

مقایسه شکست مصالح دانه‌ای گردگوشه ترک‌دار و بدون ترک تحت بارگذاری تک‌محوری فشاری با محصورشدگی جانبی

مهرداد امامی تبریزی^{۱*}؛ وحید قربانپور^۲

۱- عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی عمران و مرکز تحقیقات زلزله دانشگاه صنعتی سهند تبریز
۲- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و مرکز تحقیقات زلزله دانشگاه صنعتی سهند تبریز

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۱

دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۰۱

چکیده

مصالح دانه‌ای در اثر وزن لایه‌های فوقانی، تنش‌های ناشی از تغییرات دمایی در محیط و نیروهای لرزه‌ای، دارای ناپیوستگی‌ها و ریزترک‌هایی در ساختار خود می‌شوند. از طرفی، مصالح دانه‌ای طبیعی دارای تنوع شکل و اندازه بوده و این عوامل نیز تأثیرگذار در رفتار مکانیکی مصالح هستند. با تهیه مصالح دانه‌ای هم شکل، هم اندازه ولی ترک‌دار، میتوان تأثیر ترک را بر رفتار آنها مورد ارزیابی قرار داد. بر این اساس، سنگدانه‌های مصنوعی گردگوشه ترک‌دار و بدون ترک در محدوده اندازه کوچکتر مصالح مورد استفاده در سدهای سنگریزه‌ای، ساخته شده و تحت بارگذاری تک‌محوری فشاری با محصورشدگی جانبی قرار گرفتند. پارامترهای کنترل‌کننده همچون فاکتور شکست، انرژی اعمالی در واحد حجم، تراکم‌پذیری و نیز رفتار تنش-کرنش برای کلیه آزمایش‌ها، بدست آمده و با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان داد که وجود ناپیوستگی در دانه‌ها، سبب وقوع بیشتر شکست و نیز جذب انرژی بیشتر می‌گردد. الگوی غالب شکست در مصالح با استفاده از تابع توزیع ویبول، بصورت خردایش سطحی و لب‌پرشدگی بدست آمدند. همچنین شیب منحنی تنش-کرنش در دانه‌های ترک‌دار نسبت به دانه‌های بدون ترک کاهش یافته ولی در کلیه حالات مختلف بارگذاری، مدول الاستیسیته مماسی روند افزایشی دارد. نهایتاً روند تغییرات فاکتور شکست در برابر انرژی وارده را میتوان بصورت تابع هیپربولیک تقریب زد.

واژگان کلیدی

مصالح دانه‌ای، مصالح گردگوشه، شکست، ترک، توزیع ویبول، سنگریزه، محصورشدگی

۱- مقدمه

یکی از مهمترین عوامل مؤثر در رفتار این نوع مصالح، وجود ناپیوستگی‌ها می‌باشد [۵]. بدین‌صورت که مصالح سنگریزه‌ای همواره در معرض تنش‌های ناشی از وزن لایه‌های فوقانی در اعماق زمین، تنش‌های مکانیکی-حرارتی ناشی از ذوب و یخبندان و نیز تنش‌های تکتونیکی زمین قرار دارند. این وضعیت سبب می‌گردد ریزترک‌هایی در ساختار این نوع مصالح بوجود آیند. ریزترک‌ها در مصالح دانه‌ای معمولاً دارای طول تقریبی کمتر از ۰/۱ میلیمتر با نسبت ابعاد (عرض به طول) بین 10^{-2} و 10^{-5} می‌باشند [۶].

بررسی رفتار مکانیکی مصالح سنگریزه‌ای و دانه‌ای بدلیل کاربرد آنها در سازه‌های حساس و مهمی نظیر سدها، خطوط راه‌آهن، زیرساز جاده‌ها و فونداسیون سازه‌های بزرگ از اهمیت بالایی برخوردار است. عوامل مختلفی در پیچیدگی رفتار مصالح دانه‌ای تأثیرگذار می‌باشند از جمله شکل دانه، اندازه دانه، جنس دانه، دانسیته ترک، شرایط بارگذاری و رطوبت محیط [۱-۴].

*نویسنده مسئول: مهرداد امامی تبریزی، عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی سهند تبریز، دانشکده مهندسی عمران، کد پستی: ۵۳۳۱۸۱۱۱۱

تلفن ثابت: ۰۹۸ ۴۱ ۳۳۴۵۹۳۹۸، نمابر: ۰۹۸ ۴۱ ۳۳۴۴۴۳۴۳

آدرس پست الکترونیک: m.emami@sut.ac.ir

همچنین راستای ریزترک‌ها اغلب در بازه $\pm 10^\circ$ درجه نسبت به نیروی محوری اعمالی به سنگ و یا در بازه $\pm 30^\circ$ درجه نسبت به نیروی فشاری حداکثر در بارگذاری سه‌محوری سنگ تغییر می‌یابند [۶]. این ریزترک‌ها متعاقباً در اثر اعمال تنش، رشد کرده و با پیوستن به همدیگر، ناپیوستگی و ترک‌های بزرگتر در سنگدانه را ایجاد می‌کنند. این ترک‌ها و ناپیوستگی‌ها ویژگی‌های مکانیکی همچون سختی، مقاومت شکست، مدول الاستیسیته، تراکم‌پذیری و خصوصیات هیدرولیکی مصالح را بطور اساسی تحت تأثیر خود قرار می‌دهند [۷-۱۱].

مسلماً مدل‌سازی آزمایشگاهی ریزترک‌ها بصورت کنترل‌شده در مصالح دانه‌ای بمنظور بررسی تأثیر آنها بر رفتار مصالح براحتمی امکان‌پذیر نمی‌باشد. بعنوان مثال گریفیت و همکاران [۱۰] با تهیه ریزنگارهای نوری از مقطع گرانیته گاریبالدی و استخراج شبکه ریزترک‌ها در یک سطح مشخصی از آن ماده، مشاهده نمودند که در دمای آزاد حدود ۸۰ ریزترک به طول متوسط 0.056 میلیمتر در در یک مقطع به ابعاد 1×1 میلیمتر وجود دارند. دانسیته ترک اندازه‌گیری شده در این حالت برابر با 0.062 می‌باشد و با اعمال تنش‌های حرارتی تا 600 درجه سلسیوس، دانسیته ترک به مقدار 0.131 می‌رسد. کاملاً مشخص است که امکان تهیه نمونه‌های حاوی ریزترک‌ها در مقیاس طول و تعداد ذکر شده، آن هم بصورت کنترل شده و یکسان در دانه‌ها وجود ندارد. از طرفی، بمنظور بررسی تأثیر ترک و ناپیوستگی در سنگدانه‌ها، ضروری است مصالح ترک‌دار در وضعیت یکسان ناپیوستگی تهیه گردیده و تحت آزمایش‌های فشاری قرار گیرند و با نتایج مصالح بدون ترک مقایسه گردند.

تاکنون تحقیقات بسیاری بر روی رفتار مکانیکی مصالح دانه‌ای، بدون لحاظ نمودن تأثیر ریزترک‌ها صورت گرفته است. لیو [۱۲] با ساخت دانه‌های استوانه‌ای شکل از جنس گچ و انجام آزمایش‌های دومحوری، رفتار تنش-کرنش و نیز الگوهای شکست دانه‌ها را بررسی نمود. نتایج حاصل حاکی از وجود سه الگوی شکست به ترتیب شکافت، خردشدگی جانبی (لهیدگی) و ترکیبی از شکافت و لهیدگی می‌باشد. همچنین تحت بارگذاری فشاری قائم با فشار محصورشدگی کم، دانه‌ها امکان دوران و جابجایی را دارا

می‌باشند. اما با افزایش فشار محصورشدگی، امکان دوران دانه‌ها سلب شده و دچار خردایش می‌شوند. لی [۱۳] با انجام آزمایش‌های برش مستقیم بر روی ماسه رودخانه‌ای (گردگوشه) و سنگدانه‌های گرانیته خرد شده (تیزگوشه)، تأثیر شکل و توزیع اندازه دانه را بر روی مقاومت برشی مصالح بررسی نمود. گوپتا [۱۴] رفتار سه‌محوری مصالح سنگریزه‌ای مورد استفاده در یکی از سد‌های هندوستان را که از بستر رودخانه بدست آمده و گردگوشه بودند، مورد بررسی قرار داد. بر اساس نتایج بدست آمده، با افزایش فشار محدودکننده و نیز اندازه دانه‌ها، مقدار فاکتور شکست افزایش می‌یابد. یانگ و همکاران [۱۵] با تهیه سنگدانه‌های مصنوعی از خمیر سیمان در اشکال مکعبی، استوانه‌ای و منشور و انجام آزمایش‌های سه‌محوری بر روی آنها، تأثیر شکل دانه و فشار محدودکننده را بر روی شکست و تغییرشکل مصالح بررسی نمودند. بر اساس نتایج آنها، با گردگوشه‌تر شدن مصالح، نرخ رشد فاکتور شکست در اثر افزایش تنش، کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش فشار محدودکننده، مقدار فاکتور شکست افزایش خواهد یافت.

