

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

**مدل سازی رفتاری پی با استفاده از الگوریتم ترکیبی شبکه عصبی مصنوعی و  
تبرید شبیه سازی شده**

نگارنده:

**میلاذ عرب اسماعیلی**

استاد راهنما:

**دکتر سید مهدی حسینی**

شهریور ۱۳۹۶

شماره: ۱۰۳/۲۷۰۷  
تاریخ: ۱۳، ۴، ۹۴

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای میلاد عرب اسمعیلی با شماره دانشجویی: ۹۳۳۳۲۷۴ رشته: عمران گرایش: ژئوتکنیک تحت عنوان: مدل‌سازی رفتاری پی با استفاده از الگوریتم ترکیبی شبکه عصبی مصنوعی و تبرید شبیه سازی شده که در تاریخ ۱۳۹۶/۶/۱۱ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با امتیاز ۱۰/۳۸) (درجه .....)

مردود

نوع تحقیق: نظری  عملی

| عضو هیأت داوران           | نام و نام خانوادگی | مرتبه علمی | امضاء |
|---------------------------|--------------------|------------|-------|
| ۱- استاد راهنمای اول      | سید مهدی حسینی     | استادیار   |       |
| ۲- استاد راهنمای دوم      |                    |            |       |
| ۳- استاد مشاور            |                    |            |       |
| ۴- نماینده تحصیلات تکمیلی | علی عباسزاد        | استادیار   |       |
| ۵- استاد ممتحن اول        | محسن کرامتی        | استادیار   |       |
| ۶- استاد ممتحن دوم        | امیر بذرافشان مقدم | استادیار   |       |

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: مروتی زاهدی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تصوه: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می‌تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به:

کسانی که همواره همراهم بودند و هستند

پدر دلسوزم،

مادر فداکارم

و خانواده مهربانم

سپاس‌گذاری

سپاس و شکر از لطف بی‌پایان الهی که مرا توفیق تحولی دوباره عطا کرد و درونم را به  
شوق آموختن و نگاشتن هدیه نمود.

نگارنده لازم می‌داند از زحمات بی‌دریغ استاد کراتقدر، جناب آقای دکتر **سید**  
**همدی حسینی** نهایت سپاس‌گذاری و قدردانی را داشته باشد که انجام این تحقیق  
بدون راهنمایی‌های ایشان ممکن نبود.

## تعهد نامه

این جانب میلاد عرب اسماعیلی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران - ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل سازی رفتاری پی با استفاده از الگوریتم ترکیبی شبکه عصبی مصنوعی و تبرید شبیه سازی شده تحت راهنمایی آقای دکتر سید مهدی حسینی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافت های آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

### تاریخ

#### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن ( مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

اخیراً، برای جلوگیری از صرف زمان و هزینه بسیار زیاد انجام آزمایشات متعدد، گرایش به سمت ابزارهای کامپیوتری که مشابه با سیستم بیولوژیکی (شبه بیولوژیکی) باشند افزایش یافته است. در این مطالعه، تکنیک شبه بیولوژیکی جدیدی که از ترکیب شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و تبرید شبیه‌سازی شده (SA) بوجود آمده برای پیش بینی ظرفیت باربری نهایی پی بر خاک های دانه ای به کار گرفته شده است. مدل ANN/SA پیشنهادی بر پایه استفاده از نتایج آزمایشگاهی بسط داده شده است که پس از مطالعه گسترده ادبیات فنی جمع آوری شده اند. مجموعه داده ها شامل آزمایشات انجام شده بر روی پی های کوچک و بزرگ مقیاس مربعی، دایره ای و نواری بر بستر ماسه ای می باشد. مدل طراحی جدید ارائه شده ظرفیت باربری نهایی پی های سطحی را بر اساس پارامترهای مربوط به هندسه پی (مانند عرض، عمق و شکل پی) و مشخصات مکانیکی خاک (مانند وزن مخصوص متوسط و زاویه اصطکاک داخلی خاک) فرمول بندی می کند. به منظور بدست آوردن مدل های بهینه، سعی و خطای گسترده ای با استفاده از پارامترهای موثر بر ظرفیت باربری صورت گرفته است. نقش پارامترهای موثر در پیش بینی ظرفیت باربری با استفاده از آنالیز حساسیت مورد بحث و بررسی استفاده قرار گرفته است. مطالعه مقایسه ای صورت گرفته با معادلات بسیار معروف ارائه شده توسط ترزاقی، میرهوف، هنسن و وسیک امکان استفاده از مدل ANN/SA را به عنوان جایگزینی مطمئن برای اینگونه معادلات کلاسیک اثبات می نماید. نتایج نشانگر عملکرد بهتر مدل ارائه شده در مقایسه با سایر مدل های هوش مصنوعی موجود در ادبیات فنی می باشند. شایان ذکر است مدل های بر پایه ANN غالباً به دلیل ناتوانی در توضیح اصول زیر ساختی برای پیش بینی، به عنوان مدل های جعبه های سیاه شناخته می شوند. به عبارت دیگر، اگرچه به طور کلی ANN در پیش بینی موفق هستند ولی قادر به ایجاد معادلات کاربردی پیش بینی کننده نیستند. برای غلبه بر این محدودیت، فرایند جدیدی تعریف شده است که بر پایه آن مدل بهینه حاصل از ANN/SA به معادله طراحی نسبتاً ساده‌ای برگردانده شده است. روند محاسبات بر پایه وزن‌ها و بایاس‌های بهترین ساختار و بصورت

کابردی در قالب برنامه صفحه گسترده ارائه شده است.

**کلمات کلیدی:** ظرفیت باربری نهایی، شبکه عصبی مصنوعی، تبرید شبیه‌سازی شده، پی‌های

سطحی، خاک‌های دانه‌ای، پیش‌بینی.



## فهرست مطالب

|   |    |
|---|----|
| فصل اول: مقدمه.....                                 | ۱  |
| ۱-۱- مقدمه.....                                     | ۲  |
| ۱-۲- معرفی فصل های پایان نامه.....                  | ۶  |
| فصل دوم: مفاهیم بنیادی پی.....                      | ۹  |
| ۱-۲- مقدمه.....                                     | ۱۰ |
| ۱-۱-۲- تعاریف اولیه و مفاهیم بنیادی.....            | ۱۰ |
| ۲-۲- تعاریف مربوط به پی و اهمیت آن.....             | ۱۱ |
| ۱-۲-۲- انواع پی.....                                | ۱۲ |
| ۲-۲-۲- انواع پی های سطحی.....                       | ۱۳ |
| ۳-۲- مفهوم ظرفیت باربری نهایی پی های سطحی.....      | ۱۴ |
| ۱-۳-۲- ظرفیت باربری نهایی ( $q_u$ ).....            | ۱۵ |
| ۲-۳-۲- ظرفیت باربری نهایی خالص ( $q_n$ ).....       | ۱۵ |
| ۳-۳-۲- ظرفیت باربری ایمن ( $q_s$ ).....             | ۱۶ |
| ۴-۳-۲- ظرفیت باربری مجاز ( $q_a$ ).....             | ۱۶ |
| ۴-۲- تحلیل ظرفیت باربری پی های سطحی.....            | ۱۶ |
| ۱-۴-۲- گسیختگی برشی کلی.....                        | ۱۷ |
| ۲-۴-۲- گسیختگی برشی موضعی.....                      | ۱۷ |
| ۳-۴-۲- گسیختگی برشی سوراخ کننده.....                | ۱۸ |
| فصل سوم: بررسی کلی روش های محاسبه ظرفیت باربری..... | ۲۱ |

|    |   |
|----|---|
| ۲۲ | ۱-۳-۱- مقدمه.....   |
| ۲۲ | ۲-۳-۲- روش های تحلیلی.....  |
| ۲۲ | ۱-۲-۳- روش خطوط لغزش.....   |
| ۲۳ | ۲-۲-۳- روش تعادل حدی.....   |
| ۲۴ | ۳-۲-۳- روش تحلیل حدی.....   |
| ۲۴ | ۱-۳-۲-۳- تئوری کران پایین.....  |
| ۲۵ | ۲-۳-۲-۳- تئوری کران بالا.....   |
| ۲۵ | ۳-۳- روش های عددی.....  |
| ۲۵ | ۱-۳-۳- کاربرد اجزای محدود برای به دست آوردن ظرفیت باربری پی ها.....       |
| ۲۷ | ۲-۳-۳- روش های تجربی.....   |
| ۲۹ | <b>فصل چهارم: روش های مرسوم جهت تعیین ظرفیت باربری.....</b>               |
| ۳۰ | ۱-۴-۱- مقدمه.....   |
| ۳۰ | ۱-۱-۴- روش های مرسوم جهت تعیین ظرفیت باربری.....                          |
| ۳۰ | ۲-۴- معادلات ظرفیت باربری.....  |
| ۳۲ | ۱-۲-۴- معادله ظرفیت باربری ترزاقی.....                                    |
| ۳۸ | ۲-۲-۴- معادله ظرفیت باربری میرهوف.....                                    |
| ۴۵ | ۴-۲-۴- معادله ظرفیت باربری ویسک.....                                      |
| ۴۶ | ۳-۴- انتخاب معادله مناسب برای محاسبه ظرفیت باربری.....                    |
| ۴۹ | ۴-۴- ضرایب ایمنی در ظرفیت باربری پی ها.....                               |
| ۵۳ | <b>فصل پنجم: تکنیک ترکیبی شبکه عصبی مصنوعی و تبرید شبیه سازی شده.....</b> |
| ۵۴ | ۱-۵-۱- مقدمه.....   |

|     |   |
|-----|---|
| ۵۵  | ۲-۵- شبکه های عصبی مصنوعی   |
| ۵۷  | ۱-۲-۵- مقایسه شبکههای عصبی مصنوعی با روشهای سنتی                  |
| ۵۷  | ۲-۲-۵- مقایسه شبکه های عصبی مصنوعی با سیستم های خبره              |
| ۵۸  | ۳-۲-۵- قسمتهای اصلی شبکههای عصبی مصنوعی                           |
| ۶۲  | ۴-۲-۵- نرونهای مصنوعی و چگونگی عملکرد آنها                        |
| ۶۳  | ۵-۲-۵- انواع لایههای نرونهای مصنوعی                               |
| ۶۴  | ۶-۲-۵- ارتباط نرونهای مصنوعی                                      |
| ۶۵  | ۷-۲-۵- پرسپترون های چند لایه                                      |
| ۶۷  | ۳-۵- ترکیب شبکه عصبی مصنوعی و تبرید شبیه سازی شده                 |
| ۷۲  | ۴-۵- کاربرد ANN و ANN/SA در مهندسی ژئوتکنیک                       |
| ۷۵  | <b>فصل ششم: مدل سازی ظرفیت باربری پی های سطحی</b>                 |
| ۷۶  | ۱-۶- مقدمه  |
| ۷۷  | ۲-۶- مدل سازی ظرفیت باربری پی های سطحی با استفاده از تکنیک ANN/SA |
| ۷۷  | ۱-۲-۶- بانک داده ها   |
| ۸۳  | ۲-۲-۶- بسط مدل طراحی ظرفیت باربری پی با استفاده از ANN/SA         |
| ۸۷  | ۳-۲-۶- روش نرمالیزاسیون برای مدل های ANN/SA                       |
| ۸۷  | ۴-۲-۶- مدل ANN/SA برای پیش بینی Qult                              |
| ۹۲  | ۵-۲-۶- مثال طراحی   |
| ۹۴  | ۶-۲-۶- آنالیز حساسیت پارامتر ها                                   |
| ۹۶  | ۳-۶- بحث و مطالعه مقایسه ای                                       |
| ۱۰۳ | <b>فصل هفتم: جمع بندی و پیشنهادها</b>                             |

۱-۷- مقدمه..... ۱۰۴

۲-۷- جمع بندی و نتیجه گیری ..... ۱۰۶

۳-۷- پیشنهادها..... ۱۰۷

مراجع ..... ۱۰۳

## فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱- انشعابات مختلف هوش محاسباتی ..... ۴
- شکل ۱-۲- اجزای مولفات کلی پی، خاک و سازه ..... ۱۰
- شکل ۲-۲- ظرفیت باربری نهایی پی ..... ۱۵
- شکل ۳-۲- انواع گسیختگی برشی در خاک تکیه گاه پی: الف) گسیختگی برشی کلی، ب) گسیختگی برشی موضعی، ج) گسیختگی برشی سوراخ کننده ..... ۱۸
- شکل ۴-۲- انواع گسیختگی در پی های متکی بر ماسه [۸] ..... ۱۹
- شکل ۱-۳- شمای گسیختگی برشی در باربری نهایی یک پی نواری [۱۹] ..... ۲۳
- شکل ۲-۳- نحوه اتصال المان ها (قطعات) توسط فنر وینکلر به یکدیگر ..... ۲۶
- شکل ۳-۳- شمای کلی فنر های وینکلر در اتصال بین دو المان ..... ۲۶
- شکل ۱-۴- گسیختگی برشی کلی در باربری نهایی یک پی نواری ..... ۳۱
- شکل ۲-۴- فرضیه ترزاقی در ظرفیت باربری پی [۱۹] ..... ۳۳
- شکل ۳-۴- الف) پی سطحی با کف زبر، در معادلات ترزاقی و هسنن از مقاومت برشی در طول CD (یعنی مقاومت برشی خاک سربار) صرفنظر شده است. ب) اندر کنش خاک- پی مورد استفاده در تعیین ظرفیت باربری نهایی پی نواری، سمت چپ سطوح لغزش انتخابی ترزاقی و هسنن و سمت راست مربوط به میر هوف  
..... میباشد.

- شکل ۵-۱- جزئیات عملکردی یک نرون عصبی مصنوعی [۴۶] ..... ۶۲
- شکل ۵-۲- نمودار شماتیک یک شبکه عصبی با الگوریتم BP [۳۸] ..... ۶۶
- شکل ۵-۳- پروتکل های تغییر حرارت در الگوریتم SA بر اساس (الف) سرمایه‌ش خطی (ب) چرخه های دمایی [۱۶، ۱۷] ..... ۷۲
- شکل ۶-۱- هیستوگرام های فرکانس مقادیر ورودی های مختلف ..... ۸۲
- شکل ۶-۲- ساختار بهترین مدل ANN/SA برای پیش بینی  $q_{ult}$  ..... ۸۸
- شکل ۶-۳- نتایج پیش بینی ظرفیت باربری نهایی ( $q_{ult}$ ) بر حسب کیلو پاسکال به وسیله بهترین مدل ANN/SA برای داده های آموزش ..... ۹۱
- شکل ۶-۴- نتایج پیش بینی ظرفیت باربری نهایی ( $q_{ult}$ ) بر حسب کیلو پاسکال به وسیله بهترین مدل ANN/SA برای داده های آزمایش ..... ۹۲
- شکل ۶-۵- تعیین اهمیت نسبی پارامترها با استفاده از الگوریتم گارسون [۵۹] ..... ۹۵
- شکل ۶-۶- مقادیر اهمیت نسبی ورودی های مختلف مدل ANN/SA پیش بینی کننده  $q_{ult}$  ..... ۹۶
- شکل ۶-۶- مقایسه ظرفیت باربری نهایی برای داده های تست با استفاده از روش های مختلف ..... ۱۰۱

## فهرست جدول ها

- جدول ۴-۱- ضرایب ظرفیت باربری برای معادلات ترزاقی ..... ۳۵
- جدول ۴-۲- ضرایب ظرفیت باربری برای محاسبه  $K_{PT}$  ..... ۳۵
- جدول ۴-۳- روابط پیشنهادی محققین مختلف برای محاسبه  $N_{\Gamma}$  [۲۱] ..... ۳۶
- جدول ۴-۴- ضرایب شکل ترزاقی ..... ۳۷
- جدول ۴-۵- حالت کلی معادلات برای ظرفیت باربری نهایی پی ..... ۴۰
- جدول ۴-۶- ضرایب شکل، عمق و تمایل بار برای معادلات ظرفیت باربری میرهوف ..... ۴۱
- جدول ۴-۷- مقادیر مختلف ضرایب  $N_I$  معادله میرهوف ..... ۴۲
- جدول ۴-۸- ضرایب شکل و عمق برای استفاده در معادلات ظرفیت باربری هسن و وسیک (اندیس های  $V$  و  $H$  به ترتیب نشانگر وسیک و هسن می باشند). ..... ۴۴
- جدول ۴-۹- ضرایب تمایل بار، شیب زمین و کجی پی برای استفاده در معادلات ظرفیت باربری هسن ..... ۴۴
- جدول ۴-۱۰- پیشنهاد کاربرد معادلات ظرفیت باربری برای حالات مختلف ..... ۴۷
- جدول ۴-۱۱- معادلات خلاصه شده برای ظرفیت باربری نهایی پی تحت بار قائم بر خاک های دانه ای ..... ۴۸
- جدول ۴-۱۲- ضرایب مورد نیاز برای ظرفیت باربری نهایی پی تحت بار قائم بر خاک های دانه ای ..... ۴۸
- جدول ۴-۱۳- مقادیر ضرایب اطمینان متداول در طراحی پی و کارهای خاکی دیگر ..... ۵۰

- جدول ۶-۱- کل داده های به کار رفته در بسط مدل های ظرفیت باربری پی های سطحی تحت بار  
قائم واقع بر خاک های دانه ای ..... ۷۸
- جدول ۶-۲- شرح آماری نتایج و متغیرهای مورد استفاده در مدلسازی ..... ۸۲
- جدول ۶-۳- مقادیر وزن ها و بایاس های بین لایه ورودی و پنهان ..... ۹۰
- جدول ۶-۴- مقادیر وزن ها و بایاس های بین لایه پنهان و خروجی ..... ۹۰
- جدول ۶-۵- پارامترهای مربوط به اعتبارسنجی مدل های ارائه شده ..... ۹۷



# فصل اول: مقدمه

## ۱-۱- مقدمه

ستون ها، دیوارها و دیگر اعضای باربر بارهای ساختمان را به پی منتقل می کنند. پی پایین ترین بخش یک سازه است که بارها را به خاک بستر منتقل می کند. با توجه به ارتفاع سازه پی ها به دو گروه اصلی پی های سطحی و عمیق تقسیم بندی می شوند. پی های با نسبت عمق (D) به عرض (B) کمتر یا مساوی چهار (۳ یا  $D/B \leq 4$ ) پی های سطحی نامیده می شوند. ظرفیت باربری شکست معمولا در یکی از سه حالت برش معمولی، برش محلی و شکست برشی پانچینگ اتفاق می افتد [۱]. ظرفیت باربری نهایی با فشار کل کف پی که منجر به شکست برشی پی می شود تعیین می شود. تخمین دقیق ظرفیت باربری خاک زیر پی برای یک طراحی موثر، بسیار تعیین کننده می باشد. به طور کلی، چهار فرایند برای تعیین ظرفیت باربری پی های سطحی و عمیق استفاده می شود [۲]: (۱) تحلیل استاتیکی (۲) روش های تست در محل (۳) تست باربری با مقیاس کامل و (۴) مقادیر فرضی پیشنهاد شده توسط آیین نامه ها و کتاب های راهنما. در میان این فرایندها راه حل تئوری (تحلیل استاتیکی) از همه متداول تر می باشد. در این زمینه پراندتل [۳] و ریسینر [۴] روش هایی محاسباتی در تعیین ظرفیت باربری نهایی پی های نواری سطحی بر اساس تئوری پلاستیک ارائه کردند. فرمول های ارائه شده در طی سالیان مختلف توسط پژوهشگران مختلف بطور قابل ملاحظه ای بهبود پیدا کرده اند. ترزاقی [۵] تئوری پراندتل را با در نظر گرفتن وزن خاک توسط اصل انطباق گسترش داد. میرهوف [۶] فرمول های ظرفیت باربری ترزاقی را با اضافه کردن شکل های مختلف و ضریب عمق گسترش داد. مدل میرهوف بعدها توسط هسن [۷] اصلاح شد. وسیک [۸] فرمولی شبیه فرمول هسن برای پیش بینی ظرفیت باربری ارائه کرد. اخیرا کالیانی و همکاران [۹] فرمول میرهوف را با استفاده از الگوریتم بهینه سازی مورچه ها بهبود داد. در هر صورت، مشکل اساسی اینگونه فرمول های کلاسیک این است که یکسری فرضیات ساده شده در بسط این فرمول ها در نظر گرفته شده است که منجر به این می شود که این فرمول ها تخمین های قابل اعتمادی از ظرفیت باربری پی بدست ندهند.

پیچیدگی تحلیل رفتار ظرفیت باربری، ضرورت استفاده از روش های پیش بینی جایگزین را القا می کند. اخیراً، گرایش به سمت ابزارهای کامپیوتری که مشابه با سیستم بیولوژیکی (شبه بیولوژیکی) باشند، جهت تخمین پارامترهای خاک و مصالح با استفاده از ویژگیهای دیگر خاک و تنها بر اساس نتایج واقعی به دست آمده از آزمایشات، افزایش یافته است. محاسبات نرم<sup>۱</sup> که توسط پروفیسور زاده از دانشگاه برکلی مطرح گردید عبارتست از مجموعه ای از روش ها که برای بدست آوردن کنترل، دقت بالا و راه حل هایی با کمترین هزینه از طریق تعیین دامنه تغییرات خطاها یا عدم قطعیت ها به کار می روند. در حقیقت محاسبات نرم را می توان به عنوان مجموعه ای از تکنیک ها در نظر گرفت که رفتار ارگانیسم های زنده نظیر گیاهان، حیوانات و انسان ها را که رفتاری نرم، انعطاف پذیر، تطابق پذیر و هوشمند است، شبیه سازی می کنند. محاسبات نرم شامل روش هایی مانند منطق فازی (FL)<sup>۲</sup>، شبکه های عصبی مصنوعی (ANNs)<sup>۳</sup> و الگوریتم های تکاملی (EAs)<sup>۴</sup> می باشند که از روش های تئوریک کلاسیک استنتاج نمی شوند. FL، ANNs و EAs روش هایی برای بهینه سازی و جستجو هستند که در دهه های اخیر مورد استفاده زیاد قرار گرفته اند. EAs، مجموعه ای از روش های ابتکاری بوده که در زمینه های مختلفی با پیچیدگی های زیاد مورد استفاده قرار می گیرد و تحت نام کلی محاسبات تکاملی<sup>۵</sup> مورد استفاده قرار می گیرند. این الگوریتم ها، به دلیل انعطاف پذیری برآزشی که برای توابع مختلف دارند، دارای مزیت می باشند. این الگوریتم ها در سه دسته بزرگ الگوریتم های ژنتیک<sup>۶</sup>، برنامه ریزی تکاملی<sup>۷</sup> و استراتژی های تکاملی<sup>۸</sup> طبقه بندی می شوند که دو دسته دیگر برنامه نویسی ژنتیک<sup>۹</sup> و سیستم های

---

<sup>۱</sup>-Soft Computing

<sup>۲</sup>-Fuzzy Logic

<sup>۳</sup>- Artificial Neural Networks

<sup>۴</sup>- Evolutionary Algorithms, هر برنامه کامپیوتری که از مفهوم تکامل زیست شناختی برای حل مسئله بهینه سازی استفاده نماید.

<sup>۵</sup> Evolutionary Computations

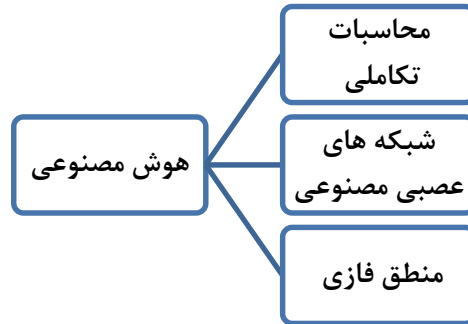
<sup>۶</sup> Genetic Algorithm

<sup>۷</sup>- Evolutionary Programming, این الگوریتم توسط Lawrence J. Fogel در سال ۱۹۶۰ توسعه داده شد و از روش انتخاب مسابقه ای، متغیرهای پیوسته و بدون تزویج استفاده می نماید.

<sup>۸</sup> Evolutionary Strategies, در کشور آلمان در سال ۱۹۶۰ توسعه داده شد. این تکنیک ها از پارامترهای قطعی انتخاب، تزویج و جهش و همچنین از متغیرهای پیوسته استفاده می کند.

<sup>۹</sup>Genetic Programming

دسته‌بندی‌کننده<sup>۱</sup> نیز به دلیل اهمیتی که در یادگیری ماشینی<sup>۲</sup> و کشف قوانین در سیستم‌های قانون مند<sup>۳</sup> دارند، در زمره این طبقه‌بندی قرار می‌گیرند. محاسبات نرم به عنوان مبنایی برای حوزه در حال رشد هوش مصنوعی<sup>۴</sup> [۱۰] می‌باشند (شکل (۱-۱)).



شکل ۱-۱- انشعابات مختلف هوش محاسباتی

ANN یکی از شناخته شده ترین شاخه های هوش مصنوعی می باشد. اخیراً، این روش در مدل‌سازی رفتار بسیاری از مسایل مهندسی ژئوتکنیک استفاده شده است [۱۱-۱۳]. هرچند ANNs در پیش بینی موفق بوده اند ولی تعیین ساختار شبکه مصنوعی ( به عنوان مثال وزن های شبکه) فرایندی تصادفی و زمانبر می باشد. به منظور بهبود عملکرد ANNs می توان از روش های بهینه سازی برای تعیین ساختاری دقیق تر استفاده کرد. یکی از این روش های بهینه سازی الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده (SA)<sup>۵</sup> می باشد. SA یک الگوریتم بهینه‌سازی فرا ابتکاری ساده و اثربخش در حل مسائل بهینه‌سازی است. منشأ الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده، کارهای کریک پاتریک و کرنی و همکارانشان در سال‌های ۱۹۸۳ و ۱۹۸۵ است [۱۴، ۱۵]. آنها برای حل مسائل سخت بهینه‌سازی، روشی مبتنی بر تکنیک تبرید تدریجی پیشنهاد نمودند. تکنیک تبرید تدریجی، به وسیله متالورژیست ها برای رسیدن به حالتی که در آن ماده جامد، به خوبی مرتب و انرژی آن کمینه شده باشد، استفاده می‌شود. این

<sup>۱</sup> Classifier Systems

<sup>۲</sup> Machine Learning

<sup>۳</sup> Rule Base Systems

<sup>۴</sup> Artificial Intelligence

<sup>۵</sup> Simulated Annealing

تکنیک شامل قرار دادن ماده در دمای بالا و سپس کم کردن تدریجی این دماست. این الگوریتم برای یافتن ساختار بهینه ANN نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴، ۱۵]. اخیراً، لدزما و همکاران [۱۶] ANN و SA را ترکیب کردند تا روش قوی تری در مقایسه با ANN بدست آورند. این الگوریتم که با نام ANN/SA شناخته می شود از یک پروتکل سرمایشی بر اساس سیکل های دمایی استفاده می کند. با وجود دقت بالا و بر خلاف الگوریتم ANN که بطور گسترده در زمینه های گوناگون مهندسی استفاده شده است، این روش تا کنون فقط یک بار در زمینه مهندسی عمران بکار گرفته شده است و لذا روش بسیار جدیدی برای مدلسازی رفتار مسائل مهندسی محسوب می شود [۱۷].

در این پایان نامه، مدل جدیدی برای تعیین ظرفیت باربری نهایی پی های سطحی بر روی خاک های دانه ای با استفاده از روش ترکیبی ANN/SA ارائه شده است. مدل پیشنهادی بر پایه استفاده از نتایج آزمایشگاهی بسط داده شده است که پس از مطالعه گسترده ادبیات فنی جمع آوری شده اند. مجموعه داده ها شامل آزمایشات انجام شده بر روی پی های کوچک و بزرگ مقیاس مربعی، دایره ای و نواری بر بستر ماسه ای می باشد. مدل طراحی جدید ارائه شده ظرفیت باربری نهایی پی های سطحی را بر اساس پارامترهای مربوط به هندسه پی (مانند عرض، عمق و شکل پی) و مشخصات مکانیکی خاک (مانند وزن مخصوص متوسط و زاویه اصطکاک داخلی خاک) فرمول بندی می کند. به منظور بدست آوردن مدل های اپتیمال، سعی و خطای گسترده ای با استفاده از پارامترهای موثر بر ظرفیت باربری صورت گرفته است. نقش پارامترهای موثر در پیش بینی ظرفیت باربری با استفاده از آنالیز حساسیت مورد بحث و بررسی استفاده قرار گرفته است. مطالعه مقایسه ای صورت گرفته با معادلات بسیار معروف ارائه شده توسط ترزاقی، میرهوف، هنسن و وسیک امکان استفاده از مدل ANN/SA را به عنوان جایگزینی مطمئن برای اینگونه معادلات کلاسیک اثبات می نماید. شایان ذکر است مدل های بر پایه ANN غالباً به دلیل ناتوانی در توضیح اصول زیر ساختی برای پیش بینی، به عنوان جعبه های سیاه شناخته می شوند. به عبارت دیگر ANNs در پیش بینی موفق هستند ولی قادر به ایجاد معادلات کاربردی پیش بینی کننده نیستند. برای غلبه بر این محدودیت، فرایند جدیدی

تعریف شده است که بر پایه آن مدل بهینه حاصل از ANN/SA به معادله طراحی نسبتاً ساده‌ای برگردانده شده است. روند محاسبات بر پایه وزن‌ها و بایاس‌های بهترین ساختار و بصورت کابردی در قالبی صفحه گسترده<sup>۱</sup> در برنامه میکروسافت اکسل ارائه شده است.

## ۱-۲- معرفی فصل‌های پایان نامه

### ❖ فصل اول: مقدمه

در این فصل مقدمه ای جهت ورود به پایان نامه ارائه شده است.

