

تحلیل تنش دیرین در اطراف سد لار (البرز مرکزی)؛ به منظور شناخت ساختارهای مؤثر در فرار آب

صفیه امیدیان^{۱*}، محسن الیاسی^۲، جمشید حسن زاده^۳ و مژگان زارعی نژاد^۴

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد پترولوژی، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، ایران

^۲ استادیار دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، ایران

^۳ دانشیار دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، ایران

^۴ رئیس گروه اطلاعات مرجع (GIS)، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

(دریافت: ۸۷،۲،۱۰، پذیرش نهایی: ۸۷،۴،۳)

چکیده

محدوده مورد تحقیق از لحاظ موقعیت زمین‌شناسی در سازندهای اکثراً آهکی دوران دوم (ژوراسیک و کرتاسه) با روند تقریباً W-NW در جنوب غرب آتشفشان دماوند قرار دارد. در گستره طرح همسو با روند کلی البرز مرکزی، چین‌ها و گسل‌های رانده و معکوس با راستای W-NW (ناشی از جهت فشارش صفحه‌عربی به صفحه‌ایران) عامل شکل‌گیری ساختارهای غالب در منطقه است. بررسی‌های میدانی، برداشت اطلاعات ساختاری و تحلیل رایانه‌ای نتایج حاصل از آن، تغییرات شدید میزان گرادیان تنش در اطراف دریاچه را مشخص می‌کند. مسیر این تغییرات در جهت تکیه‌گاه راست، همراه با اطلاعات صحرایی به روند گسلی اشاره دارد که عامل احتمالی فرار آب از دریاچه است، به نحوی که حدفاصل این تغییرات ناگهانی از شکل میدان تنش دوکی شکل (۱-۰۵) به کلوچه‌ای شکل (۰-۰۵) به صورت یک مسیر خطی بارز با روند W-NW است. این مسیر گسلی با روند قرارگیری خطی حفره‌های فروکش و اولین مکان فرار آب از زیر تکیه‌گاه راست هم‌راستا است. این بررسی به شرایط مشابه حاکم بر نواحی اطراف سد، از جمله محل احداث سد جدید (گزل‌دره) نیز اشاره دارد.

واژه‌های کلیدی: سد لار، فرار آب، شکل میدان تنش، حفره فروکش

Paleostress analysis around the Lar Dam (Central Alborz), to recognize the structures involved in water escape

Omidian, S¹., Eliassi, M²., Hassanzadeh, J³. and Zarenejad, M⁴.

¹Graduate Student of Petrology, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

²Assistant Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

³Associate Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

⁴Head of GIS group, Geological Survey of Iran

(Received: 29 Apr 2008, Accepted: 23 Jun 2008)

Abstract

Lar Dam is located 85 km to the north-east of Tehran. It supplies a fraction of agricultural water in Mazandaran and the drinking water in Tehran. This dam was built in 1980 and 2 water escape ways around it have been explored; one of them is under the right shoulder

of the dam and the other is located north of the dam toward the Haraz road (Ab-e-Ask region). For this reason, new researches are designed for shifting it to west of the same zone (Gozal Darreh). But our investigations show that structural factor (Faulting) is effective for water escape and this agent has expanded to the whole of this region and it has covered new places as well.

Geologically, the studied area is located on calcic formations related to the second and third geological periods (Jurassic and Cretaceous). These formations have a W-NW trend parallel to the general trend in the Central Alborz. In the studied region, folds, thrusts and reverse faults have the same trend is due to continuous pressure from the Arabian plate on the Iranian plate.

Originally, the aim of our research was to obtain the direction of effective stresses that are responsible for forming and expanding the structural factor for water escape. So we considered some structures such as faults, joints and fractures which are useful for reconstructing the tectonic events (the diverse directions of stress with respect to relative time) in this region. "Inversion Method" is the base of tectonic software and is designed with respect to some of these structures. The important point which is also the target of using the slickenside is to exploit the data and return step by step to reach the initial stress conditions.

In order to obtain the direction of the main stress axis in the time of affecting stress using the inversion analysis, a considerable amount of structural data was compiled. All slickenside was categorized into 12 groups, according to Yamaji software (2005) that is known to MIM (Multiple Inversion Method). Four final parameters from software are $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \Phi$ which are the results of solving reduced stress tensor. Φ , the shape of stress field, is a quantitative parameter. So the examination of the trend of changes in the shape of stress field will be reconstructible.

Field work resulting in the structural data and the computer analysis performed afterwards shows intensive changes in the rate of stress field shape all around the dam. The path of these changes of the rate of the stress field shape shows the existence of a new fault beneath the dam which is probably a natural channel for water escape. These abrupt changes are from a prolate stress field shape ($\Phi=5/0-1$) to an oblate stress field shape ($\Phi=0-5/0$) with a linear WNW trend. This path is parallel to the linear trend of the pitch of the sink holes located at the basement of the dam. The first channel of the water escape is beneath of the right shoulder. Based upon detailed studies, the proposed position for constructing a new dam, at the western end of the Lar Dam (Gozal Darreh), is still located on the continuation of the new fault we discovered. In conclusion water would escape through this fault anyway.

Key words: Lar Dam, Water escape, Stress field shape, Sink hole

۱ مقدمه

قسمتی از اراضی استان مازندران و انتقال بخشی از آب ذخیره شده با تونل ۲۰ کیلومتری به نیروگاه آبی کلان و از این محل به تونل و خط لوله انتقال به نیروگاه لوارک و در نهایت به مخزن سد لتیان برای مصارف شرب شهر تهران است.

بررسی‌های زمین‌شناسی گستره لار و پیرامون آن از

محدوده مورد بررسی در فاصله ۸۵ کیلومتری شمال شرق تهران، بین طول‌های جغرافیایی $51^{\circ}43'58''$ تا $52^{\circ}14'32''$ شرقی و عرض‌های $35^{\circ}48'24''$ تا $36^{\circ}00'51''$ شمالی قرار دارد. سد لار در پایین‌دست محل پیوند رودخانه لار با سرشاخه رودخانه دلچای ساخته شده است. هدف از احداث آن تأمین آب کشاورزی

توجه به تحولات ساختاری البرز مرکزی ضروری به نظر می‌رسد. از این رو بررسی میدان تنش مؤثر در شکل‌گیری وضعیت ساختاری محدوده سد لار مورد توجه واقع است. با توجه به تأثیر قطعی ساختارهای این ناحیه از رخدادهای زمین‌شناسی واقع بر البرز مرکزی، اشاره به سرگذشت زمین‌ساختی این محدوده منطقی است. در ادامه نیز به روش‌های پژوهش و نتایج حاصل از آن خواهیم پرداخت.

