

مروری بر مدل های خواص توأمان هیدرومکانیکی درز سنگی

مصطفی شریف زاده^۱؛ یوسف میرزائیانی^۲؛

چکیده

خواص توأمان هیدرومکانیکی توده سنگ در زمینه های عمرانی، معدنی و زیست محیطی، همچون عایق بندی زباله های اتمی و خطرناک، بازیافت هیدروکربن ها، مخازن زیرزمینی مایعات، انتقال ذرات آلوده، استخراج انرژی ژئوترمال و مدل سازی مخازن نفت اهمیت دارد. این اهمیت گاهی به دلیل نیاز به افزایش هدایت هیدرولیکی توده سنگ (بهره برداری از منابع نفت و گاز) و گاهی به دلیل نیاز به کاهش آن است (ایزوله کردن مخازن زباله و ذخیره سازی نفت و گاز در زیر زمین). فهم رفتار هیدرومکانیکی توده سنگ مستلزم درک رفتار هیدرومکانیکی یک درز سنگی است. برای درک رفتار مکانیکی و هیدرومکانیکی، درز به صورت مجزا تحت تنش عمودی و تنش برشی بررسی شد. در این مقاله، مهم ترین مدل های ارایه شده برای توصیف رفتار مکانیکی و هیدرومکانیکی درز تحت تنش های عمودی و برشی، به صورت جدول ارایه و مزایا و نواقص آنها معرفی شده است. مدل های مهم در داخل متن نیز به طور مختصر مرور شده است. به عنوان نتیجه گیری می توان ذکر کرد که کلید فهم رفتار هیدرومکانیکی درز فهم هندسه درز است. در سال های اخیر نیز تلاش بسیار زیادی برای اندازه گیری و ویژگی سنجی هندسه درز و ارتباط آن به رفتار هیدرومکانیکی انجام شده است.

کلمات کلیدی

درزه، بسته شدگی، هدایت هیدرولیکی، بازشدگی مکانیکی، بازشدگی هیدرولیکی، برش درز، توپوگرافی، زبری، هیدرومکانیک

A Review Of Hydromechanical Coupling Properties Of Rock Joint

M. Sharifzadeh; Y. Mirzaeian

ABSTRACT

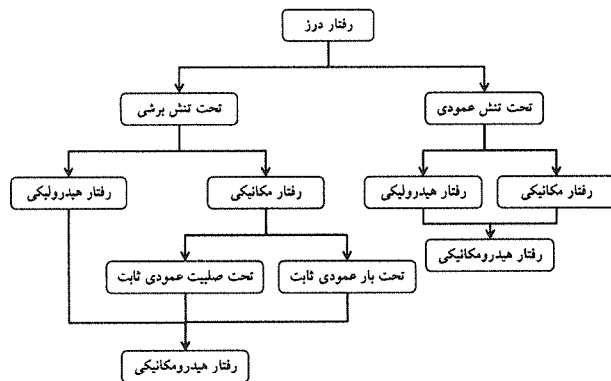
Hydromechanical coupling properties of rock mass is important in civil, mining and environmental such as Isolation of Hazardous and nuclear waste, CO₂ geological sequestration, petroleum and geothermal energy. In petroleum and geothermal engineering, the quantity of fluid recovery from fractured reservoirs is required. On the other hand, in the Isolation of nuclear and hazardous waste disposal, accurate calculation of fluid flow and contaminant transport through confined rock mass is necessary. Understanding of rock mass hydromechanical properties require the understanding of rock joint hydromechanical properties. In this paper, the important mechanical and hydromechanical models for rock joint under normal and shear loading along with models advantages and shortcomings are illustrated in tables. Some of the models are also reviewed in detail in paper. It could be concluded through review that; joint geometry have key role in joint both mechanical and hydromechanical behavior. In recent years lots of efforts have been employed to measure and characterize joint geometry and it's relation to mechanical and hydromechanical properties.

^۱ استادیار، دانشگاه صنعتی امیر کبیر تهران؛ خیابان حافظ، روبروی خیابان سمیه، دانشگاه صنعتی امیر کبیر: sharifzadeh@aut.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیر کبیر تهران: mirzaeian@aut.ac.ir

KEYWORDS

Joint, closure, Hydraulic conductivity, mechanical aperture, hydraulic aperture, joint shear, topography, roughness, hydromechanic.



شکل (۱): جنبه های مختلف رفتار درز

مدل های گودمن، بندیس، بارتون-بندیس، صائب-آمدی، پلشا، میر، پیراک نلته، گرینوود و ویلمسون، سوان و دیگران از جمله مدل های ارایه شده برای رفتارهای مکانیکی درز هستند که به بعضی از آنها اشاره می شود. مقایسه مدل های درز همراه با معرفی خصوصیات مدل ها و نقاط قوت و ضعف آنها در جدولهای (۱) و (۲) ارایه شده است.

۴-۱- مدل های رفتار مکانیکی عمودی درز

اگر یک مغزه سنگ شامل یک درز میان پله ای؛ که در جهتی تقریباً عمود بر محور مغزه قرار گرفته است، تحت آزمایش فشاری تک محوری قرار گیرد، تغییر طول بین دو صفحه انتهایی از ۲ عامل تشکیل شده است.

۱. تغییر شکل ماده سنگ

۲. تغییر شکل اضافی δ ، که آن را می توان به درز نسبت داد (گودمن ۱۹۷۶)

این تغییر شکل مازاد، بسته شدگی درز نامیده می شود و به صورت یک عدد غیر منفی تعریف می شود که با افزایش فشار درز افزایش می یابد. بدین ترتیب، تغییر شکل کلی درز به صورت زیر قابل نمایش است:

$$dL = dl_r - d\delta = -\frac{L}{E_r} d\sigma - \frac{1}{K_n} d\sigma \quad (1)$$

که در آن، E_r مدول یانگ ماده سنگ، K_n سختی عمودی درزه بر حسب (Pa/m) و l_r تغییر شکل کلی ماده سنگ و درز است. در شکل (۲) رابطه تنش عمودی، جابجایی محوری نمونه و بسته شدگی درز نشان داده شده است. با کم کردن مقادیر نمودار جابجایی سنگ بکر از جابجایی کلی نمودارهای جابجایی درز در شکل (۲b) به دست می آید.

۱- مقدمه

آزمایش های آزمایشگاهی و یا آزمایش های برجا بر روی درز سنگی نتایج وابسته به شرایط آزمایش را به دست می دهد که قابل تعمیم به کل نیست؛ بنابراین توسعه یک مدل ریاضیاتی عمومی برای مشخص کردن رفتار هیدرولیکی و مکانیکی درز سنگی تحت شرایط بارگذاری و تاریخچه بارگذاری لازم است. مدلهایی از این نوع به عنوان مدل های رفتاری برای درزه های سنگی شناخته شده اند.

در مدل های رفتاری مکانیکی معمولاً رابطه بین تنش و جابجایی (یا بین نمو آنها) مورد توجه است. مدل های مفهومی به دست آمده از رفتار نوعی درز سنگی تحت شرایط آزمایش، پایه مدل های رفتاری ابتدایی را تشکیل می دهند.

