

مدل سازی رفتار مکانیکی درزه های طبیعی سنگی طی برش مستقیم با توجه به زبری سطوح

سید احمد مهری شال^{۱*}، مصطفی شریف زاده^۲، یوسف میرزائیان^۳

۱- دانشجوی دکترای مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر Ahmad.mehri@aut.ac.ir

۲- عضو هیات علمی دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشجوی دکترای استخراج، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت ۲۱ آذر ۱۳۸۹، پذیرش ۲۱ اسفند ۱۳۹۰)

چکیده

تاکنون مدل های متعددی به منظور پیش بینی رفتار مکانیکی درزه های سنگی ارائه شده است اما برآورد صحیح ضریب زبری مؤثر و مقدار اتساع درزه ها طی برش، همواره از بزرگترین محدودیت های این مدل ها بوده است. این تحقیق، چگونگی تأثیر زبری سطوح درزه بر رفتار برشی و اتساعی درزه های گرانیتی را حین آزمایش برش مستقیم مورد بررسی قرار داده است. زبری سطوح درزه، اعم از زبری کوچک و بزرگ مقیاس، تأثیر مستقیمی بر اصطکاک و همچنین بازشدگی موجود بین دو سطح در حال تماس دارند. بنابراین در این تحقیق با ترکیب نیمرخ های برداشت شده از سطوح بالایی و پایینی درزه، یک سطح مرکب تولید شد که به طور همزمان در برگرفته های ویژگی های دندان داری هر دو سطح است. هرکدام از نیمرخ های برداشت شده از سطح درزه به صورت یک موج دو بعدی در نظر گرفته می شود. برای مطالعه ی دندان داری نیمرخ های برداشت شده، از روش تجزیه ی چند مقیاسی امواج بر پایه ی تئوری موجک استفاده شده است. با استفاده از تئوری موجک، امکان دید همزمان اجزای کوچک مقیاس (زبری) و بزرگ مقیاس (یا موج مانند) یک درزه وجود دارد. پس از تجزیه ی هر موج (یا نیمرخ) به مؤلفه های تقریبی (یا تموج) و جزئی (یا زبری) خود، هرکدام از آن ها به صورت جداگانه خصیصه دهی شدند. این شیوه خصیصه دهی به سادگی از نیمرخ ها یا امواج دو بعدی به سطوح سه بعدی درزه بسط داده می شود. در نهایت مدلی برای بیان ضریب زبری و رفتار عمودی درزه در گام های برشی مختلف توسعه داده شده است. با استفاده از این روش می توان مقدار جابجایی لازم برای رسیدن به مقاومت برشی پیک و همچنین مقاومت برشی پیک و پسماند درزه را به خوبی تخمین زد. علاوه بر این نتایج نشان داد که عامل اصلی کنترل کننده رفتار اتساعی درزه ها، دندان داری مرتبه ی اول یا تموج درزه است. انطباق مناسب نتایج مدل سازی و آزمایشگاهی، درستینسی این روش را تأیید می کند.

کلمات کلیدی

درزه ی سنگی، زبری، تئوری موجک، مقاومت برشی و اتساعی، تجزیه چند مقیاسی، کاهش خطای داده های برداشت لیزری

۱- مقدمه

رفتار برشی و اتساعی درزه‌های سنگی یکی از مهم‌ترین موارد طراحی در مهندسی سنگ بوده و تخمین درست این مقادیر اهمیت زیادی در تفهیم مکانیزم برش سنگ‌ها و حل مسائل مختلف مکانیک سنگی دارد. در کل پیش‌بینی رفتار مکانیکی درزه‌های طبیعی دشوار است، زیرا ضریب زبری مؤثر و زاویه‌ی اتساع در درزه‌های طبیعی با اعمال برش متغیر بوده و خود تابع عوامل متعددی از قبیل تنش محدود کننده، خواص مقاومتی سنگ، هندسه سطح درزه، مواد پرکننده، رطوبت و غیره است. اما محققین اظهار داشته‌اند که هندسه یا دندانه‌داری سطوح، مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده رفتار مکانیکی درزه‌ها است.

دندانه‌داری درزه‌ها در مکانیک سنگ به دو دسته‌ی دندانه‌داری مرتبه‌ی اول (یا تموج) و دندانه‌داری مرتبه‌ی دوم (یا زبری) تقسیم می‌شود. در گام‌های ابتدایی برش، دندانه‌داری مرتبه‌ی اول و دندانه‌داری مرتبه دوم به طور همزمان در رفتار قبل از پیک درزه تأثیرگذار هستند، اما در کنترل رفتار پس-ماند، تنها دندانه‌داری مرتبه اول نقش تعیین‌کننده دارد [۱]. این موضوع در مطالعات و مدل‌سازی‌های گذشته چندان مورد توجه قرار نگرفته است.

در این تحقیق، با استفاده از روش تحلیل چند مقیاسی^۱ امواج به کمک ابزار موجک^۲، دندانه‌داری سطوح نمونه درزه‌ی گرانیتی مطالعه شده است. ابتدا داده‌های ارتفاعی برداشت شده از سطوح درزه‌ها به کمک یک کد برنامه‌نویسی (نرم افزار MATLAB) و با استفاده از ابزار موجک به دو مقیاس تقریبی (تموج) و مقیاس جزئی (زبری) تجزیه شده است. با این روش تجزیه، اختلالات ناشی از خطای برداشت نیز تصحیح می‌شوند. پس از کاهش خطای برداشت زبری‌ها و اعمال تجزیه‌ی چند مقیاسی، با استفاده از شاخص آماری انحراف متوسط حسابی (S_a) و همچنین مشخصه بیشترین مقدار ارتفاعی سطح مرکب (Z_{max})، اقدام به خصصیصه‌دهی دندانه‌داری سطوح در دو مقیاس مختلف شده و در نهایت، رفتار برشی و اتساعی، بر پایه‌ی تئوری اصطکاک و با صرف نظر کردن از شکست دندانه‌ها در هر گام برش، مدل‌سازی شده است.

