بررسی شکست ذرات مصالح سنگ‌ریزه‌ای در آزمایش سه محوری

*عطا آقایی‌آرایی: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
عباس سروش: دانشگاه صنعتی امیرکبیر
سعید هاشمی طباطبایی: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
دکتر عباس قلندرزاده: دانشگاه تهران، دانشکده فنی

تاریخ: دریافت ۹۰/۷/۱۸ **پذیرش** ۹۱/٤/۱۱

چکیده

در همهٔ مصالح سنگ‌ریزه‌ای بر اثر تنش‌های اعمالی زیاد، دانه‌ها شکسته می‌شوند. شکست دانه‌ها و خرد شدن آن‌ها به دانه‌های کوچک‌تر باعث کاهش مقاومت برشی و افزایش تغییر شکل می‌شود. معمولاً شکست دانه‌ها که در آزمایش‌های سه‌محوری مشاهده می‌شود را با شاخص شکست مارسال، B_g، بیان می‌کنند. در این مقاله روشی برای محاسبه B_g در هر سطح از کرنش محوری در آزمایش‌های سه‌محوری ارائه می‌گردد. بدین‌منظور از اصل مینیمم انرژی Rowe استفاده می‌شود. پارامتر کلیدی در روش یاد شده برای محاسبه B_g، مقدار ϕ_f، زاویهٔ اصطکاک مصالح بدون در نظرگرفتن اتساع و شکست ذرات است. بررسی‌ها و آزمایش‌های صورت گرفته نشان داد که ϕ_f، زاویهٔ اصطکاک مصالح سنگ‌ریزه‌ای در تنش‌های محدود کنندهٔ مؤثر کم‌تر از ۲۰۰ kPa به‌شرط ایجاد شرایط حجم ثابت و در کرنش نظیر حالت حجم ثابت است. هم‌چنین تغییرات نسبت انرژی شکست و فاکتور شکست مارسال با تنش محدودکنندهٔ در کرنش نظیر گسیختگی با رابطهٔ خطی قابل ارائه است.

واژه‌های کلیدی: مصالح سنگ‌ریزه‌ای، شکست دانه‌ها، سه‌محوری

*نویسنده مسئول *aghaeiaraei@bhrc.ac.ir*

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8]

مقدمه

خرد شدن اجزا تشکیل‌دهندهٔ مصالح سنگ‌ریزه‌ای در اثر تنش‌های وارده، از مهم‌ترین پدیده‌هایی است که در این مصالح رخ می‌دهد. شکست دانه‌ها چه در سطح تنش‌های زیاد [۳]، [٤]، [۵]، [۸]، [۱۱] و چه تنش‌های محدودکنندهٔ کم [۹]، [۱٦] رخ می‌دهد. شکست دانه‌ها و خرد شدن آن‌ها به دانه‌های کوچک‌تر باعث کاهش مقاومت برشی (به‌علت کاهش اتساع نمونه در شرایط زه‌کشی شده) و افزایش تغییرشکل‌پذیری می‌شود [۱۰]، [۱۵]، [۲۰]، [۲۵]. در کل شکست دانه‌ها سبب تراکم حجمی در آزمایش زه‌کشی شده و ایجاد فشار آب حفره ای در آزمایش زه‌کشی نشده می‌شود [۱۹].

بر اساس نتایج بررسی‌های انجام شده مقدار شکست دانه‌ها در مصالح تیزگوشه به‌علت ایجاد تمرکز تنش در گوشه‌های تیز بیش‌تر از مقادیر نظیر مصالح گردگوشه است. ضمناً با افزایش اندازهٔ دانه مقادیر شاخص شکست به‌علت نیروی تماس بزرگ‌تر در مرز تماس دانه‌ها و افزایش درزها و ترک‌های موجود با بزرگ شدن اندازه ذرات، بیش‌تر است. با افزایش تنش محدودکننده، مقادیر زاویهٔ اصطکاک مصالح گردگوشه با افزایش اندازهٔ دانه‌ها افزایش [۲۳]، [۲۵]، [۲٦]، [۲۷]، ولی در مصالح تیزگوشه با افزایش اندازه دانه‌ها به‌علت شکست بیش‌تر کاهش [۱٤]، [۲۵]، می‌یابد. نمونه‌های زهکشی‌شده مقدار شکست ذرات بیش‌تری از نمونه‌های زه‌کشی نشده از خود نشان داده و متراکم‌تر می‌شوند.

یکی از عوامل مؤثر بر شکست ذرات، تعداد تماس‌ها و فاصلهٔ ذرات از یک‌دیگر است. هرچه تخلخل نمونه بیش‌تر باشد، درصد شکست ذرات در آن بیش‌تر است. دلیل این مسئله بزرگ بودن نیروهای تماسی در نمونه‌های با تخلخل زیاد است. ذرات تشکیل شده از کانی‌های با مقاومت پایین، تحت تنش‌های کم‌تری شکسته می‌شوند. وجود رطوبت در نمونه باعث می‌شود که ذرات راحت‌تر حرکت کنند و این حرکت باعث افزایش تماس ذرات با یک‌دیگر و بالا رفتن مقدار شکست ذرات در سطح کرنش‌های بزرگ می‌شود. بنا بر این در نمونه‌های مرطوب، شکست ذرات نسبت به نمونه‌های خشک بیش‌تر است. هرچه دانه‌بندی یک‌نواخت‌تر باشد، تعداد ذره‌های موجود در واحد حجم نمونه کم‌تر است و بنا بر این نیروهای تماسی بین ذرات بیش‌تر شده و شکست ذرات افزایش می‌یابد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8]

روش‌های مختلفی برای تعیین مقدار شکست ذرات وجود دارد. تعدادی از این روش‌ها عبارتند از: روش لسلی[۱] (۱۹۶۳)، روش لی[۲] و فرهومند[۳] (۱۹۶۷)، روش هازن[٤] (۱۹۱۱)، روش میورا[٥] و او-هارا[٦] (۱۹۷۹)، روش هاردین[۷] (۱۹۸۵)، روش مارسال[۸] (۱۹۶۷). شاخص شکست مارسال B_g به‌طور وسیعی در آزمایش‌های سه‌محوری برای بیان شکست دانه ها به‌کار می‌رود. این شاخص، تغییرات توزیع کلی اندازهٔ دانه‌ها قبل و بعد از آزمایش را دربر می‌گیرد. روش کار بدین‌صورت است که تفاوت درصد باقی مانده روی هر اندازهٔ الک محاسبه می‌شود: $\Delta w_k = w_{ki} - w_{kf}$. که در این رابطه w_{ki} و w_{kf}، به‌ترتیب درصد باقی‌مانده روی الک اندازهٔ k قبل و بعد از آزمایش است. B_g به‌صورت مجموع مقادیر مثبت Δw_k و به‌صورت درصد گزارش می‌شود. حد پایین B_g صفر است و بیان‌گر این است که هیچ شکست ذره‌ای رخ نداده است. حد بالای B_g، ۱۰۰٪ است و بیان‌گر این است که تمامی ذرات به اندازه‌های کوچک‌تر از اندازه کوچک‌ترین الک استفاده شده شکسته شده‌اند.

در این مقاله، روشی برای اندازه‌گیری انرژی شکست و شاخص شکست دانه‌ها (B_g) در هر مرحله از کرنش محوری در تعدادی از مصالح شنی تیزگوشه و گردگوشه پوسته تعدادی سد سنگ‌ریزه‌ای تحت آزمایش CD ارائه می‌گردد.

مشخصات مصالح بررسی شده

پاره‌ای از مشخصات مصالح شنی سنگریزه‌ای بررسی شده در جدول ۱ ارائه شده است. پیش از ساخت آزمونه‌ها، آزمایش‌های زیر جهت تعیین مشخصات مورد نیاز انجام شده است.

مقدار حداکثر دانسیتهٔ خشک $\gamma_{d\max}$ و درصد رطوبت بهینه با آزمایش تراکم اصلاح شده (ASTM D1557) محاسبه شد. آزمایش شاخص بارنقطه‌ای براساس استاندارد ASTM D5731 انجام و مقاومت دانه‌های سنگ، محاسبه شده است. آزمایش سایش لوس آنجلس براساس استاندارد ASTM C535 انجام شد. این آزمایش برای تعیین کیفیت نسبی مصالح که دارای کانی مشابه هستند، به‌کار می‌رود.

