

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

گرایش خاک و پی

مطالعه آزمایشگاهی رفتار برشی درزه های سنگ های کربناته آغشته به نفت خام

احسان دباغی

استاد راهنما

دکتر حسن قاسم زاده

بهمن ۱۳۹۶

چکیده

مجموعه سنگ مخزن، اغلب دارای ناهمسانی‌ها و نقاط ضعفی از جمله ناپیوستگی‌ها، نواحی خرد شده و ناپیوستگی‌ها می‌باشد. این ناپیوستگی‌ها تاثیر زیادی روی رفتار مخزن و تغییر شکل‌های آن دارند. از جمله مشکلات ایجاد شده در اثر حرکت ناپیوستگی‌ها ناشی از استخراج از مخزن، تراکم و نشست سطح مخزن و همچنین امکان فعال شدن ناپیوستگی‌های اطراف می‌باشد. از این رو، مطالعه و بررسی رفتار سنگ‌های کربناته بسیار بااهمیت است.

این پایان‌نامه یک پژوهش آزمایشگاهی بوده که هدف آن بررسی رفتار برشی درزه‌های اشباع از نفت خام در سنگ‌های کربناته می‌باشد. به همین منظور آزمایش برش مستقیم روی درزه‌های طبیعی ایجاد شده در اثر شکست نمونه‌های سنگ آهک انجام شد. در این آزمایش‌ها، اثرات تغییرات متغیرهایی چون تنش عمود روی نمونه (تنش‌های ۵ و ۷/۵ و ۱۰ مگاپاسکال)، میزان زبری سطح درزه (ضرایب ۸-۶، ۱۰-۸ و ۱۲-۱۰) و همچنین حالت درزه (شامل خشک و اشباع از آب، اشباع از نفت خام و همچنین آغشته به اسید (HCl)) مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج آزمایش‌های مقاومت برشی روی نمونه‌های سنگ آهک نشان داد که تنش عمود اعمالی در همه حالات اثر مثبتی روی مقاومت برشی درزه شده و باعث افزایش آن می‌شود. همچنین در بحث اثر ضریب زبری سطح (JRC)، مشاهده شد که در همه حالات، با افزایش (JRC)، مقدار مقاومت برشی قابل تحمل نمونه افزایش یافت. در مورد اثر حالت درزه (خشک، اشباع از آب، اشباع از نفت و آغشته به اسید) هم دیده شد که به طور متوسط، مقاومت برشی درزه‌های اشباع از نفت، نسبت به درزه‌های خشک، ۶۷٪ کمتر می‌باشد و به طور کل، درزه آغشته به اسید، نسبت به هر سه حالت دیگر، مقاومت برشی کمتری از خود نشان می‌دهد. همچنین در این حالت، نمونه رفتار ترد و شکننده‌تری دارد. به ترتیب نمونه‌های خشک، اشباع از آب، اشباع از نفت و آغشته به اسید بیشترین مقاومت برشی حداکثر را داشتند. همچنین به ترتیب، نمونه‌های خشک، اشباع از آب، آغشته به اسید و اشباع از نفت بیشترین زاویه اصطکاک را داشتند. همچنین به ترتیب نمونه‌های خشک، اشباع از نفت، اشباع از آب و آغشته به اسید بیشترین چسبندگی ظاهری را داشتند.

کلمات کلیدی:

ژئومکانیک، رفتار درزه، مقاومت برشی، درزه اشباع، مخازن نفت، اسیدشویی

فهرست مطالب

۱- مقدمه	۱
۱-۱- ضرورت تحقیق	۱
۲-۱- هدف تحقیق	۲
۳-۱- روش تحقیق	۲
۴-۱- ساختار تحقیق	۲
۲- مفاهیم اولیه و مروری بر تحقیقات پیشین	۵
۱-۲- مخزن نفت	۵
۲-۲- ناپیوستگی توده سنگ	۱۳
۱-۲-۲- تعاریف اولیه	۱۳
۲-۲-۲- اصول مکانیک درزه	۱۵
۳-۲-۲- معیار گسیختگی	۱۸
۴-۲-۲- مروری بر تحقیقات پیشین	۲۱
۱-۴-۲-۲- مقیاس	۲۲
۲-۴-۲-۲- زبری	۲۳
۳-۴-۲-۲- رطوبت	۲۶
۴-۴-۲-۲- بارگذاری	۲۹
۵-۴-۲-۲- اسیدشویی	۳۱
۳-۲- جمع بندی	۳۶
۳- روش تحقیق	۳۹
۱-۳- سنگ مورد استفاده	۳۹
۲-۳- اسید مورد استفاده	۳۹
۳-۳- نفت مورد استفاده	۳۹
۴-۳- تعیین مشخصات سنگ مورد استفاده	۳۹
۱-۴-۳- تعیین چگالی	۳۹
۲-۴-۳- تعیین تخلخل	۴۰
۳-۴-۳- تعیین درصد رطوبت	۴۱