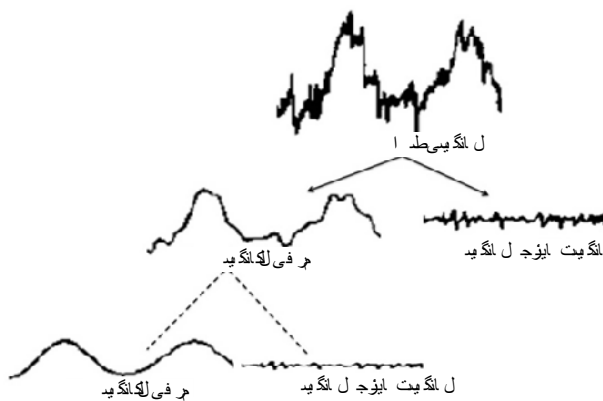
۲- مطالعه‌ی هندسه سطوح درزه

۲-۱- بررسی‌های آزمایشگاهی

نمونه مورد مطالعه یک سنگ گرانیتی با مقاومت فشاری زیاد (حدود ۱۸۰ مگاپاسکال) و ابعاد 100×180 میلی‌متر که دارای درزه‌ای با زبری‌های طبیعی و زاویه اصطکاک پایه‌ی ۳۰ درجه است. برای تحقیق رفتار برشی درزه موجود در نمونه، آزمایش برش مستقیم با استفاده از یک دستگاه برش مستقیم استاندارد تحت تنش عمودی ۱ و ۳ مگاپاسکال و شرایط مرزی CNL^۳ اجرا شده است. برای تعیین هندسه سطوح درز داده-های تپوگرافی با گام‌های ۰/۲ میلی‌متر در هر دو راستای X و Y از روی سطح درزه‌های گرانیتی به وسیله اسکنر لیزری با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر برداشت شده‌اند [۲].

۲-۲- تجزیه چند مقیاسی و نویزگیری زبری‌ها با موجک

تبدیل موجک در واقع تجزیه یک تابع به سری‌های تقریبی و جزئی تشکیل دهنده آن تابع است. با هر مرحله اعمال تجزیه بر روی یک موج یا پروفایل زبری، موج تقریبی، زمخت‌تر و موج جزئی به صفر نزدیک‌تر می‌شود. به طوری که در مرحله‌های آخر تجزیه، موج تقریبی میانگین موج عددی اصلی و موج جزئی صفر است (شکل (۱)) [۳].



شکل ۱: تجزیه یک موج به سری‌های تقریبی و جزئی تشکیل دهنده آن [۳]

در سیستم برداشت لیزری، انکسار نور توسط کانی‌های شفاف، یکی از عوامل اصلی بروز خطا است. از آنجایی که نمونه‌های مورد آزمایش، درزه‌های گرانیتی با درصد کوارتز بالا هستند، احتمال بروز خطا در این نمونه‌ها بیشتر از سایر سنگ‌ها است [۴]. خطای برداشت در نیمرخ به دست آمده از دستگاه اسکنر لیزری که در شکل (۲) نشان داده شده است به وضوح نمایان است. طبق نظر محققان، در تجزیه‌ی داده‌های تپوگرافی

چندمقیاسی مفیدترین و بیشترین اطلاعات از سطح درز سنگی حاصل شود [۳]. در شکل (۳) نیمرخ A-A برداشت شده از سطح نمونه درزه مورد مطالعه و تصاویر پروفایل مرکزی آن، قبل و بعد از تجزیه، نشان داده شده است.

۳- تئوری تحقیق

۳-۱- مکانیزم رفتار برشی درزه

مجموعه عوامل متعددی در کنترل رفتار برشی درزه ها مؤثرند. تأثیر برخی از این عوامل دارای اهمیت بیشتری هستند که توسط محققین پیشین در قالب مکانیزم برش مورد بررسی قرار گرفته اند. خلاصه ای از مکانیزم هایی که اکثر محققین در آن اتفاق نظر دارند، عبارتند از:

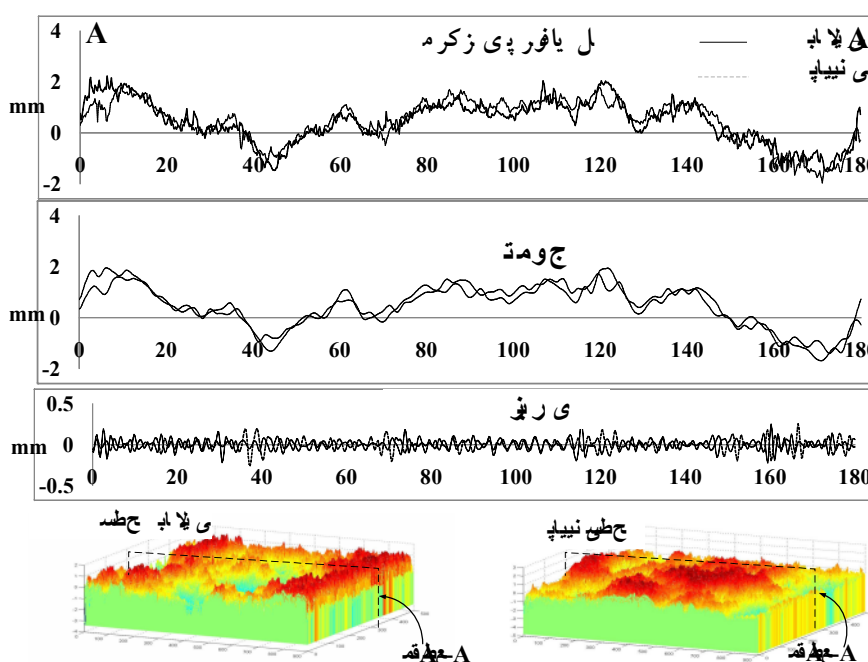
طبق نظر پاتن، بارتن، هوک و بری، سطح درز از دو نوع دندانه داری تشکیل شده است که با عبارات زبری (یا

سطوح سنگی به دست آمده از اسکنر لیزری، برای حذف نویزها و شناخت دقیق خصیصه های سطح، استفاده از ۳ مرحله تجزیه ی موج زبری کافی است [۵].

