



لرزه زمین ساخت

(کارشناسی ارشد تکتونیک)

دکتر محمد خلیج دکتر مهناز ندایی

امروزه کتاب‌خوانی و علم‌آموزی، نه تنها یک وظیفه‌ی ملی، که یک واجب دینی است.

مقام معظم رهبری

در عصر حاضر یکی از شاخصه‌های ارزیابی رشد، توسعه و پیشرفت فرهنگی هر کشوری میزان تولید کتاب، مطالعه و کتاب‌خوانی مردم آن مرز و بوم است. ایران اسلامی نیز از دیرباز تاکنون با داشتن تمدنی چندهزارساله و مراکز متعدد علمی، فرهنگی، کتابخانه‌های معتبر، علما و دانشمندان بزرگ با آثار ارزشمند تاریخی، سرآمد دولت‌ها و ملت‌های دیگر بوده و در عرصه‌ی فرهنگ و تمدن جهانی به‌سان خورشیدی تابناک همچنان می‌درخشد و با فرزندان نیک‌نهاد خویش هنرنمایی می‌کند. چه کسی است که در دنیا با دانشمندان فرزانه و نام‌آور ایرانی همچون ابوعلی سینا، ابوریحان بیرونی، فارابی، خوارزمی و ... همچنین شاعران برجسته‌ای نظیر فردوسی، سعدی، مولوی، حافظ و ... آشنا نباشد و در مقابل عظمت آنها سر تعظیم فرود نیاورد. تمامی این افتخارات ارزشمند، برگرفته از میزان عشق و علاقه فراوان ملت ما به فراگیری علم و دانش از طریق خواندن و مطالعه منابع و کتاب‌های گوناگون است. به شکرانه‌ی الهی، تاریخ و گذشته ما، همیشه درخشان و پربار است. ولی اکنون در این زمینه در چه جایگاهی قرار داریم؟ آمار و ارقام ارائه‌شده از سوی مجامع و سازمان‌های فرهنگی در مورد سرانه‌ی مطالعه‌ی هر ایرانی، برایمان چندان امیدوارکننده نمی‌باشد و رهبر معظم انقلاب اسلامی نیز از این وضعیت بارها اظهار گله و ناخشنودی نموده‌اند.

کتاب، دروازه‌ای به سوی گستره‌ی دانش و معرفت است و کتاب خوب، یکی از بهترین ابزارهای کمال بشری است. همه‌ی دستاوردهای بشر در سراسر عمر جهان تا آنجا که قابل کتابت بوده است، در میان دست‌نوشته‌هایی است که انسان‌ها پدید آورده و می‌آورند. در این مجموعه‌ی بی‌نظیر، تعالیم الهی، درس‌های پیامبران به بشر، و همچنین علوم مختلفی است که سعادت بشر بدون آگاهی از آنها امکان‌پذیر نیست. کسی که با دنیای زیبا و زندگی‌بخش کتاب ارتباط ندارد بی‌شک از مهم‌ترین دستاوردهای انسانی و نیز از بیشترین معارف الهی و بشری محروم است. با این دیدگاه، به‌روشنی می‌توان ارزش و مفهوم رمزی عمیق در این حقیقت تاریخی را دریافت که اولین خطاب خداوند متعال به پیامبر گرامی اسلام (ص) این است که «بخوان!» و در اولین

سوره‌ای که بر آن فرستاده‌ی عظیم‌الشان خداوند، فرود آمده، نام «قلم» به تجلیل یاد شده‌است: «إِقْرَأْ وَرَبُّكَ الْأَكْرَمُ. الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ» در اهمیت عنصر کتاب برای تکامل جامعه‌ی انسانی، همین بس که تمامی ادیان آسمانی و رجال بزرگ تاریخ بشری، از طریق کتاب جاودانه مانده‌اند.

دانشگاه پیام‌نور با گستره‌ی جغرافیایی ایران‌شمول خود با هدف آموزش برای همه، همه‌جا و همه‌وقت، به‌عنوان دانشگاهی کتاب‌محور در نظام آموزش عالی کشورمان، افتخار دارد جایگاه اندیشه‌سازی و خردورزی بخش عظیمی از جوانان جویای علم این مرز و بوم باشد. تلاش فراوانی در ایام طولانی فعالیت این دانشگاه انجام پذیرفته تا با بهره‌گیری از تجربه‌های گرانقدر استادان و صاحب‌نظران برجسته کشورمان، کتاب‌ها و منابع آموزشی درسی شاخص و خودآموز تولید شود. در آینده هم، این مهم با هدف ارتقای سطح علمی، روزآمدی و توجه بیشتر به نیازهای مخاطبان دانشگاه پیام‌نور با جدیت ادامه خواهد داشت. به‌طور قطع استفاده از نظرات استادان، صاحب‌نظران و دانشجویان محترم، ما را در انجام این وظیفه‌ی مهم و خطیر یاری‌رسان خواهد بود. پیشاپیش از تمامی عزیزانی که با نقد، تصحیح و پیشنهادهای خود ما را در انجام این وظیفه‌ی خطیر یاری می‌رسانند، سپاسگزاری می‌نماییم. لازم است از تمامی اندیشمندانی که تاکنون دانشگاه پیام‌نور را منزلگاه اندیشه‌سازی خود دانسته و ما را در تولید کتاب و محتوای آموزشی درسی یاری نموده‌اند، صمیمانه قدردانی گردد. موفقیت و بهروزی تمامی دانشجویان و دانش‌پژوهان عزیز آرزوی همیشگی ما است.

