

فصل هفتم

مکانیک شکستگی و گسلش

(تئوری‌ها و آزمایشات)

مقدمه

در این فصل ارتباط بین تنش و تشکیل شکستگی‌های سنگ را مورد بررسی قرار خواهیم داد. با استفاده از شناسایی شرایطی که تحت آنها در سنگ شکستگی ایجاد می‌شود به عنوان یک راهنما، می‌توانیم علت و چگونگی تشکیل شکستگی‌ها و گسلها را شناسایی نماییم. در ابتدا بحث را با دگرشکلی الاستیک^۱ شروع می‌نماییم که شاخص مواد شکننا بوده و در تنش‌هایی پایین‌تر از تنش مورد نیاز برای ایجاد شکستگی رخ می‌دهد. در آزمایشگاه می‌توان نمونه‌های سنگی را تحت انواع مختلفی از حالت‌های تنش قرار داد که باعث ایجاد دگرشکلی الاستیک می‌شوند و اگر تنش بحد کافی افزایش یابد می‌تواند باعث ایجاد انواع مختلفی از شکستگی شود. داده‌های حاصل از آزمایشات این امکان را فراهم می‌سازند تا معیار شکستگی^۲ را به فرمول درآوریم. با استفاده از معیار شکستگی قادر خواهیم بود حالتی از تنش در درون زمین که می‌تواند باعث شکستگی شود یا این که سنگ بصورت پایدار باقی می‌ماند را شناسایی کنیم. سپس اثرات شرایط فیزیکی مانند فشار همه‌جانبه، فشار مایع منفذی، انیزوتروپی سنگ، گرما و تنش اصلی متوسط بر روی معیار شکستگی را بررسی می‌نماییم. در انتهای بحث تئوری گریفیت را برای شناسایی چگونگی توسعه شکستگی شکننا مطرح خواهیم نمود که مدلی منسجم برای توجیه بسیاری از اثرات مشاهده شده در مقیاس میکروسکوپی و ریز میکروسکوپی است.

دگرشکلی الاستیک و مدل آزمایشگاهی گسیختگی سنگ‌ها

دگرشکلی الاستیک

در آزمایش دگرشکلی سنگ، تکه‌ای از سنگ به فرم یک استوانه بریده می‌شود قطر آن در برخی موارد کمتر از یک سانتیمتر تا ده‌ها سانتیمتر بوده و طول آن بطور مشخص ۲ تا ۴ برابر قطر آن است. نمونه بین دو قطعه فولاد سخت یا مواد مشابه قرار داده و بوسیله پمپ هیدرولیکی فشرده می‌شود. تنش اعمال شده باعث تغییر در طول، قطر و حجم نمونه می‌گردد. این تغییرات بخشی از استرین هستند که بوسیله استرین سنج متصل به نمونه اندازه‌گیری می‌شوند. اطلاعات اولیه حاصل از اینگونه نتایج آزمایشگاهی، ارتباط بین نیروی محوری اعمال شده و تغییرات ابعاد ناشی از آن در نمونه را نشان می‌دهند. زمانی که ماده‌ای مانند سنگ در معرض افزایش تدریجی تنش قرار می‌گیرد دگرشکلی آغازین آن بصورت الاستیک است بدین معنی که تغییر در تنش باعث ایجاد یک تغییر لحظه‌ای در ابعاد نمونه می‌شود. بنابراین استرین بصورت برگشت پذیر است استرین انبساطی^۳ (e_n) یا بطور ساده‌تر کشیدگی^۴ یک اندازه‌گیری از استرین است که برابر با تغییرات طول تقسیم بر طول اولیه است یعنی:

$$e_n = \frac{l-L}{L} = \frac{\Delta L}{L} \quad (7-1)$$

در این رابطه L طول اولیه، l طول دگرشکل شده و ΔL تغییرات طول است. همچنین کشیدگی را بصورت درصد تغییر در طول نیز نشان می‌دهیم که با ضرب e_n در ۱۰۰ بدست می‌آید. در حالت تنش تک محوری بزرگی استرین کششی الاستیک موازی با تنش اعمال شده بطور مستقیم متناسب با بزرگی تنش است.

$$e_n = \frac{\sigma_n}{E}, \quad \sigma_n = E e_n \quad (7-2)$$

۱-Elastic deformation

۲-Fracture Criteria

۳-Dilatation

۴-Extension

در اینجا ثابت نسبت E ، مدول یانگ^۱ می‌باشد که یکی از دو ثابت الاستیک مورد نیاز برای تشخیص رفتار الاستیک یک ماده ایزوتروپ است. برای علائم قراردادی زمین‌شناسی، تنش فشاری تک محوری (یا مثبت) طول نمونه را کاهش می‌دهد و در نتیجه، یک کشیدگی منفی ایجاد می‌کند. در حالت معکوس، تنش کششی (یا منفی) یک کشیدگی مثبت ایجاد می‌کند. بنابراین مدول یانگ بصورت عدد منفی است. E برای سنگ‌ها بطور شاخصی دارای مقادیری در محدوده $-0.5 \times 10^5 \text{ MPa}$ تا $-1.5 \times 10^5 \text{ MPa}$ است.

بطور کلی بیشترین کشیدگی اکثر مواد قبل از شکسته شدن معمولاً خیلی کوچک و در بیشترین حالت شاید در حدود چند درصد است. استرین در حقیقت مانند تنش یک کمیّت تنسوری درجه دوم متقارن است. در حال حاضر فقط اشاره می‌نماییم که: (۱) حالت کامل استرین توسط سه کشیدگی اصلی $\hat{e}_1 \geq \hat{e}_2 \geq \hat{e}_3$ مشخص می‌شود که علامت \wedge در بالای e نشان دهنده این است که آنها مانند علامت‌گذاری تنش مقادیر اصلی را نشان می‌دهند. (۲) برای استرین‌های بسیار کوچک شاخص دگرشکلی الاستیک، محورهای اصلی استرین به موازات محورهای اصلی تنش هستند. با اینحال، برای استرین‌های بزرگ شاخص دگرشکلی شکل‌پذیر، این محورها به موازات هم باقی نمی‌مانند. در فشار تک محوری، نمونه به موازات تنش اعمال شده کوتاه می‌باشد. اگر حجم نمونه تغییر نکند نمونه باید در جهت عمود بر جهت کوتاه شدگی منبسط شود (شکل ۱-۷ الف). با این حال، مواد هرگز بطور کامل غیر قابل فشرده شدن نیستند بطوری که در هر دگر شکلی، کاهش منظمی در حجم وجود دارد که ناشی از تنش فشاری است. ضریب پواسون (۷)، مقدار مطلق ضریبی است که از نسبت کشیدگی عمود بر تنش فشاری اعمال شده (\hat{e}_\perp) بر کشیدگی موازی با تنش فشاری اعمال شده (\hat{e}_\parallel) حاصل می‌شود.

$$\nu = \frac{\hat{e}_\perp}{\hat{e}_\parallel} \quad (7-3)$$

ضریب پواسون دومین ثابت الاستیک است که رفتار یک ماده الاستیک ایزوتروپ را مشخص می‌سازد. اگر مواد کاملاً غیر قابل فشرده شدن باشند ν برابر با 0.5 است با این حال، ضریب پواسون برای اکثر سنگ‌ها در محدوده 0.25 تا 0.33 قرار دارد. انبساط عمود بر فشارش اعمال شده انبساط پواسونی^۲ نامیده می‌شود.

در نمونه‌هایی که تحت فشار همه جانبه قرار می‌گیرند بزرگی کشیدگی محوری تنها به تنش محوری اعمال شده وابسته نیست بلکه به دلیل انبساط پواسونی به فشار شعاعی نیز بستگی دارد. کوتاه شدگی محوری حاصل از تنش فشاری محوری به وسیله انبساط پواسونی همراه با هر یک از تنش‌های اصلی شعاعی فشاری کاهش می‌یابد. (شکل ۱-۷ ب). بنابراین

$$\hat{e}_{zz} = \frac{1}{E} \hat{\sigma}_{zz} - \nu \left(\frac{1}{E} \hat{\sigma}_{xx} - \nu \left(\frac{1}{E} \hat{\sigma}_{yy} \right) \right) \quad (7-4)$$

$$\hat{e}_{zz} = \frac{1}{E} \hat{\sigma}_{zz} - \frac{\nu}{E} (\hat{\sigma}_{xx} + \hat{\sigma}_{yy}) \quad (7-5)$$

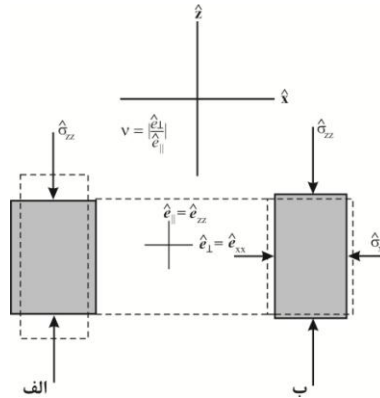
این روابط را با رابطه ۹-۲ برای تنش تک محوری مقایسه نمایید. در رابطه ۹-۴ دو بخشی که شامل ν هستند مقدار انبساط پواسونی را مشخص می‌کنند که می‌تواند در جهت \hat{x} ایجاد شود اگر هر مؤلفه تنش شعاعی موازی با \hat{x} ، بصورت تنش تک محوری باشد. همچنین می‌توانیم با تغییر اندیس‌های علائم تنش و کشیدگی روابط مشابهی برای دو کشیدگی اصلی دیگر بنویسیم.

۱-Young, s modulus

۲-Poisson expansion

انبساط حجمی^۱، تغییر حجم تقسیم بر حجم اولیه است و برای استرین‌های کوچک تقریباً با سه کشیدگی اصلی مرتبط است.

$$e_v = \frac{\Delta V}{V} \approx \hat{\epsilon}_1 + \hat{\epsilon}_2 + \hat{\epsilon}_3 \quad (۶-۹)$$



شکل ۷-۱-۱ اثر پواسون، تغییرات ابعاد برای وضوح بیشتر بطور اغراق آمیزی بزرگ نشان داده شده‌اند. (الف) مقایسه شکل قبل از دگرشکلی (مستطیل خط چین) و شکلی که با اعمال فشار تک محوری $\hat{\sigma}_{zz}$ بوجود آمده است (مستطیل سایه خورده) انبساط پواسونی را نشان می‌دهد (ب) اگر فشار شعاعی $\hat{\sigma}_{yy} = \hat{\sigma}_{xx} = P$ به تنش تک محوری (الف) اضافه شود اثر پواسون مقدار کوتاه شدگی به موازات $\hat{\sigma}_{zz}$ را کاهش می‌دهد.

الگوی آزمایشگاهی شکستگی

افزایش تنش محوری در نهایت باعث گسیخته شدن نمونه می‌شود و این در زمانی است که نمونه قادر نیست افزایش تنش را بدون دگرشکلی دائمی تحمل کند. تنش لحظه گسیخته شدن نمونه یک اندازه‌گیری از مقاومت را نشان می‌دهد. با توجه به این که گسیخته شدن به روش‌های مختلف رخ می‌دهد، اندازه‌گیری‌های متفاوتی از مقاومت وجود دارد. گسیختگی شکنا^۲ همراه با تشکیل شکستگی شکنا^۳ رخ می‌دهد که نتیجه آن سطح یا زونی است که در طول آن چسبندگی سنگ از بین می‌رود. گسیختگی شکل‌پذیر^۴ زمانی رخ می‌دهد که مواد بدون از دست دادن چسبندگی خود دچار دگرشکلی دائمی شوند. در تحقیقات آزمایشگاهی اثر فشار بر روی گسیختگی از نمونه‌ای استفاده می‌شود که با پوششی غیر قابل نفوذ پوشیده شده و بوسیله محفظه فشار پر شده از یک مایع تحت فشار احاطه شده است. فشار مایع احاطه کننده (فشار همه جانبه^۵) و فشار مایع درون تخلخل سنگ (فشار مایع منفذی^۶) برای تعیین اثر هر کدام از این دو بر روی رفتار نمونه بطور جداگانه کنترل می‌شوند. در آزمایشات مربوط به اثر گرما، گرما به وسیله یک کوره کوچک سیم پیچی شده که نمونه درون محفظه فشار را احاطه می‌کند، کنترل می‌شود.

نیروهای اعمال شده معمولاً بصورت عمود بر سطوح نمونه هستند بطوری که محورهای اصلی تنش به موازات محور اصلی استوانه (تنش محوری) یا عمود بر محور استوانه (تنش‌های شعاعی یا فشار همه جانبه) هستند. آزمایشات همیشه در فشار تک محوری (شکل ۲۵-۶ب) با فشار همه جانبه (شکل ۲۵-د) انجام می‌شوند. و تنش محوری، بزرگ‌ترین تنش فشاری ($\hat{\sigma}_1$) است. آزمایشات کشش محوری که تنش محوری، کوچک‌ترین تنش فشاری ($\hat{\sigma}_3$) است. (شکل ۲۵-۶ و) نیز متداول هستند. با تغییر و تبدیل مخصوصی بر روی تجهیزات می‌توان آزمایشات کشش تک محوری را انجام داد (شکل ۲۵۶-۶ج) اگر چه این آزمایشات معمولاً کمتر انجام می‌شوند. آزمایشات بر روی گسیختگی

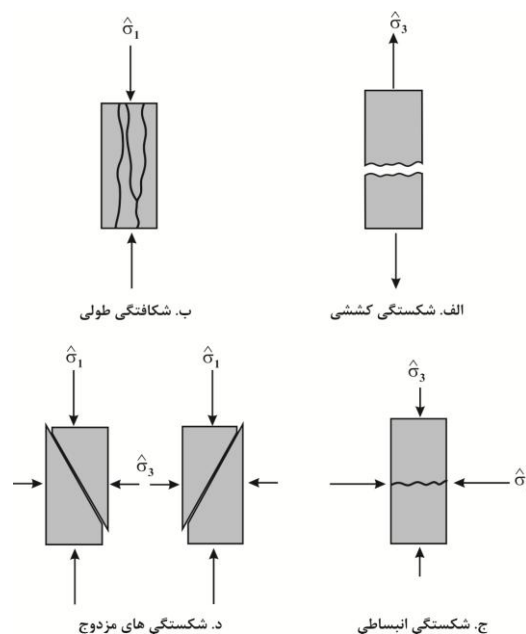
- ۱- Volumetric extension
- ۲- Brittle failure
- ۳- Brittle fracture
- ۴- Ductile failure
- ۵- Confining pressure
- ۶- Pore fluid pressure

شکنا، دو نوع اصلی از شکستگی‌ها را آشکار می‌کنند که شامل شکستگی‌های انبساطی (نوع ۱) و شکستگی‌های برشی (نوع ۲) هستند. در هر یک از این انواع شکستگی‌ها، سطوح شکستگی دارای جهت‌گیری متفاوتی نسبت به تنش‌های اصلی هستند و جهت جابجایی نسبت به سطح شکستگی متفاوت است. این دو نوع شکستگی از شکستگی‌های متداول سنگ‌ها هستند.

در شکستگی‌های انبساطی، سطح شکستگی عمود بر کوچک‌ترین تنش فشاری و به موازات بزرگ‌ترین تنش فشاری است و جابجایی بر روی آنها تقریباً عمود بر سطح شکستگی است. اگر کوچک‌ترین تنش اصلی ($\hat{\sigma}_3$) بصورت کششی^۱ باشد شکستگی‌های انبساطی بصورت شکستگی‌های کششی^۲ هستند مانند شکستگی‌هایی که در کشش تک محوری (شکل ۲۵-۶ج) تشکیل می‌شوند (شکل ۲-۷ الف).

