

تحلیل واتنش پایدار و برآورد تاوایی در سنگ‌های دگرگون اطراف مشهد

صبا دشتی چندانق^۱، محمدرضا شیخ‌الاسلامی^۲ و جعفر طاهری^۳

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

^۲دانشیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

^۳دکتر، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، مدیریت زمین‌شناسی شمال خاور، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۱۳

چکیده

این پژوهش به منظور بررسی دگرشکلی اعمال شده بر سنگ‌های دگرگون مشهد، طی همگرایی صفحات توران و ایران مرکزی و بسته شدن اقیانوس تتیس کهن و ایجاد رویداد سیمین پیشین انجام شده است. نتایج حاصل از تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی واتنش پایدار نشان می‌دهد که بیشینه دگرشکلی در بخش مرکزی ناحیه روی داده و متغیر شکل بیضوی واتنش که بر پایه نمودار فلین و از روی نمونه‌های جهت دار به دست آمده است؛ بیشتر در ناحیه پخ‌شدگی قرار دارد ($K \leq 1$). متغیر شدت واتنش در بیشتر نمونه‌ها کمتر از ۰/۵ و واتنش بیشینه در بخش‌های مرکزی ناحیه روی داده و به سوی حاشیه کاهش می‌یابد. این ویژگی از نشانه‌های آشکار بیشتر پهنه‌های برشی است که در آنها واتنش بیشینه در بخش‌های مرکزی تمرکز می‌یابد. عدد تاوایی به دست آمده میان ۰/۲ تا ۱ است که نشان‌دهنده حضور مؤلفه برش ساده و برش محض در جریان دگرشکلی ترفشارشی است.

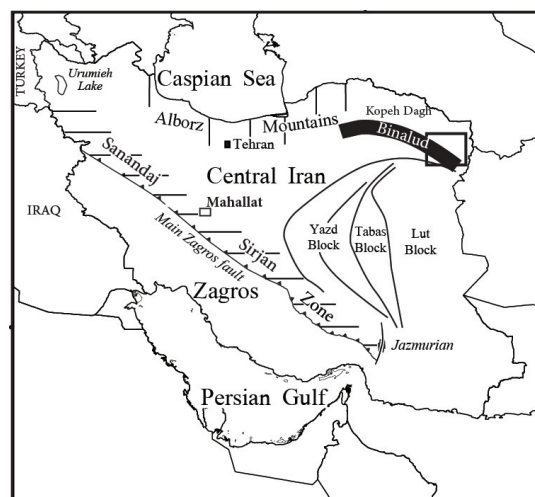
کلیدواژه‌ها: بینالود، دگرشکلی، واتنش، تاوایی.

***نویسنده مسئول:** محمدرضا شیخ‌الاسلامی

E-mail: rezasheikhholeslami@yahoo.com

۱- پیش‌نوشتار

کوه‌های بینالود در شمال خاور ایران با راستای شمال باختری - جنوب خاوری میان پهنه کپه‌داغ در شمال و پهنه ایران مرکزی در جنوب جای گرفته‌اند (شکل ۱). محل خط درز اقیانوس تتیس کهن در بخش خاوری این ناحیه و شامل توالی به نسبت ستبری از سنگ‌های رسوبی، دگرگونی و آذرین است (Sheikhholeslami and Kouhpeyma, 2012).



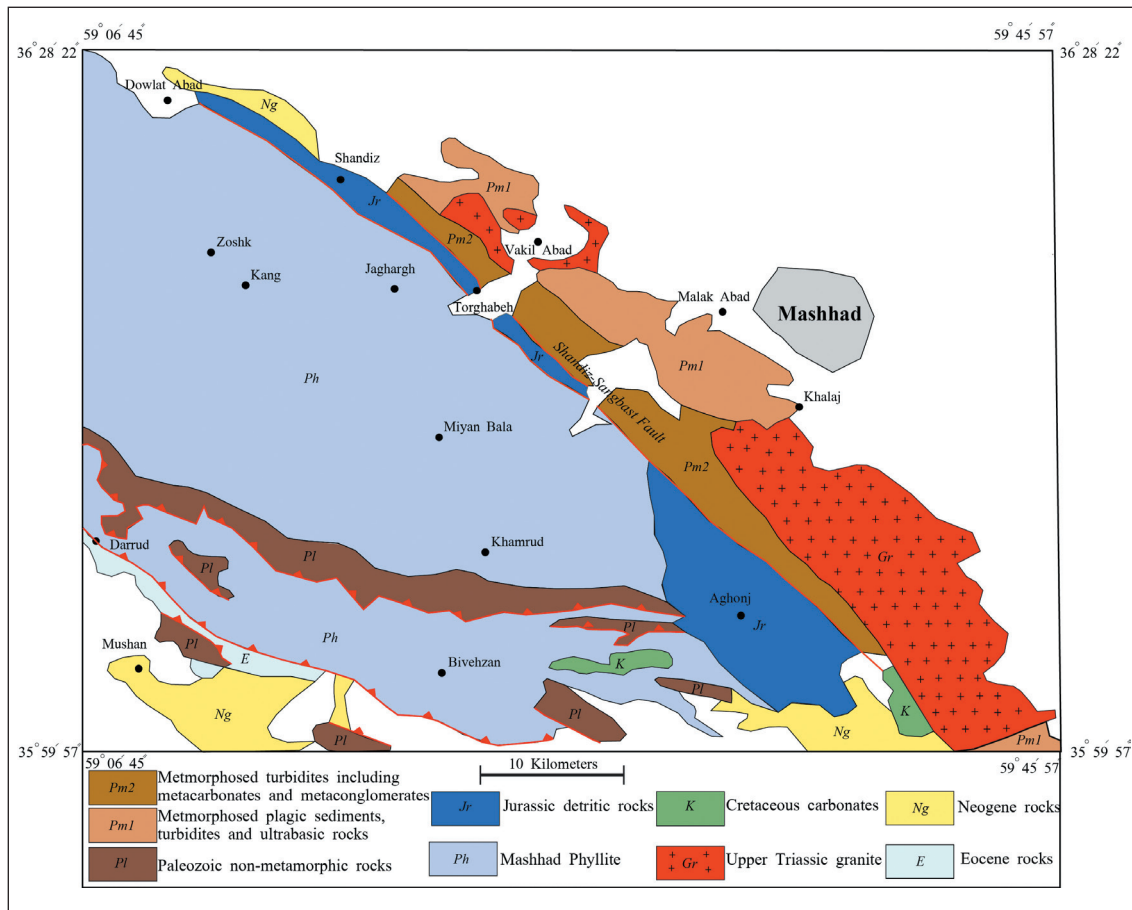
شکل ۱- موقعیت کوه‌های بینالود و ناحیه مورد بررسی (مستطیل تو خالی) در شمال خاور ایران.