### ❖ فصل دوم: مفاهیم بنیادی پی

در فصل دوم، ابتدا به تعریف پی و انواع آن شامل پی‌های سطحی و عمیق پرداخته شده است، سپس مفهوم ظرفیت باربری پی‌های سطحی و انواع گسیختگی خاک در انتها بیان شده است.

### ❖ فصل سوم: بررسی کلی روش‌های محاسبه ظرفیت باربری

در فصل سوم، جهت آشنایی بیشتر با روش‌های تعیین ظرفیت باربری پی‌های سطحی، مجموعه مطالعات انجام شده، دسته‌بندی و به صورت کلی ارائه گردیده است.

### ❖ فصل چهارم: روش‌های مرسوم جهت تعیین ظرفیت باربری

در این فصل، پس از آشنایی با مفاهیم و روش‌های مختلف تعیین ظرفیت باربری پی‌های سطحی به بررسی روش‌های مرسوم در تخمین از جمله روابط ترزاقی، میرهوف، هنسن و وسیک پرداخته شده است. پس از مقایسه روش‌های یاد شده، مفهوم ضرایب ایمنی در ظرفیت باربری پی بیان گردیده است.

### ❖ فصل پنجم: تکنیک ترکیبی شبکه عصبی مصنوعی و تبرید شبیه‌سازی شده

در فصل پنجم سعی شده است تا آنالیز رفتاری تکنیک‌های ANN و SA و ترکیب این دو روش (ANN/SA) همراه با قوانین یادگیری آن صورت گیرد. در پایان این فصل در جهت معرفی توانمندی

<sup>1</sup> Spreadsheet

های این ابزار قوی برای حل مشکلات مهندسیین ژئوتکنیک، زمینه های مختلف کاربرد آن در حل مسائل ژئوتکنیکی مرور گشته است.

### ❖ فصل ششم: مدل سازی ظرفیت باربری پی های سطحی

در این فصل روش بسط مدل های ANN/SA برای پیش بینی ظرفیت باربری نهایی پی های سطحی واقع بر خاک های دانه ای (غیرچسبنده)، به طور کامل توضیح داده شده است. نوع و محدوده مقادیر داده های آزمایشگاهی به کار رفته و نیز نوع دسته بندی داده ها برای فرآیند آموزش، صحت سنجی و تست توصیف شده اند. شیوه بسط مدل ها با استفاده از نرم افزارهای مربوطه، پارامترهای به کار رفته در الگوریتم ANN/SA و نحوه محاسبه اهمیت متغیر های ورودی در مدل ها نیز بیان شده است. نتایج حاصل از بهترین مدل ها و نیز مدل های مرسوم موجود در متون فنی بطور کامل بررسی و آنالیز شده اند.

### ❖ فصل هفتم: جمع بندی و پیشنهادها

در فصل آخر، نتایج کلی جمع آوری و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. پیشنهاد هایی نیز برای تحقیقات بعدی در زمینه مدلسازی مسئله ژئوتکنیکی بررسی شده و دیگر مسائل ژئوتکنیکی موجود با استفاده از ANN/SA ارائه شده است.





# فصل دوم:

## مفاهیم بنیادی پی

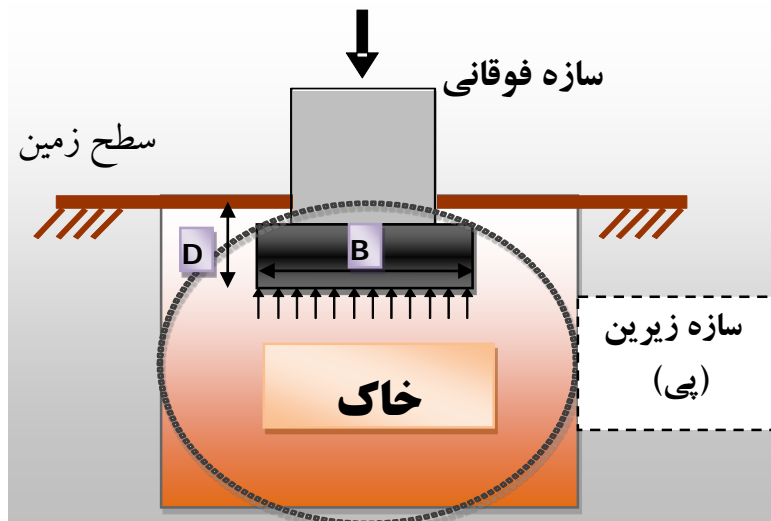
## ۲-۱- مقدمه

## ۲-۱-۱- تعاریف اولیه و مفاهیم بنیادی

مهندسی ژئوتکنیک زیرمجموعه ای از مهندسی عمران در زمینه مسائل مرتبط با به کارگیری رفتار خاک و مصالح خاکی می باشد. مهندسی ژئوتکنیک متشکل از دو بخش کلی مکانیک خاک و مهندسی پی می باشد. در واقع مهندسی پی شامل به کارگیری اصول مکانیک خاک در تحلیل و طراحی شالوده ساختمان ها و ابنیه در تماس با خاک می باشد. کلیه سازه هایی که بر روی زمین بنا می شوند از جمله ساختمان ها، پل ها، خاکریزها از دو بخش تشکیل می شوند (شکل (۲-۱)):

۱- سازه فوقانی<sup>۱</sup>: بخش نمایان سازه

۲- سازه زیرین<sup>۲</sup>: بخش مدفون سازه بخش سازه زیرین به عنوان حائل بین سازه فوقانی و زمین تکیه گاه عمل می کند یعنی بار سازه فوقانی را به زمین منتقل می نماید. مبحث مهندسی پی بررسی تاثیر متقابل سازه زیرین و زمین تکیه گاه می باشد.



شکل ۲-۱- اجزای مولفات کلی پی، خاک و سازه

<sup>۱</sup> - Superstructure

<sup>۲</sup> - Substructure

## ۲-۲- تعاریف مربوط به پی و اهمیت آن

پی عبارت است از سازه زیرین و بخشی از خاک مجاور آن که تحت تاثیر این سازه و بارهای وارد بر آن می باشد مبحث ۷ مقررات ملی ساختمان نیز تعریف مشابهی از پی ارائه کرده است: مجموعه بخش هایی از سازه و خاک در تماس با آن که انتقال بار بین سازه و زمین از طریق آن صورت می گیرد پی نامیده می شود. در واقع وظیفه پی انتقال بارهای بخش های فوقانی به خاک زیر پی می باشد، به نحوی که تنش های بیش از حد و نیز نشست های اضافی ایجاد نگردد. کلیه پی ها به منظور انتقال بارهای سازه فوقانی به زمین طرح میشوند. بار اکثر سازه های فوقانی توسط اجزاء ستون ماندی حمل میشوند که شدت تنش در آنها بسیار زیاد برای مثال حدود ۱۴۰ مگاپاسکال می باشد چنین تنش هایی می بایست به خاک تکیه گاهی حمل گردد که ظرفیت باربری آن بندرت بیش از ۵۰۰ کیلو پاسکال و اغلب در حدود ۲۰۰-۲۵۰ کیلو پاسکال می باشد. با توجه به این ارقام میتوان دریافت که این عضو واسط یعنی پی مصالحی را به یکدیگر مرتبط می سازد که مقاومت مهندسی مفید آنها تا چند صد برابر متفاوت است و این به نوبه خود اهمیت طرح صحیح و ایمنی پی را نشان می دهد [۱۸، ۱۹].

- مهندسی پی: مهندسی پی شامل تحلیل و طراحی پی (شالوده ساختمانهای متعارف) یا سازه های در تماس با خاک با به کارگیری اصول مکانیک خاک و مکانیک سازه توام با قضاوت می باشد. مهندسی پی مباحثی همچون محاسبه ظرفیت باربری طراحی انواع مختلف پی مانند پی های منفرد، نواری، گسترده، عمیق (شمع) را شامل می گردد که در رابطه با هر کدام از آنها توضیحاتی ارائه خواهد شد. علاوه بر طراحی پی های متعارف (پی ساختمان ها) طراحی سازه های حائل نیز مهندسی پی می باشد.
- مهندس پی: به کسی گفته میشود که بوسیله آموزش و تجربه کافی در اصول علمی و قضاوت مهندسی مهارت یافته است تا پی را طراحی نماید. می توان گفت که قضاوت مهندسی بخش خلاق کار طراحی پی می باشد در واقع قضاوت مهندسی در طراح پی همان گرد آوری و بهم آمیختن تجارب،

مطالعه کارهای دیگران در شرایط نسبتاً مشابه و جمع آوری اطلاعات ژئوتکنیکی مخصوص ناحیه تحت برر سی برای ایجاد طرحی اقتصادی علمی و ایمن برای سازه زیرین می باشد.

## ۲-۲-۱- انواع پی

پی ها براساس عمق و نوع عملکرد به چهار دسته تقسیم می شوند [۲۲-۱۸]:

### • پی های کم عمق معروف به پی های سطحی (Shallow foundations):

به پی هایی گفته می شود که نسبت عمق به عرض آنها مساوی یا کمتر از واحد است  $\frac{D}{B} \leq 1$  در عین حال در برخی مراجع پی های با نسبت عمق تا ۴ الی ۵ هم به عنوان پی سطحی طبقه بندی میشوند.

### • پی های نیمه عمیق (Pier foundations):

در این پی ها نسبت عمق به عرض در محدوده  $4 - 5 < \frac{D}{B} \leq 10$  قرار دارد.

### • پی های عمیق: (Deep foundations)

این پی ها عمدتاً شامل پی های شمعی بوده و در آنها  $\frac{D}{B} > 10$  می باشد در مبحث ۷ مقررات ملی ساختمان، معیار دیگری برای پی عمیق عنوان شده است و آن عبارت است از اینکه هرگاه نسبت عرض به ارتفاع پی کمتر از ۱ باشد و عمق آن از ۳ متر تجاوز نماید به آن پی عمیق می گویند. در موارد فوق D عمق پی و B عرض آن می باشد .

### • پی های ویژه (Particular Foundations):

شامل هرگونه پی که جزء دسته بندی های فوق نباشد از قبیل، صندوقه ای، مهارها ستون های شن و سنگی

## ۲-۲-۲- انواع پی های سطحی

• **پی های منفرد:** شالوده ای که حامل بار تنها یک ستون باشد شالوده منفرد گفته می شود. این پی ها معمولا متشکل از یک دال مربعی یا دایره ای بوده و خود می تواند شامل انواع بتنی غیر مسلح، بتن مسلح معمولی و غیره باشد.

• **پی های دو ستونی:** اگر دو ستون به هم نزدیک باشند (به نحوی که فاصله پی های منفرد آنها کمتر از نصف فاصله دو ستون گردد)، اقتصادی و مناسب است که از پی دو ستونی استفاده گردد. کاربرد اصلی این نوع پی در مواردیست که نمی توان یک ستون را به طور مرکزی بر روی پی منفرد قرار داد مانند پی ستون های کناری (در نوار مرزی ساختمان در زمینهای محدود). پی دو ستونی می تواند به صورت مستطیلی و یا دوزنقه ای باشد. این پی ها به نحوی طرح می گردند که مرکز هندسی آنها بر نقطه اثر برآیند بارهای وارده منطبق باشد. راه دیگر مقابله با خروج از مرکزیت ستون کناری اتصال آن توسط یک تیر قوی به پی داخلی مجاور می باشد که چنین پی را پی باسکولی می گویند. اینکار ممکن است برای جلوگیری از نشست نامساوی ستون ها مورد توجه قرار گیرد.

• **پی نواری:** با اتصال پی های ستون های یک ردیف و یا برای پی زیر یک دیوار باربر، پی نواری ایجاد می گردد که نسبت طول به عرض آن بسیار زیاد است. معمولا پی هایی که در آنها نسبت طول به عرض آنها بزرگتر از ۴ تا ۵ باشد، به عنوان پی نواری در نظر گرفته می شوند.

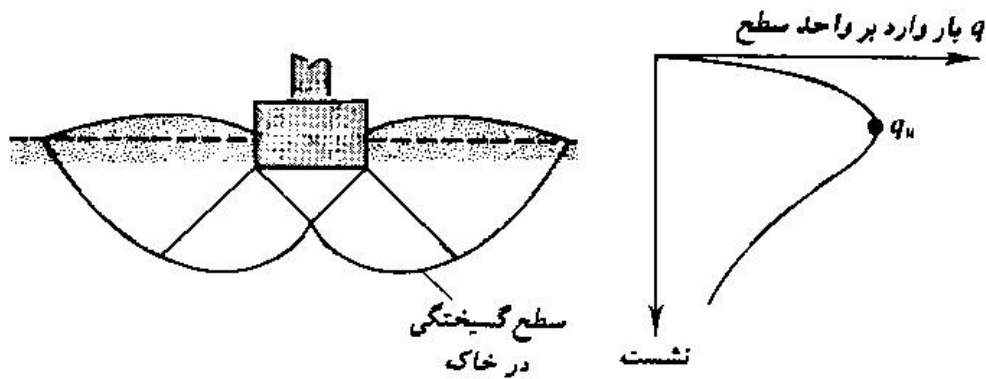
• **پی شبکه ای:** به لحاظ اقتصادی (کاهش هزینه قالب بندی) گاهی مقرون به صرفه است که پی های یک ردیف در هم ادغام و پی به صورت نواری اجرا گردد. چنانچه این نوارها در هر دو امتداد عمود بر هم قرار گیرند، پی شبکه ای ایجاد می گردد. عملکرد این پی ها مرکب بوده و متفاوت از عملکرد پی های منفردی است که توسط کلاف به یکدیگر متصل می شوند. کلاف ها کلا نقشی در جلوگیری از نشست پی های منفرد ندارند چرا که قادر به تحمل برش و لنگر نمی باشند و تنها صلبیت جانبی سازه را افزایش می دهند.

• **پی گسترده:** اگر زمین زیر پی آنقدر سست باشد و بار وارده از طرف سازه آنقدر زیاد باشد که سطح پوشیده شده توسط پی های منفرد بیش از نصف سطح زیربنا گردد، در اینصورت اقتصادی است که از پی گسترده استفاده شود. پی گسترده شامل یک دال یکپارچه است که کلیه بارهای سازه ناشی از ستون ها و دیوارها را تحمل می کند. این نوع پی موجب توزیع نسبتاً یکنواخت تنش و جلوگیری از تمرکز آن در زیر بارهای سنگین و موضعی می گردد، لذا در کاهش نشست نامساوی بسیار موثر است.

• **پی های پوسته ای:** این نوع پی ها بار را به واسطه شکل و نه به سبب جرم و حجم خود به زمین منتقل می کنند و معمولاً به عنوان پی برج های خیلی بلند یا برج های خنک کننده به کار می روند.

## ۲-۳- مفهوم ظرفیت باربری نهایی پی های سطحی

برای درک مفهوم ظرفیت باربری نهایی و مکانیسم گسیختگی برشی در خاک، مطابق شکل (۲-۱)، یک پی نواری مستطیلی به عرض  $B$  که بر روی یک لایه ماسه متراکم (یا خاک سفت) قرار دارد را در نظر بگیرید. وقتی بار گسترده  $q$  بر واحد سطح پی مدل تاثیر نماید، باعث نشست آن خواهد شد. اگر بار گسترده  $q$  افزایش یابد، نشست پی به تدریج افزایش خواهد یافت. در  $q=q_u$ ، مطابق شکل (۲-۱)، ظرفیت گسیختگی باربری خاک فرا رسیده و تحت مقدار ثابت  $q$ ، زیر پی نشست های قابل توجهی به وجود می آید. در این لحظه خاک اطراف پی بالا زده و سطح لغزش تا سطح زمین ادامه می یابد. در این حالت رابطه بار- نشست مطابق منحنی از شکل (۲-۲) خواهد شد. در این حالت  $q_u$  ظرفیت باربری نهایی خاک نامیده می شود [۱۹].



شکل ۲-۲- ظرفیت باربری نهایی پی

دیگر تعاریف مورد نیاز ظرفیت باربری در مهندسی پی به شرح در ادامه آمده است.

### ۲-۳-۱- ظرفیت باربری نهایی<sup>۱</sup> ( $q_u$ )

حداکثر تنش است که از پی به خاک زیرین وارد شده و خاک می تواند بدون گسیختگی برشی تحمل نماید.

### ۲-۳-۲- ظرفیت باربری نهایی خالص<sup>۲</sup> ( $q_n$ )

حداکثر تنش سربار یا اضافی است که از پی به خاک زیرین وارد شده و خاک می تواند بدون گسیختگی برشی تحمل نماید.

$$q_n = q_u - q_0 \quad (1-2)$$

در رابطه بالا  $q_0$  میزان فشار یا تنش اضافی موجود یا همان وزن خاک بالای پی  $\gamma D$  و بدون سربار دیگر می باشد.

<sup>۱</sup> Ultimate Bearing Capacity

<sup>۲</sup> Net ultimate Bearing Capacity

### ۲-۳-۳- ظرفیت باربری ایمن<sup>۱</sup> ( $q_s$ )

حداکثر میزان تنش است که علاوه بر وزن خاک می توان به سیستم خاک سازه و بدون گسیختگی خاک اعمال نمود.

$$q_s = \frac{q_n}{F.S} + q_0 \quad (2-2)$$

در رابطه F.S بیانگر ضریب اطمینان<sup>۲</sup> می باشد.

### ۲-۳-۴- ظرفیت باربری مجاز<sup>۳</sup> ( $q_a$ )

حداکثر میزان تنش است که می توان با در نظر گرفتن میزان نشست مجاز طراحی و گسیختگی برشی، به خاک اعمال نمود.

### ۲-۴- تحلیل ظرفیت باربری پی های سطحی

یک پی نواری به عرض B که بار P را حمل می نماید در نظر بگیرید. تحت اثر بار P نقاط مختلف خاک زیر پی تحت تاثیر تنش هایی با شدت و در جهات متفاوت قرار می گیرند. با افزایش بار P تنش در برخی از نقاط خاک زیر پی ممکن است از حد مقاومت برشی تجاوز نموده و خاک در آن نقطه دچار گسیختگی گردد. لیکن گسیختگی در یک نقطه یا بعضی نقاط خاک به معنی گسیختگی خاک زیر پی نمی باشد، بلکه گسیختگی در مجموعه ای از نقاط خاک زیر پی (که یک سطح لغزش یا گسیختگی تشکیل می دهند) موجب گسیختگی کامل می گردد.

نوع گسیختگی خاک زیر پی به نوع خاک، تراکم و یا قوام خاک، مقاومت خاک، و نیز ابعاد پی بستگی دارد. وسیک [۲، ۸] انواع گسیختگیهای خاک زیر پی را به سه دسته زیر تقسیم نموده است:

<sup>۱</sup>Safe Bearing Capacity

<sup>۲</sup>Factor of Safety

<sup>۳</sup>Allowable Bearing Pressure



۱- گسیختگی برشی کلی<sup>۱</sup>:

۲- گسیختگی برشی موضعی<sup>۲</sup>:

۳- گسیختگی برشی سوراخ کننده<sup>۳</sup>:

در ادامه این بخش توضیح بیشتری در مورد هر یک از گسیختگی های فوق ارائه می گردد.

#### ۲-۴-۱- گسیختگی برشی کلی

این نوع گسیختگی معمولاً در خاک های دانه‌ای متراکم و رس‌های سفت اتفاق می افتد. یک پی نواری واقع بر یک خاک ماسه‌ای متراکم یا خاک چسبنده سفت را در نظر بگیرید. با افزایش تدریجی بار، نشست پی افزایش می یابد (شکل (۲-۳) الف، سمت راست). در یک نقطه مشخص وقتی فشار تماس پی مساوی  $Q_{ult}$  می گردد، یک گسیختگی نهائی در زیر پی روی داده و سطح لغزشی بصورت نشان داده شده در شکل (۲-۳) (الف، سمت چپ) تا سطح زمین ادامه می یابد. فشار  $Q_{ult}$  ظرفیت باربری نهائی این پی سطحی می باشد. این حالت که گسیختگی نهائی همراه با توسعه سطوح گسیختگی تا سطح زمین می باشد به گسیختگی برشی کلی موسوم است.

#### ۲-۴-۲- گسیختگی برشی موضعی

این گسیختگی زمانی روی می دهد که خاک زیر پی ماسه با تراکم متوسط و یا رس با سفتی متوسط باشد. همانطور که در شکل (۲-۳) ب) ملاحظه می گردد با افزایش بار  $P$  نشست نیز افزایش می یابد لیکن سطح گسیختگی بتدریج به سمت بیرون گسترش می باشد وقتی که فشار تماس پی به  $Q_{u(1)}$  می رسد نشست با پرش های ناگهانی همراه می گردد. بعد از این مرحله برای گسترش سطوح لغزش به

<sup>۱</sup>- General Shear Failure

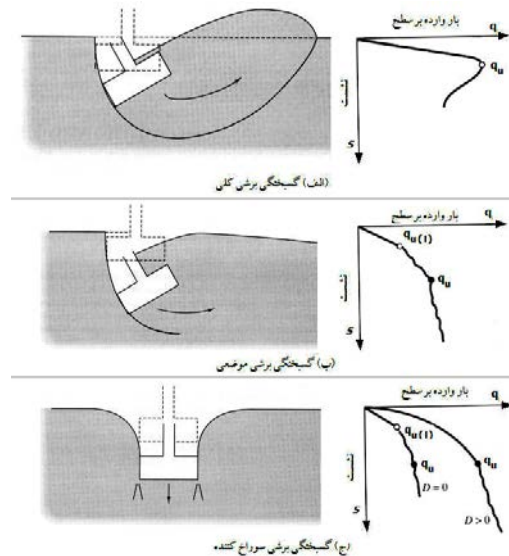
<sup>۲</sup>- Local Shear Failure

<sup>۳</sup>- Punching Shear Failure

سطح زمین، نشست قابل توجهی لازم می‌باشد و فشار تماس نهائی در این حالت  $Q_{ult}$  ظرفیت باربری نهائی می‌باشد به فشار  $Q_{ult}$  بار گسیختگی اولیه گفته می‌شود در این حالت منحنی فشار نشست نقطه اوج معینی ندارد.

### ۲-۴-۳- گسیختگی برشی سوراخ کننده

این نوع گسیختگی موقعی روی می‌دهد که پی بر روی یک خاک دانه‌ای شل با خاک چسبیده نرم بنا شده باشد. نمودار فشار نشست در این حالت بصورت نشان داده شده در شکل (۲-۳، ج) می‌باشد. ملاحظه می‌گردد که سطح گسیختگی در این حالت تنها به گوه ریزی محدود می‌شود بعد از بار گسیختگی نهائی  $Q_{ult}$  نمودار فشار نشست تقریباً خطی و با شیب بسیار کند (نزدیک به قائم) می‌باشد [۱۹، ۲۲].

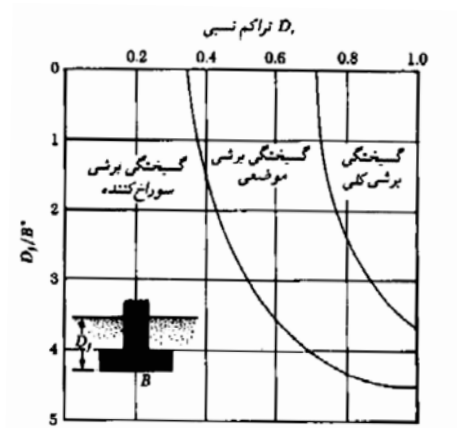


شکل ۲-۳- انواع گسیختگی برشی در خاک تکیه گاه پی: الف) گسیختگی برشی کلی، ب) گسیختگی برشی موضعی، ج) گسیختگی برشی سوراخ کننده

وسیک [۸] بر پایه نتایج تجربی رابطه‌ای برای انواع گسیختگی برشی پی‌های متکی بر ماسه ارائه کرده است که در شکل (۲-۴) درج شده است. از نمودار ارائه شده ملاحظه می‌گردد که نسبت عمق به عرض

$$\text{معادل } \left(\frac{D_f}{B^*}\right) \text{ تاثیر قابل ملاحظه ای بر نوع گسیختگی پی دارد } \left(B^* = \frac{2BL}{B+L}\right).$$

برای پی های سطحی و در حالت گسیختگی برشی کلی بار نهائی در نشست در حدود  $B(4-10\%)$  رخ می دهد، در حالی که این نشست برای دو نوع دیگر گسیختگی در حدود  $B(15-25\%)$  می باشد.



شکل ۲-۴- انواع گسیختگی در پی های متکی بر ماسه [۸]



## فصل سوم:

# بررسی کلی روش های محاسبه ظرفیت باربری

### ۳-۱- مقدمه

مجموعه مطالعات انجام شده در مورد ظرفیت باربری پی ها را می توان به سه گروه کلی تحلیلی، عددی و تجربی دسته بندی نمود. برای شناخت انواع روش های مختلف جهت به دست آوردن ظرفیت باربری پی ها در ادامه، مفهوم کلی آن روش ها بیان شده است.

### ۳-۲- روش های تحلیلی

به طور کلی روش های تحلیلی مسئله ظرفیت باربری را می توان به سه دسته تقسیم بندی کرد [۱۹]:

- روش خطوط لغزش
- روش تعادل حدی
- روش تحلیل حدی

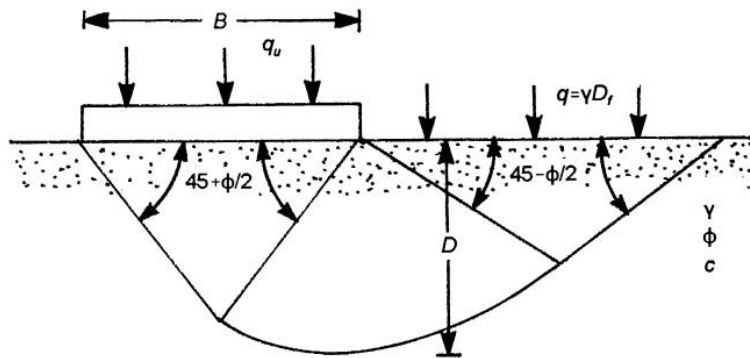
#### ۳-۲-۱- روش خطوط لغزش

در این روش معادلات دیفرانسیل تعادل تنش ها بر روی خطوط لغزش حل می شود. معادلات مسئله خطوط لغزش برای تغییر شکل های صفحه ای اولین بار توسط کوتر ارائه شد. سپس حل بسته به این معادلات برای پی هایی که بر روی خاک های تراکم ناپذیر قرار می گیرد ارائه شده است. نتایج به دست آمده از این مطالعات توسط محققینی نظیر ریزنر [۴] برای به دست آوردن ظرفیت باربری پی ها برای خاک های تراکم ناپذیر استفاده شد.

ظرفیت باربری پی های نواری بر روی خاک های دانه ای یا غیر چسبنده با توجه به زبری کف پی توسط هنسن [۷] ارائه شد. در مورد ظرفیت باربری پی های سطحی دایره ای بر روی خاک های غیر چسبنده ضعیف و همچنین خاک های چسبنده و اصطکاکی تحقیقاتی توسط پژوهشگران انجام شده است که شرح آنها صرفنظر شده است.

## ۳-۲-۲- روش تعادل حدی

در این روش سطوح گسیختگی ساده ای به صورت تقریبی فرض می شود و سپس سطح گسیختگی بحرانی به دست می آید. راه حل ارائه شده توسط ترزاقی و میرهوف بر این روش استوار است. در راه حل های مبتنی بر تعادل حدی، مکانیزم گسیختگی بر این اساس است که بخشی از توده خاک بدون فشرده شدن بر روی بخش دیگری از خاک حرکت می کند (شکل ۳-۱). در این حالت خطوط گسیختگی در فصل مشترک این دو تشکیل می شود. اکثر تئوری های بر مبنای سه مکانیزم هیل، پراندل [۳] و ترزاقی [۵] بسط داده شده اند.



شکل ۳-۱- شمای گسیختگی برشی در باربری نهایی یک پی نواری [۱۹]

بعد از ترزاقی [۵] پژوهشگران دیگر همچون میرهوف [۶، ۲۳]، هنسن [۷]، وسیک [۲، ۸] و دیگران در تصحیح و تنظیم ضرایب ظرفیت باربری، رابطه ها، معادلات و پیشنهاداتی را ارائه دادند که در فصول بعد به آنها به عنوان رایج ترین روش های بدست آوردن ظرفیت باربری نهایی شرح داده خواهد شد.

### ۳-۲-۳- روش تحلیل حدی

روش تحلیل حدی که در قالب قضایای حدی طرح می شود، در واقع تعمیم اصل کار خمیری حداکثر می باشد. اصل مزبور را هیل<sup>۱</sup> در سال ۱۹۴۸ مطرح نمود و دراگر<sup>۲</sup> گرین برگ<sup>۳</sup> و پراگر<sup>۴</sup> در سال ۱۹۵۲ با تعمیم آن، قضایای حدی ارائه کردند. فرضیات مورد استفاده در روش آنالیز یا تحلیل حدی عبارتند از:

الف) رفتار مصالح در حالت حدی به صورت خمیری کامل است.

ب) حالت حدی با تابعی محدب به معادله  $F(\sigma_{ij}) = 0$  تابع تسلیم بیان می گردد. نمایش این تابع در فضای تنش های اصلی به سطح تسلیم موسوم است.

ج) رفتار خمیری مصالح تابع قانون جریان وابسته است.

کاربرد قضایای کران بالا و پایین در روش تحلیل حدی، ابزار قدرتمند جهت تعیین حدود بار گسیختگی در مسائل پایداری در مکانیک خاک است.