مدل های رفتاری بر مبنای دو روش اساسی، شامل روش تجربی و روش مبتنی بر تئوری ارایه شده اند. در روش تجربی مدل رفتاری براساس انطباق منحنی بر روی نتایج آزمایشگاهی یا با استفاده از توابع ریاضیاتی مفهومی به دست می آید. روش مبتنی بر تئوری بر پایه توصیف رفتار درزه ها با توجه به قوانین اساسی مکانیک جامدات کلاسیک، شکل می گیرد. این مدل ها معمولاً با استفاده از تئوری های به کار گرفته شده در شاخه های مختلف مکانیک جامدات مانند تئوری پلاستیسیته، مکانیک تخریب، تئوری تماس هرتز در الاستیسیته و نظایر آن فرموله می شوند.

رفتار درز سنگی عموماً با دسته بندی ای که در شکل (۱) نشان داده شده است، بررسی می شود که در ادامه این مقاله به شرح جزئیات قسمت های مختلف آن می پردازیم.

۲- رفتار مکانیکی درزه ها

محققان فراوانی رفتار مکانیکی درزه ها را در قالب رفتار عمودی و رفتار برشی بررسی کرده اند.

می‌شود) یک مدل تجربی برای درزه های سنگی است که بر پایه نتایج عددی آزمایشگاهی به دست آمده است. در این مدل، رابطه تنش عمودی (σ_n) و جابجایی عمودی (u_n) با یک تابع هذلولوی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_n' = \sigma_n - p = k_{n0} \left(\frac{u_n}{1 - u_n / u_n^m} \right) \quad (4)$$

که در آن، k_{n0} سختی عمودی اولیه درز و u_n^m ماکزیمم بسته شدگی و (σ_n') تنش عمودی مؤثر است که از اختلاف تنش کلی (σ_n) و فشار مایع (P) به دست می‌آید.

۲-۲-۲- مدل های رفتار مکانیکی برشی درز

اگر یک درز در توده سنگی؛ که تحت تنشهای همه جانبه قرار دارد، واقع شده باشد نیروی اعمالی به صفحه درز را می‌توان به یک مؤلفه عمودی و یک مؤلفه برشی تقسیم کرد. تنش برشی باعث تغییر شکل در جهت موازی با صفحه اسمی درز می‌شود. به این تغییر، جابجایی برشی گفته می‌شود.

یک نیروی مماسی به صورت نوعی (تیبیک) همواره باعث افزایش بازشدگی متوسط می‌شود، به این پدیده، اتساع (dilation) درز گویند. اتساع به دلیل این که دندانهای یک سطح درز برای عبور از دندانهای مقابل باید به سمت بالا حرکت کنند، اتفاق می‌افتد. چند مدل برشی متداول در ذیل به طور اختصار بیان می‌شود. مقایسه جامعی بین انواع مدل های برشی در جدول (۲) ارائه شده است.

۲-۲-۲-۱ مدل برشی بارتون-بندیس (Barton-Bandis) (1983)

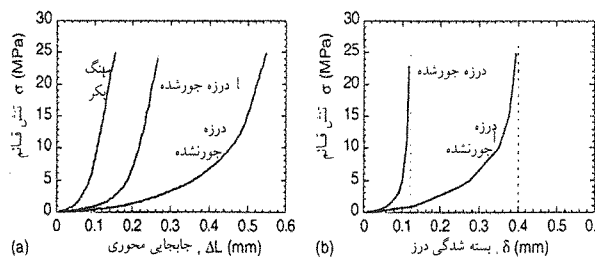
پاتون، مقاومت برشی درز را ناشی از اصطکاک و زبری سطح درز دانست. بارتون و بندیس نشان دادند که تنش برشی بسیج شده، τ^{mob} ، در طول جابجایی برشی خاص به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\tau^{mob} = \sigma_n' \left[JRC_{mob} \log \left(\frac{JCS_{mob}}{\sigma_n'} \right) + \phi_r \right] \quad (5)$$

در این رابطه، ϕ_r زاویه اصطکاک باقیمانده، JRC_{mob} ضریب زبری بسیج شده متناسب با جابجایی برشی و JCS_{mob} مقاومت فشاری تک محوری بسیج شده ماده سنگ است. تحت تنش عمودی زیاد، عبارت JCS_{mob} با $(\sigma_1 - \sigma_3)$ که معرف مقاومت برشی ناهموازی ها است، جایگزین می‌شود.

۲-۲-۲-۲ مدل صائب- آمادی (Saeb-Amadi 1992)

صائب و آمادی، یک مدل رفتاری دو بعدی برای درز سنگی، با در نظر گرفتن جابجایی متفاوت برای درزه با حالت‌های اولیه جور شده و جور نشده، و همچنین تأثیر تغییر



شکل (۲): اندازه گیری های گودمن: a: جابجایی محوری مغزه سنگ درزه دار و b: بسته شدگی درز

در ذیل چند مدل رفتاری متداول برای رفتار مکانیکی عمودی درز معرفی می‌شوند. در جدول (۱) مقایسه جامعی بین انواع مدل های مکانیکی عمودی درز بیان شده است.

۲-۱-۱-۲ مدل گودمن (Goodman 1976)

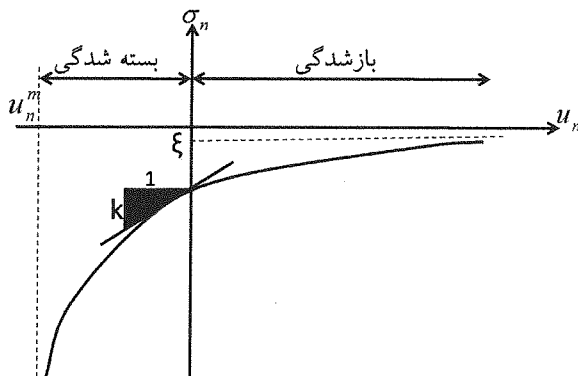
گودمن، اولین مدل رفتاری جامع را با استفاده از روش تجربی، برای درزه های سنگی به صورت دو بعدی ارائه کرد. این مدل بر پایه تنش ها و جابجایی های کلی و مشاهده رفتار درزه تحت تنش‌های عمودی ثابت در آزمایش های آزمایشگاهی فرموله شده است. رابطه تنش عمودی (σ_n) - جابجایی عمودی (u_n) به صورت زیر بیان شده است:

$$\frac{\sigma_n - \xi}{\xi} = A \left(\frac{u_n}{u_n^m - u_n} \right)^l \quad (2)$$

که در آن، ξ فشار نشست و u_n^m ماکزیمم بسته شدگی درز است، A و l ثابت های ماده هستند. سختی عمودی درز به صورت زیر بیان می‌شود:

$$K_n = \frac{\partial \sigma_n}{\partial u_n} = \frac{t}{u_n^m - u_n} (\sigma_n - \xi) \quad (3)$$

در شکل (۳)، نمودار تغییرات تنش عمودی - جابجایی عمودی و عوامل داخل فرمول نشان داده شده اند.



