

تحلیل الگوهای دگرشکلی بر اساس آرایه‌های رگه‌ای سیگموئیدال در پهنه برشی بهلگرد

محمد امیر علیمی*

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

چکیده

پهنه برشی بهلگرد در حاشیه شمالی کوهستان باقران، توسط گسل‌های جنوب بیرجند و بهلگرد فلیش‌های انوسن را از توالی افیولیتی کرتاسه و رسوبات کواترنری جدا می‌کند. در ارزیابی دگرشکلی این پهنه، از آرایه‌های رگه‌ای سیگموئیدال به‌عنوان نشانگرهای واکنش استفاده شده است. بر پایه هندسه این آرایه‌ها، معادلات ریاضی و نمودارهای $R-\theta$ فراسنج‌های واکنش برآورد شدند. میانگین مقادیر واکنش برشی (۷)، تغییر حجم (Δ) و همگرایی در عرض پهنه (K) به ترتیب ۰/۴۵، ۰/۲۶- و ۰/۸۵ می‌باشند. ترسیم بیضی‌های واکنش در نمودار لگاریتمی Flinn در محدوده پهن‌شدگی قرار گرفته‌اند که گویای عملکرد همزمان برش ساده و تراکم در منطقه است و کاهش حجم تا ۳۰٪ را نشان می‌دهند. همچنین در پهنه برشی بهلگرد مقدار $\theta < 45^\circ$ و کلیواژها در جهت عمود بر بازشدگی رگه‌ها ایجاد شده‌اند که با ویژگی‌های الگوی برش ساده تراکمی مطابقت دارند. فراسنج‌های واکنش افقی در الگوی ترافشارشی مقادیر مشابهی با الگوی برش ساده تراکمی دارند. برپایه فراسنج همگرایی محاسبه شده (۰/۳۹)، پهنه برشی بهلگرد در رده پهنه‌های با درجه همگرایی کم قرار می‌گیرد که مقدار کوتاه‌شدگی در آن ۲۱٪ برآورد می‌شود. روند محور ISA_1 در الگوی ترافشارشی N138 است که هم‌راستا با جهت‌گیری محور چین بوشاد می‌باشد همچنین این الگو در تحلیل ساختارهای کوچک مقیاس در منطقه الگویی موفق است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۱/۰۱

کلیدواژه‌ها:

پهنه برشی

واکنش

رگه

ترافشارش

۱- پیش‌نوشتار

مطالعه پهنه‌های برشی به‌دلیل دگرشکلی شاخص و مقادیر بالای واکنش از اوایل قرن ۱۹ میلادی مود توجه محققین قرار گرفت و در دهه‌های ۷۰ و ۸۰ میلادی توسط پژوهشگران پیش‌گامی نظیر Coward (1976)، Ramsay and Graham (1970)، Ramsay and Huber (1983)، Sibson (1977) و Lister and Snoke (1984) با ارائه معادلات نوین ریاضی در محاسبه کمی واکنش پیشرفت قابل توجهی یافت. تحقیقات اولیه نشان داد که برش ساده ناهمگن، الگوی دگرشکلی غالب پهنه‌های برشی است (Ramsay and Graham, 1970). در این مطالعات، با فرض این‌که دیواره‌های برش، موازی و فاقد ناپیوستگی باشند شکل‌گیری پهنه برشی با هر ترکیب ناهمگنی از برش ساده به‌همراه تغییر حجم یا بدون آن امکان‌پذیر خواهد بود (Ramsay and Graham, 1970; Ramsay, 1980). دیری نباید که افزون بر این رویکرد عمده، پهنه‌های برشی ساده حدواسط (Subsimple) بر اساس برش ساده و برش محض پایه‌ریزی و سپس در چهارچوب پهنه‌های برشی ترافشارشی (Transpression) و تراکششی (Transtension) در سه بعد معرفی شدند (Ramberg, 1975; Passchier, 1986; Sanderson and Marchini, 1984; Tikoff and Fossen, 1993; Simpson and De Paor, 1993). در این پهنه‌ها بهره‌گیری از ساختارهای کوچک مقیاسی نظیر رگه‌های نردبانی سیگموئیدال (Sigmoidal en echelon veins)، 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).

پهنه برشی بهلگرد در خاور ایران و در حاشیه شمالی کوهستان باقران، مرز فلیش‌های انوسن با توالی افیولیتی کرتاسه و رسوبات کواترنری می‌باشد. کوهستان باقران توسط پهنه‌های برشی متعددی نظیر پهنه برشی چپ‌گرد بوشاد متأثر شده است (شکل ۱-الف). این پهنه با روند خاوری-باختری، به‌صورت عرضی ۴۰ کیلومتر از کوهستان را بریده و در برخی مواقع آثار دگرشکلی آن در رسوبات کواترنری پسین در حاشیه جنوبی کوه باقران نمود دارد (Walker and Khatib, 2006). مطالعات پیشین در منطقه شامل تحلیل هندسی و جنبشی این پهنه با استفاده از برگواره‌ها و برگه‌های راندگی (خطیب و زرین‌کوب، ۱۳۸۳)، پتروفابریک (خلیل‌زاده بجند، ۱۳۸۶) و نیز رگه‌های کششی (نعیمی‌قصابان و همکاران، ۱۳۹۵) انجام شده است. هدف این مطالعه چگونگی استفاده از ساختارهای کوچک مقیاس در ارائه الگوی دگرشکلی منطقه است که در تخمین فراسنج‌های واکنش، میزان کوتاه‌شدگی و درجه همگرایی پهنه برشی بهلگرد و نیز تحلیل ساختارهای بزرگ مقیاس در منطقه (نظیر چین بوشاد) کاربرد دارد. در این تحقیق پهنه برشی بهلگرد برای نخستین بار معرفی می‌گردد.

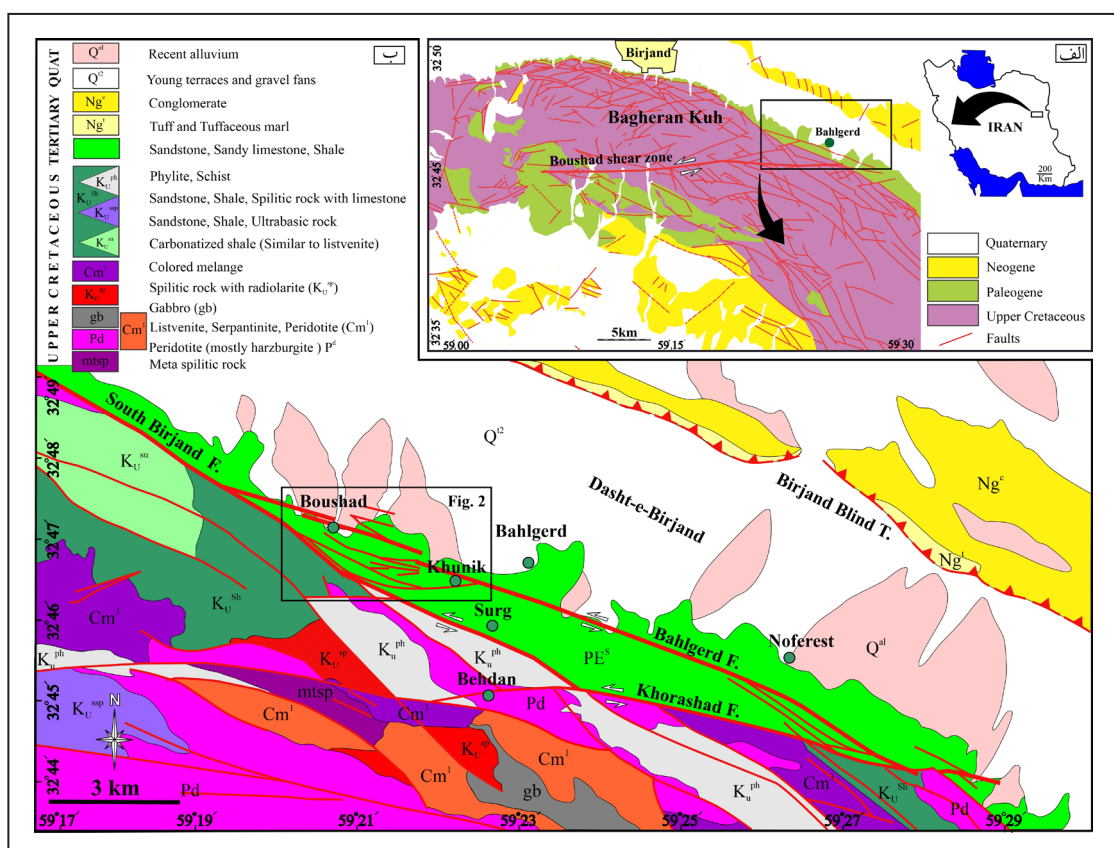
۲- زمین‌شناسی و کسلش فعال منطقه

رشته‌کوه باقران از نظر زمین‌شناسی شامل مجموعه‌ای از توالی افیولیتی، رسوبات فلیشی و سنگ‌های آتشفشانی، به ضخامت کلی ۳-۴ کیلومتر می‌باشد

(PE^s) در لبه شمالی کوهستان باقران، هم‌مرز با رسوبات کواترنری (Q) دشت بیرجند می‌باشد (شکل ۱).

گسلش فعال ناحیه‌ای در گستره مورد مطالعه شامل راندگی پنهان بیرجند و گسل‌های جنوب بیرجند است (شکل ۱-ب). از نمودهای گسلش فعال در شمال منطقه راندگی پنهان بیرجند است که به‌صورت تاقدیسی با روند شمال‌باختری- جنوب‌خاور، به طول تقریبی ۳۷ کیلومتر و عرض حدود ۲-۴ کیلومتر در واحدهای سخت شده کنگلومرای، مارن، توف، مارن توفی نئوژن و گراول‌های آبرفتی کواترنری در دشت بیرجند گسترده شده است (شکل ۱-ب). گسل جنوب بیرجند با امتداد شمال‌باختری - جنوب‌خاوری، جداکننده فلیش‌های پالتوسن از شیل‌های رادیولردار (Ku^h) و فلیش‌های کرتاسه Ku^{sh} در جنوب منطقه است. سازوکار آن امتدادلغز چپ‌گرد و به طول ۸۰ کیلومتر در سرتاسر بخش شمالی پیشانی کوهستان باقران رخمون دارد.