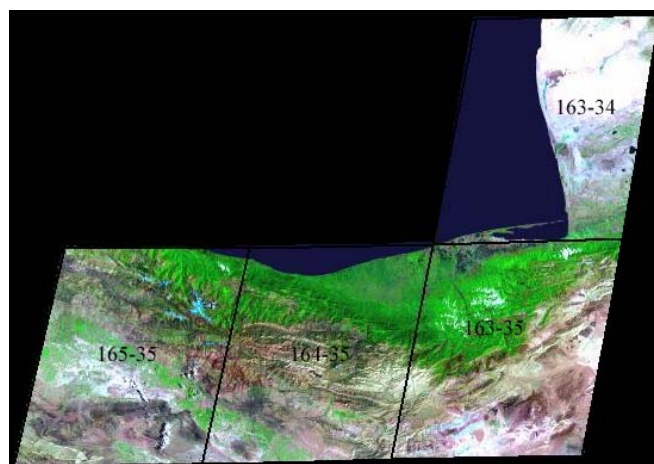
۲ زمین‌ساخت البرز مرکزی

رشته کوه‌های البرز به شکل کمانی عریض، حاشیه جنوبی فرونشستگی پهناور دریای خزر را تشکیل می‌دهند (شکل ۱). اشتوکلین (۱۹۷۴) آن را حاشیه منطقه کوهزایی ایران مرکزی در نظر گرفته است. در بخش غربی محور ساختمان‌ها دارای امتداد NW-SE است. از سوی دیگر در بخش شرقی، ساختمان‌ها دارای محور تقریباً SW-NE هستند. این دو روند متفاوت ساختاری در البرز مرکزی به هم می‌رسند و محل ویژه‌ای را در رشته کوه‌های البرز تشکیل می‌دهند که آتشفشان کواترنری دماوند نیز در محل تلاقی این دو روند ساختاری قرار دارد (آسرتو، ۱۹۶۶).

سال ۱۹۵۵ شروع شد. بعد از طی مراحل عملیات ساختمانی، در اردیبهشت ۱۳۵۹ اولین آبگیری سد صورت گرفت. با ایجاد دو حفره فروکش در بخش شمالی بدنه سد و افزایش آبدهی قابل توجه چشمه‌های هراز و ظهور گلوگاه فرار آب، ناکافی بودن مراحل مطالعاتی طرح مشخص شد.

بررسی‌های دیر هنگام بعدی روشن ساخت که شرایط ساختمانی و کارستی بودن آهک‌ها علت اصلی وقوع این پدیده بوده که تا این زمان هنوز به قوت خود باقی است. (گزارش گروه مهندسی مشاور لار، ۱۳۸۳).

بررسی‌هایی که تاکنون در همین راستا صورت گرفته، بیشتر بر پایه نگاه کلان به عوارض ساختمانی محدوده سد استوار بوده است. ما در این تحقیق تلاش کردیم که در عملیات صحرایی در محدوده دریاچه سد، قدم به قدم و با تسلط بر جزئیات ساختاری به تشخیص عوامل و روند ساختارهای مؤثر در فرار آب بپردازیم. با تأکید بر این نکته که در کنار تحقیقات صحرایی با دید وسیع‌تری به تحولات ساختاری البرز مرکزی نیز توجه داشته باشیم. زیرا گستره مورد بررسی در نزدیکی تغییر روند رشته کوه‌های البرز و پیچیدگی‌های ساختاری ناشی از آن قرار گرفته است. به لحاظ این موقعیت خاص نیز،



شکل ۱. تصویر ماهواره‌ای زون البرز مرکزی پیچیدگی ساختاری این منطقه را به صورت بارزی نشان می‌دهد. ناحیه مورد بررسی در صفحه اطلاعاتی ۳۵-۱۶۴ از مسیر گذر لندست ۷ واقع شده است.

چین‌های بارز، گسل‌های فشاری و روراندهای (thrust fault) بزرگ است. روند عمومی گسلش تقریباً در جهت W-NW است. واحدهای سنگ‌چینه‌ای تشکیل‌دهنده این محدوده به ترتیب زمانی شامل سازندهای شمشک، دلیچای، لار، تیزکوه، گدازه‌های جدید دماوند و رسوبات عهد حاضر است (شکل ۲). به دلیل بنا شدن پایه‌های اصلی ساخت‌گاه سد در واحدهای آهکی شرح جامع‌تر ویژگی‌های این واحدها ضروری است.

سازند دلیچای با سن ژوراسیک میانی (دوگر) در هر دو جناح سازه کنونی و همچنین در موقعیت سد احتمالی (گزل دره) رخنمون دارد. این واحد شامل آهک مارنی تا مارن به رنگ قهوه‌ای روشن تا خاکستری و دارای نفوذپذیری و مقاومت کم و فرسایش‌پذیری متوسط است. این عامل موجب شده که این سازند به صورت تپه‌ماهورهای کم‌ارتفاع دیده شود.

سازندهای لار و تیزکوه از توده‌های مقاوم در مقابل فرسایش هستند. سازند لار، شامل آهک نازک لایه تا توده‌های خاکستری رنگ به همراه نودول‌های چرتی است. از نظر ریخت‌شناسی تشکیلات لار به صورت واحدهای تندشیب و پله مانند روی سنگ‌های شمشک و دلیچای قرار دارد (آلباخ، ۱۹۶۶). تکیه‌گاه سد در هر دو جناح چپ و راست در این واحد بنا شده است. تشکیلات تیزکوه ردیف آهکی دانه‌ریز و متراکم به رنگ روشن و تا حدودی غیر مطبق هستند که از نظر ریخت‌شناسی نیز مشابه سازند لار است (همان منبع). هر دو سازند از واحدهای صخره‌ساز منطقه هستند.