تجزیه یک موج به چند مقیاس، به آنالیز چندمقیاسی معروف است. موجک ابزاری است که امکان دید همزمان اجزای بزرگ مقیاس و کوچک مقیاس یک موج را فراهم می کند. برای مثال اگر نیمرخ دندانه داری سطح یک درزه را به عنوان یک موج در نظر بگیریم، تموج (یا دندانه داری مرتبه ی اول) جزء بزرگ مقیاس موج بوده و زبری ها (یا دندانه داری مرتبه ی دوم) اجزای کوچک مقیاس موج را تشکیل می دهند [۶].

در تحلیل چندمقیاسی با استفاده از ابزار موجک امکان استفاده از انواع مختلفی از موجک ها با خواص تجزیه متفاوت وجود دارد. در این تحقیق برای تحلیل چندمقیاسی مناسب نمونه درز سنگی مورد آزمایش از موجک با مشخصه ی db8 که از خانواده موجک های دابچیز است، استفاده شده است. انتخاب نوع موجک به گونه ای انجام می شود که با انجام تحلیل

شکل ۲: اختلاف موجود بین پروفایل بالایی و پایینی نیمرخ مرکزی درزه شماره ۱



شکل ۳: موج یا نیمرخ برداشت شده از سطح درزه برای مقطع A-A درزه شماره ۲، قبل و بعد از تجزیه. (محور عمودی با بزرگ نمایی ۱۰ برابر)

- پاتن، لادانی و آرشامبولت، لام، جانستون، بارتن، هوک و بری معتقدند: در تنش های عمودی کم مکانیزم لغزش حاکم بوده و در تنش های عمودی زیاد، با افزایش گسترش میکروتکرک ها در دندانه ها، مکانیزم حاکم برشی

- دندانه داری مرتبه دوم) و تموج (یا دندانه داری مرتبه اول) شناخته می شوند. در جابجایی برشی اندک، رفتار برشی توسط زبری کنترل می شود و در جابجایی زیاد تموج غالب می شود.

است.

- بنابر مطالعات انجام شده توسط هانگ، هاندانیان، پرایر، فریتاز، با افزایش تنش عمودی، مکانیزم دیگری که وارد عمل می شود بروز ترک های کششی و کنده شدن یا جدایش دندانه از روی سطح خود است.
- سیدل اظهار داشت: رفتار برشی در هر مرحله از برش توسط پرشیب ترین دندانه ها کنترل می شود و پس از بریده شدن دندانه های پرشیب، دندانه های با شیب کم وارد عمل می شوند.
- انجام برخی آزمایش ها توسط هابرفیلد، جانستون نشان داد: درزهایی که دندانه های منظم و با شکل مشخص دارند، رفتاری شکننده داشته و در جابجایی های پایین به برش می رسند ولی درزه های طبیعی که دارای سطوح با زبری نامنظم هستند، قبل از پیک، رفتار شکل پذیرتری از خود نشان می دهند و بعد از پیک نیز به صورت تدریجی به مقدار پس ماند خود میل می کنند.
- گراسلی معتقد است، مقاومت برشی پیک دوسطح درحال تماس، ناهمسانگرد است. یعنی با تغییر راستای برش، مقاومت برشی تغییر خواهد یافت، زیرا زبری مؤثر راستای برش، با تغییر جهت برش، تغییر خواهد کرد. در کل در مقادیر تنش عمودی کم، نسبت به سایر پارامترها، زبری سطح عامل بسیار تعیین کننده ای است.

۳-۲- مکانیزم رفتار اتساعی درزه

- مقدار اتساع در آزمایش برش مستقیم عبارت است از نسبت جابجایی عمودی درزه به جابجایی برشی طی برش، که تانژانت معکوس این مقدار را زاویه ای اتساع می نامند [۷]. مکانیزم رفتار اتساعی از جنبه های مختلفی بررسی شده است که خلاصه ای آن به شرح زیر است:
- در سطوح تنش عمودی کم، اتساع به طور کامل تابع شکل دندانه داری بوده و توسط بلندترین دندانه کنترل می شود [۴]، [۷]، [۸].
 - با افزایش تنش عمودی، دندانه های بلندتر (یا پرشیب تر) بریده می شوند و بار به دندانه های کوتاه تر منتقل می شود. پس مشاهده می شود که در این حالت اتساع به دندانه داری و میزان تنش عمودی وارده و خواص سنگ وابسته

خواهد شد [۸]، [۹].

- در جابجایی های خیلی کم، اتساع تغییر چندانی نخواهد کرد. بنابراین رفتار اتساعی درزه اغلب توسط دندانه داری مرتبه ی اول یا تموج کنترل می شود و دندانه داری مرتبه ی دوم (یا زبری) چندان در مقدار اتساع مؤثر نیست [۴].

