

## بررسی رفتار هیدرولیکی گسل ها و مدل های رفتاری حاکم بر آنها

علی عالی انوری<sup>۱\*</sup>

دریافت مقاله: ۹۷/۱۱/۰۹ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۷/۰۲

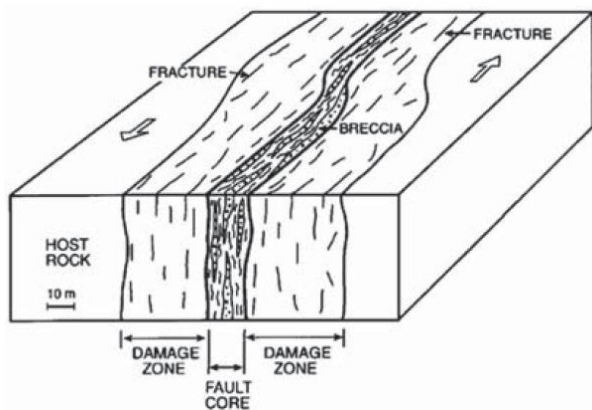
### چکیده

درزه‌ها، نوارها (Slip bands)، لایه‌های تغییر شکل یافته (Deformation band) و گسل‌ها ساختارهای فیزیکی در توده سنگ هستند، خصوصیات هیدرولیکی این ساختارها و همچنین توزیع مکانی آنها در توده سنگ نفوذپذیر ممکن است شرایط پیچیده‌ای را به لحاظ محاسبه جریان در این توده سنگ‌ها ایجاد کنند. توجه و درک این نکته که این ساختارها چگونه می‌توانند بر روی جریان سیال و مسیرهای عبور آن از توده سنگ تاثیر بگذارند در مطالعات اقتصادی و مدیریت به خصوص در مطالعه مخازن بسیار حائز اهمیت است. در این میان گسل‌ها ساختارهای پیچیده هیدرولیکی هستند که تعیین خصوصیات هیدرولیکی این مناطق یکی از مشکلات اجرایی به خصوص در مواردی نظیر محل دفن باطله‌های هسته‌ای، مخازن نفتی پایداری سدها و تونل‌ها است. گسل‌ها در مناطق مختلف رفتارهای هیدرولیکی متفاوتی از خود نشان می‌دهند. در بسیاری از حالات این ساختارها به عنوان مجراهایی برای عبور جریان عمل می‌کنند اما در مواقعی نیز این گسل‌ها به عنوان موانعی در برابر جریان و یا ترکیبی از هر دو مورد فوق عمل کنند. هر کدام از این رفتارها می‌توانند اختلالی در حرکت سیال در منطقه ایجاد کنند. بنابراین مدل‌سازی و تعیین چگونگی رفتار هیدرولیکی گسل‌ها بسیار حائز اهمیت است. در ایران علیرغم اهمیت بالای این موضوع تاکنون مجموعه مدونی برای مطالعه نقش گسل‌ها و رفتار هیدرولیکی آنها در محیط‌های مختلف صورت نگرفته است. در این تحقیق به مروری اجمالی بر روی مدل‌های مختلف توصیف کننده شرایط هیدرولیکی مناطق گسلی (مدل‌های کاین، اسمیت، تیلور و ..) پرداخته شده و به بیان نقاط ضعف و قوت هر کدام از این مدل‌ها پرداخته می‌شود

**کلید واژه‌ها:** مدل، رفتار هیدرولیکی، گسل، نفوذپذیری،

## ۱. مقدمه

کاین (Caine, 1996) و ویلیامز (Williamz, 1998). توزیع و جهت این اجزا ممکن است در بین مناطق گسلی از محلی به محل دیگر متغیر باشند. شکل ۱ اجزاء مختلف گسل را نشان می دهد.