---

۱. Leslie ۲. Lee ۳. Farhoomand ٤. Hazen ٥. Miura
٦. O-hara ۷. Hardin ۸. Marsal

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8] [Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

جدول ۱. مشخصات مصالح به‌کار رفته

نشانه	W_{opt} (%)	γ_d (۹۵%) (kN/m³)	شاخص بار نقطه‌ای (Is)	سایش لس‌آنجلس (%) (LA)	عبوری ۰.۲ میلی‌متر	عبوری ۴.۷۵ میلی‌متر	عبوری ۲۵.۴ میلی‌متر	عبوری ۳۸ میلی‌متر	سد		مصالح	
BLR	۷.۹	۲۱	۲.۱۱	۳۰	۸	۳۸	۸۴	۹۶	رودبار		سنگ آهک	تیرگوشه
BSV	۶.۲	۲۰.۸	۲.۷۵	۳۲	۵	۳۸	۸۴	۸۶	ونیار		ماسه سنگ	
BDV	۵.۹	۲۱.۸	۴.۶۱	۳۰	۸	۳۸	۸۴	۹۶			دیاباز	
BABS	۴.۵	۲۱.۱	۵.۴۵	۲۸	۴	۳۷	۷۲	۹۵	سبلان		آندزی‌بازالت	
BDZ	۷.۱	۲۱	۵.۴۲	۲۰	۱۰	۳۷	۷۲	۸۰	زنوز		داسیت	
BAA1	۶.۵	۲۱.۸	۳.۹۵	۱۹	۸	۳۷	۸۴	۹۶	آبدوقموش	G1	آندزی	
		۲۱*										
BAA2		۲۱.۸			۰	۶۳	۹۱			P		
BLSBU1	۵.۵۳	۲۱[a,b]	۲.۷۸	۴۰	۵	۴۳	۸۵	۹۵	سیاه بیشه	بالایی	سنگ‌آهک ناحیه برشی	
BLSBU2		۲۱.۵[a,c]										
BVLSBII1	۶.۶۷	۲۱[d]	۲.۶۳	۴۴						پایینی معدن ۲	سنگ‌آهک و ولکانیک	
BVLSBII2		۲۱.۵[e]										
BLSBIV1	۶.۱	۲۱[f]	۲.۳۷	۴۵						پایینی معدن ۴	سنگ‌آهک	
BLSBIV2		۲۱.۵[g]										
AADY1	۹	۲۰.۵	-	۳۲	۱۰	۶۱	۹۱	۹۷.۵	پلچی	G1	آندزی داسیت	رودخانه‌ای (گردگوشه)
AADY2					۷	۳۵	۷۰	۸۰		G2		
AABG	۹.۹	۲۱.۴	-	۲۶	۱۰	۴۳	۷۸	۹۲	قلعه‌چای		آندزی بازالت	
ADBS1	۹	۲۰.۵	-	۴۶	۱۰	۶۲	۹۱	۹۷	G1 سهند		دیوریت داسیت	
ADBS2					۸	۳۷	۸۴	۹۲	G2 سهند		دیوریت بازالت	
AAA	۷.۴	۲۲.۳	-	۱۹	۱	۲۵	۷۳	۸۲	G2- آبدوقموش		آندزیت	

کلید: * تکرار در ۷۰۰ kPa = σ_n ، [a] : 1 mm/min ، [b] : Dr =۹۲% ، [c] : Dr =۹۴% ، [d] : Dr =۹۳% ، [e] : Dr= ۹۶% ، [f] : Dr =۹۶% ، [g] : Dr =۹۸% ، [h] : سایش لس‌آنجلس =۲۶% (ASTM C131 برای ۵۰۰ دور چرخش)

روش آزمایش و نتایج اولیهٔ آزمایش‌ها

مقادیر اندازه‌های مختلف مصالح سنگ‌ریزه‌ای برای دست‌یابی به دانه‌بندی مورد نیاز برای ساخت نمونه‌ها از طریق وزن مخصوص خشک حداکثر به‌صورت وزنی تعیین و بعد از مرطوب شدن با رطوبت بهینه مخلوط شدند. از قالب‌های شکاف‌دار برای قالب‌گیری نمونه‌ها استفاده شد. مخلوط به ٦ قسمت تقسیم و برای کوبش از کمپکتور برقی با فرکانس cycle/s ٦٠ استفاده‌گردید. تمهیداتی برای کوبش یک‌نواخت نمونه به‌صورت کوبش کم‌تر لایه‌های پایین و افزایش مدت کوبش برای لایه‌های بالایی صورت گرفت. نمونه‌ها پس از عبور گاز CO_2 و تخلیه هوا، از طریق عبور آب بدون هوا از پایین به بالای محفظه سه‌محوری و به‌کارگیری سیستم زه‌کشی فوقانی، با خارج شدن هوا از فضاهای خالی، اشباع شدند. بعد از این‌که مقدار B اسکمپتون بیش از ۹۵٪ رسید که مبین کافی بودن اشباع شدگی است، ابتدا تحکیم نمونهٔ تحت فشار همه‌جانبه مورد نیاز انجام و سپس نمونه‌ها تحت بار تحت شرایط زه‌کشی‌شده مورد بارگذاری به‌صورت کرنش کنترل با سرعت۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه قرار می‌گرفتند. بارهای محوری، جابه‌جایی قائم و تغییر حجم نمونه به‌صورت هم‌زمان ثبت گردیده است. در انتهای آزمایش دانه‌بندی روی نمونه صورت گرفت.

نمونه‌ای از نتایج آزمایش‌های سه‌محوری شامل منحنی‌های تنش-کرنش- تغییر حجم در شکل۱ برای مصالح BAA1 ارائه شده‌است. به‌طورکلی مشاهده می‌شود کرنش‌محوری در لحظه گسیختگی با افزایش تنش محدود کنندهٔ افزایش می‌یابد. همهٔ مصالح تیزگوشه با توجه به تنش محدود کننده رفتار اتساعی و انقباضی در منحنی‌های تغییرحجم-کرنش محوری از خود نشان می‌دهند. ضمناً کرنش حجمی اتساعی با افزایش تنش محدود کننده کاهش چشم‌گیری می‌یابد.

شکل ۲ تغییرات نسبت تنش‌های اصلی حداکثر $(\sigma_1^{'}/\sigma_3^{'})_{max}$ در برابر شاخص شکست مارسال (B_g) برای مصالح سنگ‌ریزه‌ای و رودخانه‌ای را نشان می‌دهد. چنان‌که انتظار می‌رود B_g با $(\sigma_1^{'}/\sigma_3^{'})_{max}$ کاهش می‌یابد.

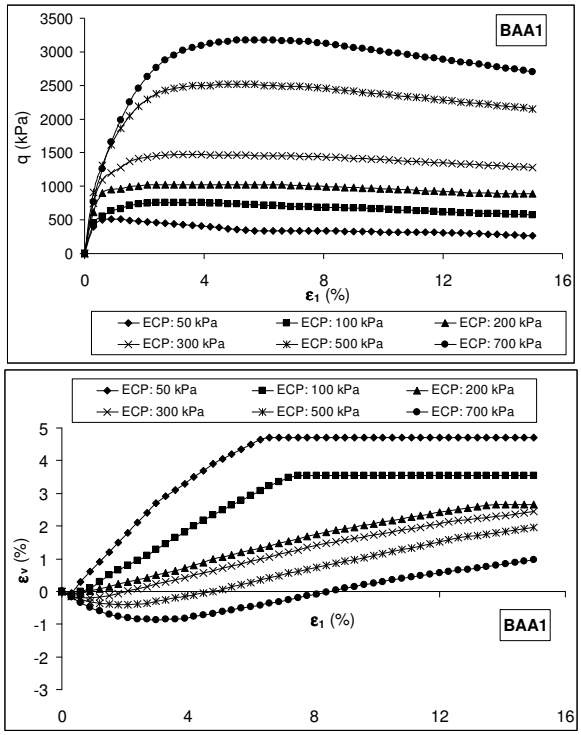
شکل ۳ تغییرات شاخص شکست در برابر تنش محدود کننده دو نوع مصالح سنگ‌ریزه‌ای و رودخانه‌ای را نشان می‌دهد. اگرچه داده ها پراکنده هستند، B_g اندکی با افزایش $\sigma_3^{'}$ افزایش

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8]

می‌یابد که نرخ نظیر برای مصالح سنگ‌ریزه‌ای اندکی بیش‌تر است.

