

# مکانیک سنگ و طراحی پی بر سنگ

## Rock Mechanics and Design of Foundations on Rocks

تالیف و ترجمہ: دکتر نادر تائف

استاد بخش راه، ساختمان و محیط زیست

دانشگاه شیراز

## فهرست نویسی بر اساس اطلاعات فیبا

سرشناسه: هانف، نادر، ۱۳۳۸-

عنوان: ونام پدید آور: مکانیک سنگ و طراحی پی بر سنگ: تالیف و ترجمه نادر هانف

مشخصات نشر: شیراز: آینه، ۱۳۸۹.

مشخصات ظاهری: ۳۸۳ ص: مصور، نمودار.

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۹۰۳۳۶-۹۰-۱

وضعیت فهرست نویسی: فیبا

موضوع: سنگ ها- مکانیک

موضوع: پی سازی

رده بندی کنگره: ۷۱۳۸۹ م ۲/۵۷۷۵ TAYY

رده بندی دیویی: ۶۲۴/۱۵

شماره کتاب شناسی ملی: ۲۱۹۴۲۷۱

شناسنامه کتاب

عنوان: مکانیک سنگ و طراحی پی بر سنگ

ترجمه و تالیف: دکتر نادر هانف- استاد بخش مهندسی راه و ساختمان دانشگاه شیراز

چاپ: اول، شمارگان: ۱۰۰۰، سال نشر: ۱۳۹۴، چاپ: مهتاب

نشر: آینه شیراز- بلوار زند- کوچه یفما- مجتمع پارس، تلفن: ۲۳۴۸۲۲۸، ۰۷۱۱

Email: nashrayene@gmail.com

## دیپاچه مهندسين مشاور

توسعه ارتباط دانشگاه و صنعت ، گذشته از مقولات شعاری، در گرو رشد و منفعت هر دو طرف است. از این رو، نگرش علمی در افزایش کیفیت محصولات صنعت و استفاده بهینه از نیروهای متخصص کار آمد، تنها با جهت دهی آموزش ها و محصولات علمی دانشگاهی، به سمت رفع نیازهای روز صنعت کشور، میسر است.

شرکت فنی و مهندسی آسماری افتخار دارد که گشاینده بایی نوین در این عرصه بوده که به بالندگی آن در بازه تخصصی خود کمک شایانی نموده است.

در این راستا ،کتاب حاضر ،دومین مکتوب از مجموعه محصولاتی است ،که با همکاری استادان مجرب دانشگاه و با رویکرد عملی در صنعت پی و مکانیک خاک و سنگ ،تهیه شده است.

امید آنکه این خدمت ،مشغلی باشد که از آن شعله ها برافروزند واز این راه ،فعالیت های سودمند برای هر دو قشر دانشگاه و صنعت ،توسعه یابد و تکثیر شود.

## فهرست

صفحه

موضوع

پیشگفتار

### فصل اول:

کاربرد دانش مکانیک سنگ

- |    |                                          |
|----|------------------------------------------|
| ۲  | ۱-۱- مقدمه                               |
| ۳  | ۲-۱- طبیعت سنگ‌ها                        |
| ۴  | ۳-۱- حوزه‌ی کاربرد مکانیک سنگ            |
| ۱۱ | ۴-۱- کانی‌های تشکیل دهنده‌ی سنگ‌ها       |
| ۱۲ | ۵-۱- طبقه‌بندی سنگ‌ها از نظر زمین‌شناسان |
| ۱۴ | ۶-۱- هوازدگی در سنگ‌ها                   |

### فصل دوم:

ویژگی‌های توده سنگ

- |    |                                     |
|----|-------------------------------------|
| ۱۸ | ۱-۲- مقدمه                          |
| ۱۸ | ۲-۲- سطوح ضعف                       |
| ۱۸ | ۱-۲-۲- خصوصیات صفحه‌ی ضعف           |
| ۱۹ | ۲-۲-۲- انواع صفحه‌ی ضعف در سنگ‌ها   |
| ۲۱ | ۳-۲-۲- جهت و ابعاد صفحه‌های ضعف     |
| ۲۳ | ۳-۲- ویژگی‌های صفحات ضعف زمین‌شناسی |
| ۲۵ | ۴-۲- تصاویر استریوگرافی             |
| ۲۹ | ۱-۴-۲- رسم قطب‌ها                   |

