دقیق، سریع و آسان و کم هزینه‌تر پی نسبت به گزینه‌های موجود از جمله شمع‌ها بویژه در آب‌های عمیق و در بعضی موارد قابلیت برچیدن آن برای استفاده مجدد، از جمله مزایای این نوع پی است که تحقیق در مورد آن و استفاده از آن در دریا مورد توجه بسیاری از دانشمندان علاقمند به سازه‌های فراساحل و موسسات مرتبط با این قبیل سازه‌ها، قرار گرفته است. مزایای دیگری همچون عدم نیاز به گودبرداری و رفع خطر ریزش خاک و تخریب سازه مجاور در نتیجه آن، عدم نیاز به دفع آب زیر زمینی در هنگام نصب، قابلیت اجرا برای پی‌های ساخته شده و قابلیت اجرا در شرایط محدود بودن ابعاد زمین کارگاه، این روش تقویت باربری پی را با گزینه‌هایی همچون تسلیح و پایدارسازی خاک، قابل رقابت می‌نماید. پی‌های مجهز به جداره با نام‌هایی از قبیل پی‌های پاجداری[1]، پی‌های دامن‌دار، پی‌های قرنیزدار، پی‌های سطلی و صندوقه‌های مکشی خوانده می‌شوند. برخلاف ظهور نسبتا طولانی مدت این پی‌ها در سازه‌های فراساحل، استفاده از جداره در پی‌های سطحی متعارف در خشکی چندان مورد توجه نبوده و همچنین میزان افزایش ظرفیت باربری پی توسط آنها بطور

---

[1] - skirted foudations

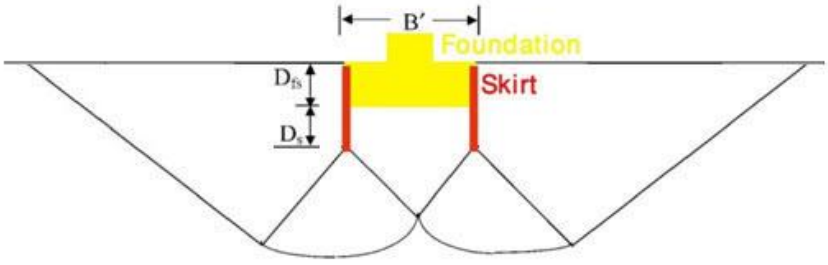
کامل و مشروح بررسی نشده است. این مسئله محرک انجام مطالعه حاضر بوده و امید است که گامی اندک در این زمینه محسوب گردد.

در مطالعه حاضر نتایج بررسی ظرفیت باربری پی‌های واقع بر سطح مجهز به جداره تحت بار قائم با استفاده از تحلیل عددی ارائه شده است. عوامل موثر بر ظرفیت باربری این دسته از پی‌ها بررسی شده و نحوه و میزان تاثیر آنها از طریق مقایسه ظرفیت باربری پی مجهز به جداره با پی واقع بر سطح فاقد جداره تعیین شده است. همچنین با ضرب کردن جملاتی به رابطه متعارف محاسبه ظرفیت باربری ارائه شده توسط میرهوف، روابطی برای تخمین ظرفیت باربری پی پاجداری ارائه شده است.

## ۱ ۲ -مزایای استفاده از جداره در پی‌های سطحی

### ۱-۲-۱- افزایش ظرفیت باربری قائم

نظریه‌های متفاوتی برای محاسبه ظرفیت باربری پی‌های سطحی همچون رابطه پیشنهاد شده توسط ترزاقی[۱] (۱۹۴۳) مطرح شده است. میرهوف[۲] (۱۹۶۳، ۱۹۵۱) ، هنسن[۳] (۱۹۷۰)، سوکولوسکی[۴] (۱۹۶۵) و وسیک[۵] (۱۹۷۳) این رابطه را از طریق اعمال ضرایب تصحیح (همچون ضرایب عمق، شکل و انحراف بار) اصلاح کرده‌اند. با توجه به مکانیزم گسیختگی برشی کلی مورد استفاده در بسط نظریه ظرفیت باربری، ظرفیت باربری یک پی واقع بر خاک همگن، با افزایش طول سطوح گسیختگی، و لذا ایجاد مقاومت برشی بیشتر، افزایش می‌یابد. افزایش در طول سطوح گسیختگی می‌تواند از طریق افزایش عرض پی، عمق آن و یا احداث جداره سازه‌ای انجام گردد [۱]. این مطلب در شکل ۱-۱ مشاهده می‌شود.