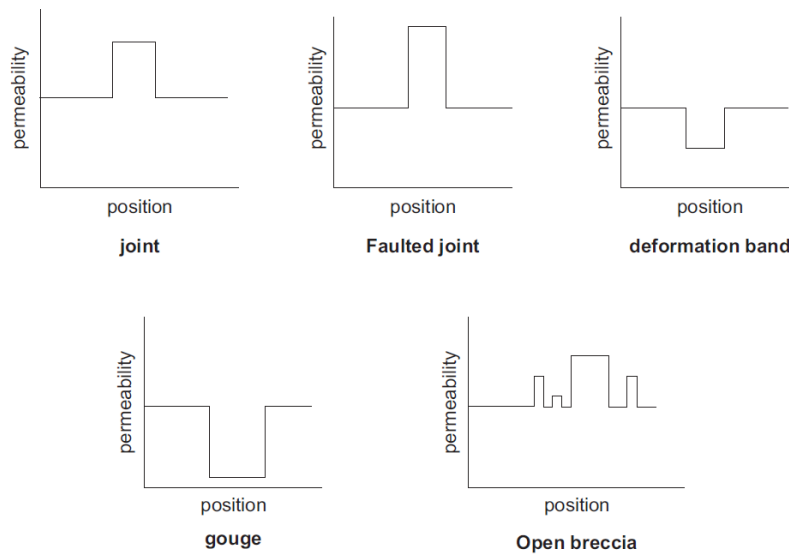


شکل ۱. اجزاء تشکیل دهنده یک منطقه گسل خورده خصوصیات هیدرولیکی هر کدام از این اجزا به عنوان تابعی از شرایط زمین شناسی، مکانیکی و شرایط هیدرولوژیکی از محلی به محل دیگر متغیر است. و این متغیر بودن بر خصوصیات هیدرولیکی منطقه گسل تاثیر خواهد گذاشت. تاثیر اجزا تشکیل دهنده بر چگونگی جریان در محیط گسل و اطراف آن وابسته به پارامترهایی نظیر رابطه هندسی اجزا و سایر اجزا ساختاری و همچنین جهت آنها نسبت به جریان است. شکل ۲ خصوصیات هیدرولیکی اجزاء مختلف تشکیل دهنده یک منطقه گسلی را نشان می دهد

گسترش روزافزون فعالیت های عمرانی و نفتی در کشور، ایران را در زمره کشورهای فعال در این زمینه در جهان قرار داده است. از این رو بررسی ساختارهای مختلف زمین شناسی و خصوصیات هیدرولیکی این ساختارها در مطالعات ساختگاهی بسیار حائز اهمیت است اما آنچه در این میان چندان مورد توجه قرار نگرفته است مطالعه چگونگی جریان در توده سنگ های ناهمگن در مقیاس های بزرگ است، بیشتر مطالعات محققین به بررسی این ساختارها در مقیاس آزمایشگاهی پرداختند در حالی که در چنین مقیاسی حداکثر می توان به ساختارهای منفرد مانند یک درزه و یا لایه های تغییر شکل یافته پرداخت.

برای بررسی تاثیر این ساختارها بر جریان، شناسایی مشخصات هیدرولیکی این ساختارها در توده سنگ، ترکیب و توزیع هندسی آنها، خصوصیات هیدرولیکی آنها به منظور شناسایی خصوصیات موثر شکستگی ها و همچنین به کار گیری این خصوصیات در مدل سازی منطقه ای بسیار حائز اهمیت است.

