چقرمگی شکست موادسنگی وسرامیکی تحت بارگذاری مرکب - بررسی نمونه های آزمایشی

مجید رضا آیت اللهی[۱] ، سارا باقری فرد[۲]

۱ -دانشیار،دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲-دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

Email: m.ayat@iust.ac.ir

چکیده :

کاربرد مکانیک شکست در تحلیل استحکام مواد و قطعات سنگی و سرامیکی طی سالهای اخیر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است . به منظور ارزیابی استحکام قطعات ترک دار سنگی تحت بارگذاری مرکب ، نمونه های آزمایشگاهی مختلف پیشنهاد شده اند . در این مقاله ابتدا مروری روی چهار نمونه متداول تر آزمایشگاهی صورت گرفته و نشان داده می شود که نمونه SENB تحت بار چهارنقطه ای نامتقارن نمونه بسیار مناسبی برای آزمایشات شکست مرکب در این مواد می باشد .

سپس این قطعه به کمک نرم افزار اجزا محدود مدلسازی شده ، ضرایب شدت تنش آن برای حالت های مختلف بارگذاری و طول ترک های متعدد استخراج می شود . ضرایب فوق به منظور تعیین چقرمگی شکست مرکب در مواد سرامیکی آزمایش شده به کمک قطعه SENB مورد نیاز می باشند .

واژه های کلیدی : چقرمگی شکست، بارگذاری مرکب، نمونه های آزمایشگاهی،مواد سنگی

۱- مقدمه

مواد سنگی و سرامیکی غالبا در مقایسه با فلزات رفتاری به مراتب ترد تر دارند . این مواد تحت بارهای کششی از تحمل پایینی برخوردار بوده و معمولا دچار شکست ترد می شوند .

وجود ترکهای ذاتی در بسیاری از توده های سنگی ، واماندگی و شکست مکانیکی در آنها را به طور قابل ملاحظه ای تسریع می نماید. از آنجا که تمرکز تنش در اطراف ترک های فوق الذکر عامل تعیین کننده ای در مقاومت توده های سنگی ترک دار محسوب می شود ، لازم است عوامل ایجاد کننده این تمرکز تنش ها و ویژگیهای آنها مورد بررسی قرار گیرند . تحقیقات متعددی در این زمینه انجام گرفته و نتایج به دست آمده در راستای بهبود ارزیابی رفتار مکانیکی سنگ ها به کار گرفته شده است . چنانچه قطعه ای دارای ترک اولیه باشد ، معیارهای استحکام و شکست آن تحت بارگذاریهای مختلف ، توسط مباحث مکانیک شکست تعیین می شود . مکانیک شکست از جمله مباحث مهم در علوم مهندسی میباشد که به بررسی شرایط لازم برای استحکام قطعات ترکدار می پردازد . طی دهه اخیر کاربردهای مکانیک شکست در مواد سنگی مورد توجه بسیار قرار گرفته ، در حال حاضر نیز تحقیقات زیادی در این زمینه در حال انجام می باشد [۱]. به منظور ارزیابی استحکام توده های سنگی، ابتدا لازم است که توزیع تنش داخل این قطعات به ویژه در ناحیه اطراف نوک ترک مورد بررسی قرار گیرد . سپس به منظورتعیین شرایط بحرانی مربوط به رشد ترک ، معیارهای موجود در مکانیک شکست مورد استفاده قرار گیرند . با این وجود برای تعیین برخی از خواص مادی مورد نیاز مانند چقرمگی شکست (Fracture toughness) در مواد سنگی استفاده از آزمایشهای استاندارد اجتناب ناپذیر می باشد . تا کنون نمونه های آزمایشی متعددی برای انجام تست چقرمگی شکست مواد سنگی پیشنهاد شده اند . با توجه به وجوه تشابه موجود در رفتارقطعات ترکدار سنگی و سرامیکی ، نمونه های آزمایشی مورد استفاده جهت تعیین چقرمگی شکست این دو دسته مواد معمولا مشترک می باشند.

در این مقاله ابتدا مروری روی چند نمونه آزمایشی متداول ترصورت گرفته ، نقاط ضعف و قوت آنها برشمرده می شود . سپس یکی ازاین نمونه ها که از مزایای متعددی برخوردار است ، با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود مدل سازی شده ، ضرایب شدت تنش(Stress intensity factors) در آن برای طول ترکهای مختلف تعیین می گردد . این ضرایب برای ایجاد ارتباط بین بار بحرانی شکست قطعه و چقرمگی شکست ماده سنگی یا سرامیکی در بارگذاری کششی و برشی مورد نیاز می باشند .

۲- تنش های الاستیک اطراف ترک

مکانیزم رشد ترک درسنگ ها و سرامیک ها، اغلب از نوع شکست ترد می باشد . شکست ترد، که به رشد ناپایدار و سریع ترک اطلاق می شود ، معمولا در موادی اتفاق می افتد که دارای میزان نرمی پایینی هستند و تغییر شکل پلاستیک ناچیزی در اطراف ترک دارند. بنابراین مفاهیم مکانیک شکست الاستیک خطی (Linear elastic fracture mechanics) برای آنها قابل استفاده خواهد بود . در این بخش به بررسی انواع بارگذاری قطعات ترکدار ، نحوه توزیع تنش در ناحیه اطراف نوک ترک و معرفی پارامترهای مطرح در

مکانیک شکست می پردازیم .در مباحث مکانیک شکست ، به منظور بررسی شرایط مختلف بارگذاری قطعات ترکدار، میدان تنش و جابجایی در نوک ترکها به حالت های زیر تقسیم می شوند[۲]:

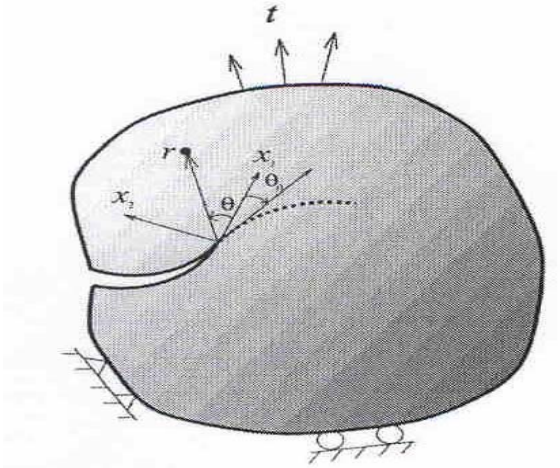
- مود I (حالت باز شوندگی) : در این حالت سطوح ترک فقط نسبت به هم باز شده ، بار اعمالی و جابجایی بر سطح ترک عمود می باشند .
- مود II (حالت برشی) : در این حالت سطوح ترک بدون هیچ باز شدگی ، در داخل صفحه قطعه نسبت به هم لغزیده ، بار اعما لی و جابجایی عمود بر جبهه ترک می باشند .
- مود III (حالت پارگی) : در این حالت نیز سطوح ترک بدون هیچ باز شدگی ، نسبت به هم در خارج از صفحه قطعه لغزیده ، جابجایی به موازات جبهه ترک می باشد.
- مود مرکب : شرایط بارگذاری مرکب هنگامی ایجاد می شود که بارگذاری به صورت ترکیبی از دو یا سه حالت از بارگذاریهای فوق باشد .

رایج ترین حالت بارگذاری که در اغلب طراحیها برای مقابله با آن تدابیر و روشهای ویژه اتخاذ می گردد ، حالت بارگذاری مود I می باشد . اما در مواد سنگی به دلیل آرایش اتفاقی ترک ها ، ترک معمولا تحت تاثیر بارهای توام کششی و برشی قرار می گیرد ، بنابراین معیارهای مربوط به بارگذاریهای مرکب برای تعیین استحکام شکست آنها به کار برده می شود .

تنش های الاستیک در یک قطعه ترک دارتحت بارگذاری مرکب به صورت یک بسط سری نوشته می شود [۳] . در نزدیکی نوک ترک ترمهای اولیه غالب بوده به فرم عمومی زیر نوشته می شود:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{\mathrm{I}}(\theta) + \frac{K_{\mathrm{II}}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{\mathrm{II}}(\theta) + T \qquad ۱$$

که در آن σ_{ij} ، نشان دهنده تانسور تنش ، K_{II} و K_{I} به ترتیب ضرایب شدت تنش مود II و I ، $f_{ij}(\theta)$ توابعی بر حسب θ بوده و r و θ نیز مولفه های مختصات قطبی با مبدا واقع در نوک ترک می باشند (شکل ۱).



شکل۱.مولفه های مختصات کارتزین وقطبی با مبدا واقع درنوک ترک [۳]

K_I و K_{II} از جمله پارامترهای اصلی در مکانیک شکست بوده ، به کمک آنها می توان شرایط بحرانی مربوط به شکست قطعه را تخمین زد . لذا تعیین آنها برای قطعات ترک دار از اهمیت بالایی برخوردار است . تعیین ضرایب K_I و K_{II} برای قطعات بسیار ساده از روش های تحلیلی میسر می باشد ولی برای قطعات ترکدار پیچیده ، استفاده از روش های عددی مانند روش اجزاء محدود برای تعیین K_I و K_{II} اجتناب ناپذیر است . ترم T ترمی ثابت و مستقل از فاصله نسبت به نوک ترک می باشد . این ترم نیز می تواند روی رشد ترک تاثیر قابل ملاحظه ای داشته باشد .

۳-استحکام شکست توده های سنگی ترک دارتحت بارگذاری مرکب

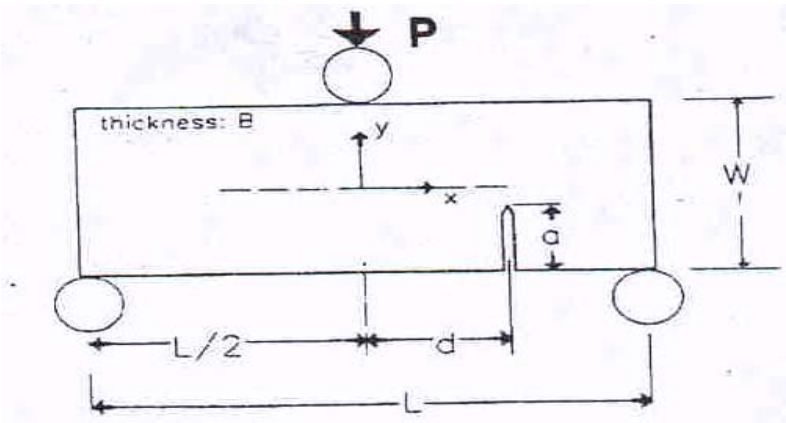
اگرچه اولین تحقیقات انجام شده بر روی مقاومت سنگ های ترک دار در برابر شکست و واماندگی، بر پایه تعیین چقرمگی شکست تحت بارگذاری مود I انجام گرفت ، ترکهای موجود در توده های سنگی به ندرت تحت بارگذاری مود I خالص قرار می گیرند . به عنوان مثال تجربیات عملی نشان می دهد که در مواد سنگی ، به دلیل آرایش اتفاقی ترک ها معمولا بارهای توام کششی و برشی به ترک وارد می شود . بنابراین تحلیل و ارزیابی قابل قبولی از رفتار مواد سنگی ترکدار مستلزم انجام بررسی ها و تحقیقات تحلیلی وآزمایشگاهی بر روی معیارهای شکست مود ترکیبی خواهد بود .