۴۳	 ۴-۴-۳ آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده (تک محوری) سنگ
۴۵	 ۵-۴-۳ آزمایش تعیین شاخص بار نقطه‌ای
۴۷	 ۶-۴-۳ آزمایش برش مستقیم
۴۸	 ۱-۶-۴-۳ دستگاه آزمایش
۴۹	 ۲-۶-۴-۳ اندازه‌گیری زبری سطح درزه سنگ
۴۹	 ۳-۶-۴-۳ آماده‌سازی نمونه
۵۵	 ۴-۶-۴-۳ مرحله برش
۵۷	 ۵-۳ جمع‌بندی
۵۹	 ۴- نتایج
۵۹	 ۱-۴ آزمایش تعیین چگالی
۵۹	 ۲-۴ آزمایش تعیین تخلخل
۵۹	 ۳-۴ آزمایش تعیین درصد رطوبت
۶۰	 ۴-۴ آزمایش فشاری تک محوری
۶۰	 ۵-۴ آزمایش بار نقطه‌ای
۶۱	 ۶-۴ آزمایش برش مستقیم
۶۳	 ۱-۶-۴ تاثیر مقیاس
۶۴	 ۲-۶-۴ تاثیر جهت یافتگی
۶۶	 ۳-۶-۴ تاثیر تنش عمود
۷۳	 ۴-۶-۴ JRC تاثیر
۸۰	 ۵-۶-۴ تاثیر اشباع‌شدگی
۸۷	 ۶-۶-۴ رفتار برشی نمونه‌ها
۹۰	 ۷-۶-۴ جابجایی قائم
۹۱	 ۸-۶-۴ پوش گسیختگی
۹۴	 ۷-۴ جمع‌بندی
۹۷	 ۵- نتیجه‌گیری
۹۷	 ۱-۵ نتایج
۹۸	 ۲-۵ پیشنهادات
۹۹	 منابع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: یک مقطع از عکس چاه گمانه با عمق روی بُعد قائم و آزمون (یا موقعیت حول چاه گمانه) روی بُعد قائم [۱۵]. ۱۰
- شکل ۲-۲: تنش‌های برشی و قائم روی درزه‌ها شناسایی شده به کمک چاه گمانه [۱۶]. ۱۱
- شکل ۳-۲: رفتار برشی نمونه درزه سنگ [۴۳]. ۱۷
- شکل ۴-۲: رفتار برشی درزه‌های زیر سنگ [۴۵]. ۱۹
- شکل ۵-۲: نیمرخ‌های زبری و مقادیر JRC متناظر [۷۸]. ۲۰
- شکل ۶-۲: نمودار تنش برشی - جابجایی برشی سطوح درزه در سطوح زبری و تنش عمود مختلف [۶۶]. .. ۲۴
- شکل ۷-۲: تاثیر هوازدگی بر ضریب JRC سطح درزه [۶۷]. ۲۵
- شکل ۸-۲: مقایسه منحنی‌های تنش برشی - جابجایی برشی نمونه‌های درزه ماسه‌سنگ بعد از اشباع شدن از آب [۷۱]. ۲۷
- شکل ۹-۲: رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوری بین حالت خشک و اشباع [۷۲]. ۲۸
- شکل ۱۰-۲: مقدار متوسط مقاومت فشاری تک‌محوری در برابر مقدار اشباع‌شدگی از آب [۷۳]. ۲۹
- شکل ۱۱-۲: تغییرات ضریب اصطکاک در برابر جابجایی برشی، (a) در سرعت برشی ثابت و (b) در تنش عمود ثابت [۷۰]. ۲۹
- شکل ۱۲-۲: (a) تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی تحت نرخ‌های بارگذاری مختلف (b) تغییرات مقاومت برشی حداکثر در برابر نرخ بارگذاری در سطوح تنش مختلف [۷۴]. ۳۰
- شکل ۱۳-۲: مکانیزم‌های برش متفاوت برای نمونه با زاویه ۲۰ درجه، تحت تنش‌های قائم متفاوت [۶۹]. ۳۰
- شکل ۱۴-۲: تغییرات تخلخل به دلیل انحلال مواد معدنی در محلول‌های مختلف [۷۷]. ۳۲
- شکل ۱۵-۲: منحنی‌های تنش-کرنش تحت محلول‌های مختلف [۷۸]. ۳۲
- شکل ۱۶-۲: تنش حداکثر نمونه‌های مستغرق در محلول‌های متفاوت در طول زمان [۷۹]. ۳۳
- شکل ۱۷-۲: تغییرات درصد تخلخل نمونه‌ها در محلول‌های متفاوت در طول زمان [۷۹]. ۳۴
- شکل ۱۸-۲: رابطه بین مقاومت کششی جداشوندگی و زمان خوردگی در محلول‌های شیمیایی متفاوت [۸۰]. ۳۴
- شکل ۱۹-۲: منحنی تنش-کرنش [۸۱]. ۳۵
- شکل ۱-۳: نمونه تحت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری. ۴۴
- شکل ۲-۳: شرایط هندسی نمونه‌ها [۹۴]. ۴۵
- شکل ۳-۳: دستگاه آزمایش بار نقطه‌ای. ۴۶
- شکل ۴-۳: دستگاه آزمایش برش مستقیم درزه سنگ. ۴۸

- شکل ۵-۳: نمونه تحت فشار برای تقسیم شدن به دو نیمه. ۵۰
- شکل ۶-۳: سیم فلزی و چسب کاغذی دور درزه جهت حفاظت از آن. ۵۱
- شکل ۷-۳: قالب‌گیری نیمه اول یک نمونه. ۵۲
- شکل ۸-۳: نمونه قالب‌گیری شده. ۵۲
- شکل ۹-۳: نمونه کامل و آماده آزمایش. ۵۳
- شکل ۱۰-۳: تعدادی از نمونه‌های مورد آزمایش. ۵۴
- شکل ۱۱-۳: نحوه آغشته کردن نمونه‌ها به اسید. ۵۴
- شکل ۱۲-۳ (الف): نمونه قبل از آغشتگی به اسید و (ب) بعد از آغشتگی به اسید. ۵۵
- شکل ۱-۴: نمونه با $JRC=6-8$ ۶۲
- شکل ۲-۴: نمونه با $JRC=8-10$ ۶۲
- شکل ۳-۴: نمونه با $JRC=10-12$ ۶۳
- شکل ۴-۴: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های اشباع از آب با $JRC=8-10$ تحت تنش عمود 10 MPa برای سه اندازه مختلف نمونه. ۶۴
- شکل ۵-۴: نمونه‌ای از ناهموازی تشکیل شده در دو امتداد مختلف. ۶۵
- شکل ۶-۴: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های اشباع از آب با $JRC=6-8$ تحت تنش عمود 5 MPa برای دو حالت جهت‌یافتگی. ۶۵
- شکل ۷-۴: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های خشک با $JRC=6-8$ برای حالت‌های مختلف تنش عمود. ۶۶
- شکل ۸-۴: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های خشک با $JRC=8-10$ برای حالت‌های مختلف تنش عمود. ۶۷
- شکل ۹-۴: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های خشک با $JRC=10-12$ برای حالت‌های مختلف تنش عمود. ۶۷
- شکل ۱۰-۴: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های اشباع از آب با $JRC=6-8$ برای حالت‌های مختلف تنش عمود. ۶۸
- شکل ۱۱-۴: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های اشباع از آب با $JRC=8-10$ برای حالت‌های مختلف تنش عمود. ۶۸
- شکل ۱۲-۴: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های اشباع از آب با $JRC=10-12$ برای حالت‌های مختلف تنش عمود. ۶۹