(Zarrinkoub et al., 2012) که امتداد غالب شمال‌باختری- جنوب‌خاوری دارد. پدیدت‌های گوشته‌ای (به‌طور عمده هارزبورژیت‌های سرپانتینی شده و دونیت (Pd) فراوان‌ترین سنگ‌های توالی افیولیتی بوده که با دایک‌های گابروی (gb) و لیستونیت‌ها (Cm¹) پریده شده‌اند. بازالت‌های بالشی و توده‌ای به‌همراه دایک‌های دلریتی نیز رخمون دارند. سنگ آهک‌های پلاژیک و شیل‌های رادیولردار به‌صورت بین لایه‌ای در میان توده‌های بزرگ سنگ‌های اسپیلیتی (Ku^{sp}) دیده می‌شوند. سنگ‌های آذرآواری جوان‌تر از افیولیت‌ها در میان توالی فلیشی ظهور یافته‌اند. رسوبات نوع فلیش شامل ماسه‌سنگ و شیل‌های سبز رنگ به سن کرتاسه بالایی و پالتوسن می‌باشند که در بخش‌هایی در اثر دگرگونی ناحیه‌ای درجه پایین به اسلیت و فلیت تبدیل شده‌اند. فلیش‌های کرتاسه (Ku^{sp}، Ku^{su}، Ku^h) از اجزای رسوبی آمیزه رنگین (Cm³) منطقه محسوب می‌شوند و در بخش‌های داخلی کمر بند افیولیتی قرار دارند در صورتی که فلیش‌های پالتوسن

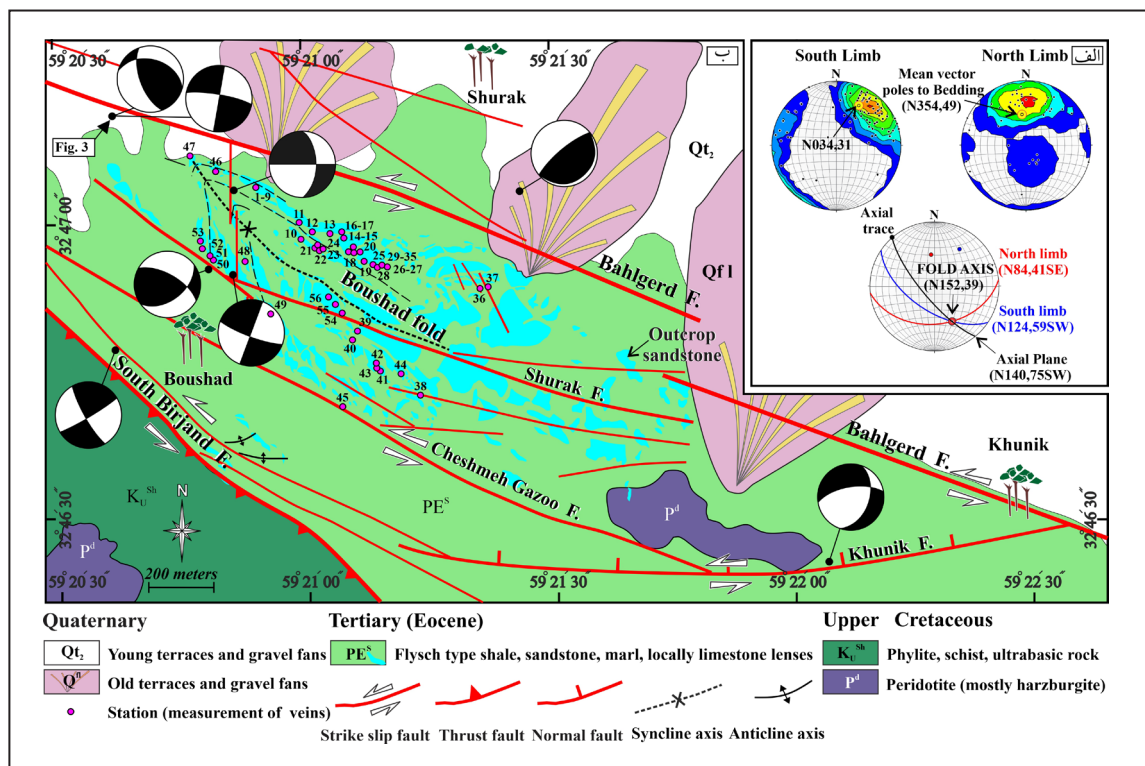


شکل ۱- الف) نقشه ساده شده واحدهای سنگ‌شناسی و گسلش برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ بیرجند (Eftekhari Nezhad et al., 1986)؛ ب) نقشه زمین‌شناسی و گسلش پیرامون گوه ساختاری بهلگرد و موقعیت منطقه مورد مطالعه که با مستطیل نمایش داده شده است.

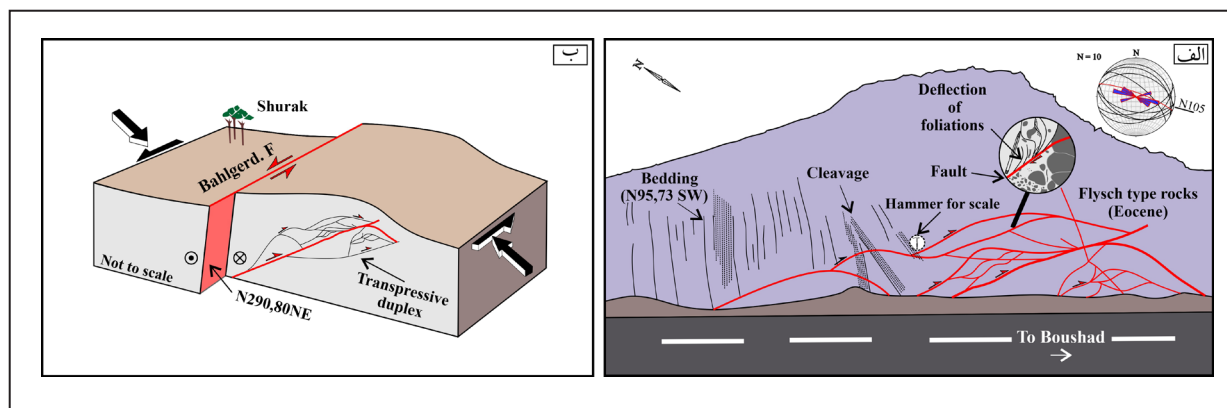
۳- گوه ساختاری بهلگرد

فرعی شورک و چشمه گزو هم‌روند با گسل بهلگرد قرار دارند که از سمت خاور و باختر به گسل‌های خونیک و جنوب بیرجند محدود می‌شوند (شکل ۲-ب). ویژگی‌های این گسل‌ها در جدول ۱ آمده است. در مقطع جاده‌ای نزدیک روستای بوشاد، دوپلکس‌های فشاری همراه گسل بهلگرد با امتداد کلی N105 اندازه‌گیری شده است (شکل ۳). در این اندازه‌گیری صفحه راندگی و خش‌لغز آن در واحد ماسه‌سنگی، موقعیت N70، 25 و N105، 40 NE را نشان می‌دهد.

مرز گوه ساختاری بهلگرد را گسل‌های خراشاد، جنوب بیرجند و بهلگرد تشکیل می‌دهند (شکل ۱-ب) که مشخصات آنها در جدول ۱ آمده است. منطقه مورد مطالعه در شمال باختری گوه ساختاری بهلگرد قرار دارد (شکل ۱-ب). گسل خراشاد، گسلی خمیده است که باعث بالاراندگی فلیش‌های پالتوسن روی بخش‌های مختلف واحدهای افیولیت ملانژ شده است (خطیب، ۱۳۶۸). دیواره‌های این پهنه برشی شامل گسل‌های بهلگرد و گسل جنوب بیرجند است. حد فاصل این دو، گسل‌های



شکل ۲- الف) با تحلیل استریوگرام قطب لایه‌بندی در چین بوشاد محور چین N152, 39 و سطح محوری آن N140,75SW به‌دست آمده است؛ ب) نقشه ساده شده واحدهای سنگ‌شناسی برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ بیرجند (Eftekhari Nezhad et al., 1986) و گسلش در پهنه گسلی بهلگرد (در این مطالعه) به همراه سازوکار کانونی آنها. ویژگی‌های ایستگاه‌های برداشت آرایه‌های رگه‌ای سیگموبیدال در جدول ۲ آمده است.



شکل ۳- الف) بازکشی ساختارها در مقطع جاده‌ای در نزدیک روستای بوشاد. استریوگرام دوپلکس‌های فشاری نشان می‌دهد که هم‌راستای گسل بهلگرد (N110) و در مرز بین فلیش‌های ائوسن و رسوبات کواترنری ایجاد شده‌اند (32° 47' 07" N, 59° 20' 46" E)؛ ب) طرحی از موقعیت دوپلکس‌های فشاری نسبت به گسل بهلگرد.

جدول ۱- مشخصات گسلش در پهنه برشی بهلگرد.

نام گسل	طول گسل (km)	صفحه گسل	خس لغز گسلی	سازوکار	عرض شمالی	طول خاوری
جنوب بیرجند	۸۰	N150, 80 SW	N330, 00	راستالغز چپ‌گرد با مؤلفه معکوس	32°34'46"N	59°49'20"E
بهلگرد	۱۴	N110,80NE	N104, 30	راستالغز چپ‌گرد با مؤلفه معکوس	32°07'47"N	59°46'20"E
خراشاد	۱۱	N096, 78 NE	N86, 40	معکوس چپ‌گرد	32°58'44"N	59°42'24"E
شورک	۲	N110,80SW	N110,00	راستالغز چپ‌گرد	32°55'46"N	59°50'20"E
چشمه گزو	۳	N120, 70 NE		راستالغز چپ‌گرد	32°42'46"N	59°03'21"E
خونیک	۲	N260,65NW	N290,47	نرمال چپ‌گرد	32°23'46"N	59°58'21"E

۴- تعیین دگرشکلی در پهنه برشی بهلگرد با استفاده از آرایه‌های رگه‌ای سیگموئیدال

دگرشکلی یک عارضه را با تغییر در زاویه برش (واتنش برشی) و تغییر اندازه را با تغییر در حجم آن (واتنش حجمی) ارزیابی می‌کنند. واقعیت این است که واتنش در پهنه‌های برشی ناهمگن است بدین معنی که وضعیت واتنش نهایی از نقطه‌ای به نقطه دیگر تغییر می‌کند و این تغییرات در آرایش هندسی ساختارها نمود می‌یابد (Ramsay and Huber, 1983). می‌توان میدان واتنش ناهمگن را به عناصر کوچک‌تری که واتنش همگن دارند تقسیم کرد و در عمل با به‌کارگیری رخنمون‌های سنگی در مقیاس مزوسکوپی این شرایط فراهم می‌آید. از جمله ساختارهای کوچک مقیاس در پهنه برشی بهلگرد آرایه‌های رگه‌ای سیگموئیدال هستند که به‌صورت رگه‌های کوآرتزی در واحدهای ماسه‌سنگی فلیش‌های اتوسن نمود دارند و فراوانی آنها در شمال‌باختری منطقه (حوالی روستای بوشاد) قابل توجه است.

۴-۱. ارتباط دگرشکلی و شکستگی‌های کششی در انواع پهنه‌های برشی

شکستگی‌های کششی از جمله ساختارهای کوچک مقیاس هستند که در پهنه‌های برشی نیمه شکننا (Semibrittle) ایجاد می‌شوند (Davis et al., 2012). در ابتدا شکستگی‌ها در راستای محور بیشینه تنش (σ_1) جهت‌گیری می‌شوند سپس در الگوی شکستگی‌های نوع ۱ عمود بر محور کشیدگی لحظه‌ای بیشینه ($ISA_1 = \text{Maximum}$) instantaneous stretching axis) باز می‌شوند. اولین شکستگی‌های تشکیل شده در برش ساده زاویه ۴۵ درجه با دیواره برشی (α) می‌سازند که این زاویه برای مناطق با اتساع مثبت کمتر از ۴۵ درجه و در مناطق با اتساع منفی (تراکمی) بیشتر از ۴۵ درجه است (شکل ۴- الف) (Ramsay and Huber, 1983; Fossen and Tikoff, 1993). در دگرشکلی‌های بعدی زوایای اولیه تغییر می‌کند و رگه‌های سیگموئیدال ایجاد می‌شوند.