در تحقیقاتی که بر روی شکست سنگها انجام گرفته ، سعی شده روشهایی برای تعیین میزان چقرمگی شکست در مود ترکیبی ارائه شود که تا حد امکان عوامل ایجاد خطا و عدم دقت در این تست ها را کاهش دهند . یکی از نمونه های کاربردی در این زمینه ، نمونهSENB (Single edge notched bend specimen) (ترک لبه ای ، تحت بار خمشی) می باشد . این نمونه شامل قطعه ای مکعب مستطیل شکل است که طول آن ، نسبت به عرض و ضخامت آن بسیار بزرگتر است . یک ترک لبه ای در طول قطعه ایجاد شده که

موقعیت و راستای آن ، بسته به نوع کاربرد نمونه ، تغییر می کند . در ادامه این بخش، چهار نمونه متداول برای آزمایش استحکام مواد سرامیکی تحت بارگذاری مرکب به اختصار شرح داده شده ، با هم مقایسه می شوند . سه مورد از این نمونه ها حالت های خاصی از قطعه SENB می باشند .

۳-۱- نمونه SENB با ترک نامتقارن تحت بار خمشی سه نقطه ای

موقعیت ترک در این نمونه ، همانطور که در شکل ۲ مشاهده میشود، نسبت به نقاط اعمال بار از عدم تقارن برخوردار میباشد. به همین دلیل در هنگام اعمال بارهای سه نقطه ای ، شرایط بارگذاری ترکیبی به وجود می آید . لذا با تغییر موقعیت ترک ، می توان نسبت مود های I و II ایجاد شده را کنترل نمود.



شکل۲. نمونه با ترک لبه ای نامتقارن تحت بار سه نقطه ای[۴]

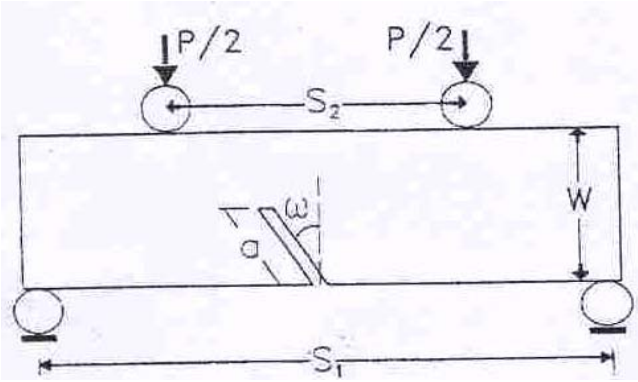
[

این گونه نمونه های نامتقارن در آزمایشات متعددی روی مواد سنگی برای بررسی ضرایب شدت تنش مود ترکیبی به کار برده شده اند . به عنوان مثال تحقیقات گسترده ای در مرجع [۴] بر روی عملکرد نمونه های ساخته شده از سنگ مرمرانجام گرفته است .

تحلیل تنش این نمونه توسط Filon [۵] مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده ازاطلاعات موجود در جداول ، امکان دستیابی به مقادیر ضرایب شدت تنش در محدوده وسیعی، به ازاء نسبتهای مختلف d /W ممکن می باشد . از مزایای این نمونه میتوان به هندسه ساده و روش ساده و کم هزینه بارگذاری که قابل انجام با دستگاه معمولی کشش و فشار می باشد ، اشاره نمود . اما یکی از نقاط ضعف جدی در این نمونه ، عدم امکان دستیابی به مود II خالص در آن می باشد .

۳-۲- نمونه SENB با ترک مایل تحت بار چهار نقطه ای

قطعه SENB با ترک لبه ای مایل یکی دیگر از قطعات متداول در اندازه گیری استحکام شکست سنگها و سرامیکها در مود مرکب می باشد . در این نمونه ترک با استفاده از اره های ظریف به صورت زاویه دار ایجاد می شود . ترکهای متقارن عمود بر سطح نمونه و روی خط تقارن آن موجب پیدایش مود یک خالص می شوند و ترک های مایل ، مود مرکب را ایجاد می نمایند . در شکل ۳ خصوصیات هندسی این نمونه نشان داده شده است [۶] . قطعه فوق از این مزیت برخوردار است که بدون تغییر موقعیت نقاط بارگذاری و صرفا با تغییر زاویه ترک می توان نسبت مودهای I وII ایجاد شده را کنترل نمود . منتها ایجاد ترک زاویه دار مشکل بوده و برای زوایای بزرگ ، احتمال پریدگی و شکستن گوشه ای از نمونه بسیار زیاد می باشد . لازم به ذکر است که این قطعه برای آزمایشات متعدد شکست در مواد سنگی و سرامیکی استفاده شده است [۵] .