### ۳-۲-۳-۱- تئوری کران پایین

در تئوری کران پایین حد پایین نیرویی که باعث گسیختگی می شود با شرایط تعادل تنش ها در مرز های گسیختگی به دست می آید. میدان تنش مورد استفاده باید معادلات تعادل، شرایط مرزی تنش و عدم خروج بردار تنش از فضای تنش های محدود به سطح تسلیم را ارضاء کند. بر اساس این قضیه تحت هر میدان تنش مفروضی که سه شرط ذکر شده را ارضاء کند، جریان خمیری آزاد به وقوع نخواهد پیوست.

<sup>۱</sup> Hill

<sup>۲</sup> Drucker

<sup>۳</sup> Greenberg

<sup>۴</sup> Prager



### ۲-۳-۲-۳- تئوری کران بالا

در تئوری کران بالا، کار خارجی با نرخ میدان سرعت سینماتیکی داخلی، معادل گردیده و پیوستگی سرعت سینماتیکی در مرزهای خارجی و داخلی دیده می شود. در این قضیه با در نظر گرفتن یک میدان سرعت فرضی و مساوی قرار دادن کار نیروهای خارجی و داخلی، بار گسیختگی محاسبه می شود. اگر در تئوری کران بالا میدان سرعت در نظر گرفته شده، شرایط مرزی سرعت و شرایط سازگاری را ارضاء کند، بار محاسبه شده بیش از بار گسیختگی واقعی خواهد بود.

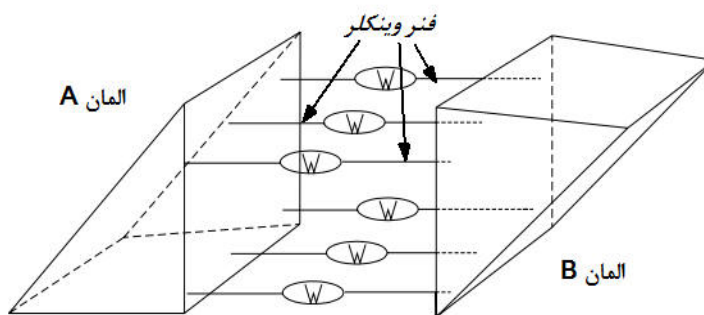
با انتخاب میدان های مناسب تنش و سرعت و نزدیک کردن جواب های حاصل از دو روش می توان محدوده ای را که بار گسیختگی واقعی در آن قرار می گیرد، کوچکتر نمود. در مسائلی که جواب دو روش یکسان باشد، جواب واقعی به دست آمده است. بدین ترتیب در این روش جایگاه هر جواب نسبت به پاسخ واقعی مشخص می باشد و اضافی یا نقصانی بودن تقریب حل کاملاً مشخص است. قدرت استواری روش تحلیل حدی نیز در همین نکته است.

### ۳-۳- روش های عددی

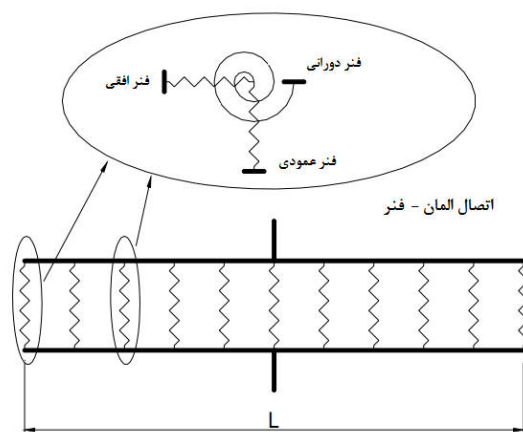
#### ۳-۳-۱- کاربرد اجزای محدود برای به دست آوردن ظرفیت باربری پی ها

به دنبال پیشرفت روش های عددی، کاربرد روش های عددی در حیطه مهندسی افزایش قابل ملاحظه ای پیدا کرد. یکی از مهمترین روش های به کار گرفته شده برای حل مسائل ژئوتکنیک روش اجزای محدود می باشد که امکان استفاده از روش های غیر خطی را نیز برای حل مسئله ظرفیت باربری امکان پذیر نموده است. استفاده از روش های اجزای محدود در بررسی رفتار خاک و به خصوص موضوع ظرفیت باربری خاک توسط پژوهشگرانی مانند زینکوویچ، گریفیت، مارکوزی، کونیتومو و ناماگوچی و دیگران صورت گرفته است.

این روش به مفهوم جدید خود اولین بار توسط چانگ [۲۴] برای بررسی ظرفیت باربری پی، پایداری شیروانی ها و دیوارهای حائل به صورت دوبعدی، انجام گرفته است. در این روش ابتدا یک سطح (در حالت دوبعدی سطح و در حالت سه بعدی، حجم) گسیختگی مفروض در نظر گرفته می شود. سپس این سطح گسیخته شده، با توجه به هندسه و ماهیت مسئله به تعدادی قطعه مجزای از هم، تقسیم می گردد. در بین سطوح مشترک قطعات از فنر هایی به نام فنر وینکلر<sup>۱</sup> استفاده می شود (شکل های ۲-۳ و ۳-۳) [۲۵].



شکل ۲-۳- نحوه اتصال المان ها (قطعات) توسط فنر وینکلر به یکدیگر



شکل ۳-۳- شمای کلی فنر های وینکلر در اتصال بین دو المان

کلیه سطوح مشترک توسط این فنر ها به یکدیگر متصل شده تا سیستمی یکپارچه تشکیل گردد. هر فنر وینکلر شامل یک فنر فشاری-کششی و یک فنر برشی و یک فنر دورانی (در صورت نیاز) نیز می

<sup>۱</sup> - Winkler Springs

باشد. رفتار کلیه فنرها به صورت ارتجاعی-خمیری فرض می شود. مقاومت برشی فنرها از معیار گسیختگی موهر-کولمب پیروی می کند ( $\tau_p = c + \sigma_n \tan \phi$ ). با خمیری شدن فنرها در بین سطوح مشترک قطعات، تنش در آن ثابت مانده و اضافه تنش باقی مانده در بین قطعات دیگر توزیع خواهد شد. با توزیع تنشها در بین قطعات دیگر، گسیختگی های موضعی به صورت پیش رونده مشاهده خواهد شد. این روند تا جایی ادامه می یابد که تنش های موجود در سطح تماس قطعات، به طور کامل روابط تنش-کرنش را ارضاء نمایند. در صورتیکه با افزایش بار پی، تمام فنرهای برشی روی سطح گسیختگی مفروض، به حالت خمیری برسند، گسیختگی کلی در خاک زیر پی رخ داده و بار پی در این لحظه ظرفیت باربری را نشان خواهد داد.

### ۳-۳-۲- روش های تجربی

روش تجربی عبارت است از روشی که مشاهده عاری از هرگونه پیش فرض است و جواب تنها براساس نتایج واقعی و آزمایشگاهی به دست می آید. روش تجربی یا آزمایشی یکی از دقیق ترین و کارآمدترین روش های تحقیق است که برای آزمون فرضیه ها مورد استفاده قرار می گیرد هدف این تحقیق بررسی تأثیر محرک ها، روش ها و یا شرایط خاص محیطی بر روی یک گروه آزمودنی می باشد. از خصوصیات روش تجربی این است که ضمن دستکاری یا مداخله<sup>۱</sup> در متغیرها و کنترل شرایط نتایج بدست آمده را در مورد گروهی که با انتساب تصادفی<sup>۲</sup> انتخاب شده اند، مورد مشاهده قرار می دهد. در این روش ها، پژوهشگران به منظور کشف روابط علت و معلولی یک یا چند گروه را به عنوان گروه تجربی تحت شرایط خاص (متغیر مستقل) قرار می دهد و نتایج را (متغیر وابسته) با گروه و یا گروه های گواه که تحت چنان شرایطی نموده اند، مقایسه می کند.

استدلالی که نتیجه اش از راه تعمیم احکام امور جزئی به دست آمده باشد را می توان از سه راه نقد کرد:

<sup>۱</sup> Manipulation or Intervention

<sup>۲</sup> Randomization

۱- نشان دادن این که برخی از مقدماتی که در تعمیم به آن ها استناد شده، نادرست هستند.

۲- نشان دادن این که شواهد تعمیم استقرائی، نمونه های کافی یا متعارفی نیستند.

۳- تردید در خود نتیجه و نشان دادن نادرستی آن.

در بررسی های آماری فرآیندهای غیرقطعی مجموعه ای از داده ها و مشاهدات عملی و تجربی را در دست داریم و می خواهیم با استفاده از آن به پیش بینی و یا تخمین بپردازیم. در تحلیل های ژئوتکنیکی نیز ناهمسانگردی خاک، تأثیر پارامترهای متغیر بسیار زیاد و همچنین رفتار متفاوت انواع خاک در مقابل بارهای وارده، سبب گردیده است که طراحی مهندسی در مورد مسائل ژئوتکنیکی به طور جداگانه ای ارائه شود. برای مثال در تحلیل پی ها، معادله ظرفیت باربری ترزاقی به تخمین بار نهایی منجر می شود؛ تخمینی که علاوه بر فرضیات بسیار زیاد، به وسیله ضریب ایمنی برای وارد کردن دسته بارهای مجاز برای طراحی، طبقه بندی می شود. لذا با لحاظ نمودن پارامترهای زیاد در حل مسأله، ایجاد یک رابطه مشخص بین آنها برای رسیدن به جواب مورد نظر بسیار پیچیده و مشکل خواهد شد. از طرف دیگر تعیین مستقیم پارامتر های ژئوتکنیکی، نظیر ظرفیت باربری پی، در اکثر مواقع نیازمند انجام آزمایش های دشوار، پرهزینه و وقت گیر است. بنابراین مهندسی ژئوتکنیک در صدد ایجاد مدل هایی هستند که بدون صرف هزینه زیاد و زمان طولانی و نیز عدم نیاز به حل رابطه ای پیچیده و دشوار بتوانند مجهولات لازم را تعیین نمایند. پیچیدگی تحلیل رفتار ظرفیت باربری نیز ضرورت استفاده از روش های شبیه سازی و پیش بینی قدرتمندی را القاء می کند. پیشرفت های گسترده در نرم افزار و سخت افزارهای کامپیوتری باعث بوجود آمدن تعداد زیادی ابزارهای مدل سازی مانند تکنیک های شبه بیولوژیکی و هوش مصنوعی گشته است. محاسبات شبه بیولوژیکی و هوش مصنوعی به استفاده از کامپیوتر برای مدلسازی طبیعت و بطور همزمان به مطالعه طبیعت برای افزایش کارایی کامپیوتر اطلاق می شود. از جمله این تکنیک ها، ANN/SA می باشد که در این پایان نامه مورد استفاده قرار گرفته است.

## فصل چهارم:

# روش های مرسوم جهت تعیین ظرفیت باربری

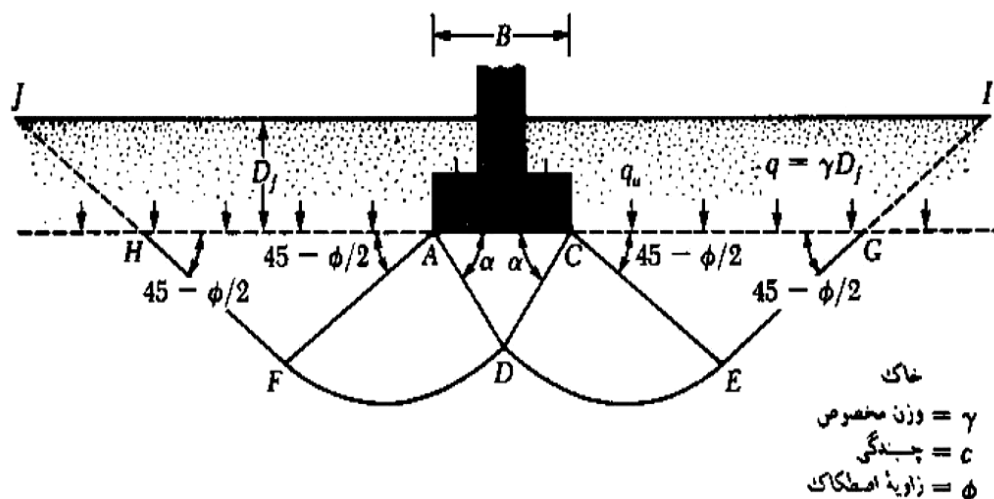
## ۴-۱- مقدمه

## ۴-۱-۱- روش های مرسوم جهت تعیین ظرفیت باربری

در حال حاضر هیچ روشی برای تعیین ظرفیت باربری مگر بصورت تخمین وجود ندارد. وسیک [۲، ۸] راه حل های نظری از سال ۱۹۴۰ به بعد را جدول نمود. از آن زمان چندین روش دیگر نیز ارائه شده اند. از بین نظریه های متعدد ارائه شده برای تعیین ظرفیت باربری پی، برخی مورد استفاده وسیع قرار گرفته و رواج و اعتبار بیشتری یافته اند. این روش ها شامل تحلیل ترزاقی [۵]، میرهوف [۶، ۲۳]، هنسن [۷]، وسیک [۲، ۸] می باشند که در ادامه این بخش مورد بررسی قرار می گیرند.

## ۴-۲- معادلات ظرفیت باربری

از آنجا که خاک زیر پی به طور معمول سفت و متراکم است (و در صورت سست یا نرم بودن به نحوی متراکم یا تثبیت می گردد) بنابراین در تعیین ظرفیت باربری عمدتاً گسیختگی از نوع برشی کلی فرض می گردد. تفاوت نظریه های مختلف عمدتاً مربوط به تفاوت در شکل و امتداد سطوح گسیختگی انتخابی می باشد. همچنین برای ساده کردن مسئله به حالت دو بعدی، تحلیل ظرفیت باربری عمدتاً با پی نواری شروع می شود و سپس ضرائب اصلاح لازم برای شکل پی اعمال می گردد (شکل ۴-۱) [۱۹].



شکل ۴-۱- گسیختگی برشی کلی در باربری نهایی یک پی نواری

قبل از آنکه به بررسی تحلیل های رایج ظرفیت باربری بپردازیم، یک توضیح کلی در مورد شکل سطوح لغزش و چگونگی شکل گیری نواحی مختلف در حالت گسیختگی برشی کلی در خاک زیر پی ارائه می گردد. همانطور که در شکل (۴-۱) ملاحظه می گردد منطقه گسیختگی زیر پی به سه ناحیه مجزا قابل تفکیک است.

۱- ناحیه I گوه گسیختگی ACD که با افزایش بار تغییر شکل جانبی زیادی نداشته و در اتصال با شالوه بطرف پایین حرکت می کند.

۲- نواحی II یا نواحی برشی شعاعی با سطوح گسیختگی DF و DE که با حرکت بخش I به سمت پایین، این نواحی به حالت حدی مقاوم رسیده و به طرفین حرکت می نمایند. بخشی از سطح گسیختگی در این نواحی بصورت حلزونی لگاریتمی و یا در  $\phi = 0$  دایره ای می باشد.

۳- نواحی III یا نواحی مقاوم رانکین که با حرکت بخشهای II به طرفین، نواحی III نیز به حالت

مقاوم درآمده و به سمت بالا حرکت می نمایند (و باعث تورم و بالازدگی سطح زمین می شوند).

بدیهی است که در گسیختگی برشی کلی هر سه ناحیه فوق تشکیل می شوند، در حالی که

درگسیختگی برشی موضعی تنها نواحی I و II در گسیختگی سوراخ کننده فقط ناحیه I تشکیل

می شود.

#### ۴-۲-۱- معادله ظرفیت باربری ترزاقی

یکی از ابتدائی ترین معادلات ظرفیت باربری برای پی نواری توسط ترزاقی پیشنهاد گردید.

معادلات ترزاقی براساس نظریه ظرفیت باربری پراندل [۳] با اندکی اصلاح بدست آمد در این تحلیل از

نظریه خمیری برای تحلیل سوراخ کنندگی یک پایه صلب به داخل مصالح نرم تر (خاک) استفاده شده

است.

تحلیل ترزاقی بر مبنای فرضیات زیر می باشد:

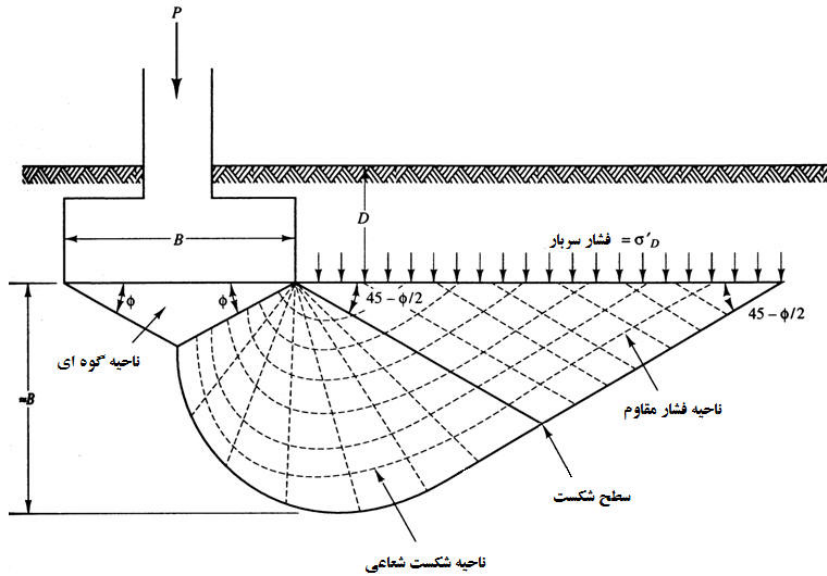
الف) کف پی زبر است.

ب) عمق پی کمتر یا مساوی عرض آن است  $D_f \leq B$ .

ج) از مقاومت برشی خاک بالای تراز کف پی صرفنظر می شود و این خاک با یک فشار (سربار) یکنواخت

جایگزین  $\bar{q} = \gamma D_f$  می گردد.





شکل ۴-۲- فرضیه ترزاقی در ظرفیت باربری پی [۱۹]

د) طول پی زیاد است (پی نواری بوده و شرایط کرنش مستوی برقرار است).

ه) بار وارد بر پی قائم بوده و فشار تماس دارای توزیع یکنواخت می باشد.

و) مقاومت برشی خاک تابع معیار موهر - کولمب است.

ترزاقی زاویه  $\alpha$  که در شکل (۲-۴) را برابر  $\Phi$  فرض نمود در حالیکه در اکثر نظریه های دیگر  $\alpha =$

$45 + \frac{\Phi}{2}$  در نظر گرفته شده است. معادله ترزاقی از تعادل نیروهای قائم روی گوه bac (شکل (۲-۴))

به صورت زیر بدست می آید:

$$Q + P = 2P_p + 2Csina \quad (۱-۴)$$

با جایگزینی مقادیر پارامترهای  $P_p$  (نیروی مقاوم)،  $W$  (وزن گوه)  $Q = q_{ult} \times B$  و ساده کردن

رابطه فوق، معادله ظرفیت باربری نهائی به دست می آید:

$$q_{ult} = cN_c + \bar{q}N_q + 0.5\gamma BN_\gamma \quad (۲-۴)$$

که در آن  $c$ ، چسبندگی،  $\gamma$ ، وزن واحد خاک،  $B$ ، عرض پی،  $(\bar{q} = \gamma D)$ ، سربار خاک در تراز کف پی و  $N_i$  ضرائب بدون ظرفیت باربری می باشند. این ضرائب به ترتیب  $N_c$ ، ضریب چسبندگی،  $N_q$ ، ضریب سربار خاک و  $N_\gamma$ ، ضریب وزن می باشند و به صورت توابعی از زاویه اصطکاک داخلی خاک محاسبه می شوند:

$$N_q = \frac{a^2}{a \cos^2(45 + \varphi/2)}, \quad a = e^{(0.75\pi - \varphi/2) \tan \varphi} \quad (۳-۴)$$

$$N_c = 5.7 \quad \text{برای } \varphi = 0 \quad (۴-۴)$$

$$N_c = \frac{(N_q - 1)}{\tan \varphi} \quad \text{برای } \varphi > 0 \quad (۵-۴)$$

$$N_\gamma = \frac{\tan \varphi}{2} \left( \frac{K_{p\gamma}}{\cos^2 \varphi} - 1 \right) \quad (۶-۴)$$

معادلات ظرفیت باربری ترزاقی برای پی های سطحی با  $D \leq B$  بدست آمده اند به طوری که بتوان از مقاومت برشی در خاک سربار صرف نظر نمود. جدول (۱-۴) یک جدول کوتاه از ضرائب  $N_i$  ترزاقی برای

استفاده سریع می باشد [۱۹].

جدول ۴-۱- ضرایب ظرفیت باربری برای معادلات ترزاقی

| $\phi$ | $N_c$ | $N_q$ | $N_\gamma$ | $\phi$ | $N_c$ | $N_q$ | $N_\gamma$ | $\phi$ | $N_c$  | $N_q$  | $N_\gamma$ |
|--------|-------|-------|------------|--------|-------|-------|------------|--------|--------|--------|------------|
| 0      | 5.14  | 1.00  | 0.00       | 17     | 12.34 | 4.77  | 1.66       | 34     | 42.16  | 29.44  | 31.15      |
| 1      | 5.38  | 1.09  | 0.002      | 18     | 13.10 | 5.26  | 2.00       | 35     | 46.12  | 33.30  | 37.15      |
| 2      | 5.63  | 1.20  | 0.01       | 19     | 13.93 | 5.80  | 2.40       | 36     | 50.59  | 37.75  | 44.43      |
| 3      | 5.90  | 1.31  | 0.02       | 20     | 14.83 | 6.40  | 2.87       | 37     | 55.63  | 42.92  | 53.27      |
| 4      | 6.19  | 1.43  | 0.04       | 21     | 15.82 | 7.07  | 3.42       | 38     | 61.35  | 48.93  | 64.07      |
| 5      | 6.49  | 1.57  | 0.07       | 22     | 16.88 | 7.82  | 4.07       | 39     | 67.87  | 55.96  | 77.33      |
| 6      | 6.81  | 1.72  | 0.11       | 23     | 18.05 | 8.66  | 4.82       | 40     | 75.31  | 64.20  | 93.69      |
| 7      | 7.16  | 1.88  | 0.15       | 24     | 19.32 | 9.60  | 5.72       | 41     | 83.86  | 73.90  | 113.99     |
| 8      | 7.53  | 2.06  | 0.21       | 25     | 20.72 | 10.66 | 6.77       | 42     | 93.71  | 85.38  | 139.32     |
| 9      | 7.92  | 2.25  | 0.28       | 26     | 22.25 | 11.85 | 8.00       | 43     | 105.11 | 99.02  | 171.14     |
| 10     | 8.35  | 2.47  | 0.37       | 27     | 23.94 | 13.20 | 9.46       | 44     | 118.37 | 115.31 | 211.41     |
| 11     | 8.80  | 2.71  | 0.47       | 28     | 25.80 | 14.72 | 11.19      | 45     | 133.88 | 134.88 | 262.74     |
| 12     | 9.28  | 2.97  | 0.60       | 29     | 27.86 | 16.44 | 13.24      | 46     | 152.10 | 158.51 | 328.73     |
| 13     | 9.81  | 3.26  | 0.74       | 30     | 30.14 | 18.40 | 15.67      | 47     | 173.64 | 187.21 | 414.32     |
| 14     | 10.37 | 3.59  | 0.92       | 31     | 32.67 | 20.63 | 18.56      | 48     | 199.26 | 222.31 | 526.44     |
| 15     | 10.98 | 3.94  | 1.13       | 32     | 35.49 | 23.18 | 22.02      | 49     | 229.93 | 265.51 | 674.91     |
| 16     | 11.63 | 4.34  | 1.38       | 33     | 38.64 | 26.09 | 26.17      | 50     | 266.89 | 319.07 | 873.84     |

ترزاقی هیچگاه به خوبی توضیح نداد که ضریب  $K_{p\gamma}$  بکار رفته در محاسبه  $N_\gamma$  چگونه تعیین می شود.

اما او منحنی کوچک مقیاسی از  $\phi$  بر حسب  $N_\gamma$  و سه مقدار ویژه  $N_\gamma$  در  $0^\circ$ ،  $34^\circ$ ،  $48^\circ$  به صورت

نشان داده شده در جدول (۴-۲) ارائه نمود.

محققین دیگر با گرفتن نقاط اضافی از این منحنی مقادیر  $K_{p\gamma}$  را محاسبه معکوس نموده‌اند. ساده سازی

های زیادی جهت حذف نیاز برای استفاده پارامتر  $K_{p\gamma}$  توسط محققین صورت گرفت. یکی از مدل

های مناسب توسط کدوتو [۲۶] با دقت حدود ۱۰٪ به صورت زیر ارائه گردید:

$$N_\gamma = \frac{2(N_q + 1)\tan\phi}{1 + 0.4\sin 4\phi} \quad (۷-۳)$$

روابط پیشنهادی دیگر محققین به صورت خلاصه در جدول (۴-۳) گرد آوری شده است.

جدول ۴-۲- ضرایب ظرفیت باربری برای محاسبه  $K_{p\gamma}$ 

| $\phi$ , deg | $N_c$ | $N_q$ | $N_\gamma$ | $K_{p\gamma}$ |
|--------------|-------|-------|------------|---------------|
| 0            | 5.7*  | 1.0   | 0.0        | 10.8          |
| 5            | 7.3   | 1.6   | 0.5        | 12.2          |
| 10           | 9.6   | 2.7   | 1.2        | 14.7          |
| 15           | 12.9  | 4.4   | 2.5        | 18.6          |
| 20           | 17.7  | 7.4   | 5.0        | 25.0          |
| 25           | 25.1  | 12.7  | 9.7        | 35.0          |
| 30           | 37.2  | 22.5  | 19.7       | 52.0          |
| 34           | 52.6  | 36.5  | 36.0       |               |
| 35           | 57.8  | 41.4  | 42.4       | 82.0          |
| 40           | 95.7  | 81.3  | 100.4      | 141.0         |
| 45           | 172.3 | 173.3 | 297.5      | 298.0         |
| 48           | 258.3 | 287.9 | 780.1      |               |
| 50           | 347.5 | 415.1 | 1153.2     | 800.0         |

جدول ۴-۳- روابط پیشنهادی محققین مختلف برای محاسبه  $N_\gamma$  [۲۱]

| مرجع                               | معادله   |
|------------------------------------|--|
| وسیک [۸]<br>کاکوت و کریسل [۲۷]     | $N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi$                      |
| هنسن [۷]<br>لاندرگن و مورتنسن [۲۸] | $N_\gamma = 1.5(N_q - 1) \tan \phi$                    |
| بیاز و همکاران [۲۹]                | $N_\gamma = 1.8(N_q - 1) \tan \phi$                    |
| فدا [۳۰]                           | $N_\gamma = 0.01e^{0.25\phi}$                          |
| میرهوف [۶]                         | $N_\gamma = (N_q - 1) \tan(1.4\phi)$                   |
| کریزک [۳۱]                         | $N_\gamma = 6\phi / (40 - \phi)$                       |
| اسپانگلر و هندی [۳۲]               | $N_\gamma = 1.1(N_q - 1) \tan(1.3\phi)$                |
| اینگرا و بیچر [۳۳]                 | $N_\gamma = e^{(0.173\phi - 1.646)}$                   |
| میچالوفسکی [۳۴]                    | $N_\gamma = 0.01e^{(5.11 \tan \phi + 0.66)} \tan \phi$ |

اگر پی نواری نباشد آنگاه گوه زیر پی به یک هرم یا مخروط تبدیل می گردد، به عبارت دیگر مسئله از حالت دوبعدی (کرنش مستوی) خارج و بصورت سه بعدی در می آید. ترزاقی برای این موارد ضرائب شکل ارائه شده در جدول (۳-۴) پیشنهاد نمود. ترزاقی ضرائب شکل را تنها با جملات چسبندگی ( $s_c$ ) و بعد ( $s_\gamma$ ) پی بکار برد. با اعمال این ضرائب، معادلات ترزاقی برای پی ها مربعی و دایره ای بترتیب بصورت زیر بدست می آید:

جدول ۴-۴- ضرائب شکل ترزاقی

| ضرب شکل    | نواری | دایره ای | مربعی |
|------------|-------|----------|-------|
| $s_c$      | 1.0   | 1.3      | 1.3   |
| $s_\gamma$ | 1.0   | 0.6      | 0.8   |

$$q_{ult} = 1.3cN_c + \bar{q}N_q + 0.4\gamma BN_\gamma \quad (۸-۴)$$

$$q_{ult} = 1.3cN_c + \bar{q}N_q + 0.3\gamma BN_\gamma \quad (۹-۴)$$

پی مستطیلی را می توان یک حالت واسطه بین پی نواری و پی مربعی در نظر گرفت و رابطه زیر را برای محاسبه ظرفیت باربری آن مورد استفاده قرار داد:

$$q_{ult} = \left(1 + 0.3 \frac{B}{L}\right) cN_c + \bar{q}N_q + \left(0.5 - 0.1 \frac{B}{L}\right) \gamma BN_\gamma \quad (۱۰-۴)$$

هنگامی که ترزاقی [۵] معادلات ظرفیت باربری خود را گسترش داد یک گسیختگی برشی کلی در ماسه متراکم و یک گسیختگی برشی موضعی برای ماسه سست را بررسی نمود. ترزاقی پیشنهاد کرد

که برای گسیختگی برشی موضعی پارامترهای  $c$  و  $\phi$  بصورت زیر کاهش می یابد و ظرفیت باربری از همان رابطه ارائه شده برای گسیختگی برشی کلی محاسبه گردد:

$$c'' = 0.67c \quad (۱۱-۴)$$

$$\phi'' = \tan^{-1}(0.67\tan\phi) \quad (۱۲-۴)$$

روابط ترزاقی اغلب نتایج محافظه کارانه‌ای بدست می دهد و شاید از همین جهت است که سابقه کاربرد موفقیت آمیزی دارد. کمبود تحلیل ترزاقی عدم توانائی در تعیین ظرفیت باربری پی‌های تحت سربارهای مایل و برون مرکزی می باشد. در این روش ها برای تعیین ابعاد پی نیاز به انجام روش سعی و خطا می باشد زیرا عرض پی  $B$  و طول پی  $L$  جهت محاسبه ضرائب شکل، عمق و ضرائب تاثیر مورد نیاز می باشند.

