فصلنامه زمین‌شناسی ایران، سال ۱۳، شماره ۴۹، بهار ۱۳۹۸، صفحات ۶۳-۷۵

تحلیل دو بعدی واتنش پایدار در مرمرهای بودین دار ناحیه خلج با استفاده از دایره مور، جنوب مشهد

محمدرضا شیخ الاسلامی [۱و*]

۱. دانشیار پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۲/۱۶
تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۱/۱۵

چکیده

مرمرهای ناحیه خلج بخشـــی از واحدهای ســـنگی مجموعه دگرگونی مشهد هستند که تحت تاثیر سه مرحله دگریختی قرار گرفته‌اند. به‌منظور بررسی واتنش پایدار در مرحله اول دگریختی، کشیدگی ایجاد شده در بودین‌ها در هفت ایستگاه اندازه‌گیری و سپس با استفاده از دایره مور مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که نسبت قطرهای بیضوی واتنش دو بعدی برای این دگریختی در ایستگاه‌های مختلف بین ۱/۰۵ تا ۱/۳۶ متغیر است. همچنین میزان بیشینه زاویه برش طی دگریختی مرحله اول بین ۴ تا ۲۰ درجه می‌باشد. این نتایج با مشاهدات صحرایی که نشان می‌دهند دگریختی غالب در جریان مرحله‌ی اول دگریختی در رژیم برش محض روی داده و با تشکیل چین‌های پیوسته و بودین‌های تخته شکلاتی همراه است، مطابقت دارند. بودین‌های مورد بررسی در اثر ایجاد کشیدگی در دو جهت شکل گرفته‌اند. نتایج حاصل از بررسی واتنش همچنین نشان‌دهنده آن است که در جریان دگریختی مرحله اول ۰/۵ تا یک برابر تغییر حجم مثبت در مرمرهای ناحیه خلج روی داده است.

واژه‌های کلیدی: خلج، بودین،دگریختی، واتنش پایدار، دایره مور.

مقدمه

شاخص‌های واتنش پایدار[1] شامل شاخص‌های طولی[2] و شـــاخص‌های زاویه‌ای[3] امکان تحلیل دو بعدی و سه بعدی واتنش را فراهم می‌ســـازند (Ragan، 2009). با تعیین این شاخص‌ها برآورد شدت دگریختی[4] و تعیین نسبت بیضوی واتنش دو بعدی و ســـه بعدی امکان‌پذیر خواهد بود. مبنای اصلی تعیین این شاخص‌ها، استفاده از عناصر کشیده شده و یا چرخیده در جریان دگریختی نظیر سنگواره‌ها و بودین‌ها هستند (Ramsay 1968؛ Ramsay and Huber، 1983).

در مناطق با درجه دگرگونی بالا، استفاده از سنگواره‌ها بـــه دلیل از بین رفتن آنها طـــی فرآیند دگرگونی امکان‌پذیر نیســـت. در این گونه موارد حضـــور لایه‌های با جنس‌های مختلف که در جریان دگریختی رفتارهای متفاوتی دارند و باعث تشکیل بودین شده‌اند، برای تعیین شاخص‌های واتنش مورد استفاده قرار می‌گیرند. با اندازه‌گیری مقدار کشیدگی در بودین‌ها می‌توان این شاخص‌ها را محاسبه نمود. در این نوشتار شاخص‌های طولی و زاویه‌ای واتنش محاسبه و بر پایه

* نویسنده مرتبط: rezasheikholeslami@yahoo.com

1. Finite strain parameters
2. Longitudinal strain parameters
3. Angular strain parameters
4. Strain intensity

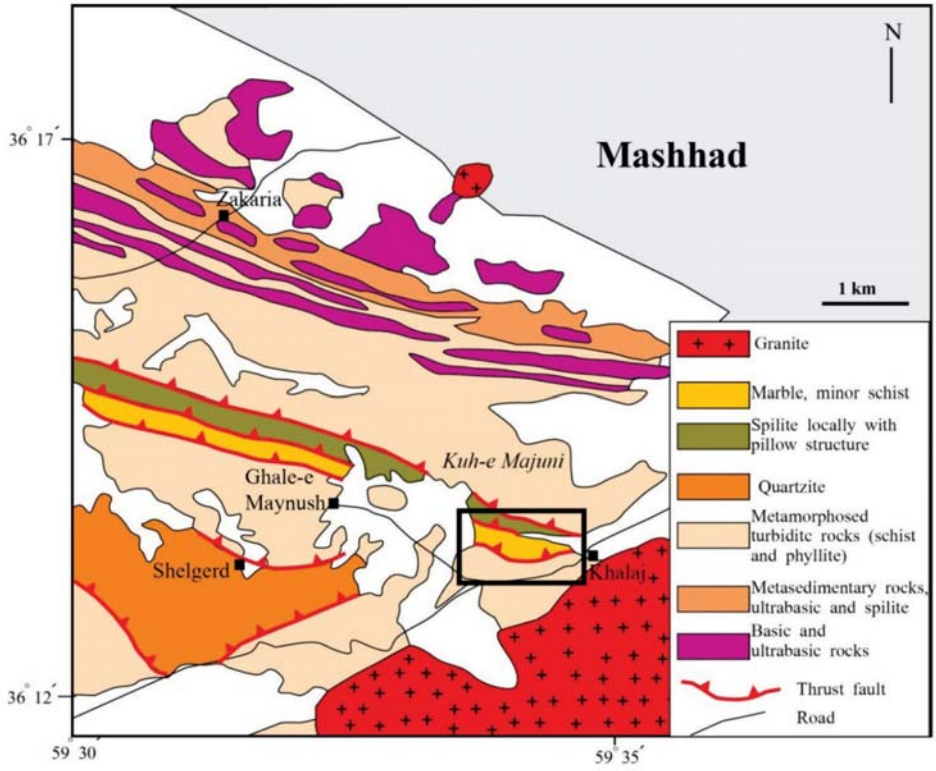
آن‌ها تحلیل دو بعدی واتنش پایدار در مرمرهای ناحیه خلج انجام شده اســت. اندازه‌گیری‌های لازم شامل طول کنونی و طول اولیه بودین‌ها و نیز تعیین راســتای خطوارگی غالب در زمان تشکیل بودین‌ها، در چند ایستگاه انجام و سپس با استفاده از دایره مور مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند. در نهایت نتایج به‌دست‌آمده از دایره مور برای تحلیل دو بعدی واتنش پایدار و انطباق با ساختارهای زمین‌شناسی و توالی دگریختی ناحیه‌ای به‌کاربرده شده‌اند.