بسیاری از مناطق گسلی که در رخنمون ها مشاهده شده است از ساختارهایی با ترکیب مجزا مانند درزه ها، درزه های برشی، صفحات تغییر شکل یافته، خرده سنگ تشکیل شده اند. (سیگال (Cigal, 1983)، مارتل (Martel, 1988)، آنتولینی (Antonellini, 1995) ۱۹۹۵، آیدین (Aydin, 1997)،



شکل ۲ پروفیل مقطعی از نفوذپذیری ساختارهای اصلی (کاین ۱۹۹۶)

این اساس هسته گسل شامل گوژ و مناطق برشی بوده و فرض شده است که نفوذپذیری در این منطقه نسبتاً پایین است. و منطقه تخریب شده منطقه ای با فراوانی بالای درزه است که نفوذپذیری بالایی دارد. در مدل ارائه شده توسط کاین گسل هایی که ۱۰۰ درصد منطقه اطراف آن تخریب شده است به عنوان مجراهای عبور جریان، گسل هایی که ۱۰۰ درصد آنها را هسته گسل تشکیل می دهند به عنوان موانع در برابر جریان و مناطقی که هسته گسل بوسیله منطقه تخریب شده احاطه شده اند به عنوان "مجرای-مانع" در نظر گرفته می شوند. [a]

از جمله مواردی که در این مدل به آن چندان توجه نشده است، این است که در این مدل هسته گسل به عنوان منطقه ای با نفوذپذیری پایین در نظر گرفته شده است در حالی که بسیاری از گسل ها دارای هسته های برشی باتخلخل بالا هستند که نفوذپذیری بالایی نسبت به هسته های گسلی دیگر دارند.

از سوی دیگر گسل ها شامل درزه ها و درزه های برشی هستند که به واسطه کانی زایی خصوصیات هیدرولیکی آنها متفاوت شده است. در این مدل این گسل ها به عنوان مجرای عبور جریان در نظر گرفته شوند. در حالی که در عمل چنین نیست و کانی زایی ثانویه انجام شده در منطقه باعث کاهش نفوذپذیری منطقه گسل خورده می شوند.

بدیهی است که ارائه یک مدل مناسب که به کمک آن بتوان خصوصیات هیدرولیکی گسل ها را با در نظر گرفتن رفتار هیدرولیکی هر کدام از اجزاء آن به دست آورد پیچیده است. در مبحث گسل ها به طور قاطع نمی توان نفوذپذیری واقعی منطقه گسله و زون های اطراف آن را به دست آورد، چرا که نیاز به یک دانش دقیق از موقعیت هندسی و خصوصیات هیدرولیکی هر جزء از اجزاء منطقه تشکیل دهنده گسل است. در حالت ایده آل مدل های ارائه شده برای محاسبه نفوذپذیری مناطق اطراف گسل می بایست با شرایط واقعی روی زمین همانند باشند و با توجه به بزرگی گسل، لیتولوژی، موقعیت و حرکت و زون های تغییر شکل یافته بایستی شبیه سازی شده باشند.

از آنجا که تاکنون در ایران بر روی مدل های محاسبه نفوذپذیری در مناطق گسلی کار چندانی صورت نگرفته است و به لحاظ اهمیت این موضوع در تحقیق حاضر به ارائه مدل های مختلف جهت محاسبه نفوذپذیری در مناطق گسلی پرداخته و به بیان مزایا و معایب هر کدام از این روش ها پرداخته می شود.

## ۲. مدل های ارائه شده برای مناطق گسل خورده

۱-۲- مدل کاین (Caine)