اثر اندازهٔ دانه و تنش محدود کننده روی B_g برای مصالح سنگ‌ریزه‌ای در مقایسه با مصالح رودخانه‌ای قابل توجه است [۲۵]. لذا شکست دانه یکی از دلایل اصلی کاهش اتساع و نسبت تنش‌های اصلی با افزایش تنش محدود کننده است.



شکل ۱. منحنی‌های تنش-کرنش محوری-کرنش حجمی مصالح BAA1

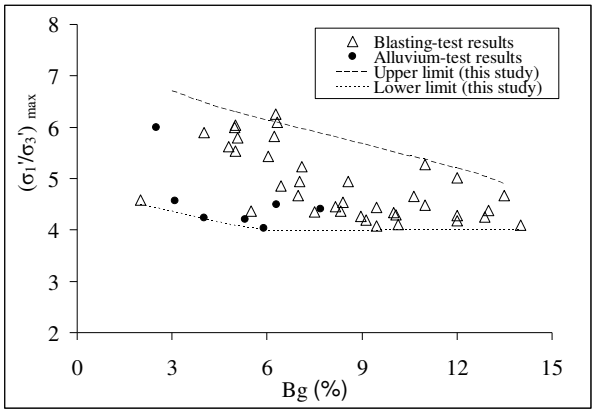
تخمین شاخص شکست ذرات در آزمایش سه‌محوری

در ادامه، روشی برای محاسبهٔ مقدار شکست ذرات در طول آزمایش سه‌محوری ارائه می‌شود. یونگ[۱] و چن[۲] (۲۰۰۰) با استفاده از اصل مینیمم انرژی (راو[۳] ، ۱۹۶۲) و با در نظر گرفتن شکست ذرات، برای مصالح ماسه‌ای رابطه تنش-اتساع را ارائه دادند. طبق اصل مینیمم انرژی راو، شکست و لغزش ذرات در سویی اتفاق می‌افتد که انرژی جذب شده داخلی حداقل باشد.

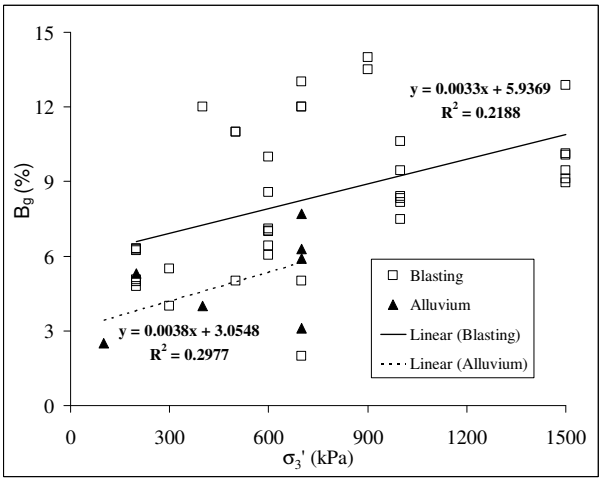
۱. Ueng ۲. Chen ۳. Rowe

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8]



شکل ۲. تغییرات $(\frac{\sigma_1'}{\sigma_3'})_{max}$ در برابر B_g



شکل ۳. تغییرات B_g در برابر σ_3'

با توجه به این‌که در حال حاضر از نتایج آزمایش‌های سه‌محوری به‌صورت وسیع در تعیین پارامترهای مقاومتی و تغییرشکلی مصالح خاکی و سنگ‌ریزه‌ای استفاده می‌شود لذا شکل ٤ که نمونه سه‌محوری متقارن تحت برش تحت شرایط زه‌کشی‌شده را در نظر می‌گیریم. می‌دانیم که در مصالح دانه‌ای، لغزش دانه‌ها و شکست دانه با هم‌دیگر رخ می‌دهد. بار عمودی F_{1i} و بار افقی F_{3i} را در مرز i بین دو دانه که تحت بار اعمالی دچار لغزش می‌شوند را در نظر بگیرید.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8]

سطح لغزش، زاویه β_i با صفحه تنش‌های اصلی حداکثر، σ_1'، می‌سازد. اگر N_i و S_i به‌ترتیب نیروی بار عمودی و مقاومت در سطح لغزش باشند با حل مجدد F_{1i} و F_{3i} می‌توان نشان داد که:

$$N_i = F_{1i}\sin\beta_i + F_{3i}\cos\beta_i \quad (۱)$$

$$S_i = F_{1i}\cos\beta_i - F_{3i}\sin\beta_i \quad (۲)$$

که S_i را می‌توان با فرض چسبندگی برابر صفر طبق رابطهٔ موهرکلمب بیان کرد:

$$S_i = N_i \tan\phi_\mu \quad (۳)$$

که ϕ_μ زاویهٔ اصطکاک بین دو دانه است. اگر δu_i جابه‌جایی جزئی در مرز i در امتداد لغزش باشد مؤلفه‌های افقی δx_i و عمودی δy_i جابه‌جایی δu_i را می‌توان با این روابط بیان کرد:

$$\delta x_i = \delta u_i \sin\beta_i \quad (٤)$$

$$\delta y_i = \delta u_i \cos\beta_i \quad (٥)$$

$$\delta x_i = \delta y_i \tan\beta_i \quad (٦)$$

اگر شکست دانه هم علاوه بر لغزش دانه‌ها در مرز تماس i رخ دهد در آن صورت کل کار انجام شده توسط F_{1i} و F_{3i} صرف غلبه بر مقاومت اصطکاکی و شکست دانه‌ها می‌شود:

$$F_{1i}\delta y_i - F_{3i}\delta x_i = N_i \tan\phi_\mu \delta u_i + \delta E_{bi} \quad (۷)$$

که δE_{bi} مقدار جزئی انرژی مصرف شده در طول شکست ذرات در مرز i به‌ازای جابه‌جایی δu_i است. با جای‌گزینی معادلات (۱)، (۵) و (٦) در معادله (۷) داریم:

$$F_{1i}\delta y_i - F_{3i}\delta y_i \tan\beta_i = F_{1i}\delta y_i \tan\beta_i \tan\phi_\mu + F_{3i}\delta y_i \tan\phi_\mu + \delta E_{bi} \quad (۸)$$

اگر n_1، n_2 و n_3 متوسط تعداد تماس در واحد طول به‌ترتیب در امتداد سه مؤلفهٔ تنش اصلی σ_1'، σ_2' و σ_3' منظور کنیم، متوسط نیروهای تماسی و مولفه جابه‌جایی عمودی را می‌توان بدین‌صورت نوشت:

$$F_{1i} = \frac{\sigma_1'}{n_2 n_3} \quad (۹)$$

$$F_{3i} = \frac{\sigma_3'}{n_1 n_2} \quad (۱۰)$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8]

$$\delta y_i = \frac{\delta\varepsilon_1}{n_1} \qquad (۱۱)$$

$\delta\varepsilon_1$ کرنش جزئی اصلی حداکثر است. از جای‌گزینی معادلات (۹)، (۱۰) و (۱۱) در معادله (۸) داریم:

(۱۲)

$$\sigma_1'\delta\varepsilon_1 - \sigma_3'\delta\varepsilon_1(\tfrac{n_3}{n_1})\tan\beta_i = \sigma_1'\delta\varepsilon_1\tan\beta_i\tan\phi_\mu + \sigma_3'\delta\varepsilon_1(\tfrac{n_3}{n_1})\tan\phi_\mu + \delta E_{bi}(n_1n_2n_3)$$

که $n_1n_2n_3$ تعداد کل تماس در حجم محیط دانه‌ای است. اگر $\delta E_B = \delta E_{bi}(n_1n_2n_3)$ = انرژی جزئی صرف شده در اثر شکست دانه در واحد حجم دانه‌ها در اثر کرنش جزئی $\delta\varepsilon_1$ فرض شود و $r_n = (n_3/n_1)$، در آن صورت معادله (۱۲) بدین‌صورت می‌شود:

$$\sigma_1'\delta\varepsilon_1 - \sigma_3'\delta\varepsilon_1 r_n\tan\beta_i = \sigma_1'\delta\varepsilon_1\tan\beta_i\tan\phi_\mu + \sigma_3'\delta\varepsilon_1 r_n\tan\phi_\mu + \delta E_B \qquad (۱۳)$$

