



تعیین دگرشکلی در پهنه برشی بهلگرد با استفاده از هندسه ساختارهای کوچک مقیاس

محمد امیر علیمی^{۱*}

۱- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده معدن، عمران و شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۷

چکیده

پهنه برشی بهلگرد در خاور ایران، فلش‌های اتوسن را در مرز با توالی افیولیتی جنوب بیرجند تحت تأثیر دگرشکلی قرار داده است. در مطالعات صحرایی منطقه، ساختارهای کوچک مقیاسی که در دگرشکلی شکنا-شکل‌پذیر ایجاد می‌شوند، به‌عنوان نشانگرهای واتنش در ارزیابی دگرشکلی محلی مورد توجه قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا روش‌های تحلیلی مناسبی بر پایه هندسه شکستگی‌های کششی، بر گوارگی‌ها، نشانگرهای انحراف یافته و اجسام بیضی شکل اولیه به کار گرفته شده‌اند سپس این روش‌ها با هم مقایسه و محدودیت‌های استفاده از آنها بحث شده است. در مقادیر برآورد شده واتنش با استفاده از شکستگی‌های کششی و انحنای بر گوارگی، مساحت زیر منحنی فاصله-واتنش، واتنش برشی متوسط (γ mean) را تعیین می‌کند که بهتر است با فراسنج شدت واتنش تمرکز یافته (Iloc) معرفی شود. در استفاده از بر گواره‌ها در تعیین واتنش، شناخت ارتباط این نوع فابریک‌ها با ساختارهای منطقه‌ای، تفاوت الگوهای واتنش در پهنه‌های برشی با دیواره‌های موازی و گوه‌ای شکل، انکسار بر گوارگی متأثر از رفتار سنگ‌ها اهمیت دارد و باید در مقیاس ناحیه‌ای در نظر گرفته شود. استفاده از روش‌های ترسیمی نظیر (Lisle 2013) به‌علت سادگی اجرا و محاسبه فراسنج‌های واتنش برشی و تغییر حجم نسبت به روش‌های دیگر ترجیح داده می‌شود. روش‌های محاسبه میانگین داده‌های R_f به‌علت سادگی تعیین فراسنج R_f در نشانگرهای بیضی شکل و محاسبات ساده ریاضی جهت تعیین دگرشکلی در مقیاس ناحیه‌ای مناسب است. در به‌کارگیری روش‌های مختلف تعیین فراسنج‌های دگرشکلی، به‌منظور کنترل صحت فرضیات و ارزیابی دقیق واتنش می‌بایست از چندین نشانگر و روش استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: شکستگی کششی، بر گوارگی، نشانگر واتنش، پهنه برشی بهلگرد، خاور ایران



Determination of deformation in Bahlgerd shear zone by using geometry small-scale Structures

Alimi .M.A ^{1*}

1- Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Faculty of Mining, Civil and Chemistry, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

Abstract

Behlgard shear zone in eastern Iran has deformed Eocene flysch on the border with the ophiolite sequence south of Birjand. In field studies of the region, small-scale structures that are formed in brittle-ductile deformation have been considered as strain marker for assessing local deformation. For this purpose, first analytical methods based on the geometry of pattern of extension fractures, foliations, deflection of markers and initially elliptical particles have been used then these methods are compared and the limitations of their use are discussed. In the estimated values of strain using extension fractures and the curvature of foliation, the area under the distance-strain curve determines the mean shear strain (γ_{mean}), which should be introduced by parameter of the intensity of strain localization (I_{loc}). In using foliations in determining the strain, recognizing the relationship of this type of fabric with regional structures, the difference of strain patterns in shear zones with parallel and wedge-shaped walls, foliation refraction affected by the behavior of rocks, It is important and should be considered on a regional scale. Graphical methods such as Lisle (2013) due to the simplicity and calculated parameters of shear strain and volume change as compared to other methods is preferred. Methods for calculating the mean of R_f data due to the simplicity of determining the R_f parameter in elliptical markers and simple mathematical calculations to determine deformation at the regional scale. In applying different methods for determining deformation parameters, in order to control the validity of the assumptions and accurate assessment of multiple markers and strain should be used.

Keywords: extension fracture, foliation, strain marker, Bahlgerd shear zone, east of Iran

دشت بیرجند هم‌مرز است (شکل ۱. الف و ب). مرز پهنه برشی را گسل‌های جنوب بیرجند و بهلگرد تشکیل می‌دهند و دگرشکلی در آن شامل گسلش، چین خوردگی، برگوارگی و شکستگی‌های کششی است. حد فاصل این گسل‌ها، گسل‌های امتدادلغز چپگرد شورک (N280,75NE) و چشمه گزو (N295,70NE) به صورت هم‌روند با گسل بهلگرد قرار دارند. موقعیت هندسی گسل جنوب بیرجند در شمال روستای بوشاد، N150,80SW و خش‌لغزهای آن N330,00 اندازه‌گیری شده است. گسل بهلگرد، گسلی امتدادلغز چپگرد با مؤلفه معکوس است که ۱۴ کیلومتر طول دارد. در مقطع جاده‌ای نزدیک روستای بوشاد، موقعیت هندسی این گسل N290,80NE اندازه‌گیری شده است (شکل ۱. ب). از جمله چین‌های شاخص در منطقه چین بوشاد است که در راستای شمال باختری-جنوب خاوری کشیده شده است. با تحلیل قطب سطوح لایه بندی در یال‌های شمالی و جنوبی، محور چین N152,39 به دست آمد. در این تحقیق، با انتخاب نمونه‌هایی از نشانگرهای مختلف که در مطالعات صحرائی از پهنه برشی بهلگرد به دست آمده است فراسنج‌های دگرشکلی محاسبه شده است.

روش‌های تعیین واتنش با استفاده از ساختارهای کوچک مقیاس در پهنه‌های برشی

در سنگ‌های دگرشکل شده در پهنه‌های برشی، ناهمگنی واتنش مشهود است بدین معنی که وضعیت واتنش نهایی از نقطه‌ای به نقطه دیگر تغییر می‌کند. این واتنش منجر به شکل‌گیری ساختارهایی می‌شود که حساس به تغییرات واتنش بوده و به طور کامل واتنش نهایی را ثبت می‌کنند.

واتنش اغلب در بخش‌های شکل‌پذیر سنگ کره انباشته می‌شود (Vauchez et al., 2012; Snyder and Kjarsgaard, 2013) و در پهنه‌های برشی بیشترین تمرکز و مقدار را دارد. سنگ‌های دگرشکل شده در این مکان‌ها از اوایل قرن ۱۹ میلادی مورد توجه محققین قرار گرفت. Ramsay (1967) تحلیل کمی واتنش با بهره‌گیری از معادلات نوین ریاضی را آغاز کرد و این موضوع توسط دیگر محققین (نظیر Ramsay and Graham, 1970; Ramberg, 1975; Coward, 1976; Cobbold, 1977; Lister and Williams, 1979; Sibson, 1977; Ramsay, 1980; Cobbold and Quinquis, 1980; Lister and Snoke, 1984) در دهه‌های ۷۰ و ۸۰ میلادی پیشرفت قابل توجهی یافت. تعیین دگرشکلی از ساختارهای کوچک مقیاس از جهت این که به سرعت در صحرا تشخیص داده می‌شوند و در نقشه‌های بزرگ مقیاس (کمتر از ۱:۱۰۰۰۰) می‌آیند، اهمیت دارند. این دسته از ساختارها اطلاعات با ارزشی از هندسه ساختارهای بزرگ مقیاس، توزیع تنش، تعیین جهت برش و تعیین مراحل دگرشکلی در اختیار ما قرار می‌دهند (Wilson and Cosgrove, 1982). چگونگی استفاده از ساختارهای کوچک مقیاس (نظیر شکستگی‌های کششی^۱، برگوارگی‌ها^۲ و ...) در محاسبه واتنش، مقایسه روش‌ها و محدودیت‌های استفاده از آنها از اهداف این مطالعه است که با ذکر مثال‌هایی از ساختارهای مختلف در پهنه برشی بهلگرد بحث شده است.