دانشگاه پیام‌نور

فهرست مطالب

پیشگفتار.....	یازده
فصل اول. کلیات.....	۱
هدف کلی.....	۱
هدف‌های یادگیری.....	۱
مقدمه.....	۱
۱-۱ اصول تغییر شکل شکننده.....	۲
۱-۱-۱ شکستگی تجربی.....	۳
۱-۱-۲ معیار شکستگی کولمب در فشار محصورکننده.....	۴
۲-۱ تأثیر فشار محصورکننده بر شکستگی و لغزش اصطکاکی.....	۶
۱-۲-۱ فشار محصورکننده و تغییر شکل شکننده.....	۶
۲-۲-۱ فشار محصورکننده و لغزش اصطکاکی.....	۸
۳-۱ تأثیر فشار منفذی بر شکستگی و لغزش اصطکاکی.....	۱۰
۴-۱ تأثیرات ناهمگنی، تنش اصلی متوسط، دما و مقیاس بر شکستگی.....	۱۲
۱-۴-۱ تأثیر ناهمگنی.....	۱۲
۲-۴-۱ تأثیر تنش اصلی متوسط.....	۱۳
۳-۴-۱ تأثیر دما.....	۱۴
۴-۴-۱ تأثیر مقیاس.....	۱۴
۵-۱ الگوهای دینامیکی زمین‌لرزه در پوسته.....	۱۵
۱-۵-۱ الگوی راید یا برگشت الاستیک یا کشسانی.....	۱۵
۲-۵-۱ الگوی آماده‌سازی-کنش.....	۱۶
۶-۱ رفتار سنگ‌های پوسته در برابر زمین‌لرزه.....	۱۹
خلاصه فصل اول.....	۲۰
خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل اول.....	۲۲

فصل دوم. ویژگی‌های زمین‌لرزه	۲۵
هدف کلی	۲۵
هدف‌های یادگیری	۲۵
مقدمه	۲۵
۱-۲ امواج زمین‌لرزه	۲۶
۱-۱-۲ امواج داخلی یا پیکری	۲۶
۲-۱-۲ امواج سطحی	۲۸
۲-۲ مختصات زمین‌لرزه	۲۹
۳-۲ سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها	۳۲
۱-۳-۲ تحلیل اولین حرکت	۳۲
۲-۳-۲ الگوی تشعشع و الگوی دو زوج نیروی متعادل	۳۳
۳-۳-۲ نمایش توزیع امواج در الگوی تشعشع	۳۴
۴-۳-۲ چگونگی تشکیل مناطق فشارشی و کششی	۳۶
۵-۳-۲ تعیین سازوکار کانونی زمین‌لرزه یا حل سطح گسل	۳۷
۴-۲ مقیاس‌های اندازه‌گیری قدرت زمین‌لرزه	۴۰
۱-۴-۲ شدت زمین‌لرزه	۴۰
۲-۴-۲ بزرگای زمین‌لرزه	۴۰
۵-۲ روابط تجربی بین شدت، بزرگی، فراوانی و انرژی زمین‌لرزه	۴۵
۱-۵-۲ رابطه بین انرژی رهاشده و مقیاس‌های برآورد و بزرگای زمین‌لرزه‌ها	۴۵
۲-۵-۲ رابطه فراوانی زمین‌لرزه‌ها با بزرگی	۴۵
۳-۵-۲ رابطه شدت و بزرگا	۴۵
۶-۲ تغییرات انرژی زمین‌لرزه	۴۶
۱-۶-۲ تضعیف زمین‌لرزه (کاهش انرژی لرزه‌ای)	۴۶
۲-۶-۲ تقویت انرژی یا تشدید	۴۶
۷-۲ زمین‌لرزه‌های توخته	۴۷
خلاصه فصل دوم	۴۸
خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل دوم	۴۹

فصل سوم. منشأ زمین‌لرزه	۵۳
هدف کلی	۵۳
هدف‌های یادگیری	۵۳
مقدمه	۵۳
۱-۳ زمین‌لرزه‌های زمین‌ساختی	۵۴
۱-۱-۳ زمین‌لرزه‌های مرتبط با حاشیه ورقه‌ها	۵۴
۲-۱-۳ زمین‌لرزه‌های زمین‌ساختی مرتبط با درون ورقه‌ها	۶۰
۲-۳ زمین‌لرزه‌های غیرزمین‌ساختی	۶۱
۱-۲-۳ زمین‌لرزه‌های القایی	۶۱
۲-۲-۳ زمین‌لرزه‌های آتشفشانی	۶۲

