٤٦٧٢٩

دانشگاه شهید باهنر کرمان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی عمران

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران

گرایش مکانیک خاک و پی

بررسی ناهمسانگردی و برآورد مقاومت فشاری سنگها

استاد راهنما:

دکتر محمد حسین باقری پور

مؤلف:

مجتبی اسدی

۱۳۸۷/۲/۱۴

شهریور ماه ۱۳۸۶

ب

٤٠٦٧٢٩

دانشگاه شهید باهنر کرمان

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط احراز درجه کارشناسی ارشد به

گروه مهندسی عمران

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی‌شود.

دانشجو: مجتبی اسدی

استاد راهنما: دکتر محمد حسین باقری پور

داور۱: دکتر محمد محسن توفیق

داور۲: دکتر غلامرضا پور ابراهیم

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی یا نماینده دانشکده: دکتر علی اکبر مقصودی

حق چاپ محفوظ و مخصوص به مؤلف است.

تقدیم به

پدر بزرگوارم که مهربانی را به من آموخت،

و مادر مهربانم که ایثار را برایم معنی کرد.

تقدیر و تشکر

در ابتدا بر خود لازم می دانم از همکاری بی شائبه و راهنمایی های ارزنده استاد گرانقدر جناب آقای دکتر باقری پور تشکر و قدردانی نمایم. همچنین مراتب ارادت خود را به محضر اساتید محترم گروه مهندسی عمران دانشگاه شهید باهنر کرمان که در طول دوران تحصیل افتخار شاگردی ایشان را داشته ام خصوصاً آقایان دکتر مقصودی، فدایی و رهگذر اعلام می دارم.

طی انجام مراحل این تحقیق از همکاری و راهنمایی های دوستان بزرگوارم آقای دکتر رهنما و آقایان مهندس پناهی، توکلی و شری زاده استفاده نموده و در اینجا از این عزیزان صمیمانه سپاسگذاری می نمایم.

همکاری پرسنل زحمتکش گروه مهندسی عمران دانشگاه شهید باهنر کرمان نیز در خور تقدیر است. سلامتی و توفیق کلیه این عزیزان را از درگاه ایزد منان خواستارم.

خدایا چنان کن سرانجام کار

تو خشنود باشی و ما رستگار

چکیده

ویژگیهای مکانیکی توده های سنگی نظیر مقاومت فشاری و مدول های اساسی بواسطه ی وجود درزه های سراسری تابع جهت میدان تنشهای موجود می گردد که این وضعیت در اصطلاح ناهمسانگردی (anisotropy) نامیده می شود. پدیده ی ناهمسانگردی بصورت تئوری عمدتاً از دو طریق تحلیلی و روابط تجربی قابل بررسی است و مطالعات گسترده ای نیز در این زمینه صورت گرفته است. در سالهای اخیر روشهای نوین محاسباتی و عددی نیز در تحلیل رفتار و خواص توده های سنگی و منجمله خواص ناهمسانگردی به وسعت به کار گرفته شده اند. علیرغم همه ی تلاشها تا کنون راه حل تئوری جامعی که رفتار ناهمسانگرد توده سنگها را به نحو رضایتبخشی پیش بینی نماید ارائه نشده است و کماکان استفاده از نتایج آزمایشگاهی مطمئن ترین روش در این زمینه محسوب می گردد. ضمن اینکه جهت دستیابی به نتایج مناسب با روشهای عددی، استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی متعدد در مدلهای عددی امری اجتناب ناپذیر خواهد بود. در تحقیق حاضر ناهمسانگردی بصورت تئوری و از جنبه های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا معیاری تجربی برای مقاومت سنگهای ناهمسانگرد با درزه های سراسری ارائه شده است که کارایی قابل ملاحظه ای در پیش بینی رفتار مقاومتی اینگونه سنگها نشان می دهد. همچنین امکان مدلسازی شرایط آزمایشگاهی تست سه محوری بر روی نمونه های درزه دار با استفاده از نرم افزار UDEC 4.0 مورد بررسی قرار گرفته و ضمن مقایسه نتایج حاصل با داده های تجربی نتیجه گیریهایی پیرامون اعتبار خروجیهای این نرم افزار تجاری برای سنگهای ناهمسانگرد انجام گرفته است. علاوه بر این با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی چند لایه پیشخور روشی جدید برای برآورد مقاومت سنگها معرفی شده است. نظر به اینکه معیار تجربی ارائه شده در این پژوهش به فرم «پارامتر کاهشی» بوده و مقاومت سنگها ی درزه دار را بصورت کسری از مقاومت سنگ بکر بدست می دهد، ابتدا تخمین مقاومت سنگهای بکر با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی مورد توجه قرار گرفته و پیش بینی های شبکه با مقادیر آزمایشگاهی موجود و معیار معتبر تجربی Hoek-Brown مقایسه گردیده اند. سپس برآورد مستقیم مقاومت نمونه های ناهمسانگرد درزه دار با استفاده از تکنیک شبکه عصبی بررسی و نتایج با داده های تجربی مقایسه شده اند که تطابق مناسب ارزیابی های شبکه با اطلاعات تجربی موید قابلیتهای این روش می باشد. در پایان می توان ضمن مقایسه روشهای مختلف مناسبترین روش جهت برآورد مقاومت سنگها را معرفی نمود.