- شکل ۴-۱۳: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های آغشته به اسید با $JRC = 8-6$ برای حالت‌های مختلف تنش عمود. ۶۹
- شکل ۴-۱۴: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های آغشته به اسید با $JRC = 10-8$ برای حالت‌های مختلف تنش عمود. ۷۰
- شکل ۴-۱۵: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های آغشته به اسید با $JRC = 12-10$ برای حالت‌های مختلف تنش عمود. ۷۰
- شکل ۴-۱۶: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های اشباع از نفت با $JRC = 8-6$ برای حالت‌های مختلف تنش عمود. ۷۱
- شکل ۴-۱۷: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های اشباع از نفت با $JRC = 10-8$ برای حالت‌های مختلف تنش عمود. ۷۱
- شکل ۴-۱۸: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های اشباع از نفت با $JRC = 12-10$ برای حالت‌های مختلف تنش عمود. ۷۲
- شکل ۴-۱۹: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های خشک تحت تنش عمود 5MPa برای حالت‌های مختلف JRC ۷۳
- شکل ۴-۲۰: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های خشک تحت تنش عمود 5MPa برای حالت‌های مختلف JRC ۷۴
- شکل ۴-۲۱: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های خشک تحت تنش عمود 10MPa برای حالت‌های مختلف JRC ۷۴
- شکل ۴-۲۲: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های اشباع از آب تحت تنش عمود 5MPa برای حالت‌های مختلف JRC ۷۵
- شکل ۴-۲۳: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های اشباع از آب تحت تنش عمود 5MPa برای حالت‌های مختلف JRC ۷۵
- شکل ۴-۲۴: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های اشباع از آب تحت تنش عمود 10MPa برای حالت‌های مختلف JRC ۷۶
- شکل ۴-۲۵: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های آغشته به اسید تحت تنش عمود 5MPa برای حالت‌های مختلف JRC ۷۶
- شکل ۴-۲۶: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های آغشته به اسید تحت تنش عمود 5MPa برای حالت‌های مختلف JRC ۷۷
- شکل ۴-۲۷: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های آغشته به اسید تحت تنش عمود 10MPa برای حالت‌های مختلف JRC ۷۷

شکل ۴-۲۸: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های اشباع از نفت تحت تنش عمود 5MPa برای حالت‌های مختلف JRC ۷۸

شکل ۴-۲۹: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های اشباع از نفت تحت تنش عمود $7/5\text{MPa}$ برای حالت‌های مختلف JRC ۷۸

شکل ۴-۳۰: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های اشباع از نفت تحت تنش عمود 10MPa برای حالت‌های مختلف JRC ۷۹

شکل ۴-۳۱: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های با $JRC=6-8$ و تحت تنش عمود 5MPa برای حالت‌های مختلف اشباع‌شدگی ۸۰

شکل ۴-۳۲: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های با $JRC=6-8$ و تحت تنش عمود $7/5\text{MPa}$ برای حالت‌های مختلف اشباع‌شدگی ۸۱

شکل ۴-۳۳: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های با $JRC=6-8$ و تحت تنش عمود 10MPa برای حالت‌های مختلف اشباع‌شدگی ۸۱

شکل ۴-۳۴: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های با $JRC=8-10$ و تحت تنش عمود 5MPa برای حالت‌های مختلف اشباع‌شدگی ۸۲

شکل ۴-۳۵: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های با $JRC=8-10$ و تحت تنش عمود $7/5\text{MPa}$ برای حالت‌های مختلف اشباع‌شدگی ۸۲

شکل ۴-۳۶: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های با $JRC=8-10$ و تحت تنش عمود 10MPa برای حالت‌های مختلف اشباع‌شدگی ۸۳

شکل ۴-۳۷: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های با $JRC=10-12$ و تحت تنش عمود 5MPa برای حالت‌های مختلف اشباع‌شدگی ۸۳

شکل ۴-۳۸: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های با $JRC=10-12$ و تحت تنش عمود $7/5\text{MPa}$ برای حالت‌های مختلف اشباع‌شدگی ۸۴

شکل ۴-۳۹: تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه‌های با $JRC=10-12$ و تحت تنش عمود 10MPa برای حالت‌های مختلف اشباع‌شدگی ۸۴

شکل ۴-۴۰: الف) نمونه قبل از برش و ب) بعد از برش ۸۷

شکل ۴-۴۱: نمودار تغییرات تنش برشی در برابر جابجایی برشی برای نمونه خشک با $JRC=10-12$ تحت تنش عمود ۱ مگاپاسکال ۸۹

شکل ۴-۴۲: تغییرات جابجایی قائم در برابر جابجایی برشی برای نمونه خشک با $JRC=10-12$ تحت تنش عمود ۱ مگاپاسکال ۹۰

شکل ۴-۴۳: پوش گسیختگی (تغییرات تنش برشی حداکثر در برابر تنش عمود) برای نمونه‌های مختلف ۹۱

فصل اول

مقدمه

۱- مقدمه

نفت خام برای توسعه‌ی کشورهای نفت‌خیز، از لحاظ تولید انرژی، سوخت و اشتغال، اهمیت قابل توجهی دارد و به عنوان یک منبع مواد خام در صنایع شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این رو مطالعه مخازن نفتی با هدف تحلیل و پیش بینی رفتار آن‌ها، می‌تواند تاثیر به‌سزایی در افزایش میزان تولید نفت داشته باشد.

ایران به عنوان چهارمین کشور دارای بیشترین مخازن نفتی در جهان [۱]، بخشی از درآمدش از طریق فروش نفت و مشتقات آن حاصل می‌شود. ایران دارای ۳۹۰ مخزن نفتی است [۲]. در این میان مخازن کربناته از اهمیت خاصی برخوردار هستند، چرا که حدود ۷۰ درصد نفت خاورمیانه و ۹۰ درصد نفت ایران، از مخازن کربناته استخراج می‌شود [۳].

در شرایطی که قیمت نفت پایین است و به لحاظ اقتصادی برای اکتشاف و استخراج هیدروکربن محدودیت وجود دارد، بسیاری از شرکت‌ها، روی شرح جزئیات زیرزمینی و یک فهم صحیح از عدم قطعیت‌های موجود در مدل‌ها، تاکید فزاینده‌ای دارند. مخازن دارای ساختار پیچیده، مدل‌های زیرسطحی‌ای نیاز دارند که با وجود ناهمگنی ساختاری مخزن، امکان پیش‌بینی خصوصیات جریان زیرزمینی را داشته باشد. آگاهی از پیچیدگی ساختاری بدست آمده در میادین با عمر بهره‌برداری زیاد، می‌تواند برای تعیین ارزش، تایید و گسترش میادین جدید به کار گرفته شود [۴].