۴-۲. روش تعیین دگرشکلی در پهنه برشی بهلگرد

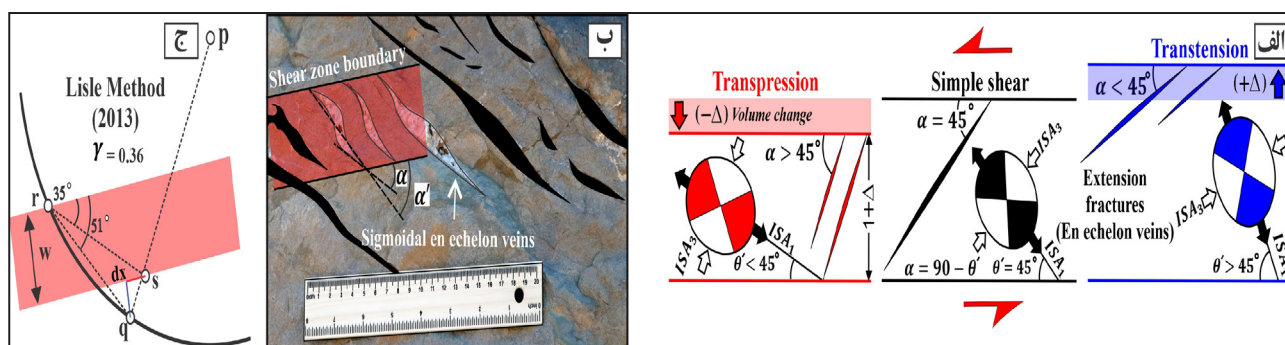
پهنه برشی بهلگرد از جمله پهنه‌های برشی شکننده - شکل‌پذیر محسوب می‌شود. دگرشکلی در این نوع پهنه‌ها به‌صورت شکستگی‌های کششی، رگه‌ها و سطوح لغزشی نمود می‌یابند. تشکیل این ساختارها در بخش‌های بالایی پوسته شکننا (عمق ۳-۱۵ کیلومتری) شکل می‌گیرند. در این تحقیق به‌منظور تعیین دگرشکلی در پهنه برشی بهلگرد، ابتدا با استفاده از آرایه‌های رگه‌ای سیگموئیدال (شکل‌های ۴- ب) و روش (Lisle (2013) (شکل ۴- ج) مقادیر واتنش برشی (γ) در ۵۶ ایستگاه محاسبه شد (جدول ۲). سپس با در نظر گرفتن زاویه (θ) و واتنش برشی (γ)، مقادیر Δ تعیین شد (جدول ۲). روش (Lisle (2013) بر پایه الگوی خمشی تدریجی پل‌های سنگی بین شکاف‌های کششی بنا شده است. در این الگو پل‌ها به مثابه تیرک‌های مقاومی بین آرایه نردبانی شکستگی‌ها قرار می‌گیرند و در اثر کوتاه‌شدگی مرتبط با برش، خم می‌شوند و رگه‌های سیگموئیدال اتساع یافته را ایجاد می‌کنند (Nicholson and Pollard, 1985; Lisle, 2013). در روش ترسیمی (Lisle (2013) ابتدا در جهت عمود بر راستای اولیه شکستگی، دایره‌ای به شعاع دلخواه (pq) رسم می‌شود. از نقطه q بر روی محیط دایره، خطی به موازات راستای شکستگی بعد دگرشکلی (qr) ترسیم می‌گردد. خط sr را که بیانگر شکستگی اولیه است مطابق روابط زیر بازسازی شده است (شکل ۴- ج).

$$s = \sin(\alpha' - \alpha) / \alpha' - \alpha \quad (1)$$

$$sr = s \times qr \quad (2)$$

α و α' : زوایای بین راستای شکستگی کششی قبل و بعد از دگرشکلی بر حسب رادیان با رسم خطوطی از نقاط s و r به موازات دیواره برش، w (عرض پهنه برشی) به‌دست می‌آید. از نقطه q خطی عمود و به موازات دیواره برش رسم می‌شود. dx مؤلفه جابه‌جایی موازی پهنه برشی می‌باشد. مقدار واتنش برشی (γ) را می‌توان از رابطه ۳ محاسبه کرد:

$$\gamma = dx/w \quad (3)$$



شکل ۴- الف) آرایش شکستگی‌های کششی و جهت‌گیری ISA (محورهای کشیدگی لحظه‌ای) در پهنه‌های برشی ساده، تراکشی و ترافشارشی برگرفته از (Ramsay and Huber, 1983)؛ ب) رگه‌های نردبانی سیگموئیدال در پهنه برشی بهلگرد (32° 46' 57" N, 59° 20' 48" E)؛ ج) بازسازی ترسیمی به روش (Lisle (2013) و تعیین واتنش برشی (γ) (نمونه ۵۱ در جدول ۲).

۵-۱. الگوی برش ساده یا برش ساده تراکمی (Compactional simple shear):

در پهنه‌های برشی ایده‌آل (Ramsay type) که دیواره‌های موازی و مستقیم دارند، واتنش مستوی و دگرشکلی به‌صورت برش ساده و یا ترکیبی از برش ساده و تغییر حجم (انبساط/انقباض) در دو بعد در نظر گرفته می‌شود (Ramsay, 1980). تغییر حجم نوع خاصی از واتنش حجمی است که به‌صورت انبساط/انقباض در سنگ‌ها ظاهر می‌شود و به اتساع/تراکم (Δ) مصطلح است (شکل ۵- الف). نکته قابل توجه

۵- الگوهای دگرشکلی در پهنه برشی بهلگرد

در توصیف دگرشکلی پهنه برشی بهلگرد ترکیبی از برش ساده با تغییر حجم و نیز برش ساده و برش محض در نظر گرفته شده است. اینها از اعضای انتهایی محدوده گسترده‌ای از انواع دگرشکلی محسوب می‌شوند که به‌ندرت به تنهایی در سنگ‌ها مشاهده شده‌اند. در ادامه الگوهای معمول دگرشکلی در پهنه‌های برشی ارائه و با استفاده از آنها وضعیت دگرشکلی در پهنه برشی بهلگرد بحث شده است:

واتنش نهایی را با معادلات زیر به دست آورد (Ramsay, 1980):

$$S_1^2 = (1+e_1)^2 = \frac{1}{2} \left[1+\gamma^2 + (1+\Delta)^2 + \left\{ (1+\gamma^2 + (1+\Delta)^2)^2 - 4(1+\Delta)^2 \right\}^{1/2} \right] \quad (6)$$

$$S_3^2 = (1+e_3)^2 = \frac{1}{2} \left[1+\gamma^2 + (1+\Delta)^2 - \left\{ (1+\gamma^2 + (1+\Delta)^2)^2 - 4(1+\Delta)^2 \right\}^{1/2} \right] \quad (7)$$

Δ : تغییر حجم (مثبت نشانه افزایش حجم و منفی نشانه کاهش حجم)، S : ضریب کشیدگی (Stretch)، e : ضریب طولیل شدگی.

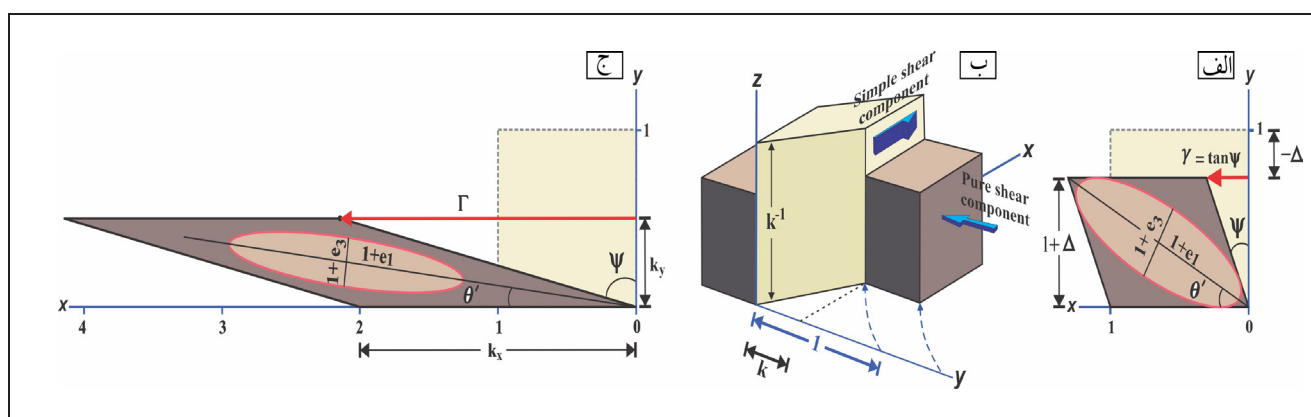
اینست که تنها در واتنش مستوی تغییر سطح به جای تغییر حجم به کار می‌رود. ماتریس دگرشکلی در این پهنه‌ها به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$D_{ss,\Delta} = \begin{bmatrix} 1 & \gamma\Delta/\ln(1+\Delta) \\ 0 & 1+\Delta \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\tan 2\theta' = 2\gamma(1+\Delta)/(1+\gamma^2 - (1+\Delta)^2) \quad (5)$$

θ' : (زاویه بین ISA_1 و جهت برش)، Δ : مؤلفه تغییر مساحت همراه برش و γ : واتنش برشی.

در این پهنه‌ها، می‌توان ضرایب کشیدگی (S_1, S_3) و طولیل شدگی (e_1, e_3) بیضی



شکل ۵- الگوهای دگرشکلی الف) الگوی برش ساده تراکمی (برش ساده به همراه تغییر حجم) (Ramsay, 1980)؛ ب) الگوی سه بعدی ترافشارشی (Sanderson and Marchini, 1984)؛ ج) الگوی برش ساده حدواسط (همزمانی برش ساده و برش محض) (Fossen and Tikoff, 1993).

۵-۱. الگوی ترافشارشی

بیشتر پهنه‌های برشی، دیواره‌های غیر موازی و انحنادار دارند و دگرشکلی در آنها به صورت ترکیبی از برش ساده و برش محض در نظر گرفته می‌شود. در این مورد الگوهای ساده و مفیدی در توصیف دگرشکلی برای رژیم‌های فشارشی و کششی در سه بعد ارائه شده است (Sanderson and Marchini, 1984; Fossen and Tikoff, 1998). فرض عمومی در این الگوها این است که پهنه برشی قائمی به طور همزمان تحت تأثیر جابه‌جایی افقی و برش محض عمود بر صفحه برشی قرار می‌گیرد و حجم ثابت است. طیف‌های دگرشکلی ترافشارشی یا تراکششی بر اساس مقدار کشیدگی قائم (برای ترافشارش) یا کوتاه‌شدگی (برای تراکشش) توصیف شده‌اند (Fossen and Tikoff, 1998). نمونه‌ای از دگرشکلی‌های شناخته شده ترافشارشی، در پهنه‌های همگرای مایل به صورت کوتاه‌شدگی افقی عمود بر صفحه برش و در عرض پهنه (محور y) و کشیدگی قائم عمود بر جهت برش (محور z) توسط Sanderson and Marchini (1984) ارائه شده است (شکل ۵ - ب). ماتریس دگرشکلی در این الگو در سه بعد به صورت زیر بیان می‌شود:

$$D = \begin{bmatrix} 1 & \Gamma & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & k^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \gamma(1-k)/\ln(k^{-1}) & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & k^{-1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

γ : برش ساده در جهت محور x ; k : فاکتور کوتاه‌شدگی در جهت محور y ؛ k^{-1} : فاکتور کشیدگی قائم در جهت محور z ؛ Γ : واتنش مؤثر.

۵-۳. الگوی برش ساده حدواسط

در الگوهای همزمانی برش ساده و محض برای ساده‌سازی، دگرشکلی ترافشارشی

$$D = \begin{bmatrix} k_x & \Gamma \\ 0 & k_y \end{bmatrix} \quad (9)$$

K_x و K_y : فاکتور کشیدگی در جهت محوره‌های x و y ؛ Γ : واتنش برش مؤثر که تابعی از K_x ، K_y و γ است (Tikoff and Fossen, 1993):

$$\Gamma = \gamma \frac{(k_x - k_y)}{\ln(k_x/k_y)} \quad (10)$$

$$k_x = 1/k_y \quad (11)$$

$$\theta' = \arctan \left(\frac{k_x - \Gamma^2 - 1}{k_y} \right) \quad (12)$$

در این پهنه‌ها نیز می‌توان ضرایب طولیل شدگی (e_1, e_3) بیضی واتنش نهایی را با معادلات ۱۳ و ۱۴ به دست آورد (Fossen and Tikoff, 1993):

$$\lambda_1 = (1+e_1)^2 = \frac{\Gamma^2 + k_x^2 + k_y^2 + \sqrt{4k_x^2 k_y^2 + (\Gamma^2 + k_x^2 + k_y^2)^2}}{2} \quad (13)$$

$$\lambda_3 = (1+e_3)^2 = \frac{\Gamma^2 + k_x^2 + k_y^2 - \sqrt{4k_x^2 k_y^2 + (\Gamma^2 + k_x^2 + k_y^2)^2}}{2} \quad (14)$$

تغییر حجم منفی را نشان می‌دهند.