گدازه‌های تراکی آندزیتی حاصل از فوران آتشفشان دماوند، در بخش شمالی دریاچه قرار دارند. حدفاصل آن نیز با رسوبات کواترن که در همه نقاط ساخت‌گاه دیده می‌شود، پوشش داده شده است. به‌طور کلی این رسوبات پی‌آمد فرسایش واحدهای سنگ‌چینه‌ای- پادگانه‌های

براساس تحقیقاتی که در راستای تعیین جهت تنش در البرز مرکزی به انجام رسیده، مشخص شده است که البرز فقط تحت یک رژیم تنشی ثابت واقع نیست. در میان پژوهشگران دهه ۶۰ میلادی، دلناخ (۱۹۶۴) نخستین بار به جنبش‌های گسلی و جهت تنش در شمال شرق تهران اشاره کرد. وی تعدادی از گسل‌های با روند NW-SE و سن ائوسن پسین را که فعالیت دوباره‌ای با سن پلیوسن پسین را نشان می‌دهند، بررسی کرد. چالنگو (۱۹۷۵) در بررسی‌های بعدی به عملکرد مؤلفه افقی راست‌گردی در امتداد گسل‌های اصلی البرز اشاره کرد. بر پایه همین بررسی، آغاز فعالیت جهت تنش شمال شرقی، پایان پلیوسن و یا در آغاز پلیستوسن پیشین دانسته شده که تاکنون نیز ادامه دارد. سازوکار زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای متوسط نیز تأیید می‌کند که جهت تنش NNE، جهت تنش در عهد حاضر است (بربریان، ۱۹۷۶).

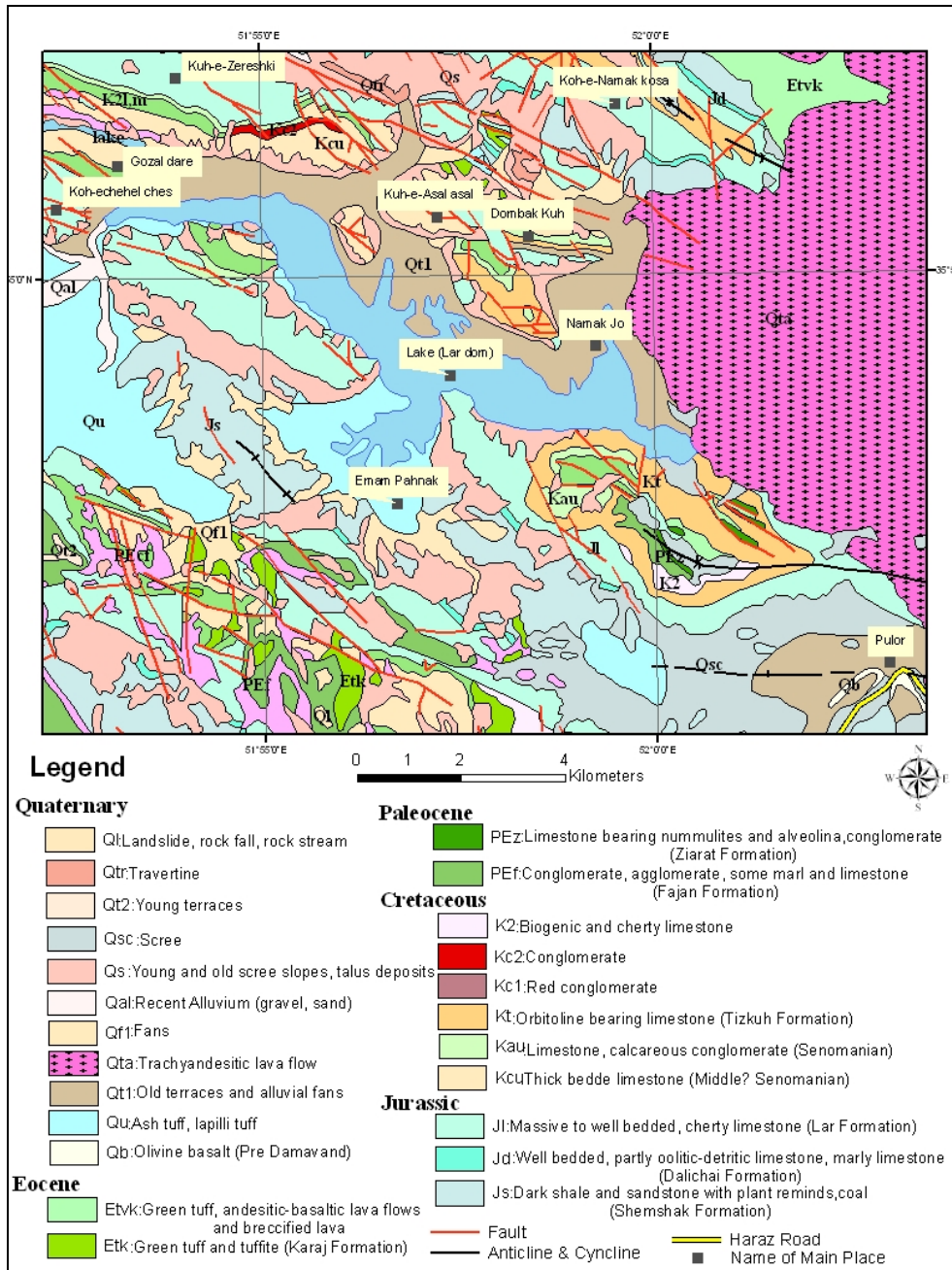
به این ترتیب براساس تحقیقات ساختاری و بررسی سازوکار زمین‌لرزه‌ها، دو جهت تنش فشارشی اصلی به ترتیب زمانی با روندهای NW و NE عامل شکل‌گیری نمای ساختارهای کنونی البرز مرکزی هستند (بربریان، ۱۹۷۶؛ اکسن و همکاران، ۲۰۰۱). با وجود راستای مشابه حاصل از دو تنش پیش‌گفته، شواهد متعددی نشان می‌دهد که در زمان اعمال تنش دیرینه (NW) مؤلفه راستالغز راست‌گرد و در تنش نوزمین‌ساخت کنونی (NE) مؤلفه راستالغز چپ‌گرد نیز در شکل‌گیری و پیچیدگی عوارض ساختمانی مؤثر بوده است. اکسن و همکاران (۲۰۰۱) با استناد به شواهد ساختاری، 5 ± 2 میلیون سال پیش را به‌مثابه زمان تغییر جهت تنش که در نتیجه آن حرکت گسل‌ها از راست‌گرد به چپ‌گرد تغییر یافته است، اعلام کردند.