کلمات کلیدی : ناهمسانگردی، مقاومت فشاری، سنگهای درزه دار، UDEC، معیار تجربی، شبکه های عصبی مصنوعی

فهرست مطالب

فصل اول – مقدمه و معرفی اهداف تحقیق

۱ـ۱ـ مقدمه ۲

۱ـ۲ـ اهداف پایان نامه ۳

۱ـ۳ـ ساختار پایان نامه ۴

فصل دوم – معیارهای شکست سنگهای ناهمسانگرد

۲ـ۱ـ مقدمه ۷

۲ـ۲ـ معیارهای تئوریک ۸

۲ـ۲ـ۱ـ شکست لغزشی ۸

۲ـ۲ ـ۲ـ شکست غیر لغزشی ۱۱

۲ـ۳ـ معیارهای تجربی ۱۴

۲ـ۳ـ۱ـ معیار Ramamurthy-Arora ۱۴

۲ـ۳ـ۲ـ معیار Bagheripour-Mostyn ۱۸

فصل سوم – شبکه های عصبی مصنوعی(ANNs)

۳ـ۱ـ مقدمه ۲۲

۳ـ۲ـ تاریخچه مختصر شبکه های عصبی ۲۲

۳ـ۳ـ شبکه عصبی واقعی ۲۳

۳ـ۴ـ شبکه عصبی مصنوعی ۲۴

۳ـ۵ـ ساختار نرون های مصنوعی ۲۶

۳ـ۵ـ۱ـ نرون ساده با یک ورودی ۲۶

۳ـ۵ـ۲ـ نرون با چند ورودی ۲۷

۳ـ۵ـ۳ـ لایه نرون ۲۸

۳ـ۶ـ توابع تحریک ۲۸

۳ـ۶ـ۱ـ تابع پله ای ۲۹

۳ـ۶ـ۲ـ تابع انتقال خطی ۲۹

۳ـ۶ـ۳ـ توابع انتقال سیگموئید ۳۰

۳ـ۷ـ انواع اتصالها در شبکه های عصبی مصنوعی ۳۱
۳ـ۸ـ طراحی شبکه های عصبی مصنوعی ۳۱
۳ـ۸ـ۱ـ انتخاب ساختار مناسب ۳۱
۳ـ۸ـ۲ـ تعیین تعداد نرونها ۳۲
۳-۸-۳- انتخاب توابع انتقال بهینه ۳۲
۳-۸-۴- تعیین روش آموزش ۳۲
۳ـ۹ـ آموزش شبکه ۳۳
۳ـ۹ـ۱ـ روش کاهش گرادیان - قانون آموزش Widrow-Hoff ۳۴
۳ـ۹ـ۲ـ آموزش با نرخ یادگیری متغیر ۳۶
۳ـ۹ـ۳ـ قانون آموزش پس انتشار ۳۷
۳ـ۹ـ۴ـ روشهای گرادیان مزدوج ۴۰
۳ـ۹ـ۵ـ روش نیوتن ۴۰
۳ـ۹ـ۶ـ روشهای شبه نیوتن ۴۱
۳ـ۹ـ۷ـ الگوریتم Levenberg-Marquardt ۴۲
۳ـ۱۰ـ کاربرد شبکه ی عصبی مصنوعی در برآورد مقاومت سنگها ۴۳