۶۲	۳-۳ ماه لرزه
۶۳	۳-۴ پدیده‌های مرتبط با زمین لرزه
۶۳	۳-۴-۱ صداهای زمین لرزه
۶۳	۳-۴-۲ نورهای زمین لرزه
۶۴	۳-۴-۳ زمین لغزش‌های مرتبط با زمین لرزه
۶۵	۳-۴-۴ روان‌گرایی خاک
۶۶	۳-۴-۵ نشست
۶۷	۳-۴-۶ سونامی
۶۷	خلاصه فصل سوم
۶۹	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل سوم
۷۱	فصل چهارم. مناطق فعال لرزه‌ای
۷۱	هدف کلی
۷۱	هدف‌های یادگیری
۷۲	مقدمه
۷۲	۴-۱ تعیین فعالیت گسل
۷۵	۴-۲ قطعه‌بندی گسل
۷۷	۴-۳ انواع گسل‌های فعال براساس نحوه رسیدن به سطح زمین
۷۸	۴-۳-۱ تقسیم‌بندی گسل‌های سطحی از دیدگاه فعالیت لرزه‌ای
۸۱	۴-۳-۲ گسل‌های نهان با فعالیت لرزه‌ای
۸۲	۴-۴ خزش گسلش
۸۲	۴-۵ چین‌های فعال مرتبط با فعالیت‌های لرزه‌ای
۸۴	۴-۵-۱ الگوی چین‌های خمشی - گسلی
۸۵	۴-۵-۲ الگوی چین‌های گسترش گسلی
۸۶	۴-۵-۳ الگوی چین‌های پوشانده
۸۶	۴-۵-۴ الگوی چین‌های خمشی لغزشی
۸۷	۴-۵-۵ الگوی چین‌خوردگی مرتبط با گسل‌های راست‌الغز
۸۷	خلاصه فصل چهارم
۸۹	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل چهارم
۹۳	فصل پنجم. دیرینه لرزه‌شناسی
۹۳	هدف کلی
۹۳	هدف‌های یادگیری
۹۳	مقدمه
۹۴	۵-۱ بررسی‌های مستقیم دیرینه لرزه‌شناسی
۹۴	۵-۱-۱ حفر ترانشه برای انجام بررسی‌های دیرینه لرزه‌شناسی مستقیم
۱۰۰	۵-۲ بررسی‌های غیرمستقیم دیرینه لرزه‌شناسی
۱۰۰	۵-۲-۱ روش‌های ریخت زمین‌ساختی برای انجام بررسی‌های دیرینه لرزه‌شناسی غیرمستقیم

۱۰۷	۳-۵ روش‌های سنیابی
۱۰۷	۱-۳-۵ روش‌های غیرمستقیم سنیابی دیرینه لرزه‌شناسی
۱۱۲	۲-۳-۵ روش‌های مستقیم سنیابی دیرینه لرزه‌شناسی
۱۱۴	خلاصه فصل پنجم
۱۱۵	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل پنجم
۱۱۷	فصل ششم. ارزیابی خطر و پیش‌بینی زمین‌لرزه
۱۱۷	هدف کلی
۱۱۷	هدف‌های یادگیری
۱۱۷	مقدمه
۱۱۸	۱-۶ چهارچوب کلی تحلیل خطر زمین‌لرزه
۱۱۸	۱-۱-۶ مطالعه لرزه زمین‌ساخت و چشمه‌های لرزه‌ای
۱۱۹	۲-۱-۶ تدوین کاتالوگ
۱۱۹	۳-۱-۶ مدل‌سازی چشمه‌های لرزه‌زا
۱۲۰	۴-۱-۶ انتخاب رابطه کاهندگی یا مدل برآورد جنبش‌های قوی زمین
۱۲۰	۵-۱-۶ تحلیل خطر احتمالی و تعیین زمین‌لرزه
۱۲۱	۲-۶ ارزیابی خطر زمین‌لرزه
۱۲۲	۱-۲-۶ تخمین بیشینه زمین‌لرزه محتمل
۱۲۳	۲-۲-۶ پیش‌بینی درازمدت زمین‌لرزه‌ها
۱۲۵	۳-۲-۶ تخمین جنبش زمین
۱۲۶	۴-۲-۶ تخمین درصد احتمال وقوع با تعیین دوره بازگشت زلزله‌ها
۱۲۷	۳-۶ گزارش لرزه‌خیزی
۱۲۸	۴-۶ نقشه‌های خطر زمین‌لرزه
۱۳۱	۵-۶ زمان‌های پیش‌بینی زمین‌لرزه
۱۳۲	۶-۶ پیش‌بینی زمین‌لرزه با استفاده از پیش‌نشانگرها
۱۳۲	۱-۶-۶ پیش‌نشانگرهای طولانی‌مدت و میان‌مدت
۱۳۵	۲-۶-۶ پدیده‌های پیش‌نشانگر کوتاه‌مدت زمین‌لرزه
۱۳۹	خلاصه فصل ششم
۱۴۰	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل ششم
۱۴۳	فصل هفتم. لرزه زمین‌ساخت ایران
۱۴۳	هدف کلی
۱۴۳	هدف‌های یادگیری
۱۴۳	مقدمه
۱۴۵	۱-۷ پهنه‌بندی لرزه زمین‌ساختی ایران
۱۴۵	۱-۱-۷ تقسیم‌بندی نوری
۱۴۶	۲-۲-۷ تقسیم‌بندی بربریان
۱۴۸	۲-۷ انواع پهنه‌بندی لرزه‌ای

۱۴۸	 ۱-۲-۷ پهنه‌بندی خطر نسبی زمین‌لرزه در ایران
۱۵۲	 ۲-۲-۷ نقشه‌های هم‌شتاب و روش احتمالاتی
۱۵۴	 خلاصه فصل هفتم
۱۵۵	 خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل هفتم
۱۵۷	 پاسخنامه خودآزمایی‌های چهارگزینه‌ای
۱۵۹	 لغات و اصطلاحات زمین‌لرزه
۱۶۹	 منابع و مآخذ

پیشگفتار

کتاب لرزه زمین‌ساخت با هدف آشنایی عمیق دانشجویان مقطع کارشناسی ارشد رشته زمین‌شناسی گرایش زمین‌ساخت و مطابق آخرین سرفصل بازنگیری شده مصوب شورای برنامه آموزش عالی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری تألیف شده است. هدف کلی درس آشنایی دانشجویان گرایش زمین‌ساخت با ویژگی‌های گسل‌های فعال، گسلش زمین‌لرزه، پارامترهای زمین‌لرزه و گسلش، آشنایی اولیه با روش‌های تحلیل خطر زمین‌لرزه و لرزه زمین‌ساخت ایران است. بر این اساس مطالب زیر در کل کتاب لرزه زمین‌ساخت بحث شده است:

ویژگی‌های سطحی و عمقی گسل‌ها شامل سیما، افرازه‌های گسل، ارزیابی توان گسلش و لرزه‌زایی، چین‌خوردگی مرتبط با گسلش، حریم گسل‌های لرزه‌زا، گسلش هم‌درد، دگرریختی‌های محلی و ناحیه‌ای در پیوند با گسل‌های لرزه‌زا، گسل‌های نهان و پنهان، سرچشمه زمین‌لرزه‌ها در اعماق.