۱-۱- ضرورت تحقیق

در مخازن تحکیم‌نیافته^۱ و یا کم‌تحکیم‌یافته^۲، تغییر شکل همراه با استخراج هیدروکربن می‌تواند باعث تراکم مخزن، نشست سطح زمین و دوباره فعال شدن بالقوه ناپیوستگی‌ها شود. برای یک مخزن هیدروکربن در حال تخلیه، کاهش در فشار حفره‌ای در نتیجه‌ی استخراج، می‌تواند تاثیر زیادی روی

^۱ Unconsolidated

^۲ Poorly consolidated

مشخصات فیزیکی سازند داشته باشد. معمولاً تغییر شکل‌ها در مخازن در حال استخراج، شامل: تراکم، فعال شدن دوباره ناپیوستگی‌ها و نشست سطح زمین می‌باشد. فهم مکانیزم‌های تغییر شکل همراه با این تغییرات، تأثیرات بسیار مهمی روی جنبه‌های مختلف گسترش میدان نفتی، از طرح‌های استخراج تا مدیریت محیطی، خواهد داشت [۵].

۱-۲- هدف تحقیق

در این تحقیق رفتار برشی درزه‌های سنگ اشباع از نفت تحت شرایط بار قائم ثابت^۱ (CNL) مورد بررسی قرار می‌گیرد. آزمایش‌ها روی سنگ آهک که از نوع سنگ‌های کربناته می‌باشد، انجام گرفت. اثرات پارامترهای مختلف مانند تنش عمود، ضریب زبری سطح^۲ (JRC) و اشباع‌شدگی از آب و نفت و همچنین اسیدشویی روی رفتار برشی درزه‌های سنگ مورد آزمایش قرار می‌گیرد. با انجام این آزمایش‌ها، دید بهتری نسبت به رفتار ناپیوستگی‌های سنگ‌های مخزن در مخازن نفتی، می‌تواند به دست آید.

۱-۳- روش تحقیق

آزمایش‌های آزمایشگاهی در این تحقیق، برای بررسی رفتار برشی درزه‌های سنگ اشباع از نفت خام انجام شد. از این رو دستگاه برش مستقیم سنگ برای رسیدن به این هدف، مورد استفاده قرار گرفت. همچنین برای تعیین ویژگی‌های سنگ مورد استفاده، آزمایش‌های دیگری مانند آزمایش بار نقطه‌ای و همچنین آزمایش فشاری تک‌محوری نیز انجام شد.

۱-۴- ساختار تحقیق

این تحقیق نتایج آزمایش‌های برش مستقیم روی نمونه‌های درزه‌های اشباع از نفت سنگ آهک تحت شرایط (CNL) را گزارش می‌کند. تحقیق حاضر به پنج فصل تقسیم شده است:

^۱ Constant Normal Loading

^۲ Joint Roughness Coefficient

فصل اول (فصل کنونی) به معرفی موضوع می‌پردازد، هدف کار را خلاصه و ارائه می‌کند و به طور کل دورنمایی از این تحقیق ترسیم می‌کند.

فصل دوم ابتدا به بیان و توضیح برخی مفاهیم اولیه و تعاریف در مباحث مکانیک و زمین‌شناسی مخازن نفتی می‌پردازد. سپس برخی تعاریف و اصول اولیه مکانیک درزه سنگ معرفی می‌شود. در نهایت مرور کلی ادبیات فنی موضوع و تحقیقات انجام شده حول موضوع مقاومت برشی درزه سنگ، ارائه می‌شود.

فصل سوم به روش تحقیق به کار گرفته شده می‌پردازد. روش تهیه و آماده‌سازی نمونه و روش انجام آزمایش‌های مختلف و استانداردهای مربوطه نیز در این بخش به تفصیل بیان شده است.

فصل چهارم نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی مختلف، ارائه و بحث می‌شود. در این فصل با ارائه نمودارهایی نحوه تاثیر پارامترهای تاثیرگذار روی مقاومت برشی درزه سنگ نشان داده می‌شود

فصل پنجم به نتیجه‌گیری از کلیه مباحث ذکر شده و نتایج به‌دست آمده می‌پردازد. در پایان این فصل نیز پیشنهادهایی برای بهبود و ارتقا کیفیت بررسی بحث مقاومت برشی درزه‌های سنگ‌های اشباع از نفت، ارائه می‌شود.

فصل دوم

مفاهیم اولیه و مروری بر تحقیقات پیشین

۲- مفاهیم اولیه و مروری بر تحقیقات پیشین

جهت گشایش بحث و درک بهتر اصول پایه‌ای موضوع، ابتدا به بیان و توضیح برخی مفاهیم اولیه پرداخته می‌شود. به همین منظور ابتدا به بررسی تعریف و شرایط زمین‌شناسی مخازن نفت پرداخته می‌شود. سپس اصول بحث مکانیک درزه سنگ و تعاریف مربوطه یادآور می‌شود. در انتها نیز تحقیقات انجام شده حول این موضوع آورده می‌شود.

۲-۱- مخزن نفت

مخزن را می‌توانیم به عنوان محل انباشت هیدروکربن در سنگ‌های رسوبی متخلخل نفوذپذیر تعریف کرد. این انباشت که به وسیله حجم حفرات در زمان اکتشاف، به یک تعادل فشار سیال می‌رسد، استخر نیز نامیده می‌شود. یک میدان هیدروکربنی از چند مخزن در افق‌های لایه‌ای متفاوت و یا در رژیم‌های فشاری متفاوت تشکیل می‌شود. محیط انباشت هیدروکربن یک حوزه رسوبی است که اجزا مورد نیاز برای ایجاد مخزن نفت را تامین می‌کند، که به ترتیب عبارتند از، (۱) یک منبع هیدروکربن‌ها، (۲) تشکیل و مهاجرت نفت، (۳) یک مکانیزم محصورشدگی؛ یعنی وجود حفره‌هایی در سنگ رسوبی متخلخل در هنگام مهاجرت و در مسیر مهاجرت. باور بر این است که نفت از تجزیه بی‌هوازی چربی‌ها، پروتئین‌ها و کربوهیدرات‌ها در گیاهان دریایی یا مصبی و جسم حیوانات، پلانکتون و خزه سرچشمه می‌گیرد. مخازن هیدروکربنی در یک محدوده وسیعی از اعماق زیر زمین یافت می‌شوند که اکثر آنها در محدوده ۵۰۰ تا ۴۰۰۰ متری از سطح زمین می‌باشند [۶].