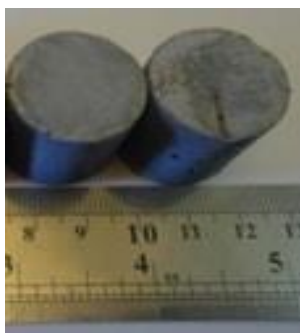
بر اساس جمع‌بندی بعمل آمده، تاکنون در هیچ یک از تحقیقات صورت گرفته پیشین، مقایسه مستقیم بین نتایج نمونه‌های بدون ترک و ترک‌دار از یک ماده یکسان و تحت شرایط بارگذاری مشابه بمنظور ارزیابی تأثیر وجود ترک در دانه‌ها صورت نگرفته است.

در این تحقیق با استفاده از نوعی بتن که خصوصیات شبیه سنگدانه‌ها را داشته و قابلیت ساخت در قالب‌های کوچک را دارا می‌باشد، دانه‌های همگن، هم شکل و هم‌اندازه در شرایط ترک‌دار و بدون ترک در آزمایشگاه ساخته و آزمایش‌های لازم بر روی آنها صورت می‌گیرند. با توجه به سختی ایجاد ریزترک‌ها در دانه‌ها به طریق مکانیکی-حرارتی و علی‌الخصوص کنترل تعداد و طول آنها، یک ترک ماکرو که معادل با ریزترک‌های موجود در مصالح دانه‌ای طبیعی است، بصورت یکسان در تمامی دانه‌ها ایجاد می‌گردد. دانسیته ترک ایجاد شده با این روش تقریباً معادل دانسیته ترک اندازه‌گیری شده در مصالح دانه‌ای طبیعی می‌باشد. بر این اساس، در این مقاله رفتار و مکانیزم شکست مصالح دانه‌ای ترک‌دار و بدون ترک با استفاده از تابع توزیع ویبول و روش مشاهده‌ای بررسی و مقایسه می‌شوند. همچنین با تحلیل

۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است، برای ساخت دانه‌های ترک‌دار از ورق‌های بسیار نازکی به ضخامت تقریباً ۰/۱ میلی‌متر استفاده گردید که قبل از بتن ریزی به کف قالب چسبانده شده و بعد از گیرش بتن، براحتی جدا می‌شدند. طول این ورق‌ها ۱۰ میلی‌متر و کل ارتفاع استوانه را در برمی‌گیرند. دانسیته ترک ایجاد شده در این حالت ۰/۰۵۱ می‌باشد که تطابق خوبی با نتایج آقای گریفیث و همکاران [۱۰] دارد.

جدول ۲ - ابعاد دانه‌های ساخته شده (بر حسب میلی‌متر)

شکل	استوانه‌ای
ابعاد (میلی‌متر)	قطر برابر با ۲۵، ارتفاع برابر با ۲۶



شکل ۱- دانه‌های ترک‌دار و بدون ترک ساخته شده با بتن پودری واکنش‌پذیر

قالب بارگذاری مورد استفاده در این تحقیق، شامل یک سیلندر فولادی با قطر داخلی ۲۲ سانتی‌متر، ضخامت ۱/۳ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۹ سانتی‌متر، با یک صفحه زیرین به قطر ۲۶ سانتی‌متر و ضخامت ۲ سانتی‌متر می‌باشد. هم‌چنین یک صفحه فوقانی به قطر ۲۰/۵ سانتی‌متر و قطر ۲ سانتی‌متر به منظور یکنواخت کردن توزیع تنش به کار رفته است. برای گرفتن نتایج قابل قبول (بدون تاثیر دیواره‌ها) لازم است که نسبت قطر قالب به بزرگترین اندازه دانه بزرگتر از ۶ باشد [۹]. در این صورت خواص فیزیکی و مکانیکی مورد اندازه‌گیری، به ابعاد قالب بستگی نخواهد داشت. در این تحقیق با توجه به اندازه محفظه و دانه‌ها، این نسبت برابر با ۸/۵ می‌باشد. به منظور انجام آزمایش‌ها، نمونه‌های بتنی به تعداد ۲۸۸ عدد به صورت تصادفی در داخل قالب استوانه‌ای ریخته شدند. نسبت تخلخل اولیه در تمامی آزمایش‌ها مقدار ۰/۸۵ می‌باشد. در شکل ۲ توده مصالح دانه‌ای قبل از بارگذاری نشان داده شده است. هر

منحنی‌های تنش-کرنش و دانه‌بندی مصالح، قبل و بعد از شکست، انرژی اعمالی در واحد حجم و مقادیر فاکتورهای شکست در اثر بارگذاری‌های مختلف، حاصل می‌گردند. در نهایت بر اساس نتایج حاصله، یک رابطه هیپربولیک برای تعیین تغییرات فاکتور شکست در برابر انرژی برای مصالح دانه‌ای ترک‌دار و بدون ترک پیشنهاد می‌گردد.

۲- آماده‌سازی آزمایش

در این تحقیق از نوعی بتن، بنام بتن پودری واکنش‌پذیر استفاده شده است [۱۶]. این نوع بتن که حاوی ماسه سیلیس، پودر سیلیس، میکروسیلیس، سیمان، فوق روان‌کننده و آب می‌باشد، دارای ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مطابق جدول ۱ بوده و همانطور که ملاحظه می‌شود، می‌توان رفتار آن را با رفتار مصالح طبیعی دانه‌ای همچون گرانیت مورد مقایسه قرار داد. مطابق طبقه‌بندی ارائه شده برای رفتار تغییرشکل‌پذیری مصالح سنگی بر اساس مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری [۱۷]، بتن پودری واکنش‌پذیر و گرانیت در رده رفتاری مصالح با مدول تغییرشکل‌پذیری زیاد قرار می‌گیرند.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی بتن پودری

شاخص	بتن پودری واکنش‌پذیر	گرانیت
وزن واحد حجم (Kg/m^3)	۲۳۰۰	۲۸۳۲
مقاومت فشاری استاندارد (MPa)	۱۰۵	۱۶۷/۷
مقاومت کششی برزیلی (MPa)	۴/۶	۱۲
مدول الاستیسیته (GPa)	۵۲	۸۵
شاخص شکنندگی	۰/۹۱۶	۰/۸۶۶

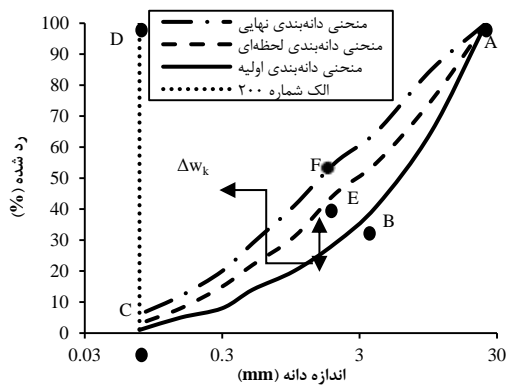
مصالح دانه‌ای طبیعی به دو گروه کلی تیزگوشه و گردگوشه تقسیم شده [۱۸] و بر اساس شکل و اندازه دانه‌ها، در پروژه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. بعنوان مثال، در سدهای سنگریزه‌ای، هر دو مصالح گردگوشه و تیزگوشه از ابعاد ۱۰ میلی‌متر الی ۶۰۰ میلی‌متر استفاده شده‌اند [۱۴]. در این تحقیق نیز مصالح دانه‌ای بتنی در شکل استوانه‌ای که نماینده دانه‌های گردگوشه طبیعی می‌باشند، در دو وضعیت ترک‌دار و بدون ترک ساخته شدند. ابعاد دانه‌های ساخته شده در جدول ۲ و تصویر آنها در شکل

۳- فاکتورهای شکست

به منظور اندازه‌گیری میزان شکست، محققان مختلف فاکتورهای شکست متفاوتی ارائه کرده‌اند. در این مطالعه به بررسی و مقایسه چهار مورد از آنها بترتیب فاکتورهای شکست مارسال، هاردین، ایناو و تاکنی پرداخته خواهد شد که ابتدا مبنای نظری و نحوه محاسبه آنها تشریح می‌گردد. اساس محاسبه فاکتور شکست مارسال بر تغییر اندازه دانه‌های مصالح، قبل و بعد از بارگذاری استوار است. به این صورت که مجموع اختلاف هم‌علامت درصد وزنی باقیمانده بر روی الک‌ها، مقدار شکست را تعیین خواهد نمود (رابطه (۱) [۲]):

$$B_g = \sum \Delta w_k \quad (1)$$

که در آن Δw_k اختلاف درصد وزنی باقیمانده مصالح بر روی الک‌ها، قبل و بعد از بارگذاری است (شکل ۴).