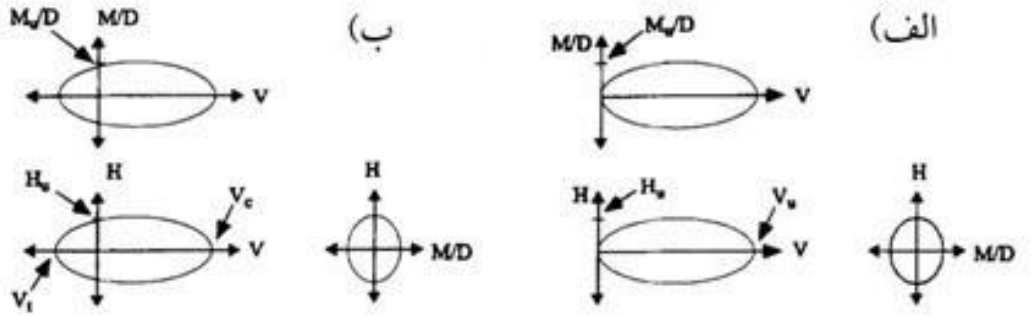



شکل ۱-۱ تاثیر جداره بر پوش گسیختگی [۱]

[1] - Terzaghi
[2] - Meyerhof
[3] – Hansen
[4] - Sokolovski
[5] - Vesic

**۱-۲-۲- افزایش ظرفیت باربری تحت بار مرکب**

شکل ۱-۲- الف، تصویر سه بعدی پوش گسیختگی را برای یک پی واقع بر سطح بدون جداره، با این فرض که پی فاقد ظرفیت باربری کششی است، نشان می‌دهد. در این شکل $V_u$ و $H_u$ و $M_u/d$، بترتیب بیشینه نیروی قابل تحمل قائم، افقی و لنگر می‌باشند. در مقایسه با پی‌های واقع بر سطح بدون جداره، پی‌های پاجداری، تحت فشار و کشش، ظرفیت باربری بیشتری را نشان می‌دهند. این افزایش ظرفیت باربری ناشی از انتقال بار توسط نوک جداره به خاک در عمق بیشتر می‌باشد. افزایش اصطکاک موجود در سطح جداره‌ها در افزایش ظرفیت کششی پی موثر است. در مورد صندوقه‌های مکشی ظرفیت کششی افزایش یافته ناشی از مکش ایجاد شده در اثر نیروی بالا برنده می‌باشد. وجود جداره به این معنی است که حتی در شرایط نبود بار قائم، ظرفیت باربری جانبی و لنگر برای پی ایجاد می‌شود[۲]. شکل ۱-۲- ب پوش گسیختگی بیان شده توسط مورف[1] (۱۹۹۴) را که قابلیت نمایش ظرفیت تحمل نیروی کششی و نیروی افقی و لنگر را در شرایط فقدان بار قائم دارد، نشان می‌دهد.




شکل۱-۲ پوش سه بعدی گسیختگی : الف- پی واقع بر سطح بدون جداره؛ ب- پی پاجداری [۲]

**۱-۲-۳- انتقال بار به خاک متراکم‌تر زیرین**

با محصور شدن خاک سطحی و افزایش باربری قائم آن، عملا بار به بخش زیرین خاک انتقال می‌یابد. در شرایطی که نحوه آرایش جداره‌ها و میزان فاصله آنها از یکدیگر برای محصور نمودن خاک مناسب باشد و همچنین جداره‌ها از صلبیت لازم برخوردار باشند، در محاسبات ظرفیت باربری می‌توان پی را بصورت یک

[1] - Murff

پی مدفون در عمق جداره‌ها فرض نمود. محصور نمودن لایه خاک نرم فوقانی و انتقال بارها به خاک محکم‌تر زیرین از مهمترین خواص جداره‌ها محسوب می‌شود.