۳ زمین‌شناسی محدوده دریاچه لار

گستره لار نیز که در بخش جنوبی لبه البرز مرکزی قرار گرفته است، متأثر از زمین‌ساخت این ناحیه دارای

زمین‌شناسی و نسبت به آتشفشان دماوند نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، روند شاخص ساختارها و گسل‌های منطقه، بیشتر در جهت شمال غرب است.

حاشیه بستر رودخانه و همچنین پادگانه‌های قدیمی و اکثراً فاقد سخت‌شدگی و نفوذپذیری متوسط تا زیاد هستند. در شکل ۲ موقعیت سد لار روی واحدهای



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی محدوده اطراف سد لار که از یکپارچه کردن نقشه‌های زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ دماوند و شرق تهران در محیط GIS تهیه شده است.

۴ بررسی‌های میدانی

تعیین جهت تنش‌های مؤثر در شکل‌گیری و زایش ساختارهای زمین‌شناختی از اساس تحلیل دینامیکی محسوب می‌شود (انزلیه، ۱۹۹۰). در چند دهه گذشته براساس روش‌های ساختاری، زمین‌فیزیکی و دستگاهی، تحولات مهمی در پایه‌های این نوع تحلیل ایجاد شده است. استفاده از روش‌های تکتونیکی، کارآمدترین روش برای تعیین جهت تنش با توجه به روش‌های سه‌گانه تحلیل دینامیکی است. توجه به ساختارهایی مانند گسل، درز و شکاف که به نحوی سرگذشت ساختاری منطقه را در خود ثبت کرده باشند، از راه‌کارهایی مفید در بازسازی مراحل متفاوت جهت و زمان نسبی اعمال تنش تا ثبت اثرهای آن است. روش برگشتی (Inversion method) که پایه طراحی بسیاری از نرم‌افزارهای ساختاری است، بر استفاده از چنین ساختارهایی تکیه دارد. این روش شامل بازگشت قدم به قدم و رسیدن به شرایط اعمال تنش مولد آنها است.

داده‌های ساختاری با هدف دستیابی به موقعیت محورهای اصلی تنش در زمان اعمال تنش با استفاده از تحلیل برگشتی، در گستره وسیعی در اطراف دریاچه، گردآوری شد. این محدوده از سمت شرق دریاچه تا امامزاده اسماعیل، از سمت شمال تا حریم راندگی ورارود و یک ایستگاه در منطقه ناندل، در جنوب تا منطقه امام پهنک و یک ایستگاه در منطقه گل زرد و از سمت غرب در حریم تأثیر گسل گزل‌دره تا کوه کمردشت را دربرمی‌گیرد. جمع‌آوری اطلاعات خش‌لغز (Slickenside)، درزه و شکاف، شیب و امتداد لایه‌ها از جمله موارد مورد بررسی در صحرا بود. تقریباً همه واحدهای سنگی که در منطقه با هدف پی‌جویی خش‌لغز بررسی شد، این عارضه را ثبت کرده‌اند. در بعضی از نواحی از جمله تکیه‌گاه راست سد، سازند

تیزکوه افزون بر داشتن خش‌لغز به شدت نیز برشی شده بودند. این وضعیت گسلیده و خردشده همراه با توسعه قابل توجه شبکه درز و شکاف‌ها در بخش‌های زیادی از ناحیه دیده می‌شد. نمونه‌ای از اثرات خش‌لغز روی صفحه گسل در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳. در تصویر نمونه‌ای از یک صفحه دارای خش لغز نمایش داده شده است.

حفره‌های فروکش وسیعی (شکل ۴) که در رسوبات واقع در حدفاصل بخش شمالی دریاچه و کوه عسل ایجاد شده‌اند، گواه خوبی بر تکتونیزه بودن واحدهای سنگی این محدوده هستند. گرچه با توجه به جنس غالباً آهکی واحدهای سنگی انتظار داریم که ایجاد و گسترش این حفره‌ها به پدیده کارستی شدن مربوط باشد. ولی قرارگیری آنها در یک روند خطی و مهم‌تر از آن ادامه این روند به زیر تکیه‌گاه راست، نشان می‌دهد که احتمالاً نقش عوامل تکتونیکی در مقابل موارد دیگر از اهمیت بسزایی برخوردار است. شایان ذکر است، یکی از دو نقطه‌ای که فرار آب سد از محل آن رخ می‌دهد نیز در زیر تکیه‌گاه راست و در مسیر روند خطی حفره‌های فروکش و بخش برشی و گسلیده جناح راست است (شکل ۶).

گسلی دیگر ندارد.

با قبول این فرضیه‌ها، لازم است داده‌ها بر اساس شرایط خاصی دسته بندی شوند. یکی از این عوامل، تفکیک داده‌ها با توجه به جنس سنگ‌ها است.