فصل چهارم - بررسی ناهمسانگردی و برآورد مقاومت سنگهای درزه دار با استفاده از UDEC

۴ـ۱ـ مقدمه ۴۵
۴ـ۲ـ روش المان مجزا ۴۶
۴ـ۳ـ معرفی نرم افزار UDEC ۴۷
۴ـ۴ـ مدلسازی با UDEC ۴۹
۴ـ۴ـ۱ـ نمونه بکر در آزمایش سه محوری ۴۹
۴ـ۴ـ۲ـ تست برش مستقیم ۵۰
۴ـ۴ـ۳ـ آزمایش سه محوری بر روی نمونه های ناهمسانگرد درزه دار ۵۱
۴ـ۵ـ مصالح بکر ۵۲
۴ـ۶ـ مصالح درزه ۵۴
۴ـ۶ـ۱ـ رفتار اتساعی درزه ۵۴
۴ـ۶ـ۲ـ مقاومت برشی درزه ۵۵
۴ـ۶ـ۳ـ برآورد ϕ_b ۵۶

۴ـ۶ـ۴ـ سختی نرمال و برشی ۵۷
۴ـ۷ـ مقایسه مدل UDEC با داده های آزمایشگاهی ۶۳
۴ـ۸ـ جمع بندی و نتیجه گیری ۶۵

فصل پنجم – برآورد مقاومت سنگهای درزه دار با معیار تجربی
۵ـ۱ـ مقدمه ۶۹
۵ـ۲ـ معرفی نرم افزار NONLIN ۷۰
۵ـ۳ـ فاکتور کاهشی ۷۱
۵ـ۴ـ مطالعه ی داده های آزمایشگاهی ۷۲
۵ـ۵ـ بررسی نتایج رگرسیون و ثوابت سنگها ۷۶
۵ـ۶ـ پارامتر وابسته به فشار محصور کننده (c) ۷۶
۵ـ۷ـ فاکتور کاهشی در تنش های جانبی متفاوت ۷۷
۵ـ۸ـ تعیین پارامترهای شکل (n , m) ۷۹
۵ـ۹ـ خلاصه و جمع بندی ۸۱

فصل ششم – برآورد مقاومت فشاری سنگهای بکر با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی
۶ـ۱ـ تعریف مسئله ۸۳
۶ـ۲ـ جمع آوری داده های آزمایشگاهی ۸۴
۶ـ۳ـ پارامترهای ورودی و خروجی ۹۱
۶ـ۴ـ طراحی شبکه عصبی ۹۲
۶ـ۴ـ۱ـ الگوریتم آموزش ۹۲
۶ـ۴ـ۲ـ توابع انتقال ۹۴
۶ـ۴ـ۳ـ تعداد نرونهای لایه پنهان ۹۷
۶ـ۴ـ۴ـ تعداد دوره های آموزش – بررسی همگرایی شبکه ۹۷
۶ـ۴ـ۵ـ طرح نهایی شبکه عصبی ۹۸
۶ـ۵ـ برآورد مقاومت سنگهای بکر ۱۰۵
۶ـ۶ـ جمع بندی و نتیجه گیری ۱۰۷

فصل هفتم - بررسی شکست سنگهای ناهمسانگرد درزه دار با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی

۷ـ۱ـ مقدمه ۱۱۰
۷ـ۲ـ گردآوری داده های تجربی ۱۱۰
۷ـ۳ـ تعیین عوامل موثر بر مقاومت سنگهای درزه دار ۱۱۴
۷ـ۴ـ طراحی شبکه ۱۱۵
۷ـ۵ـ برآورد مقاومت سنگهای درزه دار ۱۲۳
۷ـ۶ـ خلاصه و جمع بندی ۱۲۴