شکل (۳): رابطه تنش عمودی و جابجایی عمودی

۲-۱-۲-۲ مدل بارتون-بندیس (Barton-Bandis 1983)

مدل تجربی بارتون-بندیس (که اغلب مدل B-B خوانده

شکل پذیری ماده سنگ احاطه کننده درزه ها بر روی رفتار سنگ ارایه دادند. شکل نموی مدل به صورت زیر است:

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_n \\ d\tau \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{nt} \\ k_{tn} & k_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} du_n \\ du_t \end{Bmatrix} \quad (6)$$

در اینجا k_{ij} ($i, j = n, t$) نشان دهنده تانسور سختی درزه است. آمادی و صائب برای تعیین ضرایب سختی عمودی و برشی درز (ماتریس صلیبیت در رابطه بالا) روابطی را بر حسب خواص مواد، مقاومت فشاری تک محوری ماده سنگ و زاویه اتساع ارایه دادند.

۲-۳ مدل تجربی گودمن برای برش درز (۱۹۷۶)

منحنی کامل تنش برشی (τ) بر حسب جابجایی برشی (u_i) از ۵ جزء به هم پیوسته برای قسمت های برشی مختلف تشکیل شده است (شکل ۴). رابطه تنش برشی-جابجایی برشی در هر جزء از منحنی به صورت زیر داده شده است:

$$(I) \tau_r = -\tau^r \quad (u_i \leq u_i^{r(-)})$$

$$(II) \tau = -\tau^p + \frac{\tau^p - \tau^r}{u_i^p - u_i^r} (u_i - u_i^{p(-)}) \quad (u_i^{r(-)} \leq u_i \leq u_i^{p(-)})$$

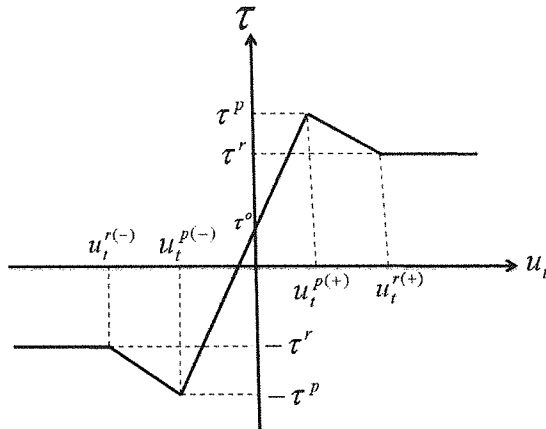
$$(III) \tau = k_t u_i + \tau^o \quad (u_i^{p(-)} \leq u_i \leq u_i^{p(+)})$$

(۷)

$$(IV) \tau = \tau^p + \frac{\tau^p - \tau^r}{u_i^p - u_i^r} (u_i - u_i^{p(+)}) \quad (u_i^{p(+)} \leq u_i \leq u_i^{r(+)})$$

$$(V) \tau = \tau^r \quad (u_i \geq u_i^{r(+)})$$

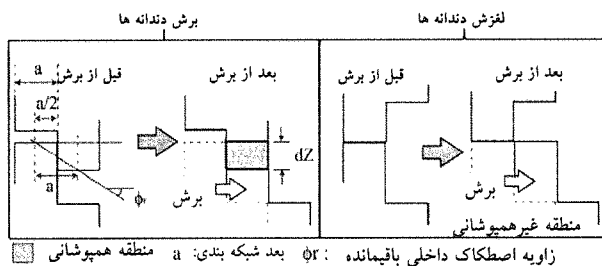
که در آن، τ^p حداکثر تنش برشی، τ^r تنش برش باقیمانده، k_t سختی برش و τ^o تنش برشی اولیه است. $u_i^{p(-)}$ و $u_i^{p(+)}$ به ترتیب جابجایی های برشی حداکثر مطابق با جهت های + و - تنش برشی بوده و $u_i^{r(-)}$ ، $u_i^{r(+)}$ جابجایی های برشی متناسب با اتفاق افتادن تنش برش باقیمانده در جهت ها + و - هستند. نمودار شکل (۴) از مبدأ مختصات عبور نکرده است. خطای موجود در قسمت منفی جابجایی برشی به جهت فرض خطی بودن رابطه در فاصله $u_i^{p(-)} \leq u_i \leq u_i^{p(+)}$ است.



شکل (۴): رابطه تنش برشی-جابجایی برشی

۲-۴ مدل برشی ایساکي و همکاران (۲۰۰۳)

در سال های اخیر، بر اهمیت بررسی نیمرخ سطح درز به صورت دقیق و ۳ بعدی تاکید زیادی شده است. بر این اساس، ایساکي و همکاران آزمایش هایی را با اندازه گیری نیمرخ سطح درز و اعمال جابجایی برشی به آن انجام داده اند. در شبیه سازی انجام شده، سطوح بالا و پایین درز به طور متناسب با منحنی های اتساع، که از نتایج آزمایش ها به دست آمده اند، حرکت داده شدند. هر قسمت از شبکه درز بسته به شکل قرارگیری دندان ها در راستای برش، در سه حالت طبقه بندی شد. این مناطق عبارت بودند از منطقه لغزش، منطقه برش دندان ها و ناحیه بازشدگی یا فضای خالی. این مناطق در شکل (۵) نشان داده شده اند.



شکل (۵): مدل جایگذاری برش

تنش برشی در هر نوع از این شبکه ها از رابطه های زیر به دست می آید.

اگر $0 < dz_i < atg\phi_r$ ناحیه در لغزش است و:

$$\tau_{(sliding)i} = \sigma_{ni} \cdot tg(\phi_r + d) \quad (الف-۸)$$

اگر $dz_i > atg\phi_r$ ناحیه در برش است و:

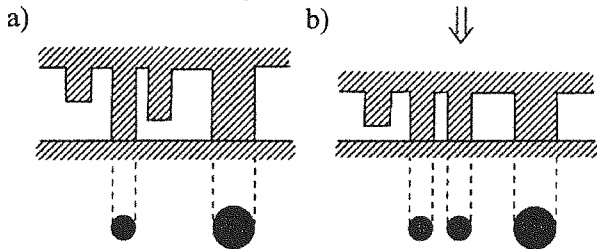
$$\tau_{(shear)i} = c_p + \sigma_{ni} \cdot tg(\phi_p) \quad (ب-۸)$$

اگر $dz_i > 0$ ناحیه بازشدگی است که در آن:

$$\tau_{(aperture)i} = 0 \quad (ج-۸)$$

در این روابط، dz_i همپوشانی در خانه شماره i ام شبکه، a بعد

Y مدول یانگ سنگ بکر و A_n سطح تماس، به عبارتی سطحی است که با میله پوشانده شده و A سطح اسمی کل درز است.