زمین‌لرزه و زمین شامل خاستگاه زمین‌لرزه‌ها در ارتباط با انواع حاشیه‌های واگرا، همگرا و راست‌الغز، صداها و نورهای زمین‌لرزه زمین‌لرزه‌های توخته، چین‌خوردگی زمین‌لرزه‌ای.

پیش‌بینی زمین‌لرزه شامل پیش‌بینی کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت، پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه.

پارامترهای زمین‌لرزه و گسلش و برآورد خطر زمین‌لرزه شامل بزرگی و شدت زمین‌لرزه و گونه‌های مختلف آن، رابطه‌های تجربی موجود بین طول گسل با بزرگی و شدت زمین‌لرزه، توان لرزه‌زایی گسل‌ها، سازوکار کانونی زمین‌لرزه، دیرینه لرزه‌شناسی.

لرزه زمین‌ساخت ایران انواع شامل پهنه‌بندی لرزه زمین‌ساختی ایران، سازوکار
چیره در گسلش زمین‌لرزه‌های ایران.

در پایان بر خود لازم می‌دانیم از همکار محترم و ارجمند جناب آقای دکتر حسن
علیزاده برای ویرایش علمی و سرکار خانم طالبی برای ویرایش ادبی و نیز همکاران
محترم دفتر تدوین به‌ویژه سرکار خانم قطبی که در مراحل مختلف تولید محتوا و چاپ
این کتاب نهایت دقت و زحمت را به کار برده‌اند تشکر و قدردانی به عمل آید.

محمد خلیج - مهناز ندایی

اعضای هیئت علمی دانشگاه پیام‌نور

۱۳۹۵

فصل اول

کلیات

هدف کلی

در این فصل به کلیاتی در خصوص کاربردهای لرزه زمین ساخت و به اجمال به اصول تغییر شکل شکننده، گسل های شکننده و شکل پذیر، انواع شکستگی، لغزش های پایدار (بی لرزه) و چسبنده (لرزه ای)، نقش اصطکاک در گسلش، الگوهای فرایند وقوع زمین لرزه اشاره خواهد شد.

هدف های یادگیری

- در پایان این فصل دانشجو قادر خواهد بود:
۱. رفتار شکننده تحت تأثیر تنش های ناشی از زمین لرزه را توصیف کند.
 ۲. شرایط ایجاد شکستگی جدید در سنگ ها را بداند.
 ۳. تأثیر عوامل مختلف همچون دما، فشار، فشار منفذی، ناهمگنی و... را روی زمین لرزه ها بیان کند.
 ۴. رخداد زمین لرزه را براساس الگوهای مختلف توجیه کند.
 ۵. نشانه های گسلش در سطح زمین را بیابد.

مقدمه

پدیده زمین لرزه به عنوان پدیده ای طبیعی از چند نظر بررسی می شود، در زلزله شناسی سازوکار ایجاد زمین لرزه، نحوه انتشار امواج و شناخت ساختار درونی زمین با استفاده از امواج مورد مطالعه قرار می گیرد. درحالی که در مهندسی زلزله، تأثیر پدیده های لرزه ای بر ساختمان ها و سازه ها بررسی می شود. در آسیب شناسی زلزله و بررسی

پی‌آمدهای ناگوار و زیان‌بار جانی و مالی این رویداد طبیعی در زندگی اجتماعی انسان‌ها، از جمله ویرانی ساختمان‌ها که مهم‌ترین آسیب زمین‌لرزه است، مطالعه می‌شود. با هر زمین‌لرزه، هزاران انسان در معرض نابودی قرار می‌گیرند. آمارهای منتشرشده از وقوع زلزله‌های دنیا حاکی است ۹۹ درصد تلفات زلزله به‌دلیل ویرانی ساختمان‌هایی است که بشر از آن‌ها به‌عنوان محل زندگی استفاده می‌کند.

در زمین‌شناسی مطالعات لرزه زمین‌ساخت که مربوط به بخشی از مباحث زمین‌ساخت است، تلفیقی از زمین‌ساخت فعال و زمین‌لرزه است و به بررسی فرایندهای زمین‌ساختی می‌پردازد که همراه با زمین‌لرزه هستند. یعنی پدیده‌های زمین‌ساختی به‌عنوان عامل و زمین‌لرزه به‌عنوان معلول مورد بررسی قرار می‌گیرند. سازوکارهای اساسی درون زمین که باعث وقوع زلزله می‌شوند، هنوز به‌طور کامل شناخته نشده‌اند. در این رابطه نظریه‌های گوناگونی مطرح شده‌است. در بحث لرزه زمین‌ساخت پدیده‌های زمین‌ساختی از جنبهٔ دینامیکی که شامل بزرگی، جهت و اندازهٔ تنش^۱ است و آثار ناشی از این تنش‌ها به‌صورت واتنش^۲ مطالعه و بررسی می‌شود. به این ترتیب پدیدهٔ زمین‌لرزه با آنچه که در زلزله‌شناسی یا مهندسی زلزله بررسی می‌شود اندکی متفاوت است؛ یعنی به‌عنوان پدیده‌ای ناشی از فعالیت‌های زمین‌ساختی شناخته می‌شود. بررسی کمربندهای زمین‌لرزه، تأثیر زمین‌لرزه بر ساختارهایی مانند چین‌ها و گسل‌ها، شناخت مناطق فعال، بررسی سازوکار کانونی زمین‌لرزه، بررسی عمق کانونی زمین‌لرزه و مطالعات مشابه در لرزه زمین‌ساخت بررسی می‌شوند. مطالعات حاصل در زلزله‌شناسی، مهندسی زلزله و زمین‌شناسی در اختیار مهندسين قرار می‌گیرد تا آنان با توجه به وضعیت گسترهٔ مورد نظر، ساختمان‌ها و سازه‌ها را از نظر ساختگاه یا طراحی مقاوم‌سازی کنند.