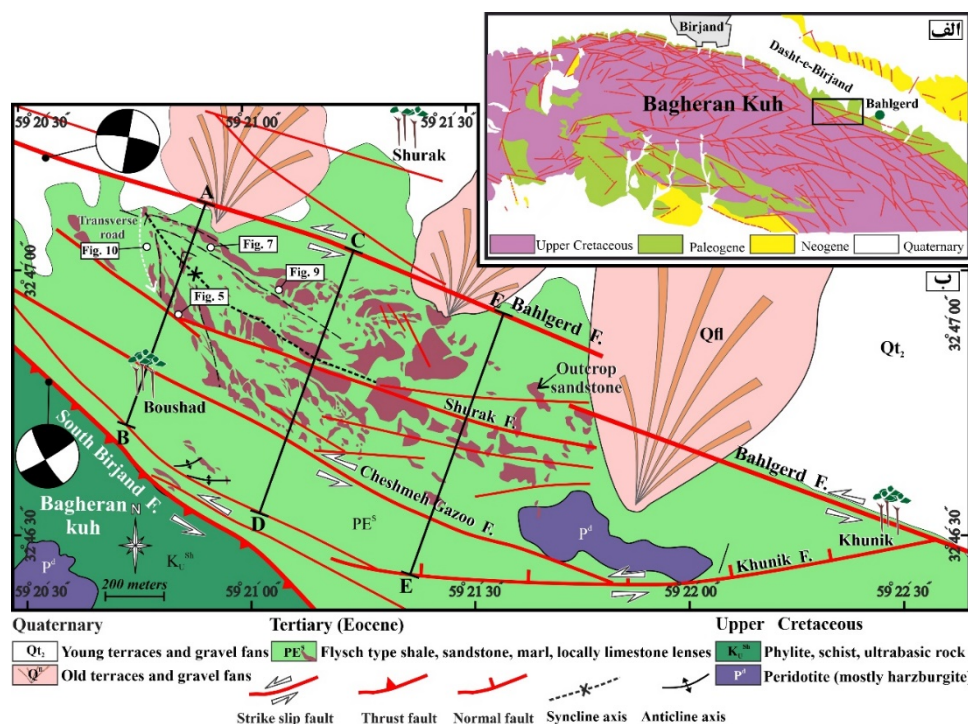
زمین‌شناسی و زمین‌ساخت پهنه برشی بهلگرد

پهنه برشی بهلگرد در خاور ایران و جنوب رشته کوه باقران قرار دارد. منطقه از فلیش‌های ائوسن (توالی از شیل و ماسه‌سنگ) پوشیده شده است که از جنوب با توالی افیولیتی جنوب بیرجند و از شمال به رسوبات کواترنری در



چه روش‌هایی می‌توان از این ساختارها برای برآورد مقدار واتنش استفاده کرد؟ مزایا و محدودیت‌های استفاده از این روش‌ها چیست؟

ساختارهایی نظیر شکستگی‌های کششی و برگوارگی‌ها که آرایش هندسی آنها وابسته به این تغییرات هستند، برای تعیین مقدار واتنش در پهنه‌های برشی مناسبند. اما به‌راستی چگونه این ساختارها در پهنه‌های برشی شکل می‌گیرند؟



شکل ۱: الف - موقعیت پهنه برشی بهلگرد در کوهستان باقران با مستطیل نمایش داده شده است؛ ب - نقشه ساده شده واحدهای سنگ‌شناسی برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ بیرجند (افتخارنژاد، ۱۳۶۶) و گسل‌های فعال در پهنه برشی بهلگرد

شکستگی‌های کششی

کششی، با گذر زمان در دگرشکلی پیشرونده هلالی شکل^۴ می‌شوند.

شکستگی‌های کششی، در پهنه‌های برشی نیمه شکننا^۳ ایجاد می‌شوند (Davis et al., 2012). این شکستگی‌ها در آغاز در راستای محور بیشینه تنش (σ_1) یا عمود بر محور بزرگترین کشیدگی بیضوی کرنش لحظه‌ای (ISA_1) باز می‌شوند (شکل ۲). بازشدگی این عوارض در الگوی شکستگی‌های نوع ۱ (حرکت نسبی عمود بر دیواره شکستگی) صورت می‌گیرد. آرایش پلکانی شکستگی‌های

الگوهای زایشی شکستگی‌های کششی

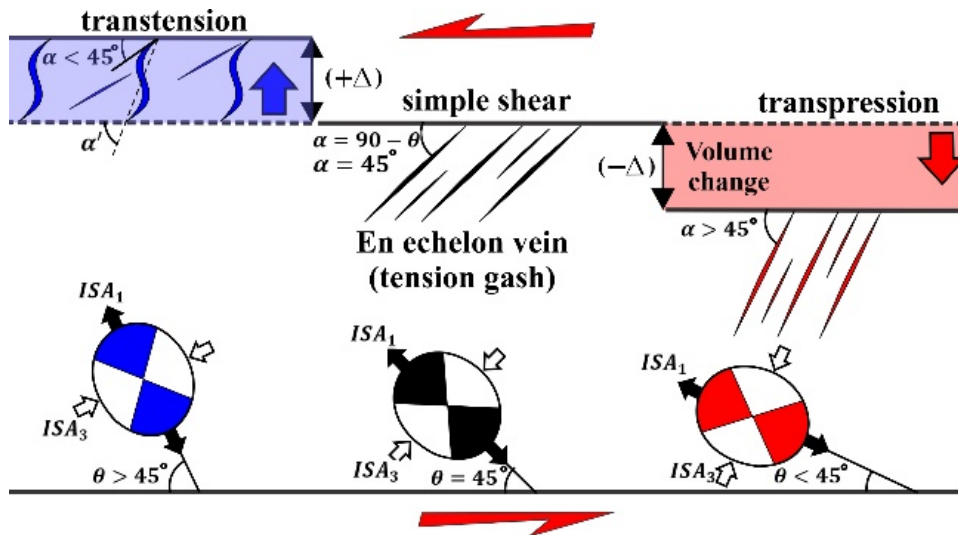
در خصوص ایجاد آرایه‌های پلکانی هلالی شکل الگوهای ارائه شده است:

الف - الگوی چرخش غیر فعال: در پهنه‌های برشی، شکستگی‌های نوع ۱ در اثر دگرشکلی ساده پیشرونده

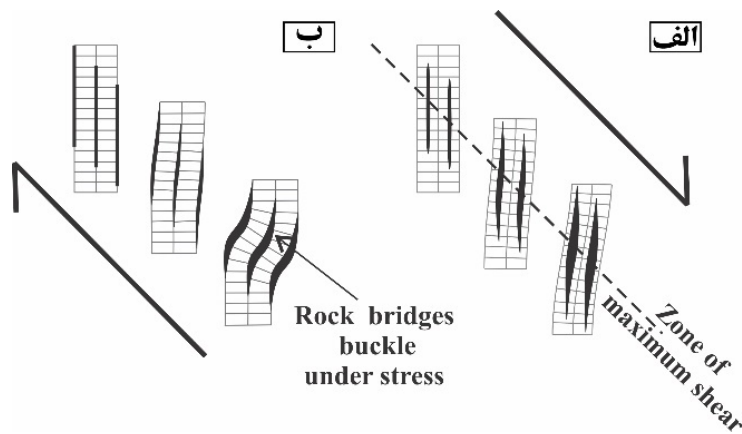
^۴ Sigmoidal

^۳ Semibrittle

می چرخند در حالی که انتهای آنها به موازات محور تنش بیشینه (σ_1) رشد می کند (Beach, 1975). در این الگو انحنا شکستگی های هلالی شکل، در نتیجه چرخش متفاوت قطعات متأثر از واتنش ناهمگن در عرض پهنه برشی ایجاد می شود (Lisle, 2013) (شکل ۳. الف).