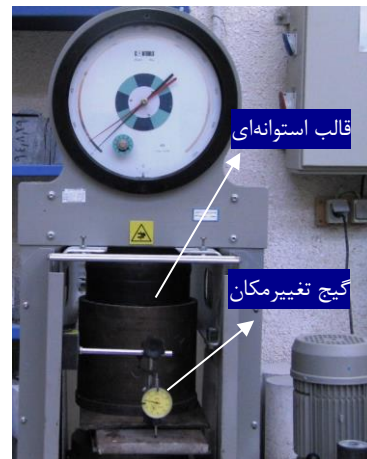
شکل ۴- نحوه محاسبه فاکتورهای شکست

هاردین با مقایسه منحنی توزیع دانه‌بندی مصالح، قبل و بعد از بارگذاری به تعریف فاکتور شکست پرداخت. این روش به گونه‌ای است که مرز نهایی شکست مصالح دانه‌ای را الک شماره ۲۰۰ (با قطر ۰/۰۷۵ میلیمتر) تعریف می‌کند چون از نظر هاردین ریزتر شدن دانه‌ها به کوچکتر از ۰/۰۷۵ میلیمتر امکان ندارد. بر این اساس، مساحت بین منحنی دانه‌بندی اولیه و الک ۲۰۰ بعنوان پتانسیل شکست و مساحت بین منحنی دانه‌بندی اولیه و کنونی، بعنوان ناحیه شکست تعریف می‌گردد. با تقسیم مساحت ناحیه شکست بر پتانسیل شکست، مقدار فاکتور شکست هاردین بدست می‌آید (شکل ۴).

سری از این نمونه‌ها پس از ریخته شدن به داخل محفظه استونهای، زیر جک هیدرولیکی بارگذاری قرار گرفته و گنج تغییرمکان‌سنج روی فک تحتانی نصب گردید (شکل ۳). آزمایش‌های بارگذاری فشاری تک محوری در شرایط محصورشدگی جانبی روی مصالح دانه‌ای در حالت آرایش نامنظم انجام شدند. بارگذاری‌ها در سه سطح نیرویی ۱۵۰، ۲۱۳ و ۳۰۰ کیلونیوتن یعنی حداکثر تنش ۳/۹، ۵/۶ و ۷/۹ مگاپاسکال انجام گرفت. بعد از اتمام بارگذاری، از روی منحنی‌های دانه‌بندی مصالح، قبل و بعد از بارگذاری، مقدار فاکتور شکست تعیین می‌شود. لازم به ذکر است در تعیین مقادیر فاکتور شکست، از روش‌های ارائه شده بوسیله مارسال [۲]، هاردین [۱۹]، ایناو [۲۰] و تاکنی [۲۱] در این تحقیق استفاده شده است. ضمناً سایر داده‌های لازم برای تحلیل رفتار مصالح دانه‌ای شامل منحنی تنش-کرنش، مقدار انرژی اعمالی به مصالح و منحنی تراکم‌پذیری استخراج شده و مورد ارزیابی قرار گرفتند.

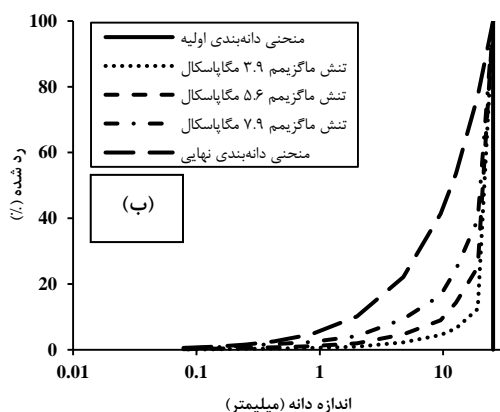
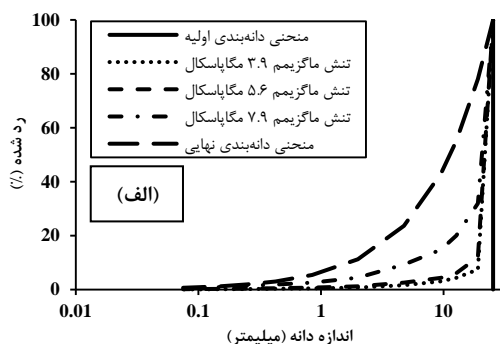


شکل ۲- آرایش دانه‌های بتنی ترک دار و بدون ترک در داخل قالب استوانه‌ای، بدون ترک (راست)، ترک‌دار (چپ)



شکل ۳- دستگاه انجام بارگذاری

خالی بین دانه‌های درشت‌تر پر شده و گستره اندازه دانه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین هر چقدر میزان بارگذاری روی دانه‌ها افزایش یابد، منحنی، خوب دانه‌بندی شده‌تر می‌شود. لازم به ذکر است با توجه به ثابت ماندن دیواره‌های قالب استوانه‌ای، با افزایش تنش قائم، محصورشدگی افقی ایجاد شده نیز افزایش یافته و میزان شکست مصالح را افزایش می‌دهد.



شکل ۵- منحنی‌های دانه بندی قبل و بعد از شکست برای مصالح الف) استوانه‌ای بدون ترک، ب) استوانه‌ای ترک‌دار

مقادیر فاکتورهای شکست مارسال، هاردین، ایناو و تاکئی بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی برای نمونه‌های استوانه‌ای به ازای هر سه سطح تنش اعمالی در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌گردد با ترک‌دار شدن دانه‌ها، هر یک از مقادیر فاکتور شکست به ازای هر سطح تنش، بطور متوسط در حدود ۲۱٪ افزایش یافته است. علت آن به کاهش مقاومت هر یک از دانه‌ها در اثر وجود ترک، مربوط می‌شود.

$$B_h = \frac{\text{مساحت } ABCEA}{\text{مساحت } ABCDA} \quad (2)$$

اینو در راستای تکمیل فاکتور شکست هاردین، منحنی دانه‌بندی نهایی (F_u) را بر اساس بعد فرکتال مصالح دانه‌ای، طبق رابطه (۳) تعریف نمود.

$$F_u(d) = \left(\frac{d}{d_{max}}\right)^{3-\alpha} \quad (3)$$

که در آن d قطر دانه، d_{max} حداکثر اندازه دانه و α بعد فرکتال می‌باشد که از روی شیب منحنی‌های دانه‌بندی در مقیاس تمام لگاریتمی حاصل می‌شود [۲۲]. بر این اساس، فاکتور شکست ایناو مطابق رابطه (۴) برابر است با:

$$B_e = \frac{\text{مساحت } ABCEA}{\text{مساحت } ABCFA} \quad (4)$$

با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که تفاوت فاکتور شکست ایناو با هاردین، در تعیین منحنی دانه‌بندی نهایی است.

تاکئی فاکتور شکست را به صورت نسبت تعداد دانه‌های شکسته شده به تعداد کل دانه‌ها مطابق رابطه (۵) پیشنهاد داده است.

$$B_t = \frac{n_{cc}}{n_{all}} \quad (5)$$

که در آن n_{cc} تعداد دانه‌های شکسته و n_{all} تعداد کل دانه‌ها می‌باشند. محاسبه این فاکتور شکست به صورت مشاهده ای می‌باشد.