۱-۱ اصول تغییر شکل شکننده

بر اثر عملکرد تنش بر جسم، نقاط مختلف جسم تغییر مکان می‌دهند. تغییرات جسم در مقابل تنش واتنش نامیده می‌شود. واتنش در جسم شامل جابه‌جایی، واتنش چرخشی، واتنش حجمی و واتنش اعوجاجی است. در طبیعت تغییر شکل‌های ساختاری زمین به دو نوع تغییر شکل شکننده و تغییر شکل شکل‌پذیر تقسیم می‌شوند. شکستگی‌ها و درزه‌ها،

1. Stress

2. Strain

حاصل تغییر شکل شکننده و چین‌ها، کلیواژها و فولیاسیون‌ها حاصل تغییر شکل شکل‌پذیر هستند. با توجه به اینکه تغییرات حاصل از وقوع زمین‌لرزه از نوع تغییرات شکننده است، از این رو در مبحث لرزه زمین‌ساخت به این نوع تغییر شکل توجه بیشتری می‌شود.

۱-۱-۱ شکستگی تجربی

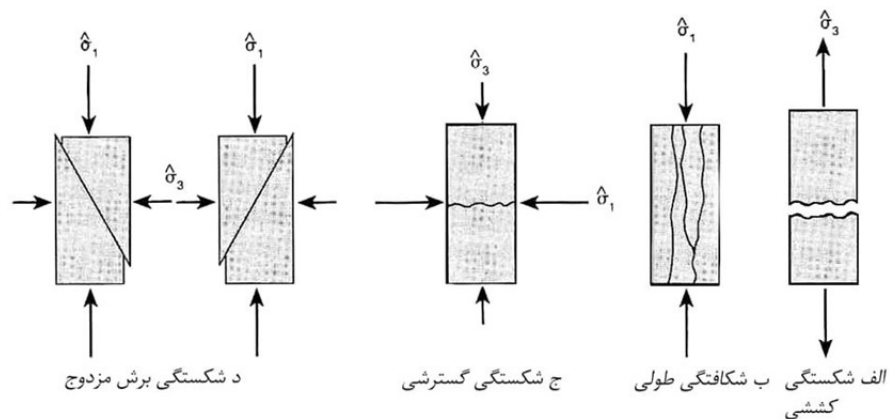
وقتی نمونه‌ای تحت تأثیر تنش قرار می‌گیرد، اگر در مقابل تنش‌های وارده تغییر شکل ندهد، با افزایش تنش گسیخته^۱ می‌شود. حداکثر تنش وارده به نمونه در جریان یک آزمایش که منجر به گسیختگی آن شود، مقاومت^۲ سنگ نامیده می‌شود. از آنجا که گسیختگی به روش‌های مختلفی انجام می‌شود، مواد مقاومت‌های مختلفی دارند. گسیختگی شکننده^۳. با تشکیل شکستگی شکننده^۴ در سطحی که دارای چسبندگی^۵ کمتر باشد اتفاق می‌افتد. گسیختگی شکل‌پذیر^۶ هنگامی اتفاق می‌افتد که مواد، بدون از دست‌دادن چسبندگی، تغییر شکل پیدا می‌کنند.

در آزمایشات گسیختگی شکننده، دو نوع شکستگی وجود دارد: شکستگی گسترشی^۷ و شکستگی برشی^۸ که شکستگی‌های طبیعی زمین نیز یکی از این دو نوع شکستگی هستند. در شکستگی‌های گسترشی، سطح شکسته‌شده عمود بر امتداد کوچک‌ترین تنش اصلی (σ_3) و به موازات بزرگ‌ترین تنش اصلی (σ_1) است و جابه‌جایی تقریباً عمود بر سطح شکسته شده است. در این حالت اگر کوچک‌ترین تنش اصلی، کششی^۹ باشد، مانند کشش تک‌محوره، شکستگی گسترشی شکستگی کششی^{۱۰} نامیده می‌شود (شکل ۱-۱ الف). در صورتی که کوچک‌ترین تنش اصلی مساوی یا نزدیک به صفر و بزرگ‌ترین تنش اصلی فشارشی باشد، مانند فشارش تک‌محوره، شکستگی گسترشی شکافتگی طولی^{۱۱} نامیده می‌شود (شکل ۱-۱ ب).