شکل ۲. آرایش شکستگی های کششی و جهت گیری ISA (محورهای کشیدگی لحظه ای) در پهنه های برشی ساده، تراکشی و توافشارشی برگرفته از (Ramsay and Huber, 1983; Fossen and Tikoff, 1993)



شکل ۳. الگوهای زايشی ایجاد آرایه های پلکانی هلالی شکل. الف- الگوی چرخش غیرفعال (Beach, 1975); ب- الگوی خمش تدریجی پل های سنگی (Nicholson and Pollard, 1985)



محاسبه واتنش با استفاده از شکستگی‌های کششی

اولین شکستگی‌های تشکیل شده در برش ساده زاویه ۴۵ درجه (α) با دیواره برشی می‌سازند اما در مواردی زاویه اولیه کمتر یا بیشتر از این مقدار می‌باشد چرا که جهت‌گیری شکستگی‌ها در مرحله اولیه دگرشکلی علاوه بر مؤلفه برش ساده به مؤلفه برش محض نیز وابسته است. آرایش پلکانی شکستگی‌ها با صفحه برش، زاویه‌ای کمتر از ۴۵ درجه در مناطق تراکشنی و زاویه بزرگتر از ۴۵ درجه در مناطق تراکشنی می‌سازند (شکل ۲). در دگرشکلی‌های بعدی زوایای اولیه تغییر می‌کند (α') و موجب ایجاد رگه‌های S مانند و کج شده می‌شود. در مطالعه واتنش ضروری است که تغییر در شکل و اندازه بررسی شود. دگرشکلی یک عارضه را با تغییر در زاویه برش (واتنش برشی) و تغییر اندازه را با تغییر در حجم آن (واتنش حجمی) ارزیابی می‌کنیم. برای محاسبه این فراسنج‌ها، راه‌حل‌های هندسی به صورت معادلاتی یا ترسیمی ارائه شده است که عبارتند از:

روش Ramsay and Huber (1983)

مطابق الگوی چرخش غیرفعال، قطعات شکستگی‌های کششی در پاسخ به گرادیان^۵ واتنش پهنه برشی چرخش یافته و انحنا شکستگی‌ها را سبب می‌شوند. در این الگو دگرشکلی غیرفعال بوده و واتنش برشی (γ) را می‌توان در هر نقطه از شکستگی هلالی شکل با استفاده از رابطه زیر بدست آورد (Ramsay and Huber, 1983).

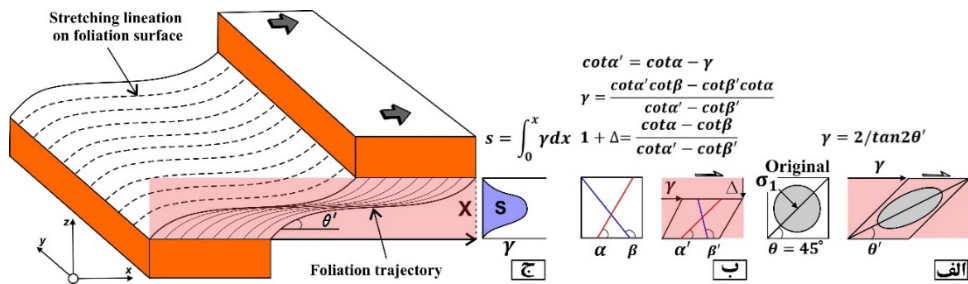
$$\cot \alpha' = \cot \alpha - \gamma \quad (\text{رابطه ۱})$$

α : زاویه بین شکستگی اولیه و دیواره برش؛ α' : زاویه بین شکستگی بعد دگرشکلی و دیواره برش در هر نقطه از انحنا شکستگی (شکل ۴. ب).

در نقاط مختلفی از انحنا رگه‌ها با تغییر آهنگ مقدار α' ، ایزوگون‌های شیب ترسیم می‌شود. سپس در این نقاط با استفاده از رابطه ۱ و با در نظر گرفتن α ، مقادیر واتنش برشی محاسبه می‌گردد. تغییرات واتنش برشی با مقادیر کوچک در کناره‌های دیواره برش آغاز و در مرکز به مقدار بیشینه خود می‌رسد مقدار واتنش برشی متوسط (γ mean) را می‌توان با استفاده از انتگرال زیر بدست آورد:

$$S = \int_0^x \gamma dx \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این رابطه، x مقدار فاصله در عرض پهنه و γ واتنش برشی است. این انتگرال مساحت (s) زیر منحنی واتنش بر حسب فاصله را محاسبه می‌کند که مقدار آن برابر میزان جابجایی کل پهنه است (Ramsay, 1980; Marshak and Mitra, 1988) (شکل ۴. ج). با دو فرض اساسی می‌توان ر فوق را بکار برد: الف- دگرشکلی در پهنه از نوع برش ساده است. ب- خط سیر فابریک‌ها بر خط سیر واتنش نهایی منطبق است.



شکل ۴: الف- در آغاز برش ساده، بر گوارگی عمود بر σ_1 و با زاویه 45° درجه θ نسبت به دیواره‌های برش تشکیل می‌شود. در طی دگرشکلی پیش‌رونده زاویه θ' به کمتر از 45° درجه می‌رسد و تابعی از واتنش نهایی است (Ramsay and Graham, 1970)؛ ب- ارتباط هندسی بین خطوط با جهت‌گیری اولیه α و β که تحت تأثیر واتنش برشی (γ) قرار گرفته است (Ramsay and Huber, 1983)؛ ج- مساحت (S) زیر منحنی فاصله-واتنش برابر واتنش برشی متوسط می‌باشد (Ramsay, 1980; Marshak and Mitra, 1988).

α' و بر حسب رادیان

روش (Lisle 2013)

با ترسیم خطوطی از نقاط s و r به موازات دیواره برش، w (عرض پهنه برشی) به دست می‌آید. d_x و d_y (مؤلفه‌های جابه‌جایی موازی و عمود بر پهنه برشی) خواهند بود. می‌توان مقادیر واتنش برشی (γ) و تغییر حجم (Δ) را محاسبه کرد:

$$\gamma = d_x / w \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$\Delta = d_y / w \quad (\text{رابطه ۶})$$

مثالی از کاربرد شکستگی‌های کششی در

محاسبه واتنش

در بخش شمال باختری پهنه برشی بهلگرد، حوالی روستای بوشاد، که رخنمون‌های ماسه‌سنگی به هم‌ریختگی کمتری دارند، شکستگی‌های کششی به صورت رگه‌های اصلی متقاطع و یا آرایه‌هایی با آرایش نردبانی ایجاد شده‌اند. شکستگی‌ها در واحدهای ماسه‌سنگی فلیش‌های ائوسن دیده می‌شود که با کوارتز پر شده‌اند و در مواردی به شکل هلالی شکل در آمده‌اند (شکل ۵). در نمونه‌ای از

مطابق الگوی پل‌های چین خورده، چین‌خوردگی پل‌های مقاوم بین شکستگی‌های کششی منجر به اتساع حجمی پهنه، رشد تدریجی و انحنا شکستگی‌ها می‌شود. به منظور تعیین مقادیر واتنش برشی (γ) و اتساع حجمی (Δ) در پهنه برشی، روشی ترسیمی توسط Lisle (2013) ارائه شده است (شکل ۶ ج):

در این روش ابتدا دایره‌ای به شعاع دلخواه رسم می‌شود. شعاع دایره (pq) را به گونه‌ای انتخاب می‌کنیم که عمود بر جهت‌گیری اولیه شکستگی باشد.