با جای‌گزینی پارامترهای معمول تنش موثرمتوسط ($p' = (\sigma_1' + 2\sigma_3')/3$) و تنش برشی($q = \sigma_1' - \sigma_3'$) به جای σ_1' و σ_3' رابطهٔ (۱۳) بدین‌صورت درآید:

$$(p' + \frac{2q}{3})\delta\varepsilon_1 - (p' - \frac{q}{3})\delta\varepsilon_1 r_n\tan\beta_i = (p' + \frac{2q}{3})\delta\varepsilon_1\tan\beta_i\tan\phi_\mu + (p' - \frac{q}{3})\delta\varepsilon_1 r_n\tan\phi_\mu + \delta E_B \qquad (۱٤)$$

با مرتب کردن رابطهٔ (۱٤) داریم:

(۱۵)

$$\frac{q}{p'} = \frac{r_n\tan(\beta_i + \phi_\mu) - 1}{[\frac{2}{3} + \frac{1}{3}r_n\tan(\beta_i + \phi_\mu)]} + \frac{\delta E_B}{p'\delta\varepsilon_1[\frac{2}{3} + \frac{1}{3}r_n\tan(\beta_i + \phi_\mu)][1 - \tan\beta_i\tan\phi_\mu]}$$

در حالت محدود تغییرجزئی کرنش‌های اصلی حداکثر (یعنی حالتی‌که $\delta\varepsilon_1 \to ۰$)، $\delta\varepsilon_1$ باید با تفاوت جزئی $d\varepsilon_1$، و همین‌طور δE_B، δy_i و δx_i با تفاوت جزئی dE_B، dy_i و dx_i جای‌گزین شوند. بنا بر این در حالت حدی (یعنی حالتی که $\delta\varepsilon_1 \to ۰$)، عبارت $\delta E_B/\delta\varepsilon_1$ سمت راست معادلهٔ (۱۵) به $dE_B/d\varepsilon_1$ تبدیل شده که بیان‌گر نرخ انرژی صرف شده در حین شکست در اثر برش است. راو (۱۹٦۲) پیشنهاد کرد که زاویهٔ اصطکاک بین دانه‌ها ϕ_μ با ϕ_f، زاویهٔ اصطکاک بعد از اصلاح اثر اتساع جای‌گزین شود. مقدار ϕ_f متغییر بین ϕ_μ برای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8]

مصالح متراکم تا ϕ_{cv} برای مصالح خیلی سست در حالت حجم ثابت است. اختلاف بین ϕ_f و ϕ_μمرتبط به انرژی صرف شده برای آرایش مجدد دانه‌ها در حین برش در محیط دانه‌ای است. لازم به ذکر است که ϕ_fزاویهٔ اصطکاک مصالح سنگ‌ریزه‌ای بدون درنظرگرفتن اتساع و شکست ذرات است. بررسی‌ها نشان داد که ϕ_f زاویهٔ اصطکاک مصالح سنگ‌ریزه‌ای در تنش‌های محدود کننده مؤثر کم‌تر از ۲۰۰ kPa به‌شرط ایجاد شرایط حجم ثابت و در کرنش نظیر حالت حجم ثابت است. براساس اصل نسبت انرژی حداقل، تغییرشکل برشی توده دانه‌ای زمانی رخ می‌دهد که در هر مرز تماس i، نسبت انرژی ($ER_i = F_{1i}\delta y_i / F_{3i}\delta x_i$) حداقل شود. با بسط عبارت ER_iو فرض $d(ER_i)/d\beta = ۰$ می‌توان امتداد لغزش در مرز تماس i(یعنی $\beta_i = \beta_c$) برای شرایط نسبت حداقل انرژی را به‌دست آورد. به‌عبارت دیگر زمانی که $ER_i = ER_{\min}$ باشد $\beta_i = \beta_c$ است. با استفاده از اصل نسبت انرژی حداقل [۲٤]، مقادیر r_n و β_c را بدین‌صورت به‌دست آوردند:

$$r_n = (1 - \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1}) / \tan\beta_c \qquad (۱٦)$$

$$\beta_c = 45^\circ - \phi_f / 2 \qquad (۱۷)$$

که $d\varepsilon_v$کرنش حجمی جزئی محدود (حالت فشرده شدن مثبت فرض شود) در اثر کرنش محوری $d\varepsilon_1$ در آزمایش سه‌محوری است.

با جای‌گزینی معادلات (۱٦) و (۱۷) و ϕ_μ با ϕ_f و $\beta_i = \beta_c$در معادلهٔ (۱۵) و استفاده از عبارات دیفرانسیل جزئی، نسبت تنش تفاضلی به‌صورت زیر در می‌آید:

(۱۸)

$$\frac{q}{p'} = \frac{(1-\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1})\tan^2(45^\circ + \frac{\phi_f}{2}) - 1}{[\frac{2}{3} + \frac{1}{3}(1-\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1})\tan^2(45^\circ + \frac{\phi_f}{2})]} + \frac{dE_B(1+\sin\phi_f)}{p' d\varepsilon_1[\frac{2}{3} + \frac{1}{3}(1-\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1})\tan^2(45^\circ + \frac{\phi_f}{2})]}$$

کمیت $(1-\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1})$ بیان‌گر اتساع درهنگام برش است.

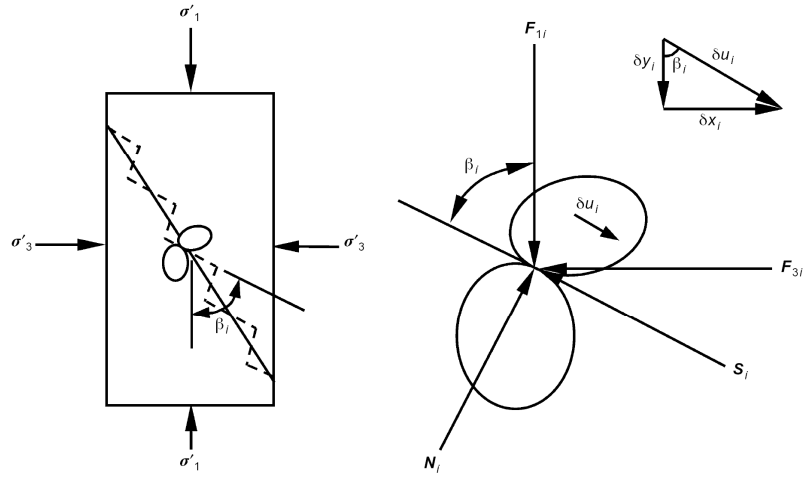
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8]

انرژی صرف شده درهنگام شکست ذرات را می‌توان به شاخص شکست دانه‌ها B_g نسبت داد. شاخص شکست مارسال (B_g) با افزایش کرنش محوری ($d\varepsilon_1$) افزایش می‌یابد و رابطهٔ خطی بین $dE_B / d\varepsilon_1$ و $dB_g / d\varepsilon_1$ وجود دارد. به‌عبارت دیگر:

$$dE_B = \beta dB_g \qquad (۱۹)$$

که در آن β ثابت تناسب است (**ایندراراتنا[1] و سلیم[2]، ۲۰۰۲ و ۲۰۰٤**).