با ایجاد یک واقعه گسلش، صفحات با جهت یابی‌های متفاوت همگی تحت اثر یک میدان تنش معین و با یک تانسور معلوم لغزیده خواهند شد (لایل، ۱۹۸۹). نکته مهم که از اهداف استفاده از اطلاعات لغزش گسلی نیز محسوب می‌شود، در بهره‌گیری از این داده‌ها و بازگشت گام به گام تا رسیدن به شرایط اولیه زایش گسل‌ها است. شرایطی که بیانگر جهت و موقعیت محورهای اصلی تنش و شکل میدان تنش $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \Phi)$ خواهد بود. در زبان ریاضی، از ۹ مؤلفه تعریف شده در فضای سه‌بعدی بر یک جسم، تنها رسیدن به موقعیت و جهت چهار مؤلفه شناسایی شده است. بنابراین از چهار پارامتر معلوم تانسور تنش اصلی برای محاسبه تانسور تنش استفاده می‌شود. تانسوری که از این راه محاسبه می‌شود و نزدیک‌ترین تانسور به تانسور واقعی تنش است، "تانسور تنش کاهش یافته" (reduced stress tensor) نام دارد (انزلیه، ۱۹۹۴):

$$T = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \quad \text{تانسور محورهای اصلی تنش} \quad (1)$$

پارامترهای مربوط به حل تانسور تنش کاهش یافته $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \Phi)$ به‌طور غیر مستقیم از میزان مقاومت اصطکاکی $(\mu = \frac{\sigma_n}{\tau})$ توده سنگی تأثیر می‌پذیرند. در صورتی که مجموعه‌های سنگی چندین نسل تنش را تجربه کرده باشند، داده‌های برداشت شده ناهمگن خواهد بود. در این صورت لازم است این داده‌ها از هم تفکیک شوند.

تاکنون بر این مبنای برنامه‌های رایانه‌ای متعددی برای حل تانسور تنش ارائه شده است. لزوم توجه کاربر به



شکل ۴. نمایی از دو حفره فروکش واقع در ساحل شمالی دریاچه که در کادر زردرنگ مشخص شده است (سمت دید: شرق).

در محدوده غرب سد (گزل دره) نیز بخش‌های برشی شده از توسعه قابل توجهی برخوردارند. این زون‌ها نه تنها در جهت گسل‌های اصلی قرار دارند، بلکه در دو جهت N30-N60 نیز گسترش یافته‌اند.

۵ کلیات تحلیل خش لغز

مطابق شکل ۳، اثر اعمال تنش روی واحدهای سنگی در وضعیت شکننده با آرایه منظمی از خطوط موازی (خش لغز) در جهت حداکثر تنش برشی ثبت می‌شود (بوت، ۱۹۵۹ و والاس، ۱۹۵۱). استفاده از اثرات خش لغز روی صفحات گسلی، برای مشخص کردن جهت مؤثر اعمال تنش و شکل میدان تنش بر سه فرض اساسی استوار است (انزلیه، ۱۹۹۰).

۱. لغزش در جهتی موازی با حداکثر تنش برشی اعمال شده روی صفحه جابه‌جایی رخ می‌دهد. برای این منظور لازم است سمت لغزش (اثر خش لغز) روی چند گسل (صفحات دارای خش لغز با مقیاس متوسط) با موقعیت یابی‌های مختلف شناسایی شود.
۲. توده‌های سنگی دارای صفحات خش لغز با جهت یابی‌های متفاوت تحت تأثیر یک میدان تنش، لغزیده شده‌اند.
۳. حرکت یک گسل اثری بر سمت لغزش صفحات

استفاده صحیح از این برنامه‌ها به منظور اطمینان از صحت داده‌های برداشت شده از منطقه، تشخیص صحیح حرکت دو دیواره گسلی نسبت به یکدیگر و همچنین تعیین جایگاه داده‌ها بر مبنای زمان‌های رویدادهای زمین‌ساختی از اهمیت شایانی برخوردار است. در این تحقیق از نرم‌افزار (Multiple Inverse Method) MIM که یاماجی آن را در سال ۲۰۰۰ طراحی کرد و تا سال ۲۰۰۶ بهبود یافت، استفاده شد. کارایی این نرم‌افزار در جدایش و نمایش داده‌های همگن از یک مجموعه ناهمگن، قابل توجه است. البته نقش کاربر در همگن‌سازی و جدایش داده‌هایی را که تحت اثر یک میدان تنش لغزیده شده‌اند، نباید از نظر دور داشت.

حالت عمومی نمایش مقادیر محورهای اصلی تنش به صورت $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ است که به ترتیب معرف موقعیت محور اصلی تنش بیشینه، میانه و کمینه‌اند. تغییر موقعیت فضایی این محورها نسبت به یکدیگر، به ایجاد یک بیضوی می‌انجامد. بیضوی نمایانگر محدوده تأثیر مؤلفه‌های تنش است. به همین دلیل کمی کردن بیان شکل بیضوی تنش، معیار مناسبی برای نمایش تغییرات مقادیر سه محور نسبت به یکدیگر است، به طوری که با توجه به تغییرات مقدار سه محور اصلی، تعاریف متفاوتی برای شکل میدان تنش ارائه می‌شود:

(کری - گایاردیس و مرسیر، ۱۹۸۷)

$$R = \sigma_1 - \sigma_3 / \sigma_2 - \sigma_3 \quad (۲)$$

(پیشاپ، ۱۹۶۶)