اگر کوچک‌ترین تنش اصلی ($\hat{\sigma}_3$) مساوی یا نزدیک به صفر باشد و بزرگ‌ترین تنش فشاری ($\hat{\sigma}_1$)، تنش محوری را تشکیل دهد شکستگی‌های انبساطی بوسیله شکافتگی طولی^۳ ایجاد می‌شوند. (شکل ۲۵-۹ ب). مانند شکستگی‌هایی که در فشار تک محوری ایجاد می‌شوند (شکل ۲۴-۶ ب). شکستگی‌هایی که بوسیله شکافتگی طولی ایجاد می‌شوند جهت‌گیری و شکل نامنظم‌تری نسبت به سایر شکستگی‌های انبساطی دارند. شکستگی‌های انبساطی ممکن است تحت شرایط کشش محوری نیز تشکیل شوند. (شکل ۲-۷ ج) که کوچک‌ترین تنش فشاری ($\hat{\sigma}_3$)، تنش محوری را تشکیل می‌دهد (شکل ۲۵-۶ ب).

شکستگی‌های برشی در فشار همه‌جانبه (شکل ۲۵-۶ د) در زوایای کمتر از 45° نسبت به بزرگ‌ترین تنش فشاری تشکیل می‌شوند (شکل ۹-۲ د) و جابجایی بر روی آنها به موازات سطح شکستگی است. اگر تنش به حالت سه محوری باشد (شکل ۲۵-۶ ز) شکستگی‌های برشی به موازات تنش اصلی متوسط ($\hat{\sigma}_2$) بوده و یک زوج مزدوج از شکستگی‌های دارای زوایای کمتر از 45° در طرفین بزرگ‌ترین تنش فشاری (45°) تشکیل می‌دهند. اگر $\hat{\sigma}_2 = \hat{\sigma}_3$ باشد (شکل ۲۵-۶ د) جهت‌گیری‌های ممکن شکستگی‌های برشی بصورت مماس بر مخروطی است که در زاویه کمتر از 45° در حول محور $\hat{\sigma}_1$ قرار دارد. (به بخش ۹-۳ مراجعه نمایید).



شکل ۲-۷: انواع شکستگی‌های تشکیل شده در سنگ‌ها در محدوده رفتار شکنا در طی آزمایشات را نشان می‌دهد.

- ۱-Tension
- ۲-Tension fracture
- ۳-Longitudinal splitting

معیار شکستگی برای شکستگی کششی

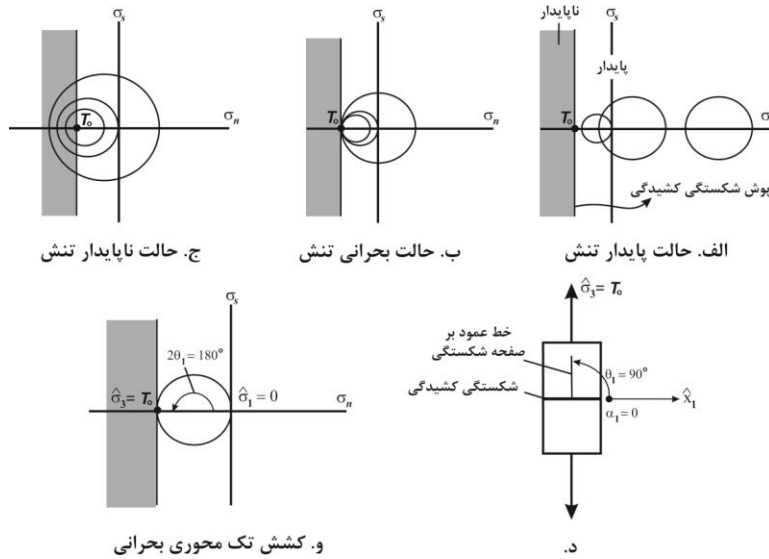
آزمایشات کشش تک محوری بر روی سنگها نشان می دهد که برای هر ماده یا هر نوع سنگی مقدار شاخصی از تنش کششی (T_0) وجود دارد. که در آن شکستگی کششی ایجاد می شود. تا زمانی که تنش های کششی کوچک تر از T_0 باشند سنگ پایدار است اما تنش های کششی بزرگ تر از T_0 را نمی تواند تحمل کند. T_0 مقاومت کششی^۱ سنگ نامیده شده است. مرز بین حالت پایدار و ناپایدار تنش کششی بر روی دیاگرام مور به نام پوش شکستگی کششی^۲ تعریف می شود. (شکل ۷-۳ الف). این مرز بصورت خطی عمود بر محور σ_n در نقطه T_0 است و بوسیله رابطه زیر بیان می شود.

$$\sigma_n^* = T_0 \quad (7-9)$$

در این رابطه σ_n^* تنش نرمال بحرانی یعنی تنش مورد نیاز برای ایجاد شکستگی است. دایره موری که در سمت راست خط T_0 قرار می گیرد حالت پایدار تنش را نشان می دهد (شکل ۷-۳ الف). دایره موری که سمت چپ آن مماس بر این خط است (دایره مور بحرانی^۳) حالتی از تنش را نشان می دهد که باعث ایجاد شکستگی کشیدگی می شود (شکل ۷-۳ ب) دایره موری که خط T_0 را قطع میکند حالتی از تنش را نشان می دهد که مواد نمی توانند آن را تحمل کنند و شکسته می شوند (شکل ۷-۳ ج). جهت گیری صفحه شکستگی نسبت به تنش های اصلی را می توان بوسیله زاویه صفحه شکستگی^۴ (α_f) که زاویه بین بزرگ ترین تنش اصلی و صفحه شکستگی است یا بوسیله زاویه شکستگی^۵ (θ_f) که زاویه بین بزرگ ترین تنش اصلی و خط عمود بر صفحه شکستگی است، توصیف نمود. برای صفحه ای که $|\theta_f - \alpha_f| = 90^\circ$ است اگر هر دو زاویه بصورت حاده باشند علامت آنها معکوس هم است (شکل های ۷-۳ د و ۷-۳ و را مقایسه نمایید). برای رسم نمودن دیاگرام مور تنش های سطحی که بر روی صفحه شکستگی عمل می کنند باید جهت گیری صفحه شکستگی را بوسیله جهت گیری خط عمود بر آن مشخص نماییم به همین دلیل از زاویه شکستگی θ_f استفاده می نماییم.

در آزمایشات، صفحه شکستگی کشیدگی بصورت عمود بر بزرگ ترین تنش کششی است. بنابراین زاویه صفحه شکستگی (α_f) برابر با صفر و زاویه شکستگی (θ_f) برابر با 90° است (شکل ۷-۳ د). بر روی دیاگرام مور (شکل ۷-۳ و) تنش بر روی صفحه شکستگی در زاویه $2\theta_f = 180^\circ$ از $(\hat{\sigma}_1, 0)$ رسم می شود. در نتیجه، مؤلفه های تنش بر روی صفحه شکستگی دقیقاً در نقطه تماس دایره مور بحرانی با پوش شکستگی کششی رسم می شوند. بنابراین رابطه ۷-۹ یک معیار شکستگی را ارائه می دهد زیرا این رابطه هم مقدار تنش لازم برای تشکیل شکستگی و هم جهت گیری شکستگی را مشخص می کند. شکستگی کششی می تواند بر روی هر سطح از مواد که تنش نرمال آن به T_0 می رسد، تشکیل شود و صفحه شکستگی عمود بر بزرگ ترین تنش کششی است. با این حال، این معیار تنها برای شکستگی های کششی تشکیل شده تحت شرایط تنش کششی بکار می رود کاربرد این معیار برای شکستگی های انبساطی که تحت شرایط عدم وجود تنش اصلی کششی تشکیل شده اند (شکل های ۷-۳ ب و ۷-۳ ج) مانند شکافتگی طولی، موجه نیست.

- ۱-Tensile strength
- ۲-Tension fracture envelope
- ۳-Critical Mohr circle
- ۴-Fracture plane angle
- ۵-Fracture angle



شکل ۷-۳- معیار شکستگی برای کشش تک محوری، پوش شکستگی کششی دایره مور را به دو بخش تنش پایدار (روشن) و تنش ناپایدار (سایه زده) تقسیم کرده است. (الف) . (ب) و (ج) بترتیب دوایر مور برای حالت‌های تنش پایدار، بحرانی و ناپایدار را نشان می‌دهند. (د) دیاگرام فضای فیزیکی نشان می‌دهد که خط عمود بر سطح شکستگی کششی به موازات $\hat{\sigma}_3$ است (و) دایره مور بحرانی برای شکستگی کششی تحت شرایط تنش کششی تک محوری را نشان می‌دهد.

معیار شکستگی کولمب برای فشار همه جانبه

ارتباط بین حالت تنش و تشکیل شکستگی برشی در آزمایشات فشار همه جانبه (شکل ۲۵-۲۶) پیچیده‌تر از کشش تک محوری است. آزمایشات شکستگی روی نمونه‌های مختلف از سنگ یکسان نشان می‌دهد که آغاز شکستگی وابسته به تنش تفریقی ($D^{\sigma} = \hat{\sigma}_1 - \hat{\sigma}_3$) بوده و بزرگی تنش تفریقی مورد نیاز برای ایجاد شکستگی برشی با افزایش فشار همه جانبه افزایش می‌یابد. زاویه شکستگی (θ_f) یعنی زاویه بین $\hat{\sigma}_1$ و خط عمود بر صفحه شکستگی معمولاً در حدود $\pm 60^\circ$ است بطوری که زاویه صفحه شکستگی (α_f) یعنی زاویه بین صفحه شکستگی و بزرگ‌ترین تنش فشاری ($\hat{\sigma}_1$) باید در حدود $\pm 30^\circ$ باشد (شکل ۷-۲ د).

داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که امکان رسم پوش شکستگی برشی^۱ بر روی دیاگرام مور وجود دارد که حالت تنش پایدار را از حالت تنش ناپایدار جدا می‌کند. این پوش معمولاً بوسیله یک جفت خط تقریباً مستقیم مشخص می‌شود که نسبت به محور σ_{II} حالت تقارن دارد (شکل‌های ۷-۴ الف، ب و ج). اگر چه در حقیقت ممکن است که این خطوط به آرامی به سمت محور σ_{II} تقعر پیدا کنند. هر دایره موری که بین این دو خط پوش شکستگی قرار گیرد حالت تنش پایدار را نشان می‌دهد. (شکل ۷-۴ الف). دایره موری که مماس بر خط پوش شکستگی است حالت بحرانی تنش را نشان می‌دهد که باعث تشکیل شکستگی می‌شود (شکل ۷-۴ ب). دایره موری که خط پوش شکستگی را قطع می‌کند حالت ناپایداری از تنش را نشان می‌دهد که سنگ نمی‌تواند آن را تحمل کند (شکل ۷-۴ ج). شعاعی از دایره مور که به نقطه تماس بین دایره مور با پوش شکستگی وصل می‌شود (شکل ۷-۴ ب) مؤلفه‌های تنش سطحی بر روی سطح شکستگی واقعی در زمان شکسته شدن را نشان می‌دهد. این خطوط مستقیم برای پوش شکستگی برشی به عنوان معیار شکستگی کولمب^۲ شناخته می‌شوند و از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$|\sigma_s^*| = c + \mu \sigma_n \quad (7-8)$$

در اینجا

^۱-Shear fracture envelope

^۲-Coulomb fracture criterion

$$\mu = \tan\phi \quad (7-9)$$

و σ_s^* تنش برش بحرانی، C, μ بترتیب شیب و عرض از مبدا، خط پوش (محل تقاطع خط با محور σ_s) و زاویه ϕ زاویه شیب خط می‌باشد که دارای مقادیر مثبت است (شکل ۴-۷ب). به دلیل این که این رابطه با استفاده از مقادیر مطلق تنش برش بحرانی نوشته شده است هر دو خط معیار شکستگی برشی را توصیف می‌کند.

دو ثابت رابطه ۷-۸ یعنی C, μ ویژگی‌های گسیختگی را مشخص می‌کنند و مقدار آنها از سنگ یا ماده‌ای به سنگ یا ماده دیگر فرق می‌کند. چسبندگی^۱ (C) عبارت است از مقاومت در برابر شکستگی برشی بر روی صفحه‌ای از سنگ که تنش نرمال بر روی آن برابر با صفر است. μ را ضریب اصطکاک داخلی^۲ و ϕ را زاویه اصطکاک داخلی^۳ می‌نامند به این دلیل که اگر چسبندگی برابر با صفر باشد رابطه ۷-۸ مشابه قانون مقاومت اصطکاک می‌خواهد شد. علاوه بر این می‌توان معیار شکستگی کولمب را با استفاده از تنش‌های اصلی نشان داد. معیار شکستگی کولمب نشان می‌دهد در هر زمانی که حالت تنش در سنگ بر روی صفحه‌ای با برخی از جهت‌گیری‌ها به گونه‌ای باشد که مؤلفه‌های تنش سطحی (σ_s, σ_n) بتوانند رابطه ۷-۸ را کامل کنند، شکستگی برشی می‌تواند بر روی آن صفحه تشکیل می‌شود. برای هر حالت تنش بحرانی، معیار شکستگی در دو نقطه کامل می‌شود یعنی جایی که دایره مور با دو خط مشخص شده بوسیله رابطه ۷-۸ مماس می‌شود (شکل ۴-۷ب) این نقاط تنش‌های روی دو صفحه با جهت‌گیری‌های مختلف را مشخص می‌کنند که به آنها صفحات برشی مزدوج^۴ می‌گویند (شکل‌های ۴-۷ د و ۴-۷ و) و نشان می‌دهند که دو جهت ممکن برای تشکیل شکستگی برشی وجود دارد. معیار شکستگی جهت تشکیل شکستگی را پیش بینی نمی‌کند.

بر روی دایره مور (شکل ۴-۷ ب) زاویه بین شعاع متصل به $(\hat{\sigma}_1, 0)$ و مؤلفه‌های تنش (σ_s^*, σ_n^*) بر روی صفحاتی که تنش بر روی آنها بصورت بحرانی است، $\pm 2\theta_f$ است. بنابراین در فضای فیزیکی، خطوط عمود بر صفحات شکستگی باید در زاویه $\pm\theta_f$ نسبت به محور $\hat{\sigma}_1, \hat{x}_1$ باشند و صفحات شکستگی با $\hat{\sigma}_1$ زاویه $\pm 2\alpha_f$ را بسازند. (شکل‌های ۴-۷ د و ۴-۷ و). بر روی دایره مور، شعاع متصل به نقطه مماس دایره با پوش شکستگی برشی باید بصورت عمود بر پوش شکستگی باشد. بطوری که زوایای α_f, θ_f با زاویه شیب پوش شکستگی (ϕ) بوسیله رابطه زیر به هم مربوط باشند.

$$|2\theta_f| = (90 + \phi)\text{degrees} = (\pi/2 + \phi)\text{radians} \quad (7-10)$$

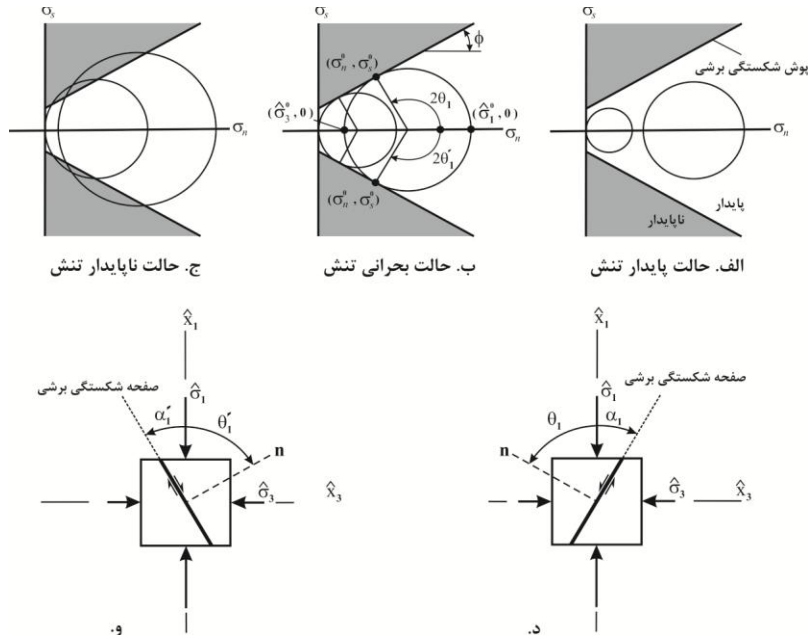
بنابراین پوش شکستگی هم تنش بحرانی مورد نیاز برای تشکیل شکستگی و هم جهت‌گیری شکستگی ایجاد شده را مشخص می‌کند.