شکل ٤. فشار سه‌محوری روی دانه‌های درشت‌دانه در نمونه سه‌محوری متقارن و مدل‌سازی تغییرشکل دندانه اره‌ای و جزئیات نیروها و تغییرشکل‌ها در مرز تماس دو دانه [۹]، [۲٤]، (ایندراراتنا و سلیم، ۲۰۰٤)

اگر فقط مؤلفه پلاستیک کرنش در نظرگرفته شده و فرض شود که هر افزایش جزئی تنش(dq و dp')، باعث رسیدن حالت تعدادی از دانه‌ها به حالت بحرانی لغزش می‌شود، و با جای‌گزینی رابطهٔ (۱۹)، رابطهٔ (۱۸) به‌رابطهٔ زیر تبدیل می‌شود:

(۲۰)

$$dB_g = \{dq d\varepsilon_1^p [\frac{2}{3} + \frac{1}{3}(1 - \frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_1^p}) \tan^2(45^\circ + \frac{\phi_f}{2})] - [(1 - \frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_1^p}) \tan^2(45^\circ + \frac{\phi_f}{2}) - 1] dp' d\varepsilon_1^p \} / [\beta(1 + \sin\phi_f)]$$

بنا بر این با محاسبهٔ شاخص شکست مارسال (B_g) در انتهای آزمایش و محاسبهٔ dE_B برای کرنش‌های محوری مختلف از رابطهٔ (۱۹) و با توجه به این‌که β در طول آزمایش ثابت است،

۱. Indraratna ۲. Salim

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8]

مقادیر B_g برای کرنش‌های محوری مختلف از رابطهٔ (۲۰) محاسبه می‌شود. مدل‌سازی تعدادی از آزمایش‌های سه‌محوری بـزرگ مقیاس و هم‌چنین تحلیل بـرگشتی تغییرشکل‌ها و تنش‌های ایجاد شونده در حین ساخت و اولین آب‌گیری سد بلند سنگ‌ریزه‌ای مسجدسلیمان نشان داد که مدل سخت‌شوندگی نرم‌افزار پلاکسیس[۱] از قابلیت بسیار مناسب در شبیه‌سازی رفتار مصالح سنگ‌ریزه‌ای دارد [۱]، [۲]، [۲۸]. این مدل زاویهٔ اتساع ψ را با استفاده از کرنش‌های حجمی و کرنش اصلی حداکثر بدین‌صورت در نظر می‌گیرد.

$$\frac{\varepsilon_v}{\varepsilon_1} = \frac{2\sin\psi}{1-\sin\psi} \qquad (۲۱)$$

لازم به‌ذکر است که پارامترهای سمت راست رابطهٔ (۲۰) جزء خروجی‌های مدل‌سازی با مدل رفتاری سخت‌شوندگی است. با توجه به به‌کارگیری اصل مینیمم انرژی راو (۱۹٦۲) در مدل سخت‌شوندگی [۲۱]، قابلیت اندازه‌گیری فاکتور شکست را می‌توان به مدل سخت‌شوندگی نرم‌افزار پلاکسیس[۱] اضافه کرد. نکته دیگر این‌که ϕ_f به‌عنوان پارامتر کلیدی در مدل‌سازی‌های شکست‌دانه‌ها است. توجه شود که برای تمام تنش‌های محدود کننده بررسی شده برای یک مصالح، اگر مقادیر انرژی شکست در برابر کرنش محوری dE_B منفی شد و یا مقادیر بزرگ‌تر از ۱ در سطح کرنش‌های کوچک برای dE_B به‌دست آمد مقادیر ϕ_f استفاده شده درست نیست.

نتایج تخمین مقدار شکست دانه

در شکل ۵ تغییرات زاویهٔ اصطکاک در برابر کرنش محوری در تنش‌های محدودکنندهٔ مختلف مصالح BAA1 ارائه شده است. مقدار زاویهٔ اصطکاک در هر سطح تنش محدودکننده براساس رابطه زیر و با فرض چسبندگی صفر محاسبه شده است.

$$\sin\phi' = \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{\sigma_1' + \sigma_3'} \qquad (۲۲)$$

نکتهٔ جالب توجه برابر بودن زاویهٔ اصطکاک ϕ_f برای تنش‌های محدود کنندهٔ ۵۰ و kPa ۱۰۰ و تفاوت چشم‌گیری آن با مقادیر نظیر در تنش‌های محدود کننده بیش‌تر است. براساس

۱. Plaxis

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8]

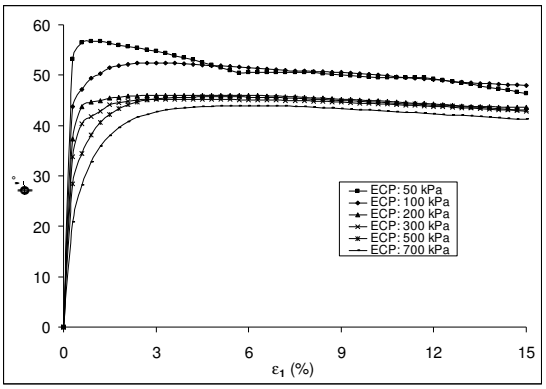
منحنی تنش-کرنش-تغیرحجمی مصالح BAA1 (شکل ۱) در تنش‌های محدود کنندهٔ ۵۰ و۱۰۰ kPa حالت حجم ثابت را در کرنش‌های بالا داریم.

یکی دیگر از پارامترهای کلیدی در محاسبه فاکتور شکست دانه‌ها، اتساع است. در شکل ٦ تغییرات زاویهٔ اتساع (طبق فرمول ۲۱) در برابر کرنش محوری در تنش‌های محدودکننده مختلف برای مصالح BAA1 نشان داده شده‌است. مقادیر حداکثر زاویهٔ اتساع (تقاطع منحنی‌ها در سمت مثبت محور با خط‌چین) تطابق خوبی با مقادیر حاصل از مدل‌سازی‌ها با مدل سخت شوندگی نرم‌افزار پلاکسیس دارد. مطابق شکل ٦ چنان‌که انتظار می‌رود در ابتدا به علت فشردگی نمونه حتی اتساع منفی (کاهش حجم داریم) و سپس چنان‌چه تنش محدودکننده برای نمونه کم باشد نمونه دچار یک اتساع زیاد و سپس کاهش اتساع را داریم. علت اتساع زیاد در کرنش‌های نزدیک به تنش تفاضلی حداکثر در تنش‌های محدودکننده کم ناشی از شرکت بیش‌تر دانه در افزایش مقاومت ناشی از اتساع، و کاهش مشارکت آن در سطح کرنش‌های بالا به‌علت محدود شدن مشارکت دانه‌های قابل اتساع در زون کوچک برشی است. در تنش‌های محدودکننده بالا از ابتدا یک فشردگی بزرگ مشاهده می‌شود، اما اثر مشارکت دانه در ایجاد اتساع به‌علت تنش محدود کننده بالا و شکست دانه‌ها محدود است.

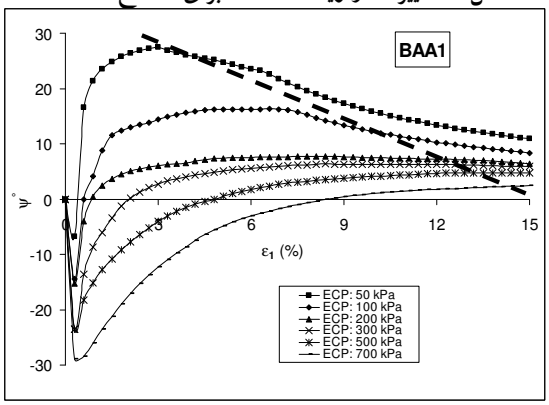
شکل ۷ تغییرات انرژی شکست در برای کرنش محوری مصالح BAA1 را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش تنش محدودکننده و کرنش محوری بر مقدار انرژی شکست افزوده می‌شود. چنان‌که در شکل مشاهده می‌شود در سطح کرنش‌های کوچک، منحنی انرژی شکست دارای یک انحنا به سمت بالا بوده و مقدار آن هم اندک می‌شود. این با واقعیت هم انطباق دارد زیرا در سطح کرنش‌های کوچک، بار تفاضلی اولیه صرف جابه‌جایی دانه‌ها قابل حرکت در نمونه می‌شود. نکته جالب توجه دیگر کاهش نرخ انرژی شکست در سطح تنش‌های محدودکننده کم در کرنش‌های محوری بزرگ است که علت آن می‌تواند ناشی از محدود شدن شکست دانه در زون برشی باشد. برعکس در تنش‌های محدودکننده بالا نرخ انرژی شکست خیلی بیش‌تر از مقادیر نظیر در سطح تنش‌های محدود کننده کم است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