زمین‌شناسی ناحیه‌ای

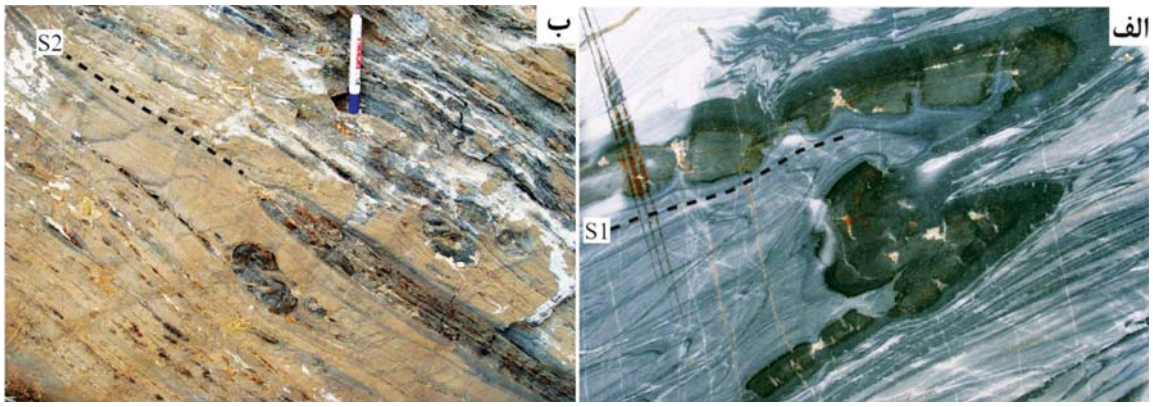
مرمرهای ناحیه خلج بخشــی از ســنگ‌های دگرگون جنوب مشهد هستند که طی کوهزاد برخوردی میان ایران مرکزی و صفحه توران، در جریان رویداد ســیمرین پیشین دگرگون و دگرشکل شده‌اند (Boulin، 1988). سنگ‌های با خاستگاه رسوبی در این مجموعه شامل انواع شیست‌ها، اســلیت، فیلیت، مرمر، کوارتزیت، متاچرت و برش کربناته به سن پرمین هستند که در زمان فرورانش پوسته اقیانوسی تتیس کهــن (Paleotethys) در شــرایط توربیدایتی و در محیط پیش کمانی-گودال شکل گرفته‌اند (Alavi، 1991؛ Taheri and Ghaemi، 1994). در جریان فرآیند برخورد، این مجموعه‌های رسوبی با سنگ‌های با خاستگاه اقیانوسی شــامل انواع ســنگ‌های اولترابازیک، بازالت و اســپلیت درهم‌آمیخته و سپس مورد نفوذ سه مرحله تزریق گرانیت قرار گرفته‌انــد (Karimpour et al.، 2006). Madjidi، 1983 و ســبزه‌ای و همکاران (۱۳۷۳) بر این باورند که سنگ‌های آذرین در ناحیه مشهد از نوع گدازه‌های مافیک و اولترامافیک هستند، درحالی‌که Alavi (1991) و Ghazi et al.، (2001) این سنگ‌ها را افیولیت می‌دانند. در ناحیه خلج در جنوب مشهد، سنگ‌های اســپلیتی متراکم و دگریخت به همراه مرمرهــای کلســیتی و دولومیتی با همبری گســله از نوع راندگی در میان شیست‌های آلومینوسیلیکات‌دار رخنمون دارند (شــکل ۱). اثر حرارتی ناشی از تزریق گرانیت مشهد باعث تشــکیل دگرگونی مجاورتی و تبلور کانی‌های شاخص این نوع دگرگونی نظیر استارولیت در شیست‌ها شده است (Sheikholeslami and Kuhpeyma، 2012). مرمرهــا حاوی قطعات بودین شــده از جنس چرت‌هــای آهن‌دار، چرت‌های رادیولاریتی و ســنگ‌آهک ماسه‌ای بوده و تحت اثر چین‌خوردگی و دگریختــی در مقیاس‌های رخنمون و ناحیه‌ای قرار گرفته‌اند (شکل ۲ الف و ب).

توالی دگریختی در مرمرهای ناحیه خلج

مرمرهای ناحیه خلج همراه با دیگر واحدهای ســنگی در مجموعه دگرگون مشــهد متحمل دگریختی ناحیه‌ای شــده‌اند. به دلیل ویژگی‌های ریولوژیکی مرمرها، توالی‌های دگریختی ناحیه‌ای در این واحد ســنگی در قیاس با دیگر واحدهای ســنگی نظیر شیست و اسلیت نمایان‌تر هستند. در اولین مرحله دگریختی (D_1)، برگوارگی رســوبی اولیه توســط چین‌های F_1 چین‌خورده و برگوارگی S_1 به‌موازات ســطح محوری این دســته از چین‌ها ایجاد شــده است. کشــیدگی طبقات در جریان این مرحله از دگریختی که در شرایط برش محض غالب روی داده باعث بودین شدگی در راستای برگوارگی S_1 شده است. بودین‌های حاصل موضوع مطالعه در این مقاله هســتند (شــکل ۲ الف). دو دســته خطوارگی شــامل خطوارگی کانی حاصل انتظام کانی‌های دگرگونی درجه پایین نظیر مسکوویت، و خطوارگی سایشی حاصل لغزش طبقــات بر روی یکدیگر نیــز در این مرحله بــه وجود آمده‌اند. این دســته از خطوارگی‌ها به دلیل آنکه توســط رویداد D_2 تحت تاثیر قرار گرفته‌اند گسترش کمی داشته و نافذ نیستند. در مرحله دوم دگریختی که با ایجاد پهنه‌هــای برشــی در ضخامت‌های متفاوت همراه شــده، ساختارهای میلونیتی شامل چین‌های تک‌شیب، چین‌های نیامی، چین‌های مایل، اجســام عدســی شــکل با تقارن تک‌شــیب و نیز خطوارگی کشیدگی کانی گسترش یافته‌اند (شیخ‌الاســلامی و همکاران ۱۳۹۲). چین‌های شکل گرفته در مرحله پیشــین، در این مرحله کشیده و یا بریده شده و به‌صورت چین‌های بدون ریشه (rootless fold) در آمده‌اند (شکل ۲ ب). ساختارهای مربوط به مرحله‌های دگریختی D_1 و D_2 توسط ریزچین‌های مرحله دگریختی D_3 فرانهاده شــده و برگوارگی ریزچین با شیب به سمت شمال غرب و جنوب شرق بر روی آن‌ها شکل گرفته‌اند (Sheikholeslami and Kouhpeyma، 2012).



شکل ۱. پراکندگی واحدهای سنگی در جنوب و جنوب غرب مشهد. محدوده مرمرهای مورد بررسی در ناحیه خلج در کادر مستطیلی به رنگ زرد مشخص شده است (برگرفته از Taheri and Ghaemi، 1996)



شکل ۲. الف) بودین شدگی و چین‌خوردگی در مرمرهای ناحیه خلج. بودین‌های از جنس چرت‌های آهن‌دار و یا چرت‌های رادیولاریتی در راستای برگوارگی S_1 شکل گرفته‌اند، ب) چین‌های بدون ریشه که در اثر ایجاد پهنه‌های برش ساده و بریده و جابجا شدن چین‌های مرحله اول شکل گرفته‌اند. بودین‌های شکل گرفته در این مرحله به نسبت بودین‌های مرحله قبل کشیده‌تر هستند

بررســـی روابط فرانهادگی[1] ساختارهای شکل گرفته طی سه مرحله دگریختی نشان می‌دهد که چین‌ها و بودین‌های ایجاد شده در مرحله‌ی D_1 تحت تاثیر چین‌های F_2 مربوط به رویداد دگرشـــکلی D_2 قرار گرفته‌اند. نتیجه این فرآیند ایجاد بودین‌ها و چین‌های بازچین‌خورده[2] است. با ادامه دگرشکلی و طی مرحله دگرشکلی D_3 چین‌های نسل قبل برای بار سوم تحت اثر ریزچین‌خوردگی‌های نسل سوم قرار می‌گیرند. بررسی هندسی چین‌های باز چین‌خورده نشانگر آن است که پس از چین‌خوردگی نسل اول، چین‌های نسل دوم و سوم به ترتیب به‌صورت هم‌محور[3] ولی با صفحات محوری با شیب متفاوت،

1. Overprinting
2. Refolded
3. Coaxial

مطابق با گونـــه‌ی III الگوی تداخلی چین‌ها (Ramsay and Huber، 1983) بر روی نسل‌های قبلی خود اثر گذاشته‌اند.

محاسبه شاخص‌های واتنش پایدار بر پایه بودین‌ها

بودین‌ها لایه‌های مقاوم ســـنگی هســـتند که توســـط کشـــیدگی از حالت اولیه خود خارج و به قطعات کوچکتری تقسیم شده‌اند. این ساختارها اطلاعاتی در خصوص واتنش، ســـوی برش و مقاومت واحدهای سنگی مختلف به دست می‌دهند. بودین‌ها در یال چین‌ها، یعنی جایی که بیشترین پهن‌شـــدگی و کشـــیدگی موازی با لایه‌بندی روی می‌دهد، فراوان‌تر هســـتند. این ســـاختارها به دو دسته بودین‌های ساده[1] و یا بودین‌های تخته شکلاتی[2] تقسیم‌بندی می‌شوند (Ramsay and Huber، 1983). بودین‌های ســـاده از یک لایه قطعه‌قطعه شـــده سوسیسی تشکیل شـــده‌اند که در آن، بخش‌های عدسی شـــکل طویل به‌موازات یکدیگر قرار گرفته‌اند. این ساختارها حاصل کشیدگی لایه در یک‌جهت می‌باشند. بودین‌های تخته شـــکلاتی در شرایطی به وجود می‌آیند که کشـــیدگی در دو جهت روی می‌دهد و نتیجه آن تشـــکیل بودین‌ها به‌صورت تخته‌های سه بعدی جدا از هم اســـت (Zulauf et al.، 2011). بیشتر بودین‌های بررسی شده در ناحیه مورد مطالعه از نوع بودین‌های جعبه شکلاتی هستند، ولی بودین‌های ساده از نوع سوسیسی نیز به میزان کمتر در مرمرها حضور دارند. از دیگر ویژگی‌های ساختاری مرمرها، حضور گســـلش عادی اســـت کـــه باعث جابجایی قطعات بودین شـــده است. این حالت گاه منجر به تشکیل سامانه گســـله‌های عادی پلکانی شده است. برای محاسبه شـــاخص‌های واتنش، اندازه‌گیری طول کنونی و طول اولیه بودین‌ها در شش ایستگاه در واحدهای مرمر خلج به انجام رســـید. انـــدازه بودین‌ها متفاوت و جهت کشـــیدگی آن‌ها به‌صورت پراکنده و در راستاهای مختلف می‌باشد.