شکل (۶): مدل گنگی (تختی از میخ ها)

۳-۲- مدل والش (Walsh 1965)

والش و گراسنبو، تئوری تراکم پذیری سطح درز را با مدل تماسی (گرینوود و ویلیامسون)، ارایه شده برای تعیین تغییر شکل الاستیک سطوح تماس زیر، ترکیب کردند و به رابطه ای در زمینه تنش-تنش بسته شدگی درز سنگی دست یافتند. مدل آنها به تغییرات در بازشدگی درز و تغییرات سطح تماس تحت تنش عمودی وابسته بود. آنها با فرض انحنا ی کروئ شکل راس دندانها (ناهمواری ها) و فرض یک تابع اکسپانسیلی برای توزیع ارتفاع آنها، نشان دادند که سختی عمودی درز باید به شکل خطی با تنش عمودی مؤثر تغییر پیدا کند؛ که آهنگ تغییرات سختی عمودی درز نسبت به تنش عمودی برابر مقدار انحراف معیار ارتفاع دندانها در نظر گرفته شد؛ به عبارتی، هر چه انحراف از معیار ارتفاع دندانها بیشتر باشد، تغییرات سختی عمودی با تغییرات تنش عمودی گسترده تر خواهد بود. آنها دریافتند که سختی عمودی اندازه گیری شده توسط پرات و همکارانش، در بلوک های بزرگ آزمایشی به صورت خطی با تنش عمودی اعمالی تغییر می یابد. با استفاده از موارد ذکر شده و مزیت های مقایسه جریان حرارت و سیال، والش رابطه ذیل را بین هدایت هیدرولیکی و تنش عمودی مؤثر استنباط و اعلام کرد.

$$k/k_0 = \left(1 - 2\sqrt{2}(b/E_0)\ln(\sigma'_n/\sigma'_0)\right)^3 \quad (12)$$

که در آن، k_0 و E_0 به ترتیب هدایت هیدرولیکی و بازشدگی در تنش عمودی مبنای، σ'_0 و b انحراف از معیار توزیع ارتفاع دندانها هاست.

۳-۳- مدل سوان (Swan 1983)

سوان، یک مدل رفتاری برای ارتباط بین تنش عمودی و بسته شدگی درز زیر ارایه کرد. به طور کلی، مدل او تعمیم یافته مدل های والش و گراسنبو بود. او توزیع ارتفاع زبری ها را به صورت نمایی و تماس آنها را به شکل نوک به نوک فرض کرد. سوان نشان داد که ناحیه تماس، تابعی از ضریب b/E_0

شبکه، ϕ زاویه اصطکاک باقیمانده، تنش عمودی در خانه شماره i ام، d زاویه اتساع، c_p چسبندگی حداکثر و ϕ_p زاویه اصطکاک حداکثر هستند. پس از تعیین تنش برشی بر روی هر المان از شبکه، تنش برشی کلی بر روی درزه با توجه به تنش های برشی المان ها محاسبه می شود:

$$\tau = \sum \tau_{sliding} + \sum \tau_{shear} \quad (9)$$

۳- رفتار توأمان هیدرومکانیکی درزه

درزه ها به وسیله دو سطح، که تحت بار برشی و عمودی قرار می گیرند، محصور هستند. وقتی درزی تحت تنش، تغییر شکل می دهد، زبری سطح درز تغییر می کند و سطح تماس (به طور مشابه فضای خالی) بین دو سطح مقابل تغییر می یابد. این تغییرات بر روی رفتار هیدرولیکی درز در هنگامی که جریان آب موجود است تأثیر می گذارند. بسیاری از محققان به بررسی این تأثیرات پرداخته اند. از جمله مدل های موجود در این زمینه می توان به مدل های گنگی، والش، سانگ و ویترسپون، سوآن، بارتون-بندیس، گیل، کوک، اونیشی، لی و هاریسون، بارتون و اولسون، ایساکا اشاره کرد که در اینجا مدل های متداول بررسی می شوند. در جدول (۲) مقایسه ای بین این مدل ها و نقاط قوت و ضعف آنها ارایه شده است.

۳-۱- مدل گنگی (Gangi 1978)

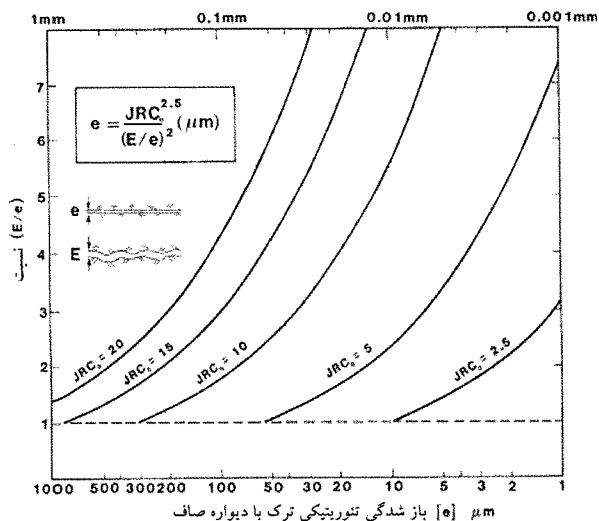
گنگی با استفاده از مکانیک تماس، مدلی را برای تغییر نفوذپذیری یک درز سنگی تکی توسعه داد. در این روش، سطح درز به صورت تختی از میخ ها، که بر روی سطح صافی پهن شده اند نشان داده شده است. گنگی این گستره میخ ها را با مفهوم تابع توزیع تجمعی از تعداد میخ های با طول خاص، $N(x)$ ، تعریف کرد، (شکل ۶). گنگی با توجه به قانون توان $N(x)$ را به شرح زیر به دست آورد:

$$N(x) = I \left(\frac{x}{w}\right)^{n-1} \quad (1 \leq n \leq \infty) \quad (10)$$

که در آن، $N(x)$ تعداد میله های کوتاه تر یا همطول با x تعداد کلی دندانها های میله ای و طول w اختلاف ارتفاع بزرگترین دندانها از دندانها مورد نظر است. با استفاده از رابطه بالا و با توجه به پروفایل سطح درز، میزان ضریب توان $(n-1)$ را تخمین زده و در ادامه در رابطه (۱۱) به کار خواهد رفت. تغییرات میزان نفوذپذیری درز، k ، به صورت تابعی از تنش عمودی مؤثر در نظر گرفته شد (رابطه ۱۱).

$$k(\sigma') = k_0 \left[1 - (\sigma'_n/Y_n)^m\right]^3 \quad (11)$$

که در آن، σ'_n تنش عمودی مؤثر، k_0 نفوذپذیری تحت تنش وزنی نمونه مورد آزمایش، $m=1/n$ و $Y_n = Y(A_n/A)$ که



شکل (۷): نمودار تغییرات نسبت (E/e) با بازشدگی هیدرولیکی با توجه به میزان JRC

اولسون نشان داد که روابط بارتون-بندیس برای بازشدگی های مکانیکی و هیدرولیکی تنها برای رفتار عمودی درز صادق است و برای رفتار برشی آن صدق نمی‌کند. به همین دلیل، بارتون و اولسون در سال ۲۰۰۱ به ارایه مدل جدیدی تصمیم گرفتند. در مدل جدید به جای پارامتر JRC از ضریب زبری بسیج شده درز، JRC_{mob} ، برای بیان رابطه بین بازشدگی هیدرولیکی و مکانیکی استفاده شد. آنها دریافتند که تا جابجایی برشی، u_s ، معادل با ۷۵٪ برش حداکثر، u_{sp} ، رابطه بازشدگی هیدرولیکی و مکانیکی مشابه مدل بارتون-بندیس است. به عبارتی، تا قبل از رسیدن به ۷۵٪ برش حداکثر رابطه (۱۵) معتبر است؛ ولی بعد از نقطه برش حداکثر رابطه (۱۵) دچار تغییر شدیدی شده که به صورت زیر جایگزین می‌شود.