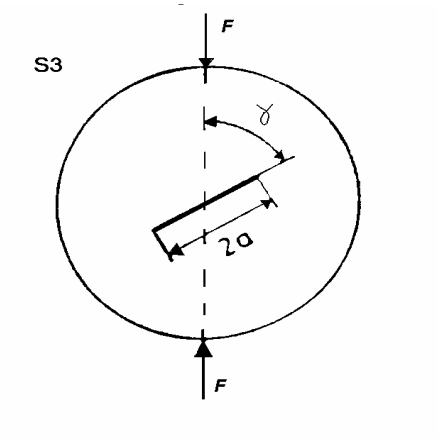


شکل ۳. نمونه با ترک لبه ای مایل تحت بار چهار نقطه ای[۵].

۳- ۳- نمونه دایره ای شکل با ترک مرکزی

نمونه دایره ای شکل تحت بار فشاری یکی از نمونه های متداول جهت تعیین خواص مکانیکی مواد سنگی می باشد.

به منظورمحاسبه چقرمگی شکست این مواد یک ترک مرکزی مطابق شکل۴ در امتداد یکی از قطر های دایره ایجاد می شود. سپس قطعه تحت یک بار فشاری قرار می گیرد . از مقدار بار متناظر با لحظه شکست قطعه چقرمگی شکست ماده محاسبه می شود . با تغییر زاویه بین بار فشاری و امتداد ترک (زاویه γ) می توان ترکیب های مختلفی از مود I و مود II را فراهم آورد . در حالت γ=۰ ، نمونه تحت مود I خالص قرار می گیرد. برای ایجاد مود II مقدار زاویه γ بستگی به قطر دیسک و طول ترک دارد ولی به طور متوسط مود II در حالت γ حدودا برابر با ۲۲/۵° حاصل می گردد .

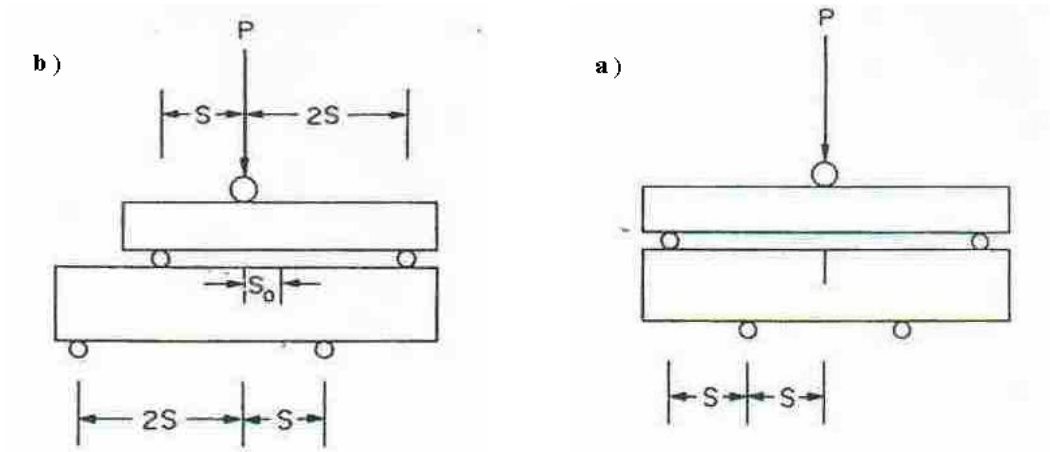


شکل ۴ . نمونه دایره ای شکل با ترک مرکزی

اگر چه دیسک برزیلی ترک دار می تواند دامنه کاملی از مود I تا مود II را فراهم آورد ولی تغییرات K_I و K_{II} با زاویه γ نسبتا شدید می باشد لذا احتمال تاثیر قابل ملاحظه خطاهای ناشی از مرحله تولید قطعه روی نتایج آزمایش وجود دارد . همچنین ایجاد ترک مرکزی در یک نمونه سنگی در مقایسه با ایجاد ترک لبه ای دشوارتر می باشد . این قطعه توسط محققین متعددی برای انجام آزمایشات شکست مرکب روی مواد سنگی مورد استفاده قرار گرفته است که به عنوان نمونه می توان مراجع [۷] و [۸] را ذکر نمود .

۳-۴- نمونه SENB با ترک مستقیم نامتقارن تحت بار خمشی چهار نقطه ای

هندسه نمونه تحت بار خمشی چهار نقطه ای نامتقارن و متقارن در شکل ۵ نشان داده شده است[۹] . همانطور که در شکل مشاهده می شود با بهره گیری از فیکسچرهای ساده و دو روش بارگذاری مختلف ، امکان دستیابی به مودI خالص ، مودII خالص و نیز مود ترکیبی I وII فراهم می شود . ممان M ایجاد شده در نمونه، در راستای ایجاد مود I و نیروی برشی Q نیز ، در رابطه با ایجاد مود II عمل میکنند. نسبت مود I به II با تغییر موقعیت ترک نسبت به محلهای اعمال نیرو قابل کنترل می باشد . مود II خالص با قرار دادن ترک در منطقه وسط نمونه نامتقارن و در راستای محور میانی (جایی که M =0 می باشد) ایجاد می شود . برای ایجاد مود I خالص نیز میتوان ترک را در منطقه وسط نمونه متقارن (جایی که Q=0 می باشد) قرار داد . آزمایشات متعددی بر روی این نمونه توسط هوانگ و وانگ انجام گرفته است[۱۱].