از نقطه p بر روی محیط دایره، خطی به موازات جهت‌گیری شکستگی بعد دگرشکلی (خطی که دو انتهای شکستگی را بهم متصل می‌کند) ترسیم می‌شود (qr). خط sr را که بیانگر شکستگی اولیه است مطابق روابط زیر بازسازی می‌گردد.

$$S = \frac{\sin(\alpha' - \alpha)}{\alpha' - \alpha} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$sr = S \times qr \quad (\text{رابطه ۴})$$



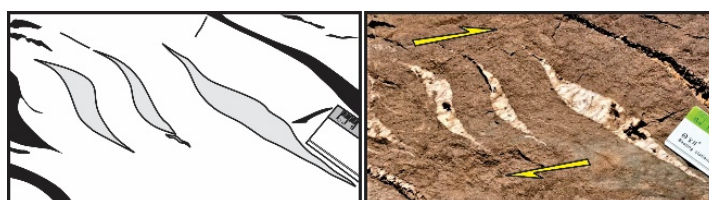
$$I_{loc} = 1 - \frac{\gamma_{mean}}{\gamma_{max}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

شکستگی‌های کششی در نزدیکی گسل شورک، مقدار و انتش به دو روش محاسبه شده است:

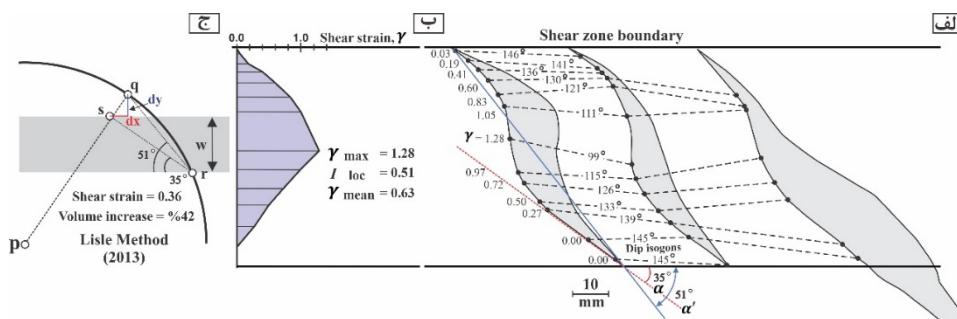
بنابراین شدت و انتش تمرکز یافته در کل پهنه ۰/۵۱ است. با بهره‌گیری از روش ترسیمی (Lisle 2013) مقادیر و انتش برشی و تغییر حجم به ترتیب ۰/۳۶ و ۴۲٪ تعیین شد (شکل ۶. ج).

مقایسه روش‌های فوق نشان می‌دهد که مقدار و انتش برشی در روش (Lisle 2013) (۰/۳۶) نسبت به روش (Ramsay and Huber 1983) (۰/۶۳) متفاوت است اما مقدار آن به شدت و انتش تمرکز یافته (۰/۵۱) نزدیک‌تر است.

ابتدا با استفاده از روش (Ramsay and Huber 1983)، در نقاط مختلفی از انحنای رگه‌ها، ایزوگون‌های شیب با مقادیر متفاوت α' رسم شد. سپس در این نقاط با در نظر گرفتن $\alpha=35^\circ$ در رابطه ۱، و انتش برشی با بیشینه مقدار ۱/۲۸ محاسبه گردید (شکل ۶. الف). با منحنی و انتش-فاصله، جابه‌جایی جانبی ۳۷ میلیمتر و و انتش متوسط ۰/۶۳ برآورد شد (شکل ۶. ب). و انتش‌های برشی محاسبه شده در این روش و انتش را به صورت موضعی در نقاطی از پهنه به دست می‌آورد از این رو می‌توان شدت این و انتش تمرکز یافته (I_{loc}) در کل پهنه را با معادله زیر به دست آورد (Schrank et al., 2008)



شکل ۵: شکستگی‌های کششی هلالی شکل که در پهنه برشی راستگرد تشکیل شده‌اند.



شکل ۶. الف- ایزوگون‌های شیب برای سه شکستگی کششی ترسیم و و انتش برشی با رابطه (۱) محاسبه شده است؛ ب- با استفاده از منحنی فاصله-و انتش در عرض پهنه برشی، و انتش برشی متوسط ۰/۶۳ برآورد شد؛ ج- با بازسازی ترسیمی به روش (Lisle 2013) و انتش برشی ۰/۳۶ و افزایش حجمی ۴۲٪ تعیین شد

برگوارگی

مقاومت کمتر (شیل) با زاویه‌ای حاده نسبت به آن قرار می‌گیرند. اگرچه عده‌ای از محققین معتقدند در تاریخچه واتنش پیشرونده صفحات کلیواژ و XY موازی هم باقی نمی‌مانند (Williams, 1976; Hobbs et al., 1982)، اما حداکثر انحراف بین برگوارگی و مسیر صفحه XY در برش ساده حدود ۵ درجه است (Ghosh, 1975) و در مواردی که دگرریختی غیر هم محور ($w_k < 1$) باشد، این میزان به ۲ درجه کاهش می‌یابد (Ghosh, 1982). در هر صورت چنین انحرافات در صحرا قابل اندازه‌گیری نیست.

الگوی برگوارگی و محاسبه واتنش

جهت‌گیری برگوارگی‌ها در عرض پهنه برشی به صورت نظام‌مند تغییر می‌کند. نخست صفحه برگواره با زاویه ۴۵ درجه نسبت به پهنه برشی آرایش می‌یابد سپس به تدریج از نزدیکترین راه به سوی جهت بیشینه طولیل‌شدگی می‌چرخد و در مرکز پهنه برشی به موازات صفحه برش نزدیک می‌شود و حتی در مناطقی که واتنش برشی بالاست چین می‌خورد (شکل ۴. الف). الگوی خمیدگی برگواره از حاشیه به سمت مرکز در پهنه‌های برشی اساس محاسبه واتنش است که به آسانی در رخنمون‌ها قابل مشاهده می‌باشد. ارتباط مستقیمی بین کاهش زاویه بین برگوارگی و صفحه برش (θ) و افزایش شدت واتنش به سمت مرکز پهنه وجود دارد که با معادله زیر قابل بررسی است (Ramsay and Graham, 1970).

$$\gamma = 2 / \tan 2\theta' \quad (\text{رابطه ۸})$$

γ : واتنش برشی و θ' : زاویه بین محور بزرگ بیضی واتنش ($1+e_1=S_1$) یا همان اثر برگوارگی با جهت برش

برگوارگی از جمله ساختارهای ثانویه‌ای است که در پهنه‌های برشی شکل‌پذیر و شکننا-شکل‌پذیر به فراوانی یافت می‌شود. حتی از دیرباز ارتباط زایشی بین چین و برگوارگی نیز شناخته شده است بدین صورت که از جمله ساختارهای همراه چین، کلیواژ^۷ سطح محوری است که به موازات سطح محوری چین‌ها شکل می‌گیرد. چین و کلیواژ به‌طور همزمان یا به صورت تدریجی در یک رویداد دگرشکلی پیشرونده واحد شکل می‌گیرند و از نزدیکترین راه به سوی جهت بیشینه درازشدگی می‌چرخند. استفاده از شکل طبیعی کلیواژ در سنگها و تغییرات جهت آن، اطلاعات ارزشمندی را از مقدار واتنش بدون وجود شاخص‌های واتنش مهیا می‌کند (Treagus, 1983). از آنجا که تبیین علت ایجاد برگوارگی در سنگ‌های دگرگونی و دگرشکل یافته از جهت زایشی دشوار است در این تحقیق واژه برگوارگی به صورت عمومی به کار رفته و شامل کلیواژ و شیستوارگی^۸ است.

ارتباط بین برگوارگی و واتنش

ظهور برگوارگی در طی اولین مرحله دگرشکلی همواره مورد توجه محققین بوده است چراکه تقریباً موازی با صفحه XY بیضوی نهایی واتنش قرار می‌گیرد (Cloos, 1947; Siddans, 1972; Wood, 1974; Tullis and Wood, 1975). شواهدی از این ارتباط با استفاده از دیگر شاخص‌های واتنش نیز به دست آمده است (Sorby, 1853). این بدان معناست که کوتاه‌شدگی اصلی عمود بر صفحات برگوارگی خواهد بود. برگوارگی در لایه‌های با مقاومت بیشتر (ماسه سنگ) عمود بر لایه بندی و در لایه‌های با



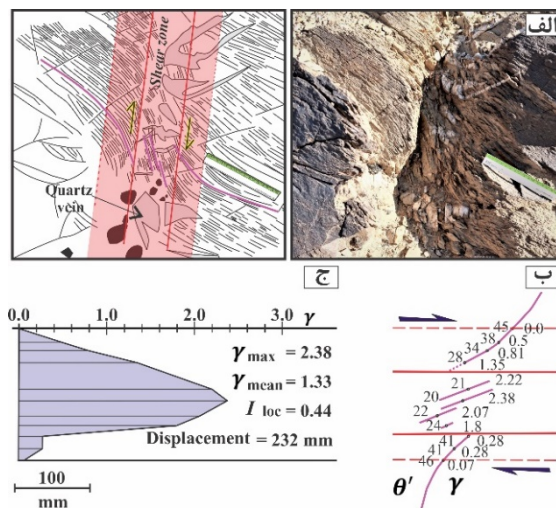
محاسبه واتنش در مقیاس مزوسکوپی

در پهنه برشی بهلگرد، در رخنمونی از واحدهای ماسه‌سنگی فلیش‌های ائوسن نمونه‌ای انتخاب شده است که شامل برگوارگی‌ها می‌باشد (شکل ۷. الف). با استفاده از انحنای برگوارگی ایزوگون‌های شیب در نقاط مختلف از مسیر برگواره تعیین شد سپس زاویه بین ایزوگون‌ها و سطح برش (θ') به دست آمد و با استفاده از رابطه (۸) مقدار واتنش برشی محاسبه گردید (شکل ۷. ب). واتنش برشی متوسط با استفاده از مساحت زیر منحنی فاصله-واتنش $1/33$ تعیین شد (شکل ۷. ج). مقدار واتنش برشی بیشینه و شدت واتنش تمرکز یافته در این نمونه به ترتیب $2/38$ و $0/44$ برآورد گردید.