|    |                                               |
|----|-----------------------------------------------|
| ۳۱ | ۲-۴-۲- تراکم قطبی                             |
| ۳۳ | ۲-۴-۳- کمان ها یا دواير بزرگ                  |
| ۳۶ | ۲-۵-۱- انواع گسيختگی در شیب های سنگی          |
| ۳۸ | ۲-۵-۱- تحلیل کينماتیکي شیب های سنگی           |
| ۴۰ | ۲-۵-۲- تحلیل گسيختگی صفحه ای                  |
| ۴۱ | ۲-۵-۳- تحلیل گسيختگی های گوه ای (قطعه ای)     |
| ۴۲ | ۲-۵-۴- تحلیل گسيختگی های واژگونی (برگشتی)     |
| ۴۲ | ۲-۵-۵- مخروط اصطکاک                           |
| ۴۳ | ۲-۶-۱- تحلیل احتمالی ساختار زمین شناسی        |
| ۴۵ | ۲-۶-۱- جهت صفحه ی ضعف                         |
| ۴۸ | ۲-۶-۲- طول صفحه ی ضعف و فاصله ها              |
| ۵۰ | ۲-۷-۱- طبقه بندی و نشانه های خواص سنگها       |
| ۵۰ | ۲-۷-۱- طبقه بندی زمین شناسی سنگ ها            |
| ۵۱ | ۲-۷-۲- نشانه مقاومت سنگ                       |
| ۵۲ | ۲-۷-۳- طبقه بندی توده ی سنگ                   |
| ۵۲ | ۲-۷-۴- سامانه طبقه بندی ژئومکانیکی            |
| ۵۷ | ۲-۷-۵- سامانه طبقه بندی Q                     |
| ۶۲ | ۲-۷-۶- سامانه طبقه بندی RSR                   |
| ۶۶ | ۲-۷-۷- روابط بین سامانه های گوناگون طبقه بندی |
| ۶۶ | ۲-۷-۸- سیستم های دیگر طبقه بندی               |
| ۶۷ | ۲-۸- مراجع و منابع مطالعاتی                   |

| صفحه | موضوع                                      |
|------|--------------------------------------------|
|      | فصل سوم                                    |
|      | تغییر شکل پذیری و مقاومت توده سنگ          |
| ۷۲   | ۱-۳-۱- مقدمه                               |
| ۷۶   | ۱-۳-۱- مدول تغییر فرم                      |
| ۷۷   | ۱-۳-۲-۱- مدول سنگ یکپارچه                  |
| ۸۰   | ۱-۳-۲-۲- رفتار تنش - کرنشی سنگهای شکسته    |
| ۸۳   | ۱-۳-۲-۳- تاثیر ابعاد بر روی مدول تغییر شکل |
| ۸۶   | ۱-۳-۲-۴- فاصله ی ترک ها و مدول             |
| ۸۸   | ۱-۳-۲-۵- مدول سنگ های غیر همگن             |
| ۹۰   | ۱-۳-۲-۶- رابطه بین مدول و کیفیت توده سنگ   |
| ۹۲   | ۱-۳-۳- مقاومت فشاری                        |
| ۹۳   | ۱-۳-۳-۱- مقاومت فشاری سنگ یکپارچه          |
| ۹۴   | ۱-۳-۳-۲- مقاومت فشاری سنگ شکسته            |
| ۱۰۰  | ۱-۳-۴- مقاومت برشی                         |
| ۱۰۰  | ۱-۳-۴-۱- مواد موهر - کولمبی                |
| ۱۰۲  | ۱-۳-۴-۲- مقاومت برشی شکست ها               |
| ۱۰۸  | ۱-۳-۴-۳- آزمایش مقاومت برشی                |
| ۱۱۲  | ۱-۳-۴-۴- مقاومت برشی سنگ شکسته             |
| ۱۱۶  | ۱-۳-۵- مقاومت کششی                         |
| ۱۱۷  | ۱-۳-۶- خواص تابع زمان سنگ ها               |
| ۱۱۸  | ۱-۳-۶-۱- تورم                              |
| ۱۲۰  | ۱-۳-۶-۲- خزش                               |

