مدل کردن تودهٔ سنگ با یک دسته درز موازی

دکتر احمد فهیمی فر
دانشیار
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

مدل سازی توده سنگی که شامل یك دسته درز موازی باشد در این مقاله مورد بررسی قرار می گیرد. با استفاده از مدل المان درز و رفتار خطی برای سنگ بکر و رفتار غیر خطی برای درزها مدل ارائه شده تحلیل می گردد. تفاوت رفتار یك تك درز در توده سنگ با رفتار توده سنگ وقتی که شامل یك دسته درز موازی باشد مورد ارزیابی و بحث قرار می گیرد و نکات افتراق آنها مشخص می گردد.

برنامه ای کامپیوتری برای تحلیل توده سنگ با یك مجموعه درز ارائه می شود که قادر به تحلیل تنش ها و تغییر شکل ها در توده سنگی بکر و درز دار می باشد. در ادامه تعدادی مدل های توده سنگ با یك، دو و سه درز موازی تحلیل شده و عوامل مختلف و موثر بر رفتار توده سنگ درزدار در این مدل ها مورد بررسی قرار می گیرند.

کلمات کلیدی

دسته درز، توده سنگ، المان درز

Modelling of Rock Mass Containing a Joint set

A. Fahimifar
Associat Professor
Department of Civil Engineering,
Amirkabir University of Technology

Abstract

Modelling of a rock mass containing a joint set has been studied in this paper. The model has been analysed on the basis of joint element, linear behaviur for intact rock, and non-linear behaviur for the joints. Difference in behavior of a single joint in a rock mass with behaviur of a rock mass containing a joint set is evaluated and discussed.

A computer program has been prepared for analysis of rock mass with a joint set which is able to analyze stresses and deformations both in intact and jointed rock mass. A number of rock mass models containing one joint, two parallel joints and tree parallel joints are analyzed and various factors affecting rock mass have been assessed.

Keywords

Model, Joint Set, Rock Mass, Joint element

مقدمه

توده های سنگی بعلت وجود عوارض گوناگون ساختاری از قبیل صفحات لایه بندی، درزها، ترک ها، گسل ها و ... توده هایی همگن و ایزوترپ نیستند. در نتیجه استفاده از اصول الاستیسیته و فرض رفتار خطی برای تحلیل این توده ها اغلب دور از واقعیت بوده و نتایج قابل قبول بدست نمی آید.

برای رسیدن به راه حل مناسب برای تحلیل رفتاری توده های سنگی، با توجه به گسترش روش های عددی، به نظر می رسد یکی از روش های مطمئن مدل کردن عوارض موجود در تودهٔ سنگ باشد. با توجه به وجود درزها در توده های سنگی که معمول ترین نوع ناپیوستگی در این توده ها است، ارائه مدلی که بتواند تودهٔ سنگ با دسته درزهای موازی را تحلیل نماید، می تواند گامی به جلو در حل دقیق و ارزیابی مناسب توده های سنگی باشد.

بسته به تعداد، جهت داری و طبیعت ناپیوستگی ها، قطعات سنگی بکر جابجا شده، چرخیده و یا شکسته و خرد می شوند که این اعمال در پاسخ به تنش هایی است که به تودهٔ سنگ وارد می شود (هوک، ۱۹۸۳). یعنی توده سنگ بسته به شرایط مرزی خود و مقدار و جهت تنش های وارد بر آن می تواند دچار تغییر شکل های متفاوت از قبیل چرخش، برش و غیره گردد. چنانچه تودهٔ سنگ دارای یک دسته درز موازی و با شرایط رفتاری یکسان باشد، تحت تنش های عمودی وبرشی می تواند فقط تغییر شکل های عمودی و برشی در هر درز و در تودهٔ سنگ اتفاق بیفتد. چنانچه دو دسته درز در تودهٔ سنگ وجود داشته باشد، علاوه بر تغییر شکل های عمودی وبرشی، تغییر شکل های خمشی و چرخشی نیز می تواند اتفاق بیفتد. این بدان معنی است که یک تودهٔ سنگ درزدار بسته به تعداد دسته درزها و خواص مکانیکی آنها می تواند درجات آزادی مختلفی داشته باشد و متناسب با هر درجهٔ آزادی سختی نظیر آن نیز باید برای درز تعریف گردد.

برای تحلیل عددی توده های سنگی درزدار اولین بار المان درز معرفی شد (گودمن ـ ۱۹۷۶). با این المان خاص، یک درز در تودهٔ سنگی مدل شده و ماتریس سختی آن تشکیل می شود و با المان های متعارف مثل المان مثلثی که برای مدل کردن قسمت بکر و سالم تودهٔ سنگ بکار می رود بهم بسته شده و تودهٔ سنگی مورد تحلیل قرار می گیرد. در این زمینه تحقیقات زیادی انجام شده است و این مدل برای تحلیل توده های سنگی با یک درز که تحت زاویه معینی نسبت به تنش اصلی بزرگتر قرار گرفته باشد مورد استفاده قرار گرفته است (فهیمی فر ۱۹۹۵ و ۱۹۹۶).

در این مقاله به بررسی رفتار یک مجموعه درز در توده سنگ می پردازیم. وجود چند درز در تودهٔ سنگ باعث می گردد که درزها بر یکدیگر تأثیر بگذارند و هر یک از درزها علاوه بر اینکه تحت تاثیر میزان بار قرار دارد، تحت تأثیر ترکیب و حضور درزهای دیگر در توده سنگ نیز قرار بگیرد و مدل ارائه شده توسط گودمن برای بیان رفتار یک تک درز صادق می باشد، اما این مدل به تنهایی قادر به بیان رفتار یک مجموعه درز نمی باشد. در واقع در مدل تک درز تاثیر پذیری درزها بر یکدیگر در نظر گرفته نمی شود.

برای بهتر روشن شدن تأثیر پذیری درزها بر یکدیگر به این مطلب می توان اشاره کرد که امکان دارد یک درز در یک مجموعه درز به حد گسیختگی خود برسد در حالیکه درزهای دیگر هنوز قادر به تحمل بارهای بیشتر باشند.

در این مقاله ابتدا به ارائه مدل یک مجموعه درز پرداخته و سپس عوامل مؤثر بر پارامترهای مختلف مدل ارائه شده بیان می گردد.

تفاوت رفتاری یک تک درز با یک مجموعه درز

مدل ساده شدهٔ یک تک درز مطابق شکل ۱ شامل یک فنر عمودی با سختی Kn و یک فنر افقی با سختی Ks می باشد. اگر بر اساس همین مدل ساده، مدل یک مجموعه درز را تعمیم دهیم، مدلی مشابه شکل ۲ که دارای چند زوج فنر عمودی و افقی به تعداد درزهای یک مجموعه درز می باشد، خواهیم داشت.

میزان سختی Kn در یک درز بستگی به میزان تنش های اولیه و عمودی درز دارد، در واقع میزان سختی Kn در یک درز تابع درجه یک از میزان تنش عمودی می باشد.

$$K_n = \frac{\sigma}{V_m} = f_1(\sigma_0) \qquad (۱)$$

چنانچه به هر دلیلی میزان σ_0 در درزهای مختلف در یک مجموعه درز متفاوت باشد، میزان سختی هر درز با دیگر درزها فرق خواهد داشت و میزان بسته شدن و یا باز شدن درز و یا در واقع میزان کرنش عمودی هر درز با دیگر درزها نیز متفاوت خواهد بود.