۴- مدل سازی رفتار مکانیکی درزه در برش

۴-۱- خصیصه دهی آماری دندانه داری سطح درزه

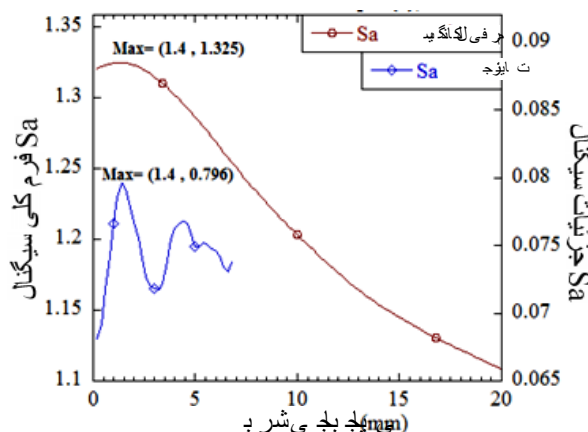
پس از تجزیه ی زبری ها به مقیاس های مختلف باید به آن ها خصیصه دهی کرد. در این تحقیق، خصیصه دهی برای زبری های چند مقیاسی با استفاده از اندیس انحراف متوسط حسابی، که از رابطه ی (۱) به دست می آید، انجام می شود.

$$S_a = \frac{1}{ij} \sum_{k=0}^{i-1} \sum_{l=0}^{j-1} |z(x_k, y_l) - u| \quad (1)$$

که در آن n تعداد کل داده های برداشت شده از نیمرخ، x راستای برداشت داده ها یا امتداد نیمرخ، Z ارتفاع نقاط برداشت شده و u طول نمونه برداری است. u نیز ارتفاع خط میانی است. پارامتر S_a متداول ترین و پر استفاده ترین پارامتر برای آنالیز ساختاری سطوح است. این پارامتر دارای واحد طول است [۳]، [۱۰].

در این تحقیق به منظور مطالعه همزمان دندانه داری سطوح درزه، از روش محاسبه ی سطح مرکب استفاده شده است. استفاده از سطح مرکب تفریقی برای مدل سازی رفتار برشی و سطح مرکب تجمعی برای مدل سازی رفتار اتساعی در این تحقیق مناسب تشخیص داده شد. یعنی این که داده های ارتفاعی سطوح بالایی و پایینی درزه، طی برش، به صورت نظیر به نظیر از یکدیگر کم یا با همدیگر جمع شده و داده های حاصله از این عملیات، سطح مرکب نامیده شده است.

شکل (۴) چگونگی تغییرات مقدار S_a سطح مرکب را طی ۲۰ میلی متر جابجایی برشی برای درزه ی گرانیته تحت مطالعه، نشان می دهد. مشاهده می شود، بیشترین مقدار S_a در جابجایی برشی ۱/۴ میلی متر حاصل شده است و این مقدار حداکثر، بیانگر بیشترین درگیری و قفل شدگی دندانه های درزه



شکل ۴: چگونگی تغییرات مقدار S_a حاصله از سطح مرکب، طی جابجایی برشی برای دو مقیاس زبری و موج

$$\tau_i = \begin{cases} \sigma_n \times \tan \left[\tan^{-1} \left(\left(\frac{S_{a(i)}^D}{Z_{[max]}^D} \times \ln(C \cdot \sigma_c) \right) + \left[\frac{S_{a(i)}^A}{Z_{[max]}^A} \right] \right) + \varphi_b \right] & u_i \leq u_p \\ \sigma_n \times \tan \left[\tan^{-1} \left(\left(\frac{S_{a(i)}^A}{Z_{[max]}^A} \right) \times EP_i \right) + \varphi_b \right] & u_i > u_p \end{cases} \quad (2)$$

که در آن u_i مقدار جابجایی برشی در گام i ام پسماند است. u_p مقدار جابجایی برشی درزه قبل از پیک بوده که در بخش ۴-۱ تخمین زده شد. u_{max} نیز بیشترین مقدار جابجایی برشی اعمالی است.

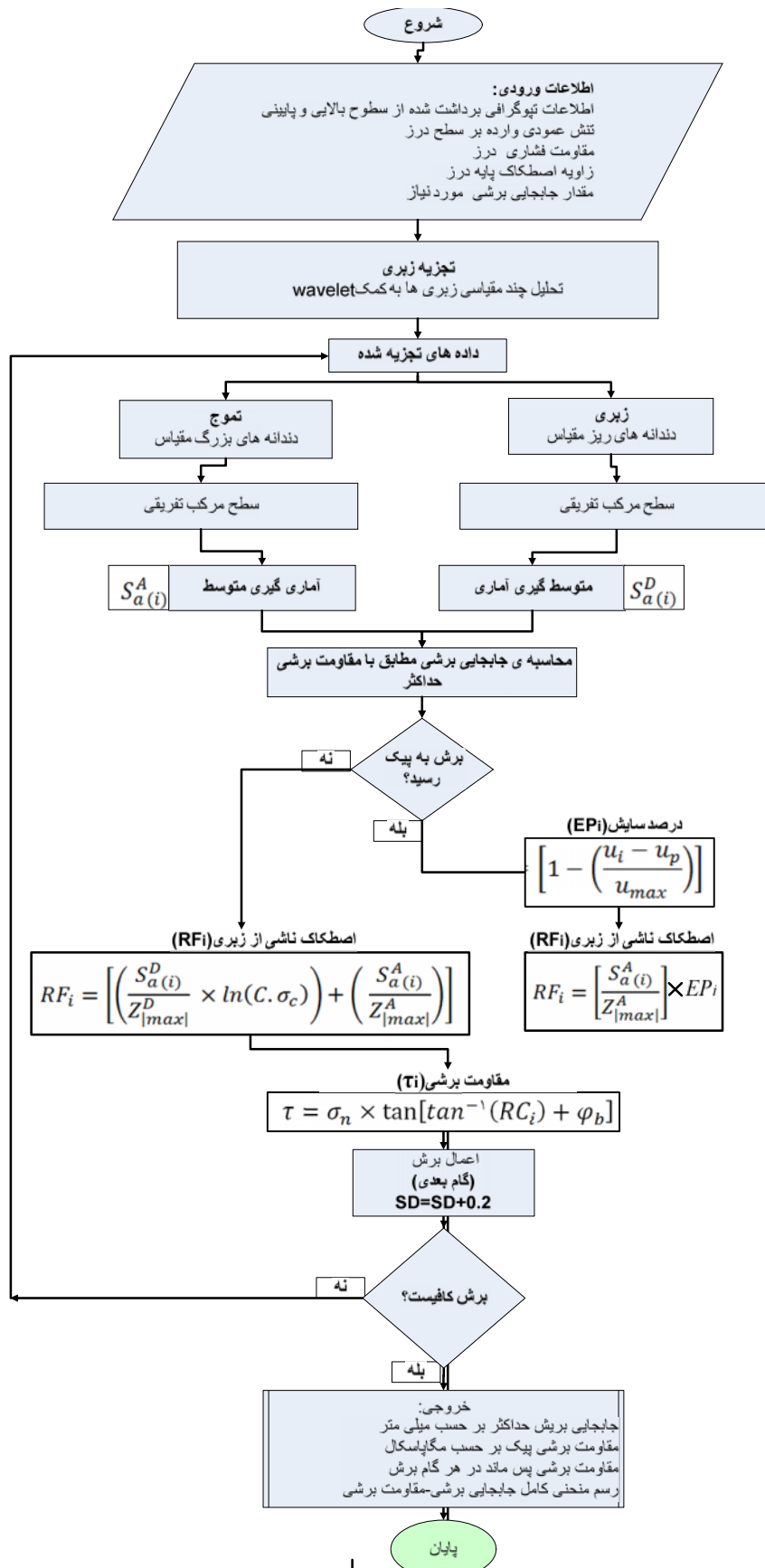
بر اساس این رابطه، یک نرم افزار شبیه سازی آزمایش برش مستقیم طراحی و ساخته شد. الگوریتم محاسباتی این نرم افزار در شکل (۵) نشان داده شده است. با وارد کردن هندسه ی سطوح درزه و خصوصیات مقاومتی نمونه و شرایط مرزی تنش، مقاومت برشی درزه طی برش با دقت خوبی برآورد می شود. نتایج منحنی تنش برشی- جابجایی برشی به دست آمده از مدل سازی و نتایج به دست آمده از آزمایشگاه در شکل (۶) در کنار یکدیگر نشان داده شده اند. مشاهده می شود که در اینجا انطباق مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل سازی وجود دارد. همچنین مقدار جابجایی برشی قبل از پیک به دست آمده از مدل سازی، به خوبی با نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارد. تنها در مقادیر مقاومت برشی قبل از پیک مقداری عدم هماهنگی بین مدل ارائه شده و نتایج آزمایشگاهی مشاهده می شود. علت این است که مدل قادر به شبیه سازی مقادیر تغییر شکل الاستیک دندانها نبوده و این عدم انطباق در مقادیر تنش بیشتر، نمایان تر خواهد شد.