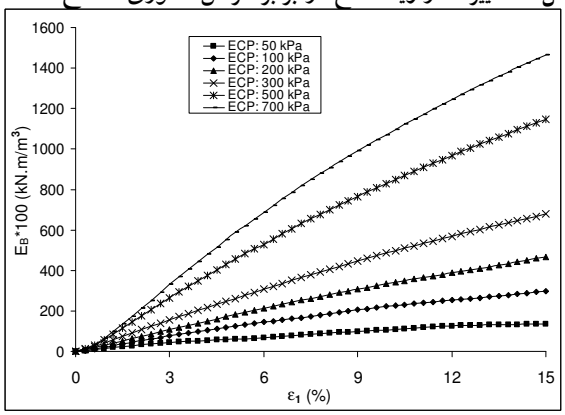
[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8]



شکل ۵. تغییرات زاویهٔ اصطکاک برای مصالح BAA1



شکل ٦. تغییرات زاویهٔ اتساع در برابر کرنش محوری مصالح BAA1

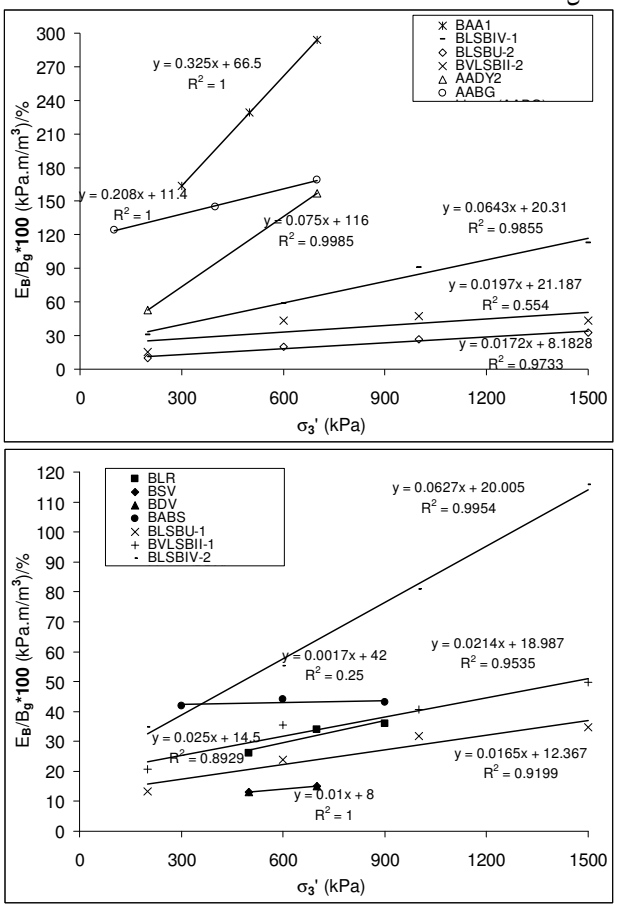


شکل ۷. تغییرات انرژی شکست در برای کرنش محوری مصالح BAA1

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8]

شکل ۸ رابطهٔ E_B/B_g در برابر σ'_3 در لحظهٔ گسیختگی مصالح مختلف را نشان می‌دهد. نکته جالب توجه وجود رابطه خطی بین پارامترهای یاد شده‌است. با تعمیم این ارتباط به سطح کرنش‌های غیر از گسیختگی می‌توان مقادیر فاکتور شکست در هر مرحله از کرنش محوری محاسبه کرد (شکل ۹).



شکل ۸. رابطهٔ E_B/B_g در برابر σ'_3

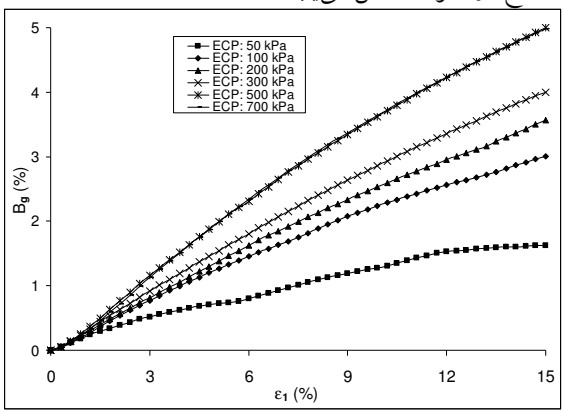
شکل ۱۰ رابطهٔ ψ° و E_B در برابر کرنش محوری در تنش‌های محدود کننده مختلف برای مصالح BAA1 را نشان می‌دهد. چنان‌که مشاهده می‌شود که با افزایش تنش محدود

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

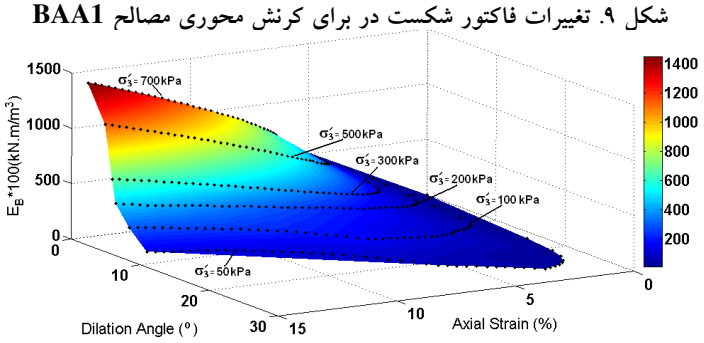
[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8]

کننده در کرنش‌های بالا، انرژی شکست افزایش، اما اتساع نمونه کاهش می‌یابد. ضمناً در اتساع‌های زیاد در آغاز اعمال برش، انرژی شکست کم است.

شکل ۱۱ رابطهٔ زاویه اتساع مدل‌سازی در برابرنسبت شاخص شکست مارسال به‌ترتیب در همهٔ کرنش‌ها و حالت حداکثر (مثبت) را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش فاکتور شکست مارسال، اتساع در نمونه کاهش می‌یابد.



شکل ۹. تغییرات فاکتور شکست در برای کرنش محوری مصالح BAA1



شکل ۱۰. تغییرات ψ° و E_B در برابر کرنش محوری مصا لح BAA1

در جدول ۲ مقادیر شاخص شکست حاصل در انتهای آزمایش‌های سه‌محوری و مدل‌سازی‌ها طبق فرمول ۲۰ و هم‌چنین نتایج انرژی شکست ارائه شده است. در شکل ۱۲ مقایسهٔ B_g حاصل از آزمایش با نتایج مدل‌سازی ارائه شده است. مشاهده می‌گردد که مدل پیشنهادی با دقت قابل قبولی قادر به تخمین B_g است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8]

جدول ۲. نتایج مدل‌سازی‌ها برای محاسبهٔ مقادیر شاخص شکست

نام مصالح سنگ‌ریزه‌ای	σ_3' (kPa)	ϕ'°_f در حالت بحرانی برای $\sigma_3' <$ ۲۰۰ kPa	Bg (%) گسیختگی		E_B*۱۰۰ (kN.m/m^3) (گسیختگی)	E_B/B_g*۱۰۰ (kN.m/m^3)/(%) گسیختگی	
			آزمایش شده	محاسبه‌شده		آزمایش شده	محاسبه‌شده
BLR	۱۰۰	٤٧	-	٤.٥	٧٧	-	١٧
	۳۰۰		-	٨.٨	١٩٣	-	٢٢
	۵۰۰		١١	١٠.٨	٢٩١	٢٦	٢٧
	۷۰۰		١٢	١٢.٨	٤٠٩	٣٤	٣٢
	۹۰۰		١٣.٥	١٣.٣	٤٩٢	٣٦	٣٧
	۱۲۰۰		-	١٤	٦٢٢	-	٤٤.٥
BSV	۱۰۰	٤٦.٥	-	٤.٤	٤٠	-	٩
	۳۰۰		-	٧.٦	٨٤	-	١١
	۵۰۰		١١	١١	١٤٠	١٣	١٣
	۷۰۰		١٢	١٢	١٨٠	١٥	١٥
BDV	۵۰	٤٦.٤	-	٦.٩	١٣.٤	-	١.٩٤
	۱۰۰		-	١١.٤	٣١.٥	-	٢.٧٦
	۲۰۰		-	١٢.٢	٥٣.٨	-	٤.٤١
	٤۰۰		١٢	١٢	٩٢.٣	٧.٦٩	٧.٦٩
	۷۰۰		١٣	١٣	١٦٤	١٢.٦١	١٢.٦١
	۱۲۰۰		-	١٣.٣	٢٧٦.٥	-	٢٠.٨١
BABS	۳۰۰	٤١	٥.٥	٥.٤	٢٢٩	٤٢	٤٢.٣
	٦۰۰		١٠	١٠.٣	٤٤٢	٤٤	٤٣
	۹۰۰		١٤	١٣.٩	٦٠٥	٤٣	٤٣.٧
BDZ	۱۰۰	٥٤	-	-	٨٨	-	-
	۲۰۰		-	-	٦٩٣	-	-
	٤۰۰		-	-	١٣٥٦	-	-
	۵۰۰		-	-	١٤٨٢	-	-
	۷۰۰		-	-	١٩٠٠	-	-
	۸۰۰		-	-	٢٢١٠	-	-
BAA1	۵۰	٤٩.٥	-	١.٧	١٣٦	-	٨٠.٤
	۱۰۰		-	٣.١	٣٠٠	-	٩٧
	۲۰۰		-	٣.٦	٤٧٣	-	١٣٠.٣
	۳۰۰		٤	٤	٦٥٧	١٦٤	١٦٣.٥
	۵۰۰		٥	٥	١١٤٣	٢٢٩	٢٣٠
	۷۰۰		٥	٥	١٤٧١	٢٩٤	٢٩٦.٥