$$e = \left(\frac{E}{e} \right) JRC_{mob}^2 \quad (18)$$

مشاهده می‌شود بر خلاف رابطه (۱۵) که رابطه معکوس بین بازشدگی هیدرولیکی و نسبت بازشدگی مکانیکی به هیدرولیکی برقرار بود، این رابطه در فرمول (۱۸) مستقیم است. مقدار JRC_{mob} به مقاومت سطح درزه (JCS)، تنش عمودی اعمال شده (σ_n)، مقدار جابجایی برشی و همچنین به ابعاد صفحه درزه (L_{jn}) و زاویه اصطکاک باقیمانده (ϕ_r) وابسته است؛ اما مدل، رابطه مشخصی را برای میزان آن بیان نمی‌کند. در فاز میانی، مابین فاز اول و فاز دوم ($u_s = 0.75u_{sp}$ تا u_{sp})، تعریف هرگونه مدلی سخت و مشکل است و توصیه می‌شود که دو فاز با یک منحنی انتقالی به یکدیگر مرتبط شوند.

است؛ که قبلاً معرفی شدند. سختی عمودی نیز تابعی از همین نسبت است و با تنش عمودی نسبت مستقیم دارد. سوان برای تعیین صحت مدل خود و مدل والش، آزمایش هایی را بر روی سطح کلیواژ سنگ ها انجام داد. این آزمایش ها در تنش کمتر از ۳۰ مگاپاسکال صورت گرفتند. او سپس مدل بسته شدگی درز خود را با فرض صحت مدل جریان در صفحات موازی ترکیب کرد و رابطه ای را برای هدایت هیدرولیکی درز به صورت تابعی از تنش عمودی و زبری درز ارایه داد.

$$\sqrt{k/k_0} = (1 - a_b/E_0) - (b/E_0) \ln(\sigma'_n) \quad (13)$$

که در آن، k ضریب هدایت هیدرولیکی درز، k_0 هدایت هیدرولیکی درز در تنش صفر یا وزنی، a_b ثابت و E_0 ، b و σ'_n نیز در معادله (۱۲) معرفی شدند. او بعدها پیشنهاد کرد که معادله وی به شکل زیر ساده شود:

$$\sqrt{k/k_0} = c_1 - c_2 \ln(\sigma'_n) \quad (14)$$

که در آن، C_1 و C_2 ضرایب ثابت هستند. این ساده سازی با تأکید بر وجود رابطه بین b و E_0 حاصل شده است.

۳-۴- مدل بارتون-بندیس (۱۹۸۳) و بارتون-اولسون (۲۰۰۱)

بارتون و همکارانش، مقالات مربوط به اطلاعات تجربی بازشدگی مکانیکی، E ، را با بازشدگی هیدرولیکی، e ، مقایسه کردند. آنها با استفاده از این مقایسه ها، اندازه گیری های جریان با توجه به قانون توان و تفاوت های بین E و e ناشی از اختلاف در هد (Head) به دلیل موج و زبری درز رابطه ای بین E و e (هر دو بر حسب mm) و ضریب زبری درز، JRC ، به شکل ذیل ارایه کردند.

$$e = \min \{ E, E^2 / (JRC)^{0.25} \} \quad (15)$$

در شکل (۷)، نمودار تغییرات نسبت بازشدگی هیدرولیکی به بازشدگی مکانیکی با بازشدگی هیدرولیکی نمایش داده شده است.

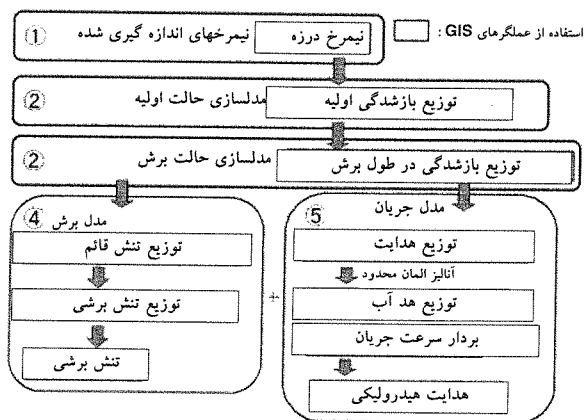
نفوپذیری ذاتی درزه نیز با استفاده از قانون اصلاح شده توان به شکل زیر به دست می‌آید:

$$k = \frac{e^2}{12} \quad (16)$$

از آنجا که بازشدگی مکانیکی در هر زمان از جمع بازشدگی مکانیکی اولیه و تغییرات بازشدگی به دست می‌آید:

$$E = E_0 + \Delta E \quad (17)$$

تغییرات بازشدگی مکانیکی، ΔE ، از مدل مکانیکی بارتون-بندیس و با کم کردن تغییر شکل عمودی درز از تغییر شکل حداکثر درز (رابطه ۴) به دست می‌آید. مجموعه روابط بالا یک مدل تجربی برای رفتار توأمان هیدرومکانیکی درز ارایه می‌کند.



شکل (۸): مدل توأمان پیشنهادی برش-جریان با استفاده از GIS

دستگاه برش-جریان آنها توانایی انجام آزمایش برش نمونه و به طور همزمان انجام آزمایش جریان را داشت. به منظور فهم رفتار هیدرومکانیکی درز سنگی، مدل برش-جریان با استفاده از نرم افزار GIS طراحی شد. آنها در آزمایش های برش-جریان نشان دادند که هدایت هیدرولیکی در مراحل اولیه برش کاهش می یابد و سپس با سرعت تا برش حداکثر افزایش می یابد. روند مدل پیشنهادی در شکل (۸) بیان داده شده است.

۴- نتیجه گیری

فهم رفتار هیدرومکانیکی درز، اهمیت زیادی در پروژه های عمرانی، معدنی، انرژی و محیط زیست دارد. در این مقاله مدل های مهم رفتار مکانیکی و هیدرومکانیکی تحت تنش های عمودی و برشی مرور شده است. روند مطالعات نشان داد که هندسه درز قبل از آزمایش و در طول جابجایی عمودی و برشی از مهم ترین پارامترها در مدل سازی رفتار درز است. با گسترش روشهای محاسباتی و اهمیت تحلیل های هیدرومکانیکی در سال های اخیر تلاش های زیادی برای مدل سازی دقیقتر رفتار هیدرومکانیکی درز سنگی با در نظر گرفتن هندسه آن، انجام گرفته است. بر این اساس، سطح درز را می توان به صورت توزیعی از نقاط تماس و نقاط بازشدگی در نظر گرفت که نقاط در تماس رفتار مکانیکی و نقاط بازشده رفتار هیدرولیکی درز را کنترل می کنند. مدل های جدید عمدتاً بر مبنای هندسه درز توسعه داده شده اند. در پایان، به طور خلاصه مدل های مکانیکی و هیدرومکانیکی درز و نقاط ضعف و قدرت هر یک در جدولهای (۱ تا ۳) ارائه شده است.