### ۱ ۳ -پی های پاجداری و رابطه ظرفیت باربری

ترزاقی (۱۹۴۳) رابطه ۱-۱ را برای محاسبه ظرفیت باربری نهایی پی‌های سطحی تحت بار قائم مرکزی ارائه داد (شکل ۱-۳):

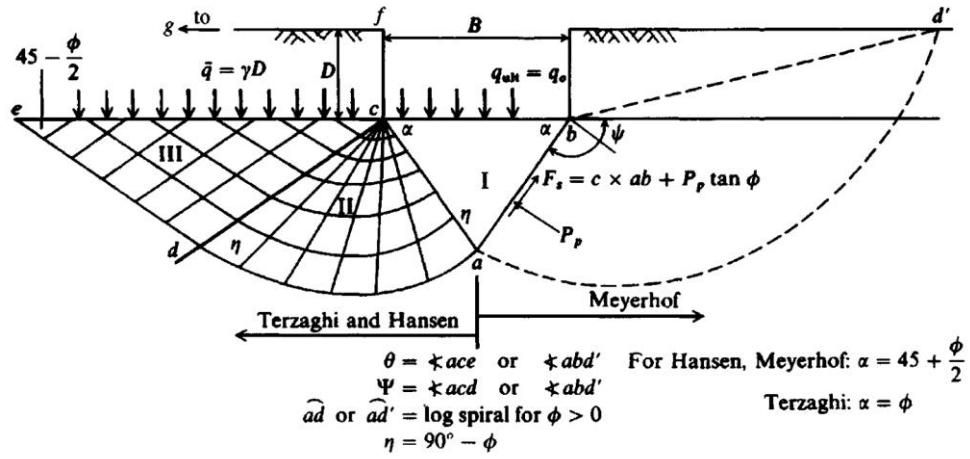
$$q_{ult} = cN_c s_c + \bar{q}N_q + 0.5\gamma BN_\gamma s_\gamma \qquad (۱-۱)$$

که در آن $q_{ult}$ ظرفیت باربری نهایی، $B$ عرض پی، $\gamma$ وزن مخصوص خاک، $\bar{q}$ فشار سربار، $N_c$ و $N_q$ و $N_\gamma$ ضرایب ظرفیت باربری و $s_c$ و $s_\gamma$ ضرایب شکل می‌باشند و امکان تخمین زدن ظرفیت باربری پی‌های نواری و مربعی و دایره‌ای را میسر می‌سازند. مقادیر $N_c$ و $N_q$ و $N_\gamma$ توسط ترزاقی (۱۹۴۳) ارائه شد و به زاویه اصطکاک داخلی خاک $(\varphi')$ مربوط بودند. شکل ۱-۳ اندرکنش خاک-پی را در روابط ظرفیت باربری پی نواری نشان می‌دهد. در این شکل مکانیزم گسیختگی مفروض در بسط این روابط ارائه شده است[۳].

میرهوف (۱۹۵۱، ۱۹۶۳) رابطه ظرفیت باربری مشابهی ارائه داد که در آن ضریب شکل $s_q$ به جزء مربوط به عمق در رابطه ظرفیت باربری اعمال شده بود (رابطه ۱-۲). او همچنین ضرایب عمق ( $d_i$ ) را جهت منظور نمودن بخشی از تاثیر مقاومت برشی خاک و سربار و ضرایب تمایل بار ( $i_i$ ) را برای حالات مربوط به انحراف بار وارد بر پی نسبت به راستای قائم، در رابطه وارد کرد (رابطه ۱-۳) [۳].