اولین گام در محاسبه شـــاخص‌های طولی واتنش پایدار اندازه‌گیری نســـبت طول کنونی بودین‌ها بـــه طول اولیه آن‌ها می‌باشد. این شاخص تحت عنوان کشیدگی[3] نامیده شده و با نماد (e+۱) نمایش داده می‌شود. شاخص بعدی مربع کشیدگی[4] است و بنا به تعریف مربع نسبت طول کنونی به طول اولیه بودین است. این پارامتر با نماد (I) نمایش داده می‌شود. آخرین شاخص طولی عکس مربع کشیدگی[5] اســـت که با نماد (λ) بیان شده و در ترسیم دایره مور مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاخص‌های زاویه‌ای واتنش شامل زاویه برش (ψ) و واتنش برشی زاویه‌ای (γ) می‌باشند که رابطه‌ی زیر بین آن‌ها برقرار است:

$$\mathrm{Tan}\ \psi = \gamma$$

γ' پارامتری است که بین شاخص طولی و زاویه‌ای واتنش از طریق فرمول زیر رابطه برقرار می‌کند (Ramsay، 1968).

$$\gamma' = \gamma/\lambda$$

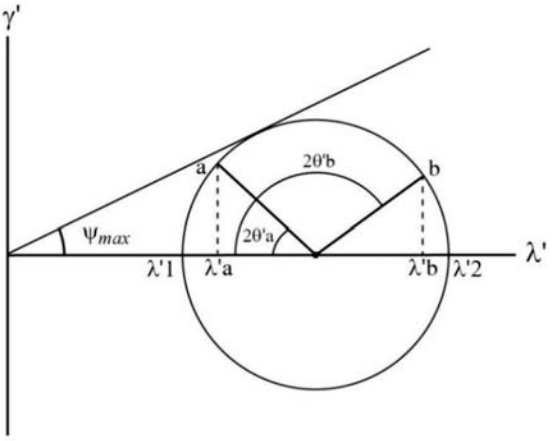
برآورد نسبت بیضوی واتنش دو بعدی و بیشینه زاویه برش با استفاده از دایره مور واتنش

یکی از روش‌های تعیین نسبت بیضوی واتنش دوبعدی در ســـنگ‌های دگریخت، استفاده از دایره مور است. دایره مور واتنش به روشی مشابه با دایره مور تنش ترسیم شده و در برآورد مقادیر بیشینه و کمینه واتنش مورد استفاده قرار می‌گیـــرد. در دایره مور واتنش، بـــر روی محور افقی مقادیر λ' و بر روی محور عمودی مقادیر γ' نشـــان داده می‌شـــود (Nadi، 1963؛ Treagus، 1987). به‌منظور رسم دایره مور دو بعدی، مقادیر مربوط به پارامتر عکس مربع کشیدگی در دو راستای متفاوت (راستای a و b) محاسبه و بر اساس زاویه بین هر کدام از این راســـتاها با جهت تعیین شده x بیضوی واتنش (یعنی زوایـــای θ_1 و θ_2)، بر روی محیط دایره پیاده می‌شوند. با استفاده از دایره مور ترسیم شده مقادیر λ'_1 و λ'_2 قابل محاسبه خواهند بود. با محاسبه این دو مقدار، درجه بیضویت[6] یا نسبت طول محور بزرگ به طول محور کوچک بیضوی واتنش (R) از طریق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R = \sqrt{\lambda'_2/\lambda'_1}$$

اســـتفاده دیگر از دایره مور واتنش تعییـــن زاویه برش بیشینه (ψ_{max}) در جریان دگریختی است. اندازه‌گیری این زاویه با رسم مماس بر محیط دایره و تعیین زاویه خط مماس با محور افقی امکان‌پذیر خواهد بود (شکل ۳).

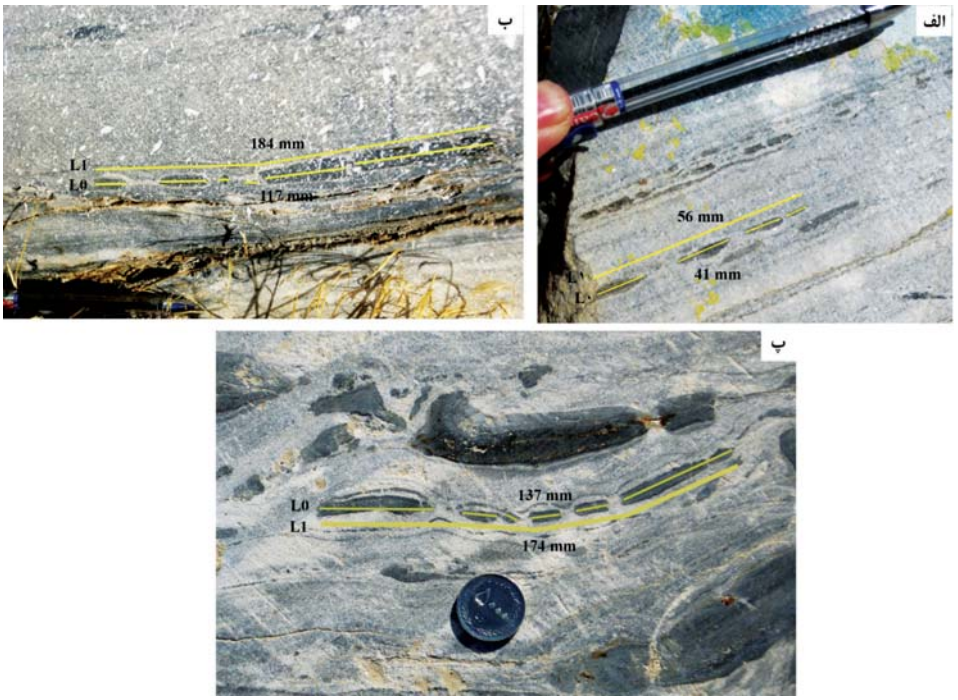
1. Ordinary boudins
2. Chocolate tablet boudins
3. Stretch
4. Quadratic stretch
5. Reciprocal quadratic stretch
6. Ellipticity



شکل ۳. چگونگی رسم دایره مور دو بعدی با داشتن دو مقدار عکس مربع کشیدگی (λ'_a و λ'_b) مربوط به دو عنصر ساختاری کشیده شده و تعیین زاویه هرکدام با محور x بیضوی واتنش. با استفاده از دایره مور ترسیم شده مقادیر محورهای بیشینه و کمینه کشیدگی (λ'_1،λ'_2) و نیز نسبت واتنش بیضوی دوبعدی (R) به همراه زاویه برش بیشینه (Ψ_{max}) به دست خواهند آمد (الیاسی ۱۳۹۱، با تغییرات)