۳-۵- مدل سانگ و ویترا سپون (Tsang-Witherspoon)

سانگ و ویترا سپون در سال ۱۹۸۱ با توجه به یک مفهوم دوگانه، یک مدل تغییر حفره را برای رفتار تنش-بسته شدگی درز و یک مدل توزیع بازشدگی را برای روابط تنش-جریان توسعه دادند.

در مدل سانگ یک درز منفرد با استفاده از تجمع حفرات صاف بین دندان های در تماس نشان داده شده است و بسته شدگی درز تحت تنش با دگرشکلی حفرات معرفی می شود. سانگ و ویترا سپون با پیروی از مدل اولیه والش روابطی را برای تعیین نسبت مدولهای مؤثر سنگ حفره دار با مدول های ذاتی ماده سنگ تعریف کردند. در این روابط از پارامتر طول متوسط حفرات، d ، و نسبت مدول های مؤثر به ذاتی، $\frac{l}{d}$ ، استفاده شد. با استفاده از تفاضلات عددی و از روی منحنی های تجربی تنش-جابجایی در نمونه های سنگی؛ که دارای یک درز بودند، طول متوسط حفرات، d ، تعداد تماس ها، Nc ، و همچنین توزیع ارتفاع دندان ها $n(h)$ به دست می آید.

پس از تعیین زبری درز، بازشدگی آماری متوسط درز (e) به صورت تابعی از تغییر شکل عمودی درز، Δu_n ، و تنش عمودی مؤثر σ'_n محاسبه می شود. در صورتی که نیازی به اطلاعات رخنمون سطح درز و پارامترهای تطبیقی تنش-جریان نباشد، رابطه (۱۹) ارایه می شود.

$$\langle e^3(\Delta u_n, \sigma'_n) \rangle = \int_0^{e_0 - \Delta u_n} (e_0 - \Delta u_n - h)^3 n(h) dh / \int_0^{e_0} n(h) dh \quad (19)$$

که در آن، e_0 بازشدگی ماکزیمم درز تحت تنش عمودی صفر است؛ و از تخمین سطح تماس دیواره های درز تحت تنش ثابتی به دست می آید. قابلیت انتقال درز با استفاده از قانون مکعبی تخمین زده می شود، این قانون از متوسط بازشدگی آماری $\langle e^3 \rangle$ در محل بازشدگی دیواره های هموار در مدل های صفحات موازی معمول استفاده می کند.

۳-۶- مدل المانی برای رفتار هیدرومکانیکی درز

ایساک، سال ها بر این حقیقت تأکید داشت که بیان رفتار هیدرومکانیکی درز با پارامترهای تک بعدی واقعی نیست و بایستی توزیع زبری، نقاط تماس و جریان در سطح درز بررسی شود. بر این مبنای آنها در سال ۲۰۰۵، آزمایش های برش-جریان را با استفاده از یک دستگاه مخصوص انجام دادند.

جدول (۱): مقایسه مدل های مکانیکی عمودی درز

محققین	مدل	خصوصیات	بررسی و مقایسه
گودمن ۱۹۷۶	$\sigma = \sigma_0 \left[1 + \left(\frac{\delta}{\delta_m - \delta} \right)^n \right] \quad \text{for } \sigma \geq \sigma_0$	در نظر گرفتن تغییر شکل مجزای ماده سنگ و درزه ها برای توده سنگ و آزمایش بر روی توده سنگ و ماده سنگ	رابطه تجربی بوده و در بعضی موارد دقیق نیست.
بندیس ۱۹۸۳	$\sigma = \frac{k_0 \delta}{1 - (\delta / \delta_m)} = \frac{k_0 \delta_m \delta}{\delta_m - \delta}$	در نظر گرفتن صلبیت عمودی درز به صورت تابعی از بسته شدگی و بسته شدگی حداکثر	با قرار دادن $t=1$ و $\sigma \geq \sigma_0$ در رابطه گودمن رابطه به دست می آید.
میر ۲۰۰۰	$\delta = \frac{4\lambda(1-\nu)\sigma}{\pi G} \ln \sec \left(\frac{\pi a}{2\lambda} \right)$	در نظر گرفتن درز به صورت ترک های بیضوی با طول $2a$ و فاصله بین دو ترک 2λ	مدل نظری بوده و در عمل باید تغییرات a و λ در طول تغییر شکل را در نظر گرفت.
بندیس ۱۹۸۳	$\ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) = J \delta$	آزمایش بر روی درزه های جور نشده انجام شده است	مدل برای درزه های جور شده ارایه شده است.
تیموشنکو و گودیر	$\sigma = \frac{4}{3} R^{1/2} \eta E' \int_{d_n - \delta}^{\infty} (z^* - d_0 + \delta)^{3/2} \phi(z^*) dz^*$	در نظر گرفتن تابع توزیع ارتفاع حداکثر دندانه ها و به کارگیری تئوری تماس هرتز در مدل سازی رفتار عمودی درز	این مدل نظری بوده و تعیین تابع توزیع ارتفاع حداکثر دندانه ها نیازمند اندازه گیری های آزمایشگاهی است.
گرینوود سوان ۱۹۸۲	$J = \frac{1}{s}$ $\sigma_0 = (\pi R s)^{1/2} (s E \eta) \exp(-d_0 / s)$	در نظر گرفتن توزیع اکسپانسیلی برای توزیع ارتفاع دندانه ها و استفاده از رابطه تغییر شکل بندیس بر روی درزه های جور نشده	تخمین پارامترهای موجود در مدل از طریق آزمایش مشکل بوده و R برای دندانه ها یکسان نیست.
بارتون اسکولز	$\sigma = \frac{4}{3} \eta \langle R^{0.5} \rangle \langle E' \rangle \langle \psi \rangle \int_{d_n - \delta}^{\infty} (z^* - d_0 + \delta)^{3/2} \phi(z^*) dz^*$	تعریف تابع ارتفاع دندانه ها به صورت جمع ارتفاع دندانه های دو سطح مقابل و انحنای آنها به صورت $R = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)}$	این مدل همانند مدل تیموشنکو و گودیر نظری بوده و تعیین تابع توزیع ارتفاع حداکثر دندانه ها نیازمند اندازه گیری های آزمایشگاهی است.
بارتون بندیس ۱۹۸۲	$\sigma_n' = \sigma_n - p = k_{no} \left(\frac{u_n}{1 - u_n / u_n^m} \right)$	در نظر گرفتن صلبیت درز به صورت تابعی از بسته شدگی و بسته شدگی حداکثر	این مدل تجربی بوده و کاملاً مشابه مدل تجربی گودمن است.