این گوه افزایشی سبب دگرشکلی و دگرگونی ناحیه‌ای طی رویداد سیمین پیشین شده است (Sheikhholeslami and Kouhpeyma, 2012; Alavi, 1991). به منظور پی بردن به ویژگی دگرشکلی اعمال شده طی این رویداد، بررسی واتنش نهایی و تحلیل تاوایی روی سنگ‌های دگرشکل و دگرگون این ناحیه صورت گرفته است. با استفاده از این مطالعات می‌توان اطلاعات ارزشمندی در زمینه دگرشکلی ناحیه‌ای به دست آورد. جهت‌یابی و پراکنندگی محور بزرگ نشانگرهای واتنش در سنگ‌های دگرشکل اطلاعاتی دارند که با استفاده از آنها می‌توان کمیت‌های مربوط به واتنش شامل شکل بیضوی واتنش (K) و نیز شدت واتنش (D) را به دست آورد. با استفاده از بررسی‌های تاوایی و محاسبه میزان چرخش مواد هنگام دگرشکلی نیز می‌توان به نسبت برش محض و برش ساده اعمال شده در جریان دگرشکلی ناحیه‌ای پی برد. در این پژوهش ابتدا با استفاده از بررسی نشانگرهای واتنش به روش فرای در سنگ‌های دگرگون ناحیه، واتنش دوبعدی و سه‌بعدی تحلیل و سپس با بهره‌گیری از روش Rx/θ عدد کینماتیک تاوایی و نسبت برش محض به برش ساده برآورد شده است.

۲- زمین‌شناسی ناحیه‌ای

گستره مورد مطالعه در این پژوهش در بخش خاوری کوه‌های بینالود قرار دارد. این منطقه، دربردارنده بخش جنوب باختری برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ مشهد و بخش جنوب خاوری برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ طرجه است که میان طول‌های جغرافیایی $25^{\circ} 6' 59''$ تا $25^{\circ} 45' 57''$ و عرض‌های جغرافیایی $57^{\circ} 59' 35''$ تا $22' 28' 36''$ جای دارد. رشته کوه بینالود در محدوده چهارگوش مشهد از سنگ‌های دگرگون شده رسوبی و آذرین به سن پالئوزویک پسین تشکیل شده و توده‌های گرانیتیویدی در آن نفوذ کرده‌اند. این مجموعه در راستای گسله شان‌دیز - سنگ بست روی رسوبات تخریبی ژوراسیک شامل ماسه‌سنگ، شیل و کنگلومرا رانده شده است. این رسوبات تخریبی نیز خود روی مجموعه کم دگرگون فیلیت مشهد شامل اسلیت، ماسه‌سنگ و فیلیت رانده شده‌اند (شکل ۲). مجموعه سنگ‌های پالئوزویک شامل ماسه‌سنگ‌های لالون، سنگ‌های کربناته سازند میلا، سنگ‌های آتشفشانی به سن اردوویسین و سیلورین و رسوبات تخریبی و کربناته معادل سازندهای سبزار و بهرام به‌صورت ورقه‌های راندگی در میان بخش مرکزی بینالود خاوری و در میان مجموعه فیلیتی مشهد رخنمون یافته‌اند (Alavi, 1991).

این توالی شامل سنگ‌های بازیک و اولترابازیک و نیز سنگ‌های رسوبی دگرگونی به سن پیش از تریاس پسین هستند. رسوبات این ناحیه از نوع رسوبات حاشیه‌ای و فلیش‌های ناحیه گودال اقیانوسی هستند که روی یک حاشیه فعال در زمان پرمین شکل گرفته‌اند (Sheikhholeslami and Kouhpeyma, 2012; Alavi, 1991). توالی فلیشی در این ناحیه شامل توربیدایت‌های پرکننده درازگودال به همراه کنگلومراها و اولیستوستروم‌های کربناتی است. این توالی به همراه سنگ‌های اولترابازیک یک گوه افزایشی را تشکیل داده‌اند (Alavi, 1991). همگرایی ایجاد شده در جریان شکل‌گیری



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی ناحیه مورد مطالعه. ساده شده بر پایه آقنابتی و همکاران (۱۳۶۵).