فصل هشتم - نتایج و پیشنهادات

۸ـ۱ـ نتایج ۱۲۹
۸ـ۲ـ پیشنهاداتی برای مطالعات آتی ۱۳۱

مراجع ۱۳۲

فصل اول

مقدمه و معرفی اهداف تحقیق

۱ـ۱ـ مقدمه

مبحث مقاومت و گسیختگی مصالح یکی از مباحث مهم مکانیک جامدات بشمار می رود. بدلیل ویژگیهای خاص مصالح ژئوتکنیکی رفتار این مصالح و بطور خاص مقاومت و شکست آنها در حوزه های تخصصی مکانیک سنگ بطور جداگانه مورد مطالعه قرار می گیرد. یکی از خصوصیات توده های سنگی ناهمسانگردی است که بدلیل وجود صفحه های ضعیف مانند درزه یا دسته درزه های سراسری بوجود می آید. در این شرایط خواص توده سنگی مثل مقاومت جهت دار و وابسته به جهت تنشهای اعمالی می گردد. به عنوان مثال ممکن است در شرایطی گسیختگی به واسطه ی لغزش روی درزه مشاهده گردد و با تغییر جهت میدان تنش، شکست توده ی سنگی ناشی از شکست مصالح بکر باشد. بررسی توده سنگها در این شرایط و مطالعه ی اثر ناهمسانگردی بطور کلی به دو صورت تئوری و تجربی امکان پذیر است. اگر چه استفاده از آزمونهای آزمایشگاهی و برجا به نتایج قابل اعتمادی منجر می گردد، لیکن انجام آزمایشهای مکانیک سنگ معمولاً مستلزم صرف هزینه قابل توجه است. لذا روشهای تئوری بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته اند.

یکی از روشهای تئوری روش تحلیلی است که بدلیل تعدد عوامل موثر بر رفتار سنگها و ارتباط پیچیده موجود بین این عوامل راه حل تحلیلی جامع و دقیقی برای مقاومت سنگها ارائه نشده است. بدین علت گروهی از محققین بر پایه مشاهدات آزمایشگاهی روابطی تجربی را برای مقاومت سنگهای ناهمسانگرد ارائه کرده اند. روابط تجربی موجود نیز عموماً نواقصی دارند و معمولاً قابل تعمیم به کلیه سنگها نمی باشند. علاوه بر این می توان به روشهای عددی اشاره کرد که به سرعت در شاخه های مختلف مهندسی از جمله مکانیک سنگ گسترش یافته اند. مدلسازی عددی می تواند راه حل مناسبی برای تحلیل رفتار توده سنگها و بطور خاص تعیین مقاومت آنها قلمداد گردد. لیکن این امر مستلزم تعیین پاره ای از خواص سنگ با استفاده از آزمایشهای بعضاً پر هزینه می باشد. لذا با توجه به شرایط موجود طرح و یا آنالیز، می توان مقاومت توده ی ناهمسانگرد را به هر یک از روشهای آزمایشگاهی، تحلیلی، روابط تجربی و مدلهای عددی برآورد نمود. معذالک همواره بدست آوردن تقریبی از مقاومت با کمترین هزینه و بیشترین دقت از اهمیت بسیاری برخوردار است.

در سالهای اخیر و بطور کلی در علوم مهندسی در کنار گسترش روشهای تجربی و آماری تکنیک های جالب توجه دیگری نیز گسترش یافته اند. از جمله این تکنیک ها می توان به شبکه های عصبی مصنوعی، الگوریتم ژنتیک و تئوری منطق فازی اشاره نمود که در مسائل مهمی همچون شبیه سازی نتایج آزمایشگاهی و برآورد نتایج مورد نظر، بهینه یابی و بهینه سازی مسائل و . . . مورد استفاده قرار می گیرند. همانطور که ذکر شد با توجه به هزینه ی انجام آزمونهای آزمایشگاهی مخصوصاً مکانیک سنگ و بعضاً وقت گیر بودن و سایر مشکلات

موجود در این زمینه می توان از روشهای جدید همچون شبکه های عصبی در این مورد بهره جست و این مسئله ایست که در این پایان نامه مورد توجه قرار گرفته است.

در کنار این مسئله و در جهت تائید و تکمیل داده های تجربی مورد نظر از تحلیل عددی و شبیه سازی کامپیوتری آزمایشهای مکانیک سنگ به نحو احسن بهره گرفته شده است و از نرم افزار مناسبی چون UDEC که مختص مدلسازی عددی سنگهای درزه دار است استفاده شده است.

۲ـ۱ـ اهداف پایان نامه

در تحقیق حاضر به مطالعه ی ناهمسانگردی مقاومتی و برآورد مقاومت سنگها در شرایط مختلف با استفاده از روشهای متداول، نظیر آنالیز عددی، و نیز روشهای جدید، نظیر شبکه های عصبی مصنوعی، پرداخته شده است. بدین منظور از اطلاعات تجربی موجود در متون فنی استفاده شده است که با توجه به هزینه بر بودن آزمایشهای مکانیک سنگ و خصوصاً تست سه محوری، امری متداول در تحقیقات مشابه می باشد.

بمنظور مطالعه ی پدیده ی ناهمسانگردی ابتدا از نرم افزار UDEC 4.0 جهت بررسی شکست سنگهای ناهمسانگرد استفاده شده و خروجی های این نرم افزار با مقادیر تجربی مقایسه شده اند و به این ترتیب اعتبار نتایج بدست آمده از UDEC در آنالیز سنگهای ناهمسانگرد درزه دار مورد بررسی قرار گرفته است.