محاسبه راستای بیشینه کشیدگی در جریان مرحله دگریختی D_1

همان‌گونه که عنوان شد برای ترسیم دایره مور نیاز به دانستن زاویه بین راستای کشیدگی با محور x بیضوی واتنش در زمان تشکیل بودین‌ها می‌باشد. با توجه به اینکه در ناحیه خلج خطوارگی غالب، خطوارگی L_2 مربوط به مرحله دگریختی D_2 می‌باشد، باید به شیوه‌ای مناسب راستای محور x بیضوی واتنش مربوط به دگریختی D_1 را شناسایی کرد تا راستای کشیدگی بودین‌ها در ایستگاه‌های مختلف با آن به دست آید. راهکار مورد استفاده در این مقاله استفاده از روش ترسیمی Lisle and Regan، (1988) می‌باشد. بر پایه این روش تعیین وضعیت بیضوی واتنش شامل درجه بیضویت و نیز راستای محور x با استفاده از تعیین مقدار کشیدگی در سه جهت متفاوت، با استفاده از دایره مور امکان‌پذیر می‌باشد. برای استفاده از این روش مقادیر طول کنونی و طول اولیه بودین‌ها در سه جهت متفاوت با آزیموت‌های ۰۹۰، ۱۴۰و ۱۷۰ در ایستگاه اول (ایستگاه A) اندازه‌گیری و سپس برای تعیین واتنش‌های طولی و تعیین راستای ناحیه‌ای محور x بیضوی واتنش مورد استفاده قرار گرفتند (شکل‌های ۴، ۵ الف و جدول ۱). دلیل انتخاب این نقطه برای تعیین محور x بیضوی واتنش، وجود معدن متروکه سنگ مرمر (سنگ چینی) و حضور سینه‌کارهای مناسب و متعدد برای اندازه‌گیری بودین‌ها در راستاهای مختلف می‌باشد.



شکل ۴. تعیین مقدار کشیدگی بر پایه نسبت طول کنونی به طول اولیه بودین‌های جعبه شکلاتی در سه راستای مختلف در ایستگاه A، الف) بودین در راستای ۱۴۰، ب) بودین در راستای ۱۷۰ و پ) بودین در راستای ۹۰

جـدول ۱. اطلاعـات مربوط به اندازه‌گیری طـول کنونی به طول اولیه بودین‌ها، راسـتا و زاویه آن‌ها با محور x در ایسـتگاه‌های اندازه‌گیری در مرمرهای ناحیه خلج

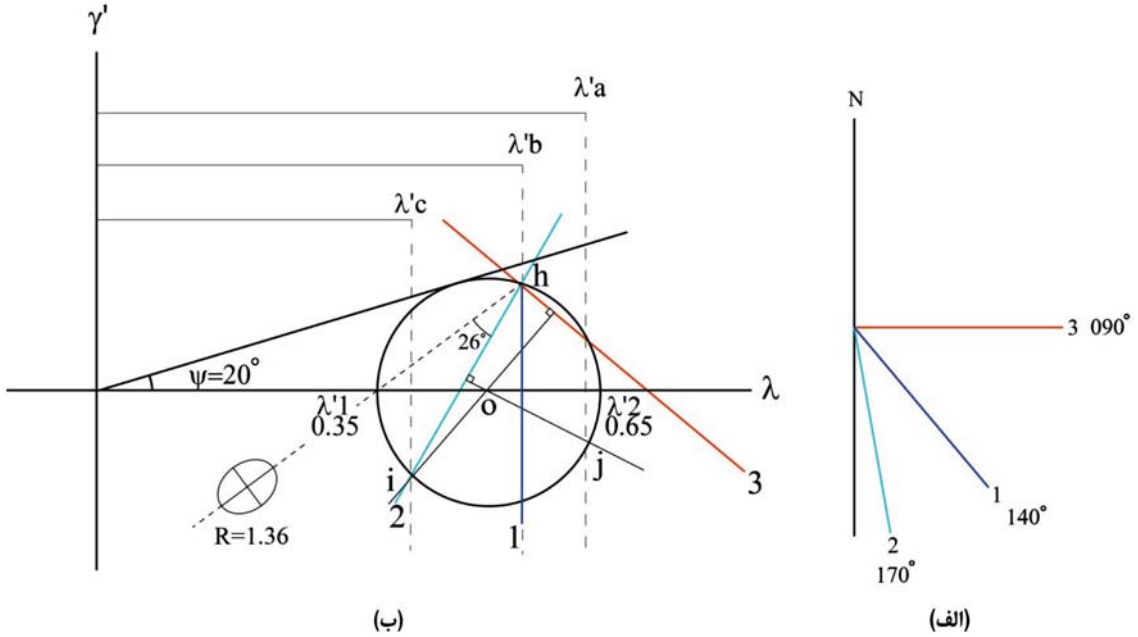
ایستگاه	شماره بودین اندازه‌گیری شده	طول کنونی (L_1) (میلی‌متر)	طول اولیه (L) (میلی‌متر)	راستای اندازه‌گیری بودین برحسب آزیموت	زاویه با خطوارگی (θ°)
A	۱	۵۶	۴۱	۱۴۰	-
	۲	۱۸۴	۱۱۷	۱۷۰	-
	۳	۱۷۴	۱۳۷	۰۹۰	-
B	۴	۳۲۳	۲۸۲	۲۲۰	۲۴
	۵	۲۰۵	۱۷۴	۳۱۵	۶۱
C	۶	۴۳۵	۳۱۱	۱۹۰	۶
	۷	۷۲۵	۵۷۸	۰۸۰	۶۴
D	۸	۱۱۱	۷۲	۱۱۰	۸۶
	۹	۱۵۹	۱۲۵	۰۴۱	۲۵
E	۱۰	۷۷۰	۶۲۰	۱۳۰	۶۶
	۱۱	۱۲۰	۱۰۱	۱۶۰	۳۶
F	۱۲	۹۷۰	۷۸۰	۰۵۰	۳۱
	۱۳	۱۵۹	۱۴۱	۱۱۵	۸۱

برای رسـم دایره مور با توجه به داده‌هـای اندازه‌گیری شـده در ایسـتگاه A، خط عمودی معرف محور γ′ را رسم نموده و مقادیر به‌دسـت‌آمده λ′ از روی کشـیدگی محاسبه شـده در راستاهای ۱، ۲ و ۳ را به فاصله از آن جدا می‌کنیم (λ′a، λ′b، λ′c) (شکل ۵ ب). از انتهای این خطوط عمودی عبور داده و نقطه اختیاری H را روی عمود λ′b (راسـتای ۱) در نظر می‌گیریم. از این نقطه خطوط مربوط به راستای ۲ و ۳ را مطابق با زاویه قرارگیری آن‌ها نسـبت به راستای ۱ جدا می‌کنیم (شکل ۵ الف). این خطوط عمودهای λ′a و λ′c را به ترتیب در نقاط j و i قطع می‌نمایند. خطوط عمود بر hi و hj را از میانه آنها رسم کرده تا یکدیگر را در نقطه o قطع نمایند. این نقطه مرکز دایره مور ما خواهد بود. برای تعیین محور λ′، پاره‌خطی افقی را به‌گونه‌ای رسم می‌کنیم که از نقطه o گذشته و محور γ′ را قطع نماید. نقطه o مرکز دایره مور می‌باشد. دایره به مرکزیت o را به‌گونه‌ای رسـم می‌کنیم که از نقاط h، i و j گذشـته و به‌این‌ترتیب دایره مور رسم می‌شود. با رسم دایره مور، مقادیر λ'_1 و λ'_2 به ترتیب ۰/۳۵ و ۰/۶۵ و مقدار بیشینه برش زاویه‌ای ۲۰ درجه به دسـت می‌آیند. راسـتای بیشینه کشـیدگی یا محور x از اتصال نقطه h به نقطه معرف λ'_1 بر روی محور افقی دایره مور به دست خواهد آمد. این خط زاویه ۲۶ درجه با راسـتای ۲ می‌سازد، به‌این‌ترتیب محور بیشینه کشیدگی یا محور x بیضوی واتنش در جریان دگریختی D_1 دارای آزیموت ۱۹۶درجه اسـت. نسبت طول محور بزرگ به طول محور کوچک بیضوی واتنش در این ایستگاه بر پایه این محاسبات برابر ۱/۳۶ می‌باشد (شکل ۵ ب).