#### ۴-۲-۲- معادله ظرفیت باربری میرهوف

میرهوف [۶، ۲۳] یک معادله ظرفیت باربری شبیه معادله ترزاقی پیشنهاد نمود. اما یک ضریب شکل  $S_q$  به جمله عمق یعنی  $\bar{q}N_q$  اضافه کرد. او همچنین ضرائب عمق  $d_i$  و ضرائب تمایل  $i_i$  برای حالتی که بار نسبت به قائم انحراف دارد منظور نمود. این ضرائب اضافی معادلاتی به شکل کلی نشان داده شده در جداول (۴-۵) و (۴-۶) بدست می دهد. مقادیر انتخابی ضرائب  $N_i$  برای این معادلات نیز در جدول

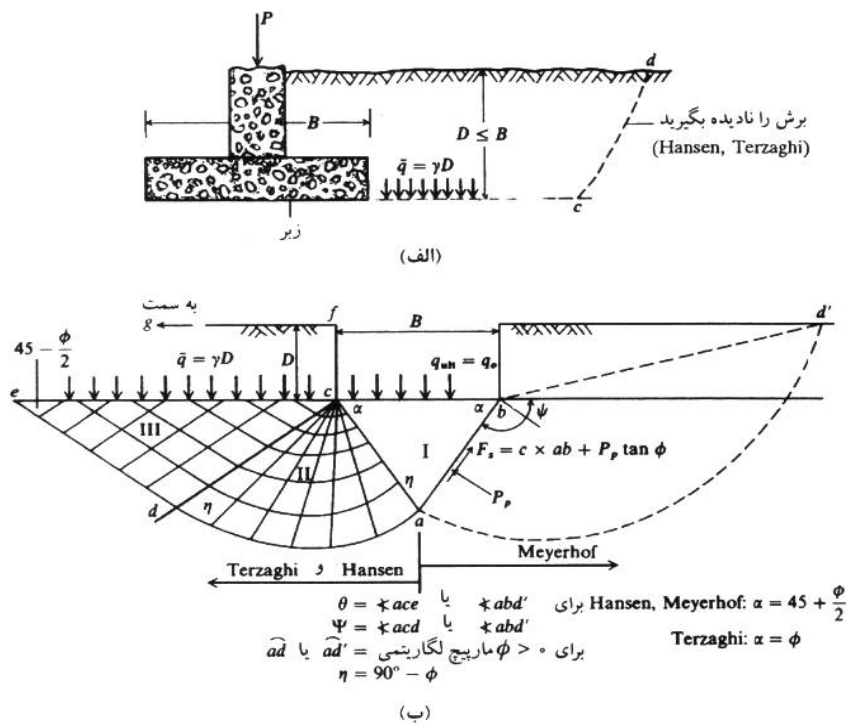
(۷-۴) ارائه شده‌اند. ملاحظه جدول (۷-۴) دلالت بر این دارد که مقادیر  $N_{\gamma(M)}$  مربوط به میرهوف

تقریب خوبی با مقادیر ترزاقی دارند مگر برای زوایای  $\phi > 40^\circ$  که تفاوت بین این دو زیاد می شود.

بطور کلی مقدار  $N_{\gamma}$  نسبت به ضرائب دیگر ظرفیت باربری دارای دامنه پیشنهادی وسیعتری می باشد

میرهوف ضرائب  $N_i$  را براساس گسیختگی  $obd$  با قوس  $ad$  از شکل (۳-۴، ب) تعیین نمود که تقریبی

از برش در امتداد خط  $cd$  از شکل (۳-۴، الف) را در بر می گیرد [۶، ۲۳].



شکل ۳-۴- (الف) پی سطحی با کف زبر، در معادلات ترزاقی و هنسن از مقاومت برشی در طول  $cd$

(یعنی مقاومت برشی خاک سربار) صرفنظر شده است. (ب) اندر کنش خاک- پی مورد استفاده در

تعیین ظرفیت باربری نهایی پی نواری، سمت چپ سطوح لغزش انتخابی ترزاقی و هنسن و سمت

راست مربوط به میرهوف می باشد.

جدول ۴-۵- حالت کلی معادلات برای ظرفیت باربری نهایی پی

| معادله   | مرجع        |
|--|-------------|
| $q_{ult} = cN_c s_c + \gamma DN_q + 0.5\gamma B N_\gamma s_\gamma$   | ترزاقی [۵]  |
| $q_{ult} = cN_c s_c d_c i_c + \gamma DN_q s_q d_q i_q + 0.5\gamma B \cdot N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma$                                   | میرهوف [۶]  |
| $q_{ult} = cN_c s_c d_c i_c g_c b_c + \gamma DN_q s_q d_q i_q g_q b_q + 0.5\gamma B \cdot N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma$ | هنسن [۷]    |
| مشابه معادله هنسن  | وسیک [۲، ۸] |

ضرائب شکل، عمق، و تمایل بار میرهوف در جدول (۴-۶) ارائه شده‌اند. ضرائب شکل پیشنهادی میرهوف به جز برای ضریب اضافه شده  $s_q$  تفاوت چندانی با مقادیر ارائه شده توسط ترزاقی ندارند. میرهوف [۶]، [۲۳] با مشاهده اینکه تاثیر برش در امتداد خط  $cd$  در شکل (۴-۳، الف) هنوز تا حدودی منظور نگردیده است ضرائب عمق  $d_i$  را پیشنهاد نمود.

میرهوف [۶] همچنین بکارگیری ضرائب تمایل ارائه شده در جدول (۴-۶) را پیشنهاد نمود تا در مواقعی که برآیند بار وارد بر پی نسبت به قائم انحراف  $\theta$  دارد. ظرفیت باربری کاهش داده شود. همانطور که در جدول (۴-۶) ملاحظه می‌گردد در صورت وجود تمایل بار، میرهوف ضرائب شکل را واحد فرض می‌نماید. اگر زاویه انحراف  $\theta=0$  باشد کلیه ضرائب  $i_i$  برابر با واحد می‌باشند. ظرفیت باربری نهایی حاصل از معادله میرهوف برای عمقی در حدود  $D \simeq B$  تفاوت چندانی با مقدار حاصل از معادله ترزاقی ندارد. تفاوت بین مقادیر حاصل از این دو معادله در اعماق بزرگتر آشکار می‌شود.



جدول ۴-۶- ضرایب شکل، عمق و تمایل بار برای معادلات ظرفیت باربری میرهوف

| ضرایب     | مقدار   | برای                           |
|-----------|---|--------------------------------|
| شکل       | $s_c = 1 + 0.2K_p \frac{B}{L}$                                  | $\phi$ هر                      |
|           | $s_q = s_\gamma = 1 + 0.1K_p \frac{B}{L}$                       | $\phi > 10$                    |
|           | $s_q = s_\gamma = 1$  | $\phi = 0$                     |
| عمق       | $d_c = 1 + 0.2\sqrt{K_p} \frac{D}{B}$                           | $\phi$ هر                      |
|           | $d_q = d_\gamma = 1 + 0.1\sqrt{K_p} \frac{D}{B}$                | $\phi > 10$                    |
|           | $d_q = d_\gamma = 1$  | $\phi = 0$                     |
| تمایل بار | $i_c = i_q = \left(1 - \frac{\theta^\circ}{90^\circ}\right)^2$  | $\phi$ هر                      |
|           | $i_\gamma = \left(1 - \frac{\theta^\circ}{\phi^\circ}\right)^2$ | $\phi > 0$                     |
|           | $i_\gamma = 0$  | $\phi = 0$ و برای $\theta = 0$ |

جدول ۴-۷- مقادیر مختلف ضرایب  $N_i$  معادله میرهوف

| $\phi$ | $N_c$  | $N_q$ | $N_{\gamma(H)}$ | $N_{\gamma(M)}$ | $N_{\gamma(V)}$ | $N_q/N_c$ | $\gamma \tan \phi (1 - \sin \phi)^2$ |
|--------|--------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------|--------------------------------------|
| ۰      | ۵/۱۴*  | ۱/۰   | ۰/۰             | ۰/۰             | ۰/۰             | ۰/۱۹۵     | ۰/۰۰۰                                |
| ۵      | ۶/۴۹   | ۱/۶   | ۰/۱             | ۰/۱             | ۰/۴             | ۰/۲۴۲     | ۰/۱۴۶                                |
| ۱۰     | ۸/۳۴   | ۲/۵   | ۰/۴             | ۰/۴             | ۱/۲             | ۰/۲۹۶     | ۰/۲۴۱                                |
| ۱۵     | ۱۰/۱۹۷ | ۳/۹   | ۱/۲             | ۱/۱             | ۲/۶             | ۰/۳۵۹     | ۰/۲۹۴                                |
| ۲۰     | ۱۴/۸۲  | ۶/۴   | ۲/۹             | ۲/۹             | ۵/۴             | ۰/۴۳۱     | ۰/۳۱۵                                |
| ۲۵     | ۲۰/۷۱  | ۱۰/۷  | ۶/۸             | ۶/۸             | ۱۰/۹            | ۰/۵۱۴     | ۰/۳۱۱                                |
| ۲۶     | ۲۲/۲۵  | ۱۱/۸  | ۷/۹             | ۸/۰             | ۱۲/۵            | ۰/۵۳۳     | ۰/۳۰۸                                |
| ۲۸     | ۲۵/۷۹  | ۱۴/۷  | ۱۰/۹            | ۱۱/۲            | ۱۶/۷            | ۰/۵۷۰     | ۰/۲۹۹                                |
| ۳۰     | ۳۰/۱۳  | ۱۸/۴  | ۱۵/۱            | ۱۵/۷            | ۲۲/۴            | ۰/۶۱۰     | ۰/۲۸۹                                |
| ۳۲     | ۳۵/۴۷  | ۲۳/۲  | ۲۰/۸            | ۲۲/۰            | ۳۰/۲            | ۰/۶۵۳     | ۰/۲۷۶                                |
| ۳۴     | ۴۲/۱۴  | ۲۹/۴  | ۲۸/۷            | ۳۱/۱            | ۴۱/۰            | ۰/۶۹۸     | ۰/۲۶۲                                |
| ۳۶     | ۵۰/۵۵  | ۳۷/۷  | ۴۰/۰            | ۴۴/۴            | ۵۶/۲            | ۰/۷۴۶     | ۰/۲۴۷                                |
| ۳۸     | ۶۱/۳۱  | ۴۸/۹  | ۵۶/۱            | ۶۴/۰            | ۷۷/۹            | ۰/۷۹۷     | ۰/۲۳۱                                |
| ۴۰     | ۷۵/۲۵  | ۶۴/۱  | ۷۹/۴            | ۹۳/۶            | ۱۰۹/۳           | ۰/۸۵۲     | ۰/۲۱۴                                |
| ۴۵     | ۱۳۳/۷۳ | ۱۳۴/۷ | ۲۰۰/۵           | ۲۶۲/۳           | ۲۷۱/۳           | ۱/۰۰۷     | ۰/۱۷۲                                |
| ۵۰     | ۲۶۶/۵۰ | ۳۱۸/۵ | ۵۶۷/۴           | ۸۷۱/۷           | ۷۶۱/۳           | ۱/۱۹۵     | ۰/۱۳۱                                |

#### ۴-۲-۳- روش هسن برای محاسبه ظرفیت باربری

هسن [۷] معادلات حالت کلی ظرفیت باربری و ضرائب  $N$  را بصورت نشان داده شده در جدول (۴-۸)

پیشنهاد نمود. این معادله شکل بسط یافته‌ای از معادله میرهوف [۶] می باشد. ضرائب شکل و عمق

هسن و دیگر ضرائبی که معادله ظرفیت باربری کلی را تشکیل می دهند در جداول (۴-۸) و (۴-۹)

ارائه شده‌اند. بسط بیشتر معادله کلی ظرفیت باربری شامل ضرائب کجی پی  $b_i$  برای موقعیت هایی

است که در آن پی نسبت به افق انحراف دارد و ضرائب شیب زمین  $g_i$  برای در نظر گرفتن شیب احتمالی

زمینی است که پی را نگه می‌دارد.

معادلاتی که در جدول (۴-۸) دارای زیرنویس  $V$  نمی باشند را می توان متناسب با حالت مورد بررسی

بکار گرفت (محدودیت ها و شرایط مربوطه در جدول ذکر گردیده‌اند). برای پی واقع بر شیب هم ضرائب

$g_i$  هسن و هم ویسک را می توان استفاده نمود. معادله ظرفیت باربری هسن برای هر نسبت  $\frac{D}{B}$  قابل

کاربرد است. بنابراین می توان آن را هم برای پی های سطحی (پی ها) و هم پی های عمیق (شمع ها و

پی های صندوقه ای) بکار برد. واریسی جمله  $\bar{q}N_q$  نشانگر افزایش زیاد  $q_{ult}$  در عمق های زیاد می باشد.

برای گذاشتن حدی منطقی بر افزایش این جمله، هنسن [۷] روابط زیر را برای ضرائب عمق پیشنهاد

نمود:

$$\frac{D}{B} \leq 1 \text{ برای } \begin{cases} d_c = 1 + 0.4 \frac{D}{B} \\ d_q = 1 + 2 \tan \varphi (1 - \sin \varphi)^2 \frac{D}{B} \end{cases} \quad (۱۳-۴)$$

$$\frac{D}{B} > 1 \text{ برای } \begin{cases} d_c = 1 + 0.4 \tan^{-1} \frac{D}{B} \\ d_q = 1 + 2 \tan \varphi (1 - \sin \varphi)^2 \tan^{-1} \frac{D}{B} \end{cases} \quad (۱۴-۴)$$

می توان ملاحظه نمود که کاربرد  $\tan^{-1} \frac{D}{B}$  برای  $\frac{D}{B} > 1$  افزایش در  $d_c$  و  $d_q$  را کنترل می نماید

که این در تطابق با مشاهداتی است که در آن  $q_{ult}$  در نسبت عمق معینی به یک مقدار حدی نزدیک

می شود، این عمق را عمق بحرانی اطلاق گویند.

جدول ۴-۸- ضرایب شکل و عمق برای استفاده در معادلات ظرفیت باربری هنسن و وسیک (اندیس

های  $V$  و  $H$  به ترتیب نشانگر وسیک و هنسن می باشند).

| ضریب   | شکل  | عمق   |
|--|--|---|
| مقدار  | $s'_{c(H)} = 0.2 \frac{B}{L} \quad (\phi = 0^\circ)$ | $d'_{c(H)} = 0.4k \quad (\phi = 0^\circ)$         |
|  | $s_{c(H)} = 1.0 + \frac{N_q}{N_c} \cdot \frac{B}{L}$ | $d_{c(H)} = 1 + 0.4k$                             |
|  | $s_{c(V)} = 1.0 \frac{N_q}{N_c} \cdot \frac{B}{L}$   | $k = \frac{D}{B} ; D/B \leq 1$                    |
|  | برای نواری $s_c = 1$                                 | $k = \tan^{-1}\left(\frac{D}{B}\right) ; D/B > 1$ |
|  | $s_{q(H)} = 1.0 + \frac{N_q}{N_c} \sin\phi$          | $d_q = 1 + 2 \tan\phi (1 - \sin\phi)^2 k$         |
| $s_{q(V)} = 1.0 + \frac{N_q}{N_c} \tan\phi$                    | $d_q = 1$  |   |
| $s_{\gamma(V)} = s_{\gamma(H)} = 1 - 0.4 \frac{B}{L} \geq 0.6$ |  |   |

جدول ۴-۹- ضرایب تمایل بار، شیب زمین و کجی پی برای استفاده در معادلات ظرفیت باربری

هنسن

| ضریب  | بار مایل   | زمین (پی بر روی شیب)                      | پی کج شده                                |
|-------|--|---|--|
| مقدار | $i'_c = 0.5 - 0.5 \sqrt{1 - \frac{H_i}{A_f c_a}} \quad (\phi = 0)$ | $g'_c = \frac{\beta^\circ}{147^\circ}$    | $b'_c = \frac{\eta^\circ}{147^\circ}$    |
|       | $i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_q - 1}$                              | $g_c = 1 - \frac{\beta^\circ}{147^\circ}$ | $b_c = 1 - \frac{\eta^\circ}{147^\circ}$ |

|  |   |   |
|--|---|---|
| $i_q = \left[ 1 - \frac{0.5H_i}{V + A_f c_a \cot \phi} \right]^{\alpha_1}$ $2 \leq \alpha_1 \leq 5$                                      |   | $b_q = \exp(-2\eta \tan \phi)$          |
| $i_\gamma = \left[ 1 - \frac{0.7H_i}{V + A_f c_a \cot \phi} \right]^{\alpha_2}$  |   |   |
| $i_\gamma = \left[ 1 - \frac{(0.7 - \frac{\eta^\circ}{45^\circ})H_i}{V + A_f c_a \cot \phi} \right]^{\alpha_2}$ $2 \leq \alpha_2 \leq 5$ | $g_q = g_\gamma$ $= (1 - 0.5 \tan \beta)^5$ | $b_\gamma$ $= \exp(-2.7\eta \tan \phi)$ |

#### ۴-۲-۴- معادله ظرفیت باربری ویسک

روش ویسک [۲، ۸] اساساً همان روش هسنس همراه با برخی تغییرات در محاسبه ضرائب می باشد.

عبارات مربوط به محاسبه  $N_c$  و  $N_q$  همان روابط هسنس می باشند. اما  $N_\gamma$  پیشنهادی ویسک اندکی

متفاوت و به صورت زیر می باشد:

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \varphi \quad (۱۵-۴)$$

برای  $\phi = 0$  در کلیه روش ها  $N_\gamma = 0$  اما چنانچه در این حالت  $\beta \neq 0$  باشد ویسک پیشنهاد می

نماید ضریب  $N_\gamma$  به صورت  $N_\gamma = -2 \sin(\mp \beta)$  محاسبه و در جمله سوم معادله ظرفیت باربری

مورد استفاده قرار گیرد. کاربرد معادله ویسک تا حدودی آسانتر از معادله هسنس می باشد، زیرا ویسک

[۲، ۸] در محاسبه ضرائب شکل  $S_i$  از  $i_i$  جملات استفاده نمی نماید.

### ۳-۴- انتخاب معادله مناسب برای محاسبه ظرفیت باربری

مقایسه  $Q_{ult}$  محاسبه شده با مقادیر اندازه گیری شده از تعداد معدودی آزمایش های بارگذاری پی دلالت بر این دارد که هیچ یک از روش ها و نظریات ارائه شده به لحاظ بهترین برآورد از ظرفیت باربری مزیت خاصی بر روش های دیگر ندارد. معادلات ترازقی که اولین معادلات پیشنهادی می باشند به طور بسیار وسیعی مورد استفاده قرار گرفته است. به خاطر سهولت بیشتر در کاربرد آن (محاسبه ضرائب شکل، عمق و دیگر ضرائب اضافی لازم نیست)، هنوز هم از این معادلات استفاده می گردد. این معادلات تنها برای پی های با بارگذاری مرکزی واقع بر زمین افقی کاربرد دارند برای پی هایی که برش افقی یا مماسی حمل می کنند و یا برای مثال برای پی های کج معادلات ترازقی کاربردی ندارند.

هر دو روش میرهوف و هنسن بطور وسیعی به کار برده می شوند. روش ویسک زیاد مورد استفاده قرار نگرفته است (اما روش پیشنهادی موسسه نفت آمریکا می باشد). همانطور که قبلا ذکر گردید تفاوت کمی بین روش های هنسن و ویسک وجود دارد. براساس مشاهدات و بررسی های انجام شده می توان کاربرد معادلات ظرفیت باربری را بصورت جدول (۴-۱۰) پیشنهاد نمود. روال مناسب آنست که حداقل دو روش به کار گرفته شده و مقادیر محاسبه شده  $Q_{ult}$  مقایسه شوند. چنانچه این دو مقدار توافق خوبی ندارند، از روش سوم نیز استفاده شود (زمانی که معادلات ظرفیت باربری بصورت برنامه رایانه ای درآورده شده اند، این کار یک تمرین ساده است). توصیه می شود که برای تعیین  $Q_a$  طراحی از متوسط حسابی یا متوسط وزنی مقادیر محاسبه شده استفاده گردد (مگر آنکه نشست کنترل کننده باشد).

جدول ۴-۱۰- پیشنهاد کاربرد معادلات ظرفیت باربری برای حالات مختلف

|  |   |
|--|---|
| <p>برای خاکهای چسبنده در موارد <math>\frac{D}{B} \leq 1</math> برای برآورد سریع <math>q_{ult}</math> به منظور مقایسه با روش های دیگر، برای پی های حامل لنگر یا نیروهای افقی و یا پی های کج واقع بر زمینهای شیبدار <u>نباید</u> از این روش استفاده شود.</p> | <p><b>ترزاقی</b></p>                      |
| <p>بسته به ترجیح و یا آشنائی کاربر با این روش ها در هر موقعیتی می توان آنها را بکار برد.</p>   | <p><b>هنسن،<br/>میرهوف و<br/>وسیک</b></p> |
| <p>در مواردی که پی کج است یا هنگامی که پی بر یک شیب قرار می گیرد یا در موارد <math>\frac{D}{B} &gt; 1</math></p>   | <p><b>هنسن و<br/>وسیک</b></p>             |

روابط مورد استفاده برای ظرفیت باربری نهایی پی تحت بار قائم (بدون تمایل بار) بر خاک های دانه ای

(غیر چسبنده) برای محقین مختلف به صورت خلاصه در جداول (۴-۱۱) و (۴-۱۲) نشان داده شده

است.

جدول ۴-۱۱- معادلات خلاصه شده برای ظرفیت باربری نهایی پی تحت بار قائم بر خاک های دانه

ای

| معادله   | مرجع   |
|--|--------|
| $q_{ult} = \gamma DN_q + 0.5\gamma BN_\gamma s_\gamma$   | ترزاقی |
| $q_{ult} = \gamma DN_q s_q d_q + 0.5\gamma B \cdot N_\gamma s_\gamma d_\gamma$                           | میرهوف |
| $q_{ult} = \gamma DN_q s_q d_q g_q b_q + 0.5\gamma B \cdot N_\gamma s_\gamma d_\gamma g_\gamma b_\gamma$ | هنسن   |
| مشابه معادله هنسن  | وسیک   |

جدول ۴-۱۲- ضرایب مورد نیاز برای ظرفیت باربری نهایی پی تحت بار قائم بر خاک های دانه ای

| وسیک                           | هنسن  | میرهوف  | ترزاقی  | مرجع       |
|--------------------------------|---|---|---|------------|
| مشابه<br>میرهوف                | مشابه میرهوف  | $e^{\pi \tan \varphi} \tan^2(45 + \varphi/2)$   | $\frac{e^{2(0.75\pi - \varphi/2)\tan \varphi}}{\cos^2(45 + \varphi/2)}$   | $N_q$      |
| $2(N_q + 1) \tan \varphi$      | $1.5(N_q - 1) \tan \varphi$   | $(N_q - 1) \tan(1.4\varphi)$  | $\frac{\tan \varphi}{2} \left( \frac{K_{py}}{\cos^2 \varphi} - 1 \right)$ | $N_\gamma$ |
| $1 + \frac{B}{L} \tan \varphi$ | $1 + \frac{B}{L} \sin \varphi$  | $\begin{cases} 1 + 0.2K_p \frac{B}{L}, \varphi > 10 \\ 1, \varphi = 0 \end{cases}$        | -   | $s_q$      |
| مشابه هنسن                     | $1 + 2 \tan \varphi (1 - \sin \varphi)^2 \frac{D}{B}$<br>for $D \leq B$<br>$1 + 2 \tan \varphi (1 - \sin \varphi)^2 \tan^{-1} \frac{D}{B}$<br>for $D > B$ | $\begin{cases} 1 + 0.1\sqrt{K_p} \frac{D}{B}, \varphi > 10 \\ 1, \varphi = 0 \end{cases}$ | -   | $d_q$      |
| مشابه هنسن                     | $1 - 0.4 \frac{B}{L}$   | مشابه $s_q$   | برای پی های 0.8<br>مربعی  | $s_\gamma$ |
| 1                              | 1   | مشابه $d_q$   | -   | $d_\gamma$ |



#### ۴-۴- ضرایب ایمنی در ظرفیت باربری پی ها

در مسائل پایداری خاک، ضریب اطمینان به صورت های گوناگونی تعریف و مورد استفاده قرار می گیرد. این تعاریف نسبت نیرو و یا ممان مقاوم به رانشی، نسبت مقاومت برشی به تنش برشی موجود روی صفحه گسیختگی و نسبت بار نهایی قابل اعمال به بار موجود را شامل می شوند. در مهندسی پی ها و طراحی آنها تعریف اخیر تر جیح داده می شود، چرا که به طور همزمان اثرات ناشی از چسبندگی، اصطکاک خاک، وزن و سربار را در نظر می گیرند. پیچیدگی رفتار خاک، عدم کنترل بر تغییرات محیطی بعد از اجرای ساختمان، شناخت ناکافی از شرایط زیرسطحی، عدم توانایی برای گسترش یک مدل ریاضی خوب جهت پی و عدم تعیین پارامترهای خاک به طور دقیق می باشد. این عدم اطمینان ها و تقریب های حاصله می بایست برای هر محلی ارزیابی شده و ضریب ایمنی مناسبی به طور مستقیم (یا غیر مستقیم) مشخص گردد به نحویکه بیش از حد محافظه کارانه نباشد بلکه حداقل موارد زیر را منظور نماید:

۱- مقدار آسیب ها (تلفات انسانی، خسارات مالی، قانونی و...) در صورت بروز گسیختگی

۲- هزینه نسبی افزایش یا کاهش ضریب ایمنی

۳- تغییر نسبی در احتمال گسیختگی با تغییر ضریب ایمنی

۴- قابلیت اطمینان و اعتماد به اطلاعات خاک

۵- دقت روش های مورد استفاده در تحلیل و طراحی

برای تعیین ظرفیت باربری مجاز می توان ضریب اطمینان را بر پارامترهای مقاومت برشی اعمال نمود و ظرفیت مجاز را مستقیماً از معادلات ظرفیت باربری نهائی محاسبه نمود. در اغلب موارد برای داشتن ضریب اطمینانی حدود ۳ تا ۴ بر روی ظرفیت باربری نهائی، انتخاب ضریب اطمینانی در حدود ۱/۶- ۱/۴ برای مقاومت برشی کافی می باشد (جدول ۴-۱۳).

جدول ۴-۱۳- مقادیر ضرایب اطمینان متداول در طراحی پی و کارهای خاکی دیگر

| حالت<br>گسیختگی | نوع  | ضریب اطمینان<br>(F.S)       |
|-----------------|--|-----------------------------|
| برش             | کارهای خاکی:<br>سدها، خاکریزها و غیره  | ۱/۲-۱/۶                     |
| برش             | سازه های نگهبان:<br>دیوار های نگهبان<br>سدهای موقت، پرده، سپر<br>حفاری های مهار بندی شده | ۱/۵-۲<br>۱/۲-۱/۶<br>۱/۲-۱/۵ |
| برش             | پی ها:<br>منفرد<br>گسترده<br>کنش به بالا   | ۲-۳<br>۱/۷-۲/۵<br>۱/۷-۲/۵   |

در مورد خاک های کاملاً چسبنده یا غیر اصطکاکی ( $\phi = 0$ )، تعریف ضریب اطمینان به صورت نسبت

بار با تعریف ضریب اطمینان روی تنش معادل هستند. به طوری که وقتی برای طراحی ضریب اطمینان

معمول ۳ اعمال می شود مانند آن است که بارمجاز با تقسیم چسبندگی بر همان ضریب اطمینان ۳ به دست آمده است.

در مورد خاک های دانه ای یا کاملاً اصطکاکی ( $c = 0$ )، تعریف ضریب اطمینان به صورت نسبت بار با تعریف ضریب اطمینان روی تنش کاملاً متفاوت است. به طوری که با مقدار کمی تغییر در ضریب اطمینان اعمالی روی مقاومت برشی خاک که با  $\tan\phi$  متناسب است، تغییر زیادی در ضریب اطمینان روی بار صورت می گیرد. اعمال ضریب اطمینان معمول ۳ روی بار، بسته به اندازه زاویه اصطکاک داخلی  $\phi$ ، معادل ضریب اطمینانی بین  $1/2$  تا ۲ روی  $\tan\phi$  می باشد. بنابراین در مورد این نوع خاک ها، ضریب اطمینان روی تنش به اندازه آنچه روی بار اعمال می شود، نخواهد بود.



## فصل پنجم:

# تکنیک ترکیبی شبکه عصبی مصنوعی و تبرید شبیه سازی شده

## ۵-۱- مقدمه

یادگیری شامل مراحل پیچیده زیادی می باشد. یادگیری ماشین شاخه ای از هوش مصنوعی میباشد که از آموزش بیولوژیکی الهام گرفته شده است. یادگیری ماشین رابطه نزدیکی با طراحی برنامه های کامپیوتری و سیستم هایی دارد که قادرند بطور خودکار با به کارگیری تجربه به یادگیری برسند [۳۵]. روش های یادگیری ماشین اطلاعات و طرح های پیچیده را از ماشینی که قادر به خواندن داده ها می باشد نیز استخراج میکند. توجه اصلی پژوهش در زمینه یادگیری ماشین بر روی سه اصل استوار است [۳۶]:

۱. کندوکاو اطلاعات (داده پردازی)

۲. حل مسائلی که مدلسازی آنها دشوار است.