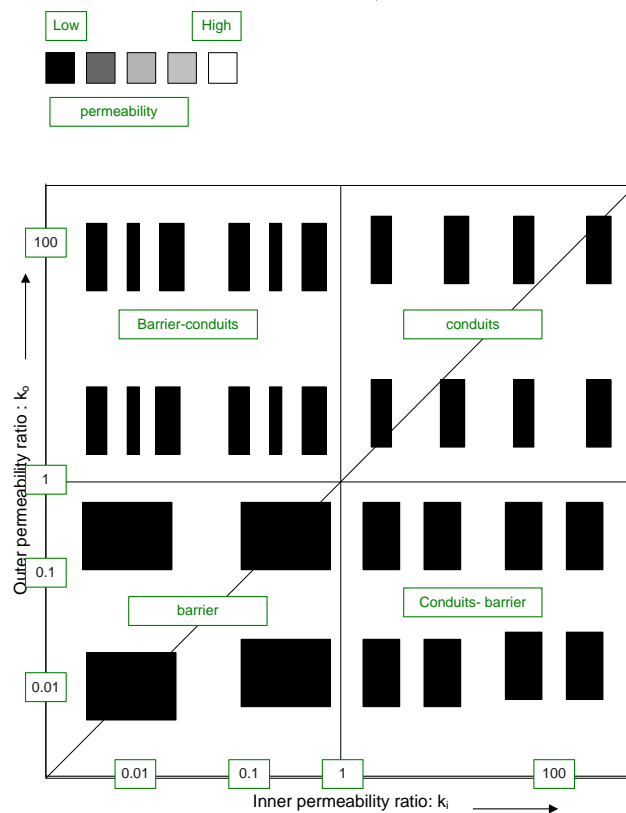
کاین در سال ۱۹۹۶ گسل ها را بر اساس نسبت درصد هسته گسل و منطقه تخریب شده توسط گسل طبقه بندی کرد. بر

۲-۲- مدل اسمیت (Smith)

اسمیت و همکاران در سال ۱۹۹۵ برای توصیف رفتار هیدرولیکی گسلها مدلی را ارائه دادند که بر اساس آن رفتار هیدرولیکی گسل ها به عنوان تابعی از نفوذپذیری منطقه گسل خورده و سنگ میزبان در نظر گرفته شده است، در این مدل اگر نسبت نفوذپذیری هم در منطقه درون گسل و هم بیرون گسل بیشتر از ۱ باشد گسل از نظر هیدرولیکی نقش مجرای عبور آب را خواهد داشت. اگر نسبت نفوذپذیری هم

در منطقه درون گسل و هم بیرون گسل کمتر از ۱ باشد گسل از نظر هیدرولیکی نقش موانع جریان آب را خواهند داشت. در سایر موارد گسل ها هم نقش موانع و هم مجرای جریان را خواهند داشت.

در شکل ۳ طبقه بندی گسل ها بر اساس رفتار هیدرولیکی آنها با توجه به نفوذپذیری درونی و بیرونی آنها نشان داده شده است.



شکل ۳. طبقه بندی گسل ها بر اساس رفتار هیدرولیکی آنها با توجه به نفوذپذیری درونی و بیرونی آنها بر اساس مدل اسمیت و همکاران

برخوردار است. که در این حالت مدل ارائه شده توسط اسمیت کارایی چندانی نخواهد داشت.

۲-۳- مدل تیلور (Taylor)

تیلور در سال ۲۰۰۰ تعریف دیگری در ارتباط با گسل ها و نقش آنها در رفتار هیدرولیکی محیط ارائه کرد، در این تعریف با استفاده از مدل های هیدرولوژی، گسل ها شامل یک منطقه درونی و یک منطقه بیرونی هستند. برای ساده سازی فرض

باید توجه داشت اگرچه مدل ارائه شده تا حد زیادی می تواند رفتار هیدرولیکی گسل ها را تفسیر کند اما در مواردی ممکن است گسل و منطقه مورد مطالعه بسیار پیچیده باشد و در هیچ کدام از دسته بندی های فوق قرار نگیرد.

از سوی دیگر گسل ها می توانند شامل یک منطقه گورژ مرکزی حاوی زون های خرد شده باشند (Aydin 1998). گورژ در واقع منطقه ای با نفوذپذیری پایین است. در حالی که سیستم شکستگی اطراف آن از یک نفوذپذیری موثر بالاتری

اند به خوبی نمایش داده شده اند. و تاثیر خود را در نفوذپذیری موثر نشان می دهند.