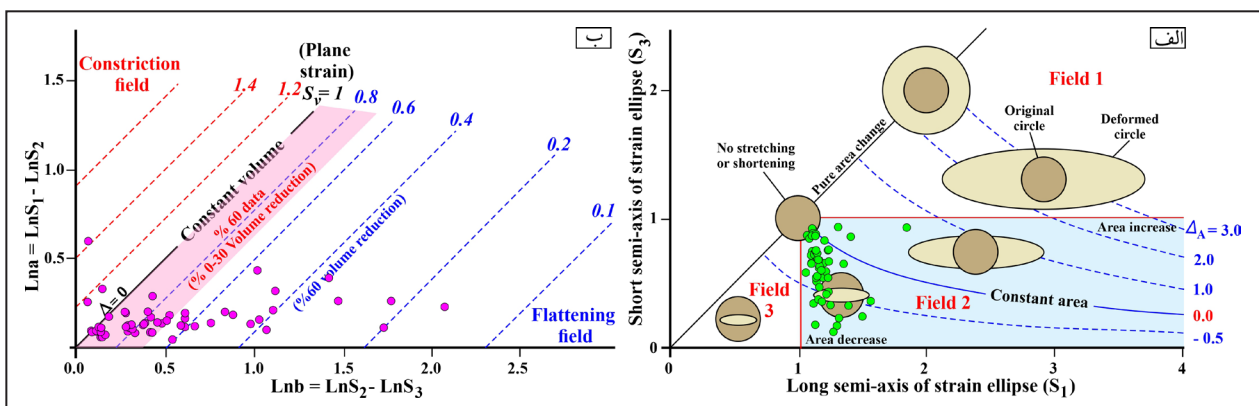
در نمودار لگاریتمی Flinn خطوط واتنش مستوی با تغییرات حجمی متفاوت رسم شده‌اند و این خطوط محدوده واتنش انقباضی (Constriction field) را در بالا از محدوده واتنش پهن‌شدگی (Flattening field) در پایین جدا می‌کنند. موقعیت بیضی واتنش نمونه‌ها در پهنه برشی بهلگرد نشان می‌دهد که ۶۰٪ داده‌ها تا ۳۰٪ کاهش حجم یافته‌اند و به‌جای قرارگیری بر روی محور $S_v=1$ نمودار Flinn، در محدوده با واتنش انقباضی ($S_v<1$) قرار می‌گیرد (شکل ۶-ب). این موضوع مبین آن است که دگرشکلی به واتنش با حجم ثابت نرسیده و برش ساده به تنهایی عمل نکرده است. در عین حال واتنش در محدوده بین محور خط چین $S_v=1$ ، با خطوط نمایانگر کاهش یا افزایش حجم ۳۰ درصد، به‌عنوان بیضوی واتنش مستوی تحلیل می‌شود (یاساقی، ۱۳۹۸) بنابراین در تحلیل دوبعدی دگرشکلی پهنه برشی بهلگرد، واتنش مستوی در نظر گرفته خواهد شد.

همچنین می‌توان درجه بیضی بودن (R) را نیز از رابطه زیر محاسبه کرد و دگرشکلی را در نمودار $R-\theta'$ ترسیم نمود.

$$R = \frac{S_1}{S_2} = \frac{1+e_1}{1+e_3} = \frac{\sqrt{\lambda_1}}{\sqrt{\lambda_2}} \quad (15)$$

۶- نمودارهای Ramsay و Flinn

برای نمایش وضعیت واتنش نهایی در پهنه برشی بهلگرد از نمودار میدان‌های بیضی واتنش (Ramsay and Huber, 1983) و نمودار لگاریتمی طبیعی (Flinn 1962) استفاده شده است. برای این منظور ضرایب حداکثر کشیدگی و کوتاه‌شدگی (S_1, S_3) بیضی واتنش نهایی، با معادلات ۶ و ۷ به‌دست آمده است (جدول ۲). ترسیم داده‌ها در شکل ۶-الف نشان می‌دهد دگرشکلی‌ها در میدان ۲ قرار می‌گیرند در این محدوده سنگ‌ها از یک جهت کشیده و در جهت عمود بر آن کوتاه شده‌اند. همچنین بیشتر داده‌ها در زیر خط مساحت ثابت قرار می‌گیرند بدین معنی که بیضی‌ها



شکل ۶-الف) نمودار طبقه‌بندی میدان‌های واتنش بر اساس شکل بیضی واتنش نهایی (Ramsay and Huber, 1983) دگرشکلی در پهنه برشی بهلگرد در میدان ۲ قرار گرفته که با کاهش حجم همراه است؛ ب) مقادیر مختلف بیضی واتنش در نمودار لگاریتمی Flinn نشان می‌دهد که ۶۰٪ داده‌های پهنه برشی بهلگرد تا ۳۰٪ کاهش حجم یافته‌اند.

۷- نمودارهای $R-\theta'$

به‌طور کلی نمودارهای $R-\theta'$ ، ترسیم و تفسیر واتنش نهایی به‌دست آمده در پهنه برشی را به‌صورت تلفیقی از برش ساده و دیگر الگوهای دگرشکلی امکان‌پذیر می‌کنند. θ' : زاویه بین محور طویل بیضی واتنش با صفحه برش بعد از دگرشکلی و R نسبت واتنش می‌باشد که با استفاده از نشانگرهای واتنش قابل محاسبه است. تحلیل شکستگی‌های کششی در پهنه برشی بهلگرد، اندازه‌گیری فراسنج‌های واتنش برش ساده، برش محض و تغییرات حجمی دگرشکلی را امکان‌پذیر کرده است به‌طوری‌که با داشتن (θ') و (γ)، مقادیر K و Δ با استفاده از نمودارهای $R-\theta'$ (شکل ۷) تعیین می‌شود (جدول ۲). برای محاسبه دگرشکلی در این تحقیق، چهارچوب مرجع به‌گونه‌ای انتخاب شده که گسل بهلگرد به‌عنوان صفحه برشی قائم (xz) باشد بدین ترتیب دگرشکلی در شکل ۷-الف همزمانی برش ساده و تغییر مساحت بیضی واتنش (Δ) در صفحه xy را نشان می‌دهد که در آن x به موازات گسل بهلگرد و y عرض پهنه برشی می‌باشد. در شکل ۷-الف، داده‌ها به‌علت تغییر حجم منفی زیر منحنی برش ساده واقع شده‌اند. پراکنش داده‌ها، اختلاف در جهت‌یافتگی و شکل بیضی‌های ایجاد شده به‌وسیله برش ساده و تغییر حجم را برای مناطق مختلف پهنه نشان می‌دهد و مبین این موضوع است که تغییر حجم باعث انحراف واتنش از برش ساده در منطقه بهلگرد شده است. بر این اساس میانگین مقادیر γ_{mean} و Δ_{mean} به ترتیب ۰/۴۵ و ۰/۲۶- خواهند بود. در شکل ۷-ب، داده‌ها زیر منحنی برش ساده قرار

می‌گیرند. پراکنش داده‌ها مقادیر $K < 1$ را نشان می‌دهند که مؤید کوتاه‌شدگی در عرض پهنه برشی بهلگرد است. بر این اساس مقادیر K_{xmean} ، γ_{mean} و K_{ymean} به ترتیب ۰/۴۵، ۱/۱۸ و ۰/۸۵ خواهند بود. این نشان می‌دهد که در راستای برش ۱۸٪ کشیدگی و در عرض پهنه ۱۵٪ کوتاه‌شدگی حاکم بوده است. کشیدگی در جهت z (kz) مستقل از kx و ky است و نمودار $R-\theta'$ ، هیچ بیش‌تری از وضعیت و بزرگی kz به‌ما نمی‌دهد (Bhattacharyya and Hudanlestone, 2001).

۸- بحث

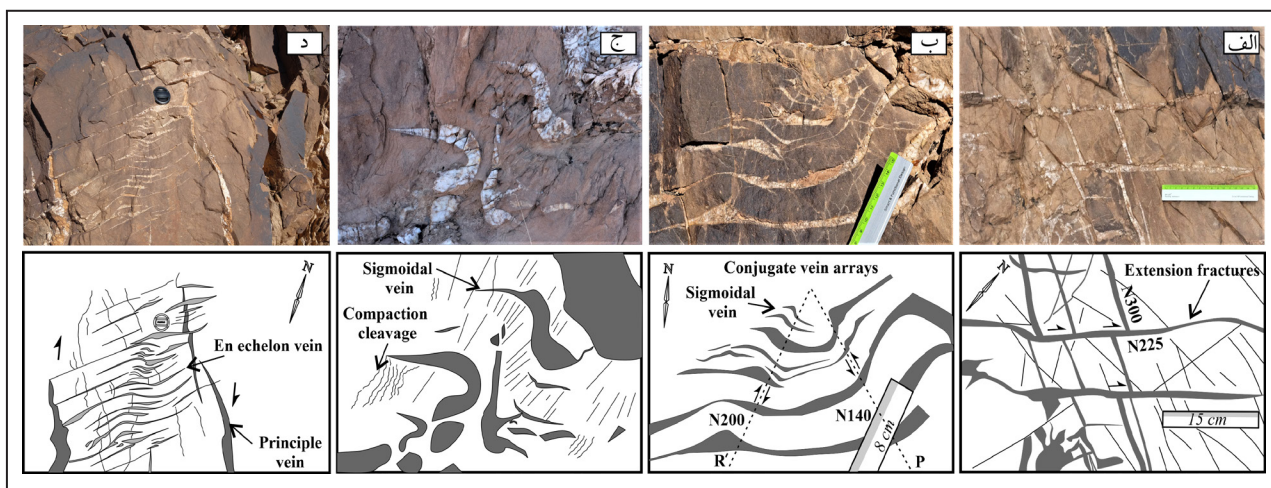
۸-۱. تحلیل واتنش در پهنه برشی بهلگرد

شکستگی‌های کششی در پهنه برشی بهلگرد به‌صورت رگه‌هایی در دو دسته کلی قابل تمایزند. دسته‌ای به‌عنوان رگه‌های اصلی موازی هم آرایش یافته‌اند که در مواردی متعامدند (شکل ۸-الف) و دسته‌ای به شکل آرایه‌های نرنبانی مستقیم یا خمیده در سطح لایه‌های ماسه‌سنگی چین‌خورده تظاهر دارند (شکل‌های ۴-ب و ۸-ج). جهت تحلیل هندسی رگه‌ها، فراوانی راستای رگه‌های اصلی در دو یال شمالی و جنوبی از چین بوشاد در نمودار گلسرخ‌ی رسم شده‌اند. از تعداد ۴۸۱ داده، ۱۷ درصد در راستای N210-220 قرار گرفته‌اند و جهت بردار میانگین آنها N215 است (شکل ۹-الف).