بار قائم : $q_{ult} = cN_c s_c d_c + \bar{q}N_q s_q d_q + 0.5\gamma BN_\gamma s_\gamma d_\gamma$ (۱-۲)

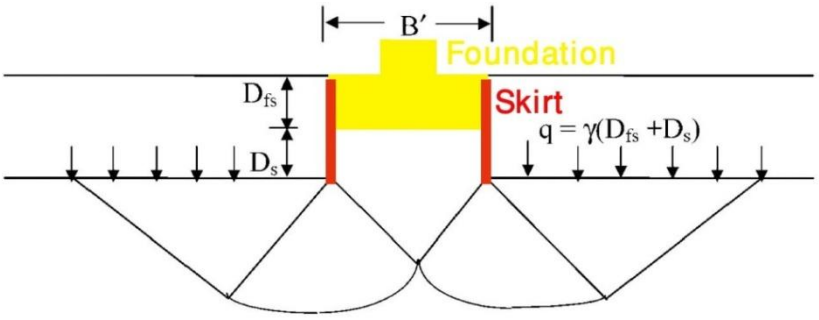
بار مایل : $q_{ult} = cN_c d_c i_c + \bar{q}N_q d_q i_q + 0.5\gamma BN_\gamma d_\gamma i_\gamma$ (۱-۳)




شکل ۱-۳ اندرکنش خاک-پی در روابط ظرفیت باربری پی نواری [۳]

العقبری (۲۰۰٤a) برای پی‌های نواری سطحی مجهز به جداره تحتانی واقع بر ماسه متراکم و تحت بار قائم مرکزی، شکل اصلاح شده‌ای از رابطه ظرفیت باربری متعارف را ارائه داد [۱]. این اصلاحات به قرار زیر است :

۱ -در تمامی حالات خاک بالای لبه جداره، مشابه با روش ارائه شده توسط ترزاقی (۱۹٤۳) برای پی‌های نواری سطحی، باید به عنوان سربار در نظر گرفته شود (شکل ۱-٤).




شکل ۱-٤ در نظر گرفتن خاک بالای لبه جداره به صورت سربار [۱]

۲ -برای تعیین ظرفیت باربری نهایی پی نواری سطحی مجهز به جداره‌های سازه‌ای و برای منظور نمودن تمامی خواص پی، جداره، خاک و بارگذاری که بر ظرفیت باربری آن تاثیر دارند، یک ضریب اصلاح ( $F_\gamma$ ) باید به جزء مربوط به وزن خاک در رابطه عمومی ظرفیت باربری اعمال شود.

در روش العقبری (۲۰۰٤a) ظرفیت باربری پی پاجداری از طریق مقایسه آن با یک پی واقع در عمق جداره انجام شده است. رابطه ۱-٤ رابطه ظرفیت باربری اصلاح شده را بر اساس شکل ۱-۱ نشان می‌دهد[۱].

$$q_{ult} = \gamma(D_{fs} + D_s)N_q + 0.5\gamma B' N_\gamma F_\gamma \qquad (۴-۱)$$

در این رابطه، $F_\gamma$ ضریب جداره، $D_{fs}$ عمق تا تراز کف پی، $D_s$ عمق از تراز کف پی تا نوک جداره و $B'$ مجموع عرض پی و ضخامت دو جداره می‌باشد. او با انجام آزمایش‌هایی به بررسی اثر زاویه اصطکاک کف پی، زاویه اصطکاک جداره، عمق جداره، سختی جداره و تراکم پذیری خاک می‌پردازد و در نهایت $F_\gamma$ را با استفاده از رابطه ۱-۵ ارائه می‌دهد[۱]:

$$F_\gamma = F_{\gamma f}.F_{\gamma d}.F_{\gamma r}.F_{\gamma s}.F_{\gamma c} \qquad (۵-۱)$$

در این رابطه $F_{\gamma f}$ ضریب اصطکاک کف پی، $F_{\gamma d}$ ضریب عمق جداره، $F_{\gamma r}$ ضریب اصطکاک جانبی جداره، $F_{\gamma s}$ ضریب سختی جداره، $F_{\gamma c}$ ضریب فشردگی پذیری خاک می‌باشد.