شکل۵ . نمونه با ترک لبه ای تحت بار چهار نقطه ای[۹] a. متقارن b. نامتقارن

طبق بررسیهای انجام شده مشاهده می شود که درنمونه فوق الذکر، امکان ایجاد مودI خالص ، مـودII خـالص و همچنین کلیه حالات مود ترکیبی I / II فراهم می شود ، در حالی که در سه نمونه شرح داده شده قبلـی ایجاد مود II خالص یاامکان پذ یر نبودیا حساسیت زیـادی بـه فراینـد سـاخت قطعـه داشـت . بـا توجـه بـه توضیحات فوق می توان نتیجه گرفت که قطعه با ترک مستقیم لبه ای تحت بار چهار نقطه ای به دلیل سـاده و کم هزینه بودن روند تولید ، عدم نیاز به فیکسـچر هـای پیچیـده و امکـان فـراهم کـردن دامنـه کـاملی از بارگذاری مرکب ، از کشش خالص تا برش خالص ، نمونه آزمایشگاهی بسیار مناسبی بـرای تعیـین اسـتحکام شکست مواد سنگی و سرامیکی می باشد . در بخش بعد به کمک روش اجزاء محـدود ایـن نمونـه مدلسـازی شده و با انجام یک تحلیل تنش الاستیک ، پارامترهای ترک در این نمونه به دست آورده می شود .

۴-روابط نیروی برشی و گشتاور خمشی در نمونه SENB تحت بار چهار نقطه ای

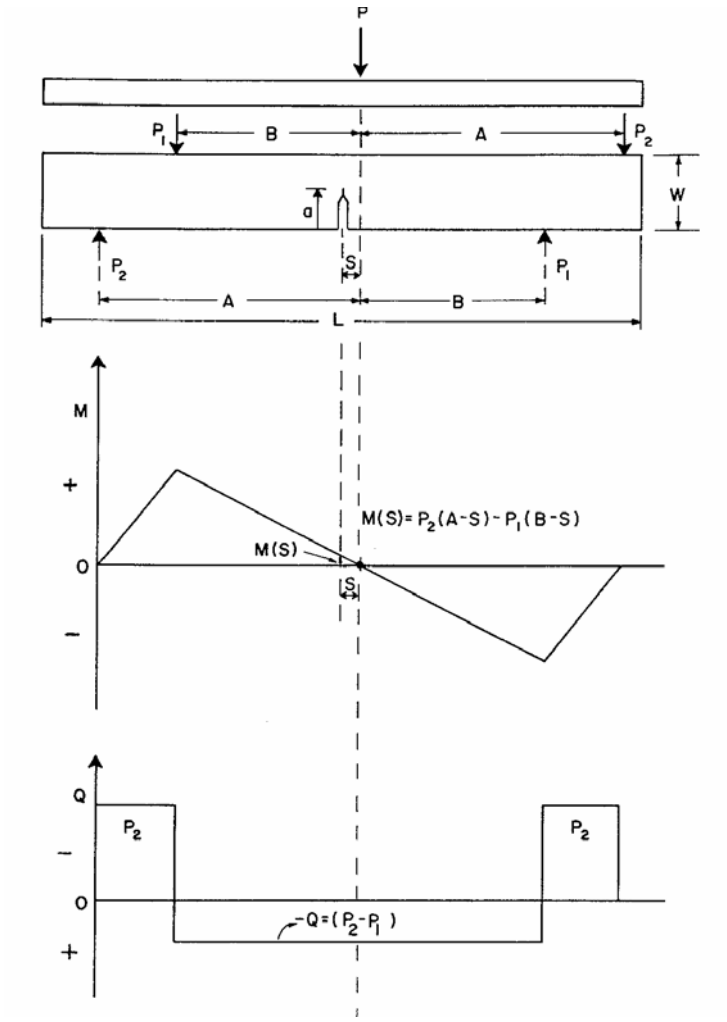
حالت کلی نحوه تغییرات بار برشی و خمشی در طول نمونه در شکل ۶ نشان داده شده است . در بارگـذاری نامتقارن ، فیکسچرهای در بر گیرنده نمونه تحت تاثیر بارP (در واحد ضخامت) که به فاصله S از محور نـاچ وارد می شود ، قرار می گیرند .

با بررسی تعادل استاتیکی قطعه خواهیم داشت :

$$P_1 = P\frac{A}{A+B} \qquad P_2 = P\frac{B}{A+B} \qquad (۲$$

و به این ترتیب نیروی برشی وارد به صفحه ترک و نیز ممان اعمالی در واحد ضخامت به صورت زیر خواهند بود :

$$Q = P_1 - P_2 = P\frac{A-B}{A+B} \quad \text{و} \quad M(S) = P_2(A-S) - P_1(B-S) = QS \qquad (۳$$



شکل ۶ . بارگذاری نمونه با ترک لبه ای تحت بار چهار نقطه ای .

نیروی برشیQ موجب پیدایش ضریب شدت تنش مود II در نوک ترک می شود . ممان M نیز ضریب شدت تنش الاستیک مود I را ایجاد می کند . ممان به صورت خطی با افزایش فاصله S ، افزایش یافته ولی نیروی

برشی Q مستقل از فاصله می باشد . بنابراین نسبت مود ترکیبی (K_I / K_{II}) در نوک ترک با تغییر فاصله S قابل تنظیم خواهد بود . اگر S=0 باشد ، ممان از بین رفته و نوک ترک تحت بارگذاری مود خالصII قرار خواهد گرفت . مود I خالص نیز با بارگذاری چهارنقطه ای قطعه متقارن ، قابل دستیابی خواهد بود .