۳-Cohesion

۴-Coefficient of internal friction

۵-Angle of internal friction

۶-Conjugate shear planes



شکل ۴-۷- معیار شکستگی کولمب برای فشار محوری. معیار شکستگی دیاگرام مور را به دو ناحیه تنش پایدار (روشن) و تنش ناپایدار (سایه زده) تقسیم کرده است (الف) دایره مور حالت پایدار تنش را نشان می‌دهد زیرا در محدوده پایدار دیاگرام رسم شده است. (ب) دایره مور حالت بحرانی تنش را نشان می‌دهد. شعاع‌های مربوط به نقطه تماس دایره مور با پوش شکستگی رسم شده‌اند. $2\theta_f$ و $2\theta'_f$ دو برابر زاویه شکستگی و Φ زاویه اصطکاک داخلی است. (ج) دایره مور حالت ناپایدار را نشان می‌دهد (د) و (و) جهت‌گیری شکستگی‌های برشی برای زوایای مشخص شده در بخش (ب) را بر روی دیاگرام فضای فیزیکی نشان می‌دهد. توجه نمایید که σ_1 نیمساز زاویه حاده بین صفحات برشی مزدوج است.

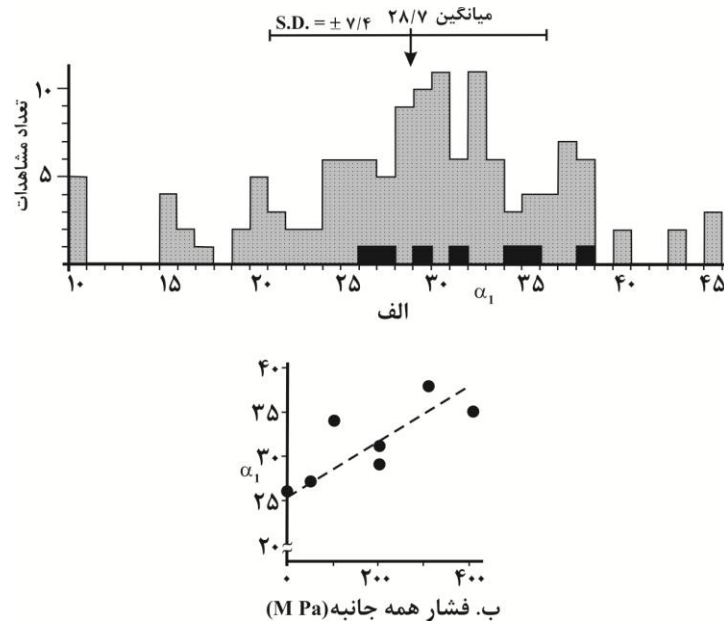
اگر سه تنش اصلی نامساوی باشند خط تقاطع صفحات برشی مزدوج به موازات محور تنش اصلی متوسط ($\hat{\sigma}_2$) خواهد بود. در فشار تک محوری یا فشار همه جانبه ($\hat{\sigma}_2 = \hat{\sigma}_3$) محور تنش اصلی متوسط مجزایی وجود ندارد و تعداد بیشماری از جهت‌گیری‌های ممکن وجود دارند که صفحات شکستگی برشی می‌توانند بصورت مماس بر یک مخروط که محور آن موازی با $\hat{\sigma}_1$ است، توزیع شوند.

معیار شکستگی کولمب که بهترین انطباق با داده‌های آزمایشگاهی تعیین شده برای شکستگی برشی است برای مثال برای شکستگی برشی ماسه سنگ بریا^۱ بصورت زیر است:

$$|\sigma_s^*| = 24.1 + 0.49\sigma_n \quad (7-11)$$

با مقایسه روابط ۷-۸ و ۷-۱۱ و با استفاده از روابط ۷-۹ و ۷-۱۰ در می‌یابیم که $\phi = 26^\circ$ ، $|\alpha_f| = 32^\circ$ ، $|\theta_f| = 58^\circ$ است.

^۱-Berea sandstone

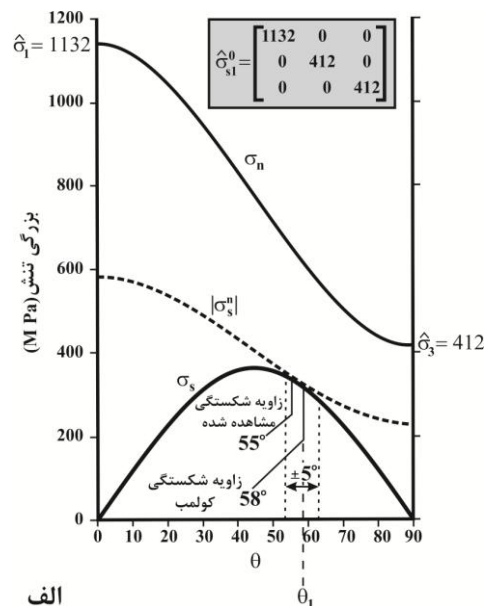


شکل ۵-۷- مقادیر آزمایشگاهی زاویه شکستگی (الف) هیستوگرام زوایای صفحه شکستگی (α_f) تعیین شده بصورت آزمایشگاهی که زاویه بین خط عمود بر سطح شکستگی و بیشترین تنش فشاری ($\hat{\sigma}_1$) است را نشان می‌دهد. دیاگرام شامل داده‌های مربوط به سنگ‌های پلوتونیک، آتشفشانی، رسوبی و دگرگونی پوشش‌دار و بدون پوشش تحت فشار همه جانبه ۰.۵ تا ۵۰۰ مگاپاسکال و دمای ۲۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد و بدون حضور مایع منفذی است. ستون‌های سیاه، داده‌های زاویه ای مربوط به نمونه‌های خشک ماسه سنگ برپا را نشان می‌دهند. (ب) تغییرات زاویه صفحه شکستگی با تغییرات فشار همه جانبه برای نمونه‌های خشک و پوشش‌دار ماسه سنگ برپا (داده‌های سیاه در بخش الف) را نشان می‌دهد.

ارتباطات نشان داده شده در روابط ۷-۹ و ۷-۱۰ نشان می‌دهند که μ , Φ , $|\theta_f|$, α_f خاصیت فیزیکی یکسانی را نشان می‌دهند. شکل ۵-۷ هیستوگرامی از مقادیر تعیین شده بصورت تجربی برای انواعی از سنگها تحت شرایط آزمایشگاهی خیلی متفاوت را نشان می‌دهد. میانگین زوایای صفحه شکستگی‌ها در حدود 29° است که خیلی نزدیک به مقدار تعیین شده ثابت 30° است این داده‌ها بیانگر این هستند که زاویه بین صفحه شکستگی برشی و بزرگ‌ترین تنش اصلی ($\hat{\sigma}_1$) در حدود 30° است. بنابراین زاویه شکستگی (θ_f) بین خط عمود بر صفحه شکستگی برشی و بزرگ‌ترین تنش فشاری ($\hat{\sigma}_1$) در حدود 60° است. پراکندگی زیاد مقادیر α_f در شکل ۵-۷ الف تا حدی ناشی از نوع آزمایشات انجام شده تحت شرایط مختلف تنش، فشار مایع منفذی، فشار همه جانبه و گرما و نوع سنگ است. داده‌های که بوسیله ستون‌های سیاه در هیستوگرام نشان داده شده برای نمونه‌های خشک ماسه سنگ برپا است. در این نمونه‌ها میانگین زاویه صفحه شکستگی 31° است و پراکندگی کاهش یافته است اگر چه زوایا هنوز در محدوده 26° تا 38° قرار دارند. گرما ظاهراً تأثیری بر روی این داده‌ها ندارد و اگر چه همانطور که در شکل ۵-۷ ب نشان داده شده است زاویه صفحه شکستگی با افزایش فشار همه جانبه تمایل به افزایش نشان می‌دهد اما نشان می‌دهند که پوش شکستگی به سمت محور σ_n تقعر می‌یابد و پراکندگی هنوز زیاد است. بنابراین تفاوت‌های تجربی در مقدار میانگین 30° برای α_f زیاد بوده و در طبیعت نیز مورد انتظار می‌باشد.

ممکن است که تشکیل شکستگی برشی در یک زاویه تقریباً $30^\circ \pm$ نسبت به بزرگ‌ترین تنش فشاری ($\hat{\sigma}_1$) نسبت به تشکیل این شکستگی‌ها به موازات صفحات مزدوج بزرگ‌ترین تنش برشی در زاویه $45^\circ \pm$ نسبت به $\hat{\sigma}_1$ عجیب به نظر برسد. زوایای کوچک‌تر حاصل اثر رقابتی تنش نرمال و تنش برشی بر روی جهت گیری شکستگی است. تشکیل شکستگی برشی به وسیله کوچک ترین تنش نرمال و بزرگ‌ترین تنش برشی بر روی صفحه شکستگی صورت می‌گیرد اما بر روی صفحه‌ای که تنش برشی بر روی آن بیشترین مقدار است تنش نرمال کمترین مقدار نیست. بنابراین زاویه شکستگی یک حالت بهینه از اثر تنش نرمال و تنش برشی است.

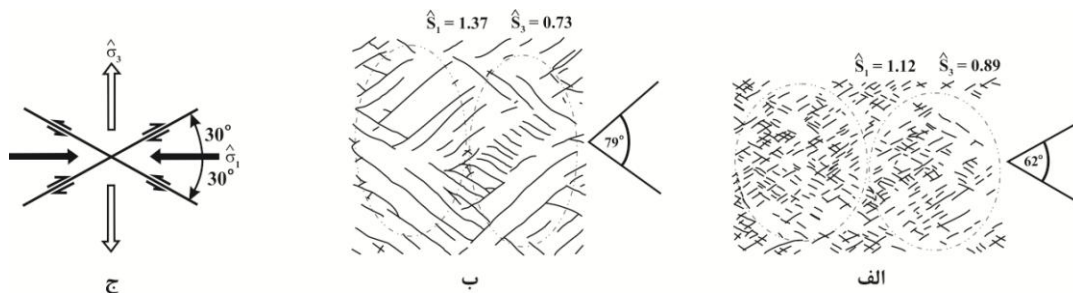
شکل ۶-۷- این ارتباطات را برای یک آزمایش شکستگی بر روی ماسه سنگ برپا نشان می‌دهد. برای این حالت مخصوص از تنش دو منحنی پر رنگ در شکل ۶-۷ الف چگونگی تغییر تنش نرمال (رابطه اول ۶-۴) و تنش برشی (رابطه دوم ۶-۴) با تغییر جهت‌گیری صفحه را نشان می‌دهد. این جهت‌گیری بوسیله زاویه θ_2 یعنی زاویه بین خط عمود بر صفحه با جهت $\hat{\sigma}_1$ تعیین می‌شود (شکل ۶-۷ ب). توجه نمایید که کوچک کردن تنش نرمال و بزرگ کردن تنش برشی بر روی یک صفحه یکسان غیر ممکن است. منحنی تنش برشی بحرانی ($|\sigma_s^*|$) مورد نیاز برای تشکیل شکستگی با هر جهت‌گیری خاص، از معیار شکستگی کولمب (رابطه ۱۱-۷) و استفاده از مقادیر σ_n از روی منحنی شکل ۶-۷ الف بدست آمده است. در این نمودار جایی که تنش برشی ممکن با تنش برش بحرانی مورد نیاز برای تشکیل شکستگی برابر می‌شود منحنی‌های σ_s و $|\sigma_s^*|$ با هم تماس پیدا می‌کنند و نقطه تماس آنها جهت‌گیری صفحه تنش بحرانی که سطح شکستگی را تشکیل خواهد داد مشخص می‌کند. زاویه شکستگی پیش بینی شده در محدوده خطای آزمایشگاهی یعنی جایی که منحنی‌ها به یکدیگر می‌رسند برابر با $\theta_f = 58^\circ$ ($\alpha_f = 32^\circ$) بوده و زاویه مشاهده شده بصورت آزمایشگاهی برابر با $\theta_f = 55^\circ$ ($\alpha_f = 35^\circ$) است با اینحال، این دو منحنی برای زوایای تقریبی $\pm 5^\circ$ در طرفین θ_f ایده‌آل تقریباً بصورت موازی هستند بطوری که کلیه صفحات در محدوده این زوایا خیلی نزدیک به تنش برشی بحرانی هستند. تحت این گونه شرایط، ناهمگنی‌های کوچک در تعیین این که کدام یک از این صفحات در نهایت سطح شکستگی را تشکیل دهند، نقش مهمی بازی می‌کنند. در نتیجه این موضوع برای توجیه پراکندگی داده‌های مشاهده شده استفاده می‌شود (ستون‌های سیاه در شکل ۶-۵ الف).



شکل ۶-۷ الف) مؤلفه‌های تنش سطحی σ_n ، σ_s و تنش برشی بحرانی مورد نیاز σ_s^* در مقابل جهت‌گیری (θ_2) صفحه برای حالت بحرانی خاصی از تنش بر روی ماسه سنگ برپا رسم شده است. همانطور که در نمودار نشان داده شده است زاویه شکستگی زاویه‌ایست که کمیت (σ_s^*) را کوچک می‌کند. (ب) ارتباطات هندسی تنش‌های اصلی، جهت‌گیری شکستگی و مؤلفه‌های تنش بر روی آن را در فضای فیزیکی نشان می‌دهد. متداول‌ترین حالت تنش در محیط‌های طبیعی، تنش سه محوری^۱ است (شکل ۶-۲۴ و ۶-۲۵). به دلیل این که گسل‌ها یک نوع شکستگی برشی هستند معیار شکستگی کولمب باعث می‌شود انتظار داشته باشیم که گسل‌ها به موازات تنش اصلی متوسط و در زاویه $\pm 30^\circ$ نسبت به بزرگ‌ترین تنش فشاری ($\hat{\sigma}_1$) تشکیل شوند. در طبیعت یکی از جهت‌گیری‌های مزدوج تمایل دارند تا بصورت محلی برتری داشته باشند اگر چه هر یک از این دو جهت‌گیری در نواحی بزرگ حضور دارند.