علاوه بر این با استفاده از نتایج این فصل، نتیجه گیریهایی نیز پیرامون عوامل موثر بر پدیده ی ناهمسانگردی صورت گرفته است. ضمن آنکه می توان با استفاده از روش معرفی شده در این فصل مقاومت نمونه های سنگی درزه دار را برآورد نمود.

در ادامه ی پایان نامه مسئله ی برآورد مقاومت فشاری سنگهای ناهمسانگرد از زاویه ی دیگری مورد بررسی قرار گرفته و معیاری تجربی برای این منظور پیشنهاد گردیده است. معیار پیشنهادی به فرم پارامتر کاهشی است. بدین معنی که مقاومت سنگ درزه دار بصورت کسری از مقاومت سنگ بکر مورد توجه قرار گرفته و تعیین می گردد. آنالیز رگرسیون بر روی داده های تجربی و بررسی نتایج حاصل، نشان دهنده ی دقت و انعطاف قابل توجه معیار پیشنهادی است. علاوه بر این در این معیار نواقص معیار های قبلی نظیر عدم پیوستگی در کلیه زوایای درزه و یا عدم تغییر معیار متناسب با تغییرات فشار محصور کننده ی جانبی، مشاهده نمی شوند.

در پایان، موضوع برآورد مقاومت فشاری سنگها با استفاده از تکنیک شبکه های عصبی مصنوعی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است که تا کنون در حوزه ی مطالعات مربوط به مهندسی سنگ به آن پرداخته نشده است. در این تحقیق برآورد مقاومت فشاری سنگها با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی در دو فصل مجزا ارائه شده است. در واقع با توجه به

جدید بودن روش مذکور در این حوزه و نیز اهمیت موضوع تعیین مقاومت سنگهای بکر در کلیه ی مباحث مکانیک سنگ و مخصوصاً برآورد مقاومت توده سنگهای درزه دار و ناهمسانگرد، ابتدا در یک فصل برآورد مقاومت سنگهای بکر مورد بررسی قرار گرفته است. صرفنظر از اهمیت و کاربرد نتایج این فصل در شاخه های کاربردی مکانیک سنگ، بدلیل اینکه در معیار پیشنهادی در این پایان نامه مقاومت سنگ درزه دار بصورت کسری از مقاومت سنگ بکر در شرایط مشابه بیان می شود، برآورد مناسب و دقیقتر مقاومت سنگ بکر تاثیر بسزایی در دستیابی به نتایج بهتر در مورد سنگ درزه دار خواهد داشت.

در ادامه ی مبحث تخمین مقاومت سنگها با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی، به برآورد مستقیم مقاومت فشاری سنگهای درزه دار با این روش پرداخته شده است. مزیت مهم استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی در برآورد مقاومت سنگها، افزایش دقت پیش بینی ها تنها با گسترش اطلاعات آموزشی شبکه و بدون نیاز به تغییرات اساسی در مبانی راه حل ارائه شده می باشد.

۳ـ۱ـ ساختار پایان نامه

پایان نامه ی حاضر در هشت فصل تنظیم و ارائه شده است. فصل اول، فصل حاضر، به معرفی اهداف و ساختار پایان نامه اختصاص دارد.

در فصل دوم تعدادی از معیارهای شکست موجود برای سنگهای ناهمسانگرد معرفی شده اند.

فصل سوم به معرفی و تشریح مختصر نحوه ی عملکرد شبکه های عصبی مصنوعی اختصاص یافته است.

در فصل چهارم ضمن معرفی نرم افزار جامع المان مجزا (UDEC) پدیده ناهمسانگردی و شکست سنگهای درزه دار با استفاده از این نرم افزار مورد مطالعه قرار گرفته و خروجی های آن با مقادیر تجربی مقایسه شده اند.

در فصل پنجم معیاری تجربی ارائه شده است که با استفاده از آن می توان با داشتن اطلاعات معدودی مقاومت فشاری سنگ درزه دار را بصورت کسری از مقاومت سنگ بکر در شرایط مشابه بدست آورد. در این فصل آنالیزهای رگرسیون با استفاده از نرم افزار NONLIN انجام گرفته و لذا فصل حاوی مقدمه ای پیرامون نرم افزار مذکور نیز می باشد.