۴- تحلیل دوبعدی واتنش

در این پژوهش از میان روش‌های موجود برای تحلیل دوبعدی، روش فرای برای تحلیل دوبعدی بیضوی واتنش استفاده شده است. برتری این روش نسبت به دیگر روش‌ها در سریع و ساده بودن آن است (Ramsay and Huber, 1983). این روش شامل تحلیل واتنش به روش مرکز به مرکز نزدیک‌ترین همسایه است. به‌طور کلی فرای برای تعیین شکل و نسبت بیضی واتنش در سنگی که از دانه‌های دگرریخت تشکیل شده است؛ به کار می‌رود. به منظور استفاده از این روش، به حضور جمعی از ذرات شامل دانه‌های کوآرتز و کلسیت با اندازه‌های کم و بیش یکسان در مقاطع نازک جهت‌دار نیاز است. گفتنی است که این دانه‌ها باید پیش از دگرشکلی در سنگ حضور داشته باشند تا بتوانند نشانگر واتنش اعمال شده به سنگ در آن مرحله از دگرشکلی باشند. برای تحلیل واتنش دوبعدی ابتدا مقاطع نازک از نمونه‌های جهت‌دار در راستای XX (موازی خطوارگی) و YZ (عمود بر خطوارگی) تهیه شد و سپس نسبت واتنش یعنی نسبت قطر بزرگ دانه‌های دگرشکل به قطر کوچک آنها برای هر کدام از این مقاطع نازک تعیین شد (جدول ۱).

با استفاده از بیضوی‌های واتنش دوبعدی که برای صفحه‌ی XY به دست آمده است؛ می‌توان نقشه واتنش دوبعدی را برای منطقه مورد مطالعه رسم کرد. این نقشه نشان‌دهنده توزیع شدت واتنش در بخش‌های مختلف منطقه است (شکل ۳).

۵- تحلیل سه‌بعدی واتنش

به منظور بررسی دقیق‌تر واتنش اعمال شده بر منطقه، تلاش شد تا واتنش اعمالی بر منطقه در سه بعد نیز بررسی شود. برای نمایش واتنش سه‌بعدی به‌طور عمومی

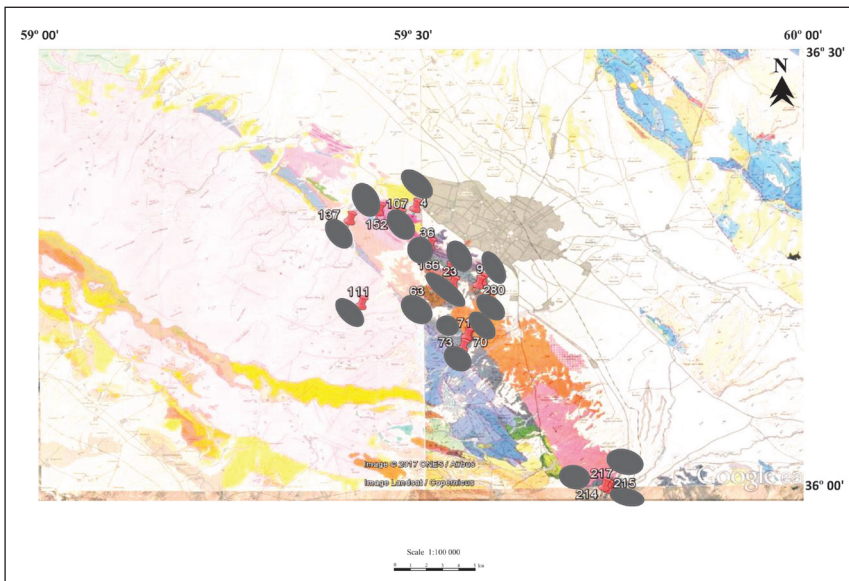
در بخش جنوبی بینالود خاوری، سازندهای پالئوزوئیک و مجموعه فیلیت مشهد در امتداد سامانه‌های گسلی با راستای شمال باختری- جنوب خاوری روی رسوبات دوران سوم و نیز نهشته‌های جوان کوآرتزری رانده شده و پهنه‌ای با توان لرزه‌ای پدید آورده‌اند (شیخ‌الاسلامی و همکاران، ۱۳۹۲؛ شکل ۲).