جدول (۲): مقایسه مدل های مکانیکی برشی درز

محققین	مدل	خصوصیات	بررسی و مقایسه
بارتون- بندیس ۱۹۸۳	$\tau^{mob} = \sigma_n' \text{tg} \left(JRC_{mob} \log \left(\frac{JCS_{mob}}{\sigma_n'} \right) + \phi_r \right)$	مدل تجربی با بررسی نحوه تغییرات زبری و مقاومت فشاری تک محوری دیواره درز در برش	این مدل تجربی، تنش برشی در جابجایی برشی خاصی را پیش بینی می کند.
صائب- آمادی ۱۹۹۲	$\left\{ \begin{matrix} d\sigma_n \\ d\tau \end{matrix} \right\} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{nt} \\ k_{tm} & k_{tt} \end{bmatrix} \left\{ \begin{matrix} du_n \\ du_t \end{matrix} \right\}$	این مدل بر اساس رابطه تئوری تنش ها و تغییر شکل ها در محیط پیوسته برای درزه ها ارایه شده است مدل برای درزه های جور شده و نشده قابل استفاده است و تغییر شکل ماتریکس سنگ را نیز در نظر می گیرد.	این مدل رفتار اتساعی درز را به درستی پیش بینی نمی کند.
پلشا ۱۹۸۷	$d\sigma_i = \left(k_{ij} - \frac{k_{ir} (\partial Q / \partial \sigma_r) (\partial F / \partial \sigma_p) k_{pj}}{(\partial F / \partial \sigma_r) k_{rp} (\partial Q / \partial \sigma_r)} \right) du_j$	این مدل بر اساس در نظر گرفتن تغییر شکل پلاستیک ناهموازی های دندانه شکل به صورت ۲ بعدی به دست آمده است.	مدل، نظری است و رفتار بعد از پیک تنش برشی را در نظر نمی گیرد، برای در نظر گرفتن این رفتار باید برای پارامترها محدوده اعتباری در نظر گرفت.
لی هاریسون	$w_{ij} = \frac{4(1-\nu^2) q_i a}{\pi E} \times E \left(\frac{\pi}{2}, \frac{a}{r} \right)$ $w_{ij} = \frac{4(1-\nu^2) q_j r}{\pi E} \times \left[E \left(\frac{\pi}{2}, \frac{a}{r} \right) - \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) F \left(\frac{\pi}{2}, \frac{a}{r} \right) \right]$	در این مدل از رابطه بین تغییر ارتفاع دندانه و تنش عمودی وارد بر آن از روی قوانین هوک و استفاده از راه حل بوزینسک برای تأثیر دندانه ها (اسپریتی ها) بر یکدیگر، استفاده شده است.	مدل کاملاً نظری است و برای انطباق با رفتار واقعی به اعتبارسنجی نیاز دارد.

$(I) \tau = -\tau^r \quad (u_i \leq u_i^{r(-)})$ $(II) \tau = -\tau^p + \frac{\tau^p - \tau^r}{u_i^p - u_i^r} (u_i - u_i^{p(-)})$ $(u_i^{r(-)} \leq u_i \leq u_i^{p(-)})$ $(III) \tau = k_i u_i + \tau^0 \quad (u_i^{p(-)} \leq u_i \leq u_i^{p(+)})$ $(IV) \tau = \tau^p + \frac{\tau^p - \tau^r}{u_i^p - u_i^r} (u_i - u_i^{p(+)})$ $(u_i^{p(+)} \leq u_i \leq u_i^{r(+)})$ $(V) \tau = \tau^r \quad (u_i \geq u_i^{r(+)})$		<p>این مدل یک مدل تجربی است؛ که با توجه به در نظر گرفتن ۵ مرحله خطی برای برش درز از برش منفی تا برش مثبت درز به دست می‌آید. با توجه به مدل مذکور تقارن تنش در برش های مثبت و منفی ضروری بوده ولی کرنش در دو نوع برش می‌تواند نامتقارن باشد.</p>	<p>مدل، یک مدل تجربی است و دارای ساده سازی های زیادی است. مدل رفتار پیش از پیک و پس از پیک و همچنین ناحیه باقیمانده را نوعاً پیش بینی می‌نماید. ساده سازیهای زیاد در مدل مذکور دقت آن را بخصوص در ناحیه برش منفی کاهش می‌دهد.</p>
<p>ایساکي ۲۰۰۳</p>	$\tau_{(sliding)} = \sigma_{ni} \cdot \lg(\phi_r + d) \quad 0 < dz_i < atg\phi_r$ $\tau_{(shear)} = c_p + \sigma_{ni} \cdot \lg(\phi_p) \quad dz_i > atg\phi_r$ $\tau_{(aperturi)} = 0 \quad 0 > dz_i$	<p>مدل بر اساس قوانین کلاسیک اصطکاک و برش برای المان های درز ارایه شده است؛ در نهایت رفتار برشی کلی درز بر اساس رفتار برشی مجموع المانهای درز به دست می‌آید.</p>	<p>با توجه به نظری بودن مدل برای انواع مختلف درزه ها قابل استفاده و نتایج دقیق تری نسبت به سایر مدل ها می دهد. مدل بر اساس گام های جابجایی بوده و با افزایش المان ها تعداد محاسبات و زمان انجام آنها افزایش می‌یابد.</p>

جدول (۳): مقایسه مدل های هیدرو مکانیکی درز

محققین	مدل	خصوصیات	بررسی و مقایسه
گنگی ۱۹۷۸	$k(\sigma') = k_0 \left[1 - (\sigma'_n / Y_n)^m \right]^3$	<p>مدل ارایه شده با در نظر گیری دندانه ها به صورت میله هایی بر روی سطوح صاف و استفاده از تابع توزیع تجمعی آنها به دست آمده است</p>	<p>مطابقت با بعضی از داده های تجربی به دست آمده از ماسه و آهک و عدم مطابقت با نتایج بسیاری از محققین</p>
والش ۱۹۶۵	$k / k_0 = \left(1 - 2\sqrt{2}(b / E_0) \ln(\sigma'_n / \sigma'_0) \right)^3$	<p>فرمول با توجه به وجود رابطه بین انحراف از معیار ارتفاع دندانه ها و صلبیت درز ارایه شده</p>	<p>این رابطه نظری است؛ ولی به دلیل ساده سازی سطح و عدم توجه به نیمرخ سطح درز در واقعیت نیاز به ضرایب اصلاحی دارد.</p>
سوان ۱۹۸۲	$\sqrt{k / k_0} = (1 - a_b / E_0) - (b / E_0) \ln(\sigma'_n)$	<p>مدل سوان مدل والش با جزئیات بیشتر و در نظر گرفتن توزیع اکسپنانتسیلی ارتفاع دندانه ها و صحت جریان در صفحات موازی است</p>	<p>تماس بین دندانه های درز در این مدل سر به سر در نظر گرفته شده است که فقط در تنشهای کم صادق است.</p>
سانک وینتراسپون ۱۹۸۱	$\langle e^3 (\Delta u_n, \sigma'_n) \rangle = \int_0^{e_0 - \Delta u_n} (e_0 - \Delta u_n - h)^3 n(h) dh / \int_0^{e_0} n(h) dh$	<p>مدل بر اساس مدل اولیه والش و حل تفاضلات محدود بر اساس تعداد و ارتفاع دندانه ها به دست آمده است.</p>	<p>نتایج رابطه برای آزمایش های Iwai مناسب و برای آزمایشات گیل انطباق ضعیفی دارد.</p>
بارتون بندیس	$e = \min \{ E, E^2 / (JRC)^{0.25} \}$	<p>بارتون یک رابطه تجربی بین بازشدگی هیدرولیکی و مکانیکی بر اساس شاخص زبری سطح درز ارایه کرد.</p>	<p>پارامترهای JRC و JCS؛ که در این رابطه و همچنین رابطه های همراه به کار رفته اند، تجربی است و دقیق نیستند. نتایج به دست آمده از رابطه نیز دقیق نیست.</p>
اونیشی	$\left(\frac{\partial u_n}{\partial u_i} \right) \Big _{u_i = u_i^j} = (u_n^j - u_n^{j-1}) / \Delta u_i$	<p>استفاده مستقیم از اطلاعات دیجیتالی شده سطح درز و امتناع از استفاده از مدل های آماری یا فاکتال</p>	<p>جواب های مدل به دلیل اجتناب از پارامترهای تجربی که نیازمند قضاوت مهندسی هستند، دقیق تر است.</p>
تریپ	$\left(\frac{e_h}{\langle e \rangle} \right)^3 = 1 + 3 \frac{\gamma - 2}{\gamma + 1} \frac{1}{(\langle e \rangle / \sigma)^2}$	<p>تاثیر ناهموازی ها در اختلاف بازشدگی های مکانیکی و هیدرولیکی با توجه به تأثیر آنها در آنیزوتروپی جریان در نظر گرفته شده است.</p>	
بارتون اولسون ۲۰۰۱	$e = \frac{E^2}{JRC_0^{2.5}} \quad u_s \leq 0.75 u_{sp}$ $e = \sqrt{E} JRC_{mob} \quad u_s \geq u_{sp}$	<p>این رابطه تجربی، اصلاح شده مدل بارتون برای رابطه بین بازشدگی هیدرولیکی و مکانیکی است که بعد از قله برشی نتایج درستی به دست نمی‌داد</p>	<p>به واسطه استفاده از پارامترهای تجربی و عدم در نظر گرفتن نیمرخ و هندسه سطح درز نتایج این مدل نیز دقیق نخواهد بود</p>