۳. کاربردهای نرم افزاری با در نظر گرفتن اولویت های شخصی کاربر.

نوعی از یادگیری ماشین که اینجا در استفاده می شود یادگیری ماشین نظارت شده است. این متدولوژی بر اساس چیدمان یکسری اطلاعات ورودی برای شناخت اطلاعات خروجی هدف است. بنابراین، اگر تابع چیدمان صحیح بر اساس  $y = f(x)$  تعیین شود و تابع چیدمان تخمین زده شده  $y = g(x_i)$  باشد، اهداف یادگیری ماشین نظارت شده به شرح زیر خواهد بود [۳۷]:

• کندوکاو اطلاعات؛ که به تعیین موثرترین ورودی ها ( $x_i$ ) برای پیش بینی خروجی می

پردازد؛

• اکتشاف دانش؛ که به توسعه رابطه  $(y = g(x_i))$  که بطور موثر داده های ورودی را به داده

های خروجی تبدیل می کند می پردازد.

روش یادگیری ماشین نظارت شده که در این تحقیق استفاده شده است شامل روش ANN/SA می

باشد.

## ۵-۲- شبکه های عصبی مصنوعی

استفاده از ANN در سالیان اخیر رواج فراوانی داشته است و از تحقیقات تئوری به تحقیقات وسیع تر

و در زمینه های کاربردی برای حل بسیاری از مسائل وارد شده است. استفاده از این زمینه علوم باز هم

مانند بسیاری از علوم دیگر با الگو برداری از طبیعت صورت گرفته و مبنای علمی آن می باشد.

شبکه های اعصاب طبیعی یکی از شگفت انگیزترین مواردی است که بشر با آن مواجه شده است و

سعی داشته است تا با استفاده از تقلید و شبیه سازی و ساختار این شبکه اعصاب طبیعی، شبکه

اعصابی موسوم به ANN را پدید آورد. کاربرد عملی ANN در زمینه های مختلفی چون علوم تجربی،

پزشکی، رشته های مختلف مهندسی و غیره پیشرفت هایی داشته است. کاربرد ANN در مهندسی

عمران به اواخر دهه ۸۰ باز می گردد. اما در حال حاضر به دامنه وسیعی از موضوعات مختلف از جمله

بهینه سازی فرآیندها محاسبه مقدار بار معادل محور وسایل نقلیه، مدل سازی فرآیند ساخت و اجرا،

پیش بینی خطر زلزله، تخمین زدن هزینه های ساخت و اجرا و غیره اختصاص یافته است. با توجه به

قابلیت پردازش آمار بالا و توانایی در رگرسیون و پیش بینی، ANN در زمینه مهندسی عمران به کار برده شده است.

گرایش به ANN تحت تاثیر عوامل مختلفی افزایش یافته است که مهم ترین آنها استفاده از خصوصیات خاص پردازش اطلاعات در مغز است که دور از دسترس روش‌های مرسوم برنامه نویسی قرار دارد. از جمله خصوصیات فوق می‌توان به قدرت یادگیری و تعلیم مثال‌ها (نتیجه‌گیری)، امکان ارائه راه حل برای مسائلی که شرایط متغیر دارند، پردازش سریع اطلاعات و به وجود آمدن کامپیوترهایی که امکان کار با حجم زیاد محاسبات مربوط به تربیت ANN را فراهم می‌کنند، اشاره نمود. منشا کار بر روی ANN تشخیص این مطلب است که عمل کرد محاسباتی مغز انسان با روشی که در کامپیوترهای امروزی به کار می‌رود، کاملاً متفاوت است. مغز یک سیستم پردازش اطلاعات پیچیده به صورت غیر خطی و موازی می‌باشد و می‌تواند اجزای خود - نرون‌ها - را طوری سازمان دهی کند که قادر باشند عملیات محاسباتی خاصی را بسیار سریع‌تر از کامپیوترهای امروزی انجام دهند [۳۷]. عملکرد ANN در دو مورد مشابه مغز انسان است:

۱. دانسته‌های از محیط اطراف و از طریق فرآیند آموزش به شبکه انتقال داده می‌شوند.
  ۲. دانسته‌های فوق با استفاده از مقادیر گره‌ها که به نام وزن شناخته می‌شوند ذخیره می‌شود.
- روشی که برای آموزش شبکه به کار می‌رود الگوریتم آموزش نامیده می‌شود که وظیفه آن اصلاح وزن نرون‌های شبکه است. به ترتیبی که ما را به سمت هدف از پیش تعیین شده راهنمایی کند.



## ۵-۲-۱- مقایسه شبکه‌های عصبی مصنوعی با روش‌های سنتی

برخی از تفاوت‌های اصلی ANN با روش‌های سنتی عبارتند از [۳۷، ۳۸]:

۱. عدم نیاز به معرفی تابع مشخص

۲. توانایی اصلاح دائمی

۳. پذیرش اغتشاش (Noise) در اطلاعات ورودی

۴. تحمل صدمات و خرابی

## ۵-۲-۲- مقایسه شبکه‌های عصبی مصنوعی با سیستم‌های خبره

سیستم‌های خبره<sup>۱</sup> یکی از شاخه‌های مهم تئوری سیستم‌های هوشمند را تشکیل می‌دهند و در آن بر اساس یک سری از قوانین تعیین شده سیستم دست به یک سری تصمیم‌گیری‌های منطقی می‌زند. سری قوانین تعیین شده سیستم خبره از دانش تعیین شده برای آن در جهت حل مسائل به صورت هوشمندانه‌ای استفاده می‌کند. موارد اختلاف ANN و سیستم خبره را به صورت زیر می‌توان خلاصه کرد:

۱. ANN و سیستم خبره در روش توسعه دادن و استفاده کردن سیستم هوشمند متفاوت عمل

می‌کنند.

---

<sup>۱</sup> Expert Systems

۲. ANN خود را با هر معلومات و دانشی به تدریج وفق می دهند. ولی دانش ذخیره شده در سیستم

خبره به محدوده دانش های انسان بر می گردد.

۳. ANN می تواند با مقداری از اطلاعات و دانسته های قبلی مسائل جدی را حل نماید. این اطلاعات

ممکن است از جمله دانش ها نباشد و برای تعدادی از مسائل نیازی نیست تا انسان دانشی در رابطه با

اطلاعات داشته باشد. ANN پاسخ را با توجه به معیارهای داخلی خود اطلاعات می دهد.

۴. ANN شیوه متفاوتی برای یادگیری دارد.

۵. زمانی که ANN ساخته شد دیگر نیازی به برنامه نویسی جدید نداریم.

به هر حال ANN و سیستم خبره می توانند با یک دیگر همکاری نمایند و در بعضی مسائل هم دیگر

را پوشش دهند و به این ترتیب گستره وسیعی از هوش محاسباتی را عملاً به کار گیرند.

### ۵-۲-۳- قسمت های اصلی شبکه های عصبی مصنوعی

قسمت های اصلی ANN عبارتند از:

فاکتور وزن<sup>۱</sup>:

یک نرون معمولاً ورودی های هم زمانی را دریافت می کند. هر ورودی وزن مربوط به خودش را دارد.

وزن ها تاثیری بر ورودی اعمال می کند تا در واحد پردازش گر نرون، حاصل ضرب ورودی ها با وزن ها

---

<sup>۱</sup> Weighting factor

جمع شوند. این وزن‌ها همان عمل کرد قوی سازی در اتصالات سیناپتیکی در واقعیت بیولوژیکی را دارند. در هر دو حالت مصنوعی و واقعی، بعضی ورودی‌ها از بقیه مهم‌ترند، بنابراین آنها تاثیر بیش‌تری روی المان پردازشگر دارند. وزن‌ها ضریب‌های تطبیقی هستند که در شبکه قدرت تاثیر ورودی را مشخص می‌سازند. آنها مقیاسی از قدرت ارتباط ورودی هستند. این قدرت‌ها می‌توانند مشخص شوند تا به دسته‌های مختلف آموزشی و ساختار مختلف شبکه مطابق قوانین مختلف یادگیری جواب دهند.

تابع جمع کننده<sup>۱</sup>:

اولین گام در عملیات پردازشگر آن است که جمع وزنی همه ورودی‌ها را محاسبه کند. به صورت ریاضی، ورودی‌ها و وزن‌ها به صورت بردارهایی مانند  $(W_1, W_2, \dots, W_n), (X_1, X_2, \dots, X_n)$  می‌توانند نشان داده شوند. سیگنال ورودی کلی می‌تواند ضرب اسکالر دو بردار باشد. ساده‌ترین تابع جمع کننده آن است که هر جزء بردار را در جزء متناظر بردار  $W$  ضرب کند و سپس حاصل ضرب‌ها را با هم جمع کنند. تابع جمع کننده می‌تواند پیچیده‌تر نیز باشد. مقادیر ورودی و وزن‌ها می‌توانند به صورت‌های دیگری قبل از وارد شدن به المان پردازشگر با یک دیگر ترکیب شوند. نوع تابع جمع کننده به وسیله نوع مدل و طراحی شبکه عصبی مشخص می‌شود. بعضی از توابع جمع کننده پروسه اضافه‌ای دارند که

<sup>۱</sup> Summation function

نتایج را قبل از فرستادن به تابع انتقالی به کار می‌برند. این پروسه که عملیات تحریک نامیده می‌شود هدفی دارد تا به خروجی تابع جمع شونده اجازه دهد تا با زمان تغییر کند.

تابع انتقالی<sup>۱</sup>:

نتایج تابع جمع کننده در اکثر الگوریتم‌ها وارد پروسه‌ای می‌شود که تابع انتقالی نامیده می‌شود. در تابع انتقالی جمع کلی می‌تواند با یک سری مقادیر آستانه‌ای مقایسه شود تا خروجی مشخص گردد. اگر جمع بزرگ‌تر از مقدار آستانه باشد المان پردازش‌گر یک سیگنال خروجی تولید می‌کند. اگر جمع ورودی‌ها و وزن‌ها کم‌تر از مقدار آستانه باشد سیگنال تولید نمی‌شود.

مقیاس گذاری و محدود سازی<sup>۲</sup>:

بعد از تابع انتقالی در المان‌های پردازش‌گر، نتیجه می‌تواند تحت پردازش‌گرهای دیگری برای مقیاس گذاری و محدود سازی قرار گیرد. این پردازش شامل ضرب یک فاکتور مقیاس در مقدار تابع انتقالی و سپس نگاشت مقادیر است. محدود سازی عملیاتی است که تضمین می‌کند مقادیر مقیاس گذاری شده در یک گسترده محدودی قرار می‌گیرند.

تابع خروجی<sup>۳</sup>:

---

<sup>۱</sup> Transfer function

<sup>۲</sup> Scaling & Limiting

<sup>۳</sup> Output function

هر المان پردازش گر اجازه دارد تا سیگنال خروجی تولید کند که ممکن است به صدها نرون دیگر فرستاده شود. درست مانند حالت نرون های بیولوژیکی که در آنها نیز مقادیر بسیار زیاد ورودی وجود دارد اما تنها یک خروجی موجود است. در حالت طبیعی، خروجی مستقیماً به تابع انتقالی مربوط است. بعضی از ساختار شبکه ها نتایج تابع انتقالی را برای رقابت با نتایج نرون های موجود در همسایگی ترکیب می کنند. نرون ها اجازه رقابت با یک دیگر را دارند تا وزن های ارتباطی آنها قوی شود. رقابت می تواند در یک و یا دو طبقه مطرح باشد. اول، رقابت مشخص می کند که کدام یک از نرون ها فعالند و سپس خروجی را تولید کند. دوم، رقابت که کمک می کند تا مشخص شود که کدام یک از المان های پردازش گر در پروسه آموزش و تطبیق می توانند شرکت داده شوند.

مقادیر انتشار به عقب و تابع خطا:

در بسیاری از شبکه های آموزشی تفاوت بین خروجی و خروجی مطلوب محاسبه می شود. این خطای خام سپس به وسیله تابع خطا با توجه به نوع طراحی شبکه تغییر می یابد. بسیاری از شبکه ها این خطاها را مستقیماً استفاده می کنند. بعضی از مجذور علامت دار آن و بعضی از توان ۳ خطا و بعضی نیز از آمار خام برای رسیدن به اهدافشان می کنند. سپس این خطا مطابق الگوریتم تابع آموزشی المان به پردازشگر دیگر منتشر می شود.

این خطا که معمولاً خطای جاری نامیده می شود به سمت لایه قبلی منتشر می شود. این خطا به وسیله فاکتورهایی مانند مشتق تابع انتقالی مقیاس گذاری می شود. طبیعتاً، این مقدار پس انتشار یافته بعد از

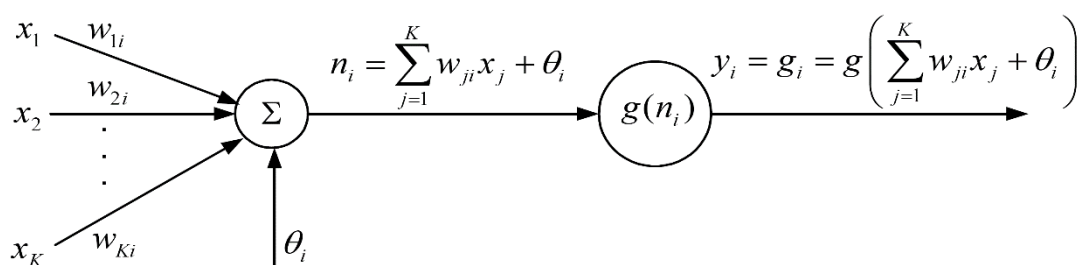
مقیاس گذاری به وسیله عملیات آموزش در وزن های ارتباطی ضرب می شوند تا قبل از دور جدید وزن های جدید محاسبه شوند.

عملیات آموزش:

هدف از تابع آموزشی آن است که وزن های متغیر روی ورودی های هر المان پردازشگر براساس الگوریتم بیولوژیکی طبیعی مشخص شوند. دو نوع آموزش موجود است: آموزش نظارت شده و آموزش بدون نظارت. در آموزش نظارت شده یک سری داده های آموزشی شبکه را آموزش می دهد. ولی اگر آموزش بدون نظارت باشد شبکه با توجه به طراحی های صورت گرفته خود به خود به اصطلاح وزن ها می پردازد و آموزش می بیند.

#### ۵-۲-۴- نرون های مصنوعی و چگونگی عملکرد آنها

در نرم افزارهای موجود و قابل دسترس نرون های مصنوعی به عنوان المان های عملیاتی شناخته می شوند و قابلیت بسیار بالایی در مقایسه با یک نرون عصبی دارند. شکل (۵-۱) یک نرون عصبی مصنوعی را با جزئیات بیش تری نشان می دهد [۴۵].



شکل ۵-۱- جزئیات عملکردی یک نرون عصبی مصنوعی [۴۶]

در شکل بالا، ورودها از بالا و چپ وارد المان عملیاتی شده و در اولین قدم باید در وزن های مربوط به خودشان ضرب گردند. سپس این ورودی های اصلاح شده به تابع جمع شونده می رسند که معمولاً این ورودی ها را جمع می کند. البته تعداد زیادی از عملیات دیگر می توانند انجام گیرند. سپس خروجی قسمت عملیات جمع کننده به قسمت عملیاتی انتقالی فرستاده می شوند. تابعی که معمولاً مورد استفاده قرار می گیرند، توابع سیگموئیدی، سینوسی، هیپربولیک تانژانت و... می باشد. این تابع انتقالی معمولاً همان خروجی های مستقیم المان عملیاتی است. در پایان، المان عملیاتی آماده است نتایج تابع انتقالی را به عنوان خروجی ارائه کند. این نتایج می تواند وارد المان های عملیاتی دیگر شود و یا این که به ارتباط خارجی که به وسیله ساختمان شبکه مشخص شده وارد شوند. تمامی مدل های ANN بر پایه این ساختمان عنصر عملیاتی ساخته می شوند.

## ۵-۲-۵- انواع لایه های نرون های مصنوعی

در کل ۳ لایه در پیکر بندی ANN در نظر گرفته می شود [۳۷]:

لایه ورودی<sup>۱</sup>: معمولاً این لایه سیگنال های مقادیر ورودی را دریافت می کند. تعداد نرون ها در این لایه با آنالیز مسئله و معمولاً پیشنهاد داده می شود. برای مثال برای پیش بینی و شبکه سازی یک طرح باران

---

<sup>۱</sup> Input Layer

ریزی، مجموعه ورودی‌های شامل اندازه‌گیری‌های باران نیاز است که ورودی می‌تواند تعداد دستگاه‌های اندازه‌گیری باران باشد.

لایه خروجی<sup>۱</sup>: نرون‌ها در این لایه سیگنال‌های خروجی تولید می‌کنند. مانند لایه ورودی تعداد نرون‌ها در این لایه با فرمول‌سازی مسئله مشخص می‌شود.

لایه‌های پنهان<sup>۲</sup>: نرون‌ها در این لایه‌ها وظیفه استخراج ارتباط بین خروجی و ورودی‌ها را دارند. معمولاً تعداد نرون‌ها در این لایه‌ها به وسیله آزمون و خطا مشخص می‌گردد. تعداد واحدهای پنهان هر شبکه در ارتباط کاملی با قابلیت شبکه هستند. برای بهترین عمل کرد شبکه، تعداد بهینه واحدهای پنهان باید به طور مناسب مشخص شوند. برای طبقه‌بندی‌ها به طور مثال یک گره خروجی یک طبقه را معرفی می‌کند.

## ۵-۲-۶- ارتباط نرون‌های مصنوعی

ارتباط بین لایه‌های مختلف می‌تواند به یکی از صورت‌های زیر باشد [۳۸].

۱. پیش‌خور<sup>۳</sup>: خروجی یک نرون به نرون در لایه بعدی وارد می‌شود.

۲. عرضی<sup>۴</sup>: خروجی یک نرون به نرون دیگر در همان لایه وارد می‌شود.

---

<sup>۲</sup> Output Layer

<sup>۳</sup> Hidden layer

<sup>۳</sup> Feed Forward

<sup>۴</sup> Lateral



۳. پس خور<sup>۱</sup> : خروجی یک نرون به نرون دیگر در لایه قبلی وارد می شود.

۴. تاخیری<sup>۲</sup> : خروجی یک نرون به نرون های دیگر فرستاده می شوند البته با یک یا چند گام تاخیر

زمانی.

با نگاهی اجمالی به شبکه ها شاید به صورت محلی مرتبط شده باشند ( هر نرون با نرون همسایه متصل

باشد) و یا به صورت کلی مرتبط شده باشند (نرون ها در هر لایه به نرون ها در هر لایه ای دیگر در مکان

دیگر متصل باشد).

### ۵-۲-۷- پرسپترون های چند لایه

پرسپترون های چند لایه (MLP) رده ای از ANN هستند که ساختار پیش خور دارند. این نوع شبکه ها

تقریب زنده های فراگیرند یعنی قادرند هر نوع تابع پیوسته ای را با دقت قابل قبولی تقریب بزنند [۳۷].

MLP معمولاً با روش انتشار برگشتی<sup>۳</sup> (BP) آموزش می بیند. شکل (۵-۲) نمودار شماتیک یک شبکه

عصبی با الگوریتم BP را نشان می دهد. شبکه های MLP شامل یک لایه ورودی، حداقل یک لایه

پنهان از نرون ها و لایه خروجی می باشند. هر کدام از این لایه ها چندین واحد پردازش گر دارد و هر واحد

---

<sup>۱</sup> Feed Back

<sup>۲</sup> Time Delayed

<sup>۳</sup> Back-Propagation

با وزن‌هایی به لایه بعدی متصل است. هر لایه تعدادی گره دارد. هر ورودی در وزن‌های هر گره ضرب

می‌شود. خروجی ( $h_j$ ) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$h_j = f\left(\sum_i x_i w_{ij}\right) \quad (1-5)$$

که  $f()$  تابع محرک است،  $x_i$  محرک  $i$ امین گره لایه پنهان و  $w_{ij}$  وزن اتصال بین  $i$ امین نرون در

یک لایه و  $j$ امین نرون در لایه قبلی است. برای مسائل خطی، توابع سیگموئید (هیپربولیک تانژانت یا

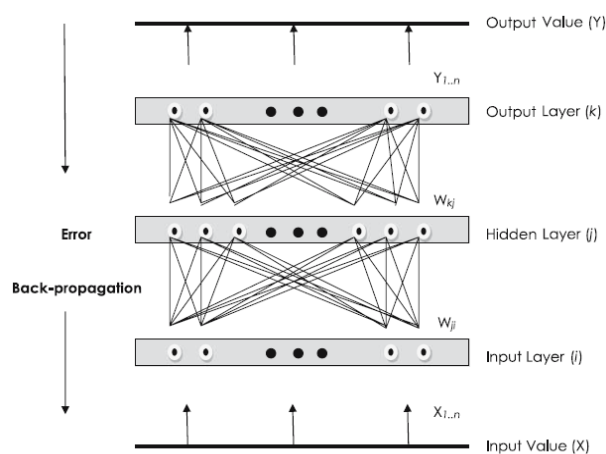
لگاریتمیک سیگموئید) به عنوان تابع محرک به کار می‌روند. تنظیم اتصالات بین لایه‌ها باعث کاهش

خطای زیر می‌شود:

$$E = \frac{1}{2} \sum_n \sum_k (t_k^n - h_k^n)^2 \quad (2-5)$$

که  $t_k^n$  و  $h_k^n$  به ترتیب خروجی محاسبه شده و واقعی هستند،  $n$  تعداد نمونه‌ها و  $k$  تعداد گره‌های

خروجی است. وزن‌ها و بایاس‌های شبکه‌های MLP می‌توانند برای آنالیز حساسیت به کار روند.



شکل ۲-۵- نمودار شماتیک یک شبکه عصبی با الگوریتم BP [۳۸]

### ۳-۵- ترکیب شبکه عصبی مصنوعی و تبرید شبیه سازی شده

SA از الگوریتم متروپلیس<sup>۱</sup> [۳۹] برای شبیه سازی کامپیوتری فرآیند گداختگی استفاده می کند. در حین فرایند گداختگی، فلز تحت حرارت بالایی قرار می گیرد و سپس به تدریج برای آزاد سازی تنش های حرارتی سرد می شود. در حین فرایند خنک سازی، هر اتم در ساختار کریستالی فلز در موقعیت خاصی قرار می گیرد. با تغییرات دما، شکل ساختار کریستال فلز تغییر می کند. انرژی داخلی (E) در هر حالت ساختار کریستال فلز که توسط فرایند گداختگی ایجاد می شود قابل اندازه گیری می باشد [۱۴].

در هر گام فرآیند سرمایش، اتم ها مجاز به برقراری یک تعادل پایدار از حداقل انرژی هستند و این امر در صورتی امکان پذیر می باشد که فرآیند سرمایش به تدریج انجام شود. تغییر ساختار کریستال فلز در حین فرایند گداختگی وابسته به تغییرات انرژی داخلی ( $\Delta E$ ) می باشد. هرچند هنگامی که دمای فلز به تدریج افت می کند روند کلی تغییرات انرژی داخلی یک فرایند نزولی می باشد ولی گاهی به طور تصادفی افزایش می یابد. احتمال افزایش انرژی داخلی  $\Delta E$  با تابع توزیع احتمالی بولتزمن محاسبه می شود [۱۷]:

$$P(\Delta E) = e^{-\frac{k\Delta E}{\gamma}} \quad (۳-۵)$$

<sup>۱</sup> Metropolis

$\gamma$  دمای فلز به کلین و  $K$  ثابت بولتزمن<sup>۱</sup> می باشند. ساختار کریستال فلز به حالت کلی حداقل انرژی در حین فرآیند گداختگی نزدیک می شود. این فرآیند برای پیدا کردن حداقل تابع در یک فضای طراحی معین با SA شبیه سازی می شود. تابع هدف به حالت انرژی و جابجایی هر حالت جدید از متغیرهای طراحی که مربوط به تغییرات حالت ساختار کریستال می باشد نیز مربوط می شود.

از سوی دیگر، ANN را می توان برای یادگیری از یک مجموعه داده به عنوان مجموعه یادگیری<sup>۲</sup> استفاده کرد. در طول فرآیند یادگیری، وزن های شبکه تنظیم می شوند تا مقادیر خروجی واقعی و پیش بینی تا حد امکان به هم نزدیک شوند. طراحی دوباره ساختار شبکه و تنظیم تعداد لایه و یا نرون ها تا زمان رسیدن به عملکرد مشخص ادامه می یابد. هنگامی که شبکه آموزش داده شده است، باید آن را با استفاده از مجموعه دیگری، به نام مجموع اعتبار سنجی<sup>۳</sup> ارزیابی نمود. روش آموزش به طور معمول به دو مرحله اصلی تقسیم می شوند: مقدار دهی اولیه و بهینه سازی. مقدار دهی اولیه شامل اختصاص دادن مقادیر اولیه تصادفی به وزن های شبکه است [۴۰]. این فرآیند ممکن با استفاده از روش های بهینه سازی قدرتمند مانند SA پیچیده تر شود تا مقادیر شروع خوبی برای وزن های شبکه تخصیص داده شود. این فرآیند نیاز به یک نقطه شروع خوب برای موفق شدن و رسیدن به دقت بالا است. بنابراین، یک روند آموزش کامل وابسته به هر دو فرآیند وزن دهی اولیه و بهینه سازی است [۱۶].

<sup>۱</sup> Boltzmann's constant

<sup>۲</sup> Learning

<sup>۳</sup> Validation

در مقایسه با سایر روش های بهینه سازی، SA به راحتی به دام حداقل محلی<sup>۱</sup> نمی افتد. استفاده از یک تولید کننده مقادیر تصادفی کارآمد یکی از خصوصیات مهم عملی هنگام پیاده سازی الگوریتم SA است [۱۶]. برای آموزش ANN، SA به طور تصادفی وزن های شبکه را با یک پروتکل سرمایشی<sup>۲</sup> تنظیم می کند. هنگامی که وزن ها تنظیم می شوند، عملکرد ANN با استفاده از مجموعه آموزش مناسب ارزیابی می شود. پروتکل های سرمایشی در SA به طور کلی ممکن است خطی یا نمایی باشند [۴۱]. هر بار که مقادیر جدید تنظیم و ارزیابی می شوند، SA با استفاده از الگوریتم متروپلیس تصمیم می گیرد که آیا راه حل جدید را رد یا قبول کند [۱۶]. SA راه حل را تنها زمانی قبول می کند که خطا کاهش می یابد. مشابه با معادله (۴-۱)، احتمال قبول یک راه حل جدید برای اولین بار توسط متروپلیس و همکاران [۳۹] در محاسبات عددی گنجانیده شده است:

$$P_a(\Delta E, y) = \begin{cases} e^{-\frac{k\Delta E}{y}} & \Delta E > 0 \\ 1 & \Delta E < 0 \end{cases} \quad (۴-۵)$$

در رابطه فوق،

$$\Delta E = \text{خطای راه حل جدید} - \text{خطای راه حل کنونی}$$

$$y = \text{دمای کنونی}$$

ثابت  $K$  نیز وابسته به محدوده وزن ها و ورودی های شبکه است. از این رو، در دمای بالا، الگوریتم اغلب ممکن است یک راه حل را بپذیرد حتی اگر نسبت به قبل بهتر نباشد [۴۲]. در طول این مرحله،

<sup>۱</sup> Local minima

<sup>۲</sup> Cooling schedule

الگوریتم با بررسی طیف بسیار گسترده ای به دنبال یک راه حل بهینه می گردد. همانطور که درجه حرارت کاهش می یابد، الگوریتم بیشتر گزینشی می شود. در این حالت، راه حل هایی را می پذیرد که خطای آنها کمتر یا بسیار شبیه به خطای راه حل قبلی باشد [۱۶].