۱-Triaxial Stress

با استفاده از آزمایش مدل‌های مقیاسی در آزمایشگاه الگویی در مورد چگونگی رخداد دگرشکلی‌های طبیعی بدست خواهیم آورد. خواص مکانیکی ماسه خشک و رس مرطوب، مدل‌های مقیاسی مناسب قابل قیاس با ویژگی‌های پوسته را فراهم می‌کند. شکل ۷-۷ آزمایشی را نشان می‌دهد که یک لایه رس به وسیله دگرشکلی لاستیک زیر آن در یک جهت کوتاه شده و در جهت عمود بر آن دچار اتساع شده است. مقدار دگرشکلی بوسیله بیضی‌هایی نشان داده شده است که در ابتدا بصورت دایره بوده‌اند. گسل‌ها ابتدا در جهت‌گیری‌های مزدوج تقریباً 60° نسبت به هم ایجاد می‌شوند (شکل ۷-۷ الف). با اینحال، لغزش بر روی مجموعه‌ای از گسل‌ها باعث انحراف گسل‌های مجموعه دیگر می‌شود و در نتیجه در دگرشکلی آن دخالت می‌کند. بنابراین با ادامه دگرشکلی، حوزه‌ها تمایل به ایجاد گسل دارند که جهت‌گیری آن موازی با جهت‌گیری این مجموعه و یا موازی با جهت‌گیری مجموعه دیگر است (شکل ۷-۷ ب). زاویه بین مجموعه‌های مزدوج گسل‌ها با افزایش دگرشکلی افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل ۷-۷ ج نشان داده شده است شکستگی‌های برشی مزدوج با معیار شکستگی کولمب سازگار هستند.



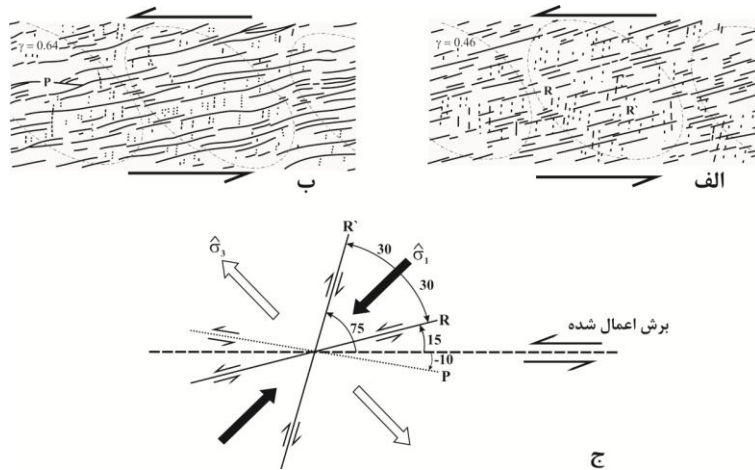
شکل ۷-۷- برش محض در یک بلوک رسی که بصورت آزمایشی بوسیله اتساع لاستیک زیرین دگر شکل شده است. بیضی‌ها، اعوجاج دایره‌های اولیه را ثبت کرده‌اند. (الف) شکستگی‌های برشی در دو جهت‌گیری مزدوج دارای زاویه 60° درجه نسبت به هم تشکیل شده‌اند (ب) حوزه‌ها به وسیله تمرکز گسلها در یک جهت‌گیری تشکیل می‌شوند زاویه بین مجموعه‌های مزدوج گسل افزایش می‌یابد (ج) گسلها با استفاده از معیار شکستگی کولمب تفسیر شده‌اند. اگر لایه رسی در معرض تنش برش موازی با مرزهای آن قرار گیرد. هندسه متفاوتی از گسل‌ها تشکیل خواهد شد. در اینجا باز هم دو مجموعه گسل مزدوج ایجاد می‌شوند که با R و \hat{R} مشخص شده‌اند (شکل ۷-۸ الف). با اینحال هیچ یک از مجموعه‌ها به موازات جهت برش اعمال شده نیستند و به عنوان برش ثانویه^۱ یا برش ریدل^۲ نامیده می‌شوند. برش‌های R بصورت همسو^۳ هستند که نوع برش آنها مشابه با نوع برش اعمال شده است (بصورت چپگرد در شکل ۷-۸ الف). و در زاویه حدود 15° نسبت به جهت برش اعمال شده جهت‌گیری کرده‌اند. برش‌های \hat{R} بصورت آنتی‌تیک هستند که نوع برش آنها معکوس نوع برش اعمال شده است (بصورت راستگرد در شکل ۷-۸ الف) و در زوایای 75° تا 80° نسبت به برش اعمال شده جهت‌گیری کرده‌اند. برش‌های R با افزایش دگرشکلی به سمت زوایای کوچک‌تر می‌چرخند و یک مجموعه دیگر از برش‌های سین‌تیک ثانویه تشکیل می‌شود (با P مشخص شده است) که در زاویه 10° - نسبت به جهت برش اعمال شده جهت‌گیری کرده‌اند (شکل ۷-۸ ب). تنها بعد از این مرحله برش‌ها در جهت موازی با برش اعمال شده تشکیل می‌شوند.

اگر فرض شود که حالت تنش بصورت تنش برش محض است (شکل ۲۴-۶ ج) و صفحه برش اعمال شده بصورت صفحه بزرگ‌ترین تنش برشی است که در زاویه 45° نسبت به $\hat{\sigma}_1$ قرار دارد برش‌های ریدل R و \hat{R} می‌توانند تشکیل شکستگی‌های برشی مزدوج پیش‌بینی شده توسط معیار شکستگی کولمب را توجیه کنند (شکل ۷-۸ ج). با اینحال، شکستگی برشی ثانویه مشخص شده با P بوسیله این تحلیل ساده پیش‌بینی نشده‌اند و احتمال دارد که این شکستگی‌ها حاصل شکستگی برشی کولمب تحت چرخش محلی جهت‌گیری‌های تنش‌های اصلی باشد.

۱-Secondary shear

۲-Riedel shear

۳-Synthetic



شکل ۸-۷- برش ساده چپگرد در بلوک رسی بوسیله تحت برش قرار دادن لایه رسی موجود آمده است. (الف). برش های ریدل مزدوج R و R' در زوایای تقریبی 15° و 75° نسبت به جهت برش اعمال شده تشکیل می‌شوند (ب) برش های R در زاویه تقریباً 10° تا 15° نسبت به برش اعمال شده تشکیل می‌شوند. برش های R و R' با استفاده از معیار شکستگی کولمب توصیف شده‌اند. صفحه برش اعمال شده بصورت صفحه بیشترین تنش برشی بوده و در زاویه 45° نسبت به بزرگ‌ترین تنش فشاری قرار دارد. برش های P و برش هایی که به موازات برش اعمال شده هستند با این تحلیل توجیه نمی‌شوند. بنابراین اگر چه معیار شکستگی کولمب یک تخمین قابل قبول برای داده‌های شکستگی است اما این معیار تنها برای بخش محدودی از دیاگرام مور بکار می‌رود و نمی‌تواند برای توجیه تمامی شکستگی‌های برشی مشاهده شده استفاده شود. با این حال، این معیار برای پیش بینی شکستگی شکنا در شرایط فشاری استفاده می‌شود. تعیین اثر تغییرات انواعی از شرایط فیزیکی بر روی رفتار مکانیکی سنگ و بر روی محدوده‌ای از شرایط که تحت آن معیار گسیختگی می‌تواند بکار برده می‌شود دارای اهمیت زیادی است. در سه بخش بعدی اثرات فشار همه جانبه، فشار مایع منفذی، گرما، انیزوتروپی، تنش اصلی متوسط و ابعاد مجموعه‌های را بررسی می‌نماییم.

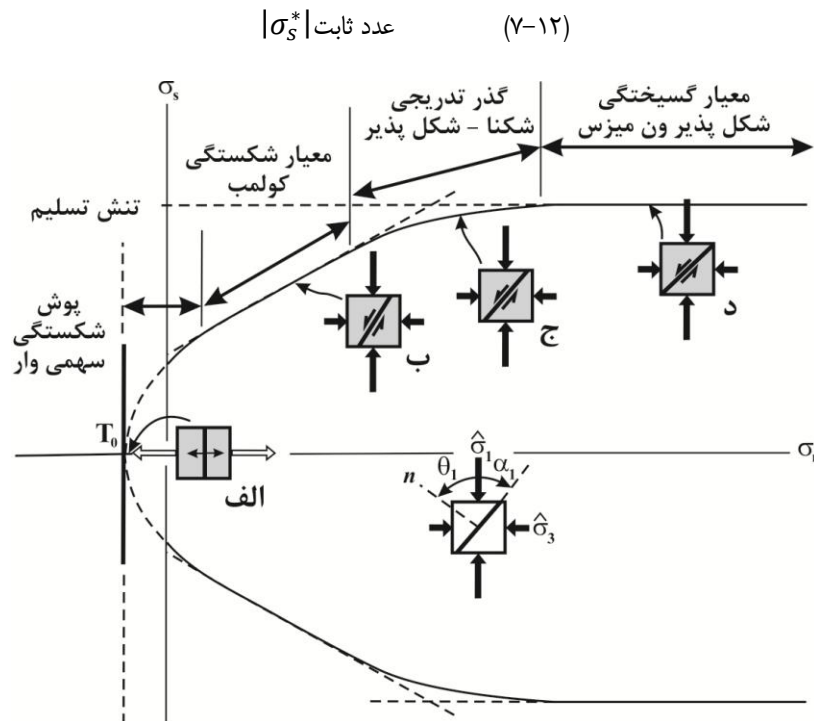
اثر فشار همه جانبه روی شکستگی و لغزش اصطکاکی

فشار همه جانبه و گسیختگی برشی

داده‌های آزمایشگاهی حاکی از آن است که معیار شکستگی کولمب برای بخش کششی دیاگرام مور کاربرد ندارد. در حقیقت داده‌ها نشان می‌دهند که پوش شکستگی بیشتر از آن بصورت خط مستقیم (شکل ۴-۷ ب) باشد باید بصورت یک منحنی سهمی وار در سمت محور تنش نرمال باشد که به معیار شکستگی برشی کولمب در سمت مثبت دیاگرام مور متصل می‌شود (شکل ۹-۷) در این نمودار جایی که پوش گسیختگی محور تنش نرمال را قطع می‌کند دایره مور با پوش شکستگی مماس باشد شکستگی‌های کششی بصورت عمود بر کمترین تنش اصلی تشکیل می‌شود ($2\theta_f = 180^\circ$ ، شکل ۹-۷ الف). با افزایش فشار همه جانبه دایره مور به سمت راست جابجا می‌شود و نقطه تماس آن با پوش شکستگی به سمت مقادیر کمتر $2\theta_f$ می‌رود. تا زمانی که نقطه تماس در محدوده تنش کششی قرار دارد شکستگی‌های دوگانه (هیبرید) تشکیل می‌شوند که ترکیبی از جابجایی کششی و برشی بر روی سطح شکستگی دارند (شکل ۹-۷ ب). فشارهای همه جانبه بالا منجر به تشکیل شکستگی‌های برشی بر اساس معیار شکستگی کولمب می‌شوند ($2\theta_f = 120^\circ$ ، شکل ۹-۷ ج).

داده‌ها نشان می‌دهند که در فشارهای همه جانبه بالاتر پوش شکستگی به سمت محور تنش نرمال تقعر پیدا می‌کند و در نتیجه شیب آن کاهش می‌یابد. در نتیجه آن، $2\theta_f$ کاهش می‌یابد (شکل ۹-۷) و زاویه صفحه شکستگی α_f افزایش می‌یابد (شکل ۵-۷ ب و ۹-۷ و د). این رفتار همراه با گذر از رفتار شکنا به رفتار شکل پذیر است. معیار کولمب در مناطق شکل پذیر کاربرد زیادی ندارد و معیار گسیختگی دیگری بنام

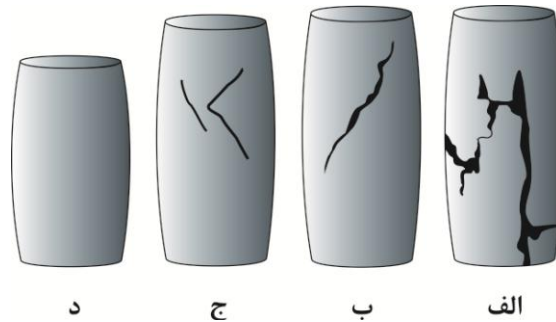
معیار ون میزس^۱ مورد استفاده قرار می‌گیرد. معیار ون میزس بر روی دیاگرام مور شامل یک جفت خط متقارن نسبت به محور تنش نرمال است که دارای تنش برشی ثابتی هستند (شکل ۹-۷). این معیار بیانگر این است که دگرشکلی شکل پذیر در تنش برشی بحرانی آغاز می‌شود که تنش تسلیم^۲ نامیده می‌شود و مستقل از فشار همه جانبه است و این صفحات گسیختگی شکل پذیر، صفحات بیشترین تنش برشی هستند. (شکل ۹-۷ ح، $2\theta_f = \pm 90$) نمایش جبری معیار ون میزس بصورت زیر است.



شکل ۹-۷- نمایش شماتیک پوش گسیختگی سهمی شکل و شکستگی‌های مرتبط با آن. مربع‌های سایه زده جهت‌گیری صفحه گسیختگی در نقاط مختلف پوش گسیختگی را نشان می‌دهند. زوج خط موجود در مربع‌ها که بین آنها سفیداست صفحاتی را نشان می‌دهند که شامل یک مؤلفه شکستگی انبساطی است خطوط پر رنگ صفحات گسیختگی برشی را نشان می‌دهند. (الف) شکستگی بصورت کششی است. (ب) شکستگی بصورت مختلط است که شامل مؤلفه‌های برشی و کششی است. (ج) شکستگی برشی شکنا بر طبق معیار شکستگی کولمب است. (د) شکستگی برشی در گذر شکنا شکل پذیر را نشان می‌دهد و (و) گسیختگی برش شکل پذیر بر طبق معیار ون میزس است.

شکل ۱۰-۷ که نتایج یک سری آزمایش در دمای اتاق بر روی مرمر وومبیان^۳ در استرالیا است گذر از رفتار شکنا به رفتار شکل پذیر اثر افزایش فشار همه جانبه را نشان می‌دهد. در فشار همه جانبه حدود 0.1 MPa (فشار اتمسفر) شکافتگی طولی تشکیل می‌شود (شکل ۱۰-۷ ب)، در 3.5 MPa شکستگی‌های برشی استاندارد تشکیل می‌شوند، در 35 MPa دگر شکلی بصورت گذر تدریجی است و به وسیله شکسته شدن فراگیر تر و تشکیل برش‌های مزدوج دارای زاویه شکستگی بزرگ مشخص می‌شود (شکل ۱۰-۷ ج). در نهایت در فشار همه جانبه برابر با 100 MPa مرمر سیلندری شکل به وسیله دگرشکلی شکل پذیر به حالت خمیره‌ای تبدیل شده است (شکل ۱۰-۷ د). بنابراین همانطور که بصورت شماتیک بر روی دیاگرام مور شکل ۹-۷ نشان داده شده است گسیختگی سنگ‌ها در یک محدوده وسیع از فشار را تنها به وسیله میانگینی از معیار گسیختگی ترکیبی می‌توانیم توجیه نماییم. البته وضعیت در روی زمین پیچیده‌تر از اینهاست زیرا افزایش فشار همراه با افزایش عمق، افزایش دما را نیز به دنبال دارد که باعث کاهش تنش تسلیم برای دگرشکلی شکل پذیر می‌شود.