است. مسیر برگوارگی که صفحه XY بیضوی نهایی واتنش را بازگو می‌کند، فرصتی را مهیا می‌سازد تا مقدار کل واتنش و تغییرات آن در عرض پهنه تخمین زده شود. اگر در برش عرضی عمود بر پهنه برشی، مقادیر θ' با استفاده از خط سیر برگوارگی تعیین شود، واتنش برشی در هر نقطه محاسبه می‌گردد.

مثالی از کاربرد برگوارگی در محاسبه واتنش

جهت تعیین واتنش، از تغییر جهت گیری برگوارگی در عرض پهنه در دو مقیاس مزوسکوپی^۹ و ماکروسکوپی^{۱۰} استفاده شده است:

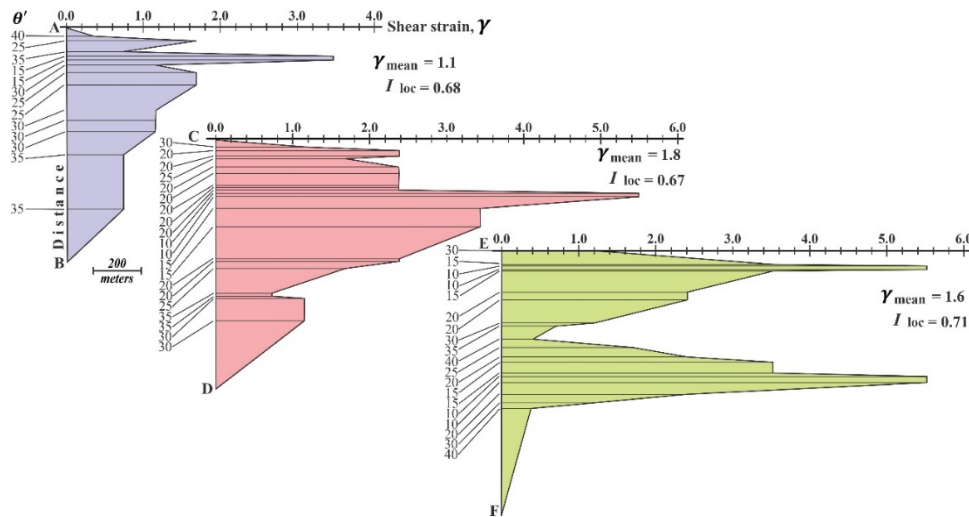


شکل ۷. الف- رخنمون پهنه برشی راستگرد در منطقه بوشاد که در آن انحنای برگوارگی در واحدهای ماسه سنگی مشهود است؛ ب- زاویه بین برگوارگی و سطح برش (θ') اندازه‌گیری و واتنش برشی (γ) با رابطه (۸) محاسبه شده است؛ ج- با رسم منحنی فاصله-واتنش در نیمرخ عرضی پهنه برشی، واتنش میانگین $1/33$ تعیین شده است.

محاسبه واتنش در مقیاس ماکروسکوپی

آمده‌اند. زاویه بین امتداد برگواری و راستای گسل بهلگرد (N290) تعیین شد سپس با استفاده از رابطه (۱) مقادیر γ به دست آمد. منحنی فاصله-واتنش مقدار واتنش برشی متوسط را در عرض پهنه تعیین می‌کند (شکل ۸ و جدول ۱).

در این پژوهش در سه مقطع AB، CD و EF عمود بر گسل بهلگرد پیمایش صحرائی انجام شده (شکل ۱) و برگواری در واحدهای ماسه‌سنگی برداشت و به نقشه در



شکل ۸: تعیین واتنش برشی با استفاده از انحنای برگواری در پهنه برشی بهلگرد. در مقاطع عرضی AB، CD و EF، با رسم منحنی فاصله-واتنش مقادیر واتنش برشی متوسط به دست آمده است. در هر موقعیت زاویه بین برگواری و سطح برش (θ') اندازه‌گیری و واتنش برشی (γ) با رابطه (۸) محاسبه شده است.

باشد. اختلاف بین مقادیر واتنش برشی متوسط در مقاطع ترسیمی زیاد است اما مقادیر شدت واتنش محلی بسیار نزدیک هم هستند. به منظور انتخاب مقدار واتنش برشی متوسط یا شدت واتنش محلی، مقدار درجه بیضی بودن (R) در پهنه برشی بهلگرد نیز با استفاده از روابط Krantz (1995) محاسبه شده است:

$$S_{H \max} = (1 - \gamma \tan \varphi)^{-1/2} \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$S_{H \min} = (1 + \gamma \cot \varphi)^{-1/2} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

جدول ۱: مقادیر واتنش برشی در پهنه برشی بهلگرد

مقطع	γ_{\max}	γ_{mean}	I_{loc}	Lateral displacement(m)
AB	۳/۴۶	۱/۱	۰/۶۸	۱۰۵۰
CD	۵/۵	۱/۸	۰/۶۷	۱۸۸۶
EF	۵/۵	۱/۶	۰/۷۱	۱۷۶۲
mean		۱/۵	۰/۶۸	۱۵۶۶

مطابق شکل ۸ در منحنی فاصله-واتنش تقارن در عرض پهنه برشی وجود ندارد و این منحنی با قله‌هایی همراه است که متأثر از تغییرات واتنش می‌باشد. به نظر می‌رسد این تغییرات در خصوص مقطع EF ناشی از زیر پهنه‌های برشی



مفید هستند. چنانچه امکان اندازه گیری خطوط (اثر سطوح لایه بندی، دایک ها و سطح محوری چین) در دو جهت متفاوت در داخل و خارج پهنه برشی وجود داشته باشد (شکل ۴. ب) در این صورت می توان مقدار واتنش برشی و حجمی را با استفاده از معادلات زیر به دست آورد (Ramsay, 1980):

$$\gamma = \frac{\cot \alpha' \cot \beta - \cot \beta' \cot \alpha}{\cot \alpha' - \cot \beta'} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

$$1 + \Delta = \frac{\cot \alpha - \cot \beta}{\cot \alpha' - \cot \beta'} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

α و β : زاویه اولیه خطوط با دیواره های برش.

α' و β' : زاویه خطوط با دیواره های برشی بعد از دگرشکلی

تغییر حجم (Δ) در روش (Ramsay 1980) با فرض واتنش مستوی محاسبه شده است که در این صورت Δ معادل با تغییر مساحت بیضی واتنش در صفحه XZ خواهد بود که در آن X به موازات برش و Z عرض پهنه برشی می باشد. بنابراین تغییر مساحت وابسته به مؤلفه برش محض وارده بر پهنه برشی نیز خواهد بود (شکل ۴. ج).

مثالی از کاربرد جابه جاشدگی رگه ها در محاسبه واتنش

در این تحقیق ماسه سنگ های رخنمون یافته در پهنه برشی بهلگرد نمونه ای انتخاب شد که شامل دسته رگه های کششی و شکستگی های کششی هلالی شکل می باشد

$$R = \frac{S_{H \max}}{S_{H \min}} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

در این رابطه (γ): واتنش برشی؛ (ϕ): زاویه بین محور طولی بیضی واتنش نهایی و جهت برش؛ $S_{H \max}$: کشیدگی افقی بیشینه و $S_{H \min}$: کشیدگی افقی حداقل.