انباشت نفت و گاز در محوطه‌های زیرزمینی تشکیل شده به وسیله عوارض ساختمانی و یا چینه‌شناسی اتفاق می‌افتد. این اتفاق معمولاً در قسمت‌هایی از بسترها که بیشتر متخلخل و نفوذپذیر هستند، غالباً ماسه، ماسه‌سنگ، سنگ آهک و دولومیت، در بازشوهای بین‌دانه‌ای یا در فضا‌های حفره‌های ایجاد شده به وسیله درزه‌ها، ترک‌ها و حل‌شدگی‌ها رخ می‌دهد. یک مخزن آن قسمت از محوطه است که حاوی نفت و گاز به عنوان یک سیستم واحد از نظر هیدرولیکی متصل است [۷].

از آنجا که تولید نفت، با تغییرات حجمی که می‌تواند به ایجاد فشارهای موضعی زیاد منجر شود همراه است، امکان دارد باعث شروع ریز ترک‌هایی شود که زمینه ایجاد یک راه فرار به سمت سیستم‌های نفوذپذیر مانند سنگ‌های رسوبی یا صفحات ناپیوستگی را فراهم می‌کند. ریز ترک‌های سنگ مادر پس از تخلیه فشار، بسته می‌شوند [۶].

برای تشکیل یک مخزن قابل بهره‌برداری، هر سازند زمین‌شناختی باید دو مشخصه اساسی را داشته باشد؛ ظرفیت برای ذخیره و قابلیت انتقال سیال جمع شده، یعنی سنگ مخزن باید توانایی انباشت و ذخیره سیالات را داشته باشد و همچنین هنگام حفر چاه‌های استخراج باید امکان عبور از مسیرهای نسبتاً طولانی تحت شیب‌های کم برای سیالات مخزن فراهم باشد. ظرفیت ذخیره، نیازمند فضا‌های حفره‌ای در درون سنگ است و انتقال نیازمند وجود استمرار و پیوستگی در آن فضا‌های حفره‌ای. اولی را به نام تخلخل و دومی را با نام نفوذپذیری می‌شناسند [۶].

استخراج اولیه هیدروکربن‌ها از مخزن زیرزمینی با استفاده از انرژی مخزن انجام می‌شود و به عنوان استخراج اصلی شناخته می‌شود. نفت و گاز به وسیله (۱) انبساط سیال (۲) جابجایی سیال (۳) افت گرانشی و (۴) موپینگی به سمت چاه‌های استخراج جابجا می‌شوند. وقتی سفره‌ای وجود ندارد و یا سیالی در مخزن تزریق نشده، بازیابی هیدروکربن عمدتاً با انبساط سیال بدست می‌آید؛ هرچند در مورد نفت ممکن است به کمک افت گرانشی کمک شود. وقتی نفوذ آب از سمت سفره وجود دارد و یا به جای آن، آب به چاه‌ها تزریق شده است، بازیابی با مکانیزم جابجایی اتفاق می‌افتد، که ممکن است توسط افت گرانشی و یا موپینگی هم کمک‌هایی انجام شود [۷].

روش‌های بازیابی مخزن، افزایش انرژی طبیعی یک مخزن نفتی با تزریق سیالات، معمولاً آب یا گاز را شامل می‌شوند [۶].

نکته اصلی یک مدل ژئومکانیکی جامع، اطلاع از حالت تنش فعلی است. سقوط چاه به این علت اتفاق می‌افتد که تنش متمرکز شده دور محیط یک چاه از مقاومت سنگ بیشتر شده است. یک ناپیوستگی

هنگامی لغزش می‌کند که نسبت برش به تنش عمود موثر اعمال شده روی ناپیوستگی، از مقاومت اصطکاکی آن بیشتر می‌شود. تخلیه مخزن باعث تغییرات در حالت تنش آن می‌شود که ممکن است برای استخراج مفید و یا مضر باشد. تعیین حالت تنش در عمق میادین نفت و گاز، یک مسئله است که با اطلاعاتی که هنگام حفر چاه‌ها بدست می‌آید، قابل حل است [۸].

لغزش ناپیوستگی‌ها در تعداد زیادی از زمینه‌های ژئوتکنیکی حائز اهمیت بسیار است. لغزش ناپیوستگی‌ها می‌تواند موجب شکافته شدن غلاف چاه شده و همچنین عملیات‌های تزریق سیال همراه با تزریق پرفشار آب می‌تواند باعث زلزله شوند. لغزش اصطکاکی روی یک سطح وقتی اتفاق می‌افتد که نسبت برش به تنش عمود، برابر ضریب اصطکاک (μ) شود. این قضیه به عنوان قانون آمونتون^۱ شناخته می‌شود:

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \mu \quad \text{رابطه (۱-۲)}$$

که τ تنش برشی اعمال شده روی صفحه لغزش است. نقش فشار حفره‌ای لغزش اصطکاکی در σ_n معرفی شده است که به آن تنش عمود موثر گفته می‌شود و برابر است با:

$$\sigma_n = \sigma_v - P_p \quad \text{رابطه (۲-۲)}$$

جایی که σ_v تنش عمود اعمال شده روی صفحه لغزش و P_p فشار حفره‌ای است [۸].

بنابراین، افزایش فشار حفره‌ای در یک ناپیوستگی (برای مثال از طریق تزریق سیال) می‌تواند باعث لغزش ناپیوستگی به دلیل کاهش تنش عمود موثر آن شود [۹].

معادله (۱-۲) به عنوان معیار کولمب^۲ نیز شناخته می‌شود و تابع گسیختگی کولمب (CFF)^۳ مانند زیر تعریف می‌شود:

^۱ Amontons

^۲ Coulomb

^۳ Coulomb Failure Function

$$CFF = \tau - \mu\sigma_n$$

وقتی که تابع گسیختگی کولمب منفی است، ناپیوستگی پایدار خواهد ماند، چرا که تنش برشی برای غلبه بر مقاومت در برابر لغزش، $\mu\sigma_n$ ، ناکافی است. هنگامی که CFF به صفر می‌رسد، لغزش اصطکاکی روی یک صفحه ناپیوستگی موجود رخ می‌دهد، چرا که تنش برشی کافی برای غلبه بر تنش عمود موثر روی صفحه ناپیوستگی وجود دارد. همچنین، مقدار CFF در این هنگام نشان‌دهنده این نکته است که مقاومت چسبندگی ناپیوستگی در برابر تنش‌های برشی و قائم اعمالی روی آن، بسیار کوچک است.