- ۱- Yield stress
- ۲- Von Misses
- ۳- Wombeyan marble



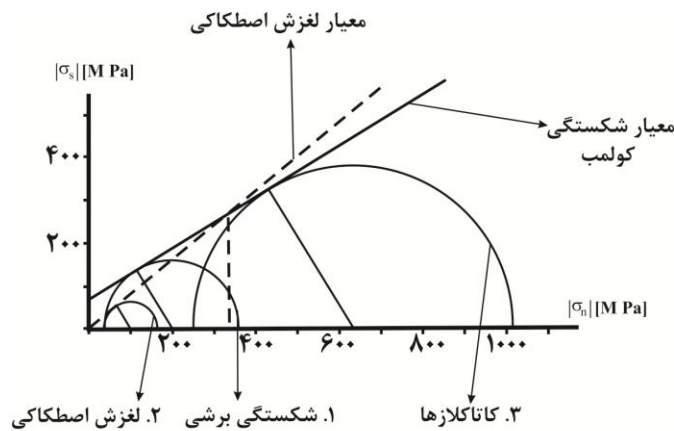
شکل ۷-۱۰- اثر فشار همه جانبه بر روی نوع دگرشکلی سنگ مرمر وومیبیان در دمای اتاق تمام نمونه‌ها در حالت دگرشکلی نشده دارای مقاومت یکسانی هستند(الف)شکافتگی طولی در $P = 0,1MPa$ (ب) شکستگی برشی در $P=3.5MPa$ (ج) گذر رفتار شکنا شکل پذیر در $P=3.5MPa$ (د) جریان شکل پذیر در $P=100MPa$

فشار همه جانبه و لغزش اصطکاکی

بعد از اینکه شکستگی برشی در فشار همه جانبه نسبتاً پایین در سنگ تشکیل شد صفحه شکستگی یک صفحه ضعیف است زیرا سنگ در طول آن هیچ گونه چسبندگی ندارد. دگر شکلی بعدی به وسیله لغزش اصطکاکی بر روی شکستگی رخ می‌دهد، معیار آغاز لغزش اصطکاکی بصورت رابطه‌ای مشابه با معیار شکستگی کولمب (رابطه ۷-۸) است.

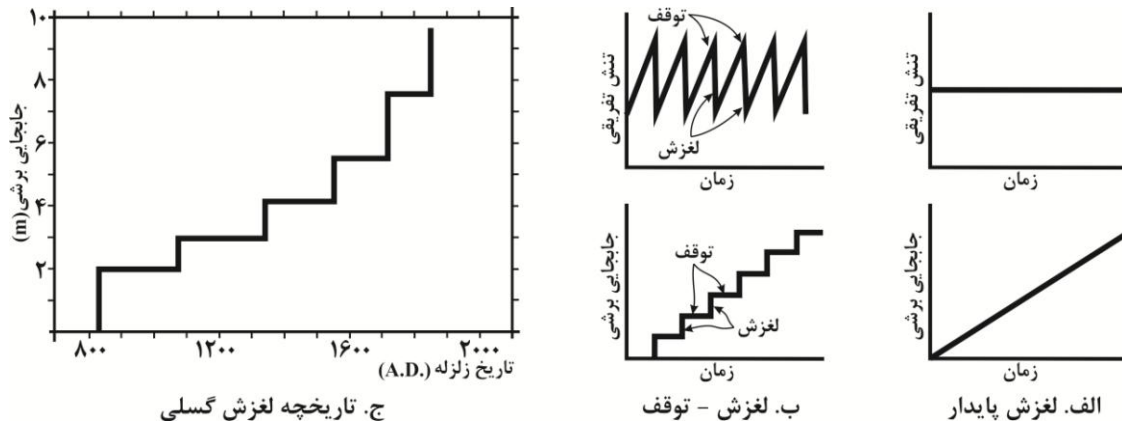
$$|\sigma_S^*| = \bar{\mu} \sigma_n \quad (7-13)$$

در اینجا $|\sigma_S^*|$ بزرگی تنش برشی بحرانی و $\bar{\mu}$ ضریب اصطکاک لغزشی است. ضریب اصطکاک لغزشی معمولاً بزرگ‌تر از ضریب اصطکاک داخلی است ($\bar{\mu} > \mu$) با رابطه ۸-۹ مقایسه نمایید) بطوری که در فشار همه جانبه پایین، تنش تفریقی مورد نیاز برای ایجاد لغزش کمتر از تنش تفریقی مورد نیاز برای ایجاد شکستگی دیگر است. در نتیجه، بلافاصله بعد از ایجاد شکستگی (شکل ۷-۱۱ دایره مور ۱) مقدار تنش تفریقی بر روی شکستگی باید بحدی کاهش پیدا کند که از معیار لغزش اصطکاکی بیشتر نشود (شکل ۷-۱۱ دایره ۲). بنابراین تعجب آور نیست که گسل‌های نزدیک به سطح زمین غالباً ناشی از لغزش گسل‌های قبلی هستند.



شکل ۷-۱۱- نمونه‌ای از معیار کولمب برای شکستگی (خط ممتد) و برای لغزش اصطکاکی (خط چین) بر روی سطح گسل. این داده‌ها متعلق به ماسه سنگ وبر^۱ هستند. دایره ۱، تنش بحرانی برای شکستگی برشی است. دایره ۲، تنش بحرانی برای لغزش اصطکاکی بر روی صفحه شکستگی در فشار همه جانبه ثابت است. دایره ۳، تنش بحرانی برای جریان کاتاکلاستی است که در طی آن تنش تفریقی مورد نیاز برای ایجاد شکستگی کمتر از تنش تفریقی مورد نیاز برای ایجاد لغزش اصطکاکی است.

لغزش اصطکاکی در فشارهای همه جانبه کم به آرامی رخ می‌دهد و حرکت پیوسته آن بعنوان لغزش پایدار^۱ نامیده می‌شود (شکل ۱۲-۷ الف). همانطور که با افزایش فشار همه جانبه، تنش فشاری در عرض سطح لغزش افزایش می‌یابد حرکت به حالت لغزش متناوب^۲ تغییر می‌یابد. (شکل ۱۲-۷ ب) که بوسیله میان دوره‌های توقف بدون لغزش و دوره‌های لغزش دارای لغزش سریع مشخص می‌شود (شکل ۱۲-۷ ب). در مقیاس‌های خیلی بزرگ‌تر از مقایس آزمایشات آزمایشگاهی، پدیده‌ای مشابه با این حالت مسئول ماهیت دوره‌ای زلزله‌ها است همانطور که به وسیله تاریخچه دقیق لغزش گسلی بدست آمده از رسوبات تازه دگر شکل شده در طول گسل سن آندریاس در جنوب کالیفرنیا نشان داده شده است (شکل ۱۲-۷ ج). توقف بخشی از چرخه است که نشان‌دهنده دوره خاموشی بین زلزله‌هاست و لغزش بخشی از چرخه است که زلزله‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲-۷- تغییرات تنش تفریقی و جابجایی برشی با گذشت زمان (الف) برای حالت پایدار لغزش ثابت و (ب) برای لغزش متناوب را نشان می‌دهد (ج) ثبت جابجایی در مقابل زمان برای گسل سن آندریاس در جنوب کالیفرنیا را نشان می‌دهد. همچنان که فشار همه جانبه افزایش می‌یابد معیار لغزش اصطکاکی و معیار شکستگی به هم بر خورد می‌کنند و تنش مورد نیاز برای تشکیل شکستگی جدید کمتر از تنش مورد نیاز برای ایجاد لغزش اصطکاکی می‌شود (شکل ۱۱-۷ دایره مور ۳). بنابراین سنگ‌ها بیشتر از آن که به وسیله لغزش بر روی ترک‌های قبلی دگر شکل شوند بوسیله شکسته شدن شکنا فراگیر دگر شکل می‌شوند. این فرایند کاتاکلاستی یا جریان کاتاکلاستیکی باعث تشکیل کاتاکلاست‌ها می‌شود.

اثر فشار مایع منفذی بر روی شکستگی و لغزش اصطکاکی

حضور مایع منفذی در سنگ باعث می‌شود تا سنگ طوری رفتار کند که انگار مقدار فشار همه جانبه به اندازه فشار مایع منفذی کاهش یافته است. رفتار مکانیکی با استفاده از تنسور تنش مؤثر توصیف می‌شود که مؤلفه‌های آن $(E^\sigma kl)$ از رابطه ۵۹-۶ مشخص می‌شود (شکل ۲۵-۶ ک). هر یک از مؤلفه‌های تنش نرمال مؤثر $(E^\sigma kl)$ که k برابر با L است نسبت به تنش اعمال شده به اندازه فشار مایع منفذی کمتر هستند (شکل ۱۳-۶). اما مؤلفه‌های تنش برشی $(E^\sigma kl)$ که K با L برابر نیست) تغییری ندارند. بنابراین اندازه دایره مور تنش مؤثر مشابه اندازه دایره مور تنش اعمال شده است. اما این دایره در طول محور تنش نرمال به اندازه فشار مایع منفذی به سمت مقادیر کوچک تر تنش‌های فشاری حرکت کرده است (شکل ۱۳-۷). معیار شکستگی برای هر دو حالت بصورت یکسان است اما تنش نرمال بوسیله تنش نرمال مؤثر جایگزین می‌شود لذا رابطه معیار شکستگی بصورت زیر خواهد بود

$$|\sigma_s^*| = c + (E^\sigma n) = c + (\sigma_c - P_f) \quad (14-7)$$

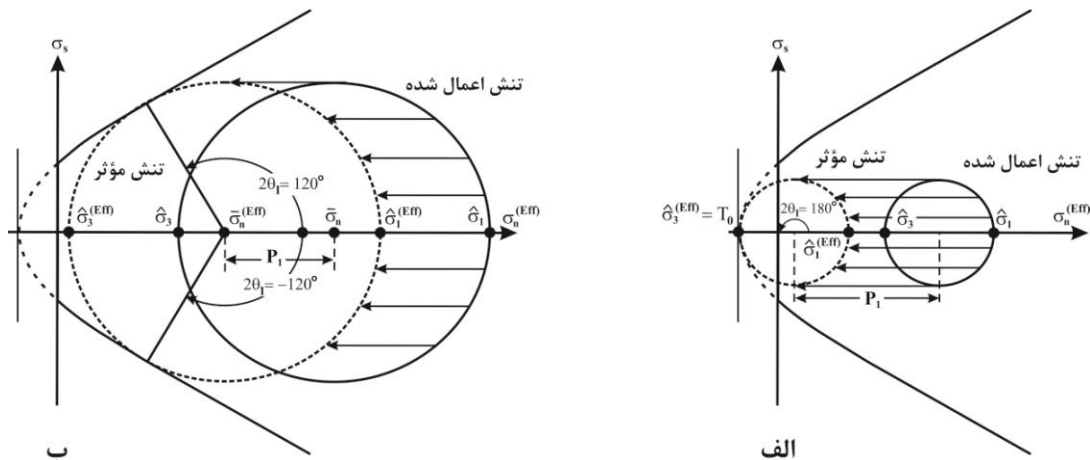
۲-Stable sliding

۳-Stick- slip

در اینجا

$$E^{\sigma}n = \sigma_n - P_f \quad (7-15)$$

اثر جابجایی دایره مور به سمت چپ دیاگرام به این صورت است که در حالت بدون حضور مایع منفذی که تنش بصورت پایدار است با حضور مایع منفذی اگر فشار مایع منفذی بحد کافی بالا رود ممکن است تنش به حالت ناپایدار تبدیل شود. اگر تنش تفریقی (قطر دایره مور) کوچک باشد (همانطور که در زمین معمول است) و اگر فشار مایع منفذی به اندازه مقاومت کششی سنگ گردد و به کوچک ترین تنش اصلی $\hat{\sigma}_3$ برسد (یعنی این که $\hat{\sigma}_3 - P_f = T_0$) حتی با وجود اعمال زیاد، شکستگی انبساطی می‌تواند تشکیل شود (شکل ۷-۱۳ الف). اگر تنش تفریقی نسبتاً بزرگ باشد و فشار مایع منفذی نیز بحد کافی بزرگ گردد شکستگی‌های برشی می‌تواند تشکیل شوند (شکل ۷-۱۳ ب).



شکل ۷-۱۳- دیاگرام مور همراه با تنش نرمال مؤثر، اثر فشار مایع منفذی بر روی پایداری شکستگی سنگ را نشان می‌دهد. (الف) در تنش تفریقی کوچک، افزایش فشار مایع منفذی منجر به تشکیل شکستگی کششی می‌شود (ب) در تنش تفریق بزرگ، افزایش فشار مایع منفذی منجر به تشکیل برشی می‌شود. فشار منفذی دقیقاً اثر مشابهی بر روی لغزش اصطکاکی می‌گذارد. افزایش در فشار مایع منفذی باعث کاهش تنش نرمال بر روی سطح شکستگی می‌شود. بدلیل این که تنش اصطکاکی متناسب با تنش نرمالی است که بر روی سطح لغزش عمل می‌کند، با کاهش آن تنش برشی مورد نیاز برای لغزش کاهش می‌یابد.

بنابراین فشار مایع منفذی به چند دلیل از نظر زمین شناسی دارای اهمیت است اول، تنش تفریقی مورد نیاز برای ایجاد گسیختگی را می‌کاهد و باعث تشکیل شکستگی در اعماق زیاد می‌شود و در حالی که بدون حضور آن سنگ بصورت پایدار می‌ماند و یا بصورت شکل پذیر رفتار می‌کند. دوم، می‌تواند شرایط لغزش اصطکاکی را از حالت لغزش متناوب به لغزش پایدار تغییر دهد. سوم، می‌تواند باعث تغییر دگرشکلی از حالت جریان کاتاکلاستیک به لغزش اصطکاکی شود. فشار بالای مایع منفذی معمولاً فاکتور مهمی در توسعه درزه‌ها و گسل‌های بزرگ مقیاس است.

بدیهی ترین منشاء مایع منفذی، آبی است که در طی رسوب گذاری در داخل رسوبات جمع می‌شود همچنین مایعاتی که در طی دگرگونی بوسیله واکنش آب زدایی از کانی‌ها آزاد می‌شود. اگر سنگی در عمق مشخصی از زمین باشد که کاملاً تا سطح زمین دارای نفوذپذیری است طوری که فضاهای منفذی از سطح زمین تا اعماق آن سنگ به هم متصل هستند فشار مایع نمی‌تواند بیشتر از وزن ستون آبی باشد که از سطح تا آن عمق وجود دارد. فشار لیتوستاتیک حاصل وزن سنگهای فوقانی در هر عمقی مشخص است بنابراین فشار مایع منفذی هیدروستاتیک (P_f) و تنش نرمال لیتوستاتیکی قائم (σ_v) در عمق مشخصی از زمین بصورت زیر است:

$$P_f = \rho_w gh \quad \sigma_v = \rho_r gh \quad (7-16)$$

در این روابط ρ_r, ρ_w بترتیب چگالی آب و چگالی سنگ هستند g شتاب ثقل زمین و h عمق نقطه مورد نظر است. اگر چگالی آب 10^3 kg/m^3 و وزن رسوب آن $2,3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ باشد نسبت λ که نسبت فشار منفذی هیدروستاتیک به فشار لیتواستاتیک است برابر است با :

$$\lambda = \frac{P_f}{\sigma_v} = \frac{\rho_w g h}{\rho_r g h} = 0.4 \quad (7-17)$$

علیرغم حقیقتی که این معادله بیان می‌کند که مقدار λ نمی‌تواند بیشتر از $1/5$ باشد، مقادیر λ نزدیک به 1 درچاه‌های عمیق حفر شده در بسیاری از سکناس‌های رسوبی غیر متداول نیست و حتی در مجموعه‌های تکتونیکی در طول مرزهای صفحه‌ای تحلیل روند نیز دیده می‌شود. بنابراین برای این نواحی از محاسبات λ استفاده نمی‌شود. مایع تنها زمانی تحت فشار قرار می‌گیرد که ارتباط آن با سطح زمین بوسیله سدی قطع شود.