در دو فصل ششم و هفتم مسئله ی برآورد مقاومت سنگها با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. همانگونه که اشاره شد نظر به اهمیت موضوع تعیین مقاومت سنگهای بکر و ارتباط آن با مقاومت سنگهای درزه دار در این پایان نامه طی یک فصل مجزا (فصل ششم) به این مسئله نیز پرداخته شده است. به دلیل تشابه تکنیکی

فصل مذکور با فصلی که به برآورد مقاومت سنگهای درزه دار با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی اختصاص دارد (فصل هفتم) این دو فصل در انتهای پایان نامه قرار داده شده اند.

در پایان، فصل هشتم به بیان نتایج پایان نامه و پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی در این زمینه اختصاص یافته است.

فصل دوم

معیارهای شکست سنگهای ناهمسانگرد

۱ـ۲ـ مقدمه

در این فصل مطالعات انجام شده در زمینه ی معیارهای شکست مورد بررسی قرار گرفته و چند معیار ارائه شده در این زمینه معرفی می‌گردد . به طور کلی معیارهای موجود را می‌توان به دو دسته‌ی تئوری و تجربی تقسیم نمود. مقاومت فشاری توده‌های سنگی تحت تاثیر عوامل متعددی قرار دارد لذا راه حل تئوری جامعی که به خوبی قادر به ارزیابی خواص مکانیکی (از جمله مقاومت فشاری) توده سنگها باشد تا کنون ارائه نگردیده است. با این وجود روابط تحلیلی قادرند در شرایط خاص تا حدودی ویژگیهای دگر شکلی و مقاومتی سنگها را بر آورد نمایند. روابط ارائه شده توسط Tien & kuo [31], Bray [11] , Jaeger [36] بر اساس آنالیز های تحلیلی بدست آمده‌اند. همانگونه که ذکر شد روابط تئوری به خوبی قادر به پیش‌بینی رفتار سنگها نبوده لذا کاربرد آنها در حوزه ی کاربردی و عملی مهندسی سنگ، محدود می‌باشد. بنابراین معیارهای تجربی شکست به منظور ارائه روابط قابل استفاده در آنالیز و طراحی و با تکیه بر مشاهدات تجربی و آزمایشگاهی مورد توجه قرار گرفته اند. از سوی دیگر تنوع حالات مورد بررسی در مکانیک سنگ، از سنگهای بکر و نسبتاً همسانگرد تا توده سنگهای ناهمسانگرد با الگوی تصادفی توزیع درزه، سبب آن شده است که نتوان رابطه‌ای برای کلیه‌ی حالات موجود معرفی نمود. معذالک تا کنون معیارهای تجربی متعددی جهت ارزیابی مقاومت فشاری سنگها ارائه گردیده است. معیار معروف Hoek & Brown [31] مقاومت فشاری سنگها را اعم از همسانگرد (بکر و درزه‌دار) و غیر همسانگرد (دارای درزه‌های غالب) پیش‌بینی می‌کند. با این وجود محبوبیت و مقبولیت این معیار عمدتاً به سادگی و کاربرد بالای آن در برآورد مقاومت فشاری سنگهای همسانگرد برمی‌گردد.

همچنین می‌توان به معیارهای دیگری نظیر Bieniawski [8] و Johnston [38] در زمینه‌ی مقاومت سنگهای همسانگرد نیز اشاره نمود که همانند معیار Hoek-Brown کاربرد اصلی آنها برآورد مقاومت سنگهای بکر و یا درزه دار همسانگرد می باشد.

توده‌های سنگی تحت تاثیر عواملی چون وجود درزه‌های سراسری[1] دارای جهت غالب و مشخص[2] و لایه‌بندی[3] رفتار مکانیکی ناهمسانگردی را نشان می‌دهند. به این معنا که خواص مکانیکی اینگونه سنگها به جهت میدان تنشهای اعمالی وابسته می‌گردد. علیرغم تلاش‌های فراوانی که در دهه‌های گذشته صرف بررسی و مطالعه‌ی ناهمسانگردی سنگها شده است، تاکنون راه حل مناسبی برای توضیح این پدیده ارائه نشده است [68]. لیکن امروزه روابط تجربی متعددی وجود دارد که می‌توان از آنها در مسائل کاربردی مهندسی سنگ بهره برد. روابط تجربی ارائه شده توسط McLamore & Gray [47] ، Ramamurthy & Arora [59] و

---

[1] Through - going
[2] Well - defined
[3] Schistosity

Bagheripour & Mostyn [3] از جمله معیارهای تجربی موجود برای ارزیابی مقاومت فشاری سنگهای ناهمسانگرد محسوب می‌گردند.