یک عامل مهم در هنگام آموزش شبکه های عصبی با استفاده از SA برای فرآیند انتخاب اولیه تعیین مقادیر مناسب برای ثابت  $K$  است. مقدار  $K$  طور مستقیم وابسته به مقدار درجه حرارت، مجموعه آموزش و مقادیر وزن مجاز است. در طول آماده سازی مجموعه آموزش، مقیاس دهی مناسب داده ها مهم است. در نظر گرفتن محدوده گسترده ای برای ورودی ها برای SA توصیه نمی شود. زیرا یک محدوده وسیع تر به معنای طیف وسیع تری از وزن ها و در نتیجه ترکیب بیشتر برای SA است. هنگامی که ورودی ها و در نتیجه وزن ها محدود شوند، می توان مقدار مناسبی برای  $K$  به دست آورد. بطور کلی، یادگیری منطقی بدان معنی است که تغییرات خطا بیش از حد متعارفی نباشد [۱۶]. پروتکل های سرمایه گذاری معمولی در دمای بالا شروع و به تدریج با استفاده از توابع مختلف تا زمانی که درجه حرارت نهایی مشخص رسیده است سرد می شوند [۴۳]. از سوی دیگر، در الگوریتم ANN/SA، درجه حرارت بایستی به صورت دوره ای افزایش و کاهش یابد (شکل (۳-۵)). در میان پروتکل های مختلف، پروتکل خطی بسیار متداول است. پروتکل های چرخه ای دمایی قبلا توسط موبیوس و همکاران [۴۴] برای حل مسائل بهینه سازی استفاده شده است. برای توضیح عملکرد چرخه های دمایی در ANN، سری با طول محدود  $x[n]$  را در نظر بگیرید [۱۶]:

$$x[n + 1] = \rho x[n], n = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (3-4)$$

که در آن  $N$  تعداد درجات حرارتی،  $x[1]$  درجه حرارت اولیه،  $x[N]$  درجه حرارت نهایی، و ثابت سرمایش به صورت ذیل است:

$$\rho = e^{\log\left(\frac{(N-1)x[N]}{x[1]}\right)} \quad (5-5)$$

پروتکل های سرمایشی بر اساس چرخه های دمایی به صورت ذیل است [۱۶]:

$$y[n] = \sum_{m=0}^{M-1} x[n - mN] \quad (6-5)$$

که در آن  $y[n]$  درجات حرارت SA و  $M$  تعداد چرخه ها قبل از شروع فرآیند بهینه سازی است. توجه داشته باشید که مقدار نسبتا کمی برای تعداد تکرارها در چرخه های دمایی توصیه می شود. اگر آموزش شبکه با استفاده از تعداد زیادی تکرار ( به عنوان مثال ۱۰۰ ) در هر دما انجام شده باشد، اثر چرخه های دمایی کاهش می یابد [۱۶]. علاوه بر این، وزن های شبکه بایستی با استفاده از معادله بازگشتی داده شده در زیر بروزرسانی شود:

$$w_{i,j}[n + 1] = \gamma(1 - \lambda) w_{i,j}[n] + \lambda u[n] - \frac{1}{2}\lambda \quad (7-5)$$

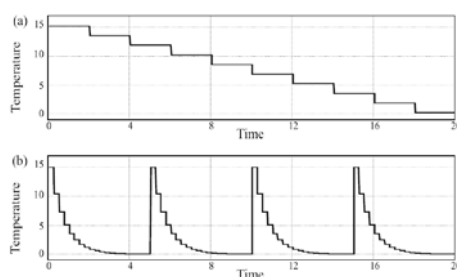
که در آن  $w_{i,j}$  وزن شبکه ها می باشد و  $\lambda$  نرخ تنظیم می باشد:

$$\lambda = \frac{y[n]}{x[1]} \quad (8-5)$$

$u \in [0, 1]$  متغیر تصادفی با توزیع یکنواخت می باشد و  $\lambda$  وابسته به محدوده وزن هاست. برای دمای

$y[n]$  نزدیک به دمای اولیه  $x[1]$ ،  $\lambda$  مقداری در حدود ۱ خواهد داشت. همانطور که درجه حرارت

کاهش می یابد، وزن های شبکه در اطراف یک مقدار ثابت به صورت تصادفی تغییر می کنند [۱۶].



شکل ۵-۳- پروتکل های تغییر حرارت در الگوریتم SA بر اساس (الف) سرمایش خطی (ب) چرخه های دمایی [۱۶، ۱۷]

#### ۵-۴- کاربرد ANN و ANN/SA در مهندسی ژئوتکنیک

در آمار، با استفاده از آنالیز رگرسیون رابطه نا معلوم بین یک متغیر وابسته به تعداد زیادتری متغیر غیر وابسته پیش بینی می شود. یکی از کارآمدترین روش هایی که می توان برای رگرسیون بکار برد استفاده از ANN و شاخه های آن مانند ANN/SA است. همان طور که قبلاً ذکر شد استفاده از ANN در چند سال اخیر برای تحلیل انواع مختلف مسائل مهندسی به شدت گسترش یافته است. به ویژه این که ANN کاربرد بسیار موفقیت آمیزی در تعداد زیادی از مسائل مهندسی ژئوتکنیک داشته و توانسته است به آسانی بسیاری از مسائل پیچیده را حل نموده و مشکلات ناشی از انجام آزمایش های پیشرفته و پرهزینه را برطرف سازد. با مروری بر تحقیقات انجام شده مشاهده می شود که استفاده از ANN در مسائل مختلف نتایج قابل قبولی داشته است، از جمله نشست پی ها [۴۵]، توان باربری شمع [۴۶]، طبقه بندی خاک [۴۷]، مقاومت برشی خاک [۴۸]، ارزیابی وقوع روان گرایی با مفهوم انرژی کرنشی [۴۹] و تراکم خاک و نفوذپذیری [۵۰]. در مقایسه با ANN، روش ANN/SA تا کنون فقط یک بار



در زمینه مهندسی عمران بکار گرفته شده است و لذا روش بسیار جدیدی برای مدلسازی رفتار مسائل مهندسی محسوب می شود [۱۷]. در مطالعه صورت گرفته توسط علوی و گندمی [۱۷]، ANN/SA برای استخراج معادلات جدید پیش بینی حرکات زمین (GMPEs) مورد استفاده قرار گرفت. پارامترهای اصلی حرکات زمین که فرمول بندی شدند عبارت بودند از حداکثر شتاب زمین (PGA)، حداکثر سرعت زمین (PGV) و حداکثر جابجایی زمین (PGD). مدل های پیشنهادی PGA، PGV و PGD را به پارامترهای لرزه ای مختلفی از جمله بزرگی زلزله، فاصله منبع تا سایت زلزله، متوسط سرعت موج برشی، و مکانیزم های گسلش ارتباط می دهند [۱۷].

در زمینه ظرفیت باربری پی، پادمینی و همکاران [۱۱] اخیرا سیستم فازی-عصبی (ANFIS) را برای پیش بینی ظرفیت باربری نهایی پی های کم عمق روی خاک بدون چسبندگی ارائه کردند. ANFIS وضوح و ارائه مناسب سیستم فازی را با قدرت فراگیری ANN ترکیب می کند. پادمینی و همکاران [۱۱] مطالعه ای مقایسه ای بین ANFIS و ANN و سیستم فازی (FIS) برای پیش بینی ظرفیت باربری نهایی انجام دادند. علاوه بر این، کو و همکاران [۵۱] از ANNs برای پیش بینی ظرفیت باربری پی های نواری بر روی خاک های چسبنده چند لایه استفاده کردند.



## فصل ششم:

# مدل سازی ظرفیت باربری پی های سطحی

## ۶-۱- مقدمه

ظرفیت باربری نهایی، مساله ای پیچیده است که شامل تعداد زیادی متغیر می گردد. در تخمین ظرفیت باربری پی های سطحی واقع بر خاک های دانه ای نیاز به پارامترهای متعددی است. جداسازی اثر این متغیرها بر ظرفیت باربری کار دشواری است. به منظور جلوگیری از نیاز بر آزمایشات زمانبر و مهمتر، نیاز بر الگویی مناسب بر اساس نتایج تجربی در هر موقعیت ساخت و ساز جدید، نیاز به توسعه مدل های ریاضی است که قادر باشند ظرفیت باربری پی ها را با استفاده از مشخصات طبیعی خاک و ویژگیهای هندسی پی، پیش بینی نماید. تحقیقات بسیار اندکی برپایه استفاده از این مشخصات برای پیش بینی ظرفیت باربری انجام گردیده است در حالی که مطالعات بیشتری در زمینه روش های کلاسیک صورت گرفته است. فرم معادلات گزارش شده توسط دیگر پژوهشگران شبیه فرم اصلی ارائه شده توسط ترزاقی است. بعد از انجام تست های آزمایشگاهی و در محل، میرهوف، هانسن، وسیک، و چندین پژوهشگر دیگر فرمول های متفاوتی برای ظرفیت باربری با در نظر گرفتن شکل، عمق وزاویه زمین و فاکتورهای اساسی دیگر ارائه کردند. در هر صورت، مشکل اساسی فرمول های کلاسیک این است که فرضیات ساده شده ای در بسط این فرمول ها در نظر گرفته شده است که منجر به این می شود که این فرمول ها تخمین های قابل اعتمادی از ظرفیت باربری پی بدست ندهند [۹، ۱۱].

به منظور تخمین دقیق ظرفیت باربری پی های سطحی اثر پارامترهای متعددی بایستی در نظر گرفته شود. با توجه به ساختار معادلات کلاسیک، ظرفیت باربری پی عمدتاً تابعی از هندسه پی و مشخصات خاک زیر آن می باشد [۵]. عرض، طول، شکل و عمق مهمترین پارامترهای مربوط به هندسه پی می باشند. اثر قابل توجه مشخصات فیزیکی خاک، نظیر وزن مخصوص و زاویه اصطکاک داخلی آن بر ظرفیت باربری پی به خوبی درک شده است [۵]. هدف اصلی این تحقیق استخراج رابطه هایی جدید برای تخمین ظرفیت باربری نهایی پی های سطحی ( $q_{ult}$ ) بر حسب پارامترهای مربوط به هندسه پی و خصوصیات فیزیکی خاک با استفاده از تکنیک ANN/SA است. بر اساس تحقیقات انجام شده،  $q_{ult}$  (kPa) می تواند تابع پارامترهای مختلفی به صورت زیر باشد:

$$q_{ult} = f(B, D, L/B, \gamma, \phi) \quad (1-6)$$

در رابطه فوق پارامترهای به کاررفته به شرح زیر می باشند:

B (m): عرض پی

D (m): عمق پی

L/B: نسبت طول به عرض پی

$\gamma$  (kN/m<sup>3</sup>): وزن مخصوص خاک

$\phi$  (°): زاویه اصطکاک داخلی خاک

انتخاب متغیرهای فوق بر اساس مطالعه گسترده ادبیات فنی است [۹-۱۱، ۱۱].

## ۲-۶- مدل سازی ظرفیت باربری پی های سطحی با استفاده از تکنیک ANN/SA

### ۲-۶-۱- بانک داده ها

مدل موجود براساس داده های جامعی که از متون فنی بدست آمده است، بسط یافته است. داده ها شامل ۹۷ نتیجه آزمایشگاهی حاصل از مطالعات جداگانه می باشد. داده ها شامل ۴۷ آزمایش

بارگذاری در مقیاس بزرگ و ۵۰ آزمایش در مقیاس کوچک می باشند. نتایج آزمایشات در مقیاس بزرگ توسط موهس و همکاران [۵۲]، ویب [۵۳]، موهس و ویب [۵۴، ۵۵]، براید و گیبنز [۵۶] و آزمایشات در مقیاس کوچک توسط گاندی [۵۷] گزارش شده اند (جدول (۶-۱)). داده های مورد نظر در مطالعات پدمینی و همکاران [۱۱] برای مدلسازی با شبکه عصبی مصنوعی نیز مورد استفاده قرار گرفته است. جدول (۶-۱) کل داده های به کار رفته در بسط مدل های ظرفیت باربری پی های سطحی را نشان می دهد. این داده ها در بازه زمانی طولانی در پی آزمایشات گوناگونی به دست آمده اند و به دلیل مورد استفاده قرار گرفتن در مقالات و متون علمی متعدد دارای اعتبار بسیار زیاد می باشند. تمامی نتایج آزمایشگاهی بر روی خاک طبیعی دست نخورده و به صورت در جا صورت گرفته است. ظرفیت باربری نهایی در مطالعه حاضر، به عنوان خروجی مدل در نظر گرفته شده است. نحوه توزیع داده ها یا ورودی های مختلف نیز در هیستوگرام های شکل (۶-۱) نشان داده شده است. شرح آماری پارامترهای ورودی و خروجی در جدول (۶-۲) نشان داده شده است.

جدول ۶-۱- کل داده های به کار رفته در بسط مدل های ظرفیت باربری پی های سطحی تحت بار

قائم واقع بر خاک های دانه ای

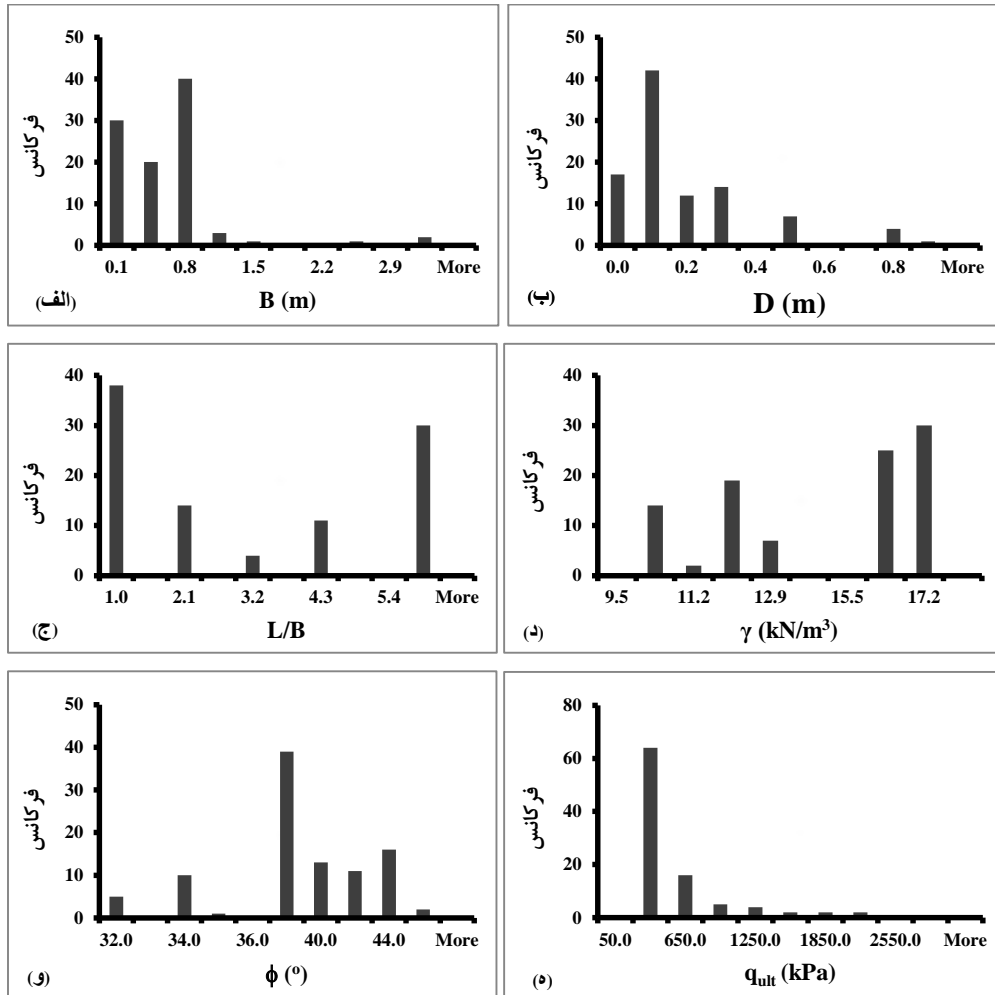
| شماره | مرجع                | B<br>(m) | D<br>(m) | L/B | $\gamma_d$ or $\gamma'$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $\phi$<br>(deg) | $q_u$<br>(kPa) |
|-------|---------------------|----------|----------|-----|---|-----------------|----------------|
| 1     | موهس و همکاران [۵۲] | 0.6      | 0.3      | 2   | 9.85  | 34.9            | 270            |
| 2     |                     | 0.6      | 0        | 2   | 10.2  | 37.7            | 200            |
| 3     |                     | 0.6      | 0.3      | 2   | 10.2  | 37.7            | 570            |
| 4     |                     | 0.6      | 0        | 2   | 10.85   | 44.8            | 860            |
| 5     |                     | 0.6      | 0.3      | 2   | 10.85   | 44.8            | 1760           |
| 6     | ویب [۵۳]            | 0.5      | 0        | 1   | 10.2  | 37.7            | 154            |
| 7     |                     | 0.5      | 0        | 1   | 10.2  | 37.7            | 165            |
| 8     |                     | 0.5      | 0        | 2   | 10.2  | 37.7            | 203            |
| 9     |                     | 0.5      | 0        | 2   | 10.2  | 37.7            | 195            |
| 10    |                     | 0.5      | 0        | 3   | 10.2  | 37.7            | 214            |

|    |                 |      |       |      |       |      |      |
|----|-----------------|------|-------|------|-------|------|------|
| 11 |                 | 0.52 | 0     | 3.85 | 10.2  | 37.7 | 186  |
| 12 |                 | 0.5  | 0.3   | 1    | 10.2  | 37.7 | 681  |
| 13 |                 | 0.5  | 0.3   | 2    | 10.2  | 37.7 | 542  |
| 14 |                 | 0.5  | 0.3   | 2    | 10.2  | 37.7 | 530  |
| 15 |                 | 0.5  | 0.3   | 3    | 10.2  | 37.7 | 402  |
| 16 |                 | 0.52 | 0.3   | 3.85 | 10.2  | 37.7 | 413  |
| 17 | موهس و ویب [۵۴] | 0.5  | 0     | 1    | 11.7  | 37   | 111  |
| 18 |                 | 0.5  | 0     | 1    | 11.7  | 37   | 132  |
| 19 |                 | 0.5  | 0     | 2    | 11.7  | 37   | 143  |
| 20 |                 | 0.5  | 0.013 | 1    | 11.7  | 37   | 137  |
| 21 |                 | 0.5  | 0.029 | 4    | 11.7  | 37   | 109  |
| 22 |                 | 0.5  | 0.127 | 4    | 11.7  | 37   | 187  |
| 23 |                 | 0.5  | 0.3   | 1    | 11.7  | 37   | 406  |
| 24 |                 | 0.5  | 0.3   | 1    | 11.7  | 37   | 446  |
| 25 |                 | 0.5  | 0.3   | 4    | 11.7  | 37   | 322  |
| 26 |                 | 0.5  | 0.5   | 2    | 11.7  | 37   | 565  |
| 27 |                 | 0.5  | 0.5   | 4    | 11.7  | 37   | 425  |
| 28 |                 | 0.5  | 0     | 1    | 12.41 | 44   | 782  |
| 29 |                 | 0.5  | 0     | 4    | 12.41 | 44   | 797  |
| 30 |                 | 0.5  | 0.3   | 1    | 12.41 | 44   | 1940 |
| 31 |                 | 0.5  | 0.3   | 1    | 12.41 | 44   | 2266 |
| 32 |                 | 0.5  | 0.5   | 2    | 12.41 | 44   | 2847 |
| 33 |                 | 0.5  | 0.5   | 4    | 12.41 | 44   | 2033 |
| 34 |                 | 0.5  | 0.49  | 4    | 12.27 | 42   | 1492 |
| 35 |                 | 0.5  | 0     | 1    | 11.77 | 37   | 123  |
| 36 |                 | 0.5  | 0     | 2    | 11.77 | 37   | 134  |
| 37 |                 | 0.5  | 0.3   | 1    | 11.77 | 37   | 370  |
| 38 |                 | 0.5  | 0.5   | 2    | 11.77 | 37   | 464  |
| 39 |                 | 0.5  | 0     | 4    | 12    | 40   | 461  |
| 40 |                 | 0.5  | 0.5   | 4    | 12    | 40   | 1140 |
| 41 | موهس و ویب [۵۵] | 1    | 0.2   | 3    | 11.97 | 39   | 710  |
| 42 |                 | 1    | 0     | 3    | 11.93 | 40   | 630  |

|           |                    |        |       |      |      |       |        |
|-----------|--------------------|--------|-------|------|------|-------|--------|
| <b>43</b> | براید و گیبنز [۵۶] | 0.991  | 0.711 | 1    | 15.8 | 32    | 1773.7 |
| <b>44</b> |                    | 3.004  | 0.762 | 1    | 15.8 | 32    | 1019.4 |
| <b>45</b> |                    | 2.489  | 0.762 | 1    | 15.8 | 32    | 1158   |
| <b>46</b> |                    | 1.492  | 0.762 | 1    | 15.8 | 32    | 1540   |
| <b>47</b> |                    | 3.016  | 0.889 | 1    | 15.8 | 32    | 1161.2 |
| <b>48</b> | گاندى [۵۷]         | 0.0585 | 0.029 | 5.95 | 15.7 | 34    | 58.5   |
| <b>49</b> |                    | 0.0585 | 0.058 | 5.95 | 15.7 | 34    | 70.91  |
| <b>50</b> |                    | 0.0585 | 0.029 | 5.95 | 16.1 | 37    | 82.5   |
| <b>51</b> |                    | 0.0585 | 0.058 | 5.95 | 16.1 | 37    | 98.93  |
| <b>52</b> |                    | 0.0585 | 0.029 | 5.95 | 16.5 | 39.5  | 121.5  |
| <b>53</b> |                    | 0.0585 | 0.058 | 5.95 | 16.5 | 39.5  | 142.9  |
| <b>54</b> |                    | 0.0585 | 0.029 | 5.95 | 16.8 | 41.5  | 157.5  |
| <b>55</b> |                    | 0.0585 | 0.058 | 5.95 | 16.8 | 41.5  | 184.9  |
| <b>56</b> |                    | 0.0585 | 0.029 | 5.95 | 17.1 | 42.5  | 180.5  |
| <b>57</b> |                    | 0.0585 | 0.058 | 5.95 | 17.1 | 42.5  | 211    |
| <b>58</b> |                    | 0.094  | 0.047 | 6    | 15.7 | 34    | 74.7   |
| <b>59</b> |                    | 0.094  | 0.094 | 6    | 15.7 | 34    | 91.5   |
| <b>60</b> |                    | 0.094  | 0.047 | 6    | 16.1 | 37    | 104.8  |
| <b>61</b> |                    | 0.094  | 0.094 | 6    | 16.1 | 37    | 127.5  |
| <b>62</b> |                    | 0.094  | 0.047 | 6    | 16.5 | 39.5  | 155.8  |
| <b>63</b> |                    | 0.094  | 0.094 | 6    | 16.5 | 39.5  | 185.6  |
| <b>64</b> |                    | 0.094  | 0.047 | 6    | 16.8 | 41.5  | 206.8  |
| <b>65</b> |                    | 0.094  | 0.094 | 6    | 16.8 | 41.5  | 244.6  |
| <b>66</b> |                    | 0.094  | 0.047 | 6    | 17.1 | 42.5  | 235.6  |
| <b>67</b> |                    | 0.094  | 0.094 | 6    | 17.1 | 42.5  | 279.6  |
| <b>68</b> |                    | 0.152  | 0.075 | 5.95 | 15.7 | 34    | 98.2   |
| <b>69</b> |                    | 0.152  | 0.15  | 5.95 | 15.7 | 34    | 122.3  |
| <b>70</b> |                    | 0.152  | 0.075 | 5.95 | 16.1 | 37    | 143.3  |
| <b>71</b> |                    | 0.152  | 0.15  | 5.95 | 16.1 | 37    | 176.4  |
| <b>72</b> | 0.152              | 0.075  | 5.95  | 16.5 | 39.5 | 211.2 |        |
| <b>73</b> | 0.152              | 0.15   | 5.95  | 16.5 | 39.5 | 254.5 |        |
| <b>74</b> | 0.152              | 0.075  | 5.95  | 16.8 | 41.5 | 285.3 |        |



|           |  |       |       |      |      |      |       |
|-----------|--|-------|-------|------|------|------|-------|
| <b>75</b> |  | 0.152 | 0.15  | 5.95 | 16.8 | 41.5 | 342.5 |
| <b>76</b> |  | 0.152 | 0.075 | 5.95 | 17.1 | 42.5 | 335.3 |
| <b>77</b> |  | 0.152 | 0.15  | 5.95 | 17.1 | 42.5 | 400.6 |
| <b>78</b> |  | 0.094 | 0.047 | 1    | 15.7 | 34   | 67.7  |
| <b>79</b> |  | 0.094 | 0.094 | 1    | 15.7 | 34   | 90.5  |
| <b>80</b> |  | 0.094 | 0.047 | 1    | 16.1 | 37   | 98.8  |
| <b>81</b> |  | 0.094 | 0.094 | 1    | 16.1 | 37   | 131.5 |
| <b>82</b> |  | 0.094 | 0.047 | 1    | 16.5 | 39.5 | 147.8 |
| <b>83</b> |  | 0.094 | 0.094 | 1    | 16.5 | 39.5 | 191.6 |
| <b>84</b> |  | 0.094 | 0.047 | 1    | 16.8 | 41.5 | 196.8 |
| <b>85</b> |  | 0.094 | 0.094 | 1    | 16.8 | 41.5 | 253.6 |
| <b>86</b> |  | 0.094 | 0.047 | 1    | 17.1 | 42.5 | 228.8 |
| <b>87</b> |  | 0.094 | 0.094 | 1    | 17.1 | 42.5 | 295.6 |
| <b>88</b> |  | 0.152 | 0.075 | 1    | 15.7 | 34   | 91.2  |
| <b>89</b> |  | 0.152 | 0.15  | 1    | 15.7 | 34   | 124.4 |
| <b>90</b> |  | 0.152 | 0.075 | 1    | 16.1 | 37   | 135.2 |
| <b>91</b> |  | 0.152 | 0.15  | 1    | 16.1 | 37   | 182.4 |
| <b>92</b> |  | 0.152 | 0.075 | 1    | 16.5 | 39.5 | 201.2 |
| <b>93</b> |  | 0.152 | 0.15  | 1    | 16.5 | 39.5 | 264.5 |
| <b>94</b> |  | 0.152 | 0.075 | 1    | 16.8 | 41.5 | 276.3 |
| <b>95</b> |  | 0.152 | 0.15  | 1    | 16.8 | 41.5 | 361.5 |
| <b>96</b> |  | 0.152 | 0.075 | 1    | 17.1 | 42.5 | 325.3 |
| <b>97</b> |  | 0.152 | 0.15  | 1    | 17.1 | 42.5 | 423.6 |



شکل ۶-۱- هیستو گرام های فرکانس مقادیر ورودی های مختلف

جدول ۶-۲- شرح آماری نتایج و متغیرهای مورد استفاده در مدلسازی

| پارامتر        | B<br>(m) | D<br>(m) | L/B   | $\gamma_d$ یا $\gamma'$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $\phi$<br>(°) | $q_{ult}$<br>(kPa) |
|----------------|----------|----------|-------|---|---------------|--------------------|
| میانگین        | 0.402    | 0.165    | 3.100 | 14.181  | 38.553        | 439.617            |
| خطای استاندارد | 0.052    | 0.020    | 0.217 | 0.266   | 0.333         | 53.903             |
| انحراف معیار   | 0.511    | 0.200    | 2.140 | 2.623   | 3.277         | 530.879            |

|                |       |       |       |        |        |            |
|----------------|-------|-------|-------|--------|--------|------------|
| پراش (واریانس) | 0.261 | 0.040 | 4.578 | 6.880  | 10.741 | 281832.400 |
| چولگی          | 3.603 | 1.774 | 0.373 | -0.355 | -0.034 | 2.468      |
| دامنه          | 2.958 | 0.889 | 5.000 | 7.250  | 12.800 | 2788.500   |
| کمینه          | 0.059 | 0.000 | 1.000 | 9.850  | 32.000 | 58.500     |
| بیشینه         | 3.016 | 0.889 | 6.000 | 17.100 | 44.800 | 2847.000   |

### ۶-۲-۲- بسط مدل طراحی ظرفیت باربری پی با استفاده از ANN/SA

داده های موجود برای بسط مدل هایی که بتوانند ظرفیت باربری نهایی را به ویژگی های هندسی پی و خصوصیات خاک دانه ای ارتباط دهند، به کار رفته اند. برای تحلیل، اطلاعات موجود به دو دسته آموزش<sup>۱</sup> (یادگیری<sup>۲</sup> و اعتبار سنجی<sup>۳</sup>) و آزمایش<sup>۴</sup> تقسیم شده اند. داده های یادگیری برای آموزش الگوریتم استفاده شده اند. داده های صحت سنجی برای مشخص کردن قابلیت عمومی سازی مدل ها بر روی داده هایی که شبکه بر روی آن ها آموزش ندیده است استفاده شده اند. در نتیجه هر دو دسته داده های یادگیری و صحت سنجی در روند مدلسازی دخیل بوده اند و می توانند در یک گروه به نام داده های آموزش طبقه بندی شوند. داده های آزمایش نیز برای بررسی عملکرد مدل ها بر روی داده هایی که هیچ نقشی در ساخت مدل نداشته اند استفاده شده اند [۱۷]. برای دستیابی به تقسیم بندی مناسب داده ها، ترکیب های مختلف دسته های آموزش (یادگیری و صحت سنجی) و آزمایش مورد

<sup>1</sup> Training

<sup>2</sup> Learning

<sup>3</sup> Validation

<sup>4</sup> Testing

بررسی قرار گرفته اند. انتخاب به گونه ای بوده است که حداکثر، حداقل و انحراف معیار پارامترها در مجموعه های آموزش، اعتبار سنجی و آزمایش با هم مطابقت داشته باشد. از میان ۹۷ داده ارائه شده در ادبیات فنی، ۶۸ داده برای یادگیری، ۱۰ داده برای صحت سنجی و ۱۹ داده برای آزمایش نهایی مدل ها به کار رفته اند.

پارامترهای مختلفی در الگوریتم SA وجود دارند که انتخاب آنها به شدت بر عملکرد الگوریتم اثر می گذارد. مقادیر در نظر گرفته شده برای این پارامترها بر اساس مطالعه ادبیات فنی [۱۶، ۱۷] و نیز سعی و خطای گسترده بوده است. پروتکل های چرخه دمایی و سرمایه گذاری خطی برای آموزش الگوریتم در نظر گرفته شد. بهترین نتایج با  $k = 1500$ ، دمای اولیه ۱۵ و دمای نهایی ۰/۰۱۵ حاصل شد. تعداد چرخه ها ۱۰، ۲۰ و ۵۰ و دفعات تکرار اجرای الگوریتم ۱۰، ۱۵ و ۲۰ در نظر گرفته شدند.