## ۲-۲- مدل اورتگا و میکارلی

اورتگا (Ortega, 2000) و میکارلی (Micarli, 2004) به منظور بررسی خصوصیات الگوی جریان در اطراف گسل های مجزا بیان داشتند که برای درک جریان سیال در سیستم های هندسی پیچیده گسل، ابتدا لازم است که به مفهوم جریان سیال درون و یا اطراف اجزا ساده سیستم، تک عضوی و گسل های مجزا که در محیط متخلخل قرار دارند، پرداخته شود.

در حالت دو بعدی جریان در اطراف به عرض و طول گسل، جهت جریان با توجه به جهت و شیب گسل و نزدیکی گسل به سایر ناهمگونی های هیدرولیکی (hydraulic heterogeneities) وابسته است. به علاوه نسبت نفوذپذیری در مناطق مختلف درون زون گسله، تاثیر معناداری بر چگونگی آشفته گی جریان خواهد داشت. یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر هدایت جریان از گسل ها، ارتباط گسل های موجود در منطقه با یکدیگر و یا ارتباط شکستگی های موجود در شبکه با یکدیگر است. بر این اساس بر طبق مطالعات اورتگا (2000) و میکارلی (2004) با توجه به نسبت شکستگی هایی که کاملا ایزوله و از هم جدا هستند (نوع یک) و شکستگی های نسبتا مرتبط (نوع دوم) و شکستگی های با ارتباط پیچیده (نوع سوم) تقسیم بر تعداد کل شکستگی ها در شبکه می توان دیاگرام زیر را ارائه کرد.

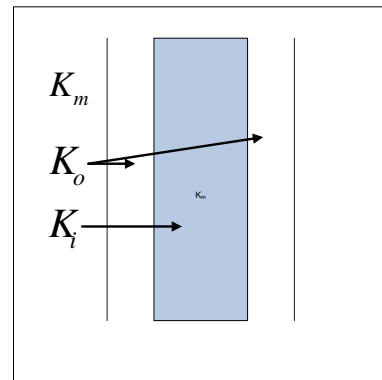
هدایت هیدرولیکی از زون شکستگی به هسته گسل افزایش می یابد، بایستی در نظر داشت که هدایت هیدرولیکی پایین در در مناطق با شکستگی کم اتفاق می افتد (WDDZ) و هدایت بالاتر در مناطق به شدت شکسته شده اتفاق می افتد. مزیت عمده این تقسیم بندی آن است که ارتباط هیدرولیکی میان گسل ها و شکستگی ها در نظر گرفته می شود و بر طبق آن مدل جریان نفوذپذیری محاسبه می شود.

شده است مناطق به صورت سیستماتیک توزیع شده اند و توزیع آنها در طول گسل ثابت است.

نفوذپذیری موثر در یک منطقه، نفوذپذیری است که رفتار هیدرولیکی کلی در یک منطقه را بدون توجه به تغییرات نفوذپذیری در مقیاس کوچک شبیه سازی می کند. در واقع نسبت نفوذپذیری در یک منطقه، نفوذپذیری موثر منطقه گسلی تقسیم بر نفوذپذیری موثر اطراف توده سنگ است. در این حالت اگر نسبت نفوذپذیری از ۱ بزرگتر باشد، منطقه نفوذپذیری موثر بالایی دارد و اگر این نسبت از ۱ کوچکتر باشد، منطقه نفوذپذیری موثر پایینی دارد. شکل ۴ یک مدل مفهومی از مناطق اطراف گسل و نفوذپذیری آنها را نشان می دهد. هر منطقه از گسل و منطقه اطراف گسل، یک نفوذپذیری موثر است که رفتار هیدرولیکی محیط را نشان می دهد که نسبت نفوذپذیری در هر محیط نسبت نفوذپذیری موثر هر منطقه به نفوذپذیری موثر منطقه فاقد گسل است.