با توجه به اینکه میزان کرنش عمودی یک درز تابعی غیر خطی از تنش عمودی است (گودمن ۱۹۷۶)، کرنش عمودی مجموعهٔ درز که جمع آثار کرنش های عمودی کلیه درزها می باشد نیز یک منحنی خواهد بود، اما باید به این نکته توجه شود که ممکن است یک درز به میزان نهایی بسته شدن (یا باز شدن) خود برسد، در حالیکه درزهای دیگر هنوز قادر به پذیرش بیشتر تغییر شکل عمودی می باشند.

در مورد تغییر شکل برشی یک تک درز نیز بنا بر آنچه توسط لادنی و آرچامبولت (۱۹۷۰) و گودمن (۱۹۷۶) مورد بررسی قرار گرفت، میزان تنش پیک و تنش ماندگار هر دو تابعی از میزان تنش عمودی می باشند:

$$\tau_p = \frac{\sigma_n (1-a_a)(\dot{V} + \tan\phi_u) + a_s s_r}{1 - (1-a_s)\dot{V}\tan\phi_u} = f_2(\sigma_n) \quad (۲)$$

$$\tau_r = (B_0 + \frac{1 - B_0}{\sigma_c})\ \tau_\rho = f_3(\sigma_n) \quad (۳)$$

a_s: نسبتی از سطح درز که طی برش خرد شده و از بین می رود، $(\frac{dv}{du})$

$\dot{V}$: نرخ اتساع در مقاومت برشی نهایی،

τ_r: مقاومت برشی ماده سنگی بکر،

ϕ_u: زاویه اصطکاک داخلی سطح درز،

σ_0: تنش عمودی وارد بر درز،

τ_p: تنش برشی نهایی

B_0: ضریبی است که در $\sigma_r=0$ برابر با صفر و در $\sigma_n=\sigma_c$ برابر با واحد منظور می شود،

σ_c: مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر.

با توجه به این مطلب مشاهده می گردد که میزان تنش برشی پیک، تنش برشی ماندگار و سختی عمودی هر یک از درزها تحت تأثیر مستقیم میزان تنش عمودی می باشند.

در یک مجموعه درز امکان متفاوت بودن تنش های عمودی نظیر هر یک از درزها وجود دارد، این تفاوت تنش عمودی در هر یک از درزها در یک دسته درز به دو دلیل عمده می باشد. اولین عامل زاویه درزها نسبت به محورهای اصلی تنش بوده و دومین عامل نیروی وزن بلوک های سنگی است که در بین دو درز متوالی وجود دارد.

وقوع گسیختگی در المان درز

با توجه به اینکه المان درز تحت دو عملکرد رفتاری متفاوت یعنی تغییر شکل های عمودی و تغییر شکل های برشی قرار می گیرد، دو نوع گسیختگی را برای المان درز می توان پیش بینی نمود.

الف ـ گسیختگی عمودی

یک درز تحت تنش های عمودی σ_n به میزان مشخصی تغییر بعد عمودی را متحمل می گردد که این میزان تابعی غیر خطی مطابق شکل ۳ می باشد (گودمن ۱۹۷۶).

با توجه به این نمودار دو حالت گسیختگی عمودی برای درز امکان پذیر است. اول اینکه میزان تنش عمودی به حد میزان تنش ς کاهش یابد که در این حالت به سطح درز کمترین میزان تنش عمودی وارد می شود و درنتیجه درز به کشش می افتد. حالت دوم گسیختگی عمودی حالتی است که میزان تنش عمودی به حدی افزایش یابد که تغییر شکل عمودی درز به میزان V_m برسد. در این حالت منحنی تنش ـ تغییر شکل به بی نهایت میل می نماید. در واقع زمانی که تغییر شکل عمودی به V_m برسد، درز کاملاً بسته شده است و حداکثر بسته شدن درز (e) اتفاق افتاده است. در این حالت حدی، هیچ گونه خرابی در توده سنگ مشاهده نمی گردد، بلکه تودهٔ سنگی درزدار به یک توده سنگی بدون عارضه تبدیل می گردد و معیارهای شکست برای این توده، بعد از این حد، مشابه معیار خرابی برای توده سنگی عارضه دار نمی باشد.

در مدل ارائه شده در این مقاله میزان گسیختگی عمودی به دو حالت مرزی محدود شده است. حد پایین گسیختگی میزان تنش عمودی ς و حد بالای گسیختگی، ماکزیمم تغییر شکل عمودی المان درز ΔV برابر $0.95Vm$ درنظر گرفته شده است.

ب ـ گسیختگی برشی

با توجه به زاویه درز نسبت به محورهای اصلی تنش (x, y) امکان دارد، درز قبل از اینکه به میزان حداکثر تغییر شکل عمودی خود برسد میزان تغییر شکل برشی از حد تغییر مکان ماندگار (U_r) بیشتر گردد. برای یک تک درز گسیختگی برشی زمانی اتفاق می افتد که میزان تغییر مکان برشی (U) در المان درز از حد تغییر مکان برشی ماندگار (Ur) بیشتر گردد. (گودمن ـ ۱۹۷۶).

در مدل ارائه شده در اینجا حد بالا گسیختگی برشی به تغییر مکان ماندگار محدود شده است. تغییر مکان ماندگار (Ur) تابعی از تغییر مکانی برشی پیک بوده و تغییر مکان برشی پیک خود تابعی از تنش برشی پیک و سختی برشی درز می باشد و نیز تنش برشی پیک تابعی از شرایط فیزیکی درز و نیز تابعی از تنش عمودی درز می باشد. بنابراین تغییر مکان برشی ماندگار نیز تابعی از تنش عمودی درز خواهد بود (به روابط ۱، ۲ و ۳ توجه شود).

تأثیر زاویه درزها در یک مجموعه درز

فرض می شود تنش های وارد بر توده سنگ در دو جهت اصلی x و y اعمال می گردند، در این صورت تنش های وارد بر درز شامل تنش های عمودی درز σ_n و تنش برشی در راستای درز می باشند که میزان آنها بستگی به میزان زاویه β (زاویه بین سطح درز با محور xها) دارد. همانطوریکه گفته شد گسیختگی در درز به دو گونه اتفاق می افتد. در این

صورت وقوع هر دو نوع گسیختگی بستگی به میزان زاویه β و تنش های وارده بر درز دارد.

اگر در یک توده سنگی که دارای چند درز مجزا می باشد، زاویه درزها با هم برابر باشند، میزان تنش های عمودی و برشی ناشی از تنش های اولیه در همه درزها یکسان می باشد. این امر زمانی صادق است که از عوامل مؤثر دیگر مثل وزن توده سنگی صرف نظر شود. اگر از عامل وزن هر بلوک صرف نظر گردد میزان تنش های عمودی و برشی در هر یک از درزهای یک دسته درز موازی یکسان خواهد بود و اگر سایر خواص درزها با یکدیگر یکسان باشد، احتمال وقوع گسیختگی در کلیه درزها یکسان خواهد بود. با قبول این شرایط می توان تودهٔ سنگی با یک دسته درز معادل، برابر مجموع سختی عمودی و برشی کلیه درزها باشد، به دو دلیل عمده معادل سازی یک مجموعه درز موازی با یک درز معادل امکان پذیر نیست، زیرا اولاً عوامل دیگری چون وزن تودهٔ سنگی میان دو درز متوالی سبب می گردد که تنش های عمودی و برشی در درزها با هم یکسان نباشد، ثانیاً بدست آوردن سختی برشی معادل و سختی عمودی معادل درز به گونه ای که نماینده واقعی دسته درز باشند به سادگی قابل تعیین نمی باشد. لذا فرض معادل سازی درزهای موازی فرضی نامعقول و غیر قابل قبول است. به همین جهت برای آنالیز رفتاری یک مجموعه درز موازی احتیاج به مدل مناسب تری می باشد.