همچنین العقبری (۲۰۰٦) به بررسی ظرفیت باربری پی‌های پاجداری دایره‌ای واقع بر ماسه پرداخته و رابطه‌ای برای محاسبه ظرفیت باربری این دسته از پی‌ها، با انجام اصلاحاتی بر رابطه عمومی ظرفیت باربری متعارف مشابه با آنچه در مورد پی های نواری انجام شد، ارائه نموده است [٤]. او عواملی چون زبری کف پی و عمق جداره را موثر دانسته و پس از بررسی اثر آنها از طریق انجام آزمایش‌ها، ضریب اصلاح را بصورت رابطه ۱-٦ ارائه نموده است.

$$F_\gamma = F_{\gamma f}.F_{\gamma d} \qquad (۶-۱)$$

در مطالعه حاضر نیز سعی شده پس از بررسی عوامل موثر بر ظرفیت باربری پی‌های پاجداری و تعیین میزان و نحوه تاثیر این عوامل از طریق مقایسه ظرفیت باربری این دسته از پی‌ها با پی‌های سطحی موجود در محیط خاکی مشابه، با اعمال ضرایبی بر رابطه متعارف ظرفیت باربری میرهوف برای پی‌های سطحی، رابطه‌ای برای محاسبه ظرفیت باربری پی پاجداری ارائه شود. در این مطالعه میزان افزایش ظرفیت باربری پی مجهز به جداره، در نشستی برابر با نشست گسیختگی پی سطحی ملاک عمل می‌باشد.

### ۱ ٤ -اهداف پایان نامه

با توجه به اندک بودن تعداد تحقیقات انجام گرفته بر پی‌های پاجداری برای استفاده آن‌ها در سازه‌های موجود در خشکی و یا محدود بودن آنها به شکل خاصی از پی و یا نوع خاصی از خاک، تحقیقات گسترده‌تر و دقیق‌تر مربوط به ظرفیت باربری این گونه از پی‌ها و عوامل موثر بر آن، جهت کاربردی کردن آنها برای استفاده در سازه‌های متعارف، لازم به نظر می‌رسد.

در مطالعه حاضر نتایج بررسی ظرفیت باربری پی‌های واقع بر سطح مجهز به جداره تحت بار قائم با استفاده از تحلیل عددی ارائه شده است. عوامل موثر بر ظرفیت باربری این دسته از پی ها، به شرح زیر بررسی شده و نحوه و میزان تاثیر آنها از طریق مقایسه ظرفیت باربری پی مجهز به جداره با پی واقع بر سطح بدون جداره تعیین شده است.

۱. پارامترهای مقاومتی و سختی خاک
۲. شکل پی
۳. عرض پی
۴. زبری کف پی
۵. ارتفاع جداره
۶. زبری جانبی جداره
۷. ضخامت جداره
۸. صلبیت جداره
۹. بررسی مدل رفتاری خاک محصور درون پی
۱۰. نحوه آرایش جداره‌ها

همچنین با ضرب کردن جملاتی به رابطه متعارف محاسبه ظرفیت باربری ارائه شده توسط میرهوف، روابطی برای تخمین ظرفیت باربری پی پاجداری ارائه شده است.

### ۱ ۵ -ساختار پایان نامه

این تحقیق به بررسی تاثیر نصب جداره بر ظرفیت باربری پی‌های واقع بر سطح از طریق انجام تحلیل‌های عددی می‌پردازد. محتوای آن در پنج فصل ارائه شده که حاوی مطالب زیر می‌باشند:

- فصل اول مطالبی کوتاه را برای معرفی پی‌های سطحی مجهز به جداره و لزوم تحقیقات بیشتر در مورد آنها ارائه می‌دهد. به طور مختصر روابط پیشنهاد شده برای محاسبه ظرفیت باربری این دسته از پی‌ها و روابط متعارف موجود برای پی‌های سطحی معرفی شده است. همچنین اهداف و کلیات این پایان نامه بیان شده است.