$$K_{Ratio} = \frac{K_0}{K_m}; K_{Ratio} = \frac{K_i}{K_m} \quad (1)$$

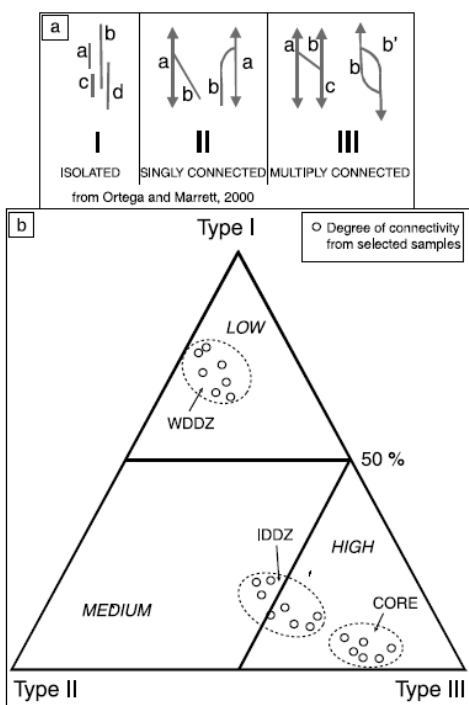
که در آن:  $K_0$  نفوذپذیری منطقه بیرونی گسل،  $K_i$ ، نفوذپذیری



شکل ۴ یک مدل مفهومی از مناطق اطراف گسل و نفوذپذیری آنها

منطقه درونی گسل و  $K_m$ : نفوذپذیری سنگ میزبان است. از جمله مزایای این روش این است که در این روش تاثیر پارامترهایی مانند کانی زایی ثانویه و یا مواد پرکننده که هر کدام به گونه ای باعث تغییر در نفوذپذیری منطقه گسلی شده

Km نفوذپذیری ماتریس میان نوار لغزش، t پیچ و خم و تورتوسیتی در شکستگی ها  $t=w/w'$ ، W': مجموع طول بازشدگی شکستگی ها، W": ضخامت نوار لغزش است. اگر تعداد شکستگی هایی که صحنه گسل قطع می کند برابر n باشد سپس خواهیم داشت:



$$K_x^* = \frac{1}{L} \left[ na \frac{K_f}{t} + (L - na) K_m \right] \quad (3)$$

بسیاری از صفحات لغزش گسل دسته ای از شکستگی ها را قطع می کنند که بوسیله مواد پرکننده ای پر شده اند که تخلخل و مجاری حرکت آب را کاهش می دهند. بنابراین جریان در عرض صفحات لغزش متمرکز می شود و فرض این که  $k_m=0$  معقولانه است (صفحات نا تراوا فرض شوند).

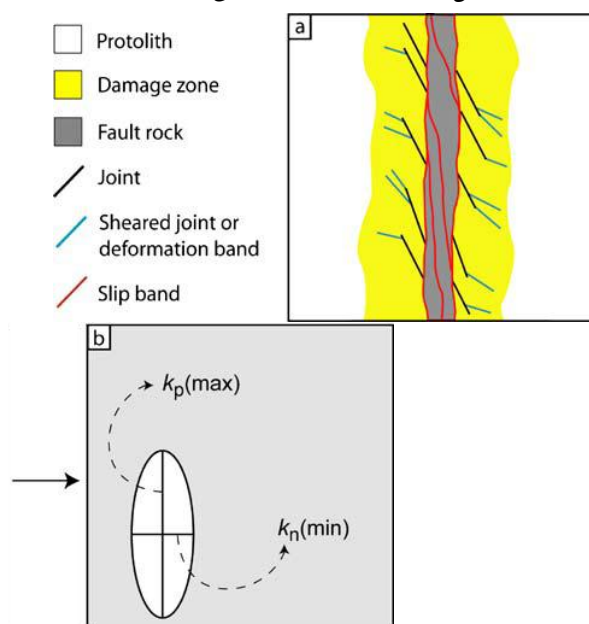
مزایا و معایب این مدل را می توان چنین بیان کرد:

عمده ترین مزیت این روش تقسیم بندی زون گسله به مناطق مجزا و بررسی نفوذپذیری در هر کدام از این مناطق و به دنبال آن ارائه یک مدل تحلیلی برای محاسبه میزان نفوذپذیری در اطراف زون گسله است.