بعلاوه اگر در یک توده سنگی، زاویه درزها با یکدیگر یکسان نباشد، میزان سختی عمودی و تنش پیک متناسب با زاویه هر درز از درز مجاور خود متفاوت خواهد بود. در این حالت فرض یک درز معادل فرضی کاملاً غلط می باشد. در این حالت حتی اگر از پتانسیل وزن سنگ فی مابین درزها صرفنظر شود، میزان سختی عمودی متفاوت خواهد بود و شروع گسیختگی در المان درزها در یک زمان با هم اتفاق نخواهد افتاد. در واقع احتمال شروع گسیختگی تنها در یک المان درز امکان پذیر است، در حالیکه بقیه درزها قابلیت تحمل باربری بیشتری را دارند. بنابراین باید مدل ارائه شده این امکان را داشته باشد که هر یک از درزها را به تنهایی کنترل نماید.

تأثیر نیروی وزن در یک مجموعه درز

یک اختلاف فاحش بین یک مجموعه درز، با یک تک درز اختلاف نیروی وزن بلوک های سنگی است که در مابین دو درز متوالی وجود دارد. نیروی وزن بلوک های سنگی خیلی مهم بوده که صرفنظر کردن از آن، مدل را با تقریب زیادی مواجه می سازد.

برای روشن شدن مطلب توده سنگی درزداری با سه مجموعه درز افقی را در نظر می گیریم (شکل ۴).

با توجه به شکل واضح است که تنش های عمودی درهر یک از درزها ناشی از تنش اولیه σ_y و نیروی وزن بالای هر یک از بلوک های سنگی است. در واقع تنش عمودی وارد بر درز شماره J1 عبارت است از $\sigma_y + \frac{W_1}{A}$ و تنش عمودی متناظر با درز J2 برابر $\sigma_y + \frac{W_1 + W_2}{A}$ و متعاقباً تنش عمودی متناظر با درز شماره J3 برابر با $\sigma_y + \frac{W_1 + W_2 + W_3}{A}$ خواهد بود. همانطوریکه قبلاً اشاره شد، سختی عمودی هر یک از درزها متناسب با تنش عمودی وارد بر درز می باشد. بنابراین روشن است که سختی عمودی (Kn) هر یک از درزها با یکدیگر متفاوت می باشد. این مسئله هیچ منافاتی با یکسان بودن خواص فیزیکی و مکانیکی درزها ندارد. در واقع حتی اگر هر سه درز دارای مشخصات فیزیکی و مکانیکی یکسان باشند شروع گسیختگی درزها با یکدیگر هم زمان نخواهد بود. در ضمن اگر دسته درز نسبت به محور اصلی تنش ها (x, y) دارای زاویه باشد، تنها تنش های عمودی بر درزها تحت تأثیر نیروی وزن قرار نمی گیرد، بلکه تنش های برشی نیز متناسب با زاویه درز و میزان نیروی وزن بالای خود تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. نکته مهم این است که میزان تنش برشی پیک و متعاقباً تنش برشی ماندگار هر دو تابعی از میزان تنش عمودی درز می باشند و با تغییر تنش های عمودی در هر یک از درزها میزان این تنش ها نیز در هر درز متفاوت خواهد بود. بنابراین تفاوت اساسی یک مجموعه درز با یک تک درز مشهود می گردد. بدین گونه که در یک توده سنگی با یک درز می توان از میزان نیروی وزن صرفنظر نمود. (با توجه به این مطلب که میزان تنش های اولیه آنقدر زیاد باشد که میزان نیروی وزن قابل صرفنظر کردن باشد). اما در مورد یک مجموعه درز با توجه به تأثیر مستقیم نیروی وزن در سختی کل سیستم چشم پوشی از این نیرو قابل قبول نمی باشد. حتی اگر این نیرو به نظر ناچیز باشد که البته این مسئله بستگی به فاصله بین درزها خواهد داشت. به این ترتیب مشاهده می گردد که فاصله بندی درزها مسئله ای ثانوی برای تأثیر نیروی وزن می باشد. با توجه به این مطلب ذکر دو نکته ضروری بنظر می رسد:

نکته اول اینکه مدل ارائه شده در این مقاله برای تحلیل توده های سنگی عارضه دار با یک مجموعه درز موازی ارائه گردیده است. بنابراین فاصله بندی درزها بگونه ای اختیار می گردد که تأثیر نیروی وزن در آنها قابل توجه می باشد. اگر فاصله بندی درزها به قدری کوچک باشد که نیروی وزن قابل صرفنظر کردن باشد در این صورت توده سنگی شدیداً عارضه دار خواهد بود که در این صورت تودهٔ سنگ به سمت

محیطی پیوسته میل می کند که خارج از بحث این مقاله است.

نکته دوم این است که اساساً این مدل برای تحلیل یک سازه زیرزمینی مثل یک تونل می باشد و ابعاد تونل ها غالباً به میزانی است که به نظر می رسد وجود چند درز با فاصله بندی مثلاً ۱ تا ۳ متر می تواند در رفتار و پایداری سازه مؤثر باشد و طبعاً این فاصله بندی به قدری است که نیروی وزن ناشی از هر بلوک قابل ملاحظه بوده و تأثیر گذار خواهد بود.

تأثیر میزان بارگذاری

مسئله قابل توجه دیگر در مدل ارائه شده اثر میزان بارگذاری است. در مدل تک درز رفتار درز تحت بارگذاری معین، رفتاری غیر خطی است و حل غیر خطی رفتار به روش انتقال بار تحلیل می گردد.

این روش در مورد بارگذاری متعارف قابل اجرا است. (منظور از بارگذاری متعارف میزان بارگذاری است که باعث ایجاد تغییر مکان های خیلی بزرگ نشود). زیرا افزایش مراحل تکرار (ITRATION) باعث تجمع خطاهای محاسباتی می گردد، که درنهایت درصد خطای قابل ملاحظه ای را به همراه دارد.

به هر حال با قبول یک درصد خطای مجاز روش تکرار برپایه روش انتقال بار (LOAD TRANSFER METHOD) برای تحلیل یک تک درز که سختی سیستم تنها متناسب با میزان تنش های اولیه است قابل قبول می باشد. اما زمانی که توده سنگی شامل یک مجموعه درز می باشد، همانگونه که اشاره شد، سختی سیستم تنها متناسب با میزان تنش های اولیه نبوده، بلکه پارامترهای نیروی وزن بلوک های سنگی و نیز زاویه درزها نسبت به هم باعث بر هم خوردن سیستم سختی کل مجموعه می گردد.