<p>شریف زاده ۲۰۰۳</p>	<p>مدل برای هندسه فضایی درز آرایه شده است و در هر یک از المانهای درز برای رفتار هیدرولیکی رابطه داری و برای رفتار برشی روابط ایساکي به کار گرفته شده. در مجموع به روابط هیدرومکانیکی دست پیدا می کند</p>	<p>سطح درز با اسکن لیزری پیمایش و اطلاعات سطوح به نرم افزار GIS وارد شده، با توجه به بازشدگی اولیه به دست آمده از آزمایش در گام های برشی دو سطح بر روی هم لغزیده و رفتار برشی مدل می شود. رفتار هیدرولیکی و جریان نیز با استفاده از المان محدود مدل شد.</p>	<p>مدل به دلیل خصیصه سنجی بسیار دقیق سطح درز از دقت بالایی برخوردار است، در ضمن آزمایش برشی دقیق انجام شده از معدود آزمایش هایی است که نرخ معکوس اتساع در ابتدای جابجایی برشی را نشان می دهد.</p>
---------------------------	--	---	---

۵- مراجع

- Hopkins D.L. (2000) The implications of joint deformation in analyzing the properties and behavior of fractured rock masses, underground excavations, and faults. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 37:pp175-202. [۱۳]
- Lee, S.D. ; Harrison, J.P. " Hydro-mechanical behaviour of a rock fracture. " *J. Rock Mechanics in the National interest*. 2001, pp 807-813. [۱۴]
- Makurat A., Barton N., Rad N. S., Bandis S. (1990) Joint conductivity variation due to normal and shear deformation. *Proceedings of the International Symposium on Rock Joints*, Balkema, Leon, Norway, p535-40. [۱۵]
- Mitani, Y., Esaki, T., Sharifzadeh, M., Vallier, F. "Shear-flow coupling properties of a rock joint and its modeling by Geographic Information System (GIS)", pp.829-836, 10th congress of the ISRM2003-Technology roadmap for rock mechanics, Sep 8-12, 2003, South Africa. [۱۶]
- Saeb, S., Amadei, B., Modeling rock joints under shear and normal loading, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abs.*, 29: 267-278, 1992. [۱۷]
- Sharifzadeh, M., Mitani, Y., Esaki, T. "Rock joint surfaces measurement and analysis of aperture distribution under different normal loading and shear loading process using GIS", *Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, Barla G. ed. 2006. [۱۸]
- Stephansson, L., Jing and C.-F. Tsang (Eds), *Coupled Thermo-Hydro-Mechanical properties of fractured media 1996*, Elsevier Science. [۱۹]
- Swan G., determination of stiffness and other joint properties from roughness measurements. *Rock mech. Rock eng.* 16, 19 (1983) [۲۰]
- Tsang Y. W., Witherspoon, The dependence of fracture mechanical and fluid flow properties on fracture roughness and sample size, *J. Geoph. Res.*, 88, 2359-2366, 1983. [۲۱]
- Walsh, J. B., The effect of cracks on the compressibility of rocks, *J. Geophy. Res.* 70, 381 (1965). [۲۲]
- Zimmerman, Robert; Main, Ian. *Hydromechanical Behavior of Fractured Rocks*. Elsevier/MFS, 2003. [۲۳]
- Bandis S. C., Lumsden A. C., and Barton N. R. (1983) *Fundamentals of rock joint deformation*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, vol. 20, pp 249-268. [۱]
- Barton N., Bandis S., and Bakhtar K., (1985) Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abs.*, 22: pp121-140. [۲]
- Barton, N., Olsson, R., 2001. An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*; 38: 317-329. [۳]
- Brown S. R. and Scholz C. H., (1985) Broad bandwidth study of the topography of natural rock surfaces, *J. Geophys. Res.*, 90, 12,575-12,582, [۴]
- Chiba S., Ohnishi Y., Ohtsu H., Nishiyama S., Yano T., Koyama T. (2003) The development of new apparatus considering effect of shear deformation on hydraulic characteristics of a single joint. *Proc. of Environmental rock engineering*, Kyoto, Japan. [۵]
- Esaki T., Du, S., Mitani, Y., Ikusada, K., Jing, L. (1999) Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint, *Int. J. of Rock Mech. and Mining Sci.*, 36:pp641-650. [۶]
- Gale J. E., (1990) Mac Load R., and LeMessurier P., Site characterization and validation - measurement of flow rate, solute velocities and aperture variation in natural fractures as a function of normal and shear stress, stage 3. stripa project. Technical report TR 90-11. SKB, Stockholm. [۷]
- Gangi, A., F., Variation of whole and fractured porous rock permability with confining pressure, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abs.*, 15: 249-257, 1978. [۸]
- Gentier S., Billiaux D., and Van Vliet L. (1989) *Laboratory Testing of the Voids of a Fracture*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 22, pp149-157. [۹]
- Goodman R. E., *Methods of geological engineering in discontinuous rock*, west New York (1976) [۱۰]
- Greenwood J. A. and Tripp J. H. (1971) The contact of two nominally flat rough surfaces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 185 (48):pp625-633. [۱۱]
- Hakami E., (1995) Aperture distribution of rock fractures. PhD thesis, Division of Engineering Geology, Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, P22. [۱۲]