$$\Phi = \sigma_2 - \sigma_3 / \sigma_1 - \sigma_3 \quad (۳)$$

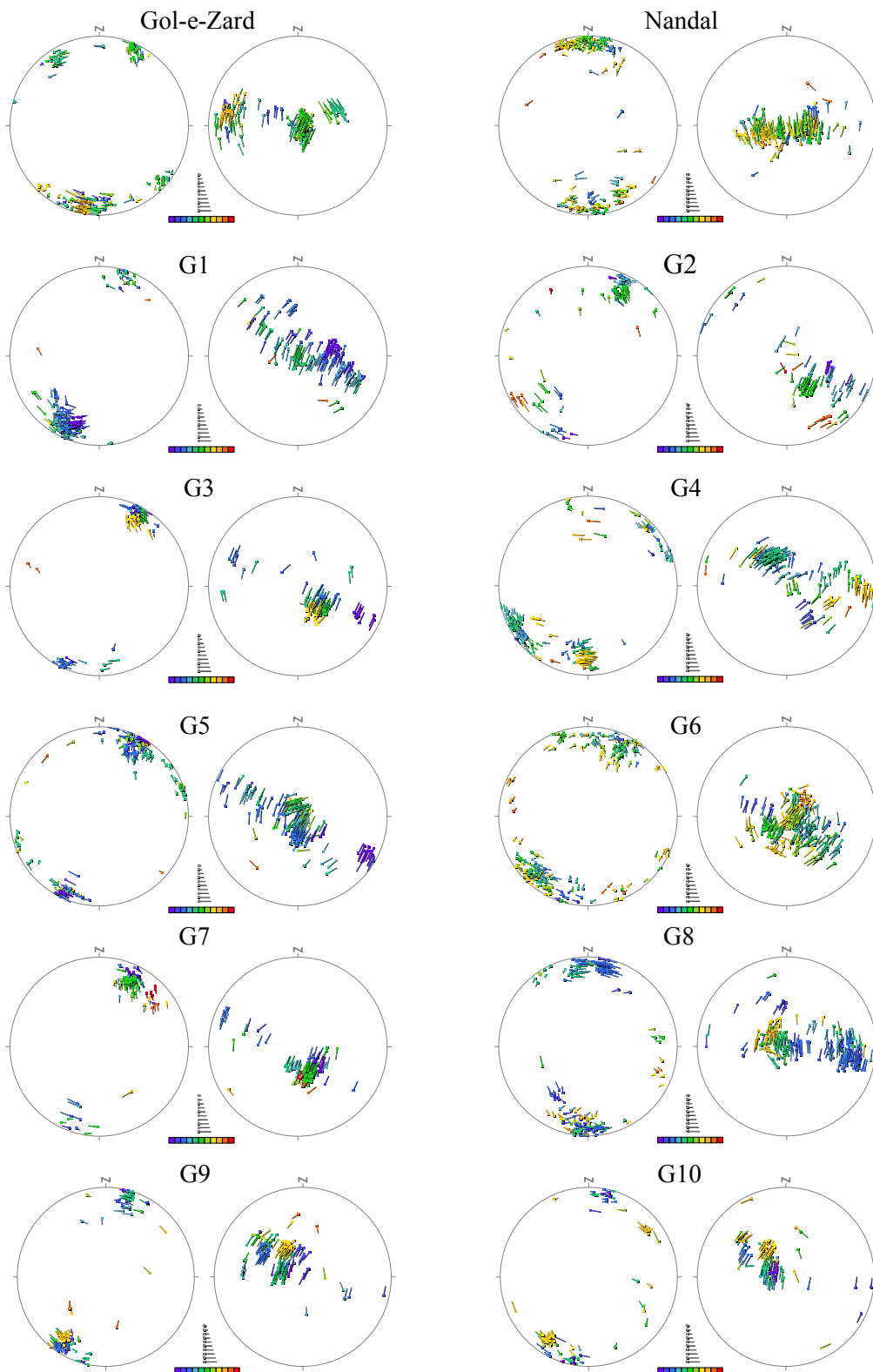
نسبت Φ بین دو مقدار صفر تا یک نوسان می‌کند. شکل بیضوی به ترتیب برای این دو مقدار، با اصطلاحات دوکی (Prolate) و کلوچه‌ای (Oblate) بیان می‌شود. در نوشتار کنونی این نسبت مطابق روش انژلیر فرض شده است. فاکتور شکل، نسبت بین دو اختلاف تنش است و

ارتباطی با مقادیر مطلق تنش‌های اصلی ندارد.

در حریم سد ۳۵۰ خش‌لغز گسلی برداشت شد. به این ترتیب که برای هر مورد شیب و امتداد صفحه دارای خش و همچنین آزیموت و پلانژ عارضه خطی حک شده روی آن به همراه جهت حرکت دیواره‌های گسل قرائت شد. سپس داده‌ها براساس موقعیتشان در جایگاه توالی سنگ‌شناسی محدوده تفکیک شده و در نهایت با اعمال فاکتورهای نرم‌افزاری به منظور همگن‌سازی، در ۱۲ دسته تفکیک شدند. هر دسته دارای ماتریس جداگانه‌ای است.

با حل تانسور تنش برای هر دسته پس از پایدار کردن داده‌ها، دو نمودار استریونت نمایانگر موقعیت محور σ_1 و σ_3 میزان نسبت اختلاف تنش‌ها (Φ) است. هر رنگ معرف مجموعه‌ای از داده‌های آماری است که تحت اثر یک میدان تنش معین لغزیده شده‌اند (یاماجی، ۲۰۰۰). در برنامه رایانه‌ای مورد استفاده، برای نمایش ترسیمی شکل میدان کدهای رنگی به گونه‌ای تعریف شده است که نوسان شکل میدان تنش را در دو حد نهایی صفر تا یک به ترتیب با رنگ‌های نیلی و سرخ مشخص می‌کند. هر گروه از مجموعه‌های رنگی نمایش داده شده روی جفت استریونت‌های مربوط به هر ایستگاه، شامل گروه نقاط دنباله‌داری هستند که برای استریونت σ_1 سر آنها موقعیت محور σ_1 ، سوی دنباله موقعیت محور σ_3 و طول دم شاخص پلانژ محور σ_1 (بین صفر تا نود درجه) است (یاماجی، ۲۰۰۲). با توجه به هدف این تحقیق بدون توجه به تغییرات موقعیت محورهای اصلی تنش در اطراف سد، فقط میزان تغییرات شکل میدان تنش در حالت کلی مد نظر قرار گرفت.

برای هر ۱۲ ایستگاه داده‌ها تفکیک و شکل میدان و موقعیت محورهای اصلی تنش به دست آمد. در شکل ۵ زوج استریونت این دسته‌ها نمایش داده شده است که به ترتیب سمت راست و چپ معرف موقعیت محورهای σ_3



شکل ۵. زوج استریوت‌های مربوط به دسته‌های همگن شده در شرایط اولیه. کل ۳۸۰ داده گسلی براساس جدایش ماتریس‌ها در ۱۲ دسته پایدار شده‌اند. برای هر دسته، استریوت‌های سمت چپ و راست به ترتیب معرف موقعیت محورهای σ_1 و σ_3 هستند. این موقعیت در همه دسته‌ها یکسان است. به موقعیت یکسان فاز $\Phi = 0.5$ با رنگ سبز در کل دسته‌ها توجه شود.

و در زمان حال، محور اصلی σ_3 را براساس محورهای چرخش محاسبه شده برای آن، در هر دسته و فاز تفکیک شده چرخانده و قائم می‌کنیم که متقابلاً محورهای σ_1 و σ_2 مربوط به آنها افقی می‌شوند. در ابتدا محور چرخش و زاویه چرخش را برای هر دسته محاسبه می‌کنیم و با توجه به آن همه داده‌های آن دسته را می‌چرخانیم. نتایج نهایی حاصل از چرخش داده‌ها و رسیدن به شکل میدان تنش در زمان اولیه در جدول ۱ آورده شده است.