مشاهدات تغییرشکل در چاه‌ها، یک روش موثر برای تعیین جهت تنش می‌باشد. سقوط چاه‌ها یک منبع مهم برای اطلاعات تنش هستند چرا که این اتفاق در چاه‌های حفر شده در مخازن سرتاسر جهان رخ می‌دهد و همچنین چون اجازه حصول جهت‌گیری تنش را در یک محدوده اعماق در یک چاه خاص می‌دهد. مطالعات نشان می‌دهند که این جهت‌گیری‌ها تقریباً در عمق‌های مختلف یکنواخت هستند و از ترکیب کانی‌شناسی و عمر مستقل هستند [۱۰] و [۱۱].

ترک‌های کششی ناشی از حفاری نوع دیگری از شکست چاه می‌باشد که اطلاعات مفیدی درباره جهت-گیری‌های تنش بدست می‌دهد [۱۲] و [۱۳].

همانطور که در بالا اشاره شد، معادله (۲-۱) پیش‌بینی می‌کند که افزایش فشار حفره‌ای می‌تواند باعث ناپایداری ناپیوستگی‌ها شده و با افزایش نسبت برش به تنش عمود باعث بروز لغزش روی ناپیوستگی‌های موجود شود.

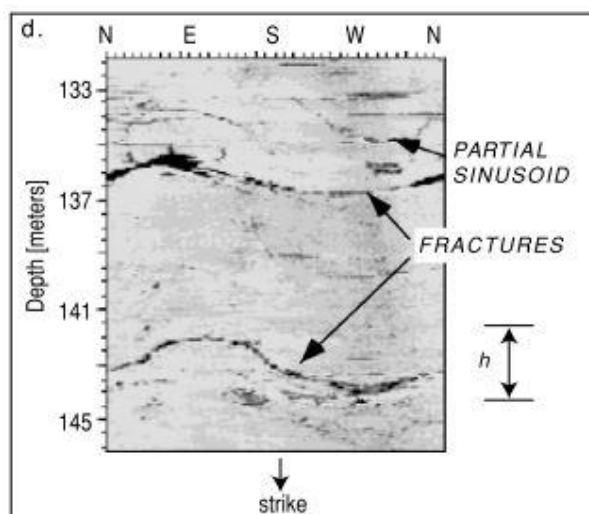
ناپیوستگی‌ها در انواع مختلف حوضه‌های رسوبی وجود دارند و نقش بسیار مهمی را در توزیع سیالات، هیدروکربن‌ها و آب زیرزمینی بازی می‌کنند. ناپیوستگی‌ها بسته به ساختارشان، که شامل کانی‌شناسی، شدت کرنش، سابقه دفن و شرایط تنش می‌شود، ممکن است کانال و یا مانعی برای جریان باشند. مخازن دارای ساختار پیچیده، چالش‌برانگیز هستند چرا که مدل‌های مخازن نسبت به عدم قطعیت در اطلاعات زمین‌شناختی ورودی، حساس هستند. ایجاد ناپیوستگی می‌تواند شامل ناهمگونی در مقیاس

کوچک و بزرگ با یک محدوده وسیعی از مشخصات ساختاری و پتروفیزیکی شود [۱۴]. در مخازن متخلخل ماسه‌سنگ، بیشترین عارضه رایج تمرکز کرنش نوار تغییرشکل می‌باشد [۱۵]. نوارهای تغییرشکل را می‌توان هم بر اساس سینماتیک آن‌ها طبقه‌بندی کرد: تورم، برش و یا تراکم؛ و هم بر اساس مکانیزم‌های تغییرشکل: جداشدگی دانه‌ها (غلطیدن و یا لغزش دانه‌ها)، خردشدگی یا شکافته شدن دانه‌ها و یا فرآیندهای هنگام تشکیل رسوبات (حل‌شدگی ناشی از فشار یا سیمانی شدن)^۱ [۱۵]. برای سنگ‌های با تخلخل کمتر، ناپیوستگی‌ها ممکن است ابتدا به شکل درزه‌ها ایجاد شوند که بعد با گسترش شکست‌های برشی و نهایتاً سطوح لغزش، به هم می‌پیوندند [۱۶]. دالان‌های شکست شامل ترک‌های برشی و درزه‌ها هم در مناطق خطر ناپیوستگی و مناطق فرآیند نوک دار شدن ناپیوستگی قابل مشاهده هستند [۱۷] و می‌توانند مسیرهای خوبی را برای جریان در مخازن فراهم کنند.

به نظر می‌رسد ناپیوستگی‌ها (ترک‌های مود ۲ یا ۳ که تغییرشکل برشی قابل توجه داشته باشند) مجراهای بهتری نسبت به ترک‌های مود ۱ برای جریان باشند. ناپیوستگی‌ها از ترک‌های ابتدایی صفحه-ای مود ۱، که گاهی به آن‌ها درزه گفته می‌شود، نشأت می‌گیرند. بعد از گذشت زمان و چرخش تنش‌های اصلی، تنش برشی فعال روی یک ناپیوستگی صفحه‌ای، می‌تواند باعث بروز لغزش شود. در سنگ‌های سیمانی شده، برش باعث خردشدگی و تکه تکه شدن در طول سطح ناپیوستگی (همچنین تورم ناشی از برش) و همچنین آسیب به سنگ‌های مجاور صفحه ناپیوستگی می‌شود. هر دو فرآیند ناپیوستگی را قادر می‌سازد که نفوذپذیری خود را حتی هنگام اعمال تنش عمود موثر قابل توجه روی آن، حفظ کند. به همین دلیل، ناپیوستگی‌هایی که در حالت تنش فعلی میدان فعال هستند، می‌توانند اثرات مهمی روی جریان سیال در بسیاری از مخزن‌ها داشته باشند [۱۸]. این‌طور به نظر می‌رسد که به استثنای صفحات بستر، اکثر عوارض صفحه‌ای مشاهده شده در مغزه‌ها که بیشترین تاثیر را در خصوصیات جریان سازندها در اعماق دارند، در واقع ناپیوستگی‌ها هستند که مطابق تعریف، ناپیوستگی‌های صفحه‌ای با مقدار محدودی تغییرشکل برشی می‌باشند [۸].