برای روشن شدن اهمیت میزان بارگذاری و تأثیر آن در سیستم آنالیز شکل ۵ را در نظر می گیریم که تحت تنش های اولیه σ_x, σ_y قرار گرفته باشد. میزان تنش عمودی در درز σ_{n1} و میزان تنش برشی τ_1 می باشد.

سختی عمودی Kn متناسب با میزان σ_{n1} و نیز تنش برشی پیک τ_p متناسب با σ_{n1} محاسبه می گردد. اگر بر این سیستم میزان ΔF_1 نیروی خارجی وارد شود. مطابق آنچه قبلاً گفته شد میزان تنش ها در سطح درز به حد σ_{n2} و τ_2 افزایش می یابد. اگر پس از این مرحله یک نیروی خارجی دیگر به میزان ΔF_2 بر سیستم وارد شود، میزان سختی عمودی متناسب با σ_{n2} و تنش برشی پیک τ_p نیز متناسب با σ_{n2} محاسبه می شود. بنابراین سختی کل سیستم متناسب با تنش عمودی σ_{n2} که ناشی از تنش های اولیه و نیروی ΔF_1 می باشد محاسبه می گردد.

این مسئله در مورد یک تک درز می تواند بصورت توأم $\Delta F_1 + \Delta F_2$ در یک مرحله انجام پذیرد. لیکن اگر یک مجموعه درز داشته باشیم. این امر اساساً تغییر می کند. بدینگونه که نرخ رشد افزایش تنش عمودی در هر مرحله بارگذاری در هر یک از درزها می تواند متفاوت باشد. بعلاوه، برای ارائه مدل رفتاری برای تودهٔ سنگ بایک دسته درز باید افزایش تنش و تغییر شکل در هر گام از بارگذاری مشخص گردد. از این رو به کارگیری روش بارگذاری گام به گام امری ضروری است.

تأثیر تغییر شکل های ایجاد شده در هر مرحله بارگذاری(REMESHING)

برای تبیین مدل ارائه شده در این مقاله باید به یکی از مشکلات اساسی برای حل عددی مدل تک درز اشاره شود. این مشکل در هم رفتن المان های درز در یکدیگر می باشد. بدین مفهوم که پس از اعمال یک نیروی خارجی بر سیستم یکسری تغییر مکان درسازه بوجود می آید، که این تغییر مکان گره ای (شکل ۶) عبارتست از:

$$U = UB + UJ \qquad (۴)$$

که در این رابطه U تغییر شکل کل، UB تغییر شکل ناشی از بلوک سنگی (این تغییر شکل ها همان تغییر شکل های الاستیک توده سنگی بکر می باشد) و UJ تغییر مکان های گره ای در المان های درز می باشد که تغییر مکان های غیر خطی و برگشت ناپذیر است. مطابق شکل ۶ ـ الف در یک درز واقعی دیواره IJ و LK دارای فاصله ای به میزان e می باشند. که مقدار این فاصله (e) بستگی به حالت و وضعیت تنش های اولیه در توده سنگ دارد. تعیین تغییرات این فاصله (e) دربدو امر، کاری مشکل است. زیرا مقدار این فاصله بستگی به تنش های مؤثر عمودی بر درز دارد. بنابر همین محدودیت و فاصله ناچیز e مختصات گره ای K و L بر مختصات J و I منطبق فرض می شود.

پس از اعمال یک نیروی خارجی و بوجود آمدن تغییر شکل در توده سنگ شکل ۶ ـ الف به شکل ۶ ـ ب تبدیل می گردد. این پدیده که در شکل مشهود است همان پدیده در هم رفتن درز می باشند. با توجه به شکل ۶ ـ ب دو مسئله باید مورد توجه قرار گیرد:

الف ـ تغییر شکل عمودی

با توجه به شکل ۶ ـ ب مشاهده می گردد که یک میزان ΔV در المان درز اتفاق افتاده است که همان میزان بسته

شدن درز تحت اعمال بار خارجی ΔF می باشد که حداکثر ΔV همان مقدار e خواهد بود.

ب ـ تغییر شکل برشی

علاوه بر تغییر شکل عمودی ΔV، یک تغییر مکان برشی ΔU نیز در شکل ۶ـ ب مشهود می باشد. این تغییر مکان ΔU باعث کاهش طول مؤثر المان درز (یا در واقع سطح تماس بین دو بلوک سنگی بالا و پایین درز) می شود، بنابراین نیروی ایجاد شده در یک سطح کوچکتر اعمال می گردد. اگر قرار باشد پس از اعمال هر گام بارگذاری ماتریس سختی کل سیستم بر اساس مختصات جدید گره ها تشکیل شود، ادامه محاسبات با اشکال مواجه خواهد شد. به همین دلیل روش بارگذاری گام به گام در مدل المان درز همواره مشکل ساز می باشد. برای رفع این نقیصه در مدل ارائه شده در این مقاله و در برنامه کامپیوتری ارائه شده این مطلب به شکل زیر حل گردیده است.

با توجه به اینکه تغییر شکل های بلوک های سنگی (UB) در مقابل تغییر شکل های درز (UJ) ناچیز می باشد و در واقع سهم اساسی و اصلی تغییر شکل ها مربوط به تغییر شکل در درزها می باشند، می توان از تغییر شکل بلوک های سنگی در یک مرحله بارگذاری صرفنظر نمود. به این ترتیب می توان در مرحله بعدی بارگذاری فرض نمود که سیستم هندسهٔ اولیه خود را حفظ کرده است. با این تفاوت که تنش های موجود در بلوک سنگی دیگر تنش های σ_x و σ_y نمی باشد، بلکه تنش ها تبدیل به تنش های σ_x، σ_y و τ_{xy} که ناشی از تنش های اولیه بعلاوه بارگذاری خارجی ΔF بوده است شده اند. در مورد المان های درز نیز مطابق شکل ۶ ـ ب طول مؤثر المان درز (Le) در هر مرحله بارگذاری باید تصحیح گردد. بدین ترتیب اثرات ناشی از تغییر شکل های مراحل بارگذاری درنظر گرفته خواهد شد.

برنامهٔ کامپیوتری و ویژگی های آن

این برنامه قادر به تحلیل استاتیکی توده سنگی بکر (بدون درز) و یا یک توده سنگی درزدار در حالت دو بعدی می باشد. این برنامه بر اساس شرایط کرنش صفحه ای (PLANE STRAIN) تنظیم شده است و قادر به قبول دو نوع المان (المان سنگ بکر و المان درز) می باشد.

با توجه به محدودیت های برنامه (QUICK BASIC VER-4.5) حداکثر تعداد گره مورد استفاده 60 گره و حداکثر تعداد المان 100 می باشد (تعداد المان ها شامل مجموع المان های سنگ بکر و المان درز و حداکثر تعداد المان های درز نیز ۳۰ عدد می باشد).

مدل ماتریس سختی در این برنامه بصورت نرمال و عادی تنظیم می گردد و سپس تبدیل به دو بلوک KU و KR (KU قسمتی از ماتریس سختی است که در مورد درجات آزادی فعال مورد استفاده قرار می گیرد و KR آن قسمت از ماتریس سختی کل می باشد که در تعیین عکس العمل ها مورد استفاده قرار می گیرد). این برنامه قادر به ترسیم شکل هندسی مدل تحلیلی قبل و بعد از بارگذاری است. بارگذاری در این برنامه به دو صورت تنش های اولیه و بارگذاری گره ای انجام می پذیرد. دو مود تحلیلی در برنامه استفاده شده است.