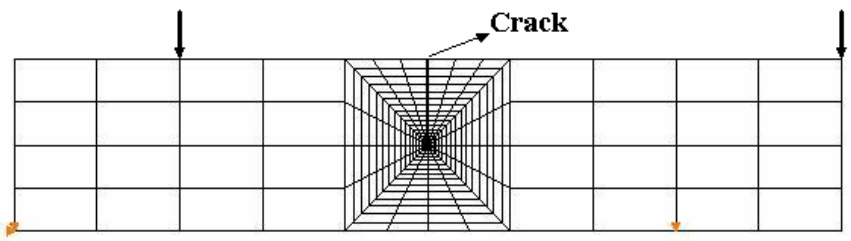
ضرایب شدت تنش نیز بر حسب M و Q برای نمونه با ترک مستقیم از روابط ۴ محاسبه می شوند :

$$K_I = \frac{M}{BW^{3/2}} F_I(\frac{a}{W})$$
$$K_{II} = \frac{Q}{BW^{3/2}} F_{II}(\frac{a}{W}) \qquad (۴$$

که در آن W عبارتست ازعرض قطعه ، B ضخامت قطعه و $F_I(\frac{a}{W})$ و $F_{II}(\frac{a}{W})$ نیز ضرایب هندسی مود I و مود II در نمونه می باشند .

۵- مدلسازی اجزاء محدود قطعه SENB با ترک مستقیم

به منظور دستیابی به میزان چقرمگی شکست قطعات سنگی لازم است رابطه ای بین باربحرانی شکست نمونه و مقدار چقرمگی شکست برقرار نمود . برای دستیابی به این هدف ، تحلیل اجزا محدودی با استفاده از نرم افزار ABAQUS بر روی نمونه به ازاء شرایط هندسی مختلف انجام گرفت . در مدلسازی نمونه ، خواص مکانیکی سنگ مرمر در نظر گرفته شد . ابتدا نمونه SENB با ترک لبه ای مستقیم در نرم افزار مدل شد . مش بندی قطعه با استفاده از المان چهاروجهی هشت گرهی Plane strain انجام گرفت . در ناحیه اطراف ترک ۱۸ ردیف المان و در هر ردیف آن ۱۴ المان در راستای شعاعی در نظر گرفته شد . به منظور ایجاد سینگولاریتی تنش های اطراف نوک ترک نیز، در این ناحیه خاص از المانهای ویژه ترک موسوم به المان های سینگولار ، استفاده شد . مدل ساده شده ای از مش بندی قطعه در شکل ۷ مشاهده می شود .



شکل ۷. مش بندی ، شرایط مرزی و بارگذاری قطعه SENB.

پس از اعمال بارگذاری و شرایط مرزی و حل مساله ، ضرایب شدت تنش بوسیله نتایج حاصل از تحلیل نمونه ، محاسبه شده و با قرار دادن در روابط ۵ ضرایب هندسی بی بعد به صورت توابعی از نسبت طول ترک به عرض قطعه (a/W) ، به دست می آیند .

$$K_{\mathrm{I}} = \frac{6(P_1 - P_2)S}{W^2}\sqrt{\pi a}F_{\mathrm{I}}(\frac{a}{W})$$

$$K_{\mathrm{II}} = \frac{(P_1 - P_2)}{W}\sqrt{\pi a}F_{\mathrm{II}}(\frac{a}{W}) \qquad (۵$$

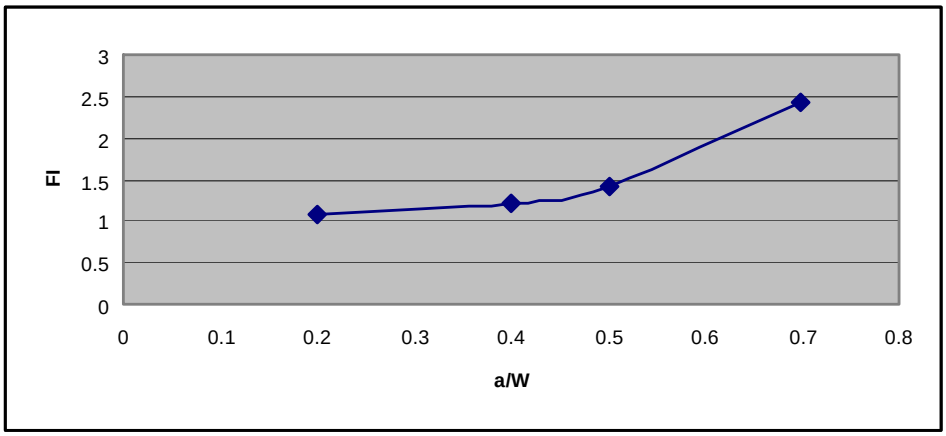
به منظور ایجاد یک جامعه آماری مناسب از ضرایب هندسی ، تحلیلهای متعددی بر روی نمونه هایی با طول ترکهای مختلف انجام گرفت ، که نتایج به صورت عددی در جدول۱ و بصورت ترسیمی در شکلهای ۸ و۹ ارائه می شوند :