۳- توالی مرحله‌های دگرشکلی ناحیه‌ای

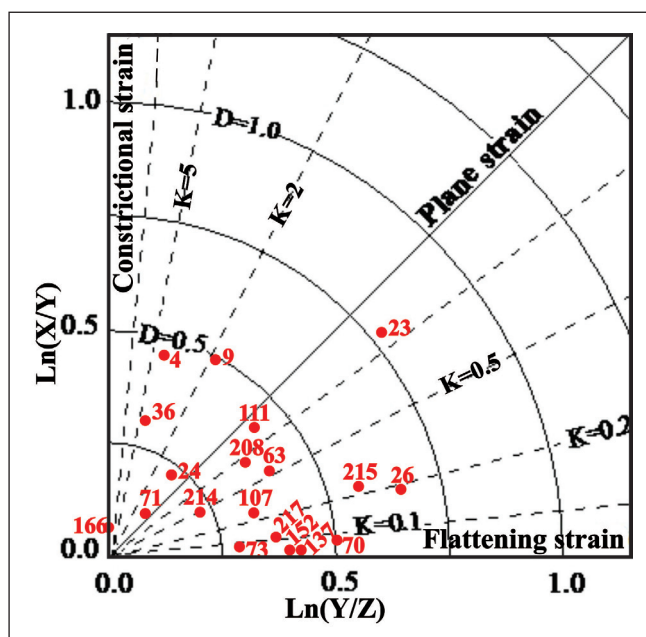
بررسی روابط ساختاری در واحدهای مختلف سنگی نشان می‌دهد که سنگ‌های ناحیه تحت اثر ۵ مرحله دگرشکلی قرار گرفته‌اند. مرحله‌های D_1 تا D_3 به‌صورت یک رویداد چندگانه پیش‌رونده و در یک بازه زمانی پیوسته در شرایط به‌طور کامل شکل‌پذیر (Ductile) روی داده‌اند (Sheikholeslami and Koupeyma, 2012). برگوارگی‌های نسل اول (S_1)، دوم (S_2) و سوم (S_3) به ترتیب توسط این مرحله‌های دگرشکل ایجاد شده‌اند. برگوارگی S_2 برگوارگی نافذتری است و در بخش‌های با شدت دگرگونی در حد رخساره آمفیبولیت به‌صورت برگوارگی میلوبیتی حضور دارد. به دنبال این مرحله‌ها، یک دوره فرسایشی بر سنگ‌های این منطقه اعمال شده و پس از آن مرحله D_4 در شرایط دگرشکلی شکل‌پذیر- شکننده (Brittle-Ductile) رخ داده است. این مرحله نسبت به مرحله‌های دگرشکلی پیشین، شدت کمتری داشته و سبب چین‌خوردگی رسوبات اولیه و ایجاد یک برگوارگی سطح محوری نافذ در فیلیت‌های مشهد شده است. مرحله D_5 که آخرین مرحله دگرشکلی است، در شرایط شکننده (Brittle) روی داده و طی آن گسل‌های رانده‌گی در بخش‌های جنوبی و مرکزی پهنه بینالود خاوری ایجاد شده‌اند (شیخ‌الاسلامی و همکاران، ۱۳۹۲؛ کوه‌پیمان، ۱۳۸۵؛ شکل ۲).

جدول ۱- نسبت های وانتش در صفحات XY و XZ، YZ بیضوی وانتش که بر پایه روش فرای به دست آمده است. نسبت وانتش سطح XY نیز بر حسب رابطه های ریاضی به دست آمده است.

Sample	(X/Z)	(Y/Z)	X/Y
4	1.9	1.19	1.59
9	1.99	1.28	1.55
23	3.01	1.83	1.64
24	1.35	1.14	1.18
26	2.22	1.9	1.16
36	1.45	1.08	1.34
63	1.72	1.43	1.20
70	1.73	1.65	1.04
71	1.18	1.08	1.09
73	1.4	1.33	1.05
107	1.52	1.38	1.10
111	1.81	1.38	1.31
137	1.56	1.53	1.01
152	1.53	1.5	1.02
166	1.07	1	1.07
208	1.66	1.34	1.23
214	1.34	1.22	1.09
215	2.11	1.8	1.17
217	1.52	1.46	1.04



شکل ۳- نقشه ی توزیع وانتش دوبعدی (صفحه XZ بیضوی وانتش) منطقه مورد مطالعه (نقشه های زمین شناسی پایه از طاهری و قائمی، ۱۳۷۶ و علوی و همکاران، ۱۳۷۷).



شکل ۴- نمودار فلین مربوط به نمونه های جهت دار منطقه مورد مطالعه. محل نمونه ها در شکل ۳ نمایش داده شده است.

D نشان دهنده تمرکز بیشینه شدت وانتش در بخش های مرکزی و نیز کاهش شدت وانتش در بخش های حاشیه ای است (شکل ۶). نقشه منحنی میزان مربوط به متغیر V در منطقه مورد مطالعه نشان دهنده کشیدگی در بخش مرکزی سنگ های دگرگون پالئوزوییک و پهن شدگی در بخش های شمالی و جنوبی این مناطق است (شکل ۷). در این مناطق ساختارهای صفحه ای گسترش کمتری می یابند و جای خود را به سنگ هایی می دهند که ساختارهای خطی در آنها گسترش بیشتری دارند (L-Tectonites).

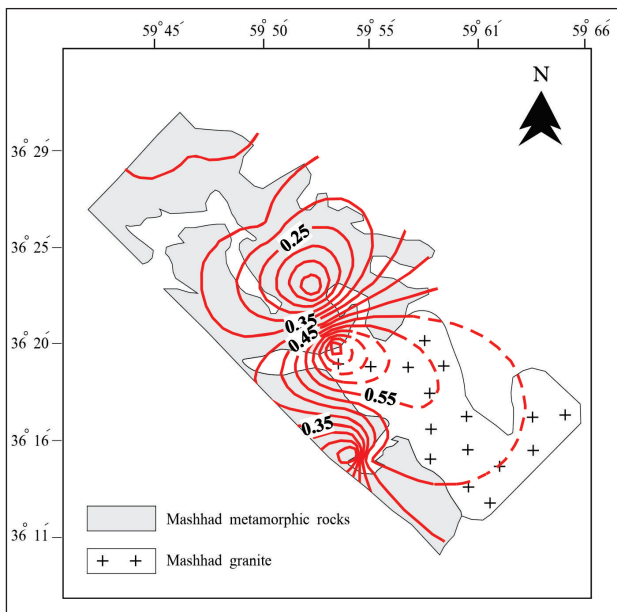
۶- تحلیل تاوایی (vorticity analysis)