اما از معایب این روش می توان به این نکته اشاره کرد که در حالتی که منطقه گسل وسیع است و تعیین پارامتر نفوذپذیری و تعیین اجزاء جریان در گسل عمودی بحرانی است.

آنتونیلینی و آیدین (۱۹۹۴) و شیپتون (۲۰۰۲) برای بررسی نفوذپذیری در اطراف زون های گسله بیان داشتند که هر منطقه گسلی شامل چندین جزء گسلی است: هسته گسل، منطقه رانده شده توسط گسل و منطقه تخریب شده در اطراف گسل که شامل درزه ها و مواد تغییرشکل یافته می شود.

شکل ۵ (a) نشان دهنده انواع ارتباط های فیزیکی میان شکستگی هاست. شکل (b) درجه هدایت شبکه شکستگی در امتداد یک گسل مورد مطالعه را نشان می دهد.



شکل (۶) - a. یک مدل مفهومی برای تعیین نفوذپذیری در اطراف گسل: هندسه اطراف گسل (b) تانسور دو بعدی نفوذپذیری با نفوذپذیری ماکزیمم ( $K_p$ ) برای جریان موازی گسل و  $K_n$  نفوذپذیری مینیمم برای جریان نرمال بر امتداد گسل

مقادیر نفوذپذیری در صفحات رانده شده توسط گسل رانده شده اند توسط رابطه زیر محاسبه شده اند:

$$K_x^* = \frac{1}{L} \left[ a \frac{K_f}{t} + (L - a) K_m \right] \quad 22 \quad (2)$$

که در آن:  $K_x$  نفوذپذیری معادل در صفحات رانده شده، L طول صفحه رانده شده، a بازشدگی شکستگی،  $K_f = a^2/12$  نفوذپذیری شکستگی هایی که توسط گسل قطع شده اند،

اجزاء، از دیدگاه هیدرولوژی گسل های ترکیبی از اجزایی با نفوذپذیری بالا مانند درزه ها، بازشدگی های باز، صفحات لغزش و اجزا با نفوذپذیری پایین سنگ های گسلی شده، صفحات تغییرشکل یافته و گوژ، که در یک ماتریس تعبیه شده اند. با توجه به اهمیت و نقش این ساختارها در هدایت سیال و به خصوص آب زیرزمینی بدرون سازه های زیرزمینی و سطحی، بررسی مدل های مختلف رفتار هیدرولیکی این ساختارها حائز اهمیت است. تاکنون مدل های زیادی به منظور محاسبه و بررسی رفتار هیدرولیکی گسل ها ارائه شده است که تعدادی از آنها در متن آورده شده است جدول ۱ به بیان مزایا و معایب هر کدام از این مدل ها می پردازد.

صفحات رانده شده در حالتی که از یک ساختار پیوسته پیروی می کنند عمدتاً جریان را کنترل کرده و مانند دو صفحه موازی با بازشدگی ثابت در نظر گرفته می شوند. در حالی که در واقعیت چنین نیست و در برابر این حالت ایده آل می توان حالتی را در نظر گرفت که صفحات رانده شده مانند دو صفحه با بازشدگی یکسان عمل نمی کنند و در بعضی موارد دارای نفوذپذیری پایینی هستند و تاثیر بسزایی بر نفوذپذیری معادل در منطقه اطراف گسل خواهند داشت. از سوی دیگر باید در نظر داشت که واضح است که شرایط بازشدگی شکستگی ها در زیر سطح تحت فشار گسل و فشار های ناشی از گسل تغییر می کند و با بازشدگی به دست آمده از سطح متفاوت خواهد بود. که در این مدل در نظر گرفته نشده اند.