مقدار ϕ در پهنه برشی بهلگرد با استفاده از زاویه بین محور چین بوشاد (N152, 39) و گسل بهلگرد (N290) ۴۲ درجه تعیین شد و مقدار درجه بیضی بودن پهنه مطابق جدول ۲ مشخص گردید:

جدول ۲: فراسنج های محاسبه شده با روابط Krantz (1995)

γ_{mean}	I_{loc}	ϕ	$S_{H \max}$	$S_{H \min}$	R (Krantz, 1995)
۱/۵		۴۲	∞		ممکن نیست
	۰/۶۸	۴۲	۱/۶	۰/۷۵	۲/۱

با توجه به وضعیت هندسی قرارگیری ساختارها در پهنه برشی بهلگرد، درجه بیضی بودن این پهنه با در نظر گرفتن مقدار واتنش برشی برابر ۰/۶۸ قابل محاسبه است. به منظور اطمینان از این نتیجه در یک مقطع عرضی در مسیر ترانشه جاده آسفالته بوشاد، مقدار درجه بیضی بودن پهنه با استفاده از نودول های شیلی واقع در ماسه سنگ های ائوسن نیز محاسبه شده است (جدول ۴).

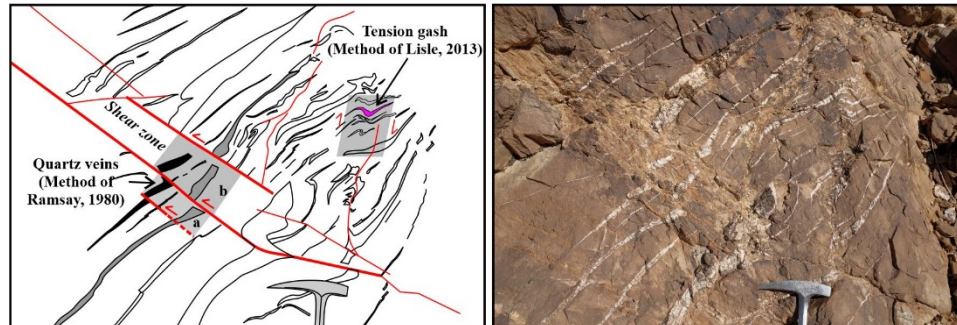
۵- جابه جاشدگی نشانگرها

سنجش کمی واتنش نهایی حاصل از دگرشکلی با استفاده از نشانگرهای انحراف یافته^۱ در پهنه های برشی

^۱Deflection of marker

همانطوری که ملاحظه می‌شود مقادیر واتنش برشی محاسبه شده در هر دو روش به هم نزدیک هستند. اما تغییرات حجمی در روش Ramsay (1980) مقادیر بالاتری را نشان می‌دهد.

(شکل ۹). با استفاده از جابه‌جاشدگی دو دسته رگه کششی و معادلات (۱۲) و (۱۳)، واتنش برشی و تغییر حجم با روش Ramsay (1980) محاسبه و نتایج با شکستگی‌های کششی در روش Lisle (2013) مقایسه شده است (جدول ۳).



شکل ۹: نمونه‌ای از رخنمون پهنه‌های برشی مزدوج (برش راستگرد و چپگرد) در واحد ماسه‌سنگی انوسن در پهنه برشی بهلگرد. در این رخنمون واتنش برشی با استفاده از جابه‌جاشدگی رگه‌های کوارتز به روش Ramsay (1980) و نیز با استفاده از شکستگی‌های کششی به روش Lisle (2013) محاسبه شده است.

جدول ۳: محاسبه واتنش برشی و تغییر حجم در پهنه برشی بهلگرد مطابق با شکل ۹.

پهنه برشی	زیر پهنه	روش رمزی (۱۹۸۰)					روش لایل (۲۰۱۳)				
		α	α'	β	β'	γ	Δ	α	α'	γ	Δ
۲	a	۶۷	۵۷	۷۰	۸۴	۰/۳۵	۰/۸۸				
	b	۷۰	۶۰	۷۰	۶۵	۰/۳۶	۱				
	متوسط					۰/۳۶	۰/۹۴	۴۵	۷۰	۰/۳۸	۰/۵۲

داشته‌اند، بدست می‌آید. روش‌های متفاوتی بر پایه تجزیه و تحلیل‌های R_f/ϕ' (جهت یافتگی ذرات گرشکل شده و R_f : نسبت بیضی بودن) ارائه شده است (Ramsay and Huber, 1983) که اصولاً وقت گیر هستند. از این‌رو برای بررسی عملی واتنش در مقیاس ناحیه‌ای روش‌های سریعی

نشانه‌های بیضی یا دایره‌ای شکل اولیه

حقیقت آنست که همیشه در موقعیتی نیستیم که بتوانیم مقادیر واتنش برشی (γ) را اندازه‌گیری کنیم اما می‌توان نسبت بیضی بودن (R) را محاسبه کرد. این فراسنج واتنش با استفاده از نشانگرهایی که ابتدا شکل دایره‌ای یا بیضی



سپس مقدار R_f برای هر بیضی محاسبه گردید. در پایان میانگین ریاضی، هندسی و هماهنگ داده‌ها مطابق جدول ۴ به دست آمد.

با استفاده از میانگین داده‌های ریاضی^{۱۲}، هندسی^{۱۳} و هماهنگ^{۱۴} به کار می‌روند که امکان استفاده از اطلاعات بیشتر ولی با دقت کمتر را در بعد ناحیه‌ای به محقق می‌دهد. در یک روش برای هر بیضی طول محور بزرگ $(1+e_1)$ و طول محور کوچک $(1+e_2)$ را به دست می‌آید سپس مقدار R_f از تقسیم طول بزرگ بر طول کوچک بیضی محاسبه می‌شود. روابط زیر برای محاسبه میانگین‌های ریاضی، هندسی و هماهنگ پیشنهاد شده است (Lisle, 1977):

$$R_f = \frac{R_{f_1} + R_{f_2} + \dots + R_{f_n}}{n} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

$$G = (R_{f_1} \times R_{f_2} \times \dots \times R_{f_n})^{1/n} \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

$$H = \frac{n}{R_{f_1}^{-1} + R_{f_2}^{-1} + \dots + R_{f_n}^{-1}} \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

مثالی از کاربرد نودول‌های شیلی در محاسبه واتنش

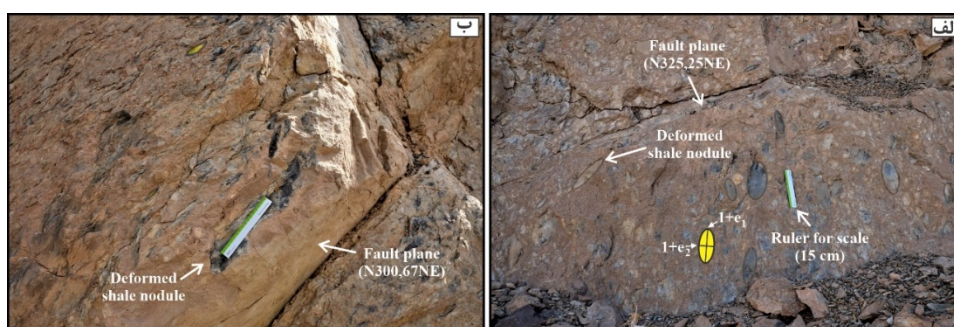
در مسیر جاده آسفالت‌ه بوشاد، نودول‌های شیلی در واحدهای ماسه‌سنگی ائوسن برون‌زدگی دارند. این نودول‌ها به صورت بیضی بوده و جهت یافتگی منظمی را نشان می‌دهند (شکل ۱۰). طول این رخنمون ۴۳۰ متر است که به موازات یال جنوبی چین بوشاد پیمایش شده است (شکل ۱). با فرض اینکه نودول‌های ابتدایی نیز بیضی شکل بوده‌اند می‌توان مقادیر R_f را محاسبه کرد. در این تحقیق طول محور بزرگ و کوچک ۲۰۰ بیضی اندازه‌گیری شد

Harmonic mean ^{۱۴}

Arithmetic mean ^{۱۲}

Geometric mean ^{۱۳}





شکل ۱۰. الف- نودول‌های شیل دگرشکل شده در ماسه‌سنگ‌های ائوسن که برای تعیین نسبت بیضی بودن واتنش در پهنه برشی بهلگرد استفاده شده‌اند. ب- نودول‌های شیل دگرشکل شده که در نزدیکی گسل طویل شدگی بیشتری را نشان می‌دهد. جدول ۴. مقادیر نسبت بیضی بودن واتنش میانگین.