محاسبه شـاخص‌های واتنش پایدار و رسم دایره‌های مور واتنش در ایستگاه‌های مختلف

پـس از تعیین راسـتای x بیضوی واتنـش مربوط به دگریختی مرحله D۱، مقادیر کشیدگی از روی اندازه‌گیری طول کنونی به طول اولیه بودین‌ها در دو راستای مختلف در ایسـتگاه‌های B تا F محاسبه گردید. بر پایه این محاسبات شـاخص‌های واتنش پایدار، دایره مـور و وضعیت بیضوی واتنش برای هرکدام از این ایسـتگاه‌ها به شـرح زیر تعیین شدند:

ایستگاه B: بودین‌های برداشـت شده در این ایستگاه بیشـتر از نوع بودین‌های تخته شـکلاتی و کمتـر از نوع سوسیسی هستند. کشـیدگی بودین-ها در این ایستگاه بر پایه طـول کنونی و طول اولیه در دو راسـتای ۲۱۰ و ۳۱۵ درجه اندازه‌گیری شدند (جدول ۱ و شکل ۵الف و ب). زاویه بین محور x بیضوی واتنش و راستاهای اندازه‌گیری شده ۲۴



شـــکل ۵. الف) نمایش آزیموت راســـتاهای اندازه‌گیری بودین‌ها در ایستگاه A، ب) روش ترسیمی برای یافتن نسبت بیضوی واتنش و راستای بیشینه کشیدگی بر پایه دایره مور با استفاده از اندازه‌گیری مقدار کشیدگی در سه راستای متفاوت (روش Lisle and Ragan، 1988)

جدول ۲. نتایج محاسبه شاخص‌های واتنش پایدار و وضعیت بیضوی واتنش با استفاده از دایره مور در ایستگاه‌های A تا F

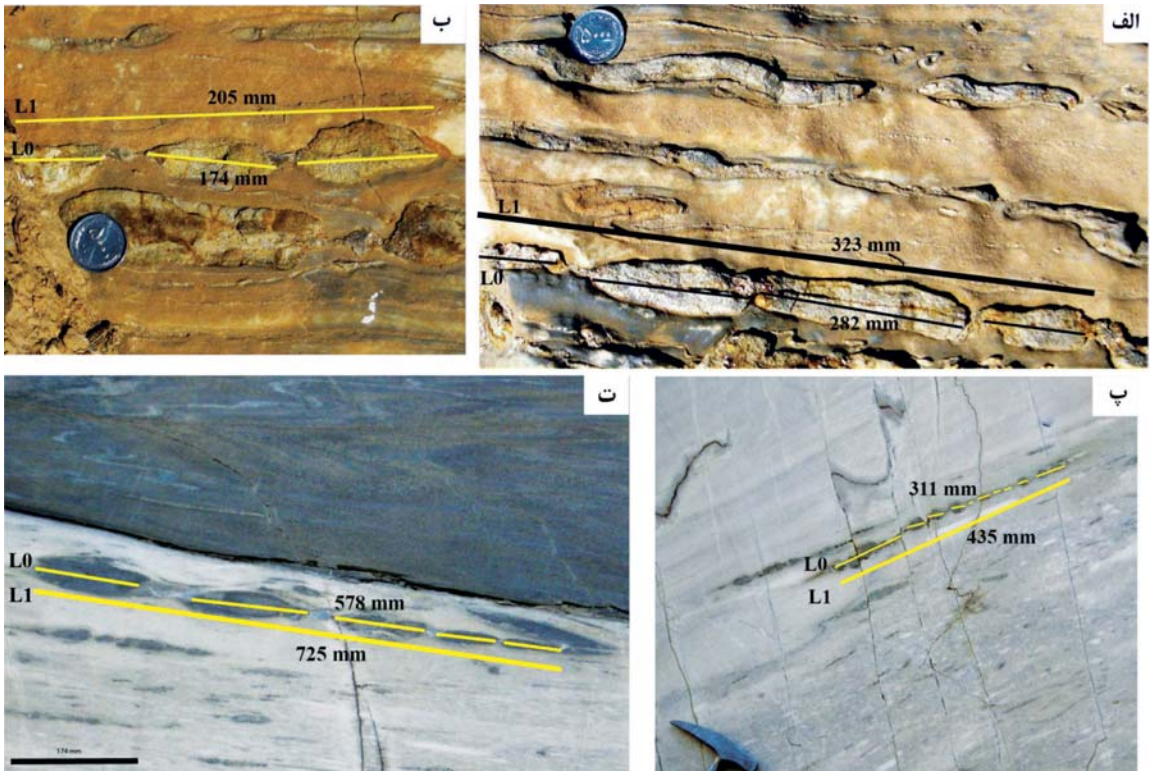
Station	$(1+e)_a$	$(1+e)_b$	λ_a	λ_b	λ'_a	λ'_b	λ'_1	λ'_2	λ_1	λ_2	R	ψ°
A*	۱٫۵۷	۱٫۲۷	۲٫۴۶	۱٫۶۱	۰٫۴۰	۰٫۶۲	۰٫۳۵	۰٫۶۵	۲٫۸۵	۱٫۵۳	۱٫۳۶	۲۰
B	۱٫۱۷	۱٫۱۴	۱٫۳۸	۱٫۳۱	۰٫۷۲	۰٫۷۶	۰٫۷۰	۰٫۷۸	۱٫۴۲	۱٫۲۸	۱٫۰۵	۴
C	۱٫۳۹	۱٫۲۵	۱٫۹۵	۱٫۵۷	۰٫۵۱	۰٫۶۴	۰٫۵۰	۰٫۶۷	۲٫۰۰	۱٫۴۹	۱٫۱۵	۱۰
D	۱٫۵۴	۱٫۲۷	۲٫۳۷	۱٫۶۱	۰٫۴۲	۰٫۶۷	۰٫۳۷	۰٫۶۳	۲٫۷۰	۱٫۵۸	۱٫۳۰	۱۷
E	۱٫۲۴	۱٫۱۸	۱٫۵۴	۱٫۴۱	۰٫۶۵	۰٫۷۱	۰٫۶۰	۰٫۷۲	۱٫۶۶	۱٫۳۸	۱٫۰۹	۸
F	۱٫۲۴	۱٫۱۲	۱٫۵۴	۱٫۲۷	۰٫۶۵	۰٫۷۹	۰٫۵۸	۰٫۸۰	۱٫۷۲	۱٫۲۵	۱٫۱۷	۱۳

* در این ایستگاه اندازه‌گیری کشیدگی در سه جهت انجام شده است. $(1+e)_c$=1.37

و ۶۱ درجه هستند. دایره مور ترسیم شده بر پایه این مقادیر نشان‌دهنده‌ی نسبت کوچک بیضوی واتنش (۱/۰۵) و زاویه برش ۴ درجه می‌باشد (جدول ۲ و شکل ۷ الف).

ایستگاه C: بودین‌های برداشت شده در این ایستگاه از هر دو نوع بودین‌های تخته شـــکلاتی و سوسیسی هستند. مقدار کشـــیدگی ایـــن بودین‌ها در دو راســـتای ۱۹۰ و ۰۸۰ اندازه‌گیری شـــده‌اند (شـــکل ۶ پ و ت). زاویه بین محور کشیدگی بیشینه ناحیه‌ای با راستاهای اندازه‌گیری شده، ۶ و ۶۴ درجه هستند (جدول ۱). دایره مور ترسیم شده بر پایه این مقادیر نشـــان‌دهنده نسبت بیضوی واتنش ۱/۱۵ و زاویه برش بیشینه ۱۰ درجه می‌باشد (جدول ۲ و شکل ۷ ب).

ایستگاه D: بودین‌های این ایستگاه به‌طور کامل از نوع تخته شکلاتی هستند (شکل ۸ الف و ب). مقدار کشیدگی در این ایســـتگاه در دو راستای ۱۱۰ و ۴۱ اندازه‌گیری شده‌اند (جدول ۱). زاویه بین محور کشـــیدگی بیشینه ناحیه‌ای با راستاهای کشیدگی در این ایستگاه ۸۶ و ۲۵ درجه هستند. دایره مور ترسیم شده بر پایه این مقادیر نشان‌دهنده‌ی نسبت بیضوی واتنش ۱/۳۰ و زاویه برش بیشینه ۱۷ درجه می‌باشد (جدول ۲ و شکل ۹ الف).