دگرشکلی طبیعی به طور معمول درون پهنه های برش با پهنای چند سانتی متر تا چند کیلومتر متمرکز می شود. بررسی کینماتیک جریان در این پهنه ها با بررسی بافت و ساختار سنگ های دگرشکل امکان پذیر است. تحلیل کمی تاوایی در سنگ های با

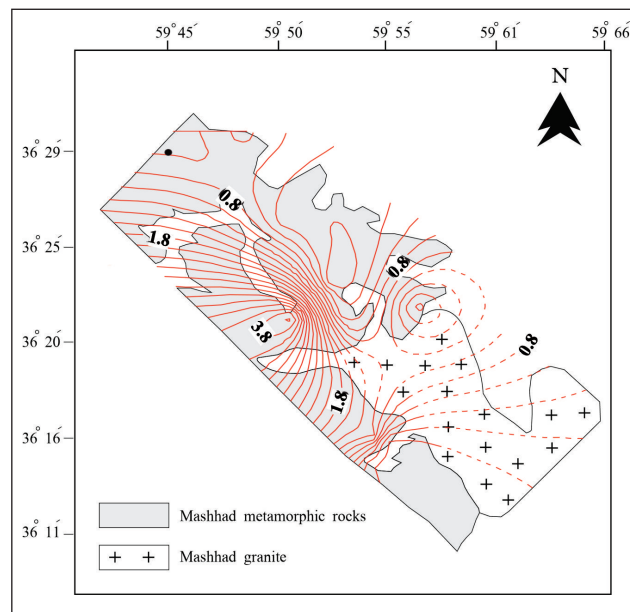
از نمودار فلین استفاده می شود که روشی ساده برای بررسی و تحلیل شکل بیضوی وانتش است. در این نمودار لگاریتم طبیعی نسبت بیضوی وانتش در صفحه YZ روی محور افقی و لگاریتم طبیعی نسبت بیضوی وانتش در صفحه XY روی محور عمودی نمایش داده می شود. این نمودار دربردارنده نسبتی به نام K (شکل بیضوی وانتش) است که از تقسیم دو نسبت ذکر شده حاصل می شود. روی محور افقی این نمودار K=0 و روی محور عمودی آن K=∞ است. همچنین خطی که با زاویه ۴۵ درجه در میان این دو محور قرار می گیرد؛ منطبق با K=1 است و بیضوی های وانتش با شکل دراز (prolate) را که گاه به آنها بیضوی های دوکی یا سیگاری شکل هم گفته می شود؛ از بیضوی های وانتش با شکل پخ (oblate) که به آنها بیضوی های کلوچه ای شکل نیز گفته می شود؛ جدا می کند. همه وانتش های صفحه ای مانند بیضوی های حاصل از برش ساده روی این خط جای می گیرند. روی این نمودار افزون بر متغیر K، متغیر D را نیز می توان به دست آورد. با محاسبه این متغیر می توان شدت وانتش را در نقاط مختلف منطقه بررسی کرد. با استفاده از داده های جدول یک مقادیر نسبت وانتش در صفحات X/Y و Y/Z مربوط به هر کدام از نمونه ها روی نمودار فلین پیاده شد (شکل ۴).

با استفاده از نمودار فلین مقادیر K و D برای نمونه های جهت دار ناحیه به دست آمد که در جدول ۲ آورده شده اند.

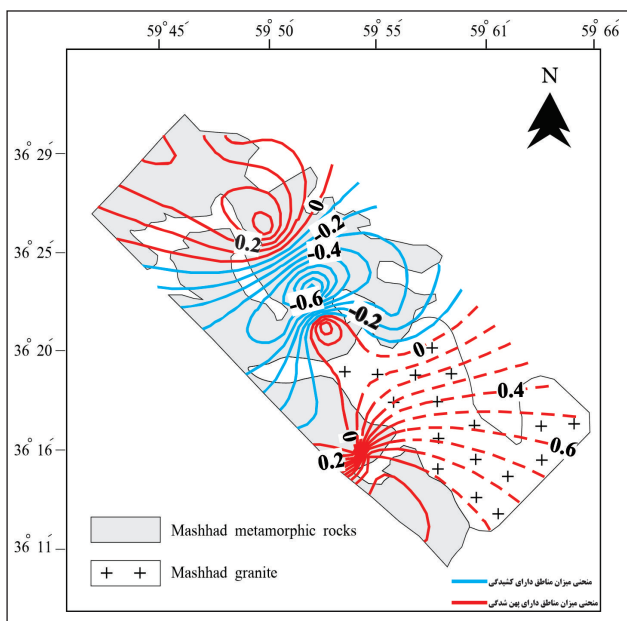
مقدار V (متغیر لود) نیز با استفاده از رابطه ۱ برآورد شده است. مقادیر منفی این متغیر نشان دهنده کشیدگی چیره و مقادیر مثبت نشان دهنده پهن شدگی چیره هستند.
$$V = \frac{1-k}{1+k} \quad (1)$$
 به منظور نمایش ویژگی های دگرشکلی ناحیه ای برای هر یک از متغیرهای سه گانه به دست آمده، نقشه های منحنی میزان آنها برای بخشی از سنگ های دگرگون شده پالئوزوییک رسم شده که تمرکز نمونه گیری در آنها بالاست (شکل های ۵ تا ۷). نقشه منحنی میزان مربوط به متغیر K در منطقه مورد بررسی نشان می دهد که بیشتر ناحیه در محدوده $K < 1$ جای دارد (شکل ۵). نقشه منحنی میزان مربوط به متغیر



شکل ۶- نقشه منحنی میزان مربوط به متغیر D در منطقه مورد مطالعه که نشان‌دهنده واتنش بیشینه در بخش‌های مرکزی و کاهش شدت واتنش در بخش‌های حاشیه‌ای است.