صفحه

موضوع

۱۲۴

۷-۲-۳- مراجع و منابع مطالعاتی

## فصل چهارم

تنش و کرنش در سنگ‌ها

۱۳۶

۴-۱- مقدمه

۱۳۶

۴-۲- اثر تنش های اولیه

۱۳۸

۴-۳- تخمین تنش های اولیه

۱۴۹

۴-۴- روش هایی برای اندازه گیری تنش های محلی

۱۵۰

۴-۴-۱- آزمایش شکست هیدرولیکی

۱۵۵

۴-۴-۲- روش چک صفحه ای

۱۵۸

۴-۴-۳- فراحقاری

۱۶۴

۴-۴-۴- اندازه گیری هایی که مستقیماً بر روی سطح سنگ انجام می شوند

۱۶۹

۴-۴-۵- تنش های اصلی

۱۷۰

۴-۴-۶- اندازه گیری تنش در سه بعد

۱۷۰

۴-۵- کرنش در سنگ

۱۷۱

۴-۴-۱- رفتار ارتجاعی و غیر ارتجاعی

۱۷۴

۴-۵-۲- روابط تنش-کرنش در حالت کشسانی

۱۷۷

۴-۵-۳- اندازه گیری مشخصات قابلیت شکل پذیری با آزمایش های استاتیکی

۱۷۷

۴-۶- مراجع و منابع مطالعاتی

## فصل پنجم

پی های سطحی بر سنگ

| صفحه | موضوع                               |
|------|-------------------------------------|
| ۱۸۲  | ۱-۵- مقدمه                          |
| ۱۸۶  | ۲-۵- مشخصات پی های سنگی             |
| ۱۸۶  | ۱-۲-۵- انواع پی های سنگی            |
| ۱۹۱  | ۲-۲-۵- رفتار پی های بر سنگ          |
| ۱۹۵  | ۳-۲-۵- تاثیر ساختار زمین شناسی      |
| ۱۹۶  | ۴-۲-۵- روش های حفاری                |
| ۱۹۶  | ۵-۲-۵- مسلح کردن                    |
| ۱۹۷  | ۳-۵- بار های سازه ای                |
| ۱۹۸  | ۱-۳-۵- ساختمان ها                   |
| ۱۹۹  | ۲-۳-۵- پل ها                        |
| ۲۰۰  | ۳-۳-۵- سد ها                        |
| ۲۰۰  | ۵-۵- تاثیر آب زیرزمینی روی رفتار پی |
| ۲۰۱  | ۱-۵-۵- سدها                         |
| ۲۰۲  | ۲-۵-۵- مهار های کششی                |
| ۲۰۲  | ۶-۵- ضریب اطمینان و تحلیل           |
| ۲۰۴  | ۲-۶-۵- طراحی حالت های حدی           |
| ۲۰۵  | ۳-۶-۵- تحلیل حساسیت                 |
| ۲۰۵  | ۴-۶-۵- ضریب اعتماد                  |
| ۲۰۷  | ۷-۵- ظرفیت باربری پی های سطحی       |
| ۲۰۹  | ۲-۷-۵- ظرفیت باربری سنگ شکسته       |
| ۲۱۴  | ۳-۷-۵- شالوده های فرو رفته در سنگ   |
| ۲۱۴  | ۴-۷-۵- ضرایب ظرفیت باربری           |

صفحه

موضوع

|     |                                                  |
|-----|--------------------------------------------------|
| ۲۱۶ | ۵-۷-۵- شالوده های روی زمین شیب دار               |
| ۲۱۸ | ۵-۷-۶- ظرفیت باربری سازندهای با سطح بستر غیر تند |
| ۲۲۳ | ۵-۷-۷- ظرفیت باربری سازندهای لایه ای             |
| ۲۲۶ | ۵-۷-۸- ظرفیت باربری سازندهای کارستی              |
| ۲۲۹ | ۵-۸- پیش بینی نشست                               |
| ۲۳۰ | ۵-۸-۱- سنگ الاستیک                               |
| ۲۳۷ | ۵-۸-۲- سنگ های همگن متعامد                       |
| ۲۴۲ | ۵-۸-۳- سنگ غیر کشسان                             |
| ۲۳۴ | ۵-۹- توزیع تنش در تکیه گاه                       |
| ۲۴۴ | ۵-۱۰- مراجع و منابع مطالعاتی                     |