در راستای برش است. محاسبه ی S_a برای هر دو مقیاس زبری در درزه های طبیعی قابل اجرا است. فقط چگونگی کاربری این روش خصیصه دهی برای زبری های کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس متفاوت است.

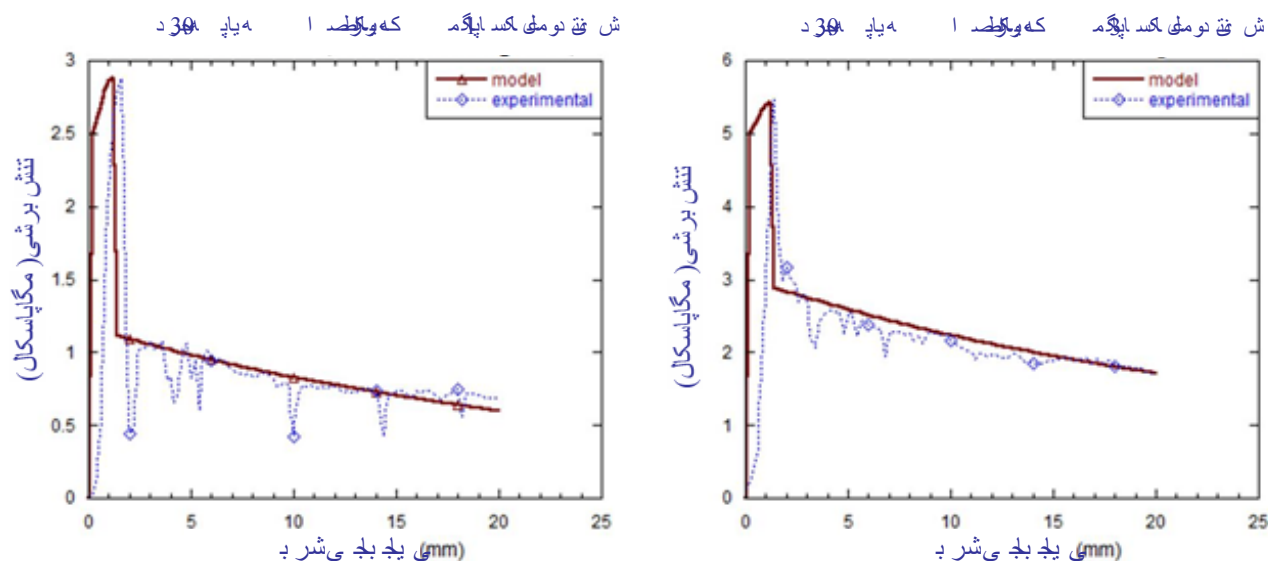
۴-۲- مدل سازی رفتار برشی درزه ها طی برش

در این تحقیق با استفاده از رابطه ی تکه ای (۲)، رفتار کامل برشی درزه مدل سازی شد. در این رابطه τ_i مقاومت برشی درزه در گام i ام برش است. σ_n تنش عمودی وارده بر حسب مگاپاسکال، φ_b زاویه ی اصطکاک پایه بر حسب درجه بوده که وابسته به جنس مواد است. $S_{a(i)}^D / Z_{[max]}^D$ زبری کوچک مقیاس سطح مرکب تفریقی در گام i ام برش است که با توجه به قدر مطلق بیشترین مقدار ارتفاعی دندانهای سطح مرکب، نرمالایز (بی بعد) شده است. $S_{a(i)}^A / Z_{[max]}^A$ نیز زبری بزرگ مقیاس سطح مرکب در گام i ام برش است (بالانویس های D و A در این عبارت مخفف کلمات Detail و Approximation بوده که معرف سری های جزئی و تقریبی حاصل از تجزیه به وسیله موجک است (شکل (۱)). C ضریب تجربی است که وابسته به خواص فیزیکی نمونه بوده و در اینجا برابر با ۰/۳ تخمین زده شد. EP_i درصد سایش در گام i ام برش بعد از پیک (پسماند^۴) بوده و از رابطه ی (۳) محاسبه می شود.