شکل ۵- نقشه منحنی میزان مربوط به متغیر K در سنگ‌های دگرگون پالئوزویک (بخش‌های خاکستری و تیره رنگ) که نشان می‌دهد بیشتر ناحیه در محدوده $K \leq 1$ قرار دارد.



شکل ۷- نقشه منحنی میزان مربوط به متغیر V در منطقه مورد مطالعه که نشان‌دهنده کشیدگی در بخش مرکزی منطقه مورد مطالعه و پهن‌شدگی در بخش‌های شمال باختری و جنوب خاوری است.

جدول ۲- مقادیر K و D به دست آمده برای نمونه‌های مورد بررسی.

Sample	K	D	V
4	4	0.47	-0.6
9	1.9	0.5	-0.31
23	0.85	0.8	0.08
24	1.5	0.23	-0.2
26	0.25	0.65	0.6
36	4.1	0.33	-0.60
63	0.55	0.4	0.29
70	0.075	0.5	0.86
71	1.2	0.125	-0.09
73	0.07	0.3	0.86
107	0.35	0.35	0.48
111	0.9	0.42	0.05
137	0.5	0.42	0.33
152	0.5	0.4	0.33
166	∞	0.042	-1
208	0.7	0.375	0.17
214	0.5	0.225	0.33
215	0.33	0.57	0.50
217	0.13	0.375	0.76

ورگه‌های کششی و استیلولیت‌ها، در این پژوهش از برگوارگی ماکروسکوپی با روش Rxz/θ برای برآورد تاوایی استفاده است.

۷- تعیین عدد تاوایی با استفاده از روش Rxz/θ

در پهنه‌های برشی تک‌شیب، برگوارگی ماکروسکوپی، به‌طور معمول صفحه اصلی XZ بیضوی واتنش پایدار را مشخص می‌کند. در شرایط جریان با حجم ثابت، ارتباط زاویه‌ای برگوارگی ثابت (زاویه θ) با مرز پهنه برش برای مقادیر مشخص Rxz و Wm ثابت است (Fossen and Tikoff, 1993; Tikoff and Fossen, 1995). از این رو اگر مقادیر Rxz و زاویه θ مشخص باشند؛ می‌توان با استفاده از فرمول زیر و یا نمودار ترسیمی نسبت واتنش

دگرشکلی طبیعی برای مطالعه جنبش‌شناسی جریان در پهنه‌های برش ضروری است و می‌توان آن را با روش‌های مختلف برآورد کرد (Xypolias, 2010).

تاوایی، میزان ناهم‌محوری دگرشکلی و به عبارت دیگر نسبت برش ساده به برش محض مؤثر بر دگرشکلی را بیان می‌کند (Sarkarnejad and Azizi, 2008). تحلیل تاوایی از روش‌های نوین و ارزشمند است که پاسخگوی ابهامات موجود در مطالعات ساختاری و زمین‌ساختی است. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری تاوایی در سنگ‌ها وجود دارد که مهم‌ترین این روش‌ها عبارتند از: دسته دایک‌ها یا رگه‌های دگرریخت شده، پورفیروکلاست‌های سخت، پورفیروبلست‌ها، فابریک‌های محور C کوآرتز، برگوارگی ماکروسکوپی (روش Rxz/θ)، برگوارگی مایل، باند برش

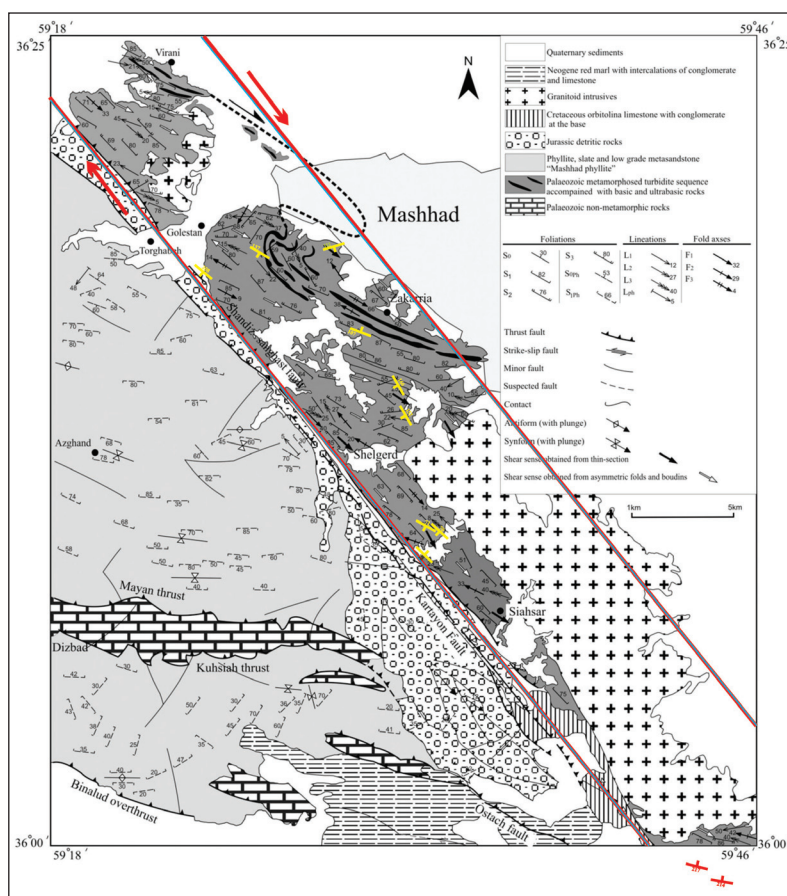
ناحیه‌ای قابل استنباط است (شکل ۸). با اندازه‌گیری زاویه θ یعنی زاویه‌ای که راستای برگوارگی در محل هر نمونه با این پهنه می‌سازد (جدول ۳) و نیز با داشتن مقدار R_{xz} (نسبت بیضوی واتنش در صفحه XZ) که از تحلیل دوبعدی مقاطع به دست آمده است (جدول یک)؛ مقدار تاوایی برای هر نمونه با استفاده از نمودار (Tikoff and Fossen, 1995) به دست می‌آید (شکل ۹).