۴- نتایج

۴-۱- منحنی‌های دانه‌بندی و فاکتورهای شکست

شکل ۵ نتایج منحنی‌های دانه‌بندی مصالح را برای نمونه‌های ترک‌دار و بدون ترک نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش سطح تنش اعمالی و شکست مصالح، منحنی دانه‌بندی مصالح از حالت دانه‌بندی یکنواخت به سمت خوب دانه‌بندی شده تمایل پیدا می‌کند. زیرا با شکسته شدن دانه‌ها و در نتیجه، تقسیم آنها به قطعات کوچکتر فضای

مارسال و هاردین به عنوان شکست محسوب نگردد. زیرا اساس این فاکتورهای شکست، منحنی دانه‌بندی آن‌هاست. عبارتی دیگر، ممکن است دانه‌ای در عمل دچار شکست گردد و هنوز بر روی همان الک قبل از بارگذاری، باقی بماند و در محاسبه شکست لحاظ نگردد. بنابراین امکان رخداد خطا در این فاکتورها بیشتر از فاکتور شکست تاکئی است. از طرفی، فاکتور شکست تاکئی، تأثیر پودرشدن مصالح دانه‌ای را در بر نمی‌گیرد. چرا که مبنای آن بر اساس شمارش چشمی دانه‌هاست. همچنین در مصالحی که به جهت بصورت پودر درمی‌آیند، استفاده از فاکتور شکست تاکئی مناسب نمی‌باشد.

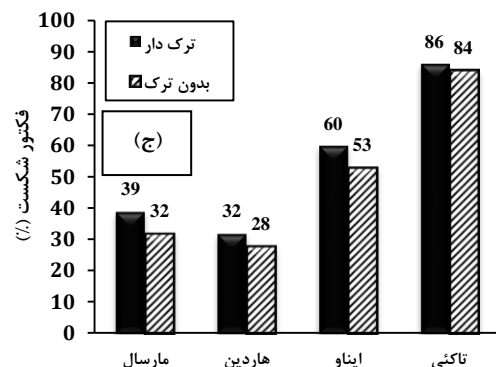
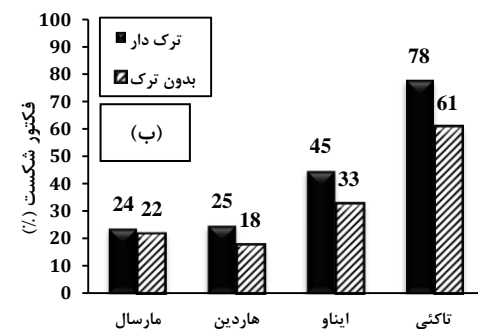
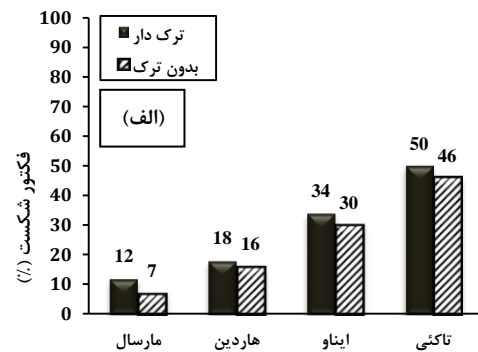
فاکتور شکست اینا و در تمامی موارد بیشتر از فاکتور شکست هاردین می‌باشد. دلیل آن هم تغییر منحنی دانه‌بندی نهایی از الک شماره ۲۰۰ به منحنی دانه‌بندی دیگری است که بر اساس بعد فرکتال مصالح بدست می‌آید و لذا پتانسیل شکست را کاهش می‌دهد. لازم به ذکر است مقادیر بدست آمده از روش مارسال و روش هاردین، تقریباً در یک محدوده قرار گرفته و تفاوت خیلی زیادی میان آنها مشاهده نمی‌گردد.

۴-۲- مکانیزم شکست دانه

بطور کلی مصالح دانه‌ای سه الگوی شکست را تجربه می‌کنند [۲۳]: شکافت، شکست گوشه یا لب‌پرشدگی، خردایش سطحی (شکل ۷). مود غالب شکست در هر یک از این الگوها، متفاوت می‌باشد. بعنوان مثال، در الگوی شکافت، مود غالب شکست بصورت نوع I (کشش) و در الگوهای لب‌پرشدگی و خردایش سطحی، ترکیبی از مود I (کشش) و مود II (برش) می‌باشد.

میزان هر یک از این الگوهای شکست در مصالح دانه‌ای بر اساس شکل، اندازه و بافت سطحی دانه‌ها تغییر می‌کند. در آزمایش‌های صورت گرفته، با توجه به ابعاد درشت دانه‌ها و شمارش آنها جهت تعیین فاکتور شکست را، این امکان فراهم بود که بتوان انواع الگوهای شکست را تفکیک نمود.

جدول ۳ و جدول ۴ نتایج بدست آمده را بترتیب برای نمونه‌های بدون ترک و ترک‌دار نشان می‌دهند.



شکل ۶- مقادیر فاکتورهای شکست به ازای تنش‌های قائم (الف) ۳/۹، (ب) ۵/۶، (ج) ۷/۹ مگاپاسکال

از طرفی با مقایسه فاکتورهای شکست می‌توان دریافت که در تمامی موارد آزمایش شده، مقدار فاکتور شکست تاکئی بیشتر از فاکتورهای شکست اینا، هاردین و مارسال است. با توجه به اینکه دانه‌های ساخته شده به قدری درشت هستند که شکست آن‌ها را با چشم می‌توان مشاهده کرد، فاکتور شکست تاکئی واقع‌بینانه‌ترین نتیجه را در مورد میزان شکست دانه‌ها ارائه می‌کند. چون امکان دارد دانه‌ای بدون تغییر در اندازه‌اش فقط دچار شکست یا ترک‌خوردگی شود و این حالت در فاکتورهای شکست اینا،

مقاومت دانه‌های ترک‌دار در برابر شکافت برمی‌گردد. یعنی هرچقدر تعداد ترک در دانه‌ها افزایش یابد، دانه ضعیف‌تر شده و به ازای تنش‌های کمتر، شکافت را تجربه می‌کند. در حالی که دانه سالم تحت همان تنش، ممکن است دچار شکست گوشه گردد. از طرفی، با افزایش تنش اعمالی در هر گروه از دانه‌های ترک‌دار و بدون ترک، سهم لب‌پرشدگی مجدداً کاهش می‌یابد. در دانه‌های بدون ترک، مقدار کاهش برابر با ۱٪ و در دانه‌های ترک‌دار ۳٪ کاهش مشاهده می‌گردد.

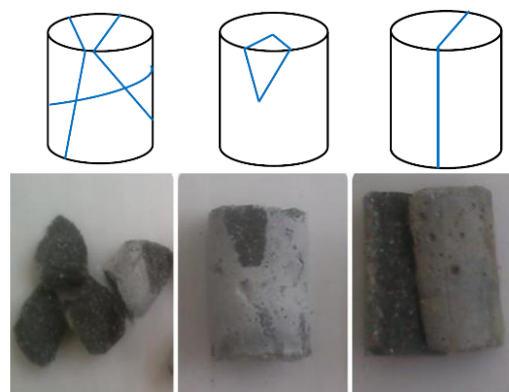
با استفاده از تابع توزیع دو پارامتره ویبول، میتوان الگوی شکست مصالح دانه‌ای را با استفاده از نتایج منحنی دانه‌بندی مورد ارزیابی قرار داد. با استفاده از این تابع که برای نمونه‌های با اندازه یکنواخت ارائه شده است، میتوان تابع توزیع تجمعی (F) دانه‌ها را بصورت رابطه (۶) تعریف نمود [۲۳].

$$F = 1 - e^{-\left[\frac{x_{ij}}{a(1-x_{ij})}\right]^b} \quad (6)$$

که در آن x_{ij} نسبت اندازه دانه می‌باشد که بصورت نسبت قطر دانه مانده بر روی الک j (D_j) به دومین قطر بزرگ الک‌ها (D_{i-1}) تعریف می‌گردد. علت استفاده از دومین قطر بزرگ الک‌ها به این دلیل است که مبنای تابع توزیع ویبول، بر اساس تغییر اندازه دانه‌ها در اثر بارگذاری و ایجاد دانه‌های جدیدی می‌باشد که در اثر شکست بوجود آمده‌اند. با توجه به اینکه ممکن است دانه‌های بزرگتر دچار شکست نشده و همچنان بر روی بزرگترین الک باقی بمانند، لذا مبنای محاسبات از دومین الک بزرگ قرار داده می‌شود. b ضریب شکل و a ضریب مقیاس می‌باشد. با مشتق‌گیری از رابطه (۶) نسبت به x_{ij} میتوان تابع چگالی احتمال ویبول را مطابق رابطه (۷) تعیین نمود.

$$f = \frac{b}{a^b} \frac{x_{ij}^{b-1}}{(1-x_{ij})^{b+1}} e^{-\left[\frac{x_{ij}}{a(1-x_{ij})}\right]^b} \quad (7)$$

با استفاده از این تابع، میتوان الگوی غالب اندازه دانه‌ها را که در اثر شکست تغییر یافته‌اند، بررسی نمود. شکل ۸ انواع حالات تابع چگالی احتمال ویبول را به ازای پارامترهای مختلف a و b نشان می‌دهد.