جدول ۱ . ضرایب هندسی بدون بعد به دست آمده از نرم افزار به ازاء طول ترک های مختلف

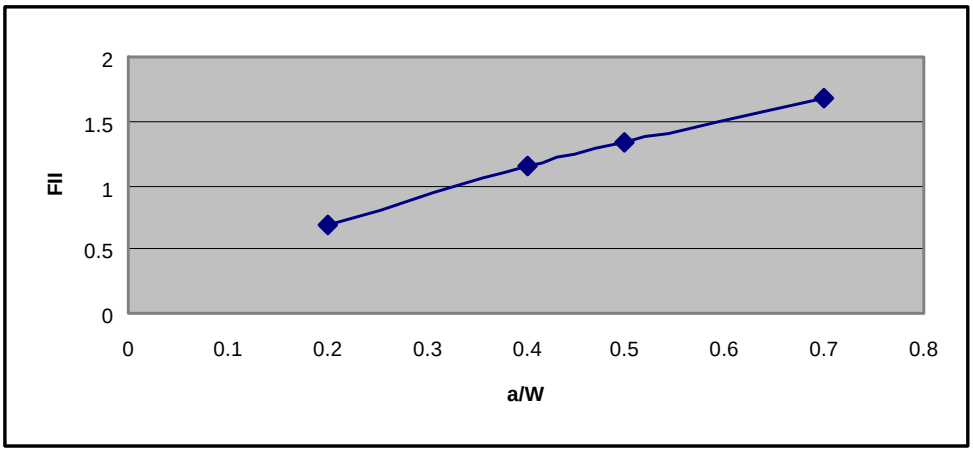
a/W	F_{I}	F_{II}	F_{II}/F_{I}
0.2	1.07	0.68	0.64
0.4	1.2	1.15	0.96
0.5	1.41	1.33	0.94
0.7	2.44	1.68	0.69

نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود نشان داد که در صورت مرتب نمو دن روابط شدت تنش بصورت روابط (۵) ، ضرایب بدون بعد $F_{\mathrm{I}}(\frac{a}{W})$ و $F_{\mathrm{II}}(\frac{a}{W})$ مستقل از فاصله ترک تا امتداد وسط قطعه ،S ، خواهند بود .

شکل۸ نشان می دهد که با افزایش طول ترک ، ضریب هندسی F_{I} ابتدا افزایش میابد ولی برای ترک با طول بیشتر ، روند نزولی در مقادیر F_{I} مشاهده می شود . این در حالیست که براساس شکل (۹) ، ضریب هندسی F_{II} همواره با افزایش طول ترک زیاد می شود .



شکل ۸ . نمودار ضریب هندسی نرمال شده مود I به ازاء نسبتهای مختلف طول ترک به عرض قطعه.

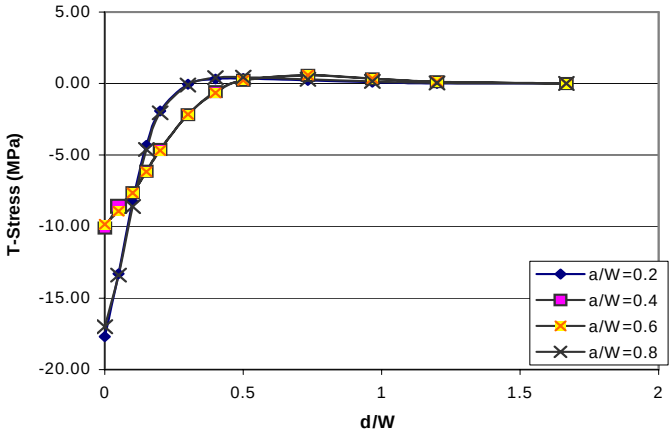


شکل ۹ . نمودار ضریب هندسی مودII نرمال شده به ازاء نسبتهای مختلف طول ترک به عرض قطعه.

از نمودارهای ارائه شده در شکلهای (۹) و(۸) ، میتوان جهت ایجاد ارتباط بین بار شکست حاصل از آزمایش و چقرمگی شکست مرکب مواد سنگی استفاده نمود . چنانچه آزمایش روی نمونه های سنگی با ابعاد و طول ترک مشخص انجام گیرد و موقعیت بارها و امتداد ترک مشخص باشند ، به سادگی می توان K_{I} و K_{II} متناظر با بار شکست در قطعه ترک دار را از روابط (۵) محاسبه نمود . سپس به کمک این مقادیر و با استفاده از معیارهایی از قبیل معیار حداکثر تنش محیطی [۱۱] ، معیار حداکثر نرخ انرژی کرنشی آزاد شده [۱۲] ویا معیار حداقل چگالی انرژی کرنشی [۱۳] ، می توان میزان چقرمگی شکست نمونه سنگی مورد نظر را در بارگذاری مرکب تعیین نمود . بر اساس مبانی مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) ، نتایج حاصل

ازتست روی قطعه آزمایشگاهی SENB با ترک مستقیم ، برای تخمین شکست در مواد سنگی که همان نسبت F_{I} به F_{II} را دارند ، قابل استفاده می باشد .

علاوه بر محاسبه ضرایب شدت تنش ، مقدار تنش T نیز در حالت های مختلف و برای طول ترک های قبلی محاسبه گردید . به این منظور نتایج تحلیل روش اجزاء محدود و روش شرح داده شده در مرجع [۱۴] به کار گرفته شد . در این روش از تنش های به دست آمده روی لبه های ترک استفاده شده و مقدار تنش T در فاصله مناسبی از نوک ترک محاسبه می شود .



شکل ۱۰ . نمودار ترم تنش T به ازاء نسبتهای مختلف طول ترک به عرض قطعه.