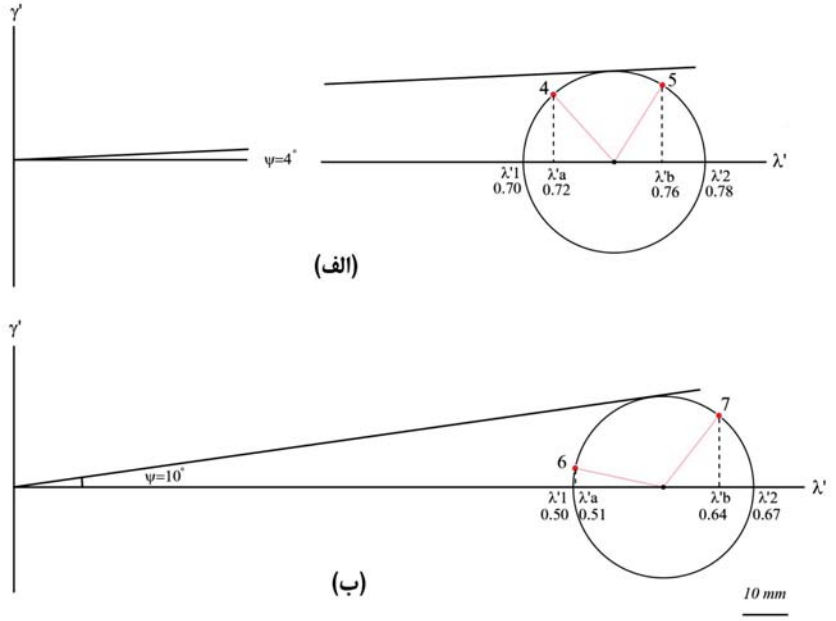
شکل ۶. نمایش بودین‌ها و مقادیر اندازه‌گیری شده طول کنونی به طول اولیه در دو ایستگاه B و C، الف و ب) ایستگاه B؛ اندازه‌گیری بودین‌ها در دو راستای ۳۲۰ و ۲۱۵ انجام شده است، پ و ت) ایستگاه C؛ اندازه‌گیری نسبت‌های طولی در راستاهای ۱۹۰ و ۰۸۰ انجام شده است. در شکل پ جابجایی عادی به‌صورت پلکانی در بودین روی داده است

ایستگاه E: بودین‌های این ایستگاه نیز همانند ایستگاه پیشین به گونه تخته شکلاتی هستند (شکل ۸ پ و ت). مقدار کشیدگی در این ایستگاه در دو راستای ۱۳۰ و ۱۶۰ اندازه‌گیری شده‌اند (جدول ۱). زاویه بین محور کشیدگی بیشینه ناحیه‌ای با راستاهای اندازه‌گیری کشیدگی در این ایستگاه ۶۶ و ۳۶ درجه هستند. دایره مور ترسیم شده بر پایه این مقادیر نشان‌دهنده‌ی نسبت بیضوی واتنش ۱/۰۹ و زاویه برش ۸ درجه می‌باشد (جدول ۲ و شکل ۹ب).

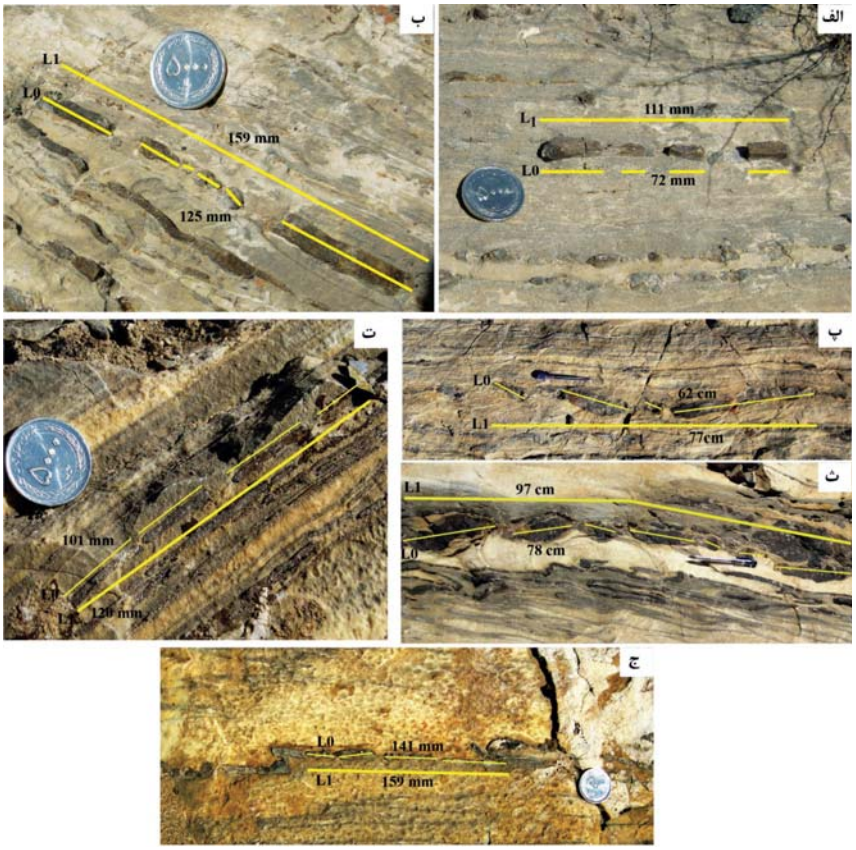
ایستگاه F: بودین‌های نوع جعبه شکلاتی در این ایستگاه در دو راستای ۱۵۰ و ۱۱۵ اندازه‌گیری شده‌اند (شکل‌های ۸ ت و ج). مقدار کشیدگی در این ایستگاه در دو راستای ۱۳۰ و ۱۶۰ اندازه‌گیری شده‌اند (جدول ۱). زاویه بین محور کشیدگی بیشینه ناحیه‌ای با راستاهای اندازه‌گیری کشیدگی در این ایستگاه ۶۶ و ۳۶ درجه هستند. دایره مور ترسیم شده بر پایه این مقادیر نشان دهنده‌ی نسبت بیضوی واتنش ۱/۰۹ و زاویه برش ۸ درجه می‌باشد (جدول ۲ و شکل پ ۹).

بحث

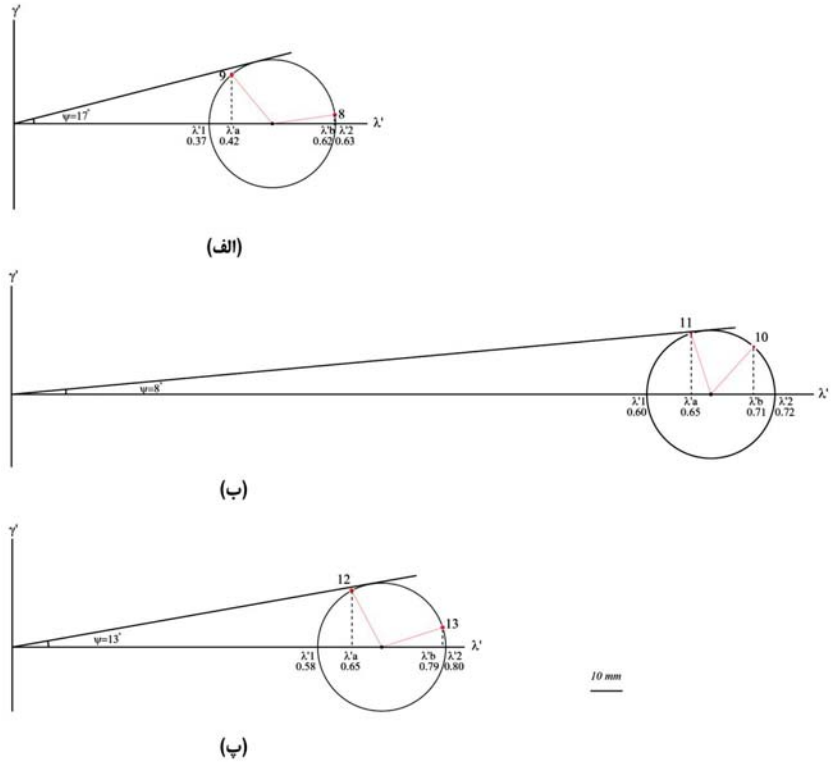
زاویه برش بیشینه پایین (۴ تا ۲۰ درجه) و نیز شدت واتنش پایین که از روی مقادیر کم نسبت بیضوی واتنش (R) حاصل از دایره مور به‌دست‌آمده‌اند (۱/۰۵ تا ۱/۳۶)، انطباق مناسبی با هندسه ساختارهای ایجاد شده در ناحیه خلج دارند. این انطباق با تحلیل واتنش در ایستگاه‌های مختلف و طبقه‌بندی دو بعدی واتنش با استفاده از نمودار (Ramsay and Huber، 1983) قابل بحث می‌باشد (شکل ۱۰). محور افقی این نمودار برحسب مقدار بیشینه کشیدگی در راستای محور بزرگ بیضوی واتنش و محور عمودی برحسب مقدار کمینه کشیدگی در راستای محور کوچک بیضوی واتنش مدرج شده است. این نمودار در محل مختصات (۱و۱) (مرکز دایره فرضی اولیه پیش از شروع دگریختی) به سه محدوده تقسیم می‌شود. میدان یک شامل بیضوی‌هایی است که در آن مقادیر $1+e_1$ و $1+e_2$ هر دو بزرگتر از یک هستند و بیضوی واتنش به‌طور کامل خارج از دایره مرجع قرار گرفته است. در