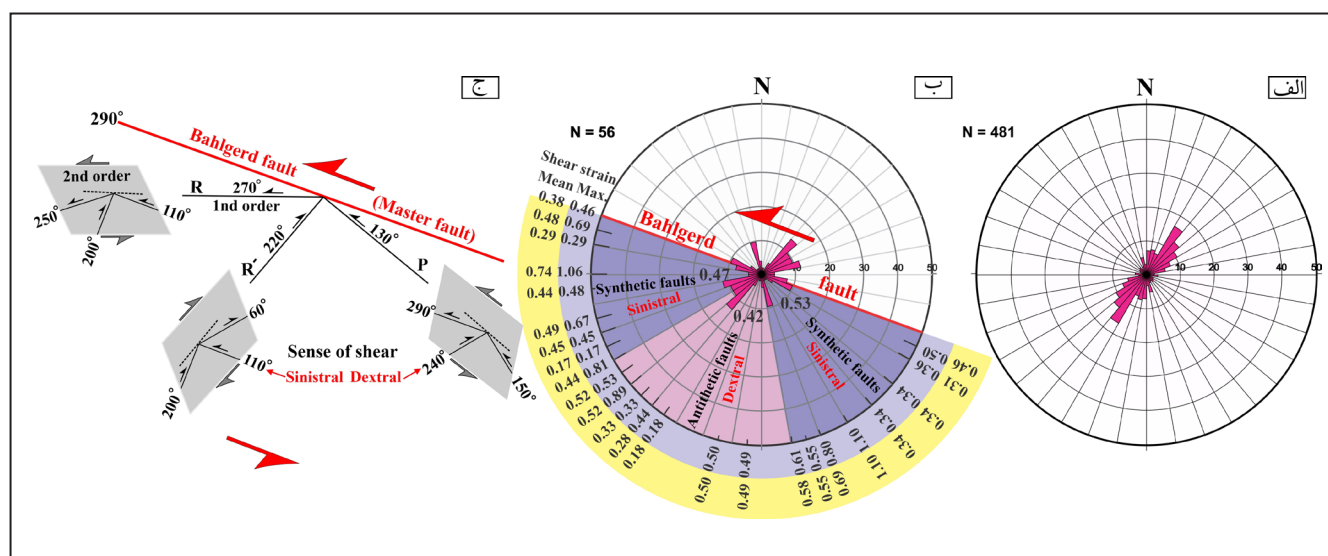
جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های اندازه‌گیری و مقادیر فراسنج‌های رانش محاسبه شده در پهنه برشی بعلبک.

Liste (2013)										Ramsay (1980)					Fossen (1993, 2017)							
Station	Latitude	Longitude	Strike	Sense of shear	α	α'	θ' (Field)	γ	$\tan \gamma = \psi$	R-0° plot		S_1 (Eq. 6)	S_3 (Eq.7)	θ' (Eq.5)	K_s	K_s (Eq.11)	Γ (Eq.10)	λ_1 (Eq.15)	λ_3 (Eq.16)	S_{1-} $\psi_{\lambda 1}$	S_{3-} $\psi_{\lambda 3}$	θ' (Eq.12)
										Δ	R_{xz}				$R-0^\circ$ plot							
1	3629816	719923	220	D	71	53	19	0.33	18	-0.28	1.57	1.09	0.66	19	1.16	0.86	0.33	1.56	0.64	1.25	0.80	19
2	3629816	719923	245	D	56	42	34	0.21	12	-0.06	1.20	1.08	0.87	34	1.03	0.97	0.21	1.24	0.80	1.12	0.90	34
3	3629816	719923	265	D	57	33	33	0.45	24	-0.08	1.55	1.22	0.76	33	1.04	0.96	0.45	1.57	0.64	1.25	0.80	34
4	3629816	719923	255	D	51	38	39	0.20	11	-0.02	1.20	1.10	0.89	39	1.01	0.99	0.20	1.22	0.82	1.11	0.90	39
5	3629816	719923	220	D	65	50	25	0.30	17	-0.18	1.42	1.10	0.75	25	1.10	0.91	0.30	1.42	0.70	1.19	0.84	25
6	3629816	719923	255	S	75	47	15	0.63	32	-0.47	2.35	1.22	0.43	15	1.34	0.75	0.64	2.33	0.43	1.53	0.65	15
7	3629816	719923	230	D	59	45	31	0.19	10	-0.08	1.22	1.07	0.86	31	1.04	0.96	0.19	1.23	0.81	1.11	0.90	31
8	3629816	719923	220	D	70	47	20	0.44	24	-0.29	1.72	1.15	0.62	21	1.18	0.85	0.44	1.73	0.58	1.31	0.76	20
9	3629816	719923	220	D	45	35	45	0.18	10	0.01	1.17	1.10	0.92	44	0.99	1.01	0.18	1.20	0.83	1.09	0.91	46
10	3629816	719923	340	S	68	52	22	0.30	16	-0.22	1.48	1.09	0.72	22	1.12	0.89	0.30	1.45	0.69	1.21	0.83	22
11	3629662	720060	285	S	79	45	11	0.69	34	-0.59	3.00	1.24	0.33	12	1.50	0.67	0.71	2.85	0.35	1.69	0.59	11
12	3629710	720056	245	S	61	49	29	0.17	9	-0.08	1.15	1.06	0.87	30	1.04	0.96	0.17	1.21	0.83	1.10	0.91	30
13	3629684	720096	240	S	83	45	7	0.81	39	-0.70	3.90	1.30	0.23	9	1.80	0.56	0.86	4.04	0.25	2.01	0.50	7
14	3629679	720149	340	S	88	52	2	0.80	39	-0.78	5.10	1.29	0.17	6	2.90	0.34	0.97	9.37	0.11	3.06	0.33	2
15	3629677	720186	341	S	73	47	17	0.52	28	-0.36	1.95	1.18	0.54	19	1.25	0.80	0.52	1.97	0.51	1.40	0.71	18
16	3629677	720186	195	D	87	64	3	0.50	26	-0.80	5.30	1.12	0.18	5	2.20	0.45	0.55	5.16	0.19	2.27	0.44	3
17	3629667	720190	270	S	80	35	10	1.06	47	-0.64	3.95	1.48	0.24	10	1.65	0.61	1.10	4.06	0.25	2.02	0.50	10
18	3629667	720190	230	S	77	25	13	0.89	42	-0.55	3.20	1.38	0.33	13	1.47	0.68	0.91	3.14	0.32	1.77	0.56	13
19	3629627	720207	350	D	77	46	13	0.61	31	-0.50	2.57	1.20	0.42	14	1.40	0.71	0.62	2.45	0.41	1.56	0.64	13
20	3629634	720215	340	D	88	53	2	0.76	37	-0.84	5.50	1.26	0.13	4	2.70	0.37	0.72	7.81	0.13	2.79	0.36	2
21	3629625	720208	240	S	73	50	17	0.45	24	-0.42	2.80	1.13	0.51	16	1.24	0.81	0.45	1.85	0.54	1.36	0.73	17
22	3629634	720106	255	S	65	40	25	0.48	26	-0.22	2.65	1.19	0.66	25	1.13	0.88	0.48	1.71	0.59	1.31	0.77	25
23	3629627	720115	215	D	60	47	30	0.21	12	-0.09	1.27	1.08	0.85	30	1.05	0.95	0.21	1.26	0.79	1.12	0.89	30
24	3629634	720106	295	S	83	60	7	0.44	24	-0.62	2.80	1.11	0.34	9	1.58	0.63	0.46	2.74	0.37	1.66	0.60	7
25	3629627	720115	215	D	44	34	46	0.18	10	0.01	1.17	1.10	0.92	44	0.99	1.01	0.18	1.20	0.83	1.09	0.91	46
26	3629620	720236	265	S	75	50	15	0.43	23	-0.39	1.92	1.12	0.54	16	1.27	0.79	0.43	1.89	0.53	1.38	0.73	15
27	3629587	720283	330	S	73	30	17	1.10	48	-0.44	3.25	1.55	0.36	17	1.34	0.75	1.12	3.29	0.30	1.81	0.55	17
28	3629816	720281	290	D	56	43	34	0.46	25	-0.07	1.57	1.22	0.76	34	1.04	0.96	0.46	1.59	0.63	1.26	0.79	34

Lisle (2013)										Ramsey (1980)					Fossen (1993, 2017)							
Station	Latitude	Longitude	Strike	Sense of shear	α	α'	θ' (Field)	γ	$\tan \gamma = \psi$	R- θ' plot		S_1 (Eq.6)	S_3 (Eq.7)	θ' (Eq.5)	K_x R- θ' plot	K_y (Eq.11)	Γ (Eq.10)	λ_1 (Eq.15)	λ_3 (Eq.16)	S_{1-} $\sqrt{\lambda_1}$	S_{3-} $\sqrt{\lambda_3}$	θ' (Eq.12)
										Δ	R_{xz}											
29	3629580	720288	295	S	103	49	-13	0.50	27	-0.46	2.15	1.15	0.47	15	1.35	0.74	0.51	2.17	0.46	1.47	0.68	13
30	3629583	720298	185	D	42	21	48	0.49	26	0.20	1.67	1.39	0.86	-40	0.92	1.09	0.49	1.67	0.60	1.29	0.77	47
31	3629584	720300	295	S	73	50	17	0.44	24	-0.37	1.85	1.13	0.56	17	1.24	0.81	0.44	1.84	0.54	1.36	0.74	17
32	3629584	720300	255	D	68	42	22	0.54	28	-0.29	1.85	1.20	0.59	22	1.18	0.85	0.54	1.86	0.54	1.36	0.73	22
33	3629584	720300	235	D	63	39	27	0.53	28	-0.18	1.75	1.22	0.67	27	1.10	0.91	0.53	1.75	0.57	1.32	0.76	28
34	3629584	720300	235	D	81	54	9	0.51	27	-0.57	2.70	1.14	0.38	11	1.50	0.67	0.52	2.58	0.39	1.61	0.62	9
35	3629583	720311	220	D	51	41	39	0.21	12	-0.02	1.20	1.10	0.89	39	1.01	0.99	0.21	1.23	0.81	1.11	0.90	39
36	3629512	720607	270	S	66	45	24	0.42	23	-0.22	1.60	1.15	0.68	24	1.13	0.88	0.42	1.62	0.62	1.27	0.79	24
37	3629516	720626	245	D	80	52	10	0.57	30	-0.58	2.80	1.17	0.36	11	1.50	0.67	0.59	2.66	0.38	1.63	0.61	10
38	3629186	720424	320	S	64	47	26	0.34	19	-0.17	1.47	1.12	0.74	26	1.10	0.91	0.34	1.47	0.68	1.21	0.82	26
39	3629380	720232	255	S	60	35	30	0.67	34	-0.13	1.95	1.34	0.65	30	1.07	0.93	0.67	1.96	0.51	1.40	0.71	30
40	3629355	720217	285	S	65	48	25	0.33	18	-0.19	1.47	1.11	0.73	25	1.10	0.91	0.33	1.46	0.68	1.21	0.83	25
41	3629274	720291	265	S	66	45	24	0.39	21	-0.22	1.53	1.14	0.69	24	1.12	0.89	0.39	1.57	0.64	1.25	0.80	24
42	3629282	720289	300	D	80	64	10	0.25	14	-0.39	1.73	1.05	0.58	12	1.27	0.79	0.25	1.71	0.58	1.31	0.76	10
43	3629262	720301	285	S	71	43	19	0.58	30	-0.34	2.05	1.22	0.54	20	1.23	0.81	0.58	2.02	0.50	1.42	0.70	19
44	3629252	720364	250	S	68	46	22	0.44	24	-0.27	1.70	1.15	0.63	22	1.16	0.86	0.44	1.69	0.59	1.30	0.77	22
45	3629154	720188	290	S	55	43	35	0.22	12	-0.05	1.25	1.09	0.87	35	1.10	0.91	0.22	1.33	0.75	1.15	0.87	22
46	3629865	719803	230	S	69	45	21	0.48	26	-0.30	1.78	1.16	0.60	21	1.18	0.85	0.48	1.78	0.56	1.33	0.75	21
47	3629915	719724	225	D	73	55	17	0.33	18	-0.29	1.57	1.09	0.65	19	1.19	0.84	0.33	1.61	0.62	1.27	0.79	17
48	3629590	719888	220	D	50	39	40	0.24	14	-0.01	1.27	1.12	0.88	40	1.01	0.99	0.24	1.27	0.79	1.13	0.89	39
49	3629435	719972	280	S	33	19	57	0.29	16	0.21	1.40	1.29	0.94	-31	0.91	1.10	0.29	1.41	0.71	1.19	0.84	57
50	3629603	719786	310	D	63	45	27	0.34	19	-0.16	1.45	1.12	0.75	27	1.09	0.92	0.34	1.46	0.68	1.21	0.83	27
51	3629607	719785		D	51	35	39	0.36	20	-0.01	1.40	1.19	0.83	39	1.01	0.99	0.36	1.43	0.70	1.20	0.84	38
52	3629636	719762	350	D	30	13	60	0.55	29	0.70	2.12	1.82	0.93	-25	0.78	1.28	0.51	2.01	0.50	1.42	0.71	61
53	3629650	719760	300	D	63	45	27	0.36	20	-0.17	1.47	1.13	0.73	27	1.09	0.92	0.36	1.49	0.67	1.22	0.82	27
54	3629436	720188		S	52	41	38	0.25	14	-0.03	1.27	1.12	0.87	38	1.03	0.97	0.25	1.29	0.77	1.14	0.88	35
55	3629461	720169		S	62	45	28	0.34	19	-0.15	1.45	1.12	0.76	28	1.08	0.93	0.34	1.45	0.69	1.20	0.83	28
56	3629483	720148		S	66	45	24	0.40	22	-0.22	1.60	1.14	0.68	24	1.13	0.88	0.40	1.59	0.63	1.26	0.79	24
Mean							24	0.45	24	-0.26	1.8	1.19	0.63	20	1.18	0.85	0.46	1.74	0.57	1.32	0.76	21