-
1. Failure
 2. Strength
 3. Brittle Failure
 4. Brittle Fracture
 5. Cohesion
 6. Ductile Failure
 7. Extension Fracture
 8. Shear Fracture
 9. Tensile
 10. Tension Fracture
 11. Longitudinal Splitting

در شکافتگی طولی، نسبت به انواع دیگر شکستگی‌های گسترشی، امتداد و شکل شکستگی‌ها نامنظم است. شکستگی‌های گسترشی ممکن است در وضعیت گسترش محوری^۱ نیز ایجاد شوند که در این وضعیت کوچک‌ترین تنش اصلی فشارشی خواهد بود (شکل ۱-۱ ج).

ایجاد شکستگی‌های برشی به اختلاف تنش $(\sigma_1 - \sigma_3)$ وابسته است. در فشار محصورکننده $(\sigma_2 = \sigma_3)$ ، ایجاد این شکستگی‌ها به اختلاف تنش بزرگ‌تری نیاز دارد و سطح شکسته شده با زوایای کمتر از ۴۵ درجه نسبت به محور σ_1 به وجود می‌آید. زاویه شکستگی (θ) یعنی زاویه بین بزرگ‌ترین تنش اصلی و خط عمود بر سطح شکستگی، حدود $\pm 60^\circ$ درجه و زاویه سطح شکستگی (α) یعنی زاویه بین بزرگ‌ترین تنش اصلی و سطح شکسته شده، حدود $\pm 30^\circ$ درجه می‌باشد. جابه‌جایی به موازات سطح شکسته شده صورت می‌گیرد. اگر تنش سه محوره باشد امتداد شکستگی‌های برشی به موازات تنش اصلی متوسط (σ_2) است و سطوح شکسته شده به شکل دو سطح مزدوج تشکیل می‌شوند (شکل ۱-۱ د).



شکل ۱-۱. انواع شکستگی که درون سنگ‌ها ایجاد می‌شوند.

۱-۱-۲ معیار شکستگی کولمب در فشار محصورکننده

در آزمایشات مربوط به فشار محصورکننده وضعیت تنش با شکستگی برشی نسبت به کشش تک‌محوره، پیچیدگی بیشتری دارد.

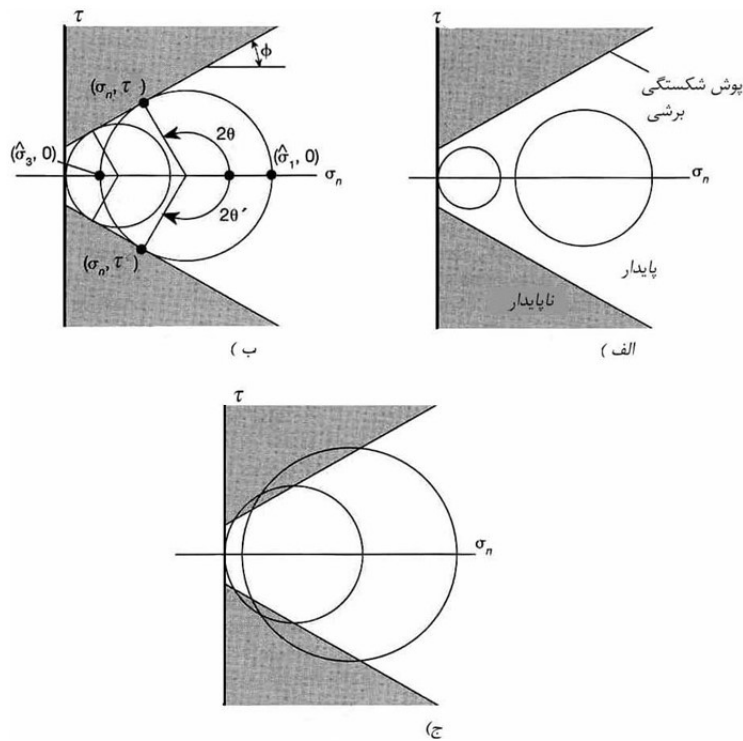
کلیات ۵

آزمایشات نشان داده است که پوش شکستگی برشی^۱ همان جداکننده حالت پایدار و ناپایدار تنش را می‌توان روی دایره مور ترسیم کرد که معیار شکستگی کولمب یا معیار شکستگی مور-کولمب نامیده می‌شود. در حالت عادی این پوش به شکل دو خط مستقیم و قرینه نسبت به محور σ_n رسم می‌شود (شکل ۲-۱ الف، ب و ج). این معیار با معادله‌های (۱-۱ و ۲-۱) نمایش داده می‌شود:

$$\tau = c + \mu \sigma_n \quad (1-1)$$

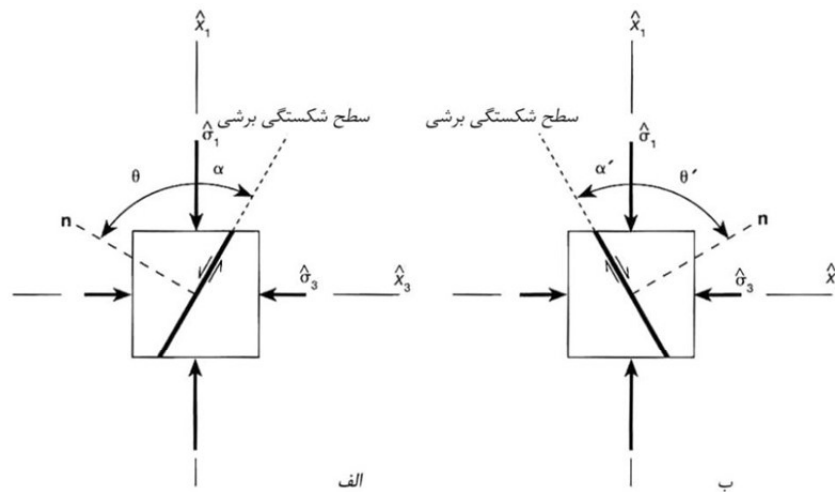
$$\mu = \tan \phi \quad (2-1)$$

در این معادله τ تنش برشی بحرانی، μ و C به ترتیب شیب و مقدار چسبندگی و ϕ زاویه شیب است که زاویه اصطکاک درونی نامیده می‌شود (شکل ۲-۱ ب).