الگوی واتنش غالب مدنظر است دور از انتظار نیست و بسته به دقت مطالعه باید آن را پذیرفت.

بحث

در این پژوهش از روش‌هایی که مبتنی بر الگوهای زایشی و هندسی ساختارهاست جهت تعیین دگرشکلی در پهنه‌های برشی استفاده شده است. قابل ذکر است که روش‌های کنونی تعیین واتنش تنها برای پهنه‌های برشی شکل‌پذیر و شکننا-شکل‌پذیر کاربرد دارند. از آنجایی که رگه‌های کششی و برگوارگی در پهنه‌های برشی و نشانگرهای بیضی شکل در طبیعت به فراوانی یافت می‌شوند تمایل محققین برای استفاده از این روش‌ها را دوچندان می‌کند. سنجش دگرشکلی در مثال‌هایی از پهنه برشی بهلگرد نشان داد که پاره‌ای از نتایج برای نمونه‌های یکسان متفاوت هستند. این موضوع تعجب آور نیست چراکه فرضیاتی که برای به کارگیری روش‌ها در نظر گرفته شده است متفاوتند. بنابراین تصمیم‌گیری در انتخاب روش مناسب نیاز به جمع‌آوری داده‌های اضافی و حتی تغییر در الگوی انتخابی خواهد داشت.

جدول ۴. مقادیر نسبت بیضی بودن واتنش میانگین.

میانگین	R (Lisle, 1977)	R (Krantz, 1995)
ریاضی	۱/۹۹	
هندسی	۱/۹۲	
هماهنگ	۱/۸۵	
مقاطع عرضی		۲/۱

نسبت بیضی بودن واتنش به دست آمده از روش Krantz (1995) با مقادیر روش Lisle (1977) اندکی اختلاف دارد که این تفاوت ناشی از بهره‌گیری از فرانسج‌های مورد استفاده در روش‌هاست چرا که به عنوان مثال واتنش برشی استفاده شده در روابط Krantz (1995) میانگین واتنش در پهنه برشی در امتداد مقاطع انتخابی است که با استفاده از برگوارگی تعیین شده‌اند و انتخاب مقاطع دیگر بر مقدار واتنش میانگین تأثیر خواهند گذاشت. همچنین روش سریع Lisle (2013) نیز دقت چندانی ندارد اگرچه به نظر این محقق میانگین هماهنگ نزدیک‌تر به مقدار واقعی بیضی واتنش زمین‌ساختی است. در هر صورت این خطاها در مقیاس ماکروسکوپی که در آن



ارزیابی شکستگی‌های کششی در محاسبه واتنش

در تعیین واتنش با استفاده از برگوارگی در مقیاس ماکروسکوپی به نظر می‌رسد توجه به نکات زیر ضروری باشد:

الف- اصل کلی در خصوص صفحات برگوارگی اینست که به موازات صفحه XY بیضوی واتنش نهایی جهت‌گیری می‌شوند. امروزه اثبات شده است که صفحه برگوارگی موازی صفحه محوری چین قرار می‌گیرد. اگر چین و کلیواژ در اثر نیروهای برشی واحدی ایجاد و توسعه یافته باشند انتظار ارتباط هندسی مشخص را داریم اما اگر چین‌ها و کلیواژ قبل از پهنه برشی ایجاد شده باشند ارتباط هندسی بین آنها حفظ می‌شود اما ممکن است کلیواژ ناشی از عملکرد پهنه برشی موازی سطح محوری چین‌ها نباشد در این صورت استفاده از کلیواژ سطح محوری چین راه حل صحیحی در اختیار ما قرار نمی‌دهد.

ب- مسیر برگوارگی انکساری (تغییر جهت صفحات برگوارگی در گذر از لایه‌های با ویسکوزیته متفاوت) که به خصوص در یال‌های چین متداول است، جدا از خط سیر واقعی برگوارگی متأثر از پهنه برشی می‌باشد. از این رو در مقاطع ترسیمی می‌بایست این داده‌ها شناسایی و حذف شوند.

ج- با تمام محدودیت‌های ذکر شده، نکته قابل توجه اینست که در برش ساده پیشرونده (دگرشکلی غیر هم محور) برگوارگی‌های مادی از حالت اولیه خارج شده و از نزدیک‌ترین مکان به سمت صفحه برش می‌چرخد در این میان اگرچه ممکن است انحرافات کوچکی در جهت‌گیری برگوارگی‌ها به صورت محلی ایجاد شود اما خط سیر کلی برگوارگی‌ها منطبق بر الگوی ذکر شده در پهنه‌های برشی خواهد بود.

د- در پهنه‌های برشی با دیواره‌های ناموازی (گوه‌ای) الگوی انحنای خط سیر برگوارگی متقارن نیست و بسته به

الف- در برآورد واتنش برشی با استفاده از شکستگی‌های کششی انتخاب الگو تأثیرگذار خواهد بود. روش Ramsay and Huber (1983) واتنش برشی متوسط (γ mean) را تخمین می‌زند که نسبت به روش (Lisle 2013) از مقادیر بالاتری برخوردار است. به نظر می‌رسد در این روش معرفی فراسنج شدت واتنش تمرکز یافته در کل پهنه (I_{loc}) در بیان دگرشکلی مناسب‌تر باشد. اما انتخاب کدام روش پیشنهاد می‌شود؟ یک اصل مهم در انتخاب روش اندازه‌گیری واتنش آنست که واتنش به دست آمده بیانگر واتنش کل نمونه باشد. برای این منظور دانه نسبت به زمینه بایستی فعال در نظر گرفته شود یعنی دانه در خلال واتنش مقاوم باشد و زمینه واتنش پیدا کند (یساقی، ۱۳۹۸). این اصل در روش (Lisle 2013) در نظر گرفته شده است.

ب- (Lisle 2013) راه حلی ترسیمی ارائه داده است که سنجش واتنش برشی را آسان‌تر و با سرعت بیشتر انجام می‌دهد.

ج- روش (Lisle 2013)، برآوردی از تغییر حجم را با استفاده از شکستگی‌های کششی امکان‌پذیر می‌سازد که یک مزیت محسوب می‌شود.

د- تعیین واتنش برشی متوسط با استفاده از منحنی فاصله-واتنش، بر دگرشکلی در شرایط برش ساده پایه‌ریزی شده اما همیشه برش ساده به تنهایی بر منطقه حاکم نیست. بنابراین باید به منظور کنترل صحت این فرض از روش‌های دیگری برای ارزیابی واتنش برشی استفاده کنیم.

ارزیابی برگوارگی در محاسبه واتنش



زاویه گوه و میزان واتنش برشی متفاوت خواهد بود (Mandal et al., 2002).

شکستگی‌های کششی، انحناهای فابریک موجود در سنگ‌ها، میزان جابه‌جاشدگی نشانگرها نشان داد که:

ه- توجه به پیوستگی داده‌ها و دقت اندازه‌گیری θ' در مقیاس مزوسکوپی مهم است زیرا اختلاف بسیار کوچک در مقدار θ' تفاوت‌های بزرگی در میزان واتنش برشی به وجود می‌آورد که ممکن است سبب تغییر در منحنی فاصله-واتنش شود و هنگام محاسبه جابه‌جایی کلی و واتنش برشی میانگین خطاهای محاسبه‌ای بزرگی ایجاد کند.

ارزیابی نشانگرهای بیضی شکل در محاسبه واتنش

در خصوص نشانگرهای بیضی شکل در پهنه برشی بهلگرد باید اذعان داشت که:

الف- میزان واتنش محاسبه شده در نودول‌های شیل نمی‌تواند بیانگر میزان واتنشی باشد که کل توده سنگ متحمل شده است چراکه نودول‌های شیل (نامقاوم) در زمینه ماسه سنگ (مقاوم) قرار گرفته و به صورت غیرفعال عمل می‌کند در این حالت میزان واتنش نودول‌ها بیشتر از زمینه خواهد بود.