مورد اول مربوط به مدل رفتاری است و مود دوم مربوط به تحلیل تنش در موارد کاربردی مثل تونل می باشد.

در مورد تحلیل رفتاری برنامه قادر به ارائهٔ نتایج رفتاری مثل تنش قائم ـ تغییر مکان قائم درزها و تنش برشی و تغییر مکان برشی می باشد. در این حالت، بارگذاری تا زمانی ادامه می یابد که درز به یکی از دو حالت گسیختگی (گسیختگی قائم و یا گسیختگی برشی) برسد. در حالیکه در مورد تحلیل تنش، بارهای خارجی به ۱۰ سری بارگذاری 0.1 نیروی خارجی تبدیل شده و تنش نهایی ناشی از ۱۰ مرحله بارگذاری بدست می آید.

مدل های رفتاری در برنامه

برنامهٔ ارائه شده شامل دو مدل رفتاری می باشد. مدل رفتاری خطی برای تودهٔ سنگی بکر و مدل رفتاری غیر خطی برای المان های درز. هر المان درز رفتاری غیر خطی داشته که برای تحلیل از دو روش بارگذاری تدریجی و روش حل تکرار توأماً استفاده شده است.

ماتریس سختی کل توده سنگ در هر گام بارگذاری ثابت بوده اما در هر مرحله سختی کل توده سنگی با توجه به شرایط تنش گام ماقبل تعیین می گردد.

بحث و نتیجه گیری

الف ـ مقایسه بین نتایج حاصل از مدل تک درز با مدل دسته درز

مقایسه ای بین رفتار توده سنگی با یک مجموعه درز با رفتار همان توده با یک تک درز انجام شده است. بدین منظور یک سری مدل های سه محوری کلاسیک مورد بررسی قرار گرفته اند و نتایج مربوطه که از اجرای برنامهٔ ارائه شده بدست آمده اند با یکدیگر مقایسه شده اند. برای مقایسه رفتاری بین یک تودهٔ سنگی با یک درز و یک توده سنگی با چند درز موازی نیاز به تعریف شاخص مناسبی است تا امکان مقایسه فراهم باشد. بدین منظور در این پژوهش از دو نوع منحنی رفتاری که به شکل زیر بیان می شود استفاده شده است:

۱ـ منحنی تنش عمودی متوسط درزها نسبت به مجموع تغییر مکان های عمودی درزها.

۲ـ منحنی تنش برشی متوسط درزها نسبت به مجموع تغییر مکان های برشی درزها.

مدل های آنالیز شده

در این تحقیق ۳ سری المان مورد آنالیز قرار گرفته است. بعلت نتایج بسیار زیاد تنها به ارائه یک نمونه از نتایج خروجی اکتفا می گردد.

اولین المان مربوط به توده سنگی با یک المان درز می باشد. این مدل شبیه یک نمونه آزمایش سه محوری کلاسیک بوده که تعداد ۱۲۰ نمونه مورد آنالیز قرار گرفته است. در این مدل تأثیر ۳ عامل بصورت عمده بررسی شده است، عوامل مورد بررسی عبارتند از:

- تأثیر زاویه درز نسبت به محور تنش اصلی کوچکتر(β).
- تأثیر عمق،
- تأثیر میزان فشارهای جانبی،

برای اینکه تأثیر زاویه درز (β) در مدل رفتاری و تنش های ایجاد شده مشخص شود مدل فوق تحت زاویه های ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰، ۶۵ و ۷۰ درجه مورد آنالیز قرار گرفته است. همچنین برای مشخص شدن تأثیر میزان عمق (تنش های اولیه)، مدل فوق در عمق های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰، ۱۰۰ متری سطح زمین آنالیز گردیده است. این بررسی برای تمام زاویای فوق الذکر صورت گرفته است. نهایتاً برای تعیین تأثیر میزان فشار جانبی این مدل در ۳ حالت k=0.5 و k=0.7 و k=1.0 مورد بررسی قرار گرفته است. K عبارت از نسبت تنش افقی به قائم می باشد.

دومین مدلی که مورد آنالیز قرار گرفته است مربوط به همان توده سنگی اول می باشد. با این تفاوت که دارای دو درز موازی است. در این مدل نیز مشابه مدل اول حالت های مختلف مورد آنالیز قرار گرفت و زاویه β مشابه مدل اول انتخاب گردید.

میزان تنش های اولیه نیز در این مدل مانند مدل اول در عمق های ۱۰ متری تا ۱۰۰ متری با پرش ۱۰ متر انجام گرفته است.

سومین مدلی که در این بررسی مورد آنالیز قرار گرفته است، مدلی مشابه مدل های قبلی است با این تفاوت که دارای سه درز موازی می باشد. این مدل نیز مطابق مدل های قبل برای حالت های مختلف تحلیل و زاویه درز (β) همان زوایای مدل دو درزی است. تنش های اولیه مانند حالت های قبل، تنش های متناظر با عمق های ۱۰ تا ۱۰۰ متر می باشد. شکل ۷ مدل تغییر شکل یافته برای حالت سه درز موازی را نشان می دهد. همچنین شکل ۸ نمودار تنش برشی ـ تغییر مکان برشی برای این حالت را نشان می دهد.

اثر زاویه درز با توجه به شکل های ۹ و ۱۰ قابل مشاهده می باشد. این نمودارها مربوط به مدل تک درز بوده که در تنشی متناظر با عمق ۵۰ متری و در شرایط k=0.5 بدست آمده است. در این نمودار ها ۴ منحنی مشاهده می گردد که مربوط به مقادیر مختلف زاویه β می باشد. نتایجی که از این گرافها بدست می آید به شرح زیر می باشد.

۱ـ میزان تنش برشی پیک با افزایش زاویه درز کاهش می یابد.
۲ـ سختی برشی (ks) با افزایش زاویه درز کاهش می یابد.
۳ـ اگر مساحت زیر منحنی تنش برشی ـ تغییر مکان برشی را بعنوان انرژی لازم برای رسیدن به تنش برشی حداکثر در نظر بگیریم مشاهده می شود که انرژی لازم برای این منظور با افزایش زاویه درز کاهش می یابد.
۴ـ میزان تغییر مکان عمودی درز با افزایش زاویه درز افزایش می یابد.
۵ـ میزان بارگذاری خارجی (تعداد دفعات بارگذاری برای رسیدن به گسیختگی) با افزایش زاویه درز کاهش می یابد.

گسیختگی غیر همزمان مجموعه درز

همانطور که مشاهده گردید عواملی که در مورد مدل تک درز و چند درز مورد بحث قرار گرفتند تأثیر آنها برای یک یا چند درز از لحاظ کلی و خصوصاً هندسی مشابه می باشد. اگر نمودارهای مربوط به مدل های تک درز با نمودارهای مشابه از مدل چند درز با هم مقایسه شوند، تفاوت شکلی مشاهده نمی شود. البته باید توجه داشت که خواص فیزیکی و مکانیکی کلیه درزها چه بصورت تکی و چه بصورت چندتایی در این تحلیل ها، یکسان منظور شده است. با این حال یک نکتهٔ اساسی که رفتار تک درز را با رفتار چند درز در تودهٔ سنگ متفاوت می سازد، وقوع شکست و لغزش ناهمزمان درزها است.