اثر انیزوتروپی، تنش اصلی متوسط، گرما و مقیاس بر روی شکستگی

اثر انیزوتروپی

در مباحثی که تا به حال صورت گرفته است فرض بر این بود که سنگ‌ها در تمامی جهات خواص مکانیکی یکسانی دارند که به آنها ایزوتروپ مکانیکی می‌گویند. معیار شکستگی در اینگونه موارد صرف نظر از جهت‌گیری تنش‌های اصلی یکسان است. با اینحال، بسیاری از سنگ‌ها مقاومت‌های متفاوتی در جهات مختلف دارند و بصورت مکانیکی انیزوتروپ هستند. برای مثال انیزوتروپی مکانیکی ممکن است از آرایش صفحه‌ای ترجیحی کانی‌های صفحه‌ای در سنگ بوجود آید که مشخصه اسلیت‌ها و شیب‌ها است و به آن کلیواژ^۱ می‌گویند. اینگونه سنگ‌ها در طول این صفحات به سادگی شکسته شده یا کلیواژی می‌شوند. مجموعه‌ای از درزه‌های فراگیر در مقیاس وسیع نیز اثر مشابه دارند. این صفحات ضعف مقاومت سنگ و جهت‌گیری شکستگی‌هایی که در محدوده وسیعی از جهت‌گیری‌های تنش‌های اصلی نسبت به انیزوتروپی تشکیل می‌شوند را کنترل می‌کنند.

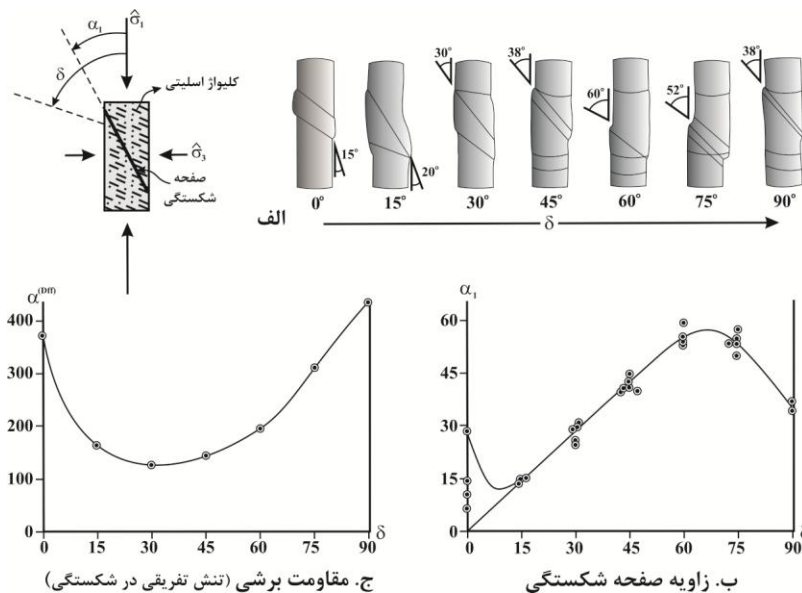
یکسری آزمایشات شکستگی صورت گرفته بر روی اسلیت مارتینزبرگ^۲ این اثرات را نشان می‌دهند. شکل ۱۴-۷ الف، مثال‌هایی از نمونه‌های شکسته شده در پوشش مسی برای جهت‌گیری متفاوت (δ) صفحه کلیواژ اسلیتی نسبت به بزرگ‌ترین تنش فشاری ($\hat{\sigma}_1$) را نشان می‌دهد. شکل ۱۴-۷ ب، ارتباط بین زاویه صفحه شکستگی (α_f) با زاویه (δ) را نشان می‌دهد. اگر صفحه کلیواژ و $\hat{\sigma}_1$ موازی ($\delta = 0^\circ$) یا عمود بر هم ($\delta = 90^\circ$) باشند هیچ‌گونه تنش برشی بر روی صفحه کلیواژ وجود نخواهد داشت زیرا کلیواژ به موازات صفحه اصلی تنش است، در اینگونه موارد، مقاومت شکستی^۳ دارای بیشترین مقدار است (شکل ۱۴-۷ ج) و شکستگی برشی در زاویه متداول 30° تشکیل می‌شود (شکل ۱۴-۷ ب). با اینحال، اگر صفحه کلیواژ و $\hat{\sigma}_1$ موازی باشند ($\delta = 0^\circ$) تمایل به تشکیل شکافتگی فشاری در فشارهای همه‌جانبه پایین وجود دارد در مقادیر 15° تا 60° برای δ ، شکستگی‌های برشی تمایل به تشکیل به موازات صفحه کلیواژ دارند و حتی اگر δ بالای 75° باشد کلیواژ هنوز اثر قابل توجهی بر روی جهت‌گیری شکستگی‌ها دارد. مقاومت برشی در جهت‌گیری‌هایی از صفحه کلیواژ که تشکیل

۱-Cleavage

۲-Martinsburg slate

۳-Fracture strenght

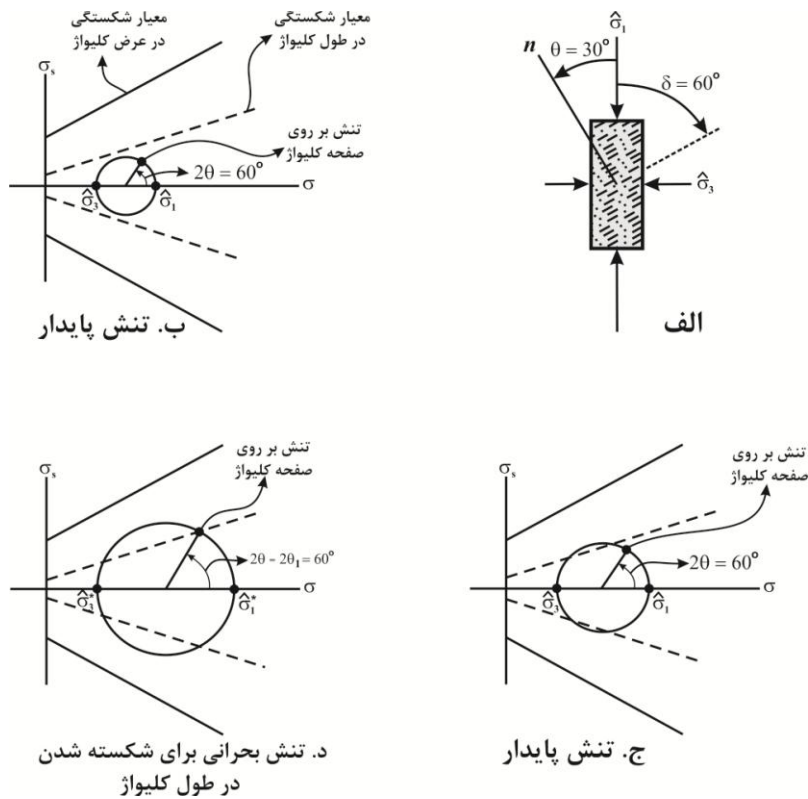
شکستگی‌های برشی را متأثر می‌سازد، کم است (شکل ۱۴-۷ج) و زمانی که کلیواژ به موازات صفحه شکستگی برشی متداول در زاویه تقریباً 30° نسبت به بزرگ‌ترین تنش فشاری ($\hat{\sigma}_1$) قرار دارد مقاومت برشی دارای کمترین مقدار است.



شکل ۱۴-۷- اثر انیزوتروپی بر روی شکستگی اسلیت مارتینزبورگ در فشار همه جانبه ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ مگاپاسکال α_f زاویه صفحه شکستگی و δ زاویه بین کلیواژ و بزرگ‌ترین تنش فشاری است. (الف). نمونه‌های دارای پوش مسی اسلیت مارتینزبورگ، زاویه شکستگی برشی تشکیل شده برای مقادیر مختلف δ را نشان می‌دهند. نمونه‌هایی با $\delta = 75^\circ$ و $\delta = 45^\circ$ در فشار همه جانبه ۱۰۰ مگاپاسکال و نمونه‌های دیگر در فشار همه جانبه ۲۰۰ مگاپاسکال دگر شکل شده اند (ب). تغییرات زاویه صفحه شکستگی با تغییر جهت‌گیری کلیواژ را نشان می‌دهد. (ج) تغییرات مقاومت سنگ اندازه‌گیری شده با استفاده از تنش تفریقی در هنگام شکستگی با تغییر جهت‌گیری کلیواژ نشان می‌دهد.

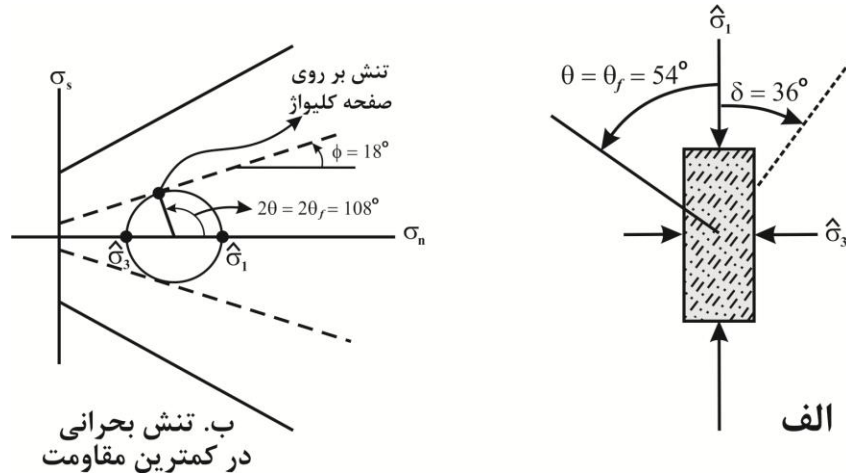
به عبارت ساده برای توجیه رفتار سنگ به دو معیار شکستگی احتیاج هست. معیار اول که بصورت زوج خط ممتد بیرونی در شکل ۱۵-۷ رسم شده است برای شکستگی‌هایی که در عرض صفحه^۱ ضعف تشکیل می‌شوند استفاده می‌شود دایره مور نمی‌تواند این معیار را قطع کند زیرا قبل از آن که مؤلفه‌های تنش سطحی بر روی هر سطحی به مقادیر بحرانی برسند در زاویه برشی متداول شکستگی برشی ایجاد می‌شود. معیار دوم که بصورت زوج خط چین داخلی در شکل ۱۵-۷ است تنها برای مؤلفه‌های تنش سطحی که بر روی صفحه کلیواژ^۲ عمل می‌کنند، استفاده می‌گردد.

۱-across cleavage
۲-along cleavage



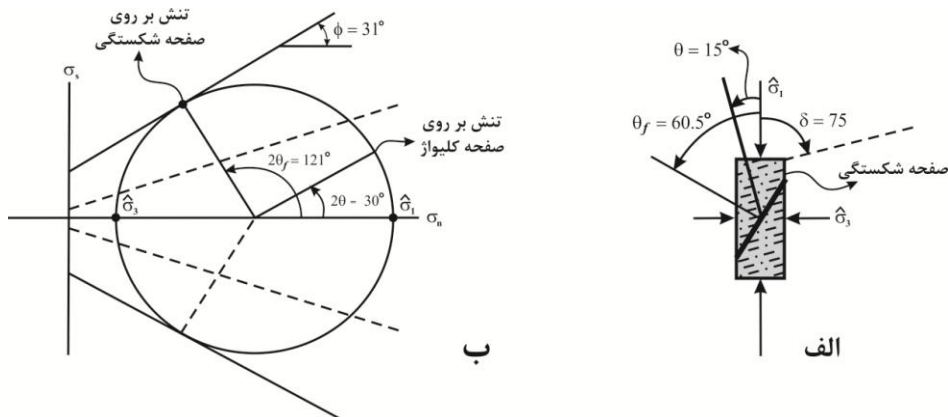
شکل ۱۵-۷- مدل رفتار شکستگی یک ماده انیزوتروپ بر اساس دو پوش شکستگی که یکی از آنها برای شکستگی در عرض صفحه ضعیف است (زوج خط ممتد بیرونی) و دیگری برای شکستگی موازی با صفحه ضعیف است (جفت خط چین داخلی). برای این دیاگرامها، خط عمود بر کلیواژ اسلیتی در $\theta = 30^\circ$ نسبت به بزرگترین تنش فشاری قرار دارد (صفحه کلیواژ در $\delta = 60^\circ$ از بزرگترین تنش فشاری قرار دارد) (الف) دیاگرام فضای فیزیکی جهت‌گیری کلیواژ و تنشهای اصلی نسبت به هم را نشان می‌دهد. (ب) حالت تنش بصورت پایدار است (ج) حالت تنش بصورت پایدار است پوش داخلی تنش‌های بحرانی را فقط برای تنش سطحی روی صفحه کلیواژ مشخص می‌کند که در اینجا در محدوده پایدار قرار دارد. (د) حالت تنش بصورت بحرانی است. تنش سطحی روی صفحه کلیواژ که به شرایط بحرانی رسیده است بوسیله پوش داخلی مشخص می‌شود و شکستگی به موازات سطح کلیواژ رخ می‌دهد.

تا زمانی که دایره مور در داخل پوش شکستگی بیرونی قرار دارد تنش بصورت پایدار است و مؤلفه‌های تنش‌های سطحی بر روی صفحه کلیواژ در درون پوش شکستگی داخلی رسم می‌شوند (شکل ۱۵-۷ ب و شکل ۱۵-۷ ج) توجه نمایید که در شکل ۱۵-۷ ج، دایره مور پایدار می‌تواند پوش شکستگی داخلی را قطع کند تا زمانی که تنش سطحی عمل‌کننده بر روی صفحه کلیواژ عمل در محدوده پایدار باقی بماند. تنش‌های ناپایدار زمانی رخ می‌دهند که تنش سطحی بر روی صفحه کلیواژ به پوش شکستگی داخلی برسد (شکل ۱۵-۷ د و شکل ۱۶-۶ ب) در این گونه موارد شکستگی به موازات صفحه کلیواژ تشکیل می‌شود و یا زمانی رخ می‌دهند که تنش سطحی بر روی کلیواژ پایدار باشند ولی دایره مور پوش شکستگی بیرونی را قطع کند (شکل ۱۷-۷ ب) در این گونه موارد شکستگی در عرض کلیواژ تشکیل می‌شود.



شکل ۱۶-۷- کمترین مقاومت سنگ دارای انیزوتروپی مکانیکی صفحه‌ای، معیار شکستگی مشابه شکل ۹-۱۵ است. (الف) دیاگرام فضای فیزیکی، صفحه ضعف جهت‌گیری کرده به موازات با جهت شکستگی برشی ترجیحی را نشان می‌دهد (ب) در دیاگرام مور، صفحه ضعف طوری جهت‌گیری کرده است که تنش سطحی بر روی آن در نقطه تماس دایره با معیار گسیختگی داخلی رسم شده است.