یکی از پرکاربردترین ساختارهای ANN با نام MLP برای پیش بینی Qult به کار رفته است. عملکرد MLP بشدت وابسته به ساختار شبکه و تنظیم پارامتر است. انتخاب تعداد لایه های پنهان، گره ها، نرخ یادگیری و اپوک ها و نوع تابع فعال سازی نقش مهمی را در ساخت مدل بازی می کند. توانایی MLP یک لایه برای تخمین هر تابع پیوسته و غیر خطی بر اساس قضیه تقریب جهانی<sup>۱</sup> توسط محققین اثبات گردیده است [۳۷]. در این مطالعه، مدل های متعددی با تنظیمات گوناگون برای رسیدن به ترکیب بهینه آموزش دیدند. الگوریتم های مزدوج-گرادیان<sup>۲</sup> و لوبنرگ مارکواردت<sup>۳</sup> نیز در

<sup>1</sup> Universal Approximation Theorem

<sup>2</sup> Conjugate-Gradient

<sup>3</sup> Levenberg-Marquardt

آموزش مدل ها در نظر گرفته شدند. بهترین نتایج با الگوریتم مزدوج-گرادیان به دست آمد. تابع

لگاریتمیک سیگموئید با ساختار  $(\frac{1}{1+e^{-x}})$  به عنوان تابع محرک بین لایه ورودی و پنهان به کار

گرفته شد. تابع خطی<sup>۱</sup> نیز برای لایه پنهان و خروجی استفاده شد. به منظور اجرای الگوریتم

ANN/SA از برنامه کامپیوتری Neural-Lab program نسخه ۳,۱ استفاده شد [۵۸].

وزن ها و بایاس ها در شبکه عصبی در هر اجرای برنامه تغییر می کنند. این مساله باعث می شود

حتی اگر الگوریتم با پارمترهای خاص مجدد اجرا شود نتایج متفاوتی حاصل شود. برای حل این مساله،

وزن ها و بایاس های بهترین مدل حاصل ذخیره شدند. مدل های ANN و ANN/SA غالباً به

دلیل ناتوانی در توضیح اصول زیر ساختی شان برای پیش بینی، به عنوان جعبه های سیاه شناخته می

شوند. برای غلبه بر این محدودیت، وزن ها و بایاس های ذخیره شده مدل بهینه با استفاده از رابطه

زیر به معادله طراحی نسبتاً ساده ای برگردانده شد:

$$h = f_{HO} \left( bias_h + \sum_{k=1}^h V_k f_{IH} \left( bias_{hk} + \sum_{i=1}^m w_{ik} x_i \right) \right) \quad (2-6)$$

که  $h$  خروجی مدل،  $bias_h$  بایاس لایه پنهان،  $V_k$  وزن اتصال بین نرون  $k$  و نرون خروجی،  $bias_{hk}$

بایاس در نرون  $k$  ( $k=1, h$ )، وزن اتصال بین ورودی ( $i=1, m$ ) و نرون  $k$  از لایه پنهان،  $x_i$  متغیر

ورودی،  $f_{HO}$  تابع محرک بین لایه پنهان و خروجی، و  $f_{IH}$  تابع محرک بین لایه ورودی و پنهان می

<sup>۱</sup> Purelin

باشند.

مطالعه آزمایشی (سعی و خطا) گسترده ای برای تعیین موثرترین ورودی ها برای مدل های ANN/SA انجام شد. مدل های متفاوتی با در نظر گرفتن ترکیب های مختلف از متغیرهای تاثیرگذار  $B, D, L/B, \gamma$  و  $\phi$  بسط داده شد. نمودارها و نتایج نشان داده شده نیز برای ترکیبی از ورودی هاست که بهترین نتیجه را بر روی تمام داده ها بدست داده است. به منظور ارزیابی عملکرد مدل های ارائه شده از ضریب تعیین  $R^2$ <sup>۱</sup>، مجذور میانگین مربعات خطا  $(RMSE)$ <sup>۲</sup>، میانگین کلی خطا  $(MAE)$ <sup>۳</sup> استفاده شده اند که از فرمول های ارائه شده محاسبه می شوند:

$$R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h}_i)(t_i - \bar{t}_i) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h}_i)^2 \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t}_i)^2} \quad (۳-۶)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - t_i)^2}{n}} \times 100 \quad (۴-۶)$$

$$MAE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_i - t_i| \right] \times 100 \quad (۵-۶)$$

که  $h_i$  و  $t_i$  به ترتیب مقادیر واقعی و پیش بینی شده برای  $i$  امین خروجی هستند.  $\bar{h}_i$  و  $\bar{t}_i$  به ترتیب میانگین خروجی واقعی و پیش بینی شده و  $n$  شماره نمونه است.

<sup>۱</sup>-Determination Coefficient

<sup>۲</sup>-Root Mean Squared Error

<sup>۳</sup>-Mean Absolute Error

### ۳-۲-۶- روش نرمالیزاسیون برای مدل های ANN/SA

گام مهم در آموزش ANN/SA مقیاس کردن داده هاست [۱۷]. در مطالعه حاضر توابع لگ - سیگموئید به عنوان توابع محرک انتخاب شده اند. این توابع خروجی را بین ۰ و ۱ نگه می دارند. نرمالیزاسیون ورودی ها بین (۱ و ۰) باعث افزایش سرعت آموزش می شود. از فرمول زیر برای نرمالیزه

کردن ورودی ها در محدوده  $[U, L]$  استفاده شده است [۱۷]:

$$X_n = ax + b \quad (۶-۶)$$

به طوری که:

$$a = \frac{U - L}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (۷-۶)$$

$$b = U - aX_{\max} \quad (۸-۶)$$

در روابط فوق:

$X_n$  : عدد نرمالیزه شده از ورودی  $X_i$  است.

$X_{\max}$  و  $X_{\min}$  : به ترتیب نمایانگر کمترین و بیشترین مقادیر  $X_i$  می باشند.

در تحقیق حاضر  $L = 0.05$  و  $U = 0.95$  در نظر گرفته شد.

### ۴-۲-۶- مدل ANN/SA برای پیش بینی $q_{ult}$

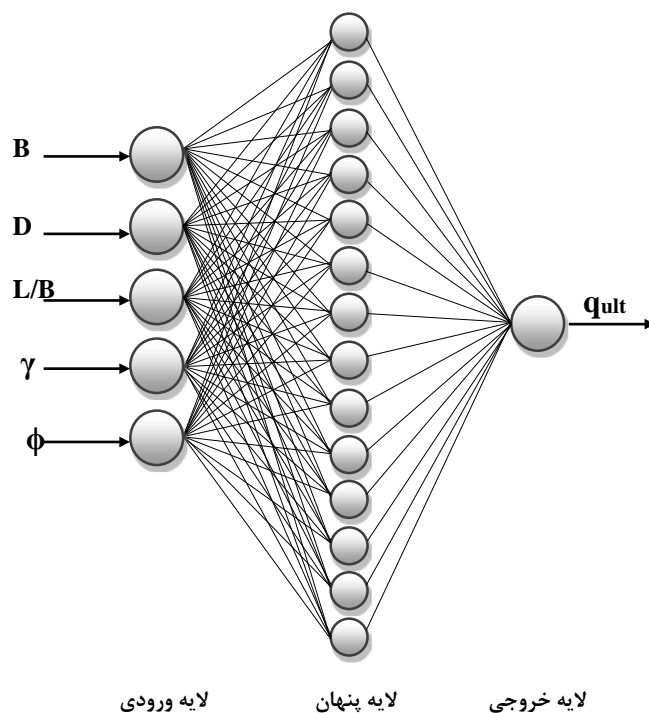
مدل های ANN/SA متفاوتی با پارامترهای ورودی متفاوت بسط داده شدند. بر اساس آنالیزهای

انجام شده، بهترین مدل ANN/SA برای پیش بینی  $q_{ult}$  (kPa) با مشخصات زیر می باشد:

- ۵ متغیر ( $B, D, L/B, \gamma$  و  $\phi$ ) همراه با یک بایاس ورودی های این مدل بهینه می باشند.
- همچنین این مدل بهینه دارای یک لایه پنهان با ۱۴ نرون می باشد.
- لایه خروجی نیز دارای یک نرون می باشد.

۸۰۰۰ اپوک برای ساختن این مدل در نظر گرفته شد. ساختار این مدل در شکل (۶-۲) نشان داده

شده است.



شکل ۶-۲- ساختار بهترین مدل ANN/SA برای پیش بینی  $q_{ult}$

در نهایت، فرمولاسیون  $q_{ult}$  (kPa) با استفاده از پارامترهای ورودی و توابع انتقالی به صورت زیر

است:



$$q_{ult} \text{ (kPa)} = -3098.33 \left( bias_h + \sum_{k=1}^{14} \frac{V_k}{1 + e^{-F}} \right) + 3001.92 \quad (9-6)$$

به طوری که:

$$(10-6)$$

$$F_k = B_n \times W_{1k} + D_n \times W_{2k} + L/B_n \times W_{3k} + \gamma \times W_{4k} + \Phi \times W_{5k} + bias_k$$

در فرمول فوق:

$k$ : تعداد نرون های لایه پنهان

$V_k$ : وزن های لایه پنهان

$Bias_h$ : بایاس لایه پنهان

$W_k$ : وزن های لایه ورودی

$Bias_k$ : بایاس های لایه ورودی

$B_n$ : عرض پی نرمالیزه شده با استفاده از فرمول (6-6)

$D_n$ : عمق پی نرمالیزه شده با استفاده از فرمول (6-6)

$L/B_n$ : نسبت طول به عرض پی نرمالیزه شده با استفاده از فرمول (6-6)

$\gamma_n$ : وزن مخصوص خاک نرمالیزه شده با استفاده از فرمول (6-6)

$\phi_n$ : زاویه اصطکاک داخلی خاک نرمالیزه شده با استفاده از فرمول (6-6)

مقدیر وزن ها و بایاس های موجود در رابطه (9-6) در جداول 3-6 و 4-6 نشان داده شده اند.

جدول ۳-۶- مقادیر وزن ها و بایاس های بین لایه ورودی و پنهان

| وزن ها   | تعداد نرون های پنهان ( $k$ ) |        |        |        |        |        |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          | 1                            | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    |
| $W_{1k}$ | -2.184                       | -2.431 | 2.319  | 3.171  | 2.811  | -5.022 | -     | 1.418 | -     | 2.594 | -     | 2.990 | 1.977 | 1.176 |
| $W_{2k}$ | -1.217                       | 2.452  | -6.432 | 4.288  | 0.250  | -5.628 | -     | 0.963 | -     | 0.361 | -     | 6.914 | 2.259 | -     |
| $W_{3k}$ | -3.578                       | 1.081  | 5.676  | -2.805 | 2.073  | -1.635 | 0.021 | -     | -     | 0.192 | -     | 1.703 | -     | -     |
| $W_{4k}$ | -0.310                       | 0.343  | -0.319 | 12.983 | 0.645  | 1.887  | -     | -     | -     | 1.640 | 1.476 | -     | -     | 1.432 |
| $W_{5k}$ | -3.765                       | -0.888 | -7.493 | -0.455 | -1.402 | 1.914  | 3.862 | -     | 8.919 | 2.290 | 0.511 | -     | -     | 1.855 |
| $bias_k$ | -2.184                       | -2.431 | 2.319  | 3.171  | 2.811  | -5.022 | -     | 1.418 | -     | 2.594 | -     | 2.990 | 1.977 | 1.176 |

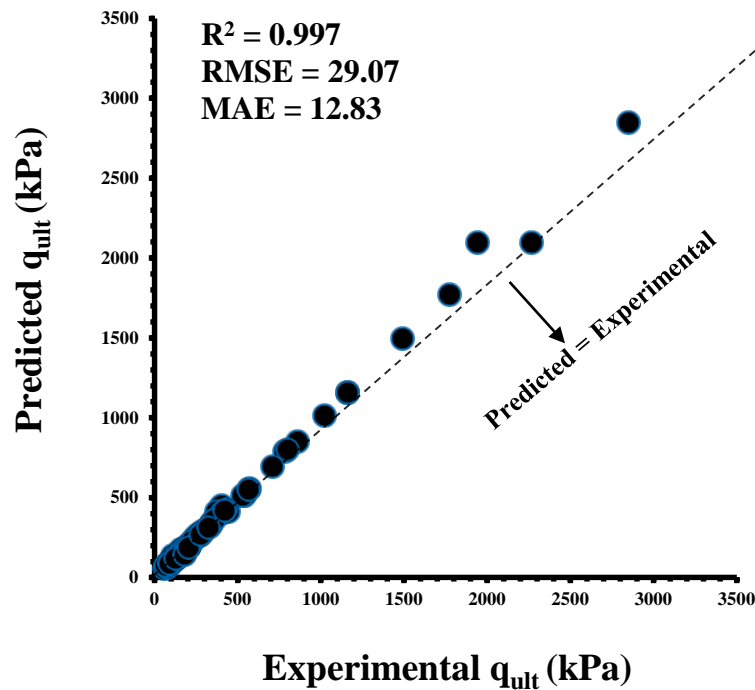
جدول ۴-۶- مقادیر وزن ها و بایاس های بین لایه پنهان و خروجی

| وزن ها   | تعداد نرون های پنهان ( $k$ ) |        |        |         |        |        |       |        |        |       |        |       |       |        |
|----------|------------------------------|--------|--------|---------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|
|          | 1                            | 2      | 3      | 4       | 5      | 6      | 7     | 8      | 9      | 10    | 11     | 12    | 13    | 14     |
| $V_k$    | -1.105                       | -0.958 | -3.936 | -11.531 | -0.445 | -4.325 | 4.818 | -1.223 | -4.309 | 4.551 | -0.787 | 6.835 | 3.754 | -2.218 |
| $bias_h$ | 0.7306                       |        |        |         |        |        |       |        |        |       |        |       |       |        |

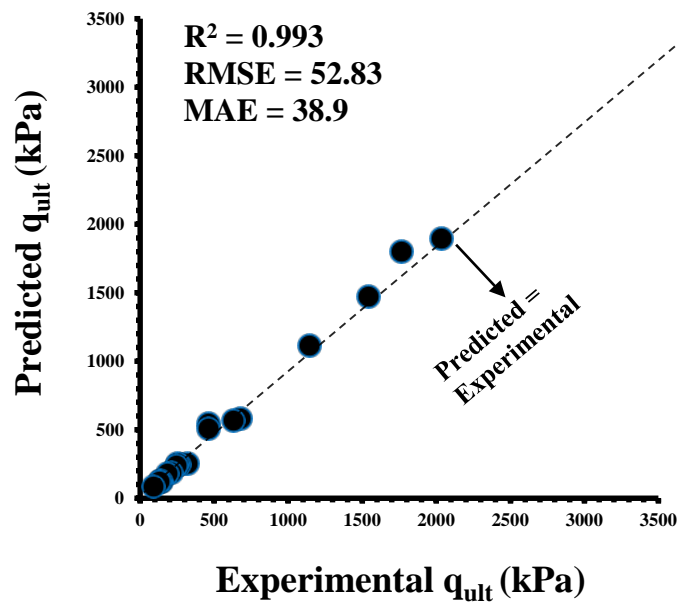
نتایج پیش بینی شده به وسیله بهترین مدل ANN/SA برای داده های آموزش و آزمایش در شکل

های (۳-۶) و (۴-۶) نمایش داده شده اند. همانطور که مشاهده می شود مدل های ارائه شده  $R^2$  بالایی

برابر با ۰/۹۹۷ و ۰/۹۹۳ به ترتیب برای داده های آموزش (یادگیری و صحت سنجی) و آزمایش به دست می دهد. طبیعتاً، هر چه مقدار  $R^2$  به ۱ نزدیک تر و تراکم حول خط قطری (تبادل) بیشتر باشد دقت مدت بالاتر خواهد بود.



شکل ۶-۳- نتایج پیش بینی ظرفیت باربری نهایی ( $q_{ult}$ ) بر حسب کیلو پاسکال به وسیله بهترین مدل  $ANN/SA$  برای داده های آموزش



شکل ۶-۴- نتایج پیش بینی ظرفیت باربری نهایی ( $q_{ult}$ ) بر حسب کیلو پاسکال به وسیله بهترین

مدل  $ANN/SA$  برای داده های آزمایش

#### ۶-۲-۵- مثال طراحی

یک مثال طراحی روشن و گویا برای توضیح روش استفاده از رابطه (۶-۹) تهیه شده است. برای این

منظور یکی از نمونه ها برای آزمایش مدل انتخاب شده است. مقادیر ورودی های مرتبط با این پی به

این ترتیب است:  $B=0.094m$ ,  $D=0.094m$ ,  $L/B=6$ ,  $\gamma=15.7 \text{ kN/m}^3$  و  $\phi=91.5^\circ$ .

روند طراحی برای تعیین  $q_{ult}$  به سه قسمت تقسیم می شود: (۱) نرمالیزه کردن مقادیر ورودی (۲)

محاسبات لایه پنهان (۳) پیش بینی  $q_{ult}$

این سه گام به صورت زیر است:

**گام اول:** نرمالیزه کردن مقادیر ورودی ها جهت قرارگیری در بازه [ 0.05, 0.95 ]. به این منظور از

معادلات فرمول (۶-۹) تا (۶-۸) استفاده می کنیم. نرون های ورودی به صورت زیر محاسبه می شوند:

نرمالیزاسیون B: حداکثر و حداقل مقادیر B به ترتیب 3.02 و 0.06 می باشد.

$$B_n = \left( \frac{0.95 - 0.05}{3.02 - 0.06} \right) B + \left( 0.95 - \frac{0.95 - 0.05}{3.02 - 0.06} \times 3.02 \right) = 0.939,$$

نرمالیزاسیون D: حداکثر و حداقل مقادیر D به ترتیب 0.89 و 0 می باشد.

$$D_n = \left( \frac{0.95 - 0.05}{0.89 - 0} \right) C_u + \left( 0.95 - \frac{0.95 - 0.05}{0.89 - 0} \times 0.89 \right) = 0.855,$$

به همین ترتیب:

$$\phi_n = 0.809 \text{ و } \gamma_n = 0.224, L/B_n = 0.05$$

**گام دوم:** محاسبه لایه پنهان. تعداد ورودی هر نرون در لایه پنهان با استفاده از مقادیر وزن ها و

بایاس های جدول ۳-۶ محاسبه می شود. با توجه به اطلاعات موجود، مقادیر ورودی هر نرون ]

[ F1, ..., F14 با استفاده از فرمول (۶-۱۰) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$F_1 = -2.184 \times 0.939 - 1.217 \times 0.855 - 3.578 \times 0.05 - 0.310 \times 0.224 - 3.765 \times 0.809 - 0.945 = -7.332$$

به همین ترتیب:

$$F_2 = -0.678, F_3 = -13.912, F_4 = 9.656, F_5 = 2.880, F_6 = -8.938, F_7 = -3.117, \\ F_8 = 0.418, F_9 = -2.982, F_{10} = 3.921, F_{11} = -6.763, F_{12} = 8.482, F_{13} = 2.443, \\ F_{14} = 0.784.$$

**گام سوم:** پیش بینی Qult. مقدار ورودی هر نرون لایه خروجی با استفاده از تابع لگ سیگموئید

محاسبه می شود. مقادیر محاسبه شده همانند زیر در وزن های لایه پنهان (۶-۴) ضرب می شوند:

$$A = -1.105f(F_1) - 0.958f(F_2) - 3.936f(F_3) - 11.531f(F_4) - 0.445f(F_5) - \\ 4.325f(F_6) + 4.818f(F_7) - 1.223f(F_8) - 4.309 f(F_9) + 4.551f(F_{10}) - \\ 0.787f(F_{11}) + 6.835f(F_{12}) + 3.754f(F_{13}) - 2.218 f(F_{14}) + 0.7306 = 0.9397$$

به طوریکه  $f$  تابع لگ سیگموئید به شکل  $1/(1+e^{-x})$  می باشد. با استفاده از فرمول (۶-۹) مقدار  $q_{ult}$  به شکل زیر محاسبه می شود:

$$q_{ult} = -3098.33 \times (0.9397) + 3001.92 = 90.36 \text{ kPa} \quad (۶-۸)$$

در این مثال، مقدار  $q_{ult}$  پیش بینی شده در تطابق مطلوبی با مقدار واقعی ( $q_{ult} = 91.5 \text{ kPa}$ ) قرار دارد.

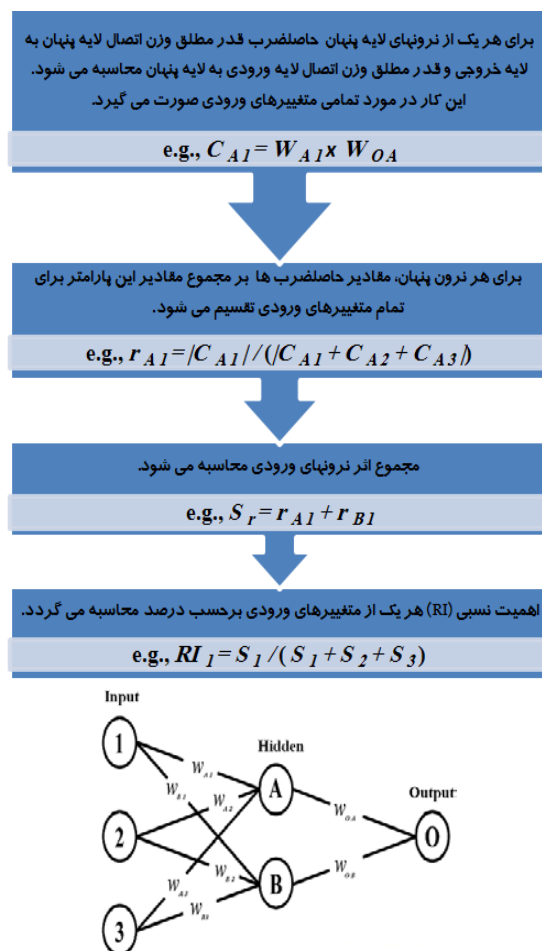
( 1.2 % پایین تر از مقدار واقعی). روند محاسبات بر پایه وزن ها و بایاس های بهترین ساختار و بصورت کاربردی در قالبی صفحه گسترده در برنامه مایکروسافت اکسل ارائه شده است.

### ۶-۲-۶- آنالیز حساسیت پارامترها

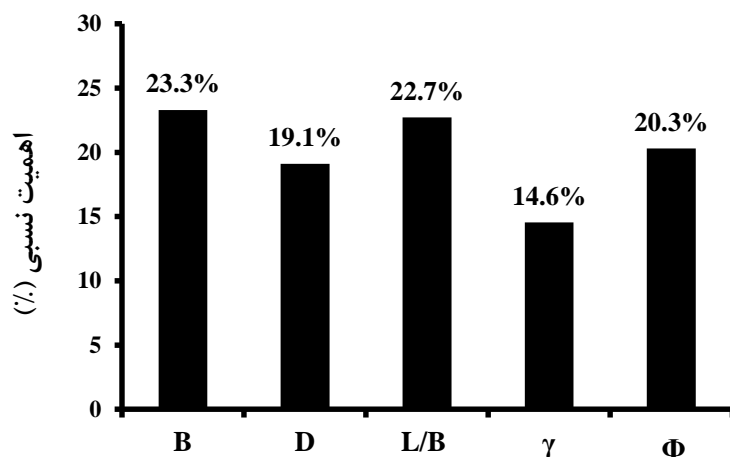
سهم نهایی هر کدام از متغیرها در مدل های نهایی ارائه شده توسط ANN/SA، اهمیت نسبی متغیر نامیده می شود و توسط آنالیز حساسیت، سنجیده می شود. برای تعیین اهمیت نسبی پارامترها در مدل ANN/SA از روشی که توسط گارسون [۵۹] پیشنهاد گردیده استفاده شده است. مراحل مورد استفاده برای تعیین اهمیت نسبی پارامترها با استفاده از الگوریتم گارسون در شکل (۶-۵) و مقادیر اهمیت نسبی محاسبه شده برای ورودی های مختلف در شکل (۶-۶) نمایش داده شده است. همانطور

که در شکل (۶-۶) نشان داده شده است، ظرفیت باربری نهایی پی به  $B$  و  $L/B$  حساس تر از  $D$ ،  $\gamma$  و

$\phi$  می باشد.  $\gamma$  کمترین اثر را بر روی  $Q_{ult}$  دارد.



شکل ۶-۵- تعیین اهمیت نسبی پارامترها با استفاده از الگوریتم گارسون [۵۹]



شکل ۶-۶- مقادیر اهمیت نسبی ورودی های مختلف مدل ANN/SA پیش بینی کننده  $q_{ult}$

### ۶-۳- بحث و مطالعه مقایسه ای

در این مطالعه، ظرفیت باربری نهایی ( $q_{ult}$ ) به عنوان پارامتر مستقلی در نظر گرفته شد خود که تابع

پیچیده ای از متغیرهای تاثیرگذار  $B, D, L/B, \gamma$  و  $\Phi$  است.

بر اساس یک فرضیه منطقی، اسمیت [۶۰] معیار زیر را برای بررسی عملکرد مدل ها ارائه کرده است:

- اگر ضریب همبستگی ( $R$ ) برای مدلی بزرگتر از  $0.18$  ( $R > 0.18$ ) و یا  $R^2 > 0.64$  باشد،

همبستگی بین مقادیر واقعی و پیش بینی شده قوی می باشد.

- اگر  $R$  برای مدلی بین  $0.18$  و  $0.35$  ( $0.18 < R < 0.35$ ) باشد، همبستگی بین مقادیر واقعی و پیش

بینی شده وجود دارد.

- اگر  $R$  برای مدلی کمتر از  $0.18$  ( $R < 0.18$ ) باشد، همبستگی ضعیفی بین مقادیر واقعی و پیش

بینی شده وجود دارد.



در تمامی حالات مقادیر خطا مانند RMSE و MAE بایستی کمینه باشد. همانطور که در شکل های (۲-۶) و (۳-۶) مشاهده می شود مدل ANN/SA، با مقادیر بالای  $R^2$ ، R و پایین RMSE و MAE، دقت بسیار زیادی برای داده های آموزش (یادگیری و اعتبار سنجی) و آزمایش دارد. علاوه بر این، اعتبار مدل ارائه شده برای داده های آزمایش توسط معیارهای جدیدی که گلبرخ و تروپشا [۶۱] پیشنهاد کرده اند بررسی شده است. بر این اساس، حداقل یکی از شیب های خطوط رگرسیون (k و k') بایستی نزدیک به ۱ باشد. اخیراً، روی و روی [۶۲] شاخص تعیین  $R_m$  را برای ارزیابی قابلیت پیش بینی مدل ها معرفی کرده اند. قید به ازای  $R_m > 0.5$  ارضا می شود. همچنین، مربع ضریب همبستگی بین مقادیر پیش بینی شده به مقادیر واقعی ( $Ro^2$ ) و مربع ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی به مقادیر پیش بینی شده ( $Ro^2$ ) بایستی نزدیک ۱ باشد. معیارهای اعتبارسنجی ذکر شده و نتایج به دست آمده توسط مدل ها در جدول (۵-۶) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود، مدل ANN/SA کلیه شرایط را ارضا می کنند. نتایج به دست آمده نشانگر اعتبار بسیار بالای مدل ارائه شده می باشد.