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

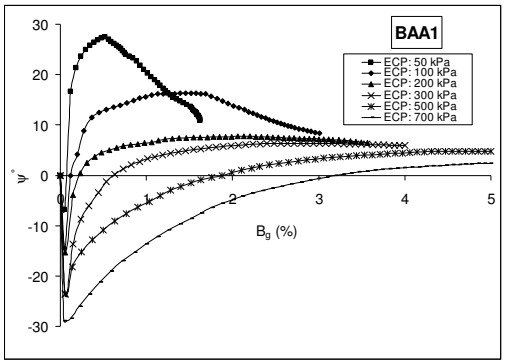
[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8]

نام مصالح سنگ‌ریزه‌ای	σ_3' (kPa)	ϕ'_f در حالت بحرانی برای ۲۰۰ kPa σ_3'<	Bg (%) گسیختگی		E_B*۱۰۰ (kN.m/m^3) (گسیختگی)	E_B/B_g*۱۰۰ (kN.m/m^3)/(%) گسیختگی	
			آزمایش شده	محاسبه‌شده		آزمایش شده	محاسبه‌شده
BAA1-re	۳۰۰	٤۹.٥	-	-	۷۲۳	-	-
	۷۰۰		-	-	۱۳۰٤	-	-
BAA2	٥۰	٤۷	-	-	۳۷	-	-
	۱۰۰		-	-	٦۸	-	-
	۳۰۰		-	-	۱۷۷	-	-
	۷۰۰		۲	-	۳٥۸	۱۷۹	-
BLSBU-1	۲۰۰	٤٤	٤.۸	٤.۱	٦٤	۱۳	۱٥.۷
	٦۰۰		۷	۷.٥	۱٦۷	۲٤	۲۲.۳
	۱۰۰۰		۷.٥	۸.۲	۲۳۸	۳۲	۲۸.۹
	۱٥۰۰		۱۰.۱	۹.٥	۳٥۲	۳٥	۳۷.۱
BVLSBII-1	۲۰۰	٤٦.۷	٥	٤.٤	۱۰۲.۹	۲۱	۲۳.۳
	٦۰۰		٦	٦.۷	۲۱۳.٦	۳٥	۳۱.۸
	۱۰۰۰		۸.۳	۸.٤	۳۳۹	٤۱	٤۰.٤
	۱٥۰۰		۹	۸.۷	٤٤۷	٥۰	٥۱.۱
BLSBIV-1	۲۰۰	٤۷.۳	٦.۳	٥.۸	۱۹۳	۳۱	۳۳.۲
	٦۰۰		۷.۱	۷.۱	٤۱۹	٥۹	٥۸.۹
	۱۰۰۰		۸.٤	۹	۷٦۱	۹۱	۸٤.٦
	۱٥۰۰		۹.۱	۸.۸	۱۰۳۱	۱۱۳	۱۱٦.۸
BLSBU-2	۲۰۰	٤٦.٥	٥.۱	٤.٤	٥۱	۱۰	۱۱.٦
	٦۰۰		٦.٤	۷	۱۳۰	۲۰	۱۸.٥
	۱۰۰۰		۸.۲	۸.٥	۲۱٦	۲٦	۲٥.٤
	۱٥۰۰		۱۲.۹	۱۲.٥	٤۲٤	۳۳	۳٤
BVLSBII-2	۲۰۰	٤٦.۹	٦.۲	۳.۸	۹٦.٦	۱٦	۲٥.۱
	٦۰۰		۷	۹.۲	۳۰٥	٤۳	۳۳
	۱۰۰۰		۹.٥	۱۰.۹	٤٤٦	٤۷	٤۰.۹
	۱٥۰۰		۹.٥	۸.۱	٤۱۳	٤٤	٥۰.۷
BLSBIV-2	۲۰۰	٤۷.٤	٦.۳	٦.۸	۲۲۰	۳٥	۳۲.٥
	٦۰۰		۸.٦	۸.۲	٤۷٤	٥٥	٥۷.٦
	۱۰۰۰		۱۰.٦	۱۰.٤	۸٦۰	۸۱	۸۲.۷
	۱٥۰۰		۱۰.۱	۱۰.۲	۱۱٦٥	۱۱٦	۱۱٤.۱
AADY1	۲۰۰	٤۰	-	-	٤۲	-	-
	٤۰۰		-	-	۷۹	-	-

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8]

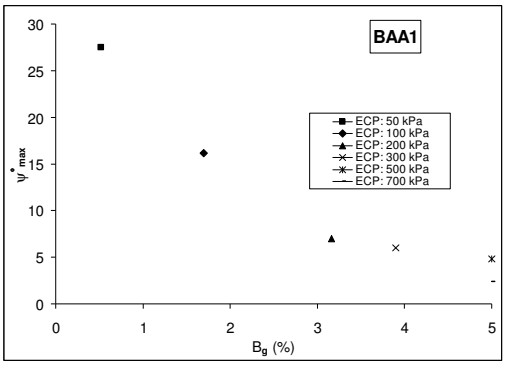
نام مصالح سنگ‌ریزه‌ای	σ_3' (kPa)	ϕ'°_f در حالت بحرانی برای ۲۰۰ kPa $\sigma_3'<$	Bg (%) گسیختگی		E_B*۱۰۰ (kN.m/m^3) (گسیختگی)	E_B/B_g*۱۰۰ (kN.m/m^3)/(%) گسیختگی	
			آزمایش شده	محاسبه‌شده		آزمایش شده	محاسبه‌شده
	۷۰۰		۷.۷	-	۱۲۷	۱۶	-
AADY2	۲۰۰	۳۷	۵.۳	۵.۳	۲۸۱	۵۳	۵۳
	۴۰۰		-	۶.۶	۶۲۸	-	۹۴.۶
	۷۰۰		۶.۳	۶.۳	۹۸۷	۱۵۷	۱۵۷
AADY2-re	۲۰۰	۳۷	-	-	۲۸۱	-	-
	۴۰۰		-	-	۶۲۲	-	-
	۷۰۰		-	-	۱۰۳۳	-	-
AABG	۱۰۰	۴۰.۶	۲.۵	۲.۵	۳۱۱	۱۲۴	۱۲۳.۵
	۴۰۰		۴	۴	۵۷۹	۱۴۵	۱۴۶
	۷۰۰		۵.۹	۵.۹	۱۰۰۰	۱۶۹	۱۶۸.۵
ADBS2	۲۰۰	۴۱	-	-	۸۳	-	-
	۴۰۰		-	-	۳۲۰	-	-
	۷۰۰		-	-	۵۱۴	-	-
ADBS1	۲۰۰	۴۱	-	-	۱۷۱	-	-
	۴۰۰		-	-	۲۹۰	-	-
	۷۰۰		۳.۱	-	۴۹۰	۱۵۸	-
AAA	۳۰۰	۴۰	-	-	۶۲	-	-
	۵۰۰		-	-	۱۱۶	-	-
	۷۰۰		-	-	۱۶۷	-	-