$$EP_i = \left| 1 - \left(\frac{u_i - u_p}{u_{max}} \right) \right| \quad (3)$$



شکل ۵: الگوریتم محاسباتی مدل سازی رفتار کامل برشی



شکل ۶: مقایسه‌ی مدل برشی ارائه شده و نتایج آزمایشگاهی حاصله از آزمایش برش مستقیم درز گرانیته‌ی شماره (۱) و (۲)

۴-۳- مدل سازی رفتار اتساعی درزه

در این بخش با استفاده از تعریف سطح مرکب تجمعی، تأثیر هندسه‌ی سطوح درزه بر رفتار اتساعی آن مورد بررسی قرار گرفته است. سطح مرکب تجمعی از حاصل جمع مقادیر ارتفاعی نظیر به نظیر سطح بالایی و پایینی درزه در گام‌های برشی مختلف به دست می‌آید.

به علت کم بودن تنش عمودی و زیاد بودن مقاومت فشاری درزه، از شکست یا بریده شدن دندانه‌ها صرف نظر شد. بنابراین، مقدار اتساع درزه در هر گام از برش با استفاده از دندانه‌های با ارتفاع بلندتر کنترل می‌شود. رابطه (۴) برای اولین بار در این تحقیق برای بیان رفتار اتساعی درزه‌ها حین برش ارائه شده است.

$$Dil_k = (Z_{max(k)} - Z_{max(0)}) * \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_c}\right) \quad (4)$$

که در آن σ_n تنش عمودی و σ_c مقاومت فشاری تک محوره است. $Z_{max(k)}$ بیشترین مقدار ارتفاعی سطح مرکب مجموع در گام برش k ام بوده و $Z_{max(0)}$ نیز بیشترین مقدار ارتفاعی سطح مرکب در ابتدای برش است. بدین ترتیب مقدار اتساع درزه در هر گام برش (Dil_k) محاسبه می‌شود.

فرآیند مدل سازی در این بخش به دو طریق انجام شد. یکی با استفاده از داده‌های اولیه‌ی به دست آمده از نیمرخ پیمایی لیزری و دیگری با استفاده از زبری مؤثر توسعه یافته (یا همان داده‌های هندسی اصلاح شده) بوسیله‌ی ابزار موجک. نتایج رفتار اتساعی به دست آمده از مدل سازی نمونه‌های گرانیته‌ی شماره‌ی (۱) و (۲) با استفاده از زبری اولیه و اصلاح شده که با

تجزیه ۳ مرحله‌ای زبری سطح مرکب حاصل شده، به ترتیب در اشکال (۷) و (۸) در مقابل نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده‌اند.

در تمام اشکال، حالت کلی منحنی اتساع مشابه نتایج آزمایشگاهی است. اما در منحنی‌های به دست آمده از داده‌های اولیه‌ی زبری، نوسانات شدیدی مشاهده می‌شود که ناشی از خطاهای برداشت هندسه سطوح درزه است. به طوری که پس از اصلاح زبری‌ها بوسیله‌ی تجزیه‌ی موجک، منحنی اتساع به طور کامل به شکل نرم در آمده و رفتار مدل تا حدود زیادی مشابه رفتار واقعی درزه است. از طرفی دیگر نیز می‌توان گفت: از آنجایی که عامل اصلی کنترل کننده رفتار اتساعی درزه‌ها، دندانه‌داری مرتبه اول یا تموج سطوح درزه است، بنابراین تجزیه‌ی زبری سطوح، موجب حذف زبری‌های ریز مقیاس شده و اتساع بر اساس زبری‌های بزرگ مقیاس مدل می‌شود.

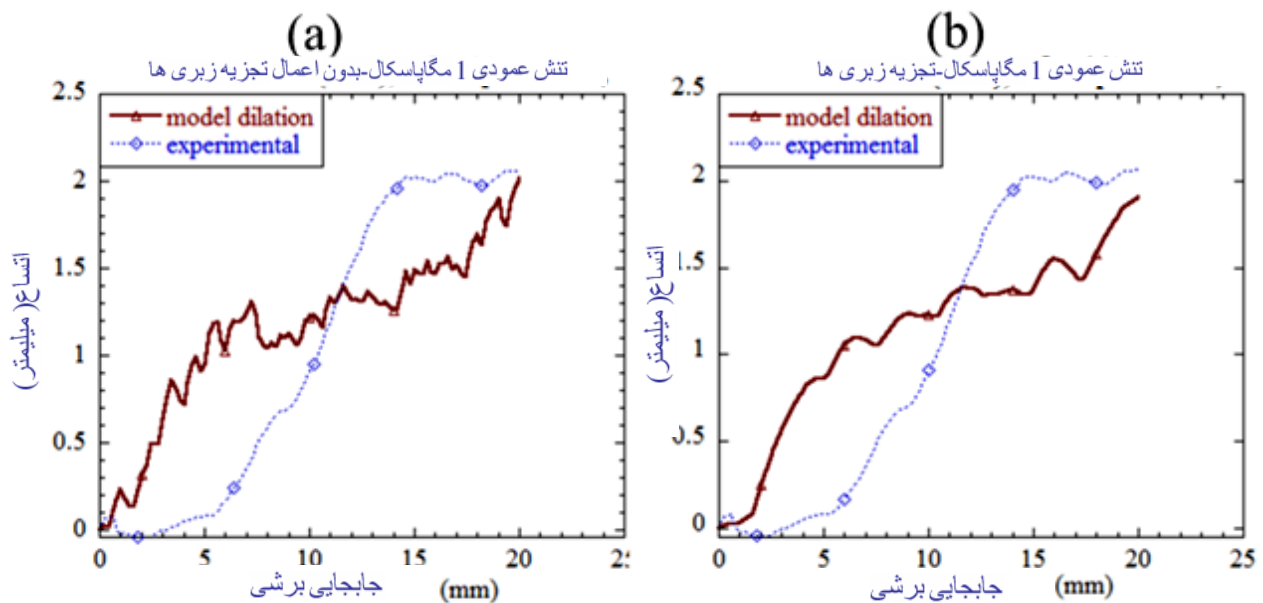
سایر تفاوت‌هایی که بین مدل سازی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد، ممکن است دلایل مختلفی داشته باشد. برای مثال در اینجا برای مدل سازی رفتار اتساعی، فرض شده است که دو سطح درزه در حالت کاملاً افقی قرار داشته و در اثر برش تنها سطح بالایی درزه بدون هیچ چرخشی به سمت بالا حرکت می‌کند که این فرض با واقعیت در تناقض است. زیرا دو سطح در حال تماس در هر موقعیتی حداقل باید سه نقطه تماس بایکدیگر داشته باشند، ولی در اینجا از چرخش نمونه‌ها حین برش صرف نظر شده است. همچنین صدمات احتمالی وارد شده بر دندانه‌های سطح درزه نیز می‌تواند یکی از دلایل بروز مقداری عدم انطباق بین نتایج مدل سازی و نتایج آزمایشگاهی