شکل ۷- انواع الگوهای شکست مصالح دانه‌ای، شکافت (راست)، لب‌پرشدگی (وسط)، خردایش (چپ)

جدول ۳- تفکیک مود شکست در دانه‌های بدون ترک

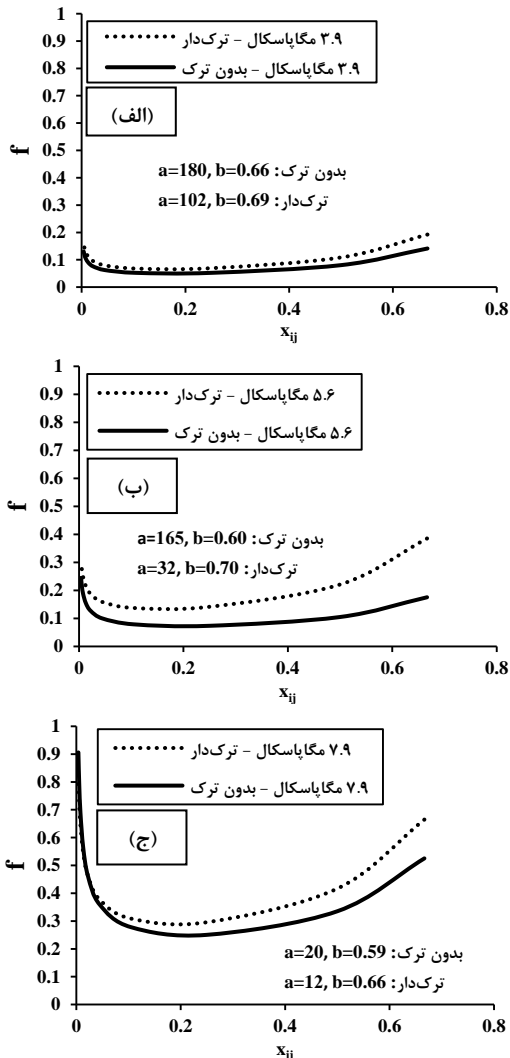
درصد شکست	تعداد دانه‌های سالم	تعداد لب‌پر شده	تعداد دانه‌های شکسته شده	تعداد کل دانه‌ها	تنش
٪۴۶	۱۵۵	۴۰	۹۳	۲۸۸	۳٫۹
٪۶۱	۱۱۲	۴۳	۱۳۳	۲۸۸	۵٫۶
٪۸۴	۴۶	۳۹	۲۰۳	۲۸۸	۷٫۹

جدول ۴- تفکیک مود شکست در دانه‌های ترک‌دار

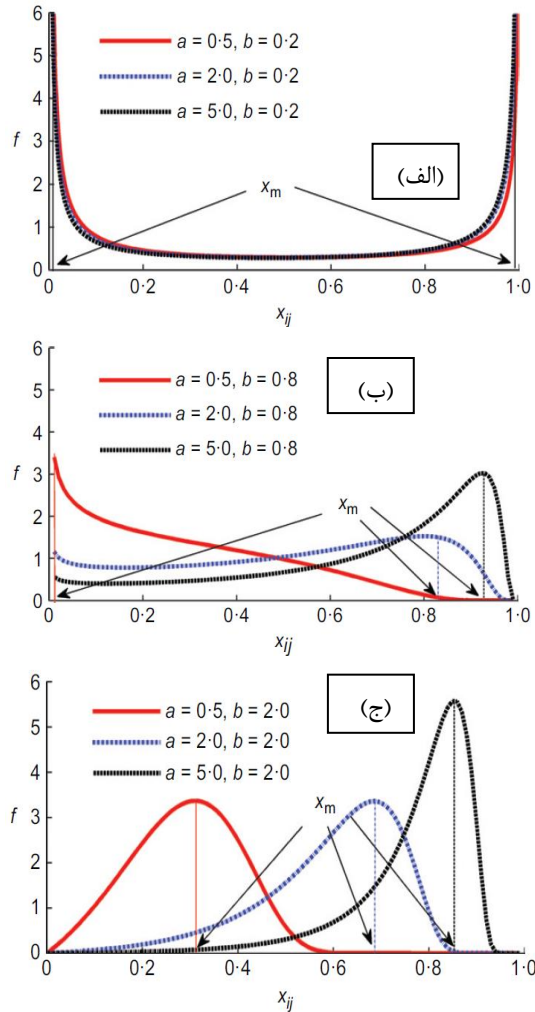
درصد شکست	تعداد دانه‌های سالم	تعداد لب‌پر شده	تعداد دانه‌های شکسته شده	تعداد کل دانه‌ها	تنش
٪۵۰	۱۴۵	۳۰	۱۱۳	۲۸۸	۳٫۹
٪۷۸	۶۲	۲۷	۱۹۹	۲۸۸	۵٫۶
٪۸۶	۴۱	۲۰	۲۲۷	۲۸۸	۷٫۹

در مقایسه نتایج حاصله با نتایج آزمایش‌های لیو که بر روی مصالح گچی صورت گرفته است [۱۲]، میتوان دریافت که علاوه بر الگوی شکافت، بدلیل مقاومت و سختی بالای دانه‌های بتنی، الگوی شکست مصالح تغییر یافته و لهیدگی رخ نمی‌دهد. بجای آن، لب‌پرشدگی و خردایش سطحی در دانه‌ها مشاهده می‌شوند. همچنین ملاحظه می‌گردد که با ترک‌دار شدن دانه‌ها، سهم دانه‌های لب‌پر شده از تعداد کل دانه‌ها کاهش می‌یابد. بطوریکه برای نمونه‌های بدون ترک، بطور میانگین ۱۴٪ کل شکست مربوط به لب‌پرشدگی می‌باشد. در حالی که برای دانه‌های ترک‌دار، این سهم به ۹٪ کاهش یافته است. علت آن به کاهش

دارد. هرچه قدر مقدار a کاهش می‌یابد، تعداد دانه‌های کوچکتر بیشتر می‌گردد. در این حالات، شکافت دانه نیز رخ می‌دهد و سبب می‌شود که x_m به اعداد پیرامون 0.5 نزدیکتر گردد. بطور کلی میتوان گفت که ضریب b شکل تابع و ضریب a محتمل‌ترین اندازه دانه، بعد از وقوع شکست را کنترل می‌کنند. ضمناً هرچه قدر مقدار f در یک محدوده اندازه دانه بیشتر باشد، نشان‌دهنده تجمع اندازه دانه‌ها در آن محدوده است. شکل ۹ مقادیر تابع چگالی احتمال ویبول را برای نمونه‌های ترک‌دار و بدون ترک در سه سطح بارگذاری نشان می‌دهد.



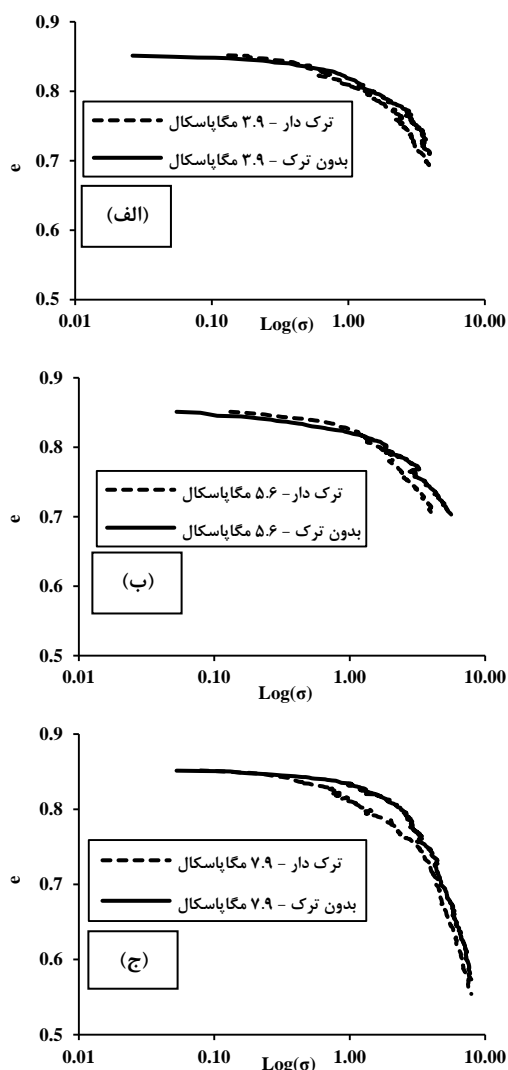
شکل ۹- تابع وضعیت ویبول برای تنش قائم الف) ۳/۹، ب) ۵/۶، ج) ۷/۹ مگاپاسکال