شکل ۸- الف) شکستگی‌های کششی متقاطع، شکستگی‌ها در راستای N225 علاوه بر کشش به صورت راستگرد نیز بریده شده‌اند (32° 46' 57" N, 59° 20' 06" E)؛ ب) آرایه‌های رگه‌ای سیگموئیدال که در راستای شکستگی‌های مزدوج نوع R' و P ایجاد شده‌اند (32° 47' 03" N, 59° 20' 53" E)؛ ج) رگه‌های سیگموئیدال به همراه کلیوآزهای تراکمی نمایش داده شده است (32° 46' 57" N, 59° 20' 05" E)؛ د) نمونه‌ای از رگه‌های نردبانی سیگموئیدال در پهنه برشی بهلگرد که جهت تعیین واتنش استفاده شده است (نمونه ۸ در جدول ۲) (32° 46' 04" N, 59° 20' 54" E).



شکل ۹- الف) نمودار گلسرخی از رگه‌های اصلی در پهنه برشی بهلگرد، جهت بردار میانگین آنها N215 می‌باشد؛ ب) نمودار گلسرخی از سامانه‌های برشی همسو یا ناهمسو با برش چپ گرد گسل بهلگرد به همراه مقدار واتنش برشی بیشینه و میانگین در این سامانه‌ها نمایش داده شده است؛ ج) شکستگی‌های برشی همراه با گسل چپ گرد بهلگرد تا رده دوم پیش‌بینی شده است.

شکل گرفته‌اند. به نظر می‌رسد در پهنه برشی بهلگرد واتنش در راستای گسل‌های مزدوج از نوع R، R' و P توزیع شده است که میانگین واتنش برشی در راستای گسل‌های همسو با گسل بهلگرد بیشتر از گسل‌های ناهمسو است. نمونه‌ای از آرایه‌های رگه‌ای مزدوج که در سامانه برشی نوع R' و P شکل گرفته‌اند در شکل ۸- ب نشان داده شده است. شکل ۹- ج گسل‌های رده‌های اول و دوم مورد انتظار در پهنه برشی بهلگرد را بررسی کرده است که قابل تعمیم به رده‌های بالاتر می‌باشد.

۸-۲. کاربرد الگوی ترافشارشی در تعیین فراسنج‌های دگرشکلی پهنه برشی بهلگرد

الگوی ترافشارشی در تخمین فراسنج‌های واتنش افقی، الگویی موفق است که بر پایه حجم ثابت، عدم تغییر طول به موازات جهت برش و توزیع برش همگن در

همچنین نمودار گلسرخی سامانه‌های برشی که آرایه‌های رگه‌ای سیگموئیدال در آنها ایجاد شده‌اند به همراه مقدار واتنش برشی حداکثر و میانگین در شکل ۹- ب نشان داده شده است. فراوان‌ترین سامانه‌های برشی در راستای N220-230 آرایش یافته‌اند که میانگین واتنش برشی در آنها ۰/۳۸ می‌باشد. وضعیت قرارگیری این سامانه برشی نسبت به گسل بهلگرد بیانگر شکستگی‌های نوع (R') است که سازوکار راستگرد و ناهمسو با گسل اصلی دارد. رگه‌های اصلی که در راستای N220 قرار گرفته‌اند علاوه بر کشش تحت تأثیر این برش راست گرد نیز قرار گرفته‌اند (شکل ۸- الف). در پهنه برشی بهلگرد، سامانه‌های برشی چپگرد متعددی نیز ایجاد شده‌اند که جزو گسل‌های همسو با برش اصلی و از نوع (R) و (P) هستند و بیشترین مقادیر واتنش برشی (۱/۱) نتیجه فعالیت آنها در منطقه می‌باشد. این گسل‌ها در طی دگرشکلی پیش‌رونده پهنه برشی بهلگرد ایجاد شده‌اند بدین ترتیب که در گذر زمان گسل‌هایی با راستا و جهات برش مختلف

مقدار کوتاه‌شدگی در مقاطع عرضی عمود بر گسل بهلگرد با فراسنج کشیدگی پیمایشی (St) سنجیده می‌شود که عبارتست از:

$$S_t = \left((k^{-1})^2 + \gamma^2 \right)^{-0.5} = \left((1.18)^2 + (0.45)^2 \right)^{-0.5} = 0.79 \quad (19)$$

این مقدار نشان می‌دهد که در نتیجه واتنش برشی (به مقدار ۰/۴۵) در پهنه برشی بهلگرد، ۲۱٪ کوتاه‌شدگی در جهت عمود بر گسل بهلگرد ایجاد شده است. به‌طور کلی در پهنه ساختاری سیستان نیز میزان کوتاه‌شدگی در واحدهای رسوبی ائوسن با استفاده از گسلش و چین‌خوردگی در مقاطع متوازن شده برابر ۲۰-۲۲٪ به‌دست آمده است (احمدی کمیجانی، ۱۳۹۸). محور کشیدگی حداقل بیضی واتنش افقی (S_{Hmin}) ۰/۷۴ می‌باشد که مقدار ۲۶٪ کوتاه‌شدگی در جهت عمود بر محور چین را نشان می‌دهد و میزان آن از کوتاه‌شدگی در عرض پهنه برشی بهلگرد بیشتر است. هندسه ساختارهایی نظیر چین پوشاد و جهت‌گیری بیضی واتنش به درجه همگرایی پهنه برشی بهلگرد (R) ارتباط دارد:

$$R = \frac{1-k}{k\gamma} = \frac{1-0.85}{0.85 \times 0.45} = 0.39m \quad (20)$$

پهنه بنا شده است (Krantz, 1995). از آنجاکه جهت‌گیری ساختارها، انعکاسی از فراسنج‌های واتنش افقی می‌باشند در نقشه‌های زمین‌شناسی نیز قابل بررسی هستند. چین‌ها و روند گسل‌های معکوس موازی محور طویل و شکستگی‌های کششی و روند گسل‌های نرمال موازی با محور کوچک بیضی واتنش نهایی افقی جهت‌گیری می‌شوند. در پهنه برشی بهلگرد با استفاده از مقادیر γ و $k-1$ و روابط زیر فراسنج‌های بیضی واتنش نهایی در سطح افق محاسبه شده است (جدول ۳) (Krantz, 1995):

$$\theta' = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2\gamma}{(k^{-1})^2 + \gamma^2 - 1} \right) = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2 \times 0.45}{(1.18)^2 + (0.45)^2 - 1} \right) = 28^\circ \quad (16)$$

$$S_{Hmax} = (1 - \gamma \tan \theta')^{-0.5} = (1 - 0.45 \times \tan 28)^{-0.5} = 1.15 \quad (17)$$

$$S_{Hmin} = (1 + \gamma \cot \theta')^{-0.5} = (1 + 0.45 \times \cot 28)^{-0.5} = 0.74 \quad (18)$$

θ' : زاویه محور طویل بیضی واتنش افقی نسبت به دیواره برش و S_{Hmin} و S_{Hmax} بزرگی کشیدگی‌های اصلی افقی می‌باشند.

جدول ۳- مقادیر فراسنج‌های دگرشکلی در الگوهای پیشنهادی در پهنه برشی بهلگرد.

Model	γ_{mean}	Δ_{mean}	K_{mean}^{-1}	K_{mean}	θ'	S_{Hmax}	S_{Hmin}	R_{xz}	W_k	S_t	Shortening	R
Ramsay type	0.45	-0.26			20	1.19	0.63	1.88	0.73		%26	
Subsimple shear			1.18	0.85	21	1.32	0.76	1.74	0.81		%15	
Transpression		-0.28	1.18	0.85	28	1.15	0.74	1.55		0.79	%21	0.39

شواهدی از کاهش حجم (Volume loss) به صورت کلیوژهای تراکمی در جهت عمود بر بازشدگی رگه‌ها نیز وجود دارد (شکل ۸ ج-). از طرفی از لحاظ تئوری وجود دیواره‌های ناموازی پهنه برشی بهلگرد، مؤلفه برش محض را به‌دنبال خواهد داشت. در این‌صورت باریک‌شدگی عرض پهنه با ستبرشدگی محلی و ایجاد چین‌خوردگی و گسل‌های رانده‌گی در پهنه برشی بهلگرد به توازن خواهد رسید که در الگوی ترافشارشی و در سه بعد قابل بحث است. فراسنج‌های دگرشکلی به‌دست آمده در الگوهای پیشنهادی در پهنه برشی بهلگرد در جدول ۳ آمده است و در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. فراسنج‌های بیضی نهایی واتنش که در سطح افقی محاسبه شده‌اند در هر سه الگو مقادیر نسبتاً مشابهی را نشان می‌دهند. زاویه محور کشیدگی بیشینه نسبت به دیواره برش (θ') در الگوهای دو بعدی مشابه و با الگوی ترافشارشی تفاوت جزئی دارند. در الگوی ترافشارشی، تغییر مساحت ظاهری (ΔA) بیضی واتنش بر روی صفحه xy را می‌توان بر اساس ارتباط بین kx و ky به‌دست آورد (Baird and Hudleston, 2007):

$$k_y = k_x (1 + \Delta_{ap}) \rightarrow \Delta_{ap} = \frac{0.85}{1.18} - 1 = -0.28 \cong \Delta_{mean} \quad (21)$$

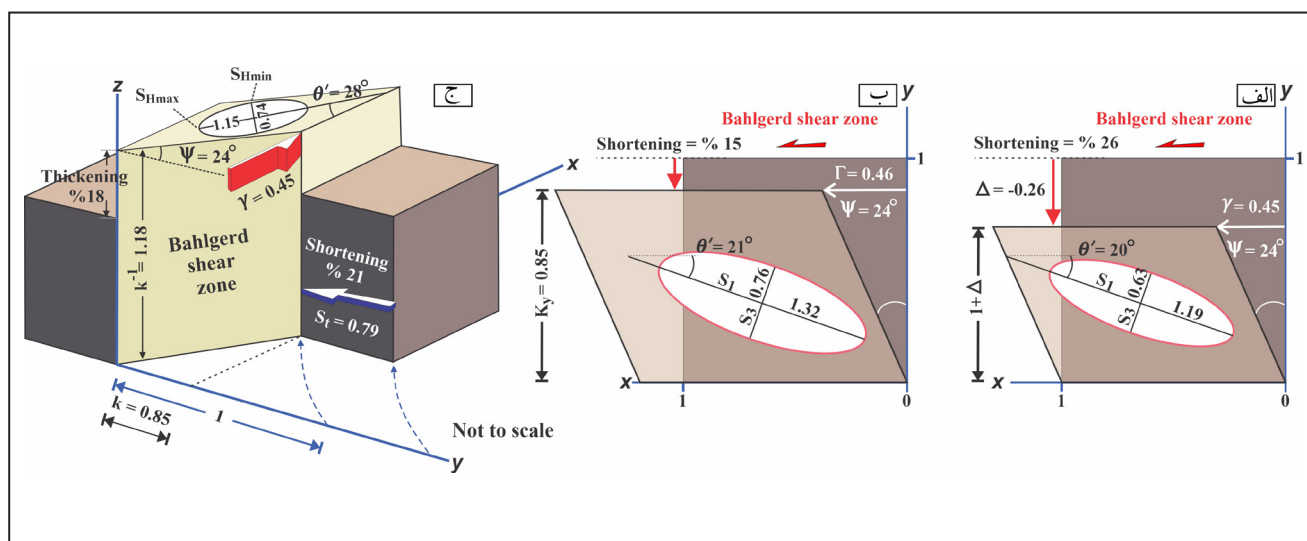
بنابراین در پهنه برشی بهلگرد مقدار کاهش مساحت ظاهری، ۰/۲۸ می‌باشد که به مقدار کاهش حجم (۰/۲۶) به‌دست آمده در الگوی برش ساده تراکمی نزدیک است. در اینجا یادآوری می‌شود که در الگوی ترافشارشی Sanderson and Marchini (1984) واتنش سه بعدی مطالعه می‌شود و تغییر مساحت ظاهری به‌دست آمده، تغییر سطح در صفحه‌ای افقی (دو بعدی) می‌باشد و این موضوع دلالت بر تغییر حجم پهنه ندارد چراکه در الگوی ترافشارشی حجم ثابت در نظر گرفته می‌شود.