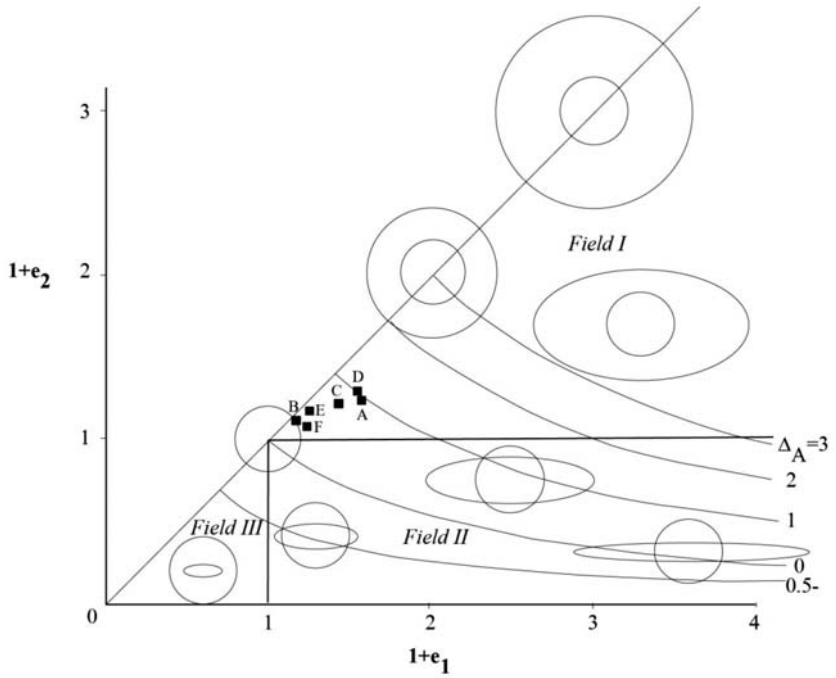
شـــکل ۷. دایره‌های مور ترسیم شده بر پایه داده‌های اندازه‌گیری شـــده، الف) ایستگاه B؛ ب) ایستگاه C. نسبت بیضوی واتنش و زاویه برش بیشینه در ایستگاه B به ترتیب ۱/۰۵ و ۴ درجه و در ایستگاه C، ۱/۱۵ و ۱۰ درجه هستند



شکل ۸. نمایش بودین‌ها و مقادیر اندازه‌گیری شده طول کنونی و طول اولیه آن‌ها در ایستگاه‌های D، E و F، الف و ب) ایستگاه D؛ اندازه‌گیری کشیدگی در این ایستگاه در دو راستای ۱۱۰ و ۰۴۱ انجام شده است. پ و ث) ایستگاه E؛ اندازه‌گیری کشیدگی در این ایستگاه در دو راستای ۱۳۰ و ۱۶۰ انجام شـــده اســـت. ت و ج) ایستگاه F؛ اندازه‌گیری کشیدگی در این ایستگاه در دو راستای ۰۵۰ و ۱۱۵ انجام شده است. جابجایی عادی در بودین‌های شکل پ، ت و ث دیده می‌شود



شـــکل ۹. دایره‌های مور ترســـیم شده بر پایه داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های D تا F، الف) ایستگاه D؛ نسبت بیضوی واتنش و زاویه برش بیشـــینه در این نقطه ۱/۳۰ و ۱۷ درجه اســـت. ب) ایستگاه E؛ نسبت بیضوی واتنش و زاویه برش بیشینه در این ایستگاه ۱/۰۹ و ۸ درجه است. پ) ایستگاه F؛ نسبت بیضوی واتنش و زاویه برش بیشینه در این نقطه ۱/۱۷ و ۱۳ درجه است



شـــکل ۱۰. طبقه‌بندی شکل بیضوی واتنش با اســـتفاده از نمودار ترسیمی $1+e_1$ در مقابل $1+e_2$ (Ramsay and Huber، 1983). بیضوی‌های واتنش به شـــکل‌های مختلف در میدان‌های ســـه گانه قرار خواهند گرفت. نسبت‌های کشیدگی بیشینه و کمینه به‌دست‌آمده در ایستگاه‌های مختلف همگی در میدان I قرار گرفته‌اند. پراکندگی نقاط بر روی منحنی‌های تغییر حجم نشـــان می‌دهد که سنگ‌های ناحیه خلج بین ۰/۵ تا یک برابر تغییر حجم مثبت داشته‌اند

این حالت تغییر حجم مثبت روی می‌دهد. در میدان ۲ مقدار $1+e_1$ بزرگتر از یک و مقدار $1+e_2$ کوچکتر از یک است. در این محدوده، هم تغییر حجم مثبت، و هم تغییر حجم منفی روی می‌دهد. در میدان ۳ هر دو مقدار $1+e_1$ و $1+e_2$ کوچکتر از یک هستند، در نتیجه بیضوی واتنش به‌طور کامل درون دایره مرجع قرار گرفته و تغییرات حجم منفی خواهد بود.

به‌منظور تحلیل واتنش دو بعدی مقادیر $1+e_1$ و $1+e_2$ با استفاده از l_1 و l_2 به‌دست‌آمده از دایره مور در ایستگاه‌های مختلف محاسبه و بر روی نمودار شکل ۱۰ منتقل شده‌اند ($1+e=\sqrt{l}$). نمودار حاصل نشان می‌دهد که تمامی نقاط در محدوده میدان یک قرار می‌گیرند. بیضوی واتنش مربوط به این میدان نشان می‌دهد که کشیدگی می‌تواند در تمام راستاها روی دهد. این بدان معنی است که طبقات مقاوم واقع در میان طبقات نامقاوم می‌تواند در تمامی جهات کشیده شده و به‌تبع آن بودین‌ها نیز می‌توانند در تمامی جهات شکل گیرند. این وضعیت با پراکندگی بودین‌ها در مرمرهای ناحیه خلج مطابقت دارد، زیرا بودین‌های این ناحیه در راستای خاصی گسترش نداشته و تنوع راستاهای اندازه‌گیری شده بودین‌ها نشان از کشیدگی در جهات متفاوت دارد (جدول ۱). این شرایط دگریختی باعث تشکیل ساختارهای تخته شکلاتی و گسل‌های عادی در ناحیه مورد بررسی شده است (شکل‌های ۶ و ۸). محدوده شماره یک همچنین حاصل انقباض شدید در راستای عمود بر بیضوی است که در نتیجه آن ساختمان‌های پهن شده و یا کلوچه‌ای به وجود آمده‌اند. نسبت‌های پایین درجه بیضویت یا نسبت بیضوی واتنش به‌دست‌آمده در ایستگاه‌های مختلف نشان می‌دهد که کشیدگی در راستای هر دو محور اصلی بیضوی واتنش روی داده و ازاین‌رو نسبت عددی به‌دست‌آمده پایین است.