شود.

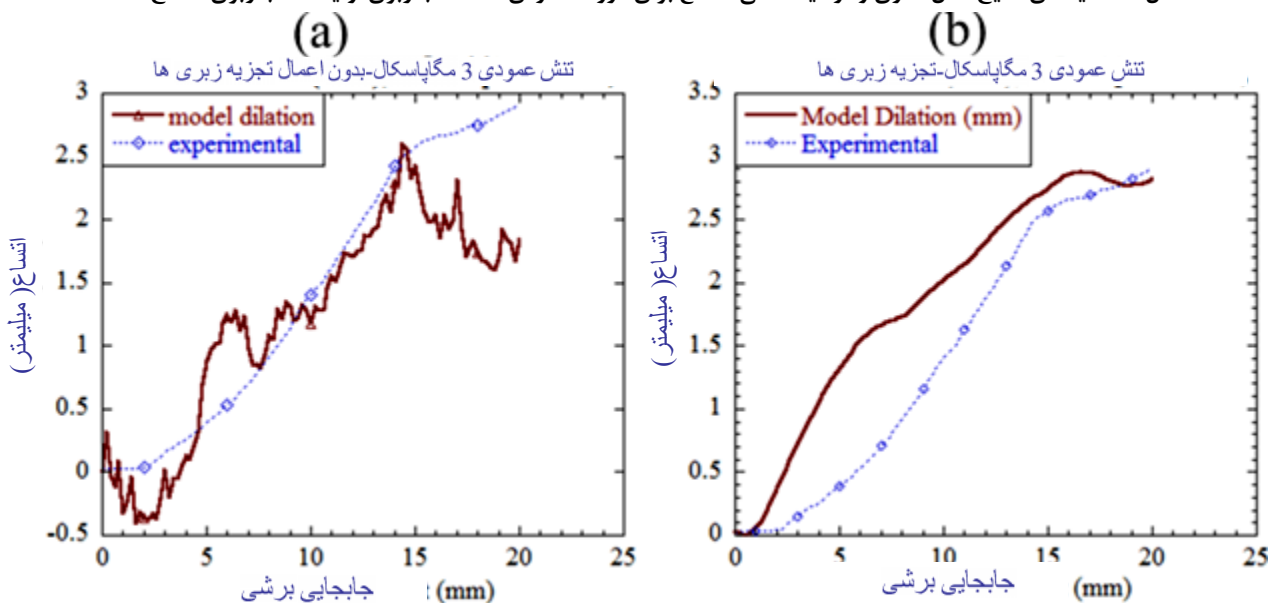
۵- بحث

فرض بر این است که مکانیزم اصلی حاکم بر رفتار برشی نمونه درزه‌های با مقاومت فشاری زیاد تحت تنش‌های عمودی کم، اصطکاک است. بنابراین دندان‌داری دو سطح تأثیر زیادی بر مقاومت برشی و رفتار عمودی آن دارد. یافته‌های محققین پیشین نیز این اظهارات را تصدیق می‌کند. برای مثال در مدل اصطکاکی ارائه شده توسط بارتن پارامتر ضریب زبری درزه (JRC) یکی از اجزای اصلی مدل است [۱۲].

در این تحقیق، تأثیرگذاری دندان‌داری سطوح بر رفتار برشی درزه‌ها در دو مقیاس زبری و تموج بررسی شد. بدین ترتیب که با تحلیل داده‌های تیپوگرافی برداشت شده از هر دو سطح بالایی و پایینی درزه‌ها، مقدار جابجایی برشی قبل از پیک، مقاومت برشی پیک و پسماند درزه‌ها و همچنین تغییرات مقدار اتساع درزه طی برش با دقت قابل قبولی تخمین زده شد.



شکل ۷: مقایسه‌ی نتایج مدل سازی و آزمایشگاهی اتساع برای درزه شماره‌ی (۱). (a) با زبری اولیه. (b) با زبری اصلاح شده



شکل ۸: مقایسه‌ی نتایج مدل سازی و آزمایشگاهی اتساع برای درزه شماره‌ی (۲). (a) با زبری اولیه. (b) با زبری اصلاح شده

همچنین طبق همان فرض، به علت کم بودن تنش عمودی و زیاد بودن مقاومت فشاری درزه، شکست یا بریده شدن دندانه ها اتفاق نمی افتد و رفتار برشی درزه اغلب تحت تأثیر توپوگرافی سطوح است. این اظهارات با یافته های آزمایشگاهی برخی محققین از قبیل گراسلی، یانگ و چیانگ، سیدل و هابرفیلد، هوانگ و همکاران مطابق دارد [۷]، [۸]، [۹]، [۱۱].