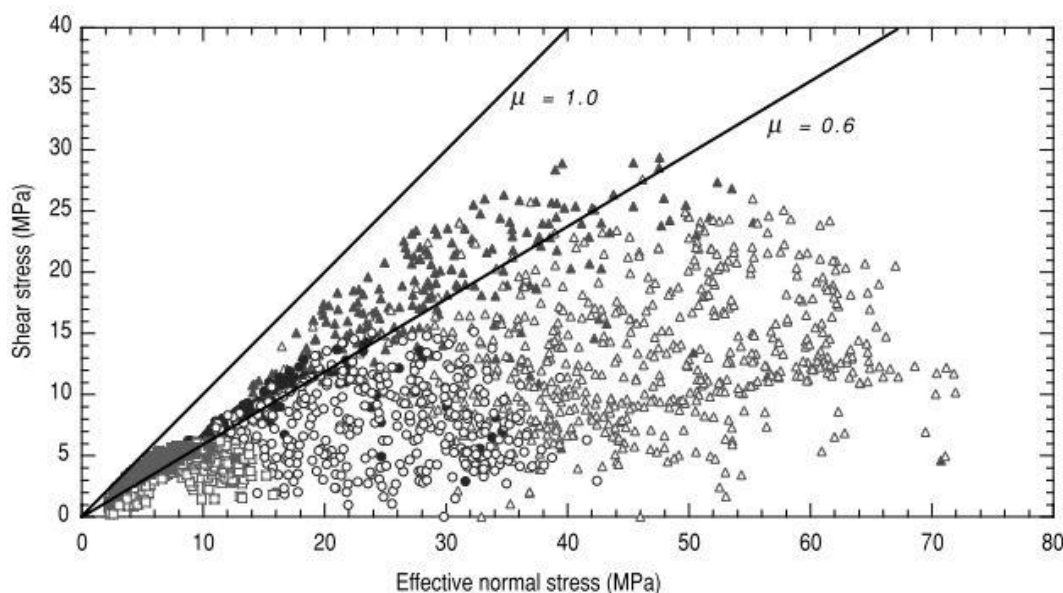
^۱ Diagenetic

شکل (۱-۲) نمونه‌ای از مغزه به‌دست‌آمده از چاه گمانه در اعماق یک مخزن را نشان می‌دهد. در این مورد، عوارض صفحه‌ای موجود در چاه گمانه، مانند بستر صفحه‌ای یا ترک‌ها به صورت سینوسی به نظر می‌رسند.



شکل ۱-۲: یک مقطع از عکس چاه گمانه با عمق روی بُعد قائم و آزمون (یا موقعیت حول چاه گمانه) روی بُعد قائم [۱۹].

در یک سازند با وجود ناپیوستگی‌ها در انواع زوایا نسبت به میدان تنش موجود، ناپیوستگی‌هایی که از نظر هیدرولیکی رسانا هستند، آنهایی هستند که در میدان تنش موجود، در شرایط بحرانی تنش هستند. به عبارت دیگر، ناپیوستگی‌هایی که از نظر مکانیکی فعال هستند، از نظر هیدرولیکی فعال هستند و آنها که از نظر مکانیکی غیرفعال هستند، از نظر هیدرولیکی غیرفعال هستند [۱۸].



شکل ۲-۲: تنش‌های برشی و قائم روی درزه‌ها شناسایی شده به کمک چاه گمانه [۲۰].

در شکل (۲-۲) نشانگرهای مثلث، دایره و مربع هر کدام نماینده مکان تصویربرداری از ناپیوستگی می‌باشد. علائم پرشده نشان دهنده ناپیوستگی‌های از نظر هیدرولیکی فعال و علائم باز نشان دهنده ناپیوستگی‌های غیرفعال هستند. مستقل از تنش عمود موثر اعمالی روی یک ناپیوستگی، تمایل یک ناپیوستگی برای رسانا بودن از نظر هیدرولیکی، به نسبت برش به تنش عمود موثر بستگی دارد، با وجود اینکه اکثریت ناپیوستگی‌های فعال، دارای نسبت برش به تنش عمود موثر ثابت و دارای ضرایب اصطکاک بین ۰/۶ و ۰/۹ هستند. دلیل این پدیده، این است که در سنگ‌های ترک‌دار و ناپیوستگی‌دار آواری، بیشتر فرآیندهای زمین‌شناختی، مانند رسوب، سیمانی شدن و دگرگونی فلدسپات‌ها به رس، باعث می‌شوند ناپیوستگی‌ها (و همچنین ترک‌ها و ناپیوستگی‌های ثانویه در مناطق آسیب در نزدیکی آنها) در طول زمان آب‌بند و بسته شوند. فرآیندهای مکانیکی همراه با ایجاد ناپیوستگی مانند خردشدگی، این تمایلات را خنثی می‌کنند و کمک می‌کنند که نفوذپذیری در ناپیوستگی‌ها و مناطق آسیب نزدیک آنها حفظ شود. این حضور ناپیوستگی‌های تحت تنش بحرانی در عمق پوسته ترد است که نفوذپذیری توده پوسته را چهار برابر بیشتر از نمونه‌های سنگ دست‌نخورده در معرض فشارهای محدودکننده مناسب می‌کند [۲۰].

در مخازن با عرض زیاد در مقایسه با ضخامتشان، تنش‌های افقی هنگام تخلیه کاهش پیدا می‌کنند اما تنش عمود تقریباً ثابت می‌ماند [۸].

خروج سیال و تزریق سیال، به نظر می‌رسد که روی ایجاد ناپیوستگی در مخازن نفت و گاز تاثیر بگذارد. ایجاد ناپیوستگی در مخازن نفت و گاز، معمولاً با افزایش فشار حفره‌ای در اثر سیلاب‌زنی یا شکست هیدرولیکی همراه است. دلیل لغزش ناپیوستگی ایجاد شده در این موارد واضح است، چرا که افزایش فشار حفره‌ای باعث کاهش تنش عمود موثر در روی صفحه ناپیوستگی می‌شود [۲۱].