برای اینکه این اختلاف به وضوح مشاهده گردد، مدلی فرضی مورد تحلیل قرار می گیرد. این مدل همان مدل دو درزی و سه درزی موازی است که قبلاً به آن اشاره گردیده است. با این تفاوت که وزن مخصوص سنگ در اینجا ۱۰۰ برابر بزرگتر انتخاب شده است. (این مدل تنها برای نشان دادن لغزش ناهمزمان درزها بطور عینی ارائه گردیده است).

همانطور که بیان گردید، تفاوت مدل رفتاری یک مجموعه درز موازی با یک تک درز در میزان تنش های ایجاد شده ناشی از وزن بلوک سنگی است، همچنین گفته شد که تمامی پارامترهای رفتاری از قبیل میزان تنش برشی پیک، میزان تنش برشی ماندگار، میزان سختی عمودی درز و میزان سختی برشی درز متأثر از میزان تنش های عمودی وارد بر درز می باشد. بنابراین، با این شیوه و با این مدل خاص بدون

اینکه شکل هندسی مدل تغییر کند، میزان تنش های مؤثر عمودی بر درز در یک مجموعه درز بصورت قابل ملاحظه تغییر کرده اند و به این ترتیب هر کدام از پارامترهای رفتاری فوق الذکر در هر یک از درزها با درزهای مجاور خود تفاوت خواهد داشت.

با تحلیل این مدل خاص نمودارهای ۱۱و۱۲ که به ترتیب مربوط به تنش برشی ـ تغییر مکان برشی در مدل های دو درز موازی و سه درز موازی هستند بدست می آید. شکل ۱۱ نشان می دهد که در حوالی تنش برشی پیک یک ناحیه صاف شدگی ایجاد شده است. در واقع در یک محدوده از تغییر مکان برشی میزان تنش برشی ثابت می ماند. برای توجیه این امر پارامترهای زیر را در نظر بگیرید:

KS = سختی برشی دسته درز

(k_1) P = سختی برشی ناحیه سخت شوندگی درز اول

(k_1) R = سختی برشی ناحیه نرم شوندگی درز اول

(k_2) P = سختی برشی ناحیه سخت شوندگی درز دوم

(k_2) R = سختی برشی ناحیه نرم شوندگی درز دوم

نمودار ۱۱ را می توان به سه ناحیه مشخص تقسیم نمود:

ـ ناحیه اول سخت شوندگی

در این ناحیه KS متأثر از سختی برشی ناحیه سخت شوندگی هر دو درز می باشد. در واقع در این ناحیه هر دو درز از خود رفتار سخت شوندگی نشان می دهند.

$$KS = (k_1)\ P + (k_2)\ P$$

ـ ناحیه دوم انتقالی (Transitional)

ـ شروع این ناحیه زمانی است که درز اول به میزان تنش برشی پیک خود رسیده است و بعد از آن وارد ناحیه نرم شوندگی خود می شود. در حالیکه درز دوم هنوز در ناحیه سخت شوندگی خود قرار دارد. در واقع سختی برشی دسته درز متأثر از سختی برشی نرم شوندگی درز اول بعلاوه سختی برشی سخت شوندگی درز دوم می باشد.

$$KS = (k_1)\ R + (k_2)\ P$$

انتهای این ناحیه محلی است که درز دوم نیز به حد تنش پیک خود می رسد.

ـ ناحیه سوم نرم شوندگی

در این ناحیه که منحنی رفتار نرم شوندگی از خود نشان می دهد سختی برشی مجموع درزها متأثر از سختی برشی ناحیه نرم شوندگی دو درز می باشد یا بعبارت دیگر:

$$KS = (k_1)\ R + (k_2)\ R$$

این پدیده بعلت مسئله اختلاف تنش عمودی (به موجب وجود تنش های ناشی از نیروی وزن بلوک های سنگی) در هر یک از درزها است. اگر این اختلاف تنش عمودی درزها در یک مجموعه درز وجود نداشته باشد، شروع و انتهای ناحیه دوم بر هم منطبق خواهد شد. در واقع درزها بطور همزمان به تنش پیک خواهند رسید. از طرف دیگر اگر تعداد درزهای موجود در یک مدل افزایش یابد، ناحیه دوم منحنی یعنی ناحیه انتقالی به قسمت های کوچکتری تقسیم خواهد شد. این امر در شکل ۱۲ مشاهده می گردد.

همانطور که مشاهده می شود شکل ۱۲ مربوط به مدل سه درز موازی است که میزان وزن مخصوص سنگ بصورت فرضی ۱۰۰ برابر بزرگ شده است. در این منحنی نیز سه ناحیه مشخص وجود دارد. با این تفاوت که ناحیه دوم خود شامل دو ناحیه می باشد که بنام ناحیه IIa و IIb نامگذاری شده است.

با تعمیم آنچه در مورد مدل دو درزی گفته شد در ناحیه IIa یکی از درزها به تنش برشی پیک خود رسیده اما دو درز دیگر هنوز در ناحیه سخت شوندگی قرار دارند و ناحیه IIb، محدوده ای است که درز دوم نیز به تنش برشی پیک خود رسیده است در حالیکه هنوز درز سوم در ناحیه سخت شوندگی قرار دارد و نقطه پایانی ناحیه IIb محلی است که هر سه درز وارد منطقه نرم شوندگی خود می شود. این نواحی با تعاریفی که دربالا انجام گرفت بشرح زیر می باشد:

ناحیه اول $KS = (k_1)\ P + (k_2)\ P + (k_3)\ P$

ناحیه دوم (IIa) $KS = (k_1)\ R + (k_2)\ P + (k_3)\ P$

ناحیه دوم (IIb) $KS = (k_1)\ R + (k_2)\ R + (k_3)\ P$

ناحیه سوم $KS = (k_1)\ R + (k_2)\ R + (k_3)\ R$

هر چه تعداد المان درز در یک مدل بیشتر باشد ناحیه دوم (ناحیه انتقال از حالت سخت شوندگی به حالت نرم شوندگی) دارای شکستگی های بیشتری خواهد بود و این ناحیه دامنه گسترده تری را به خود اختصاص خواهد داد.

این پدیده لغزش های تدریجی در منحنی تنش برشی ـ تغییر مکان برشی در جائیکه تنش برشی ماندگار به وقوع می پیوندد نیز اتفاق می افتد، لیکن با توجه به اینکه در برنامه ارائه شده توقف مراحل بارگذاری تا جایی است که اولین درز

به تنش ماندگار خود برسد، این پدیده قابل رویت نمی باشد.

این مدل در حالیکه یک مدل فرضی و خاص است اما در واقع در تمام گراف های مربوط به تنش برشی ـ تغییر مکان برشی در مدل های چند درز موازی، این پدیده وجود دارد. اما با توجه به اینکه میزان اختلاف تنش عمودی ناشی از نیروی وزن در درزها ناچیز می باشد، این ناحیه انتقالی بسیار کوچک بوده و قابل مشاهده نمی باشد.

با توجه به این مطلب اهمیت یک پارامتر دیگر در مدل های چند درز موازی نمایان می شود و آن مسئله فاصله بندی درزها خواهد بود. هر چه فاصله بین درزها بیشتر باشد، اختلاف تنش عمودی در درزها افزایش خواهد یافت و این اختلاف باعث بزرگتر شدن ناحیه انتقالی خواهد شد.