در مدل سازی رفتار برشی ارائه شده فرض بر این است که ابتدا در جابجایی های قبل از تنش برشی حداکثر، هر دو مقیاس دندانه داری سطوح بر رفتار برشی درزه تأثیر می گذارند، اما رفته رفته با افزایش جابجایی برشی، رفتار برشی به طور کامل تحت کنترل تموج درزه قرار می گیرد. بر پایه ی این استدلال در برآورد رفتار اتساعی تنها از تموج درز استفاده شد و فرض شد زبری های کوچک مقیاس تأثیری بر مقدار اتساع ندارند. در مطالعات انجام شده توسط بارتن و پاتن نیز به این موضوع اشاره شده است [۱۱]، [۱۲].

به کمک یافته های این تحقیق مقادیر مقاومت لغزشی بلوک های آزاد در سطوح شیب دار و تونل ها قابل تخمین است. تنها با استفاده از تحلیل زبری سطوح و بدون اجرای آزمایش برش مستقیم، امکان برآورد مقاومت برشی و مقدار اتساع (با بازشدگی) درزه ها در اثر جابجایی های برشی وجود دارد. بنابراین در آینده امکان توسعه ی این روش در بررسی های هیدرولیکی درزه ها نیز وجود دارد.

۶ - نتیجه گیری

خلاصه ای از یافته های این تحقیق به شرح زیر است:

- دندانه داری هر دو سطح بالایی و پایینی و موقعیت قرارگیری سطوح نسبت به همدیگر و راستای برش، همگی در ضریب اصطکاک و مقدار اتساع موجود بین سطح درزه مؤثر هستند. بنابراین به منظور توسعه ی مطالعات، ضروری است تا دو سطح با یکدیگر ترکیب شده و یک سطح مرکب معرفی حاصل شود.
- اصطکاک در رفتار برشی درزه ها به جنس و زبری بستگی دارد. اصطکاک وابسته به جنس مواد ثابت بوده و با Φ_b نشان داده می شود. اما اصطکاک وابسته به زبری در طول برش به دلیل متفاوت بودن نحوه ی درگیری دندانه ها در هر گام برش، متغیر است.
- در مقادیر اندک جابجایی برشی، زبری های مرتبه ی اول و دوم یا بزرگ مقیاس و کوچک مقیاس، هر دو فعال

هستند. با افزایش جابجایی برشی و بروز پدیده ی اتساع، دندانه داری مرتبه ی دوم از تماس خارج شده و رفتار برشی پسماند توسط دندانه داری مرتبه ی اول درزه کنترل می شود. از طرفی دیگر، عامل اصلی کنترل کننده رفتار اتساعی درزه ها، دندانه داری مرتبه ی اول یا تموج سطوح درزه است. بنابراین علاوه بر حذف پارازیت ها، تجزیه ی زبری سطح درزه به دو مقیاس زبری و تموج بسیار مهم است.

- جابجایی برشی قبل از مقاومت پیک به دو قسمت تغییر شکل الاستیک و تغییر شکل پلاستیک تقسیم شد. جابجایی برشی حداکثر تا حدودی زیادی مربوط به هندسه ی سطح درزه است. به طوری که طبق یافته های این تحقیق، لغزش پلاستیک ناچیز اولیه ی سطوح موجب بروز حداکثر قفل شدگی درزه در راستای برش خواهد شد.

منابع

- [1] Patton FD. "Multiple modes of shear failure in rock". Proc 1st Cong IntSoc Rock Mech Lisbon; 1:509-13. (1966).
- [2] Sharifzadeh M, Mitani Y, Esaki T. "Rock joint surfaces measurement and analysis of aperture distribution under different normal and shear loading using GIS". Rock Mech Rock Eng. doi: 10.1007/s00603-006-0115-6. (2006).
- [3] Mirzaeiyan, Y. "Hydromechanical coupling behavior of a single rock joint under normal and shear load". M.sc. thesis of rock mechanic engineering, Amirkabir university of technology of Tehran. (2008) (Farsi).
- [4] Grasselli G, Wirth J, Egger P., "Quantitative three-dimensional description of a rough surface and parameter evolution with shearing". Int J Rock Mech Min Sci: 39:789-800. (2002).
- [5] Khoshdelham, K., Altundag, D. "Wavelet denoising of terrestrial laser scanner data for the characterization of rock surface roughness". <http://www.isprs.org>. Optical and Laser Remote Sensing, Delft University of Technology, Kluverweg, The Netherlands. (2010).
- [6] Raja, J. Muralikrishnan, B. Fu, S. Y., "Recent Advances in Separation of Roughness, Waviness and Form". Prec. Eng., 26, PP. 222-235. (2002).
- [7] Bandis SC, Lumsden AC, Barton NR. "Fundamentals of rock joint deformation". Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr; 20(6):249-68. (1983).
- [8] Yang, Z. Chiang, D. "An experimental study on the progressive shear behavior of rock joints with tooth-shaped asperities". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences: 37 1247±1259. (2000).
- [9] Julian P. Seidel, Chris M. Haberfield. "A

- theoretical model for rock joints subjected to constant normal stiffness direct shear*". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 39 - 539–553. (2002).
- [10] Dashtizadeh, M. Biglari, F. "Surface morphology and contact roughness". AmirKabir University publication. (2006) (Farsi).
- [11] Huang, T. Chang, C. Chao, C. "Experimental and mathematical modeling for fracture of rock joint with regular asperities". Engineering Fracture Mechanics: 69 - 1977–1996. (2002).
- [12] Barton, N., "Rock mechanics review: the shear strength of rock and rock joints." Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 13, 255–279. (1976).

^۱ - Multi-scale analysis

^۲ - Wavelet analysis

^۳ - Constant Normal Load

^۴ - Residual