فصل ششم

پی های فرو رفته در سنگ (سنگ پایه ها)

|     |                                                     |
|-----|-----------------------------------------------------|
| ۲۵۸ | ۶-۱- مقدمه                                          |
| ۲۵۸ | ۶-۱-۱- انواع پی های عمیق                            |
| ۲۵۸ | ۶-۱-۲- مطالعات بر روی سنگ- پایه ها                  |
| ۲۵۹ | ۶-۲- ظرفیت باربری سنگ - پایه ها در فشار             |
| ۲۶۰ | ۶-۲-۱- مکانیزم انتقال بار                           |
| ۲۶۳ | ۶-۲-۲- رفتار برشی سنگ - پایه ها                     |
| ۲۶۴ | ۶-۲-۳- عوامل موثر بر ظرفیت باربری سنگ پایه ها       |
| ۲۶۸ | ۶-۳- مقادیر طرح: مقاومت برشی جداره و مقاومت انتهایی |
| ۲۶۹ | ۶-۳-۱- مقاومت برشی جداره                            |

| صفحه | موضوع                                                     |
|------|-----------------------------------------------------------|
| ۲۷۰  | ۶-۳-۲- ظرفیت باربری نهایی                                 |
| ۲۷۱  | ۶-۴- تغییر شکل محوری                                      |
| ۲۷۱  | ۶-۴-۱- مکانیزم نشست سنگ پایه ها                           |
| ۲۷۳  | ۶-۴-۲- نشست پایه های با مقاومت برشی جداره                 |
| ۲۷۴  | ۶-۴-۳- نشست پایه های با باربری نوک (انتهایی)              |
| ۲۷۶  | ۶-۴-۴- نشست پایه های با مقاومت جداره و مقاومت انتهایی     |
| ۲۸۳  | ۶-۴-۵- سنگ پایه با اعمال پیش بارگذاری                     |
| ۲۸۳  | ۶-۵- نیروی برگنش (بالابرده)                               |
| ۲۸۵  | ۶-۵-۱- مقاومت برشی جداره در برابر نیروی بالابرده          |
| ۲۸۵  | ۶-۵-۲- مقاومت پایه های زنگوله ای در برابر بارهای بالابرده |
| ۲۸۶  | ۶-۶- بارگذاری جانبی بر روی سنگ - پایه ها                  |
| ۲۸۸  | ۶-۶-۱- محاسبه جابجایی با استفاده از منحنی های P-y         |
| ۲۹۵  | ۶-۶-۲- بارگذاری سنگ پایه تحت بار جانبی                    |
| ۲۹۵  | ۶-۸- مراجع و منابع مطالعاتی                               |

## فصل هفتم

### پی های کششی

|     |                                                |
|-----|------------------------------------------------|
| ۳۰۴ | ۷-۱- مقدمه                                     |
| ۳۰۷ | ۷-۲- جنس مهارها و روش های مهاربندی             |
| ۳۰۸ | ۷-۲-۱- بارهای مجاز و ضرایب اطمینان             |
| ۳۰۹ | ۷-۲-۲- نرمی فولاد (سست شدن فولاد)              |
| ۳۱۰ | ۷-۲-۳- خواص مقاومتی رشته ها و میلگردهای فولادی |