شکل ۸- حالات مختلف تابع چگالی احتمال ویبول [۲۲]

همانطور که ملاحظه می‌شود، بصورت کلی، تابع چگالی احتمال ویبول، دارای سه الگوی رفتاری است. در این شکل، x_m نشان‌دهنده محتمل‌ترین نسبت اندازه دانه‌ها است که در دانه‌بندی‌های یکنواخت، بعد از وقوع شکست حاصل می‌شود. بعنوان مثال، در $b=0.2$ در شکل ۸-الف، مقادیر حداکثر f در x_m صفر و یک رخ داده است و مقدار a هیچ تأثیری بر نتایج ندارد؛ یعنی اینکه بیشترین تعداد دانه‌ها در اندازه D_0 (دانه‌های باقیمانده بر روی کوچکترین الک) و D_{i-1} (دانه‌های باقیمانده بر روی دومین الک بزرگ) می‌باشند. این مطلب حاکی از وقوع لب‌پرشدگی (شکست گوشه) و خردایش سطحی در دانه‌ها می‌باشد. در عین حال، در شکل ۸-ب و شکل ۸-ج، مقدار x_m علاوه بر b به a نیز بستگی

همانطور که ملاحظه می‌گردد، نمودار مربوط به دانه‌های ترک‌دار در زیر نمودار دانه‌های بدون ترک قرار گرفته است. مهمترین علت آن، افزایش میزان شکست و در نتیجه کاهش بیشتر نسبت تخلخل در دانه‌های ترک‌دار می‌باشد.



شکل ۱۰- رفتار تراکم پذیری مصالح استوانه‌ای تحت تنش قائم، الف) ۳/۹، ب) ۵/۶، ج) ۷/۹ مگاپاسکال

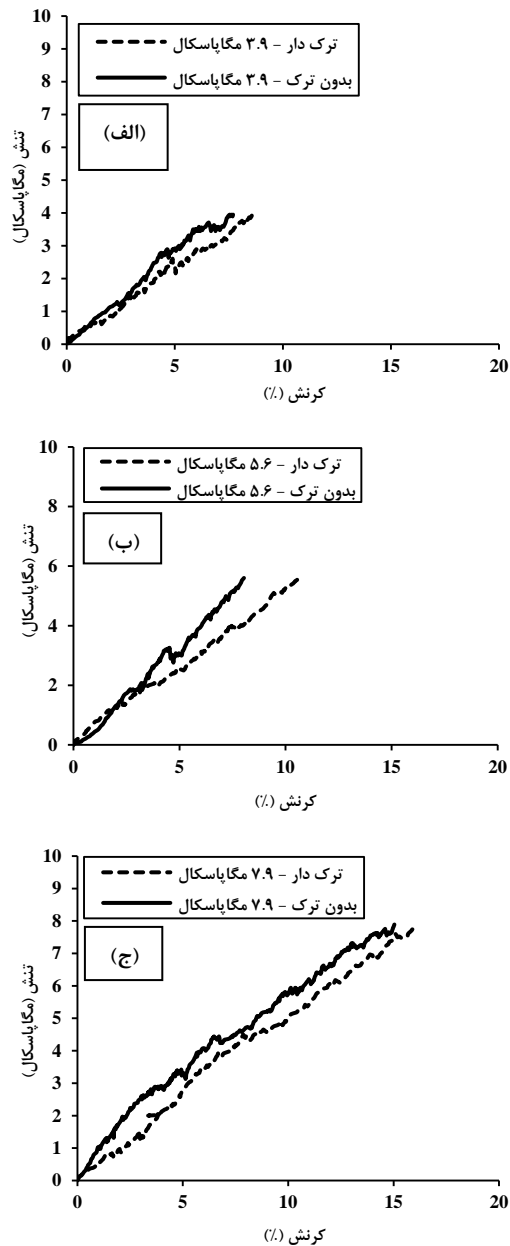
یک نکته بسیار مهم در این بخش، رفتار تقریباً یکسان دانه‌های ترک‌دار و بدون ترک، قبل از رسیدن به تنش تسلیم می‌باشد. تنش تسلیم طبق تعریف، تنش نظیر نقطه دارای بیشترین خمیدگی در نمودار $e-\log(\sigma)$ [۲۴]

مشاهده می‌گردد که روند تغییرات نمودارها مشابه هم می‌باشند. بدین صورت که مقادیر حداکثر f_c در نسبت‌های کوچکتر و بزرگتر x_{ij} رخ داده است. یعنی دانه‌های جدید عمدتاً در اثر لب‌پرشدگی و یا خردایش سطحی بوجود آمده‌اند. در صورتی که اگر شکافت در دانه‌ها الگوی غالب شکست بود، مقادیر حداکثر f_c به سمت وسط نمودار کشیده می‌شدند. از طرفی ملاحظه می‌گردد با افزایش سطح بارگذاری، مقادیر f_c به سمت بالا تغییر پیدا می‌کنند. این مسئله نشان‌دهنده بیشتر شدن تعداد لب‌پرشدگی و خردایش سطحی در عین ثابت ماندن الگوی کلی شکست می‌باشد.

با مقایسه نتایج بدست آمده از تابع توزیع ویبول و همچنین مشاهده چشمی دانه‌ها، میتوان ارزیابی کلی تری از مکانیزم شکست دانه‌ها ارائه نمود. همانطور که قبلاً ذکر گردید، در دانه‌های ترک‌دار نسبت به دانه‌های بدون ترک و همچنین با افزایش سطح تنش، سهم لب‌پرشدگی از کل شکست دانه‌ها کاهش می‌یابد. از طرفی نتایج تابع توزیع ویبول، نشان‌دهنده تجمع اندازه دانه‌ها در نسبت‌های کوچکتر و بزرگتر x_{ij} دارد. لازم بذکر است که امکان تفکیک خردایش و لب‌پرشدگی در تابع توزیع ویبول و نیز محاسبه خردایش سطحی در روش مشاهده‌ای وجود ندارند. در تابع توزیع ویبول، چون مقادیر حداکثر f_c در کوچکترین و بزرگترین نسبت اندازه دانه‌ها رخ داده اند، بنابراین تعیین اینکه کدام عامل شکست گوشه یا خردایش سطحی، مکانیزم غالب شکست بوده است، امکان‌پذیر نیست. از طرفی، در روش مشاهده‌ای هم فقط میتوان تعداد دانه‌های شکافته شده و لب‌پر شده را مشخص نمود و در خصوص خردایش سطحی نمیتوان اظهارنظری نمود. بنابراین میتوان بصورت کلی بیان کرد که در نمونه‌های آزمایش شده، مجموع لب‌پرشدگی و خردایش سطحی، مکانیزم غالب شکست بوده و البته تعدادی نیز شکافت دانه رخ داده است. همچنین میتوان نتیجه گرفت که با ترک‌دار شدن دانه‌ها و افزایش سطح تنش، مکانیزم خردایش به تدریج زیاد شده و عملاً کاهش سهم لب‌پرشدگی را جبران می‌نماید.