معیارهای شکست در حالت کلی به صورت یک سطح، که *سطح گسیختگی* نامیده می‌شود، در دستگاه تنشهای اصلی $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ تعریف می شوند به شکلی که خواهیم داشت:

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0 \qquad (۲\text{ـ}۱)$$

در معیارهای تجربی تابع F بر اساس مشاهدات نتایج آزمایشگاهی تعیین می‌گردد. به علت محدودیتهای فیزیکی در انجام آزمایشهای تجربی، معیارهای موجود عموماً به صورت تابعی از تنشهای اصلی کوچکتر و بزرگتر ارائه شده‌اند. در واقع تاثیر تنش اصلی متوسط (σ_2) در گسیختگی مورد توجه قرار نمی‌گیرد.

۲ـ۲ـ معیارهای تئوریک

در این قسمت دو معیار تئوریک ارائه شده برای گسیختگی سنگهای ناهمسانگرد مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این تحقیق نوع خاصی از سنگهای ناهمسانگرد، موسوم به همسانگرد مایل[1] مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. سنگهایی که دارای درزه‌های سراسری، به صورت تک و یا دسته درزه‌ی موازی، می‌باشند جزء این گروه قلمداد می‌شوند. گسیختگی اینگونه سنگها در دو مد مجزا قابل بررسی است : ۱ـ مد شکست لغزشی و ۲ـ مد غیر لغزشی.

در حالت اول، شکست سنگ بواسطه‌ی لغزش بر روی ناپیوستگی (درزه) رخ می‌دهد در حالیکه در حالت دیگر امکان لغزش بر روی درزه ایجاد نشده و شکست مصالح سنگی غالب خواهد بود [3]. نخستین معیاری که در این بخش معرفی می‌شود معیار Jaeger-Cook است که نقطه قوت آن در ارزیابی شکست لغزشی می‌باشد. در ادامه معیار تئوریک دیگری نیز معرفی می‌شود که نسبتاً جدید بوده و با پذیرش معیار Jaeger-Cook در مد لغزشی، به صورت تئوریک و با استفاده از تئوری الاستیسیته و نظریه‌ی کرنش محوری ماکزیمم، مقاومت فشاری سنگهای ناهمسانگرد (مایل) را در مد غیر لغزشی برآورد می‌نماید.

۱ـ۲ـ۲ـ شکست لغزشی

Jaeger [36] و Jaeger & Cook [37] مقاومت نمونه‌های سنگی دارای تک درزه یا دسته‌ای از درزه‌های موازی را به صورت تئوریک محاسبه نمودند. بدین منظور آنها فرض نمودند که مقاومت برشی سطوح ناپیوستگی از مقاومت برشی سنگ سالم[2] کمتر بوده و با

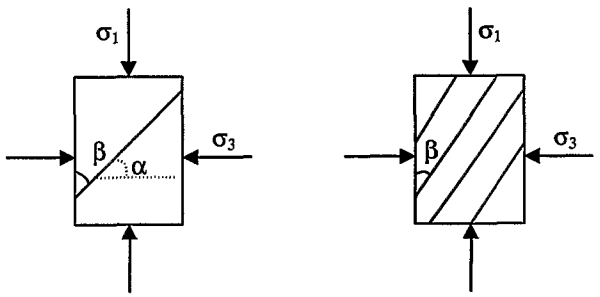
[1] Transversely isotropic
[2] Intact

استفاده از رابطه‌ی موهر- کولمب قابل بیان باشد. لذا برای سطوح ناپیوستگی (درزه) خواهیم داشت:

$$\tau_j = \sigma_n \tan\phi_j + c_j \qquad (۲\text{-}۲)$$

که در این رابطه اندیس j نشان دهنده درزه می‌باشد.