همان‌طور که هم از داده‌های جدول ۱ و هم از شدت تغییرات شکل میدان تنش (شکل ۷) مشخص می‌شود، این محدوده با وجود وسعت کم، گستره وسیعی از میدان‌های تنشی را نشان می‌دهد. بیشترین تمرکز کشیدگی گرادیان تغییرات شکل میدان تنش، حاشیه شمالی دریاچه را پوشش می‌دهد. با پی‌گیری روند کاهش شکل میدان، این مسیر به صورت متمرکزی به حاشیه جنوبی دریاچه می‌رسد. به عبارت دیگر مسیر عطف تغییر شکل میدان تنش از وضعیت دوکی در بخش شمالی به وضعیت کلوچه‌ای غالب در قسمت جنوبی، در یک مسیر خطی رخ می‌دهد. مسیر یاد شده به وضوح در شکل ۷ با تمایز رنگ مشخص شده است. نکته قابل توجه در مقایسه شکل میدان تنش در دو حالت قبل و بعد از چرخش داده‌ها در نبود تغییر بارز در شکل میدان تنش از زمان اعمال تنش فشاری محض تاکنون است. این نشان می‌دهد که محدوده موردنظر از زمان اعمال تنش فشاری محض تاکنون در این وضعیت نسبتاً پایدار به سر برده است.

شدت تغییرات میدان تنش در این محدوده کوچک، با توجه به نبود تغییرات بارز در توالی سنگی حریم سد، احتمالاً نشانگر تفاوت ساختاری زیرسطحی است که حداقل از زمان اعمال رژیم تنش فشاری محض، این منطقه را متأثر کرده است.

در شکل ۶، مطابق تحقیقات صحرائی نشان داده شده است که حفره‌های فروکش ایجاد شده در اطراف دریاچه

σ_1 هستند. σ_1 در کل دسته‌ها موقعیت یکسانی را نشان می‌دهد که به سمت فشارش صفحه عربی به ایران (N10-40E) اشاره دارد. برای هر دسته موقعیت σ_3 در مرکز استریونت قرار می‌گیرد و سازوکار فشاری اعمال شده را نشان می‌دهد. همچنین در ۸۰ درصد دسته‌ها، فاز سبز رنگ با شکل میدان تنش $\Phi = 0.5$ نه تنها تکرار می‌شود، بلکه از نظر موقعیت محورهای اصلی تنش با دسته اصلی مشابه است. به دلیل مشابهت‌های آماری در حل تانسور تنش و رسیدن به یک ماتریس یکسان هم در دسته‌های اصلی و هم در فاز $\Phi = 0.5$ ، امکان مقایسه متغیر چهارم، یعنی شکل میدان تنش، فراهم می‌شود.

مطابق جدول ۱ شکل میدان تنش برای این دسته‌ها بین اعداد ۰٫۸ تا ۰٫۱ تغییر می‌کند که از لحاظ ترسیمی به ترتیب نمایانگر شکل میدان دوکی ($\Phi = 1$) تا نزدیک کلوچه‌ای ($\Phi = 0$) است. روند شدید تغییرات شکل میدان تنش به مراحل متعدد اعمال تنش در این محدوده اشاره دارد. کمی بودن پارامتر Φ این امکان را فراهم آورد که به منظور بررسی شکل میدان تنش، شبکه‌ای از نقاط هم‌تراز شاخص میدان تنش تهیه و نتایج قابل توجه آن بررسی شود (شکل ۷). به کمک این شبکه مسیرهای دارای ساختارهای پنهان قابل پیگیری است.

از آنجا که صفحات گسلی نیز همراه با دیگر ساختارها متأثر از وضعیت پویای زمین در طی زمان از نظر موقعیت فضایی تغییر می‌کنند، دستیابی به حالت اولیه در زمان گسلش ضروری بود. این امر به منظور مقایسه تغییرات معنادار تغییرات شکل میدان تنش در وضعیت نهایی کنونی (finite) و حالت اولیه صورت گرفت. برای دستیابی به حالت اولیه در زمان گسل خوردگی، بر اساس نظریه اندرسون محورهای اصلی تنش‌های محاسبه شده را که مربوط به گسل‌های برداشت شده در حالت نهایی بوده است می‌چرخانیم و به حالت اولیه برمی‌گردانیم.

به دلیل فشارشی بودن منطقه مورد بررسی در گذشته

شکل ۷-الف و ۷-ب). همان گونه که مشاهدات صحرایی نیز نشان می‌دهد، از دو مسیر شناخته شده فرار آب قطعاً گریزگاه واقع در جناح راست با این عامل پنهان ساختاری منطبق است.