مقادیر عدد تاوایی (Wk) به دست آمده برای نمونه‌ها، اعدادی میان ۰/۲ تا ۱ است (جدول ۴). این اعداد نشان می‌دهند که ناحیه مورد بررسی تحت اثر هر دو نوع برش ساده و محض قرار داشته است. این یافته با نتایج تحلیل‌های ساختاری ارائه شده توسط (Sheikholeslami and Kouhpeyma, 2012) همخوانی دارد که دگرشکلی اعمال شده بر ناحیه را حاصل یک رژیم ترفاشاری می‌دانند.

در صفحه XZ در برابر زاویه θ مقدار تاوایی را به دست آورد (Xypolias, 2010).

$$W_m = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{1 - R_{xz} \tan^2 \theta}{(1 + R_{xz}) \tan \theta} \right) \right] \quad (2)$$
 برای محاسبه عدد تاوایی دگرشکلی با استفاده از روش R_{xz}/θ در ابتدا نیاز به تعیین وضعیت پهنه برش ناحیه‌ای است. در منطقه مورد مطالعه پهنه برشی در برگیرنده سنگ‌های دگرگونی پالتوزویک (واحد‌های Pm1 و Pm2 در شکل ۲) با راستای شمال باختر- جنوب خاور که توسط (Sheikholeslami and Kouhpeyma, 2012) به عنوان پهنه برشی اصلی با مؤلفه ترفاشاری راست بر معرفی شده؛ به عنوان پهنه برشی ناحیه‌ای برای محاسبه عدد تاوایی در نظر گرفته شده است (شکل ۸). مرز پایینی این پهنه منطبق با گسل شاندیز- سنگ‌بست و مرز بالایی آن منطبق با خطواره شمال باختری- جنوب خاوری است که سوی برش راست بر آن از روی چین‌های

شکل ۸- پهنه برشی راست بر شمال باختری- جنوب خاوری که به عنوان پهنه برش ناحیه‌ای برای محاسبه زاویه θ در نظر گرفته شده است. راستا و شیب برگوارگی‌ها در محلی که نسبت بیضوی واتنش برای آنها از روی نمونه‌های جهت‌دار به دست آمده با رنگ زرد نشان داده شده است. نقشه ساختاری از (Sheikholeslami and Kouhpeyma, 2012).

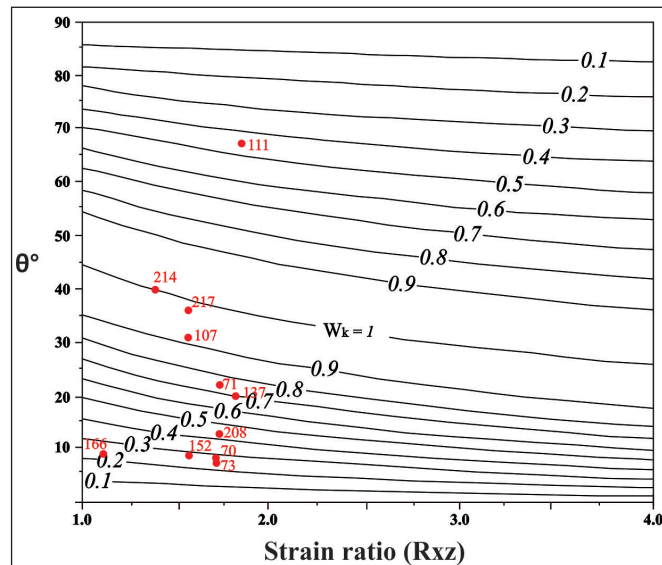


جدول ۴- عدد تاوایی به دست آمده برای هر نمونه بر پایه نمودار (Tikoff and Fossen, 1995).

Sample	Wk
70	0.3
71	0.75
73	0.25
107	0.91
111	0.45
137	0.7
152	0.28
166	0.22
208	0.43
214	1
217	0.97

جدول ۳- مقادیر برگوارگی اندازه‌گیری شده و محاسبه زاویه آن با پهنه برشی ناحیه‌ای. این زاویه‌ها به همراه نسبت بیضوی واتنش در صفحه XZ برای محاسبه عدد تاوایی استفاده شده‌اند.

Sample	Foliation	θ
70	225/72	8
71	210/50	22
73	047/29	7
107	020/85	31
111	165/44	67
137	212/66	20
152	240/30	8
166	240/30	8
208	220/67	12
214	011/60	40
217	015/62	36



شکل ۹- مقادیر عدد تاوایی با استفاده از نمودار نسبت واتنش در صفحه ی XZ در برابر زاویه برگواری ماکروسکوپی و پهنه برش ناحیه‌ای (Tikoff and Fossen, 1995).