### ۳. جمع بندی و نتیجه گیری

گسل ها ساختارهای پیچیده زمین شناسی هستند که ترکیبی از ساختارهای مجزای کوچکتر نظیر درزه ها، درزه های برشی، صفحات تغییر شکل یافته، خرده سنگ هستند بنابراین رفتار هیدرولیکی گسل ها تابعی است از رفتار هر کدام از این

جدول ۱ مروری بر مدل های ارائه شده برای رفتار هیدرولیکی گسل ها

method	Advantages	Disadvantages
Smith et al,1994	<ul style="list-style-type: none"> <li>Classification of hydraulic behaviour of faults to barrier and conduits</li> <li>Considration to inner and outer hydraulic behaviour of faults</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Considration af limited permeability distribution in fault zone</li> <li>Model inefficiency in complex hydraulic conditions</li> <li>Model is inefficient in paradoxical condition including low permeable gouge and high permeable fractures</li> </ul>
Caine, 1996	<ul style="list-style-type: none"> <li>Improved the Smith model by classification of fault zone based on the fault core and disturebed zone</li> <li>Considration of major properties of faults including gouge and berreiciated zone</li> <li>Isolation of the damaged area from the fault core, assuming high permeability for this zone</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consideration of low permeable core for all fault zone is incorrect.</li> <li>Inattention to the change in the fault permeability due to the filling material</li> </ul>

Taylor, 2000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Providing effective permeability ratio for fault zone in order to model hydraulic conditions in fault zone and fault cor</li> <li>• resolve the problem of the caine method, taking into account parameters such as secondary mineralization or filling materials, that change the fault zone permeability.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• The Small-scale items are not considered in the definition of effective permeability</li> <li>• Inattention to the physical connectivity of fault items and their effects on the fault zone permeability</li> </ul>
Schiptone, 2002	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Classification of fault zone to the:core, slip band, disturbed zone, joints and deformation band</li> <li>• Attention to the permeability changes due to the weathering and filling material</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consideration of fixed aperture for faults</li> <li>• In the large scale, determination of faults item permeability is difficult</li> </ul>
Micarly, 2004	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consideration of fluid properties in the fault zone</li> <li>• Attention to the fault length and width, flow path and fault dip</li> <li>• Attention to the flow turbulanty</li> <li>• Attention to the connectivity of faults and joints</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• In attention to the aperture change during the loading</li> <li>• In attention to the changing in the slip band permeability</li> </ul>

#### منابع

- Antonellini, M., Aydin, A., 2002 Microstructure of deformation bands in pourous sandstones at arches nation park, journal of structural geology 16, 941-959.
- Caine, J.S, et al, 1996, fault zone architecture and permeability structure, geology 24, 1025-1028.
- Graham Wall, B, 2004, evolution of fluid pathways along fracture controlled faults in fold-thrust belt carbonate strata , Ph.D thesis, Stanford university.
- Micarelli, L. et al 2006, "Structural evolution and permeability of normal fault zones in highly porous carbonate rocks " Journal of Structural Geology 28 , 1214-1227.
- olsson, W, 1992, "The effect of slip on the flow of fluid through a fracture", geophysical research, 19, 541-543
- Smith, L. 1990, " Interaction of fault zones, fluid flow, and heat transfer at the basin scale, In: hydrogeology of low permeability environments", hydrogeology, p 41-67
- Smith . 1995, " \scaling and nonsealing faults in Louisiana gulf coast salt basin-implications for effective permeability of fractured rock", association of petroleum geologist 64, 145-172
- Taylor, W.L, 2000, "Affinity of joints and deformation bands-implications for effective permeability of fractured rock", water resources research
- Taylor, W.L, (1999), "fluid flow in and chemical alteration in fractured sandstones."Ph.D thesis, Stanford university.