K: فاکتور کشیدگی به موازات محور γ (عرض پهنه) و γ' : واتنش برشی با در نظر گرفتن مقدار ۰/۳۹ برای فراسنج همگرایی و بر اساس تقسیم‌بندی (Krantz, 1995)، پهنه برشی بهلگرد در رده پهنه‌های برشی با درجه همگرایی کم (Slightly convergent) قرار می‌گیرد.

۳-۸. مقایسه الگوهای دگرشکلی در پهنه برشی بهلگرد

در الگوی برشی کلاسیک Ramsay and Graham (1970)، برش ساده تنها سازوکار در شکل‌گیری پهنه برشی است و منجر به واتنش مستوی می‌شود. با این حال بررسی دقیق مناطق برشی نشان می‌دهد که در بسیاری موارد، دگرشکلی شامل همزمانی برش ساده، برش محض یا تغییر حجم نیز می‌شود. این تحقیق به دو الگو از الگوهای دگرشکلی دو بعدی اشاره دارد که متأثر از برش ساده به همراه برش محض یا تغییر حجم می‌باشد. اما به‌راستی کدامیک از این الگوها برای پهنه برشی بهلگرد مناسب‌تر است؟ چه شواهدی در انتخاب الگوی مناسب راهگشاست؟ در الگوی برش ساده حدواسط با فرض حجم ثابت، کشیدگی به موازات برش و کوتاه‌شدگی عمود بر آن اتفاق افتاده که باعث گریز مواد از پهنه برشی و باریک شدن عرض پهنه می‌شود. این الگو بیشتر در پهنه‌های برشی شکل‌پذیر مطرح است که گریز مواد و باریک‌شدگی عرض پهنه با اتساع حجمی یا بدون آن توسط (Baird and Hudleston, 2007) توضیح داده شده است.

اما در خصوص کاهش حجم می‌توان به شواهدی در پهنه برشی پوشاد استناد کرد. شکل ۶- ب نشان می‌دهد که داده‌ها در نمودار Flinn در محدوده پهن‌شدگی قرار گرفته‌اند که گویای عملکرد همزمان برش ساده و تراکم در منطقه است. همچنین زاویه محور طویل‌شدگی بیضی نهایی واتنش و گسل بهلگرد در الگوهای پیشنهادی کمتر از ۴۵ درجه (۲۰) است که از ویژگی‌های پهنه‌های برشی تراکمی می‌باشد.



شکل ۱۰- فراسنج‌های دگرشکلی در الگوهای پیشنهادی برای پهنه برشی بهلگرد؛ الف) الگوی برش ساده تراکمی؛ ب) الگوی برش ساده حدواسط؛ ج) الگوی سه بعدی ترافشارشی.

۸-۴. اثر ترافشارش بر ساختارها در پهنه برشی بهلگرد

از جمله چین‌های شاخص در پهنه برشی بهلگرد، ناودیس پوشاد است که در راستای شمال‌باختری- جنوب‌خاوری کشیده شده است و بین دو گسل بهلگرد و چشمه گزو محدود می‌شود (شکل ۲- ب). بردار میانگین قطب سطوح لایه‌بندی در یال شمالی چین، ۳۵۴، ۴۹ N و در یال جنوبی، ۳۱، ۳۴ N۰۳۴ به‌دست آمده است. با تحلیل قطب سطوح لایه‌بندی در یال‌های شمالی و جنوبی، محور چین N۱۵۲، ۳۹ و با تخمین اثر محوری چین از روی نقشه، سطح محوری آن N۱۴۵، ۷۵ SW تعیین شد که نشان می‌دهد سطح محوری چین به سمت جنوب باختری کج شده است (شکل ۲- الف). در پهنه‌های برشی ترافشارشی کوتاه‌شدگی افقی در عرض پهنه، محور چین‌ها را با زاویه اولیه کمتر از ۴۵ درجه نسبت به برش ساده آرایش می‌دهد که مقدار آن وابسته به مقادیر γ و K بوده و با محاسبه فراسنج واتنش جزئی (T_i) مطابق رابطه ۲۲ و نمودار شکل ۱۱- الف قابل پیش‌بینی است (Sanderson and Marchini, 1984).

$$T_i = \frac{\gamma}{1-k} = \frac{0.45}{1-0.85} = 3 \quad (22)$$

در پهنه برشی بهلگرد مقدار T_i برابر ۳ محاسبه شده است. بنابراین زاویه اولیه محور چین پوشاد با گسل بهلگرد با استفاده از شکل ۱۱- الف، ۳۶ درجه تخمین زده می‌شود. اما در روند توسعه پیش‌رونده پهنه‌های برشی ترافشارشی، با افزایش واتنش محور چین به سمت صفحه برش می‌چرخد و نتیجه کوتاه‌شدگی در عرض پهنه خواهد بود. مقدار این چرخش نیز به مقادیر γ و K وابسته است و مطابق رابطه زیر برای چین خوردگی پوشاد به‌دست می‌آید (Sanderson and Marchini, 1984):

$$\cot \theta' = k \cot \theta + \gamma = 0.85 \cot 36 + 0.45 \rightarrow \theta' \cong 32^\circ \quad (23)$$

(θ): زاویه محور طویل بیضی واتنش نسبت به دیواره برش در صفحه XY قبل از دگرشکلی و θ' بعد از دگرشکلی.

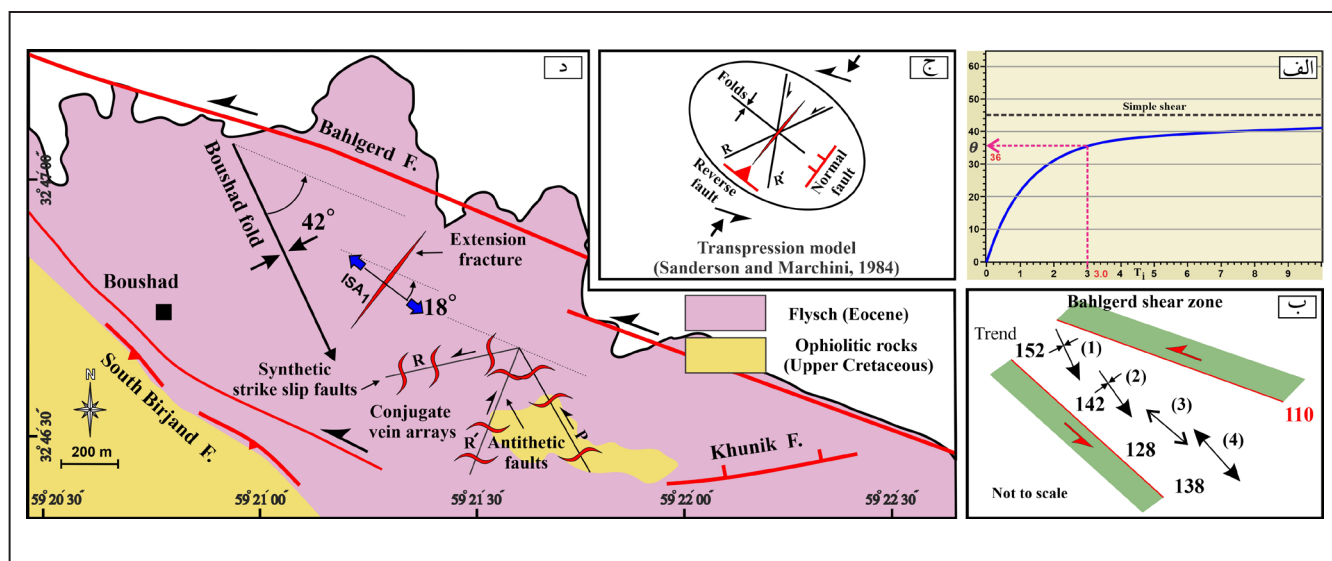
با در نظر گرفتن موقعیت هندسی گسل بهلگرد (N۱۱۰، ۸۰ NE)، پیش‌بینی می‌شود امروزه محور چین پوشاد، متأثر از برش ساده و برش محض در پهنه برشی بهلگرد، در روند N۱۴۲ جهت‌گیری شده باشد. تحلیل قطب سطوح لایه‌بندی در چین، محور چین پوشاد را N۱۵۲، ۳۹ معرفی می‌کند که اختلاف ۱۰ درجه‌ای با مقدار پیش‌بینی شده دارد. اما این روند همچنان با موقعیت سطح محوری چین (N۱۴۰، ۷۵ SW) می‌باشد. براساس یافته‌های (θ')، در الگوی برش ساده تراکمی روند محور ISA_۱، N۱۲۸ و در الگوی ترافشارشی N۱۳۸ است (شکل ۱۱- ب). با فرض اینکه محور چین به موازات محور ISA۱ جهت‌گیری می‌شود الگوی ترافشارشی در تحلیل

ساختارهای بزرگ مقیاس در منطقه الگویی موفق است (شکل ۱۱- ج). بر اساس الگوی ترافشارشی جایگاه ساختارها در پهنه برشی بهلگرد در شکل ۱۱- د نمایش داده شده است.

۹- نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری کمی واتنش برشی در پهنه برشی بهلگرد با انتخاب آرایه‌هایی از رگه‌های سیگموبیدال انجام شد و نشان داد که: الف) فراوان‌ترین سامانه‌های برشی که رگه‌های سیگموبیدال در آنها شکل گرفته‌اند، راستای N۲۲۰-۲۳۰ دارند همچنین میانگین واتنش برشی در راستای گسل‌های همسو با گسل بهلگرد بیشتر از گسل‌های ناهمسو است. ب) میانگین مقادیر واتنش برشی (γ)، تغییر حجم (Δ) و فراسنج کوتاه‌شدگی در عرض پهنه (K) به ترتیب ۰/۴۵، ۰/۲۶- و ۰/۸۵ به‌دست آمد. ج) در تبیین الگوی برش ساده تراکمی (Ramsay type) در منطقه که برش ساده با تغییر حجم همراه خواهد بود شواهدی از کاهش حجم وجود دارد که عبارتند از: پراکنش داده‌ها در محدوده پهن‌شدگی در نمودار Flinn، زاویه محور طویل‌شدگی بیضی نهایی واتنش و گسل بهلگرد (کمتر از ۴۵ درجه) و ایجاد کلیوهای تراکمی در جهت عمود بر بازشدگی رگه‌ها. د) در برآورد فراسنج‌های واتنش افقی با استفاده از الگوی ترافشارشی (Sanderson and Marchini, 1984) نتایج تفاوت ناچیزی با مقادیر به‌دست آمده از الگوی برش ساده تراکمی دارد. ه) بر پایه الگوی ترافشارشی میزان کوتاه‌شدگی واحدهای فلیش در منطقه ۲۱٪ و فراسنج همگرایی منطقه ۰/۳۹ محاسبه شده است.