۸- نتیجه گیری

دگرشکلی با مؤلفه چیره برش محض احتمالاً در اثر همگرایی میان صفحه توران با ایران مرکزی و تا پیش از بسته شدن کامل اقیانوس تیس کهن روی داده است. این دگرشکلی که حاصل فشردگی و کشیدگی لایه‌هاست سبب شکل‌گیری چین‌های به نسبت بسته و برگواری سطح محوری شده است. به دنبال بسته شدن اقیانوس تیس کهن مرحله دیگری از دگرشکلی ناحیه‌ای با فعال شدن پهنه‌های برشی با راستای شمال باختر- جنوب خاور و با مؤلفه چیره برش ساده در یک رژیم ترفشارشی شکل گرفته است. ساختارهای مربوط به این مرحله که بیشتر از نوع ساختارهای میونیتی هستند؛ روی ساختارهای شکل گرفته در مرحله پیشین فرانهاده شده‌اند.

توزیع واتنش دوبعدی نشان می‌دهد که دگرشکلی بیشینه در بخش مرکزی ناحیه مورد بررسی تمرکز دارد. همچنین تحلیل سه‌بعدی واتنش نشان می‌دهد که مقدار K یا شکل بیضوی واتنش برای بیشتر نمونه‌های مورد بررسی کمتر از ۱ و در محدوده پخش‌شدگی است. متغیر D (شدت واتنش) در بیشتر نمونه‌ها کمتر از ۰/۵ است؛ ولی بیشینه آن تا ۰/۷۵ نیز می‌رسد. بر پایه نقشه منحنی میزان متغیر D ، واتنش بیشینه در بخش‌های مرکزی ناحیه روی داده است و به سوی حاشیه کاهش می‌یابد. این ویژگی، خاص بیشتر پهنه‌های برشی است که در آنها واتنش بیشینه در بخش‌های مرکزی تمرکز می‌یابد. تحلیل تاوایی در منطقه مورد مطالعه نشان‌دهنده عملکرد هر دو مؤلفه برش محض و ساده است ($0.2 < Wk \leq 1$). به وجود آمدن جریان

کتابنگاری

- آقاباتانی، ع.، افشارحرب، ع.، مجیدی، ب.، علوی تهرانی، ن.، شهرابی، م.، داوودزاده، م. و نوایی، ا.، ۱۳۶۵- نقشه زمین‌شناسی یک دویست و پنجاه هزارم مشهد، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- شیخ‌الاسلامی، م. ر.، نواب‌پور، پ.، نواب‌مطلق، ا.، کوه‌پیمای، م.، مافی، آ. و حیدرزاده، ق.، ۱۳۹۲- بررسی‌های زمین‌شناسی و زمین‌ساختی در ناحیه کپه‌داغ- بینالود، چاپ اول، نشر رهی، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- طاهری، ج. و قائمی، ف.، ۱۳۷۶- نقشه زمین‌شناسی یک صد هزارم مشهد، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- علوی، م.، رحیمی، ب.، علوی نائینی، م. و پورلطیفی، ا.، ۱۳۷۷- نقشه زمین‌شناسی یک‌صد هزارم طبقه، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- کوه‌پیمای، م.، ۱۳۸۵- بررسی ساختاری دگرریختی نرم در سنگ‌های دگرگونی جنوب مشهد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

References

- Alavi, M., 1991- Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran, Geological society of America Bulletin, 103, 983-992.
- Fossen, H. and 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.
- Ramsay, J. and Huber, M., 1983- The techniques of modern structural geology, Volume 1: strain analysis, Academic Press
- Sarkarinejad, K. and Azizi, A., 2008- Slip partitioning and inclined dextral transpression along the Zagros thrust system, Iran: Journal of Structural Geology, 30, 116-136,
- Sheikholeslami, M. R. and Kuhpeyma, M., 2012- Structural analysis and tectonic evolution of the eastern Binalud Mountains, NE Iran, Journal of Geodynamics, 61, 23-46.
- Tikoff, B. and Fossen, H., 1995- The limitations of three-dimensional kinematic vorticity analysis. Journal of Structural Geology 12, 1771-1784.
- Xypolias, P., 2010- Vorticity analysis in shear zones: A review of methods and applications, Journal of structural Geology, 32, 2072-2092.

Finite strain analysis and vorticity estimation in the metamorphic rocks around Mashhad

S. Dashti Chandanagh¹, M. R. Sheikholeslami^{2*} and J. Taheri³

¹M.Sc. Student, Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

²Associate Professor, Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

³Ph.D., Geological Survey of Iran, NE Branch, Mashhad, Iran

Received: 2017 February 05

Accepted: 2017 June 03

Abstract

This study was conducted to determine the deformation pattern of the Mashhad metamorphic rocks which results from the convergence between Turan and Central Iran plates and closure of Paleotethys Ocean during Early Cimmerian event. The results of 2D and 3D strain analysis show that the maximum deformation is concentrated in the central part of the study area and most strain shape parameters (K) obtained from oriented samples are located within the flattening part of the Flinn diagram. Strain intensity parameter in most cases is less than 0.5 and a maximum strain occurred in the central part which is reduced towards the margins. This is the most characteristic of the typical shear zones in which the maximum strain is concentrated in the central part. Calculated vorticity numbers is ranged between 0.2 to 1 indicating the presence of both pure shear and simple shear during a transpressional regional deformation.

Keywords: Binalud, Deformation, Strain, Vorticity

For Persian Version see pages 215 to 220

*Corresponding author: M. R. Sheikholeslami; E-mail: rezasheikholeslami@yahoo.com