شکل ۲-۱. معیار شکستگی کولمب در فشارش تک‌محوره. معیار شکستگی در دایره مور به دو ناحیه مجزای پایدار و ناپایدار تقسیم می‌شود: الف) حالت تنش پایدار، ب) حالت تنش بحرانی، ج) حالت تنش ناپایدار.

در وضعیت تنش بحرانی که دایره مور با دو خط پوش شکستگی مماس است، دو نقطه محل تماس دایره مور با پوش شکستگی نشان دهنده دو سطح برشی مزدوج^۱ با جهت گیری متفاوت است (شکل ۱-۳). گسیختگی فقط در یکی از دو شکستگی برشی ایجاد می شود. البته تنها با استفاده از معیار شکستگی کولمب نمی توان تعیین کرد کدام یک از این دو جهت، جهت واقعی شکست است.



شکل ۱-۳. جهت گیری شکستگی برشی با دو زاویه شکستگی.

۲-۱ تأثیر فشار محصورکننده بر شکستگی و لغزش اصطکاکی

۱-۲-۱ فشار محصورکننده و تغییر شکل شکننده

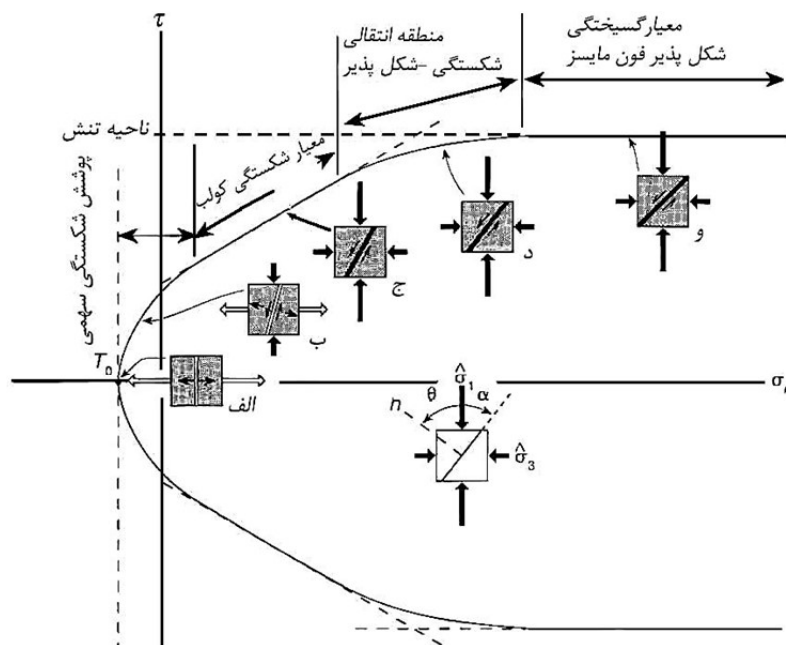
نتایج حاصل از آزمایشات نشان می دهد معیار شکستگی کولمب در بخش کششی دایره مور، سمت چپ، اعمال نمی شود. در حقیقت پوش شکستگی کولمب با خط مستقیمی که در شکل (۲-۱ ب) نشان داده شده متفاوت و تقریباً به صورت منحنی سهمی شکل^۲ است (شکل ۱-۴).

در فشار محصورکننده کم، در صورتی که دایره مور مماس با پوش شکستگی باشد، در نقطه ای که پوش شکستگی محور σ_n را قطع و از آن عبور می کند، شکستگی کششی به شکل عمود بر کوچک ترین محور اصلی تنش ایجاد می شود ($\theta = 180^\circ$ ، شکل ۱-۴ الف). با

1. Conjugate Shear
2. Parabolic Curve

کلیات ۷

افزایش فشار محصورکننده، دایره مور به سمت راست تغییر مکان می‌دهد و مقدار زاویه 2θ کاهش پیدا می‌کند، در این حالت، در ناحیه تنش کششی^۱، شکستگی‌های ترکیبی توسعه پیدا می‌کنند که تلفیقی از جابه‌جایی‌های برشی و گسترشی در سطح شکسته شده است (شکل ۴-۱ ب). با افزایش بیشتر فشار محصورکننده شکستگی‌های برشی مطابق معیار شکستگی کولمب ایجاد می‌شوند ($2\theta=120^\circ$ ، شکل ۴-۱ ج).



شکل ۴-۱ تقسیمات شماتیک پوش گسیختگی و شکستگی‌های مربوط به آن. قطعات سایه‌دار نشان‌دهنده جهت‌گیری سطح گسیختگی در نقاط مختلف در طول پوش گسیختگی است. خطوط دوگانه که از قطعات عبور می‌کند نشان‌دهنده سطوحی است که در آن‌ها مؤلفه شکستگی گسترشی عمل می‌کند، خطوط توپر دلالت بر سطوح گسیختگی برشی دارد. الف) شکستگی کششی، ب) شکستگی ترکیبی، ج) شکستگی برشی شکنده مطابق معیار کولمب، د) شکستگی برشی در یک ناحیه انتقالی تغییر شکل‌کننده به تغییر شکل شکل‌پذیر، و) گسیختگی برشی شکل‌پذیر.