- فصل دوم به ارائه توضیح بیشتر در خصوص پی‌های سطحی مجهز به جداره، انواع و مزایای استفاده از آنها و ارائه پیشینه علمی مربوط به آن و بررسی تحقیقات انجام شده در مورد آنها می‌پردازد.
- فصل سوم شیوه انجام تحقیق و ابزار مورد استفاده را معرفی می‌کند. فهرست تحلیل‌های انجام شده و جزئیات ساخت مدل‌های مربوط به آنها آمده است. همچنین بخشی از تحلیل‌های انجام شده بر پی‌های واقع بر سطح بدون جداره و مقایسه نتایج آنها با روابط ظرفیت باربری متعارف ارائه شده است.
- فصل چهارم نتایج تحلیل‌های انجام شده را ارائه می‌دهد. همچنین نتایج ارائه شده مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرند. در انتهای این فصل، با اعمال ضرایب اصلاحی به معادله ظرفیت باربری پیشنهادی میرهوف، رابطه‌ای برای محاسبه ظرفیت باربری پی‌های سطحی مجهز به جداره ارائه شده است.
- فصل پنجم مهمترین نتیجه بدست آمده از انجام هر یک از تحلیل‌ها بر پی‌های پاجداری و همچنین برخی از جنبه‌های مناسب برای تحقیقات بیشتر را ارائه می‌دهد.

# فصل دوم  پیشینه علمی موضوع

## ۲-۱- مقدمه

جداره‌های سازه‌ای[1] متصل به کناره‌های پی‌های سطحی مدت‌های طولانی است که در سازه‌های فراساحل[2] کاربرد دارند. این جداره‌ها برحسب کاربرد پی، می‌توانند کاربردهایی از قبیل افزایش ظرفیت باربری قائم و جانبی، سهولت در نصب و اجرا، کاهش هزینه‌های ساخت و نصب و اجرا و ... را باعث شوند. اتصال این جداره‌ها که می‌توان گفت در تمامی موارد به طور قائم به کف پی متصل می‌گردند، موجب پیدایش دسته‌ای از پی‌ها با عنوان پی‌های پاجداری شده که با نام‌های دیگری چون صندوقه‌های مکشی یا پی‌های دامن‌دار در سازه‌های دریایی و پی‌های پاجداری، پی‌های قرنیزدار و پی‌های سطلی شناخته می‌شوند. به طور کلی پی‌های پاجداری پی‌هایی هستند که به جداره‌های قائم در زیر پی مجهز شده‌اند. با توجه به قدمت استفاده از پی‌های پاجداری در دریا، تحقیقات متعدد و گسترده‌ای در مورد آنها در زمینه‌هایی از قبیل نحوه نصب، ظرفیت باربری و ... انجام شده است. با این حال تاکنون استفاده از این جداره‌ها برای پی‌های سطحی متعارف موجود در خشکی کمتر مورد توجه بوده و همچنین تاثیر این جداره‌ها در افزایش ظرفیت باربری این پی‌ها به طور کامل و مشروح بررسی نشده است[۱]. در ادامه شرح مختصری از انواع این پی‌ها، کاربرد، عوامل موثر در ظرفیت باربری و تحقیقات انجام شده، با نظری دقیق‌تر بر انواع آنها در خشکی آمده است.

---

[1] – structural skirts

[2] – offshore structures

### ۲-۲- انواع پی‌های پاجداری

با توجه به انواع پی‌های پاجداری، می‌توان گفت مهمترین وجه تمایز این دسته از پی‌ها، روش اجرای آنها است که بر این اساس با توجه به محل نصب، به دو دسته عمده پی‌های پاجداری ویژه سازه‌های دریایی و پی‌های پاجداری ویژه شرایط خشکی تقسیم بندی می‌گردند.