مقاومت برشی سنگ‌ها برابر با مقدار تنش تفریقی بر روی شکستگی برشی است (در شکل ۱۴-۷ رسم شده است) که قطر دایره مور بحرانی است. مقاومت برشی در جهت کلیواژ دارای کمترین مقدار است و تنش سطحی بر روی صفحه کلیواژ در نقطه تماس بین دایره مور و پوش شکستگی داخلی رسم شده است. (شکل ۱۶-۷ ب). اما زمانی که تنش برشی بر روی صفحه کلیواژ کمترین باشد مقاومت برشی دارای بیشترین مقدار است و سنگ در عرض کلیواژ شکسته می‌شود (شکل ۱۶-۷ ب).



شکل ۱۷-۷- تشکیل شکستگی برشی در عرض صفحه ضعف هنگامی که تنش‌ها بر روی آن سطح در زیر حالت بحرانی باقی می‌ماند. (الف) جلوگیری پایدار کلیواژها نسبت به تنش‌های اصلی را نشان می‌دهد. تنها یکی از صفحات شکستگی مزدوج نشان داده شده است. (ب) دیاگرام مور معیاری مشابه با شکل ۹-۱۶ را نشان می‌دهد. جهت‌گیری انیزوتروپ به گونه‌ای است که تنش سطحی بر روی صفحه ضعف در داخل پوش گسیختگی درونی قرار دارد و در نتیجه بصورت پایدار است زمانی که دایره مور پوش مربوط به عرض انیزوتروپی را قطع کرده است. بنابراین سنگ در عرض انیزوتروپی شکسته می‌شود. شعاع خط چینی، مقدار تنش بر روی صفحه شکستگی مزدوج است.

اثر تنش اصلی متوسط

تا اینجا در بحث‌های صورت گرفته در مورد معیار شکستگی در سنگ‌ها بصورت ایزوتروپ فرض نمودیم که شکستگی برشی به موازات تنش اصلی متوسط $\hat{\sigma}_2$ تشکیل می‌شود. در این جهت، $\hat{\sigma}_2$ دخالتی در مقادیر تنش نرمال یا تنش برشی روی صفحه شکستگی ندارد بطوری که هیچ گونه تأثیری بر روی مقاومت شکستگی ندارد. با اینحال، این فرض بطور تقریبی معتبر است زیرا آزمایشات نشان می‌دهند که $\hat{\sigma}_2$ بر روی مقاومت شکستگی سنگ‌ها تأثیر کوچکی می‌گذارد. زمانی که تنش اصلی متوسط با بزرگ‌ترین تنش فشاری مساوی باشد ($\hat{\sigma}_1 = \hat{\sigma}_2$)

($\hat{\sigma}_2$) مقاومت دارای بالاترین مقدار و زاویه صفحه شکستگی (σ_f) دارای کمترین مقدار است (تنش کششی، شکل ۲۵-۶ را ملاحظه نمایید). بر عکس، اگر تنش اصلی متوسط برابر با کوچک‌ترین تنش اصلی باشد. ($\hat{\sigma}_1 = \hat{\sigma}_3$) مقاومت دارای کمترین مقدار و زاویه صفحه شکستگی دارای بیشترین مقدار خواهد بود (فشار همه جانبه، شکل ۲۵-۶ را ملاحظه نمایید) این ارتباطات بیانگر این هستند که زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) پوش شکستگی در تنش کششی دارای بالاترین مقدار و در فشار همه جانبه دارای کمترین مقدار است.

اثر گرما

تعیین اثر گرما بر روی شکستگی شکنا با استفاده از تحقیقات آزمایشگاهی مشکل است زیرا در محدوده $200 - 500^\circ C$ (وابسته به ترکیب سنگ) مکانیسم دگرشکلی شکل پذیر اهمیت می‌یابد. افزایش گرما باعث کاهش تنش تسلیم و ن میزس برای رفتار شکل پذیر می‌شود (شکل ۷-۹) و در نتیجه، فشار گذر از رفتار شکنا به شکل پذیر را پایین آورده و محدوده رفتار شکنا را کاهش می‌دهد. با اینحال، داده‌های آزمایشگاهی بیانگر این هستند که همچنین با افزایش دما، کاهش کوچکی در مقاومت برشی شکنا رخ می‌دهد.

اثر مقیاس

نمونه‌های سنگی مورد استفاده در آزمایشات آزمایشگاهی معمولاً بصورت همگن و بدون نقص هستند. با اینحال، نقص‌هایی مانند درزه‌ها، گسل‌ها و هتروژنی ترکیبی در طبیعت از ویژگی‌های شاخص مجموعه‌های بزرگ سنگی است. بنابراین باید این انتظار را داشته باشیم که مقاومت تعیین شده از روی نمونه‌های بدون نقص در آزمایشگاه ممکن است نتوانند رفتار مجموعه‌های بزرگ سنگی را توصیف کنند. برای مثال در سنگی که دارای درزه‌های فراگیری است مقاومت ممکن است بیشتر از آنکه بوسیله نمونه‌های درزه‌دار تعیین شود بوسیله مواد فاقد نقص بین درزه‌ها تعیین شده باشد. در حقیقت آزمایشات مشخص کرده‌اند که با افزایش مقیاس نمونه میزان مقاومت اندازه‌گیری شده کاهش می‌یابد. بنابراین باید انتظار داشت که مقاومت شکستگی سنگ‌های پوسته شکنا زمین کمتر از مقادیری باشد که آزمایشات انجام شده بر روی سنگ‌های پوسته‌ای در آزمایشگاه نشان می‌دهند.

تئوری گریفیت برای شکستگی

مباحثی که تا کنون صورت گرفته است درباره معیار شکستگی بوده که آغاز شکستگی را به تنش و سایر شرایط فیزیکی مرتبط می‌سازد. این معیارها در توجیه رفتار شکنا ماکروسکوپی اکثر مواد زمین‌شناختی موفق بوده‌اند اما مشارکت کمی در شناسایی مکانیسم فیزیکی شکستگی در مقیاس میکروسکوپی یا مولکولی دارند.

مقاومت کششی ماده جامد را می‌توان بصورت تئوریک بر اساس مقاومت باندهای اتمی سازنده جامد محاسبه نمود. با اینحال، مقاومت بدست آمده از این روش حدود ۲ برابر بیشتر از مقاومت کششی تعیین شده از آزمایشات مواد است. در کوشش برای توجیه این اختلاف در اوایل قرن بیستم گریفیت^۱ پیشنهاد کرد که تمام جامدات حاوی تعداد بیشماری ترک میکروسکوپی یا ریز میکروسکوپی دارای جهت گیری اتفاقی هستند که به آنها ترک گریفیتی^۲ می‌گویند. (مرحله ۱ در شکل ۲۱-۷ ب را ملاحظه نمایید) که تا حد زیادی مقاومت مواد را کاهش می‌دهند.

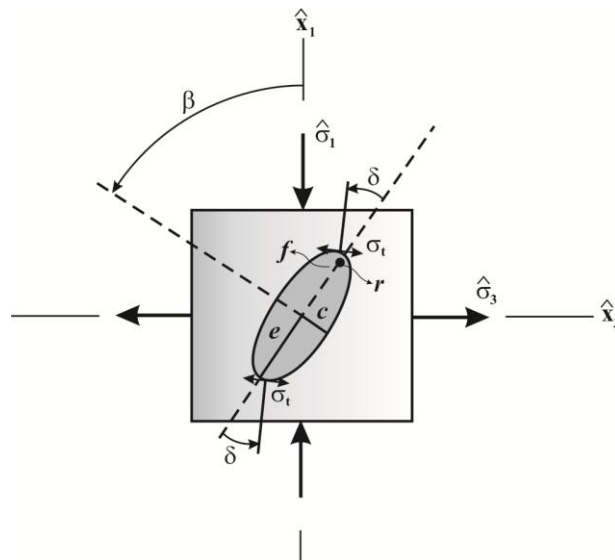
ترک گریفیتی، شکاف کوچکی شبیه به سکه یا درزه است که مقطع طولی آن خیلی بزرگتر از ضخامت آن است و انحناء شعاعی بسیار کوچکی در خط راس دارد ترک‌های گریفیت ممکن است نقص درون شبکه بلوری دانه‌های بلوری سنگ باشند و یا این که ممکن است ترک‌های درون

۱-A.A. Griffith
۲-Griffith Crack

دانه‌ای یا بین مرز دانه‌ای باشند. ترک‌ها معمولاً بصورت بیضوی شدیداً تخت شده هستند بطوری که نیمرخ آنها به شکل یک بیضی است که نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک آن بسیار بزرگ می‌باشد یعنی بیضویت بالایی دارد (دیاگرام ترک‌های گریفیتی در شکل‌های ۱۸-۷ تا ۲۰-۷ محور کوچک $2c$ را نشان می‌دهند که بسیار بزرگ‌تر از اندازه واقعی آن در ترک گریفیتی رسم شده است).

توانایی ترک گریفیتی برای کاستن مقدار زیادی از مقاومت ماده از این حقیقت ناشی می‌شود که تنش اعمال شده معمولاً تمرکز محلی بالایی از تنش‌های کششی در نزدیکی رأس ترک ایجاد می‌کند. بنابراین تنش‌های اعمال شده که بوسیله نیروهای اعمال شده بر واحد سطح صفحه‌ای از مجموعه تعیین می‌شود را از تنش‌های محلی که حالت تنش در مجاورت ترک‌های گریفیتی را توصیف می‌کند، متمایز می‌سازیم. شعاع کوچک‌تر انحنا در رأس ترک گریفیتی و در نتیجه بزرگ‌تر بودن نسبت a/c ترک بیضوی نشان دهنده تمرکز محلی بیشتری از تنش کششی در رأس ترک است.

دو فاکتور برای درک این مکانیسم وجود دارد که باید به آنها توجه نماییم. اولین فاکتور، روش توزیع تنش‌های محلی در اطراف سطح ترک گریفیتی است. بطور کلی تنش کششی محلی در نزدیکی رأس ترک در نقطه‌ای که بوسیله زاویه δ زاویه بین خط عمود بر سطح بیضوی ترک و محور بزرگ ترک مشخص شده است. دارای بیشترین مقدار است (شکل ۱۸-۷) دومین فاکتور، جهت‌گیری ترک (زاویه β) نسبت به تنش‌های اصلی اعمال شده است که بزرگی و موقعیت بزرگ‌ترین تنش محلی را مشخص می‌کنند. جهت‌گیری β^* ترک گریفیتی تحت تنش بحرانی شدید و محل δ^* و جهت‌گیری بزرگ‌ترین تنش کششی محلی بر روی آن سطح ترک و چگونگی ایجاد شکستگی از ترک گریفیتی را حاکمیت می‌کند.

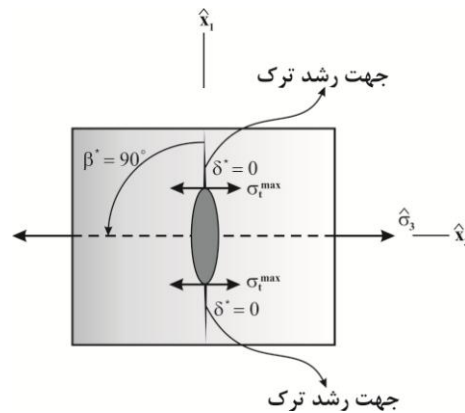


شکل ۱۸-۷- نمایش شماتیک ترک گریفیتی در دو بُعد که در حالت ایده آل بصورت یک بیضی با محور بزرگ a و محور کوچک c و شعاع انحنا r در رأس ترک و کانون f که انحنا به دور آن انجام می‌شود، می‌باشد. $\hat{\sigma}_t$ تنش نرمال کششی محلی است که به موازات سطح بیضی است و بر صفحه عمود بر سطحی عمل می‌کند در نقطه‌ای که بوسیله زاویه δ بین محور بزرگ بیضی و خط عمود بر بیضی مشخص می‌شود. برای وضوح بیشتر محور کوچک بیضی بسیار بزرگتر از اندازه واقعی آن در ترک گریفیتی رسم شده است. β زاویه بین خط عمود بر صفحه ترک و $\hat{\sigma}_1$ است.

تشکیل شکستگی کششی

در مجموعه‌ای که تحت تنش کششی اعمال شده قرار می‌گیرد ترک‌های گریفیتی باز می‌شوند. بنابراین هر سطح ترک بصورت سطح آزاد است که نمی‌تواند تنش برشی را تحمل کند. در نتیجه، سطح ترک باید صفحه اصلی تنش محلی باشد. همچنین سطح آزاد نمی‌تواند تنش نرمال کششی را تحمل کند. بنابراین بزرگ‌ترین تنش کششی محلی σ_T^{max} باید به موازات سطح بیضی شکل باشد.

جهت‌گیری ترک گریفیتی تحت تنش بحرانی شدید بصورت عمود بر بزرگ‌ترین تنش کششی اعمال شده است (شکل ۱۹-۷، $\beta^* = 90^\circ$). موقعیت بزرگ‌ترین تنش تمرکز یافته در این جهت‌گیری دقیقاً در رأس ترک است ($\delta^* = 0$) و جهت‌گیری تنش کششی محلی σ_T^{max} به موازات تنش کششی اعمال شده ($\hat{\sigma}_3$) است. اگر بیضویت اینگونه ترک برای مثال برابر با $\frac{a}{c} \approx 100$ شود که برای ترک گریفیتی قابل قبول است، بزرگی تنش کششی محلی در رأس ترک تقریباً ۲۰۰ برابر بزرگی تنش کششی تک محوری اعمال شده ($\sigma_T^{max} = 200\hat{\sigma}_3$) است. بنابراین تنش در رأس ترک می‌تواند برابر با مقاومت تئوریک مواد باشد در حالی که بزرگی تنش اعمال شده هنوز ۲ مرتبه کوچک‌تر از مقاومت تئوریک است. وقتی مقدار تنش بیشتر از مقاومت صحیح مواد در رأس ترک شود ترک در صفحه عمود بر تنش کششی محلی σ_T^{max} رشد می‌کند که در اینگونه مورد صفحه‌ای که ترک در آن رشد می‌کند به موازات خود صفحه ترک است. چنانچه ترک رشد کند بیضویت ترک نیز افزایش می‌یابد. برای تنش اعمال شده ثابت، رشد ترک در نهایت منجر به تشکیل یک ناپایداری شده و رشد سریع ترک باعث تشکیل شکستگی کششی می‌شود (شکل ۲-۷ الف). رشد ترک زمانی متوقف می‌شود که تنش‌های اعمال شده بحدی کاهش پیدا می‌کنند که تمرکز تنش‌های محلی بحد پایین‌تر از حالت بحرانی می‌رسد.



شکل ۱۹-۷- جهت‌گیری ترک گریفیتی تحت تنش بحرانی شدید در تنش کششی تک محوری ($\beta = 90^\circ$) بیشترین تمرکز تنش کششی محلی در رأس ترک ($\delta^* = 0$) قرار دارد و جهت‌گیری بزرگ‌ترین تنش کششی محلی (σ_T^{max}) به موازات تنش کششی اعمال شده ($\hat{\sigma}_2$) است. ترک در جهت عمود بر σ_T^{max} رشد می‌کند یعنی جهت رشد آن بر $\hat{\sigma}_2$ نیز عمود است.