تداوم افزایش فشار محصورکننده موجب تقعر پوش شکستگی به سمت محور تنش افقی می‌شود و شیب پوش کاهش می‌یابد. به این ترتیب با افزایش فشار

محصورکننده مقدار 2θ کاهش پیدا می کند و زاویه صفحه شکستگی 2α افزایش می یابد (شکل ۱-۴ د). این رفتار مربوط به مرحله تبدیل تغییر شکل شکننده به تغییر شکل شکل پذیر است.

در ناحیه شکل پذیر معیار کولمب را نمی توان به کار برد و معیار دیگری به نام معیار فون مایسز^۱ به کار برده می شود (شکل ۱-۴ و). در دایره مور معیار فون مایسز یک جفت خط تنش برشی ثابت است که نسبت به محور تنش عمودی به صورت متقارن رسم می شود. این معیار حاکی از آن است که تغییر شکل شکل پذیر با تنش برشی بحرانی آغاز می شود و مستقل از فشار محصورکننده است. سطوح گسیخته شده شکل پذیر سطوح بزرگ ترین تنش برشی هستند ($2\theta = \pm 90^\circ$). تنش برشی بحرانی، تنش تسلیم^۲ نامیده می شود.

بنابراین با استفاده از شکل معیار گسیختگی می توان گسیختگی سنگ ها را در محدوده ای از فشار، پیش بینی و محاسبه کرد. البته وضعیت گسیختگی در طبیعت با آزمایشگاه متفاوت است، زیرا در طبیعت افزایش فشار با افزایش عمق و دما همراه است که موجب کاهش تنش تسلیم برای ایجاد تغییر شکل شکل پذیر می شود. به عبارت دیگر مقدار تنشی که در طبیعت برای ایجاد تغییر شکل شکل پذیر نیاز داریم کمتر از مقدار آن در آزمایشگاه است.

۲-۲-۱ فشار محصورکننده و لغزش اصطکاکی

وقتی شکستگی برشی در فشار محصورکننده نسبتاً کم توسعه پیدا کند سطح شکست سطح ضعیفی خواهد بود، زیرا فاقد چسبندگی است. پس از شکست تغییر بعدی، لغزش اصطکاکی^۳ روی سطح شکسته شده خواهد بود.

معیار لغزش اصطکاکی معادله ای مشابه معیار شکستگی کولمب دارد:

$$\tau = \mu' \sigma_n \quad (3-1)$$

در این معادله τ بزرگی تنش بحرانی و μ' ضریب لغزش اصطکاکی است. معمولاً ضریب لغزش اصطکاکی از ضریب اصطکاک داخلی بزرگ تر است. به این

1. Von Mises Criterion

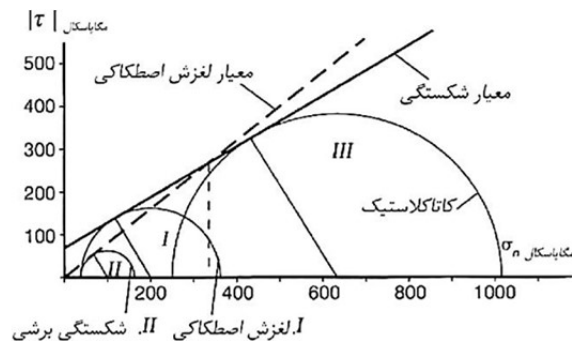
2. Yield Stress

3. Frictional Sliding

کلیات ۹

ترتیب در فشار محصورکننده پایین، مقدار اختلاف تنش ($\sigma_1 - \sigma_3$) لازم برای ایجاد لغزش در مقایسه با ایجاد شکستگی کمتر خواهد بود.

پس از شکستگی (دایره مور I شکل ۵-۱) مقدار اختلاف تنش باید به اندازه‌ای کاهش یابد که از معیار لغزش اصطکاکی بیشتر نشود و از آن عبور نکند (دایره مور II شکل ۵-۱). بنابراین طبیعی است که گسلش نزدیک سطح زمین حاصل لغزش روی گسل‌های قبلی باشد. اگر فشار محصورکننده افزایش یابد معیار لغزش اصطکاکی و معیار شکستگی یکدیگر را قطع می‌کنند. در این صورت برای ایجاد شکستگی جدید در سنگ نسبت به زمانی که فقط لغزش وجود داشت، مقدار کمتری تنش برشی نیاز است. در صورتی که شکستگی شکننده انتشار یابد و موجب خردشدن^۱ دانه‌های درشت سنگ شود، نسبت به زمانی که لغزش روی درزه‌های اولیه اتفاق بیافتد، سنگ زودتر تغییر می‌یابد. وجود این مراحل کاتاکلاز^۲ یا جریان کاتاکلاستیک^۳ یک سنگ کاتاکلاستیک ایجاد می‌کند (دایره مور III شکل ۵-۱).



شکل ۵-۱. معیار کولمب برای شکستگی و لغزش اصطکاکی روی سطح گسل. دایره I تنش بحرانی برای شکستگی برشی، دایره II تنش بحرانی برای لغزش اصطکاکی روی سطح شکستگی در فشار محصورکننده ثابت، دایره III تنش بحرانی برای جریان کاتاکلاستیک در طی شکستگی.

در فشار محصورکننده کم لغزش اصطکاکی به شکل صاف و با حرکت ممتد و پیوسته صورت می‌گیرد که لغزش پایدار^۴ نامیده می‌شود (شکل ۶-۱ الف).

1. Comminution
2. Cataclasis
3. Cataclastic Flow
4. Stable Sliding