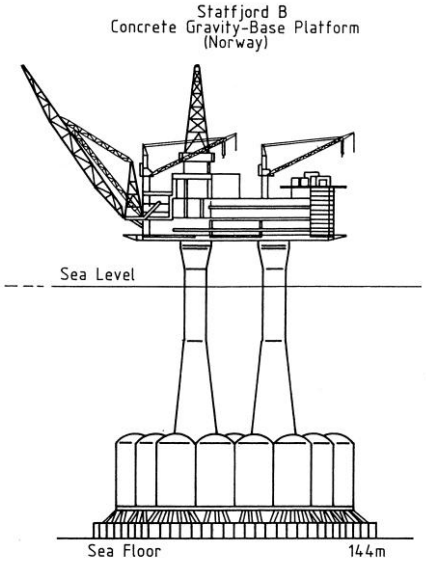
#### ۲-۲-۱- پی‌های پاجداری رایج در سازه‌های دریایی

پی‌های پاجداری در دریا به انواع پی‌های وزنی و صندوقه‌های مکشی دسته بندی می‌گردد. در ادامه ابتدا شرح مختصری در مورد پی‌های وزنی مجهز به جداره‌های تحتانی ارائه می‌گردد. با توجه به محل قرارگیری جداره‌ها در صندوقه‌های مکشی و نحوه تاثیر آنها بر افزایش ظرفیت باربری این دسته از پی‌ها، به لحاظ نزدیکی با موضوع این تحقیق، صندوقه‌های مکشی مورد توجه بیشتری واقع شده و برخی مطالعات مهم در زمینه این پی‌ها نیز شرح داده می‌شود.

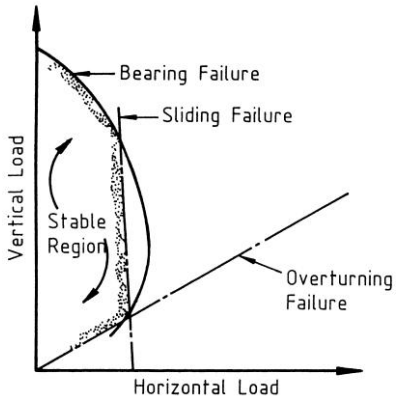
- ***پی‌های وزنی***

پی‌های وزنی با استفاده از هندسه پی و وزن زیاد آن، در برابر نیروهای شدید محیطی مقاومت می‌کنند. وزن آنها بسته به شیوه طراحی به یک پی گسترده تکی و یا به چند پی گسترده وارد می‌شود. این پی‌ها در کارگاه ساحلی و یا در منطقه‌ای محصور شده متصل به دریا ساخته شده و به طور شناور به محل نصب منتقل می‌گردند و سپس در آب غرق شده و بر بستر طبیعی دریا و سطح آماده نشده زمین می‌نشینند. پی‌های وزنی عموماً به گونه‌ای طراحی و ساخته می‌شوند که برای تحمل بارهای محیطی بلافاصله پس از نصب کارایی دارند[۵]. شکل ۲-۱ یک نمونه از پی‌های وزنی را نشان می‌دهد.

شکل ۲-۲ دیاگرام اندرکنش مولفه‌های پایداری این گونه از پی‌ها را نشان می‌دهد. دوولکار (۲۰۰۸) [۵] نشان می‌دهد که یک مدل ساده سه بعدی اجزاء محدود، می‌تواند برای چنین سازه حساس و گران‌قیمتی بکار رود و تمامی پارامترهای لازم برای طراحی را در اختیار طراح قرار دهد.




شکل ۲-۱ یک نمونه از سکوی وزنی [۶]




شکل ۲ -۲ دیاگرام اندرکنش مولفه‌های پایداری [۶]

طراحی سیستم جداره‌ها مهمترین جنبه در فراهم آمدن امکان تنظیم سکو با شرایط محل و خاک می‌باشد. شکل ۲-۳ محل قرارگیری جداره‌ها را در این دسته از پی‌ها نشان می‌دهد. به طور کلی کاربرد جداره در این دسته از پی‌ها شامل موارد زیر است [۶]:

۱ -محصور نمودن لایه خاک نرم فوقانی و انتقال بارها به خاک محکم‌تر زیرین

۲ -بهبود بخشیدن به شرایط هیدرولیکی در لبه‌ها و کاهش خطر آب شستگی

۳ -تسهیل شرایط لازم برای تزریق در ناحیه پایه