گسیختگی طولی

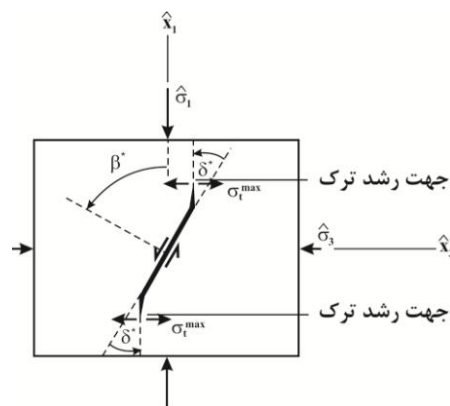
تحت شرایط فشار تک محوری هر ترک گریفیتی که به موازات تنش فشاری نیست بوسیله مؤلفه نرمال تنش در عرض آن ترک بسته می‌شود. با اینحال، ترک‌های موازی با تنش فشاری لزوماً بسته نمی‌شوند و حتی با وجود تنش فشاری اعمال شده، تمرکز محلی تنش در رأس ترک بصورت کششی بوده و عمود بر تنش فشاری اعمال شده جلوگیری کرده‌اند. این وضعیت مشابه وضعیتی است که در شکل ۹-۱۹ نشان داده شده است به استثنای این که تنش اعمال شده بجای این که بصورت تنش کششی موازی با محور \hat{x}_3 باشد بصورت تنش فشاری موازی با محور \hat{x}_1 است (شکل‌های ۲-۷ الف و ۲-۷ ج) را مقایسه نمایید). برای ترک گریفیتی تحت تنش بحرانی شدید در تنش فشاری تک محوری

$\beta^* = 90^\circ$ و $\delta^* = 0$ را بدست می آوریم. (شکل ۱۹-۷). اگر بیضویت ترک برابر با $\frac{a}{c} \approx 100$ باشد بزرگ‌ترین تنش کششی محلی بر روی ترک تقریباً ۲۵ برابر بزرگی تنش فشاری اعمال شده است ($\sigma_T^{max} = 25\hat{\sigma}_1$) هنگامی که این گونه ترک‌ها رشد می‌کنند رشد تقریباً موازی با تنش فشاری اعمال شده باعث تشکیل شکافیتیگی طولی می‌شوند (شکل ۲-۷). این مکانیسم دلیل موجهی برای تشکیل شکستگی‌های انبساطی تحت فشارش با فشار همه جانبه کم یا صفر است. افزایش فشار همه جانبه تمایل به بستن ترک‌های این جهت‌گیری و کاهش تمرکز تنش محلی بوجودآورنده این نوع شکستگی دارد.

تشکیل شکستگی برشی

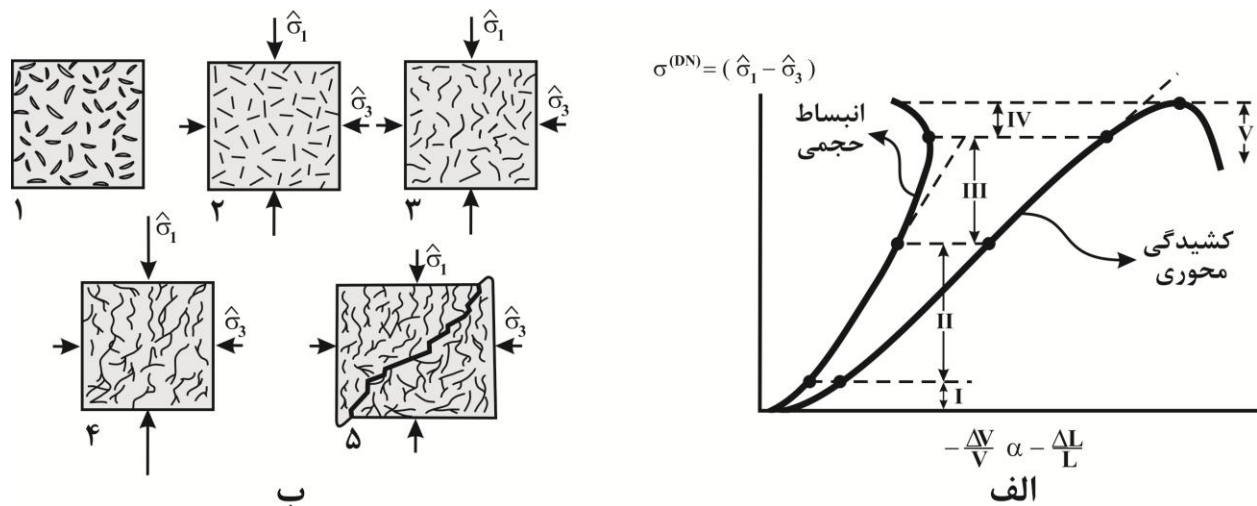
رفتار ترک‌های گرفتیت در فشار همه جانبه پیچیده‌تر می‌شود. در فشار همه جانبه بطور کلی ترک‌ها بسته می‌شوند زیرا تنش‌های اعمال شده باعث ایجاد تنش نرمال فشاری در عرض سطوح ترک‌ها می‌شود. اصطحاکاک بر روی سطح ترک‌های بسته شده و تنش فشاری اعمال شده باعث توزیع تنش محلی در اطراف ترک می‌شوند که متفاوت از تنش محلی اطراف ترک‌های گرفتیتی تحت تنش‌های کششی اعمال شده است. برش در طول ترک‌های بسته شده منجر به ایجاد تنش کششی در نزدیکی رأس ترک می‌شود که بیشترین مقدار آن معمولاً بطور دقیق در رأس ترک نیست. ترک‌ها به وسیله باز شدن ترک‌های کششی که برش خوردگی بر روی سطح ترک را به انجام می‌رسانند، رشد می‌کنند (شکل ۲۰-۷). جهت‌گیری ترک گرفتیتی تحت تنش بحرانی شدید در فشارش، وابسته به مقادیر نسبی $\hat{\sigma}_3, \hat{\sigma}_1$ در زاویه β^* بین 45° تا 90° قرار دارد. بنابراین صفحه ترک تحت تنش بحرانی شدید بین صفر تا 45° نسبت به بزرگ‌ترین تنش فشاری قرار دارد که محدوده‌ای از جهت‌گیری‌ها است که شکستگی‌های برشی معمولاً در آن تشکیل می‌شوند.

موقعیت نقطه تمرکز بزرگ‌ترین تنش کششی در نقطه‌ای است که سطح ترک خیلی نزدیک به حالت عمود بر بزرگ‌ترین تنش فشاری است (δ^* در شکل ۲۰-۷) بنابراین هنگامی که ترک رشد میکند یک ناپایداری ایجاد نمی‌شود زیرا بخش جدید ترک به سمت موازی شدن با بزرگ‌ترین تنش فشاری که جهت‌گیری پایدارتری است، رشد می‌کند (شکل ۲۰-۷ و مرحله ۳ از شکل ۲۱-۷) در نتیجه، آغاز رشد ترک گرفتیتی در فشارش بلافاصله منجر به گسیختگی برشی نمی‌شود. تنش تفریقی باید بطور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از مقدار مورد نیاز برای آغاز رشد ترک گردد.



شکل ۲۰-۷- جهت‌گیری ترک گرفتیتی تحت تنش بحرانی شدید در فشار همه جانبه اعمال شده، ترک بسته می‌شود و جهت‌گیری ترک تحت تنش بحرانی شدید در محدوده $90^\circ > \beta^* > 45^\circ$ قرار می‌گیرد. تمرکز تنش کششی محلی در نزدیکی رأس ترک ایجاد می‌شود در زاویه $\delta^* > 0$ دارای بیشترین مقدار است. بزرگ‌ترین تنش کششی محلی به گونه‌ای جهت‌گیری کرده است که رشد ترک بصورت پیشرونده به سمت موازی شدن با $\hat{\sigma}_1$ می‌شود. رشد ترک باید بوسیله لغزش اصطحاکاک بر روی بخش بسته شده سطح ترک به انجام برسد.

مکانیسم تشکیل شکستگی برشی در شکل ۲۱۹-۷ نشان داده شده است. داده‌های آزمایش شکستگی شاخص بصورت دیاگرامی در شکل ۲۱-۷ الف نشان داده شده است که کشیدگی محوری (رابطه ۱-۷) و انبساط حجمی (رابطه ۶-۷) در مقابل تنش تفریقی رسم شده‌اند. حالت فیزیکی ماده برای پنج مرحله مختلف منحنی‌های تنش - کرنش (که از ۱ تا ۵ مشخص شده است) بصورت شماتیکی در شکل ۲۱-۷ ب نشان داده شده است. در مرحله ۱، ماده دگر شکل نشده ابتدایی دارای تعداد زیادی ترک گریفتی باز است و شیب کم منحنی‌های تنش - کرنش حاصل دگرشکلی نسبتاً بزرگ مطابق با بسته شدن ترک‌ها می‌باشد. در مرحله ۲، ترک‌ها بسته شده و بصورت پایدار هستند و با افزایش تنش هیچ گونه رشدی در ترک رخ نمی‌دهد. رشد ترک در مرحله ۳ آغاز می‌شود جایی که حجم باز شدگی ترک‌ها، کاهش حجم عادی ناشی از افزایش تنش را خنثی می‌سازد. همانطور که تنش اعمال شده افزایش می‌یابد ترک‌های جهت یافته دارای حالت بحرانی کم شروع به رشد می‌کنند. سرانجام در مرحله ۴، کاهش حجم ناشی از فشارش کاملاً بوسیله افزایش حجم خنثی می‌شود و در حقیقت حجم مواد شروع به افزایش می‌کند (پدیده‌ای که اتساع یا حجیم شدن نامیده می‌شود) در این مرحله، میدان‌های تنش محلی حول ترک‌ها شروع به فعل و انفعال می‌کنند و ترک‌ها شروع به پیوستن به یکدیگر می‌کنند و در نهایت در مرحله ۵، یک شکستگی برشی سراسری تشکیل می‌شود، بنابراین شکسته شدن برشی تحت تنش‌های فشاری در حقیقت وابسته به رشد ترک‌های کششی در ماده است.



شکل ۲۱-۷- فرایند شکسته شدن برشی تحت فشارش. (الف) رسم شماتیک تنش تفریقی در مقابل کشیدگی محوری و انبساط حجمی برای یک آزمایش شکستگی برشی شاخص در فشار تک محوری را نشان می‌دهد. مراحل ۱ تا ۵ تغییرات فرایندهای فیزیکی درون سنگ را نشان می‌دهند. (ب) مراحل نشان داده شده نمودار (الف). برای تشکیل شکستگی برشی شکنا را بصورت دیاگرام نشان می‌دهد. مرحله ۱- ماده دارای تعداد زیادی ترک گریفتی باز است. چنانچه تنش افزایش یابد، ترک‌ها به تدریج بسته می‌شوند. مرحله ۲- تمامی ترک‌ها بسته شده و بصورت پایدار هستند و افزایش تنش باعث رشد ترک نمی‌شود. مرحله ۳- با افزایش مقدار بارگذاری ترک‌های طولی‌تر و ترک‌هایی که تنش بر روی آنها بصورت بحرانی درآمده است به سمت جهت بزرگ‌ترین تنش فشاری شروع به رشد می‌کنند. با ادامه افزایش بارگذاری ترک‌های کوتاه‌تر و دارای جهت‌گیری مناسب‌تر نیز شروع به رشد می‌کنند. مرحله ۴- نمونه در این مرحله تقریباً بصورت جامد دانه‌ای است. میدان‌های تنش محلی در اطراف ترک شروع به فعل و انفعال می‌کند. مرحله ۵- با پیوستن تعداد زیادی از شکستگی‌های کوچک به یکدیگر یک شکستگی برشی سراسری تشکیل می‌شود.

معیار شکستگی گریفتی

مدل ترک گریفتی می‌تواند برای بدست آوردن معیار تئوریک گسیختگی برای شرایط تنش کششی و فشاری مورد استفاده قرار گیرد. در رژیم تنش کششی، معیار شکستگی پیش‌بینی شده بصورت پوش سهمی وار می‌باشد. که بطور قابل قبولی مشابه با داده‌های آزمایشگاهی است. شکل معیار شکستگی برای تنش‌های فشاری مشابه با معیار شکستگی کولمب است اما ثابت‌های پیش‌بینی شده متفاوت از ثابت‌هایی است که بصورت آزمایشگاهی تعیین شده‌اند. وجود اختلاف به این دلیل است که تئوری گریفت برای اولین آغاز رشد ترک گریفتی یک معیار ارائه

می‌دهد. (شکل ۲۱-۷ آغاز مرحله ۳) درحالی که تشکیل شکستگی برشی در تنش‌های تفریقی بسیار بزرگ‌تری رخ می‌دهد (در آغاز مرحله ۵ شکل ۲۱-۷) فرایند واقعی تشکیل شکستگی برشی خیلی پیچیده است و جزئیات مکانیسم آن خیلی کم شناسایی شده است.

تئوری گریفیت و اثر فشار همه جانبه، فشار مایع منفذی و تنش اصلی متوسط

رشد ترک‌های کششی از ترک‌های گریفیتی در رژیم تنش فشاری بوسیله لغزش اصطکاکی بر روی سطح ترک گریفیتی همراهی می‌شود (شکل ۲۰-۷). هنگامی که فشار همه جانبه افزایش می‌یابد تنش نرمال درعرض ترک گریفیتی افزایش می‌یابد و مقاومت اصطکاکی در برابر لغزش نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه، برای آغاز رشد ترک باید مقدار تنش برشی بر روی ترک افزایش یابد و این افزایش نیازمند افزایش تنش تفریقی اعمال شده است. در نتیجه، همانطور که به وسیله معیار شکستگی کولمب تعیین شده است در فشار همه جانبه بالاتر تنش‌های تفریقی بزرگ‌تری برای شکسته شدن برشی لازم است. بنابراین زاویه اصطکاک داخلی (Φ) که شیب پوش شکستگی کولمب را تعیین می‌کند به اصطکاک روی سطوح ترک‌های گریفیتی مرتبط است.

فشار همه جانبه اعمال شده به سنگ در تمامی جهت گیری‌ها تنش نرمال یکسانی درعرض ترک‌های گریفیتی ایجاد می‌کند. حضور مایع منفذی تحت فشار در ترک‌ها بطور مستقیم باعث کاهش تنش نرمال اعمال شده می‌شود. بطوری که تنش نرمال درعرض ترک گریفیتی دقیقاً برابر با تنش نرمال مؤثر تعیین شده در بخش ۸-۶ و بررسی شده در بخش ۹-۵ است. تئوری ترک‌های گریفیتی به همین صورت برای توجیه اثرات مشاهده شده فشار مایع منفذی بر روی شکستگی شکنا استفاده می‌شود.

چنانچه مقدار تنش اصلی متوسط ($\hat{\sigma}_2$) از $\hat{\sigma}_1$ تا $\hat{\sigma}_2$ تغییر کند مقاومت شکستگی سنگ به آرامی کاهش می‌یابد. تئوری گریفیت مدلی برای توجیه این رفتار ارائه می‌دهد. در مواد سه بُعدی، ترک‌های گریفیتی در تمامی جهات پراکنده شده‌اند و آنهایی که سرانجام یک شکستگی برشی را ایجاد می‌کنند ضرورتاً بطور دقیقی به موازات $\hat{\sigma}_2$ نیستند. $\hat{\sigma}_2$ در این ترک‌ها مشارکت کمی در ایجاد تنش فشاری دارد. بنابراین مقاومت اصطکاکی در برابر لغزش بر روی سطح ترک گریفیتی وابستگی کمی به $\hat{\sigma}_2$ دارد و مقدار آن با افزایش $\hat{\sigma}_2$ بیشتر خواهد شد. افزایش مقاومت اصطکاکی به این معنی است که تنش تفریقی بزرگ‌تری برای شکسته شدن برشی لازم است.