شکل ۱-۲ یک نمونه‌ی سنگی که تحت سیستم تنش موجود در آستانه‌ی گسیختگی لغزشی قرار دارد را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۲) نمونه سنگی در آستانه ی گسیختگی لغزشی

با استفاده از تبدیل تنشها و با توجه به سیستم تنش نشان داده شده در شکل ۱-۲ تنش نرمال و برشی بر روی سطح درزه را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\alpha \qquad (۲\text{-}۳)$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\alpha \qquad (۲\text{-}۴)$$

چنانچه نمونه در آستانه‌ی گسیختگی لغزشی قرار داشته باشد می‌توان روابط ۳-۲ و ۴-۲ را در رابطه ی موهر- کولمب، (۲-۲)، جایگزین نمود.

$$\sigma_1\left[\sin 2\alpha - \tan\phi_j(1+\cos 2\alpha)\right] = 2c_j + \sigma_3\left[\sin 2\alpha + \tan\phi_j(1-\cos 2\alpha)\right] \qquad (۲\text{-}۵)$$

در نهایت پس از انجام ساده سازیهای جبری و نیز استفاده از روابط مثلثاتی رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{2(c_j + \sigma_3 \tan\phi_j)}{(1 - \tan\phi_j \tan\alpha)\sin 2\alpha} \qquad (۲\text{-}۶)$$

رابطه‌ی ۶ -۲ شرط گسیختگی لغزشی نمونه‌ی سنگی دارای درزه یا دسته‌ای از درزه‌های موازی را با توجه به پارامترهای مقاومت برشی و نیز زاویه‌ای درزه بیان می‌کند.

عموماً در مسائل کاربردی مکانیک سنگ ، بجای زاویه‌ای α زاویه‌ی سطح ناپیوستگی با امتداد تنش اصلی حداکثر (σ_1) ,β , مورد استفاده قرار می‌گیرد. لذا می‌توان نوشت:

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha \qquad (۲\text{ـ}۷)$$

می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ۶ ـ۲ آن مقدار از زاویه ی α که بـه ازاء آن نمونـه کمتـرین مقاومت را نشان می‌دهد بدست آورد. مشتق‌گیری از رابطه‌ی مذکور و سپس صفر قرار دادن آن به رابطه ی زیر منتهی می‌شود:

$$\tan 2\alpha = -\cot\phi_j \qquad (۲\text{ـ}۸)$$

و یا معادلاً :

$$\beta_{\min} = 45 - \frac{\phi_j}{2} \qquad (۲\text{ـ}۹)$$

رابطه‌ی ۹ـ۲ شرایطی را که در آن نمونه کمترین مقاومت فشاری را دارد نشان می‌دهـد. مشاهدات تجربی متعدد صحت رابطه‌ی تئوری مذکور را تایید می‌نمایند [59].

براساس این تئوری تنش تفاضلی مورد نیاز جهت ایجاد لغـزش بـر روی صـفحه ی درزه برای زمانیکه زاویه‌ی β نزدیک به صفر و نود درجه باشد مقدار بسیار زیادی داشته و در حد بـه سمت بی‌نهایت میل می‌کند. لذا نمودارها در محل مقاومت سنگ سالم قطع می‌شوند تـا نتـایج منطقی تری حاصل گردد (شکل ۲-۲).

یکی دیگر از نواقص معیار Jaeger-Cook اینست که برای زوایای ناپیوستگی نزدیـک بـه صفر و نود درجه مقاومـت یکسـانی را پـیش‌بینـی مـی‌کنـد . در حالیکـه مشـاهدات تجربـی و آزمایشگاهی این مسئله را رد نموده و عموماً سنگها دارای مقاومت فشاری متفـاوتی در زوایـای مذکور می‌باشند . فرم تعمیم یافته‌ی این معیار مشکل اخیـر را برطـرف نمـوده و امکـان وجـود مقاومت نابرابر در زوایای مذکور را فراهم می‌آورد (شکل ۲ـ۲). معذالک وجود لبـه‌هـای تنـد در محل برخورد خطوط مقاومت لغزشی و سنگ بکر در عمل وجود نداشته و نتایج واقعـی خـلاف این امر را نشان می‌دهد [31].

تاثیر افزایش فشار جانبی بر کاهش ناهمسانگردی مقاومتی (anisotropy) بـا آزمایشـهای متعدد به اثبات رسیده است، به نحوی کـه بـا افـزایش σ_3 منحنـی مقاومـت در برابـر زاویـه‌ی ناهمسانگردی (β) شکل هموار تری به خود می‌گیرد. این روند تا آنجا ادامه می‌یابد که منحنـی مذکور به شکل خطی در آمده و تاثیر وجـود درزه در مقاومـت سـنگ بـه طـور کامـل از بـین می‌رود. بررسی روند تغییرات معیار Jaeger-Cook به واسـطه‌ی تغییـر در فشـار جـانبی نشـان می‌دهد که با افزایش σ_3 منحنی این معیار فقط به سـمت بـالا تغییـر مکـان داده و هیچگونـه