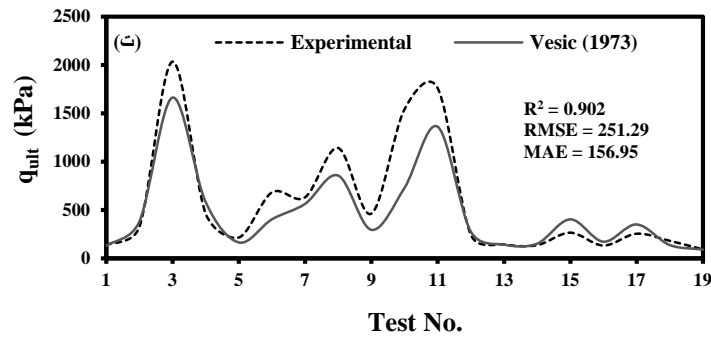
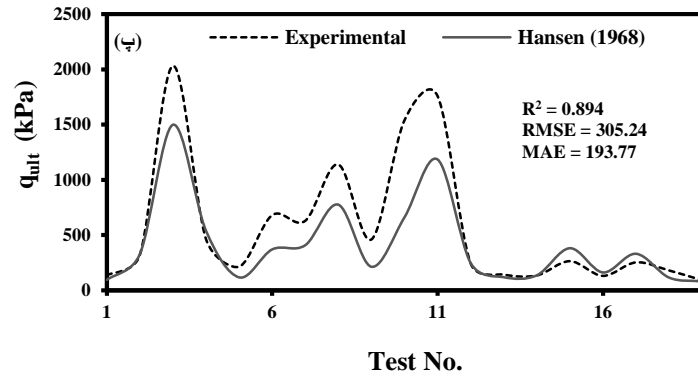
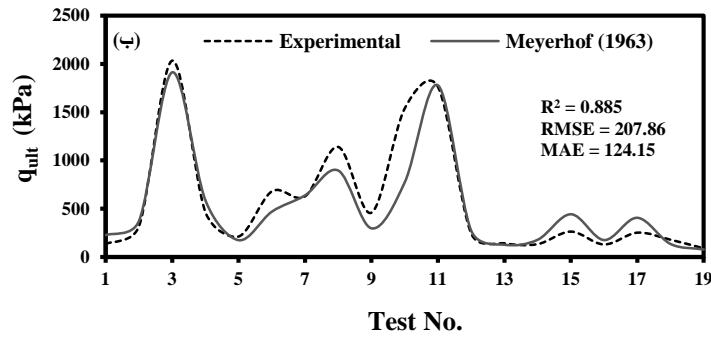
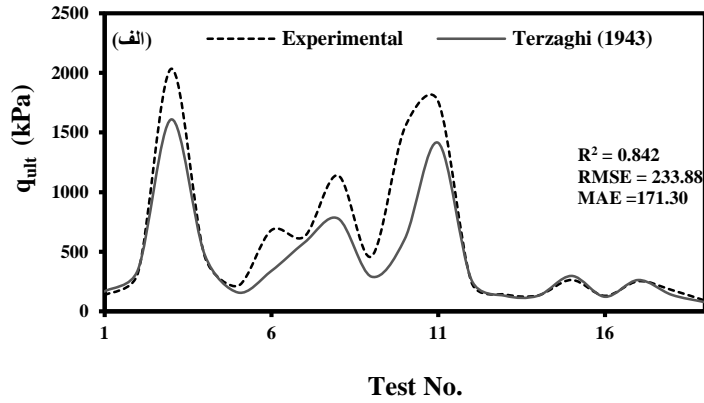
جدول ۵-۶- پارامترهای مربوط به اعتبارسنجی مدل های ارائه شده

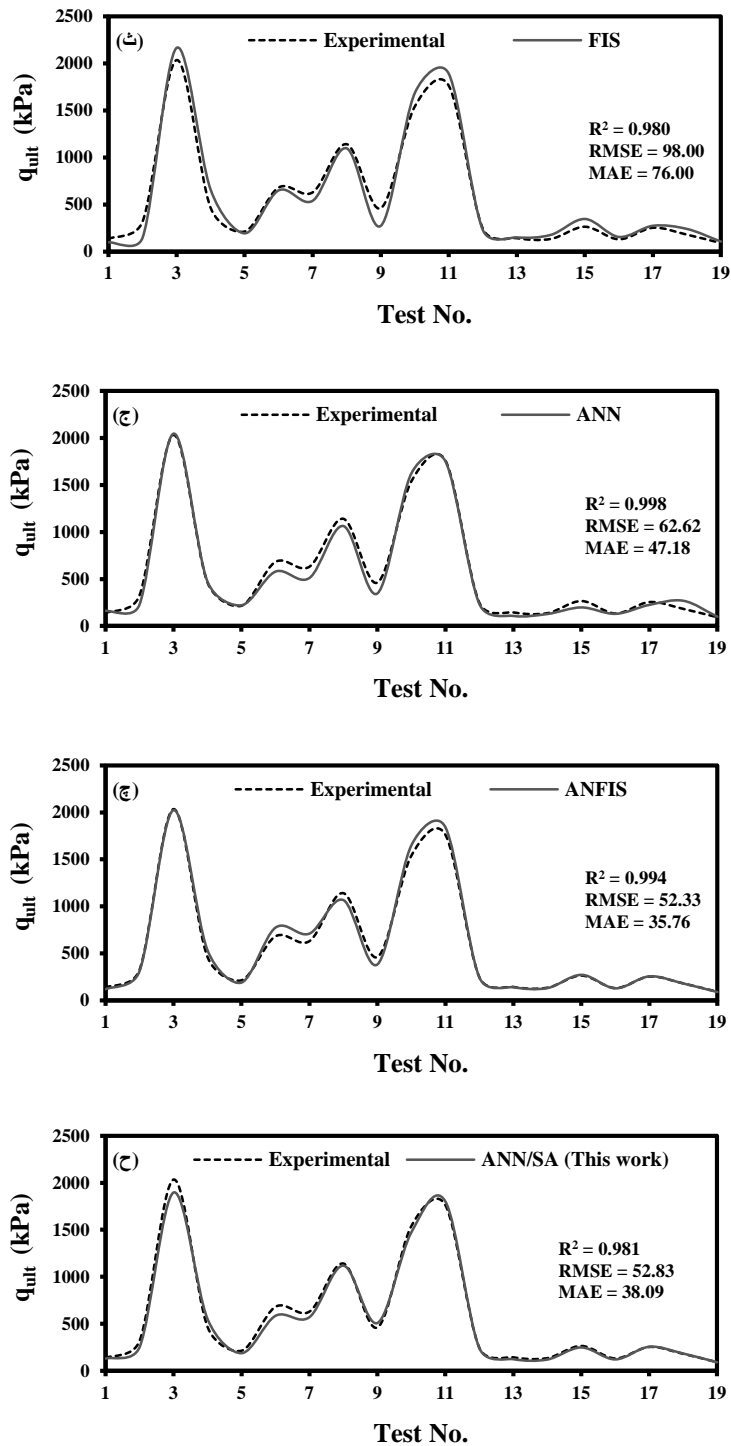
| آیتم | رابطه  | شرایط              | مدل   |
|------|--|--------------------|-------|
| ۱    | $R = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h}_i)(t_i - \bar{t}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h}_i)^2 \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t}_i)^2}}$ | $R > 0.8$          | 0.997 |
| ۲    | $k = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i \times t_i)}{h_i^2}$  | $0.85 < K < 1.15$  | 1.030 |
| ۳    | $k' = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i \times t_i)}{t_i^2}$   | $0.85 < K' < 1.15$ | 0.968 |
| ۴    | $R_m = R^2 \times (1 - \sqrt{ R^2 - Ro^2 })$   | $R_m > 0.5$        | 0.924 |

|       |   |                         |   |
|-------|---|-------------------------|---|
| 0.998 | $Ro^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - h_i^o)^2}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t}_i)^2}$  | $h_i^o = k \times t_i$  | ۵ |
| 0.998 | $Ro'^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - t_i^o)^2}{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h}_i)^2}$ | $t_i^o = k' \times h_i$ | ۶ |

علاوه بر این، نتایج حاصل با نتایج بدست آمده از چندین مدل بسیار معروف مقایسه شده اند. اخیراً، پادمینی و همکاران [۱۱] سیستم فازی-عصبی (ANFIS) و ANN را برای پیش بینی ظرفیت باربری نهایی پی های کم عمق روی خاک بدون چسبندگی ارایه کردند. ANFIS وضوح و ارایه مناسب سیستم فازی را با قدرت فراگیری ANN ترکیب می کند. پادمینی و همکاران [۱۱] مطالعه ای مقایسه ای بین ANFIS و ANN و سیستم فازی (FIS) برای پیش بینی ظرفیت باربری نهایی انجام دادند. شکل (۶-۷) آمار عملکردی مدل ANN/SA، مدل های ANN، ANFIS و FIS ارائه شده توسط پادمینی و همکاران [۱۱] و نیز نتایج حاصل از معادلات معروف ترزاقی، مایرهورف، هنسن و وسیک را برای داده های تست نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود عملکرد مدل ANN/SA در مقایسه با سایر مدل های کلاسیک و نیز مدل های FIS و ANN بهتر می باشد. اگرچه عملکرد مدل ANFIS اندکی بهتر از ANN/SA است ولی ANFIS توانایی ایجاد رابطه خروجی ساده و کاربردی را ندارد که از ضعف های عمده این روش می باشد و استفاده از آن را به شدت محدود می کند. علاوه بر این، معادله طراحی ارائه شده  $q_{ult}$  را بر حسب  $B$ ،  $D$ ،  $L/B$ ،  $\gamma$  و  $\phi$  فرموله می کند. بنابراین، بر خلاف معادلات کلاسیک، نیازی به محاسبه ضرایب گوناگونی مانند  $N_c$ ،  $N_{\gamma}$ ،  $N_q$ ،  $s_c$ ،  $s_q$ ،  $s_{\gamma}$ ،  $i_c$ ،  $i_d$ ،  $i_{\gamma}$ ،  $d_c$ ،  $d_q$ ،  $d_{\gamma}$ ،  $g_c$ ،  $g_q$ ،  $b_c$ ،  $b_q$  و  $b_{\gamma}$  نخواهد بود.

شایان ذکر است، مدل به دست آمده در این تحقیق علاوه بر دقت بالایی که دارد براحتی می تواند توسط برنامه صفحه گسترده در برنامه مایکروسافت اکسل مورد استفاده قرار گیرد. نکته قابل ذکر اینکه، مدل های متداول آماری (نظیر رگرسیون) رابطه ای خطی و یا غیر خطی میان ورودی ها و خروجی در نظر می گیرند که همواره درست نیست. تقریبا در تمامی موارد، بهترین مدل های به دست آمده از آنالیزهای متداول آماری پس از بسط تعداد محدودی مدل با ساختار از پیش تعیین شده به دست می آیند. به همین دلیل، اینگونه مدل ها نمی توانند برهم کنش بین متغیرهای وابسته و غیر وابسته را بطور مناسب در نظر بگیرند. از سوی دیگر، ANN/SA مشخصات کاملا متمایزی دارد. یکی از مهمترین برتری های این تکنیک در مقایسه با روش های متداول آماری توانایی قابل توجه آن در تولید مدل های پیچیده بدون در نظر گرفتن ساختاری اولیه برای مدل می باشد. مسلما، ایجاد این تعداد مدل بدون استفاده از روش ANN/SA غیر ممکن می نماید.





شکل ۶-۶- مقایسه ظرفیت باربری نهایی برای داده های تست با استفاده از روش های مختلف



## فصل هفتم:

# جمع بندی و پیشنهادها

## ۷-۱- مقدمه

مهندسی متکی بر امر قضاوت، مشاهدات، آزمایشات، تمرین بر علوم، مفاهیم تئوری و تجربیات گذشته می باشد. با توجه به اینکه علوم ناقص و نا تمام بوده و بسیاری مسائل ناشناخته است پس قضاوت مهندسی امری ضروری در طراحی می باشد بنابراین رهایی یا کاهش میزان خطا در آن نکته بسیار ضروری و صحیحی می باشد. برای کاهش خطا و جلوگیری از قضاوت اشتباه، استفاده از نتایج و مشاهدات گذشته می تواند به مهندس جهت تصمیم گیری بهتر کمک نماید و این امر به وسیله ابزار آمار و روش های تجربی صورت می پذیرد. در بررسی های آماری فرآیندهای غیرقطعی، مجموعه ای از داده ها و مشاهدات عملی و تجربی را در دست داریم و می خواهیم با استفاده از آن به پیش بینی و یا تخمین بپردازیم. از طرفی دیگر در مهندسی خاک و پی و در تحلیل های ژئوتکنیکی، ناهمسانگردی خاک، تأثیر پارامترهای متغیر بسیار زیاد و همچنین رفتار متفاوت انواع خاک در مقابل بارهای وارده، سبب گردیده است که مدل های طراحی مهندسی، در مورد مسائل ژئوتکنیکی، به طور جداگانه ای ارائه شود.

طراحی پی های سطحی در مهندسی ژئوتکنیک ملزم به ارضاء نیاز به دو شرط اساسی می باشد: ظرفیت باربری نهایی و میزان نشست پی. برای مثال در تحلیل پی ها، معادله ظرفیت باربری ترازقی به تخمین بار نهایی منجر می شود؛ تخمینی که به وسیله ضریب ایمنی برای وارد کردن دسته بارهای مجاز برای طراحی طبقه بندی می شود. لذا با لحاظ نمودن پارامترهای زیاد در حل مسأله، ایجاد یک رابطه مشخص



بین آنها برای رسیدن به جواب مورد نظر بسیار پیچیده و مشکل خواهد شد. از طرف دیگر تعیین مستقیم پارامترهای ژئوتکنیکی، نظیر ظرفیت باربری پی، در اکثر مواقع نیازمند انجام آزمایش های دشوار، پرهزینه و وقت گیر است. بنابراین مهندسين ژئوتکنیک در صدد ایجاد مدل هایی هستند که بدون صرف هزینه زیاد و زمان طولانی و نیز عدم نیاز به حل رابطه ای پیچیده و دشوار بتوانند مجهولات لازم را تعیین نمایند. بدین منظور پارامترهای مرتبط شناسایی شده و با تعیین آنها و با استفاده از ابزارهای ریاضی مختلف، مجهول مورد نظر تعیین می گردد. پیچیدگی تحلیل رفتار ظرفیت باربری نیز ضرورت استفاده از روش های پیش بینی قدرتمندی را القا می کند. توسعه در ابزارهای کامپیوتری طی دو دهه اخیر باعث سهولت و سرعت در رشد تکنیک های محاسباتی نرم گردیده است. علاوه بر این، مشخص گردیده است که این تکنیک ها می توانند به عنوان ابزاری برای حل مسایلی که روش های متداول در حل آنها ناموفقند یا عملکرد ضعیفی دارند به کار روند. نمونه ای کاملاً بارز برای نشان دادن این پتانسیل زمینه های طراحی مهندسی ژئوتکنیک است. با نگاهی بر متون فنی موجود این موضوع به خوبی مشهود می گردد، لیکن این مهم نیز آشکار می گردد که جامعه محققین تمایل فزاینده ای به جنبه های جدیدی از تکنیک های محاسبات نرم از نقطه نظر مهندسی پیدا نموده اند. با توجه به این تمایل، مولفین تعریفی جدید به نام طراحی به کمک محاسبات نرم<sup>۱</sup> (SCAD) ارائه می کنند. محاسبات نرم به عنوان مبنایی برای حوزه در حال رشد هوش محاسباتی می باشند. تکنیک های هوش محاسباتی

---

<sup>۱</sup>Soft Computing Aided Design

به عنوان ابزارهای مهم برای تعیین روابط غیر خطی بین ورودی های مدل و خروجی های مربوط به آن دامنه های تحقیقاتی برای طراحی های مهندسی نظیر شبکه های عصبی مصنوعی را در بر می گیرد [۱۷].

در این پایان نامه، تکنیک ترکیبی شبکه عصبی مصنوعی و تبرید شبیه سازی شده (ANN/SA) در زمینه مدل سازی ظرفیت باربری نهایی پی های سطحی واقع بر خاک های دانه ای به کار گرفته شده است. مدلی غیر خطی با دقت بالا برای پیش بینی ظرفیت باربری پی های سطحی بر خاک های دانه ای با استفاده از این تکنیک ارائه شده است. مدل ارائه شده با استفاده از نتایج آزمایشگاهی بدست آمده از متون علمی منتشر شده بسط داده شده است.

## ۷-۲- جمع بندی و نتیجه گیری

عمده ترین یافته های این تحقیق عبارتند از:

- مدل ارائه شده ANN/SA تخمین های بسیار دقیقی از مقادیر ظرفیت باربری نهایی پی های سطحی واقع بر خاک های دانه ای بدست می دهد. معادله استخراج شده می تواند به سهولت برای مقاصد پیش طراحی و یا بررسی سریع راه حل های حاصل از تحلیل های زمانبر و قطعی و همچنین برای کنترل اعتبار نتایج آزمایشگاهی به طور موثری مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، در شرایطی که امکان انجام مطالعات آزمایشگاهی نباشد، این مدل می تواند در محدوده آزمایشات انجام شده، جایگزین مناسبی برای تخمین ظرفیت باربری پی های سطحی تلقی شود.

- به منظور تعیین نقش هر ورودی در مدل های ظرفیت باربری پی های سطحی، مقادیر اهمیت نسبی متغیرهای ورودی در پیش بینی خروجی مدل محاسبه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، ظرفیت باربری نهایی پی به  $B$  و  $L/B$  حساس تر از سایر متغیرها می باشد.
  - جهت ارزیابی، نتایج به دست آمده توسط مدل ارائه شده با نتایج مدل های روش های مرسوم نظیر ترزاقی، میرهوف، هنسن و وسیک و همچنین با دیگر تکنیک های هوش مصنوعی مقایسه گردید. نتایج نشانگر عملکرد بسیار خوب مدل ارائه شده در مقایسه با سایر مدل های موجود می باشند. به دلیل رفتار بشدت غیر خطی پارامترهای ژئوتکنیکی بررسی شده، مدل غیرخطی ANN/SA نتایج بسیار بهتری را در مقایسه با روش های کلاسیک تولید کرده است.
- در هر صورت، مطالعه حاضر نشان دهنده این مهم است که ANN/SA می تواند به عنوان یکی از ابزارهای امید بخش در مدل سازی مسائل مهندسی ژئوتکنیک به کار رود.

### ۳-۷- پیشنهادها

ANN/SA در مقایسه با شبکه های عصبی بندرت در مسائل مهندسی عمران به کار رفته است و در موارد موجود نیز عملکرد موفقیت آمیزی داشته است. بطور کلی، در صورت وجود داده های کافی جهت آموزش ANN/SA، این تکنیک می تواند به عنوان ابزاری قدرتمند برای رگرسیون غیر خطی جهت مدلسازی رفتار بسیاری از مسایل مهندسی عمران به کار رود. در هر صورت، هر گاه درک درستی از

پارامترهای تأثیرگذار در یک مسأله خاص انجام گیرد و بتوان یک بانک اطلاعاتی قوی در مورد این پارامترها کسب کرد، می توان برای آن مسأله مدل هایی توسط ANN/SA ارائه نمود که با دقت بسیار بالا بتواند مجهولات لازم را پیش بینی و تعیین نماید. این روش ها می توانند به آسانی بسیاری از مسائل پیچیده را حل نموده و مشکلات ناشی از انجام آزمایش های پیشرفته و پرهزینه را برطرف سازند. برخی از زمینه هایی ژئوتکنیکی که کاربرد تکنیک های هوش محاسباتی و به ویژه تکنیک ANN/SA در آنها به درستی مورد بررسی قرار نگرفته است عبارتند از:

- پیش بینی ظرفیت باربری پی های عمیق
- پیش بینی ظرفیت باربری شمع های در جا
- پیش بینی نشست های سازه ای
- استفاده از الگوریتم های هوش مصنوعی در طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان

# مراجع

- [1] Chen, W., Duan, L., 2000. Bridge Engineering Handbook. CRC Press, New York, N.Y., USA
- [2] Vesic, A.S., 1973. Analysis of ultimate loads of shallow foundations. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division 99 (1), 45–73.
- [3] Prandtl, L., 1921. Über die Eindringungsfestigkeit (Härte) plastischer Baustoffe und die Festigkeit von Schneiden (On the penetrating strengths (hardness) of plastic construction materials and the strength of cutting edges). Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik 1 (1), 15–20.
- [4] Reissner, H., 1924. Zum Erddruckproblem (Concerning the earth-pressure problem). Proceedings 1st International Congress of Applied Mechanics, Delft, 295–311.
- [5] Terzaghi, K., 1943. Theoretical Soil Mechanics. John Wiley & Sons, New York.
- [6] Meyerhof, G.G., 1963. Some recent research on the bearing capacity of foundations. Canadian Geotechnical Journal 1 (1), 16–26.
- [7] Hansen, J. B., A revised and extended formula for bearing capacity, Danish Geotech. Inst. Bulletin, No. 28, Denmark, 1970.
- [8] Vesic, A.S., 1975. Bearing capacity of shallow foundations, Chap. 3, in Foundation Engineering Handbook, Winterkorn, H.F. and Fang, H.Y., Ed., Van Nostrand Reinhold, New York.
- [9] Kalinli, A., Acar, M.C., Gündüz, Z. 2011. New approaches to determine the ultimate bearing capacity of shallow foundations based on artificial neural networks and ant colony optimization. Engineering Geology 117, 29–38.
- [10] Schwefel H.-P., Wegener I., and Weinert K. Advances in Computational Intelligence – Theory and Practice, Springer-Verlag, Berlin, 2002.

- [11] Padmini, D., Ilamparuthi, K., Sudheer, K.P., 2008. Ultimate bearing capacity prediction of shallow foundations on cohesionless soils using neurofuzzy models. *Computers and Geotechnics* 35, 33–46.
- [12] Pooya Nejad F., Jaksa M.B., Kakhi M., McCabe B.A., 2009. Prediction of pile settlement using artificial neural networks based on standard penetration test data. *Computers and Geotechnics*, 36(7), 1125–1133.
- [13] Das, S. K., Basudhar, P.K. 2008. Prediction of Residual Friction Angle of Clays Using Artificial Neural Network. *Engineering Geology* 100(3-4), 142–145.
- [14] Kirkpatrick S, Gelatt CD, Vecchi MP. Optimization by simulated annealing. *Science* 1983;220(4598):671–80.
- [15] Cerny V. Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: an efficient simulation algorithm. *J Optim Theor Appl* 1985;45:41–52.
- [16] Ledesma S, Torres M, Hernandez D, Avina G, Garcia G. Temperature cycling on simulated annealing for neural network learning. In: *Proceedings of the MICAI 2007, LNAI 4827, 2007*, p. 161–171.
- [17] Alavi A.H., Gandomi A.H., “Prediction of Principal Ground-Motion Parameters Using a Hybrid Method Coupling Artificial Neural Networks and Simulated Annealing.” *Computers and Structures*, 89 (23-24): 2176-2194, 2011

[۱۸] اطمینانی ا.، (ترجمه)، تحلیل و طراحی پی، جلد دوم: مهندسی پی، تألیف باولز ج.ای، موسسه انتشارات پارس آئین، ۱۳۷۹.

[۱۹] طاحونی ش.، (ترجمه)، اصول مهندسی ژئو تکنیک"، جلد اول: مکانیک خاک، تألیف داس بی. ام، موسسه انتشارات پارس آئین، ۱۳۸۳.

- [20] Bowles, Joseph, E. , *Foundation Analysis and Design*, 3<sup>rd</sup> edition, *New York Mc.Graw- Hill, C1982*, 1175 pp., ISBN 0070067708.
- [21] Cerato, A. B., *Scale Effects of Shallow Foundation Bearing Capacity on Granular Materials*, *Ph.D. dissertation. University of Massachusetts*,

Amherst. 2005.<http://faculty-staff.ou.edu/C/Amy.B.Cerato-1/CERATO DISSERTATION.pdf>

- [22] Das, B.M., Principles of Foundation Engineering. 3rd edition. PWS Publishing, Boston. 1995.
- [23] Meyerhof, G.G. The bearing capacity of sand. *PhD thesis, University of London*. 1950.
- [24] Chang, C. S. (1992). "Discrete element method for slope stability analysis." *J. of Geotech. Engng*, Vol. 118 ,No. 12, PP. 1889-1905.
- [۲۵] میرقاسمی ع، ا، مجیدی ع، تعیین ضرایب ظرفیت باربری و شکل در پی های سطحی مستطیلی به روش اجزای مجزا، نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۹ ، شماره ۵، دی ماه ۱۳۸۴ ، صفحه ۶۲۱ تا ۶۳۲.
- [26] Coduto, D.P. (2001). Chapter 6: Shallow Foundations- Bearing Capacity. *Foundation Design: Principles and Practices*. 2nd ed. pp. 170-206.
- [27] Caquot, A. and Kerisel, J. (1956) *Traite de mecanique des sols*. GauthierVillars, Paris, pp. 231.
- [28] Lundgren, H. and Mortensen, K. (1953). Determination by the Theory of Plasticity of the Bearing Capacity of Continuous Footings on Sand. *Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering ,Zurich*. Vol. 1, pp. 409-412.
- [29] Biarez, J., Burel, M., and Wack, B. (1961). Contribution a L'Etude De La Force Portante Des Fondations. *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, France*. Vol. 1, No. 603-609.
- [30] Fedaa, J. (1961). Research on the Bearing Capacity of Loose Soils. *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Vol. 1, No. 3A. pp. 635-642.
- [31] Krizek, R.J. (1969). Behaviour of Rectangular Footings on Dense Sand. *Journal of the Indian National Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. pp. 51-62.

- [32] Spangler, M. G. and Handy, R. L. (1982). Soil Engineering. 4th edition, Harper & Row, New York.
- [33] Ingra, T.S. and Baecher, G.B. (1982). Uncertainty in Bearing Capacity of Sands. Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 109, No. 7. pp. 899-914.
- [34] Michalowski, R.L. (1997). An Estimate of the Influence of Soil Weight on Bearing Capacity Using Limit Analysis. Soils and Foundations. Vol. 37, No. 4. pp. 57-64.
- [35] Mitchell T (1997) Does machine learning really work? AI Magazine 18(3):11–20
- [36] Tesink S (2007) Improving Intrusion Detection Systems through Machine Learning. ILK Research Group, Technical Report Series no. 07-02.
- [37] Haykins, S., (1999), "Neural networks – A comprehensive foundation (2nd ed.)", Prentice Hall International Inc., Englewood Cliffs (NJ).
- [۳۸] منہاج، م، ب، (۱۳۷۷)، " مبانی شبکه‌های عصبی مصنوعی"، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- [39] Metropolis N, Rosenbluth AW, Rosenbluth MN, Teller AH, Teller E. Equation of state calculations by fast computing mechanics. J Chem Phys 1953;21(6): 1087–92.
- [40] Reed RD, Marks RJ. Neural smithing: supervised learning in feedforward artificial neural networks. Cambridge: The MIT Press; 1999.
- [41] Huang M, Romeo F, Sangiovanni-Vincentelli A. An efficient general cooling schedule for simulated annealing. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Aided Design, 1986, p. 381–384.
- [42] Jones MT. AI application programming. 2nd ed. Charles River Media; 2005.
- [43] Luke BT. Simulated Annealing Cooling Schedules. 2007. Available at: <http://members.aol.com/btluke/simanf1.htm>.
- [44] Mobius A, Neklioudov A, Diaz-Sanchez A, Hoffmann KH, Fachat A, Schreiber M. Optimization by thermal cycling. Phys Rev Lett 1997;79:4297–301.



- [45] Goh, A.T.C., (1994), "Nonlinear modeling in geotechnical engineering using neural network", Australian Civil Engineering Transaction, pp. 293-297.
- [46] Goh, A.T.C., (1995), "Pile driving records reanalyzed using neural network", J. Geotechnical Engrg., 122(6), PP. 499-505.
- [47] Cal, Y., (1995), "Soil Classification by neural network", Advances in Engineering Software, 22, pp. 95-97.
- [48] Penumadu, D. and Zhao, R., (1999), "Triaxial compression behavior of sand and gravel using artificial neural network (ANN)", Computers and Geotechnics, 24, pp. 207-230.
- [49] Baziar, M.H., Jafarian, Y., (2007), "Assessment of liquefaction triggering using strain energy concept and ANN model: Capacity Energy", J Soil Dyn Earthquake Eng; 27: 1056–1072.
- [50] Sinha S. K., Wang M. C. (2008), "Artificial Neural Network Prediction Models for Soil Compaction and Permeability", Geotech. Geol. Eng., Vol. 26, pp- 47-64.
- [51] Kuo, Y.L., Jaksa, M.B., Lyamin, A.V., Kaggwa, W.S., 2009. ANN-based model for predicting the bearing capacity of strip footing on multi-layered cohesive soil. Computers and Geotechnics 36, 503-516.
- [52] Muhs, H., Elmiger, R., Weiß, K., Sohlreibung und Grenztragfähigkeit unter lotrecht und schräg belasteten Einzelfundamenten. Deutsche Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik (DEGEBO), Berlin. HEFT 62. 1969.
- [53] Weiß, K., Der Einfluß der Fundamentform auf die Grenztragfähigkeit flachgegründeter Fundamente. Deutsche Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik (DEGEBO), Berlin. HEFT 65. 1970.
- [54] Muhs, H., Weiß, K., Untersuchung von Grenztragfähigkeit und Setzungsverhalten flachgegründeter Einzelfundamente im ungleichförmigennichtbindigen Boden. Deutsche

- Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik (DEGEBO), Berlin. HEFT 69. 1971.
- [55] Muhs, H., Weiß, K., Inclined load tests on shallow strip footings. Proceedings of the 8th international conference on soil mechanism and foundation engineering, Vol. II, pp. 173–179. 1973.
- [56] Briaud, J.L., Gibbens, R., Behavior of five large spread footings in sand. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering ASCE* 125(9), 787–96. 1999.
- [57] Gandhi, G.N., Study of bearing capacity factors developed from lab. Experiments on shallow footings on cohesionless soils. *PhD thesis, Shri G.S. Institute of Tech and Science, Indore (MP), India.* 2003.
- [58] Ledesma S. Neural-Lab, Version 3.1. University of Guanajuato, Mexico, 2009 .Available at:  
<http://www.dicis.ugto.mx/profesores/sledesma/documentos/index.htm>.
- [59] Garson GD. Interpreting neural-network connection weights. *AI Expert* 1991;6:47–51.
- [60] Smith, G. N. 1986. Probability and statistics in civil engineering. Collins, London.
- [61] Golbraikh A, Tropsha A. Beware of  $q^2$ . *J Mol Graph Modell* 2002;20(4): 269–76.
- [62] Roy PP, Roy K. On some aspects of variable selection for partial least squares regression models. *QSAR Comb Sci* 2008;27:302–13.

## **Abstract**

Recently, in order to avoid spending too much time and money for the implementation of different experiments, the tendency toward computer tools that are similar to the biologic (Quasi-biological) system has increased. In this study, a new quasi-biological technique which has been developed by the combination of the artificial neural network (ANN) and simulated refrigeration (SA), has been used to predict the final bearing capacity of gravel soil. The proposed ANN / SA model has been developed based on the use of laboratory results that have been collected after extensive technical literature studies. The data set includes experiments which performed on small and large scale square, circular, and bandwidths on a sand bed. The new presented model formulates the final loading capacity of the surface peaks based on parameters related to the geometry of the pitch (such as width, depth and shape of the pit) and mechanical properties of the soil (such as average specific gravity and internal friction angle of soil).

In order to obtain optimal models, extensive attempts and errors have been made for using effective parameters on bearing capacity. The role of effective parameters in predicting load bearing capacity has been discussed for using the sensitivity analysis. A comparative study carried out by the well-known equations which was provided by Trezaghi, Meirov, Hansen and Wessiak proves the possibility of using the ANN / SA model as a reliable alternative for such classical equations. The results indicate a better performance of the proposed model than other artificial intelligence models in the technical literature. It is worth noting that ANN based models are often recognized as black box models due to the inability to explain the underlying principles for prediction.

In other words, although ANN are successful in predicting, they are not capable of creating predictive equations. To overcome this limitation, a new process has been defined based on the optimal model from ANN / SA which is returned to the relatively simple design equation. The calculation process is based on the weights and biases of the best structure and in the form of a spreadsheet program.

**Keywords:** Ultimate Bearing Capacity, Artificial Neural Network, Simulated Refrigeration, Surface Paths, Grain Soils, Prediction.



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Engineering-Department of Civil Engineering**

**(M.Sc.) Thesis**

On Geotechnical Engineering

**Behavioral Modeling of Foundation Using a Hybrid  
Neural Network and Simulated Annealing Algorithm**

Thesis Supervisor:

**Dr. hosseini**

By:

**Milad Arab Esmaeili**

**August 2017**