نکتهٔ دومی که می توان به آن اشاره کرد میزان تنش های اولیه می باشد. هر چه میزان تنش های اولیه در مدل کمتر باشد تأثیر میزان تنش های ناشی از نیروی وزن در تنش های عمودی بر درز بیشتر خواهد بود. در واقع در حالت هائی که نمونه در عمق های کمتر و نزدیک به سطح زمین قرار داشته باشد، میزان تأثیر نیروی وزن در محدودهٔ انتقالی بیشتر خواهد بود.

سختی معادل یک مجموعه درز

برای اینکه سختی معادل یک مجموعه درز بیان شود، به اشکال ۱۳ و ۱۴ توجه نمایید. این دو شکل به ترتیب تنش برشی ـ تغییر مکان برشی و تنش عمودی ـ تغییر مکان عمودی را نشان میدهد که مربوط به سه حالت مدل های بحث شده می باشد که در شرایط یکسان قرار دارند. با این تفاوت که مدل اول یک درز، مدل دوم دو درز و مدل سوم سه درز موازی دارد.

از مشاهده این گرافها نتایج زیر بدست می آید:

۱ـ میزان تنش برشی پیک و ماندگار در سه مدل تقریباً یکسان می باشد.

۲ـ میزان تنش عمودی در هر سه مدل یکسان می باشد.

۳ـ تغییر مکان برشی متناظر با تنش برشی پیک در مدل دو درزی تقریباً دو برابر و در مدل سه درزی تقریباً سه برابر میزان تغییر مکان برشی متناظر با تنش برشی پیک در مدل یک درزی می باشد.

۴ـ تغییر مکان برشی متناظر با تنش برشی ماندگار در مدل دو درزی تقریباً دو برابر و در مدل سه درزی تقریباً سه برابر میزان تغییر مکان برشی متناظر با تنش برشی ماندگار در مدل یک درزی می باشد.

۵ـ تغییر مکان عمودی درز در هر میزان تنش عمودی درمدل دو درزی دو برابرو در مدل سه درزی سه برابر میزان تغییر مکان عمودی درز در مدل یک درزی می باشد.

۶ـ با توجه به نکات فوق استنباط می شود که سختی برشی در یک مدل دو درزی نصف حالت تک درزی و سختی برشی در حالت سه درزی تقریباً ثلث حالت تک درزی می باشد. اعداد 1/2 و 1/3 در حالتی که از تنش های ناشی از نیروی وزن صرفنظر شده و شرایط درزها یکسان باشد معتبر و دقیق خواهند بود. اما با وجود مسئله وزن این اعداد بصورت تقریبی قابل قبول می باشند. بنابراین می توان انتظار داشت که تغییر مکان های برشی در یک مجموعه درز با n درز موازی تقریباً n برابر تغییر مکان برشی در یک تودهٔ سنگی با یک تک درز باشد.

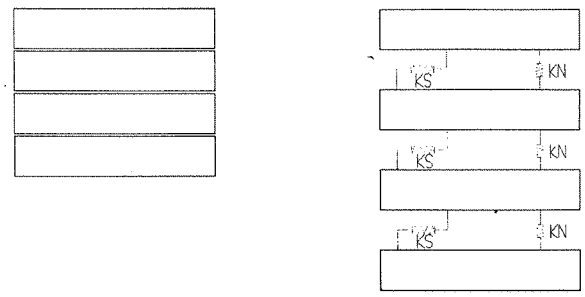
همچنین می توان انتظار داشت که تغییر مکان های عمودی در یک مجموعه درز با n درز موازی تقریباً n برابر تغییر مکان عمودی در یک تودهٔ سنگی با یک تک درز باشد. این امر را می توان به شکل زیر بیان کرد.

$$(KS)\,n = K'.\frac{1}{n}\,(KS)\,1$$

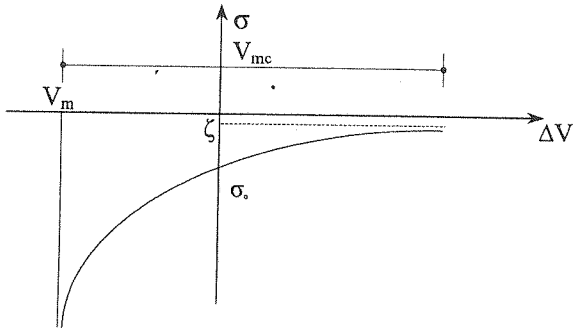
$$(Kn)\,n = K''.\frac{1}{n}\,(Kn)\,1$$

در رابطهٔ فوق K'، K'' تابعی از خواص فیزیکی و مکانیکی درزها، فاصله بندی درزها و عوامل مؤثر دیگر می باشد. هر چه درزها از نظر مکانیکی یکسان تر باشند مقدار K'، K'' به عدد یک نزدیکتر خواهند بود.

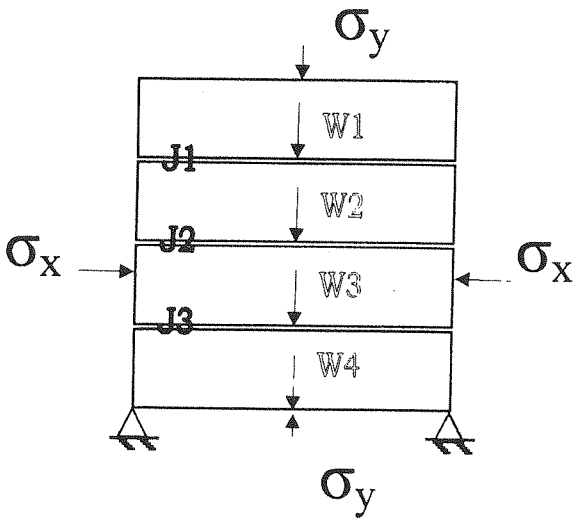
شکل (۱)



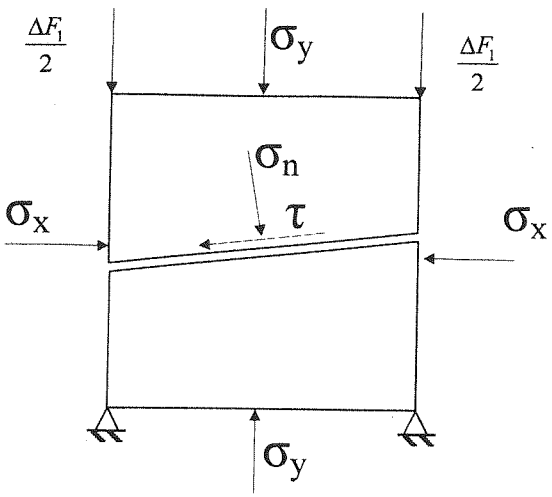
شکل (۲) مدل ساده شده توده سنگ با یک دسته درز موازی.



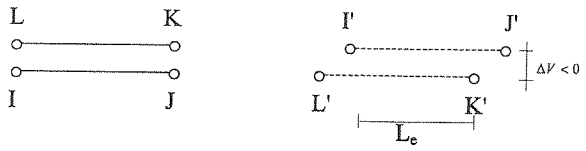
شکل (۳) تغییرات تنش عمودی ـ تغییر شکل عمودی درز.