| صفحه | موضوع                                                  |
|------|--------------------------------------------------------|
| ۳۱۱  | ۷-۲-۴- کاربردهای میلگردهای سخت مهاری                   |
| ۳۱۳  | ۷-۲-۵- کاربرد مهارهای رشته ای                          |
| ۳۱۴  | ۷-۲-۶- مهارهای با تزریق سیمان                          |
| ۳۲۰  | ۷-۲-۷- مهارهای با تزریق رزین                           |
| ۳۲۲  | ۷-۲-۸- مهارهای مکانیکی                                 |
| ۳۲۳  | ۷-۳-۳- مراحل طراحی مهارهای کششی                        |
| ۳۲۴  | ۷-۳-۱- مکانیزم انتقال بار میان سنگ، مهار و ماده تزریقی |
| ۳۲۶  | ۷-۳-۲- تنش پیوستگی مجاز و طرح مهار                     |
| ۳۲۹  | ۷-۳-۳- مهارهای پیش تنیده و واکنشی (انفعالی)            |
| ۳۳۲  | ۷-۳-۴- باربری کششی مهارهای سنگی                        |
| ۳۴۱  | ۷-۳-۵- عملکرد گروهی                                    |
| ۳۴۱  | ۷-۳-۶- بارگذاری تناوبی مهارها                          |
| ۳۴۲  | ۷-۳-۷- رفتار تابع زمان و خزش                           |
| ۳۴۳  | ۷-۳-۸- تاثیر انفجار روی مهارها                         |
| ۳۴۴  | ۷-۳-۹- مهارهای واقع در ناحیه‌ی یخ زدگی                 |
| ۳۴۵  | ۷-۴-۴- حفاظت در برابر خوردگی                           |
| ۳۴۶  | ۷-۴-۱- مکانیزم خوردگی                                  |
| ۳۴۷  | ۷-۴-۲- انواع خوردگی                                    |
| ۳۴۹  | ۷-۴-۳- شرایط خوردگی                                    |
| ۳۵۰  | ۷-۴-۴- روش های نگهداری در برابر خوردگی                 |
| ۳۵۴  | ۷-۵-۵- نصب و آزمایش                                    |
| ۳۵۵  | ۷-۵-۱- آزمایش آب                                       |

۲۵۶

۷-۵-۲- آزمایش بارگذاری

۲۵۹

۷-۶- مراجع و منابع مطالعاتی

پیوست : کاربرد شبکه استریو در مکانیک سنگ

www.ketab.ir

## پیشگفتار

این کتاب برای پر کردن جای خالی آشکاری در مهندسی ژئوتکنیک به زبان فارسی نوشته شده است. اگرچه در مورد طراحی و ساخت پی های بر سنگ تجربه و تخصص و مراجع فراوانی به زبان های غیر فارسی وجود دارد، ولی تا کنون کتابی به زبان فارسی که در آن مطالب این شاخه از مهندسی ژئوتکنیک جمع آوری شده باشد کمتر ارائه شده است. یکی از دلایل عدم وجود کتابی در مورد پی بر سنگ این است که ساختن پی های بر خاک به گونه معمول مهمتر و شایان توجه تر است. بنابراین، مقدار زیادی متون در مورد پی های بر خاک وجود دارد و این باور در میان مهندسان است که هر گاه پی بر سنگ گذاشته شود، پی ایمن و پایدار خواهد بود. متأسفانه سنگ ممکن است در بطن خود شگفتی های ناخوشایندی در غالب ساختارهای زمین شناسی مانند حفره ها، بخش های هوازده و گسل های پر شده از خاک رس داشته باشد. تمام این ساختارها و ساختارهای بسیار دیگری از این قبیل ممکن است به گسیختگی فاجعه آمیز پی هایی منجر شود که به ظاهر بر سطح سنگ محکم قرار گرفته اند.

به نظر می رسد در اذهان بسیاری از مهندسان، سنگ تکیه گاه نهایی و عالی برای تحمل بارهای مهندسی است و اغلب نیز این چنین است. ولی واژه ی "سنگ" شامل انواع و شرایط گوناگونی از مواد است که برخی از آنها به طور حتم عالی نیستند و برخی بالقوه خطرناکند. نمونه هایی از توده های خطرناک سنگ شامل سنگ های آهکی حل شده و رسوباتی که زیر آنها حفاری شده، گرانیات تجزیه شده، شیل های آماسی و شیست ها و سنگ لوح های به شدت درزه دار یا گسل دار می باشند. کم و بیش تجارب کسب شده از ساختمان سنگ ها شامل مثال های متعدد از مشکلات اقتصادی ناشی از اشتباه ها و یا رفتارهای نامطلوب پی های بر سنگ است. این موارد شامل زیاده برش در حفاری ها، تخریب سطح آماده شده، آب گرفتگی یا یخ زدگی بوسیله نشت آب زیر زمینی، تجمع خرده سنگ های ناشی از حفاری و رگاب شدن کناره های فرسایش پذیر و