مقادیر بیشینه زاویه برش که بر پایه دایره مور در ایستگاه‌های مختلف تعیین شده بین ۴ تا ۲۰ درجه متغیر است. این میزان کم از زاویه برش بیشینه با مشاهدات میدانی از هندسه و کینماتیک ساختارهای ناحیه مطابقت دارد. همان‌گونه که در ابتدای مقاله عنوان شد، چین‌ها و بودین‌های شکل گرفته در مرحله اول دگریختی بیشتر تحت تاثیر فشردگی حاصل از برش محض قرار گرفته و تاثیر پهنه‌های برشی ایجاد شده طی برش ساده و در مرحله دوم دگریختی بر آن‌ها اندک بوده است (شکل ۲ الف). بودین‌های چین‌خورده در منطقه نشان می‌دهند که تشکیل بودین‌ها مقدم بر چین‌خوردگی بوده و در جریان کوتاه شدگی ابتدا بودین‌ها شکل گرفته‌اند و پس از آن چین‌خوردگی روی داده است. این حالت می‌تواند در اثر تغییرات میدان واتنش از کشش به فشارش در جریان پیشرفت برش محض روی داده باشد. بررسی‌های صورت گرفته توسط شیخ‌الاسلامی و همکاران (۱۳۹۲) نشان می‌دهد عامل دگریختی در منطقه، تنش اصلی شمال شرقی ناشی از همگرایی صفحات ایران مرکزی و توران است. این تنش اصلی به دو مولفه تنش عمودی و تنش برشی تقسیم شده است. در مراحل آغازین همگرایی، بخش عمده‌ای از مولفه عمودی تنش باعث ایجاد اولین مرحله دگریختی در رخساره شیست سبز شده است. اثر این دگریختی که حاصل فشردگی طبقات است باعث شکل‌گیری چین‌های نسل اول، برگوارگی نسل اول و ایجاد لایه‌های بودین شده موضوع این مقاله شده است. در مرحله بعد، همزمان با توسعه دگریختی و فعال شدن تنش برشی در ناحیه، مرحله دوم دگریختی با ایجاد ساختارهای برشی و فرانهادگی ساختارهای جدید بر روی ساختارهای مرحله پیشین در شرایط دگرگونی رخساره آمفیبولیت روی داده است (Sheikholeslami and Kouhpeyma، 2012).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با محاسبه مقادیر کشیدگی در بودین‌های موجود در مرمرهای خلج که طی مرحله اول دگریختی ناحیه‌ای به وجود آمده‌اند، شاخص‌های طولی مورد نیاز برای رسم دایره مور محاسبه شده‌اند. اندازه‌گیری مقادیر واتنش در ایستگاه‌های اندازه‌گیری نشان می‌دهد که واتنش در مرحله اول دگریختی چندان بالا نیست، به‌طوری‌که بیشینه نسبت بیضوی واتنش عدد ۱/۳۶ می‌باشد (جدول ۲). این مرحله از دگریختی حاصل انقباض شدید در راستای عمود بر بیضوی واتنش است که نتیجه آن ایجاد چین‌های نسل اول و بودین‌های غالب جعبه شکلاتی هستند. دایره‌های مور ترسیم شده در ایستگاه‌های مختلف نشان می‌دهند که زاویه

برش بیشینه بین ۴ تا ۲۰ درجه می‌باشد (شکل‌های ۷ و ۹). این بدان معنی است که میزان چرخش مواد طی این مرحله از دگریختی کم، و دگریختی در شرایط برش محض غالب روی داده اســـت. نتایج به‌دست‌آمده با مشاهدات صحرایی ساختارها مطابقت داشته به‌گونه‌ای که چین‌ها و بودین‌های شگل گرفته در مرحله اول به حالت پیوسته دیده می‌شوند. همین ساختارها هنگامی‌که تحت تاثیر مرحله دوم دگریختی برشـــی قرار می‌گیرند به حالت چین‌های کشیده و بی‌ریشه نمایان می‌شوند (شکل‌های ۲ الف و ب). تحلیل واتنش دو بعدی با استفاده از نمودار (شکل ۱۰) بر پایه مقدار کشیدگی بیشینه و کمینه بودین‌ها نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌های مورد بررسی در محدوده میدان یک قرار می‌گیرند. این بدان معنی اســـت که کشـــیدگی در جهات مختلف روی داده و حاصل آن ایجاد بودین‌های تخته شکلاتی و گسله‌های عادی است (Ramsey and Huber, 1983). با استفاده از نمودار شکل ۱۰ مشخص می‌شـــود که در جریان دگریختی مرحله اول مقدار ۰/۵ تا یک برابر تغییر حجم مثبت در ســـنگ‌های ناحیه خلج روی داده است.

منابع

- الیاسی، م.، ۱۳۹۱. مبانی زمین‌شناسی ساختمانی، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۲۸ .

- ســـبزه‌ای، م.، پورلطیفـــی، ع.، بهـــروزی، ا . و جعفری صـــدر، ع.، ۱۳۷۳. پدیده‌های تفریق در ماگماهای اولترابازیک. گدازه‌های اولترامافیک، مافیک و اولاکوژن‌های پالئوزوییک ایران زمین. سیزدهمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی کشور، ۷۹-۶۵

- شیخ‌الاسلامی، م.ر.، حقی پور، ن.، نواب پور، پ.، نواب مطلق، ا.، کوه‌پیما، م.، مافی، آ. و حیدر زاده، ق.، ۱۳۹۲. بررسی‌های زمین‌شناســـی و زمین‌ساختی در پهنه کپه‌داغ-بینالود. پژوهشکده علوم زمین، نشر رهی، ۲۳۴ .

- Alavi, M., 1991. Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. Geological Society of America Bulletin. 103, 983-992.

- Boulin, J., 1988. Hercynian and Eo-cimmerian events in Afghanistan and adjoining regions. Tectonophysics 148, 235-278.

- Ghazi, A, M., Hassanipak, A, A., Tucker, P.J., Mobasher, K. and Duncan, R, A., 2001. 40Ar-39Ar Geochronology and Geochemistry of the Paleo-Tethyan Mashhad ophiolite, NE Iran. Abstract as: Eos (Transactions American Geophysical Union), 82,47, Fall Meeting

- Karimpour, M.H., Farmer, L., Ashouri, C. and Saadat, S., 2006. Major, Trace and REE geochemistry of Paleo-Tethys Collision-Related ganitoids from Mashhad, Iran. Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran, 17,2, 127-145

- Lisle, R. J. and Ragan D. M., 1988. Brevia: Strain from three stretches: a simple Mohr circle solution. Journal of Structural Geology, 10, 905-906.

- Madjidi, B., 1983. The geochemistry of ultrabasic and basic lava flows occurences in northern Iran, In Geodynamic project in Iran. Geological Survey of Iran, report,51, 436-477.

- Nadai, A., 1963. Theory of Flow and Fracture of Solids. Engineering Societies Monographs. McGraw-Hill, New York. 705.

- Ragan, D. M., 2009. Structural geology; An Introduction to Geometrical Techniques, fourth edition. Cambridge University Press, 602.

- Ramsay, J.G., 1967. Folding and Fracturing of Rocks: McGraw-Hill, New York. 410.

- Ramsay, J.G. and Huber M.I., 1983. The Techniques of Modern Structural Geology: Strain Analysis: Academic Press, London. 307.

- Sheikholeslami, M.R. and Kouhpeyma, M., 2012. Structural analysis and tectonic evolution of the eastern Binalud Mountains, NE Iran, Journal of Geodynamics, 61, 23-46.

- Taheri, J. and Ghaemi, B., 1996. Geologi-

cal Map of Mashhad, Scale 1:100,000. Geological Survey of Iran, Tehran.

- Treagus, S. H., 1987. Mohr circles for strain, simplified, Geological Journal, 22, 119-132

- Zulauf, G., Gutierrez-Alonso, G., Kraus, R., Petschick, R. and Potel, S., 2011. Formation of chocolate-tablet boudins in a foreland fold and thrust belt: A case study from the external Variscides (Almograve, Portugal), Journal of Structural Geology, 33, 1639-1649