هنگامی که استخراج از مخزن صورت می‌گیرد فشار منفذی که پیش از استخراج، سبب باز نگه داشته شدن منافذ است، کاهش یافته در نتیجه تنش موثر وارده بر سنگ بیشتر می‌شود. افزایش تنش موثر در نتیجه خروج هیدروکربور از سنگ سبب کاهش تخلخل می‌شود. بسته به مقاومت سنگ کاهش تخلخل در مخازن مختلف متفاوت خواهد بود بطوریکه در مخازنی که از یکپارچگی کمتری برخوردار هستند کاهش تخلخل سبب کاهش ضریب بازیافت می‌شود. روند تغییرات تخلخل در اثر تولید به عنوان تراکم نیز مطرح می‌شود. طبیعتاً برای شناخت تغییرات تراکم مخزن در اثر تولید نیاز به شناختی کامل از تراکم پذیری مخزن می‌باشد. هنگامی که تنش موثر از فشار بحرانی (مرز تغییر شکل الاستیک و غیرالاستیک) فراتر رود تغییر شکل سنگ وارد مرحله غیرالاستیک می‌شود. در این مرحله تراکم همراه با جابه‌جایی دانه‌ها و همچنین برش دانه‌ها و رخداد فروریزش تغییرشکلهای عمده در سنگ می‌باشند. در این مرحله از تغییر شکل روند تغییرات تخلخل از روند تغییرات مرحله الاستیک تبعیت نکرده و لیکن تخلخل و تراوایی با شدت بیشتری کاهش می‌یابد [۲۲].

در حالی که واضح است که تزریق سیال می‌تواند باعث ایجاد ناپیوستگی در مخازن نفت و گاز شود، مطالعات مختلفی گزارش داده‌اند که هم تخلیه سیال و هم تزریق سیال می‌تواند باعث ایجاد ناپیوستگی فعال شوند [۲۳]. هنگامی که یک مخزن در حال تخلیه است، کاهش در فشار حفره‌ای در سازند باعث تغییرات ناهمگن در تنش‌های افقی فعال در مخزن می‌شود. این تغییرات در تنش‌ها، سازند در حال

استخراج را از نظر تراکم و ایجاد ناپیوستگی تحت تاثیر قرار می‌دهد [۲۴]. به نظر می‌رسد لغزش روی ناپیوستگی‌های فعال، دلیل بریده شدن لوله‌های درون چاه‌های استخراج در بعضی میادین بوده باشد [۲۵]. و در بقیه، به نظر می‌رسد، لغزش برشی روی ناپیوستگی‌های موجود و صفحات بستر، یک علت مهم ناپایداری چاه هنگام حفاری باشد [۲۶]. ناپیوستگی‌های با تنش وارده بحرانی (یعنی ناپیوستگی‌هایی که در میدان تنش فعلی فعال هستند) در مخازن با نفوذپذیری کم، به طور ملموسی در نفوذپذیری کلی مخزن مشارکت می‌کنند [۲۷] و [۲۸]. در همین حال، فعالسازی دوباره ناپیوستگی‌های مرزی می‌تواند باعث از دست دادن ظرفیت آب‌بندی شود و تراوش رخ دهد [۲۹]. همچنین لغزش روی ناپیوستگی‌های فعال می‌تواند اندازه عمودی ستون هیدروکربن را که یک مخزن مرزبندی شده توسط یک ناپیوستگی می‌تواند دارا باشد، کنترل کند [۳۰]. به عنوان نتیجه، دانش بهتر درباره خصوصیات فیزیکی سازند و چگونگی تاثیرپذیری آن توسط طرح استخراج، برای به حداقل رساندن آسیب‌های ناشی از استخراج، بسیار ضروری است.

۲-۲- ناپیوستگی توده سنگ

۲-۲-۱- تعاریف اولیه

ناپیوستگی

تعاریف اینکه چه چیزی شامل یک ناپیوستگی و یا درزه می‌شود، بین زمین‌شناسان و مهندسان و بین استانداردهای جهانی مختلف، متفاوت می‌باشد. ناپیوستگی یک اصطلاح کلی برای صفحات ضعیف در سنگ است، مانند صفحه درزه بستر و شکاف می‌باشد [۳۱]. انجمن جهانی مکانیک سنگ (ISRM)^۱، ۱۹۷۸)، ناپیوستگی‌ها را دارای مقاومت کششی صفر و یا خیلی کم معرفی می‌کند [۳۲]. این درک از توده سنگ که آن را تشکیل شده از بلوک‌های سنگ جدا شده توسط ترک‌های به شدت ضعیف و یا باز

^۱ International Society of Rock Mechanics

تعریف می‌کند، در طبقه‌بندی‌های توده سنگ شامل RQD و سایر آن‌ها مثل RMR و Q، یافت می‌شود [۳۳].

درزه

ISRM درزه را یک فاصله در خاستگاه زمین‌شناسی در پیوستگی توده یک سنگ تعریف می‌کند که جابجایی قابل مشاهده‌ای ندارد. درزه‌ها می‌توانند باز، پرشده و یا بسته شده باشند [۳۲]. حال آن‌که طبق تعریف ASTM، یک وقفه یا تغییر ناگهانی در ویژگی‌های ساختاری سنگ می‌باشد. این تغییرات ممکن است شامل مقاومت، سختی، و یا چگالی شود و معمولاً در سطوح داخلی و یا ناحیه‌هایی مثل بستر، جداسازی‌ها، ترک‌ها، درزه‌ها، ناپیوستگی‌ها و شکافتگی اتفاق می‌افتد [۳۴].

جهت

جهت یک ناپیوستگی با شیب و جهت شیب توصیف می‌شود. شیب یک صفحه با درجه انحراف (درجه بین سطح ناپیوستگی و صفحه افقی) اندازه‌گیری می‌شود. زاویه شیب بین ۰ تا ۹۰ درجه متغیر است. جهت شیب، جهت صفحه ناپیوستگی می‌باشد و از شمال به صورت پادساعتگرد اندازه‌گیری می‌شود. جهت شیب عموماً با یک زاویه بین ۰ تا ۳۶۰ بیان می‌شود [۳۵].

زبری

زبری معیاری از ناصافی و حالت موجی ذاتی سطح یک ناپیوستگی نسبت به صفحه میانگین آن می‌باشد. زبری با موج‌دار بودن در مقیاس بزرگ و ناصافی در مقیاس کوچک، در یک ناپیوستگی مشخص می‌شود. زبری یک عامل مهم تعیین‌کننده در جابجایی برشی و مقاومت برشی می‌باشد. زبری درزه توسط مقیاس هندسی تحت تاثیر قرار می‌گیرد [۳۵]. انجمن جهانی مکانیک سنگ ISRM (۱۹۸۷) پیشنهاد می‌کند که در شرایط کلی زبری دیواره ناپیوستگی می‌تواند به وسیله حالت موجی (زبری بزرگ مقیاس، که اگر در قفل و بست و تماس با یکدیگر باشند، باعث تورم حین جابجایی برشی می‌شوند، از آنجا که برای بریده شدن بسیار بزرگ هستند) و به وسیله ناهمواری (زبری کوچک مقیاس که در حین جابجایی برشی