۳-۴- رفتار تراکم‌پذیری

رفتار تراکم‌پذیری مصالح دانه‌ای ترک‌دار و بدون ترک در همه سطوح تنش اعمالی در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۱ - رفتار تنش-کرنش دانه‌ها به ازای تنش‌های الف) (ب) ۳/۹، (ج) ۷/۹ مگاپاسکال

همچنین سطح زیر منحنی تنش-کرنش نشان‌دهنده انرژی جذب شده توسط دانه‌ها می‌باشد. بدین ترتیب می‌توان انرژی اعمالی در واحد حجم مصالح دانه‌ای را محاسبه نمود که نتایج آن در جدول ۵ ذکر شده است. ملاحظه می‌گردد دانه‌های ترک‌دار بدلیل وقوع شکست و جابجایی بیشتر در

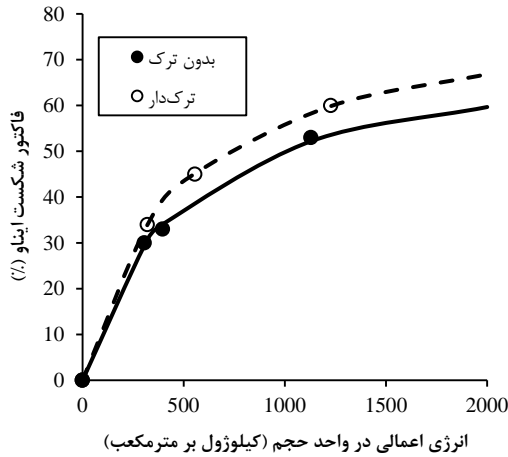
می‌باشد. تا قبل از تنش تسلیم، دانه‌ها دارای رفتار اصطکاکی بوده و نسبت به هم لغزش و دوران می‌کنند. بعد از رسیدن به تنش تسلیم، شکست در دانه‌ها آغاز می‌گردد. مشاهده می‌شود که ترک‌دار شدن دانه‌ها، تأثیری بر رفتار تراکم‌پذیری نداشته و لغزش و دوران اولیه دانه‌های ترک‌دار و بدون ترک مشابه هم می‌باشند. ولیکن به محض رسیدن به تنش تسلیم که آغاز فرایند شکست در دانه‌ها می‌باشد، رفتار متفاوت می‌گردد. تنش تسلیم در مصالح ترک‌دار در حدود 0.7 MPa بوده لیکن در مصالح بدون ترک این مقدار در حدود 1 MPa می‌باشد. بعبارت دیگر، مصالح ترک‌دار زودتر از مصالح بدون ترک به وضعیت تسلیم رسیده و شیب منحنی $e\text{-Log}(\sigma)$ افزایش می‌یابد. همچنین این شیب برای نمونه‌های ترک‌دار بزرگتر از نمونه‌های بدون ترک می‌باشد.

۴-۴- رفتار تنش-کرنش

در شکل ۱۱ رفتار تنش-کرنش مصالح دانه‌ای در سه سطح تنش اعمالی نشان داده شده است. می‌توان دریافت که شیب منحنی تنش-کرنش در مصالح ترک‌دار، کوچکتر از شیب منحنی مصالح بدون ترک می‌باشد. علت اصلی آن وقوع بیشتر پدیده شکست و در نتیجه جابجایی بیشتر دانه‌ها در مصالح ترک‌دار نسبت به مصالح بدون ترک می‌باشد. با مقایسه بین نمودارهای تنش-کرنش معلوم می‌گردد که با ترک‌دار شدن دانه‌ها، مقادیر جابجایی بطور متوسط ۱۲٪ افزایش یافته است.

خصوصیت مشترک تمامی منحنی‌ها، رفتار سخت‌شوندگی آنها است. چراکه بدلیل مکانیزم بارگذاری که از نوع فشاری با محصورشدگی جانبی می‌باشد، عملاً امکان تغییرشکل جانبی دانه‌ها وجود نداشته، مصالح در اثر شکست متراکم‌تر شده و لذا سختی آنها افزایش می‌یابد. این امر منجر به افزایش تدریجی شیب منحنی تنش-کرنش شده و در حالت حدی که مقدار تنش اعمالی بسیار زیاد شده و دانه‌ها دیگر امکان شکست ندارند، شیب به سمت بینهایت میل خواهد نمود [۲۵].

کنترل می‌کند.



شکل ۱۲ - نمودار تغییرات فاکتور شکست بر حسب انرژی اعمالی در واحد حجم مصالح

مقادیر c و m محاسبه شده برای نمونه‌های استوانه‌ای ترک‌دار و بدون ترک در جدول ۶ آورده شده‌اند. ملاحظه می‌شود که مقدار m برای هر دو نمونه بسیار نزدیک هم بوده که نشان‌دهنده روند یکسان در تغییرات آنها می‌باشد. ولیکن مقدار c برای نمونه ترک‌دار، کوچکتر از مقدار نظیر برای نمونه بدون ترک بدست آمده است.

بدون ترک	ترک‌دار	وضعیت دانه
۰٫۲۲	۰٫۵۳	c
۰٫۱۳	۰٫۱۲	m

با دقت در روند تغییرات ضرایب m و c و نیز فرم تابع هیپربولیک، مشخص می‌گردد که با کاهش پارامتر c ، مقدار فاکتور شکست افزایش خواهد یافت. با توجه به نتایج بدست آمده، پارامتر c را میتوان وابسته به خصوصیات ساختاری دانه (وجود ناپیوستگی‌ها) در نظر گرفت. بطوریکه با ازدیاد ریزترک‌ها در دانه، مقدار c کاهش می‌یابد. در حالت حدی در صورت وجود ریزترک‌های بسیار، مقدار c بسمت صفر میل نموده و فاکتور شکست B به سمت $1/m$ میل خواهد نمود. ضریب m را نیز میتوان وابسته به جنس دانه لحاظ

قیاس با دانه های بدون ترک، بطور میانگین ۱۷٪ مقدار انرژی بیشتری را نسبت به دانه‌های بدون ترک جذب نموده‌اند.

جدول ۵- مقادیر انرژی جذب شده در واحد حجم مصالح دانه‌ای (کیلو ژول بر مترمکعب)

استوانه‌ای		سطح تنش (مگاپاسکال)
بدون ترک	ترک‌دار	
۳۰۶	۳۲۱	۳٫۹
۳۹۶	۵۵۶	۵٫۶
۱۱۲۹	۱۲۲۷	۷٫۹

نکته مهمی که در بررسی و تحلیل نمودارهای تنش- کرنش و نیز مقدار انرژی اعمالی بایستی لحاظ گردد، در برگرفتن توأمان رفتار شکست و رفتار اصطکاکی مصالح دانه‌ای می‌باشد. بدین‌صورت که ممکن است دو گروه از مصالح دانه‌ای دارای منحنی‌های تنش-کرنش شبیه هم بوده ولیکن رفتار شکست متفاوتی را تجربه نمایند. یعنی در یک گروه، شکست کمتر و لغزش بیشتر و در گروه دیگر، عکس آن اتفاق بیفتد. به همین دلیل، توجه به رفتار شکست بصورت مستقل، یک ضرورت می‌باشد.

با ترسیم منحنی تغییرات فاکتور شکست اینا و در برابر انرژی اعمالی در واحد حجم مصالح که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، میتوان الگوی رفتاری این نوع مصالح را با دقت قابل قبولی تقریب زد. همانطور که ملاحظه می‌گردد، تغییرات فاکتور شکست در برابر انرژی وارده بصورت یک تابع هیپربولیک می‌باشد. بدین صورت که ابتدا شیب منحنی زیاد بوده و سپس دچار روند کاهشی می‌گردد تا در یک مقدار حدی، به صورت افقی درآید که نشان‌دهنده حداکثر میزان شکست رخ داده در مصالح می‌باشد.

با استفاده از یک تابع هیپربولیک میتوان تغییرات فاکتور شکست در برابر انرژی اعمالی را بصورت ذیل برقرار نمود [۲۶]:

$$B = \frac{E}{c+mE} \quad (8)$$

که در آن E انرژی اعمالی در واحد حجم، c و m ضرایب رگرسیون تابع می‌باشند. هرچقدر m به صفر نزدیک‌تر شود، رابطه فوق خطی‌تر می‌گردد. پارامتر c نیز شیب منحنی را

نمود. بطوریکه هر چقدر دانه سخت تر باشد، مقدار m افزایش و با ضعیف تر شدن دانه، مقدار m کاهش خواهد یافت.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق دانه‌های گردگوشه به شکل استوانه‌ای از جنس بتن پودری واکنش‌پذیر، مشابه سنگدانه‌های گرانیتی، در دو وضعیت ترک‌دار و بدون ترک ساخته شده و در شرایط یکسان به لحاظ تخلخل و سطح بارگذاری، تحت آزمایش-های شکست با محصورشدگی جانبی قرار گرفتند. ضمن نصب گیج تغییرمکان بر روی صفحه بارگذاری و ثبت مقادیر نیرو و جابجایی، بعد از اتمام هر بارگذاری، منحنی دانه‌بندی مصالح ترسیم شده و مقادیر شکست با استفاده از فاکتورهای شکست ماسال، هاردین، ایناو و تاکئی بررسی گردیدند. بطورکلی نتایج حاصل شده را می توان بصورت زیر جمع‌بندی نمود:

- مقادیر فاکتور شکست در دانه‌های ترک‌دار بطور متوسط ۲۱٪ بیشتر از شکست در دانه‌های بدون ترک می‌باشند.
- مقدار انرژی جذب شده در واحد حجم مصالح در نمونه‌های ترک‌دار بطور متوسط ۱۷٪ بیشتر از مقدار نظیر برای نمونه‌های بدون ترک می‌باشد.
- تراکم پذیری رخ داده در دانه‌های ترک‌دار بیشتر از دانه‌های بدون ترک می‌باشد.
- شیب منحنی نیرو-جابجایی در نمونه‌های ترک‌دار ۱۲٪ کمتر از نمونه‌های بدون ترک می‌باشد.
- منحنی تنش-کرنش دانه‌ها بدلیل محصورشدگی جانبی و عدم امکان جابجایی جانبی، رفتار سخت‌شوندگی داشته و با افزایش بسیار زیاد نیرو، شیب آن به سمت بینهایت میل خواهد نمود.
- با ترک‌دار شدن دانه‌ها و همچنین افزایش سطح تنش، سهم لب‌پزشدگی از میان مکانیزم‌های شکست دانه‌ها کاهش می‌یابد.
- در مصالح دانه‌ای گردگوشه با سختی بالا، الگوی غالب شکست بصورت شکافت، لب‌پزشدگی و خردایش سطحی می‌باشد.
- با استفاده از تابع چگالی احتمال ویبول، مشخص گردید که مکانیزم غالب شکست در شرایط ترک‌دار شدن دانه‌ها و نیز افزایش سطح تنش، خردایش سطحی

- می‌باشد.
- تغییرات مقادیر فاکتور شکست در برابر انرژی جذب شده در واحد حجم مصالح تقریباً بصورت یک تابع هیپربولیک می‌باشد. بدین صورت که ابتدا شیب منحنی زیاد بوده و سپس دچار روند کاهشی می‌گردد و در حالت حدی، بصورت افقی در می‌آید.
- با استفاده از تابع دوپارامتره هیپربولیک پیشنهادی میتوان رابطه فاکتور شکست و انرژی اعمالی به دانه‌ها را برقرار نمود. در این تابع، ضریب c وابسته به خصوصیات ساختاری دانه و ضریب m وابسته به جنس دانه‌ها می‌باشند. بطوریکه با ترک‌دار شدن دانه‌ها، ضریب c کاهش می‌یابد. ضریب m نیز با افزایش سختی دانه‌ها رابطه معکوس دارد.

۶- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
a	-	ضریب مقیاس در تابع توزیع ویبول
b	-	ضریب شکل در تابع توزیع ویبول
c	-	ضریب رگرسیون در تابع هیپربولیک
B_g	-	فاکتور شکست ماسال
B_h	-	فاکتور شکست هاردین
B_e	-	فاکتور شکست ایناو
B_t	-	فاکتور شکست تاکئی
d	mm	اندازه دانه
d_{max}	mm	حداکثر اندازه دانه
E	kJ/m^3	انرژی اعمالی در واحد حجم
F_u	-	تابع توزیع تجمعی اندازه دانه‌ها
m	-	ضریب رگرسیون در تابع هیپربولیک
x_{ij}	-	نسبت اندازه دانه‌ها
α	-	بعد فرکتال
Δw_k	-	اختلاف درصد وزنی باقیمانده مصالح بر روی الک‌ها، قبل و بعد از بارگذاری

۷- منابع ها

[1] Seyedi Hosseinia, E., and Mirghasemi, A., Effect of particle breakage on the behavior of simulated angular particle assemblies. China Particuology, 2007. 5(5): p.

doi:10.1007/BF0072136

[12] Liu, E., Breakage and deformation mechanisms of crushable granular materials. *Computers and Geotechnics*, 2010. 37(5): p. 723-730. doi:10.1016/j.compgeo.2010.04.009.

[13] Li, Y., Effects of particle shape and size distribution on the shear strength behavior of composite soils. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2013. 72(3): p. 371-381. doi:10.1007/s10064-013-0482-7

[14] Gupta, A., Effects of particle size and confining pressure on breakage factor of rockfill materials using medium triaxial test. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016. 8(3): p. 378-388. doi:10.1016/j.jrmge.2015.12.005

[15] Yang, G., Yan, X., Nimbalkar, S., and Xu, J., Effect of particle shape and confining pressure on breakage and deformation of artificial rockfill. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2019. 5(15): p. 1-10. doi:10.1007/s40891-019-0164-z

[16] Richard, P., and Cheyrezy, M., Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, 1995. 25(7): p. 1501-1511. doi:10.1016/0008-8846(95)00144-2

[17] Bieniawski, Z., *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. 1989. Wiley.

[18] Holtz R, and Kovacs, W., *An introduction to geotechnical engineering*. 1981. Englewood Cliffs: Prentice Hall.

[19] Hardin, BO., Crushing of soil particles. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985. 111(10): p. 1177-1192. doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:10(1177)

[20] Einav, I., Breakage mechanics—Part I: Theory. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2007. 55(6): p. 1274-1297. doi:10.1016/j.jmps.2006.11.003

[21] Takei, M., Kusakabe, O., and Hayashi, T., Time-dependent behavior of crushable materials in one-dimensional compression tests. *Soils and Foundation*, 2001. 41: p. 97-121.

doi:10.1016/j.enggeo.2013.03.005.

[2] Marsal, R., Large scale testing of rockfill materials. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1967. 93(2): p. 27-43.

[3] Shahnazari, H., and Rezvani, R., Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: An experimental study. *Engineering Geology*, 2013. 159: p. 98-105. doi:10.1016/j.enggeo.2013.03.005.

[4] Gupta, A., Triaxial behaviour of rockfill materials. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2009. 14: p. 1-12.

[5] Luong, M.-P. and Emami Tabrizi, M., Characterization of mechanical damage in granite. *Fracture and Structural Integrity*, 2014. 8(27): p. 38-42. doi: 10.3221/IGF-ESIS.27.05.

[6] Simmons, G., Richter, D., and Strens, R., *The physics and chemistry of minerals and rocks. The Microcracks in Rocks*, 1976. p. 105-137.

[7] Lade, P., Yamamuro, J., and Bopp, P., Significance of particle crushing in granular materials. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996. 122(4): p. 309-316. doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:4(309)

[8] Vallejo, L., Lobo-Guerrero, S., and Chik, Z., A network of fractal force chains and their effect in granular materials under compression. *Fractals in Engineering*, 2005. p. 67-80.

[9] Holtz, W., and Gibbs, H., Triaxial shear tests on pervious gravelly soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, 1956. p. 1-22.

[10] Griffiths, L., Heap, M., Baud, P., and Schmittbuhl, J., Quantification of microcrack characteristics and implications for stiffness and strength of granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017. 100: p. 138-150. doi:10.1016/j.ijrmms.2017.10.013.

[11] Zimmerman, R., The effect of microcracks on the elastic moduli of brittle materials. *Journal of Materials Science Letters* 4, 1985. 4(12): p. 1457-1460.

doi:10.3208/sandf.41.97

[22] Coop, M., Sorensen, K., Bodas Freitas, T., and Georgoutsos, G., Particle breakage during shearing of a carbonate sand. *Géotechnique*, 2004. 54(3): p. 157-163. doi:10.1680/geot.2004.54.3.157

[23] Zhang, S., Tong, C., Li, X., and Sheng, D., A new method for studying the evolution of particle breakage. *Géotechnique*, 2015. 65(11): p. 911-922. doi:10.1680/jgeot.14.P.240

[24] McDowell, GR., On the yielding and plastic compression of sand. *Soils and Foundation*, 2002. 42(1): p. 139-145. doi:10.3208/sandf.42.1139

[25] Xiao, Y., Meng, M., Daouadji, A., Chen, Q., Wu, Z., and Jiang, X., Effects of particle size on crushing and deformation behaviors of rockfill materials. *Geoscience Frontiers*, 2020. 11(2): p. 375-388. doi:10.1016/j.gsf.2018.10.010

[26] Zhang, T., Zhang, C., Zou, J., Wang, B., Song, F., and Yang, W., DEM exploration of the effect of particle shape on particle breakage in granular assemblies. *Computers and Geotechnics*, 2020. 122: p. 103542. doi:10.1016/j.compgeo.2020.103542