الف

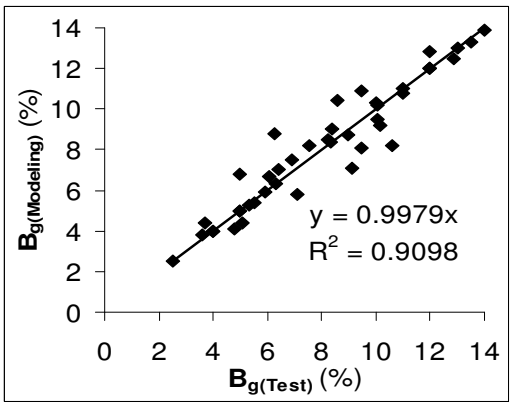
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8]



ب

شکل ۱۱. رابطهٔ زاویهٔ اتساع مدل‌سازی در برابر نسبت شاخص شکست مارسال، الف) همهٔ ب) حداکثر (مثبت)



شکل ۱۲. مقایسهٔ B_g حاصل از آزمایش با نتایج مدل‌سازی

جمع‌بندی

در این مقاله ضمن بررسی نتایج شکست ذرات در تعدادی آزمایش سه‌محوری، روشی برای محاسبهٔ مقدار شکست دانه‌ها با استفاده از اصل مینیمم انرژی راو (۱۹۶۲) در هر سطح از کرنش محوری ارائه شد. خلاصه نتایج بدین شرح است:

- با افزایش B_g مقدار $(\sigma_1^{'}/\sigma_3^{'})_{max}$ کاهش می‌یابد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8]

- B_g اندکی با افزایش σ_3' افزایش می‌یابد که نرخ نظیر برای مصالح سنگ‌ریزه‌ای اندکی بیش‌تر از مقادیر نظیر رودخانه‌ای است.
- با افزایش تنش محدود کننده و کرنش محوری بر مقدار انرژی شکست افزوده می‌شود.
- بین E_B/B_g و σ_3' در لحظه گسیختگی مصالح مختلف رابطهٔ خطی وجود دارد.
- در سطح کرنش‌های کوچک، منحنی انرژی شکست دارای یک انحنا به سمت بالا بوده و مقدار آن هم اندک است. نرخ انرژی شکست تحت تنش‌های محدود کننده کم در کرنش‌های محوری بزرگ، کاهش می‌یابد که علت آن می‌تواند ناشی از محدود شدن شکست دانه در زون برشی باشد. برعکس در تنش‌های محدود کننده بالا، نرخ انرژی شکست خیلی بیش‌تر از مقادیر نظیر در سطح تنش‌های محدود کننده کم است.
- با افزایش فاکتور شکست مارسال، اتساع در نمونه کاهش می‌یابد.

قدردانی

این تحقیق با کمک مالی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و امکانات آزمایشگاهی بخش ژئوتکنیک انجام شد که بدین وسیله تشکر می‌گردد.

منابع

1. Aghaei Aaraei A., "Back Analysis of Deformations Induced During First Impounding of the Masjed-E-Soleyman Dam", M.Sc. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran (2002).
2. Aghaei Araei A., Soroush A., Rayhani M., "Large-Scale Triaxial Testing and Numerical Modeling of Rounded and Angular Rockfill Materials", Scientia Iranica, Transaction A: Civil Engineering, Sharif University of Technology, Vol.17 (3) (2010) 169-183.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8]

3. Bilam J., "Some aspects of the behavior of granular materials at high pressures, In Stress-Strain Behavior of Soils: Proceedings of the Roscoe Memorial Symposium", Cambridge, 29-31 March 1971, Edited by R. H. G. Parry. G. T. Foulis & Co. Ltd., Henley-on-Thames, UK. (1971) 69-80.
4. Hamidi A., Yazdanjou V., Salimi N., "Shear strength characteristics of sand-gravel mixtures", The International Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 3 (1) (2009a) 29-38.
5. Hamidi A., Alizadeh M., Soleimani S. M., "Effect of Particle Crushing on Shear Strength and Dilation Characteristics of Sand-Gravel Mixtures" Vol. 7(1) (2009b) 61-71.
6. Hardin B. O., "Crushing of soil particles", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 111(10) (1985) 1177-1192.
7. Hazen A., "Discussion of Dam on Sand Foundation", by A. C. Koenig, Transaction ASCE, New York, N.Y., 73 (1911).
8. Hirschfeld R. C., Poulos S. J., "High-pressure triaxial tests on a compacted sand and an undisturbed silt", Laboratory Shear Testing of Soils, ASTM, Special Technical Publication, Vol. 361 (1963) 329-339.
9. Indraratna B., Salim W., "Modelling of particle breakage of coarse aggregates incorporating strength and dilatancy", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, London, Vol. 155(4) (2002) 243-252.
10. Indraratna B., Ionescu D., Christie H. D., "Shear behavior of railway ballast based on large-scale triaxial tests", Journal of Geotechnical and Geoenvirnomental Engineering, Vol. 124(5) (1998) 439-449.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8]

11. Lade P. V., Yamamuro J. A., Bopp, P. A., "Significance of particle crushing in granular materials, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering", Vol. 122 (4) (1996) 309-316.

12. Lee K. L., Farhoomand I., "Compressibility and crushing of granular soils inanisotropic triaxial compression", Can. Geotech. J., Ottawa, Canada, Vol. 4(1) (1967) 68-86.

13. Leslie D. D., "Large scale triaxial tests on gravelly soils", Proceeding of the 2nd Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brazil, Vol.1 (1963) 181-202.

14. Marachi N. D., Chan C. K., Seed H. B., "Evaluation of properties of rockfill materials", J. SMFE, Vol. 98 (1972) 95–114.

15. Marsal R. J., "Large scale testing of rockfill materials", Journal of the soil Mechanics and Foundations Div., ASCE, Vol. 93 (SM2) (1967) 27-43.

16. Miura N., O-hara S., "Particle crushing of decomposed granite soil under shear stresses", Soils and Foundations, Vol. 19 (3) (1979) 1-14.

17. Plaxis7.2, User Manual, Brinkgreve R. B. J. and Vermeer, P. A.

18. Rowe P. W., "The stress-dilatancy relation for the static equilibrium of an assembly of particles in contact", Proc. rock society, A269 (1962) 500-527.

19. Russell A. R., Khalili N., "A bounding surface plasticity model for sands exhibiting particle crushing", Can. Geotech. J., Vol. 41 (2004) 179-1192.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8]

20. Salim W., Indraratna B., "A new elastoplastic constitutive model for coarse granular aggregates incorporating particle breakage", Can. Geotech. J., Vol. 41 (2004) 657-671.

21. Schanz T., Vermeer P. A., Bonnier P. G., "Formulation and verification on the Hardening Soil Model", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geotechnics (1998) 281-296.

22. Soroush A., Aghaei Araei A., "Analysis of behavior of a high rockfill dam", Proc. of the Institution of Civil Engng., Geotechnical Engng 159, Issue GEI, Paper 13980 (2006) 49-59.

23. Sudhindra C., Venkatachalam K., Soni M. L., Sivakumar N., Sharma P., "Large size triaxial shear tests on rockfill materials for design parameters", Proc. 56th Research and Development Session, CBIB, Hyderabad (1991) 29-34.

24. Ueng T. S., Chen T. J., "Energy aspects of particle breakage in drained shear of sands", Géotechnique, Vol. 50(1) (2000) 65-72.

25. Varadarajan A., Sharama K. G., Venkatachalam K., Gupta A. K., Testing and modeling two rockfill mareials", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, March (2003) 206-218.

26. Varadarajan A., Sharma K. G., Abbas S. M., Dhawan A. K., "Constitutive model for rockfill materials and determination of material constants", International journal of Geomechanics, ASCE / July/August (2006) 226-237

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8]

27. Venkatachalam K., "rediction of mechanical behavior of rockfill materials" PhD thesis, Indian Institute of Technology, Delhi, India (1993).

۲۸. آقایی‌آرایی، ع.، سروش. ع، طباطبایی، س.ه، قلندرزاده، ع.، *ارزیابی رفتار سه‌محوری مونوتونیک مصالح شنی*، پروژه تحقیقاتی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن(۱۳۸۹).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.2.1.8]