ب- از آنجاکه نسبت بیضی بودن واتنش نهایی (R) می‌بایست در صفحه XZ اندازه‌گیری شود تا بیشترین مقدار را داشته باشد در رخنمون‌هایی که نودول‌های شیل مطالعه شده‌اند امکان شناسایی این صفحات امکان‌پذیر نبوده است.

نتیجه‌گیری

هندسه ساختارها در پهنه‌های برشی ابزار مناسبی در تعیین فراسنج‌های واتنش می‌باشند. اندازه‌گیری کمی واتنش برشی در پهنه برشی بهلگرد با انتخاب نمونه‌هایی از

الف- در مقادیر برآورد شده واتنش با استفاده از شکستگی‌های کششی هلالی شکل، تفاوت‌های جزئی وجود دارد که این موضوع به فرضیات در نظر گرفته شده در روابط هندسی ارائه شده توسط محققین بر می‌گردد. روش Ramsay and Huber (1983) واتنش برشی متوسط (γ_{mean}) را تخمین می‌زند که پیشنهاد می‌شود با فراسنج شدت واتنش تمرکز یافته در کل پهنه (I_{loc}) ارائه شده توسط Schrank et al (2008) تعدیل شود. ضمن آنکه در تعیین واتنش با استفاده از شکستگی‌های کششی، روش Lisle (2013) به علت سادگی و سرعت در اجرا و محاسبه اطلاعات مفید دیگری (نظیر تغییر حجم) در اولویت است.

ب- بهره‌گیری از انحناهای برگوارگی جهت تعیین واتنش در مقیاس مزوسکوپی روش مفید و کارآمدی است و می‌توان از آن در تعیین الگوی واتنش غالب در مقیاس ناحیه‌ای نیز استفاده کرد. با وجود این شناخت ارتباط فابریک‌ها با ساختارهای منطقه‌ای، تفاوت الگوهای واتنش در پهنه‌های برشی با دیواره‌های موازی یا گوه‌ای شکل، انکسار برگوارگی متأثر از رفتار سنگ‌ها از جمله ملاحظات است که به دشواری‌های مطالعه در مقیاس ناحیه‌ای می‌افزاید. در روش‌های ارائه شده، اگرچه مساحت زیر منحنی فاصله-واتنش، واتنش برشی متوسط را تعیین می‌کند اما در اینجا نیز تعیین فراسنج شدت واتنش تمرکز یافته در کل پهنه (I_{loc}) پیشنهاد می‌شود چراکه مقدار آن در مقاطع مختلف از پهنه برشی تفاوت ناچیزی را نشان می‌دهد.

ج- در پهنه برشی بهلگرد، مقایسه روش‌های میزان جابه‌جاشدگی نشانگرها و شکستگی‌های کششی در تعیین واتنش برشی مقادیر یکسانی را بدست می‌دهد.



د- در خصوص نشانگرهای بیضی شکل، با وجود اینکه نمی‌توان برآورد دقیقی از واتنش زمین‌ساختی با میانگین‌گیری از R_f ها داشت اما در مقیاس ناحیه‌ای می‌توان با برداشت اطلاعات بیشتر ولی با دقت کمتر، از روش‌های سریع برای اندازه‌گیری میانگین نسبت بیضی بودن واتنش بهره جست که در پهنه برشی بهلگرد این مقدار به مقدار بدست آمده از روش Krantz (1995) نزدیک است.

از آنجا که روابط هندسی ارائه شده توسط محققین مختلف بر پایه فرضیاتی بنا نهاده شده است و شرایط برای تمامی مکان‌ها یکسان نمی‌باشد از این رو پیشنهاد می‌شود در صورت در دسترس بودن نمونه مناسب در صحرا، به‌منظور صحت سنجی نتایج از چندین روش برای ارزیابی واتنش برشی استفاده شود.



منابع

- Krantz, R.W., 1995. The transpressional strain model applied to strike-slip, oblique-convergent and oblique-divergent deformation. *Journal of Structural Geology* 17 (8), 1125–1127.
- Lisle, R.J., 1977. Estimation of tectonic strain ratio from the mean shape of deformed elliptical markers. *Geol. Nijnb* 56, 140-144.
- Lisle, R.J., 2013. Shear zone deformation determined from sigmoidal tension gashes. *Journal of Structural Geology* 50, 35-43.
- Lister, G.S. and Snoke, A.W., 1984. S-C mylonites. *Journal of Structural Geology* 6, 617–638.
- Lister, G.S. and Williams, P.F., 1979. Fabric development in shear zones: theoretical controls and observed phenomena. *Journal of Structural Geology* 1, 283–297.
- Mandal, N., Samanta, S.K. and Chakraborty, C., 2002. Flow and strain pattern at termination of tapered shear zones. *Journal of Structural Geology* 24, 297–309.
- Marshak, S., and Mitra, G., 1988. Basic methods of structural geology. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Nicholson, R. and Pollard, D., 1985. Dilation and linkage of echelon cracks. *Journal of Structural Geology* 7, 583-590.
- Ramberg, H., 1975. Particle paths, displacement and progressive strain applicable to rocks. *Tectonophysics* 28, 1–37.
- Ramsay, J.G. and Graham R.H., 1970. Strain variation in shear belts. *Canadian Journal of Earth Sciences* 7 (3), 786-813.
- Ramsay, J.G. and Huber, M.I., 1983. The techniques of modern structural geology. Volume 1: Strain analysis. Academic Press, London, 307 p.
- Ramsay, J.G., 1980. Shear zone geometry: a review. *Journal of Structural Geology* 2, 83–99.
- Schrank, C.E., Handy, M.R. and Fousseis, F., 2008. Multiscaling of shear zones and the evolution of
- افتخارنژاد، ج.، ۱۳۶۶. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه بیرجند. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- یساقی، ع.، ۱۳۹۸. مبانی دگرشکلی در زمین‌ساخت، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس.
- Beach, A., 1975. The geometry of en-echelon vein arrays. *Tectonophysics* 28, 245-263.
- Cloos, E., 1947. Oolite deformation in South Mountain fold Maryland. *Geological Society of America Bulletin*. 58, 843-918.
- Cobbold, P.R. and Quinquis, H., 1980. Development of sheath folds in shear regions. *Journal of Structural Geology* 2, 119–126.
- Cobbold, P.R., 1977. Description and origin of banded deformation structures. I. Regional strain, local perturbations and deformation bands. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 14, 1721–1731.
- Coward, M.P., 1976. Strain within ductile shear zones. *Tectonophysics* 34, 181–197.
- Davis, G.H., Reynolds, S.J. and Kluth, Ch.F., 2012. Structural geology of rocks and regions. J. Wiley and Sons press, 861 p.
- Fossen, H., Tikoff, B., 1993. The deformation matrix for simultaneous simple shearing, pure shearing, and volume change, and its application to transpression/transension tectonics. *Journal of Structural Geology*. 15, 413–422.
- Ghosh, S.K., 1975. Distortion of planar structures around rigid spherical bodies. *Tectonophysics* 28, 185-208.
- Ghosh, S.K., 1982. The problem of shearing along axial plane foliations. *Journal of Structural Geology* 4, 63-67.
- Hobbs, B.E., Means, W.D. and Williams, P. F., 1982. The relationship between foliation and strain: an experimental investigation. *Journal of Structural Geology* 4, 411-428.



the brittle-to-viscous transition in continental crust. *Journal of Geophysical Research* 113, B01407.

Sibson, R.H., 1977. Fault rocks and fault mechanisms. *J. Geol. Soc. Lond.* 133, 191–213.

Siddans, A.W.B., 1972. Slaty cleavage - a review of research since 1815. *Earth-Science Reviews* 8, 205-232.

Snyder, D.B. and Kjarsgaard, B.A., 2013. Mantle roots of major Precambrian shear zones inferred from structure of the Great Slave Lake shear zone, Northwest Canada. *Lithosphere* 5, 539–546.

Sorby, H.C., 1853. On the origin of slaty cleavage. *Edinburgh New Philosophical Journal*. J 55, 137-148.

Treagus, S.H., 1983. A theory of finite strain variation through contrasting layers, and its