شکل ۱۰ تغییرات تنش T را در حالت بارگذاری پاد متقارن (مود II خالص) نشان می دهد . نتایج بر حسب فاصله محل بارگذاری تا امتداد ترک d و همچنین برای مقادیر مختلف $\frac{a}{W}$ ارائه شده است . همانطور که مشاهده می شود مقدار تنش T در اکثر حالتها ناچیز و قابل اغماض می باشد . فقط چنانچه امتداد بارهای اعمالی به قطعه به امتداد ترک بسیار نزدیک گردد، مقدار تنش T قابل ملاحظه می شود. مشابه این نتایج در سایر ترکیب های بررسی شده از مود I وII نیز مشاهده گردید . لذا می توان به طور کلی بیان نمود که با انتخاب محل بارگذاری به گونه ای که به اندازه کافی از امتداد ترک دور باشد (حدودا $\frac{d}{W} \geq 0.4$) اثر تنش T روی شکست قطعه قابل اغماض خواهد بود .

این نکته را می توان به عنوان مزیت دیگری از نمونه SENB تحت بار چهار نقطه ای به شمار آرود. به عنوان مثال مطالعات انجام یافته توسط Fett [۱۵] نشان می دهد که تنش T در نمونه دیسک برزیلی با ترک مرکزی از مقدار منفی بالایی برخوردار است و این موضوع سبب شده است که نتایج آزمایشگاهی پراکندگی زیادی داشته و با معیارهای متداول شکست قابل پیش بینی نباشند .

۶- نتیجه گیری :

مطالعه نمونه های متداول تست شکست مواد سنگی ، نشان داد که قطعه SENB با ترک مستقیم لبه ای تحت بار خمشی چهار نقطه ای ، به دلیل عدم نیاز به شرایط تکیه گاهی و فیکسچرهای پیچیده ، سادگی هندسه ، کم هزینه بودن روند تولید و قابلیت تولید گستره کامل مود های بارگذاری از مودI خالص تا مود II خالص ، نمونه بسیار مناسبی برای انجام تحقیقات آزمایشگاهی و محاسبه پارامتر های شکست مواد سنگی می باشد . به منظور برقراری رابطه ای بین نیروی شکست حاصل از تست روی این نمونه و چقرمگی شکست ماده ، در این مقاله ، محاسبه فاکتورهای هندسی به کمک تحلیل اجزا محدود قطعه در حالت های بارگذاری مود I و II انجام گرفت . نتایج اجزاء محدود همچنین نشان داد که اگر امتداد بارگذاری از امتداد ترک به اندازه کافی دور باشد اثر ترم T قابل اغماض می شود .

منابع و مراجع :

1-Wittaker, B.N.,Singh,R.N.,Sun,G., (1992), ”Rock Fracture Mechanics”, Elsevier science publications.

2- Meguid,S.A., , (1989)” Fracture Mechanics, “, Elsevier science pub.

3- Williams, M.L. (1957). “On The Stress Distribution at The Base of a Stationary Crack”, *Journal of Applied Mechanics,* Vol. 24, pp. 109–114.

4-Xeidakis,G.S. ,Samaras,I,S. ,Zacharopoulos. ,Papakaliatakis,G,E., (1996), “ Crack Growth in a Mixed-Mode Loading on Marble Beams under Three Point Bending “ , International journal of fracture 79: 197-208

5- L.N.G,Filon,(1903) , “On an Approximate Slution for the Bending of a Beam of the Rectangular Cross-Section Under any System of Load, With Special Reference to Points of Concentrated or Discontinuous Loading “ , Phil. Trans., A , 201,63-155

6- Fett,T., Gerteisen,G., Hahnenberger,S.,Martin,G. & Munz,D., (1995), “Fracture Tests for Ceramics under Mode-I, Mode-II and Mixed-Mode Loading “, Journal of the European Ceramic Society 15 ,307-312.

7-Khan,K., Al-Shayea,N,A., (2000), “ Effect of Secimen Geometry and Testing Method on Mixed Mode I-II Fracture Toughness of a Limestone Rock From Saudi Arabia “, Rock Mech ,Rock Engng 33 (3),179-206

8-Chang,Soo-Ho., Lee, Chung-In.,Jeon,Seokwon, (2002), “ Measurement of Rock Fracture Toughness under modes I and II and Mxed Mode Conditions by Using Disc-Type Specimens “ , Engineering Geology 79-97.

9-T.M.Maccagno and J.F.Knott ,(1989),"The Fracture Behaviour of PMMA in Mixed Modes I and II ", engineering fracture mechanics Vol.34 ,No.1, pp65-86

10-Huang,J., Wang,S.,(1985), “ An Experimental Investigation Concerning the Comprehensive Fracture Toughness of Some Brittle Rocks “ , Intl.J.Rock.Mech.Min.Sci and Geomech.Abstr.,No.2,99-104

11- F. Erdogan, and , G.C. Sih, (1963) ,” On the Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear “ , Journal of Basic Engineering, Transactions of ASME. 85, 519-525

12- M.A.Hussain, S.L Pu and Underwood J, (1974), “ Strain Energy Release Rate for a Crack under Combined Mode I and Mode II” ,Fracture Analysis, ASTM STP 560. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 2-28

13- G.C.Sih, (1973), “Some Basic Problems in Fracture Mechanics and New Concepts “ Engineering Fracture Mechanics. 5, 365-377

14-Ayatollahi,M,R., Pavier,M.J., Smith,D,J., (1998), “ Determination of T-stress from Finite Element Analysis for Mode I ، and Mixed Mode I/II Loading “, International Journal of Fracture 91:283-298 .

15- Fett,T., (2001), “ Stress Intensity Factors and T-Stress for Internally Cracked Circular Disks under Various Boundary Conditions “ , Engineering Fracture Mechanics 68,1119-1136 .