در این نوشتار، از آنجا که آرایه‌های رگه‌ای سیگموبیدال در سطح واحدهای ماسه‌سنگی مطالعه شده‌اند، مقادیر تغییرات واتنش و تغییر حجم در سطح دو بعدی به‌دست می‌آیند. بنابراین از بین الگوهای بی‌شماری که در تفسیر دگرشکلی نهایی توسط محققین ارائه شده است به نمونه‌هایی اشاره شد که بتواند فراسنج‌های برش ساده (γ) به همراه برش محض (K) یا تغییر حجم (Δ) را در دو بعد پاسخگو باشد. در عین حال با این سطح از داده، مطالعه سه بعدی با استفاده از الگوی ترافشارش با فرض حجم ثابت امکان‌پذیر است. نتایج به‌دست آمده در پهنه برشی بهلگرد نشان می‌دهد که فراسنج‌های واتنش نهایی در این الگوها تا حدودی یکسان بوده و در توجیه نوع دگرشکلی و تفسیر ساختارها در نقشه (اطلاعات دو بعدی) کارآمد هستند. با وجود این ارائه الگویی که بتواند با استفاده از مطالعات واتنش در سه بعد، همزمانی برش ساده، برش محض و تغییر حجم را توجیه کند در پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود.



شکل ۱۱- الف) برآورد جهت‌گیری اولیه محور چین بوشاد (θ) با استفاده از فراسنج و آتشنش جزئی (Ti) برگرفته از (Sanderson and Marchini, 1984)؛ ب) طرحی از جهت‌گیری محور چین خوردگی و محور کشیدگی بیشینه در پهنه برشی بهلگرد. ۱) محور چین بوشاد، ۲) برآورد محور چین در الگوی ترافشارشی، ۳) روند محور ISA_1 در الگوی برش ساده تراکمی، ۴) روند محور ISA_1 در الگوی ترافشارشی؛ ج) جایگاه ساختارها بر اساس الگوی ترافشارشی (Sanderson and Marchini, 1984)؛ د) نقشه ساده شده پهنه برشی بهلگرد به همراه طرحی از ساختارهای درون پهنه.

کتابکاری

- احمدی کمبجانی، ن.، ۱۳۹۸ - تعیین رابطه بین رانش و کوتاه‌شدگی به کمک بازسازی حوضه، جهت تعیین میزان تغییرات نرخ همگرایی، دانشگاه بیرجند، رساله دکتری، ۲۲۰ ص.
- خطیب، م. م. و وزینکوب، م. ح.، ۱۳۸۳ - تحلیل هندسی و جنبشی برگواره‌ها و برگه‌های راندگی در افیولیت- ملانژ جنوب بیرجند، هشتمین همایش زمین‌شناسی ایران، شاهرود، انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه صنعتی شاهرود، <https://civilica.com/doc/18450>.
- خطیب، م. م.، ۱۳۶۸ - تحلیل ساختاری کوه‌های جنوب بیرجند، دانشگاه تربیت مدرس، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۱۸۸ ص.
- خلیل‌زاده بجند، ب.، ۱۳۸۶ - تحلیل هندسی و جنبشی پهنه برشی بوشاد (افیولیت ملانژ جنوب بیرجند)، دانشگاه بیرجند، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۱۵۴ ص.
- نعمی قصابان، ن.، خطیب، م. م.، قاسمی رزوه، ط.، نظری، ح. و هیهات، م. ر.، ۱۳۹۵ - تحلیل هندسی، جنبشی و تعیین متغیرهای آتشنش بر پایه رگه‌های کششی سیگموئیدال در پهنه برشی بوشاد، فصلنامه علوم زمین، شماره ۱۰۰، ص. ۳۷-۴۶. <https://www.magiran.com/paper/1577535>.
- یساقی، ع.، ۱۳۹۸ - مبانی دگرشکلی در زمین‌ساخت، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، ۴۰۵ ص. <http://pub.modares.ac.ir/article-1-69-fa.html>.

References

- Baird, G. B. and Hudleston, P., 2007- Modeling the influence of tectonic extrusion and volume loss on the geometry, displacement, vorticity, and strain compatibility of ductile shear zones. *Journal of Structural Geology*, Vol. 29, pp. 1665-1678, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2007.06.012>.
- Bhattacharyya, P. and Hudleston, P., 2001- Strain in ductile shear zones in the Caledonides of northern Sweden: a three-dimensional puzzle. *Journal of Structural Geology*, Vol. 23, pp. 1549-1565, [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(01\)00020-7](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(01)00020-7).
- Coward, M. P., 1976- Strain within ductile shear zones. *Tectonophysics*, Vol. 34, pp. 181-197, [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(76\)90095-0](https://doi.org/10.1016/0040-1951(76)90095-0).
- Davis, G.H., Reynolds, S.J. and Kluth, Ch.F., 2012- Structural geology of rocks and regions. J. Wiley and Sons press, 861 p. <https://ir1lib.org/dl/2054071/36c594>.
- Eftekhari Nezhad, J., Ohanian, T., Tatevosian, S., Manouchehri, M., Afaghi, A., Hosseini, Z., Qomashi, A., Afsharian Zadeh, A. and Etemadi, N., 1986- Geological Map of Birjand, Scale: 1:100,000, Geological Survey of Iran, Tehran, <http://dgc.mshdiau.ac.ir/images/download/geologymap/Downloadmap/birjand%20map.jpg>.
- Flinn, D. 1962- On folding during three-dimensional progressive deformation. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, Vol. 118, pp. 385-433, <https://doi.org/10.1144/gsjgs.118.1.0385>.

- Fossen, H. and Tikoff, B., 1998- Extended models of transpression and transtension, and application to tectonic settings. Geological Society, London, Special Publications, Vol. 135, pp. 15–33, [http://refhub.elsevier.com/S0012-8252\(17\)30027-2/rf0230](http://refhub.elsevier.com/S0012-8252(17)30027-2/rf0230).
- Fossen, H. and Tikoff, B., 1993- The deformation matrix for simultaneous simple shearing, pure shearing, and volume change, and its application to transpression/transtension tectonics. Journal of Structural Geology, Vol. 15, pp. 413–422, [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(93\)90137-Y](https://doi.org/10.1016/0191-8141(93)90137-Y).
- Krantz, R.W., 1995- The transpressional strain model applied to strike-slip, oblique-convergent and oblique-divergent deformation. Journal of Structural Geology, Vol. 17, pp. 1125–1127, [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(94\)00129-N](https://doi.org/10.1016/0191-8141(94)00129-N).
- Lisle, R. J., 2013- Shear zone deformation determined from sigmoidal tension gashes. Journal of Structural Geology, Vol. 50, pp. 35-43, <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.08.002>.
- Lister, G. S. and Snoke, A. W., 1984- S-C mylonites. Journal of Structural Geology, Vol. 6, pp. 617–638, [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(84\)90001-4](https://doi.org/10.1016/0191-8141(84)90001-4).
- Nicholson, R. and Pollard, D., 1985- Dilation and linkage of echelon cracks. Journal of Structural Geology, Vol. 7, pp. 583-590, [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(85\)90030-6](https://doi.org/10.1016/0191-8141(85)90030-6).
- Passchier, C.W., 1986- Flow in natural shear zones - the consequences of spinning flow regimes. Earth and Planetary Science Letters, Vol. 77, pp. 70–80, [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(86\)90133-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(86)90133-0).
- Ramberg, H., 1975- Particle paths, displacement and progressive strain applicable to rocks. Tectonophysics, Vol. 28, pp. 1–37, [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(75\)90058-X](https://doi.org/10.1016/0040-1951(75)90058-X).
- Ramsay, J. G. and Graham R.H., 1970- Strain variation in shear belts. Canadian Journal of Earth Sciences, Vol. 7, pp. 786-813, <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/e70-078>.
- Ramsay, J.G. and Huber, M.I., 1983- The techniques of modern structural geology. Volume1: Strain analysis. Academic Press, London, 307 p, <https://ir1lib.org/dl/3169418/63e0dd?dsouce=recommend>.
- Ramsay, J. G., 1980- Shear zone geometry: a review. Journal of Structural Geology, Vol. 2, pp. 83–99, [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(80\)90038-3](https://doi.org/10.1016/0191-8141(80)90038-3).
- Sanderson, D. and Marchini, R.D., 1984- Transpression. Journal of Structural Geology, Vol. 6, pp. 449–458, [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(84\)90058-0](https://doi.org/10.1016/0191-8141(84)90058-0).
- Sibson, R. H., 1977- Fault rocks and fault mechanisms. Journal of the Geological Society, Vol. 133, pp. 191–213, <https://doi.org/10.1144/gsjgs.133.3.0191>.
- Simpson, C. and De Paor, D. G., 1993- Strain and kinematic analysis in general shear zones. Journal of Structural Geology, Vol. 15, pp. 1-20, [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(93\)90075-L](https://doi.org/10.1016/0191-8141(93)90075-L).
- Tikoff, B. and Fossen, H., 1993- Simultaneous pure and simple shear: the unified deformation matrix. Tectonophysics, Vol. 217, pp. 267–283, [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(93\)90010-H](https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90010-H).
- Walker, R. and Khatib, M. M., 2006- Active faulting in the Birjand region of NE Iran: Tectonics, Vol. 25, TC4016, <https://doi.org/10.1029/2005TC001871>.
- Wilson, G. and Cosgrove, J. W., 1982- Introduction to Small-scale Geological Structures. Allen and Unwin, London. 128 p, <https://ir1lib.org/dl/2124123/1ff46a>.
- Zarrinkoub, M. H., Pang, K. N., Chung, S. L., Khatib, M. M., Mohammadi, S. S., Chiu, H. Y. and Lee, H. Y., 2012- Zircon U/Pb age and geochemical constraints on the origin of the Birjand ophiolite, Sistan suture zone, eastern Iran. Lithos, Vol. 154, pp. 392–405, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.08.007>.

Original Research Paper

Analysis of deformation models based on sigmoidal vein arrays in the Bahlgerd shear zone

M. A. Alimi¹*¹Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Faculty of Mining, Civil and Chemistry, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2021 March 22

Accepted: 2021 August 02

Available online: 2022 March 21

Keywords:

shear zone

strain

vein

transpression

ABSTRACT

The Bahlgerd shear zone in the northern margin of Bagheran Mountain is separated Eocene flysch from the Cretaceous ophiolite sequence and Quaternary sediments by southern Birjand and Bahlgerd faults. In the deformation evaluation of this zone, sigmoidal array arrays located in sandstone units have been used as strain markers. Based on the geometry of these arrays, the mathematical equations and $R-\theta'$ diagrams of the strain parameters were estimated. The mean values of shear strain (γ), volume change (Δ) and convergence across the zone (K) are 0.45, -0.26 and 0.85, respectively. The plotting strain ellipses on the logarithmic Flinn diagram are in the field of flattening, which indicates the simultaneous simple shear and compaction in the region and show a volume reduction of up to 30%. Also, in the Bahlgerd shear zone, the value of $\theta' > 45^\circ$ and cleavages are created in the direction perpendicular to the opening of the veins, which conforms to the characteristics of the compactional simple shear model. The horizontal strain parameters in the transpression model have similar values the compactional simple shear model. Based on the calculated convergence parameter (0.39), Behlgard shear zone is in the category of slightly convergence zones in which the amount of shortening is estimated at 21%. The trend of the ISA1 axis is in the N138 transpression model, which is aligned with the orientation of the Bushad fold axis. This model is also successful in analyzing small-scale structures in the model region.

* Corresponding author: Mohammad Amir Alimi; E-mail: malimi@birjandut.ac.ir

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/GSJ.2021.277344.1895 dor: 20.1001.1.10237429.1401.32.1.8.8