طبقه بندی اشتباه و یا شناخت اشتباه مواد در ناحیه هوازده می باشد. طبقه دیگری از مسائل شامل لغزش های سنگی، حرکات گسل ها و یا رفتار دراز مدت سنگ است. مسئله اکتشاف و مشخص کردن خصوصیات پی های سنگی کاری ویژه است و ممکن است نیاز به مهارت لازم در طراحی برای شرایط خاص آب و هوایی و تشخیص مواد و محل مناسب برای پروژه داشته باشد.

از هدف های اصلی این کتاب کمک به خوانندگان، برای آشنایی با اصول مکانیک سنگ و کاربرد این اصول در شناسایی ویژگی های پی هایی که بر سنگ قرار گرفته اند و بالقوه ناپایدارند، نشان دادن روش های طراحی مناسب برای شرایط گسترده زمین شناسی و انواع پی ها و تشریح روش های ساخت پی در سنگ است. فصول یک تا چهار این کتاب به شرح عوامل اولیه مؤثر بر رفتار پی های بر سنگ به عنوان مثال مقاومت و مدول سنگ، مشخصات و جهات شکستگی ها و وضعیت آب زیر زمینی، می پردازند. فصل های پنج تا هفت جزئیات روش های طراحی پی سطحی، پی های عمیق یا شمع های در سنگ (سنگ پایه ها) و پی های کششی را ارائه می دهند. این بخش ها شامل مثال های حل شده است که کاربردهای عملی روش های طراحی را نشان می دهد. مطالب این کتاب بیشتر از کتاب Introduction to Rock Mechanics نوشته R. E. Goodman و کتاب Foundations on Rock نوشته D. C. Wyllie که به عنوان کتاب های اصلی و مرجع توسط اینجانب در تدریس دروس مکانیک سنگ و تونلسازی در بخش مهندسی راه، ساختمان و محیط زیست دانشگاه شیراز مورد استفاده قرار می گیرند، برگرفته شده است. همچنین، سعی شده است که این کتاب در کنار کتاب های موجود در زمینه ی مهندسی ژئوتکنیک، مهندسی شیب های سنگی، مهندسی زمین شناسی و مکانیک سنگ قرار گیرد. استفاده کنندگان از این کتاب می توانند متخصصین و کارشناسان شرکت های مهندسین مشاور در زمینه ژئوتکنیک،

سازه و آب و یا دانشجویان کارشناسی ارشد و دکترای رشته های مهندسی راه و ساختمان و عمران با گرایش مکانیک خاک و مهندسی پی باشند.

پس از الطاف خداوند، تهیه ی این کتاب مرهون همکاری صمیمانه دانشجویان کوشا و علاقه مند بخش راه، ساختمان و محیط زیست دانشگاه شیراز در مقاطع کارشناسی عمران و کارشناسی ارشد و دکترای گرایش مهندسی مکانیک خاک و پی، در سال های متمادی گذشته بوده است. از آنجا که نام بردن از همه آنها ممکن است سبب کاستن از نقش کسانی باشد که نامشان به حسب تصادف آورده نشده بنابراین از ذکر نام ایشان خودداری میکنم. افراد بسیار دیگری در تایپ مطالب و تهیه نسخه نهایی کمک کرده اند که از آنها صمیمانه قدردانی می شود.

از شرکت مهندسين مشاور آسماری که حمایت معنوی و مالی در انتشار این کتاب را به عهده گرفته است و کارشان الگویی است برای دست اندرکاران این حرفه جهت ایجاد ارتباط بین دانشگاه و صنعت صمیمانه سپاسگزاری می نمایم.

ارزش حمایت خانواده ام، همسر و فرزندانم، در طول سالیان تهیه این کتاب در قالب واژه ها نمی گنجد که به این وسیله از آنها صمیمانه قدر دانی می نمایم و به خاطر پشتیبانی های معنوی شان این کتاب را به آنها تقدیم می نمایم.

نادر هاتف

استاد بخش راه، ساختمان و محیط زیست

دانشگاه شیراز