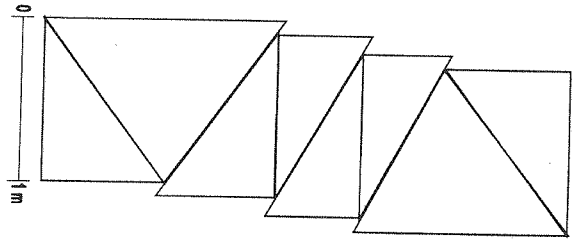
شکل (۴) تأثیر نیروی وزن بر رفتار درزها درمجموعه درز.



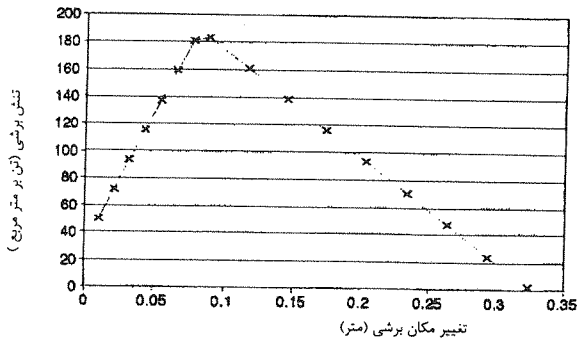
شکل (۵) مدل تك درز تحت تنش های اولیه و نیروهای خارجی.



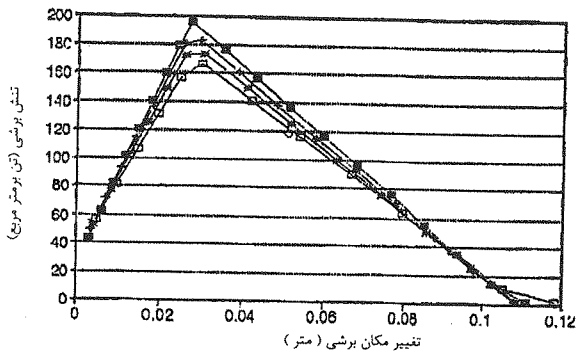
شکل (۶) تغییر مکان برشی و عمودی در المان درز.



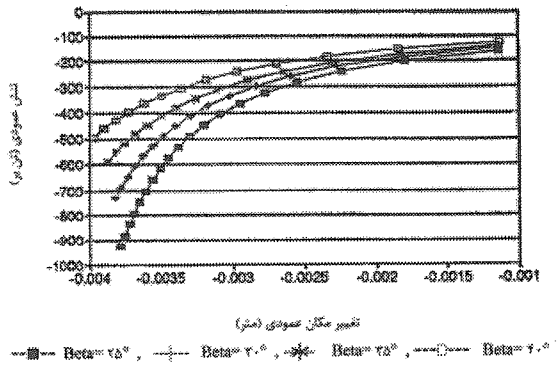
شکل (۷) مدل تغییر شکل یافته با سه درز موازی.



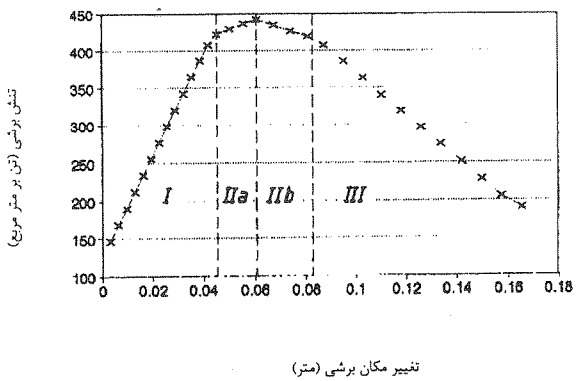
شکل (۸) نمودار تنش برشی ـ تغییر مکان برشی مدل
با سه درز موازی (زاویه درز = ۳۰°).



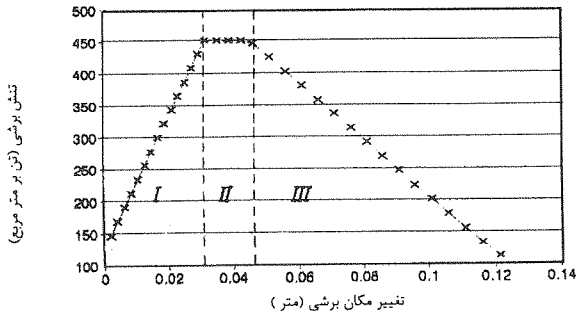
شکل (۹) نمودار تنش برشی ـ تغییر مکان برشی
مدل تك درز با زوایای مختلف.



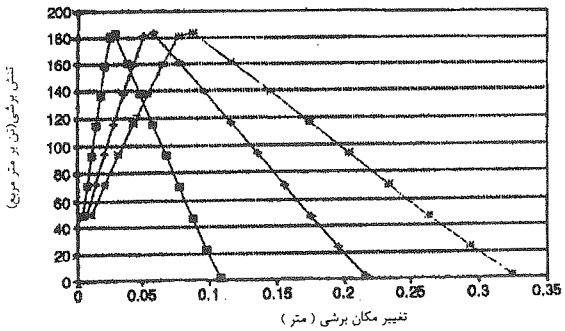
شکل (۱۰) نمودار تنش عمودی ـ تغییر مکان برشی
مدل تك درز با زوایای مختلف.



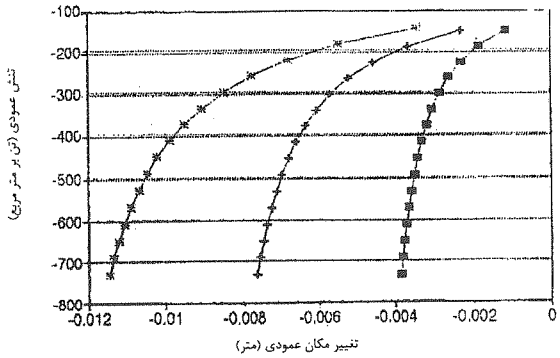
شکل (۱۲) نمودار تنش برشی ـ تغییر مکان برشی
مدل با سه درز موازی (زاویه درز = ۳۰°).



شکل (۱۱) نمودار تنش برشی ـ تغییر مکان برشی
مدل با دو درز موازی (زاویه درز = ۳۰°).



شکل (۱۳) نمودار تنش برشی ـ تغییر مکان برشی
مدل با یك درز، دو درز، سه درز موازی.



شکل (۱۴) نمودار تنش عمودی ـ تغییر مکان عمودی
مدل با یك درز، دو درز، سه درز موازی.

مراجع

[1] Hock, E. (1993) Strength of jointed rock masses. Twenty Third Rankine Lecture,J. Geotechnique, Vol. 33, No3.

[2] Fahimfar, A. (1995). Behavioural analysis of discontinuous rock using finite element method. Proc. Sec. Int. Conf. Mechanics of jointed and faulted rock, Austria.

[3] Fahimifar, A. (1996). Effects of system constraints in triaxial testingg of jointed rocks.Int. Jour. Eng. Sic., Iran University of Science and Technology, No. 2a, Vol. 7.

[4] Goodman, R. E. (1976). Methods of geological engineering in discontinuous rock. St. Paul: west.

[5] Ladanyi, B. and Archambault. G. (1970). Simulation of the shear behavior of a jointed rock mass, Proc., 11th Symp. Rock Mechanics (AIME).