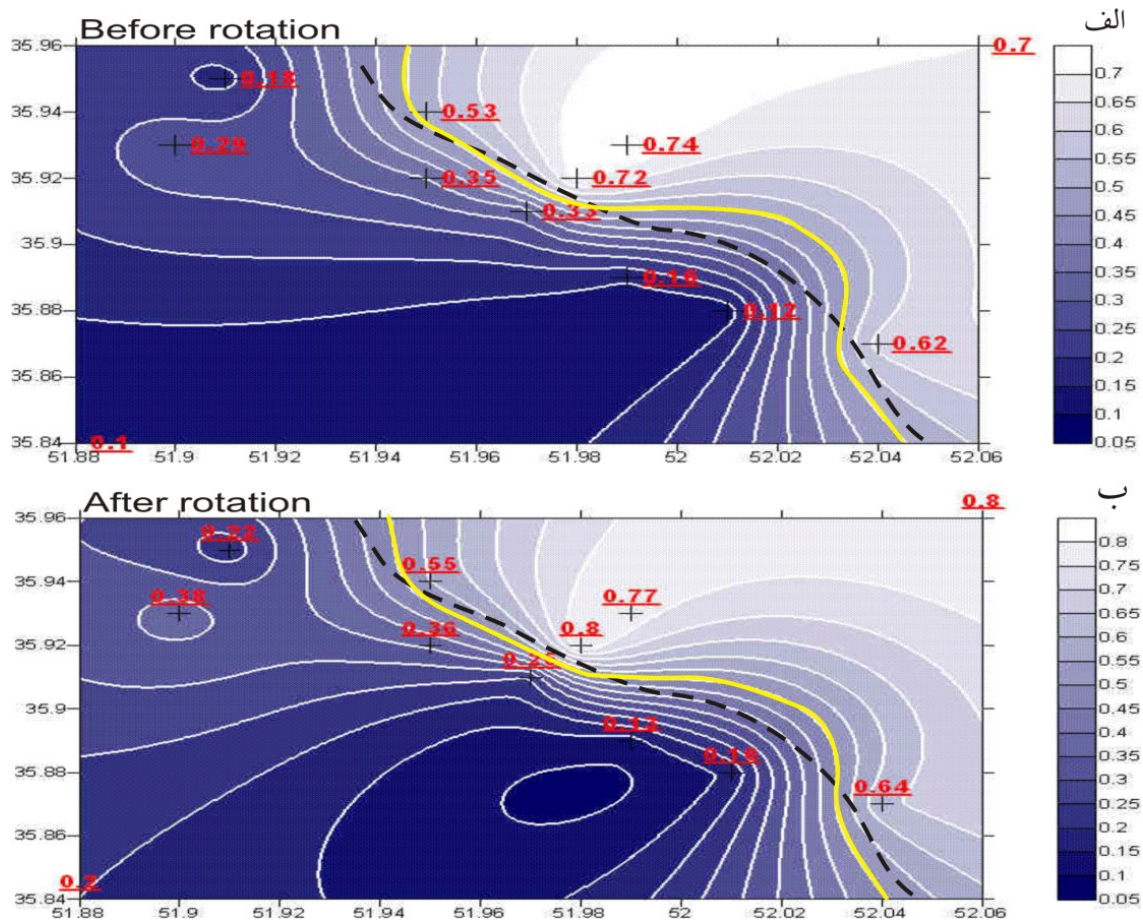
و نقطه فرار آب در زیر تاج سد (علامت ستاره در شکل ۶)، در یک روند خطی قرار می‌گیرد. همان طور که به وضوح دیده می‌شود، این روند با مسیر تغییرات شکل میدان تنش از کلوچه‌ای به دوکی هم‌راستا است (مقیاسه

جدول ۱. اطلاعات ایستگاه‌های ۱۲ گانه شامل زاویه و محور چرخش محور σ_3 و شکل میدان تنش در قبل و بعد از چرخش داده‌های گسلی هر ایستگاه.

دسته‌های اصلی	زاویه چرخش (°)	محور چرخش (°)	Φ قبل از چرخش	Φ بعد از چرخش	بعد از چرخش	
					σ_1	σ_3
Gol-e-zard	339	14	0/1	0/2	205/6-7/5	309/8-71/1
Nandal	99	50	0/7	0/8	203/1-9/5	310/9-61/4
G ₁	181	9	0/62	0/64	183/5-3/3	296/6-81/7
G ₂	21	15	0/12	0/16	3/9-3/5	212/9-85/5
G ₃	47	32	0/1	0/13	207/1-12/7	82/8-68/1
G ₄	193	3	0/72	0/8	30/8-11/3	133/5-47/6
G ₅	145	12	0/74	0/77	2/9-7/9	186-82/1
G ₆	250	6	0/33	0/25	206-13/8	8/1-74/5
G ₇	51	20	0/35	0/36	31/1-5/9	217/3-84
G ₈	150	10	0/53	0/55	27/1-2/3	128/6-78/7
G ₉	336	13	0/29	0/38	25/6-17/9	163-66/4
G ₁₀	314	19	0/16	0/22	184/1-2/5	71/9-83/5



شکل ۶. بررسی موقعیت حفره‌های فروکش (با دایره سفید رنگ) و محل فرار آب (با علامت ستاره) از زیر سد لار با توجه به روند تغییرات شکل میدان تنش و ساختارهای پنهان. خط قرمز رنگ علاوه بر نمایش قرارگیری خطی محل فرار آب از زیر تکیه‌گاه راست سد و حفره‌های فروکش، نمایانگر راستای حد واسط بین شکل میدان تنش کلوچه‌ای و دوکی در ایستگاه‌های ۱۲ گانه است.



شکل ۷. مقایسه شدت تغییرات شکل میدان تنش در اطراف سد لار در دو مورد قبل (الف) و بعد (ب) از چرخش داده‌ها. مسیر زرد رنگ نمایش داده شده در هر دو شکل، از ردیابی میزان شکل میدان تنش ۰/۵ (محل عطف شکل میدان تنش کلچه‌ای به دوکی) به دست آمده است. این روند با خط فرضی گذرنده از حفره‌های فروکش و محل فرار آب از زیر تکیه‌گاه راست سد (خط چین سیاه)، تقریباً هم‌راستا است.

۶ بحث و نتیجه‌گیری

بررسی‌های صورت گرفته پیرامون گستره لار و گزل دره نشان می‌دهد که مسیرهای بررسی شده علاوه بر گسل‌های اصلی، با شماری از گسل‌های فرعی نیز بریده شده‌اند. این منطقه به دلیل واقع شدن در حریم گسل بزرگ مشاء، شمال تهران و گسل‌های کوچک متعدد دیگر، دارای وضعیت تکتونیکی پیچیده‌ای است. زون‌های برشی حاصل از عملکرد این گسل‌ها با توسعه قابل توجهی در راستاهای گوناگون دیده می‌شود.

با استفاده از تحلیل تنش دیرین و به دست آوردن موقعیت محورهای اصلی تنش (σ_1 : N10-40E و σ_3 نزدیک به قائم) در زمان اعمال تنش، نشان داده شد که ساختارهای این منطقه نیز متأثر از وضعیت تکتونیکی حاکم بر صفحه ایران است. تعدد فازها و دسته‌های تفکیک شده در این ناحیه کوچک، حاکی از شدت عملکرد تنش است. با تحلیل داده‌های خش‌لغز گسلی، شبکه‌ای از نقاط هم‌تراز شاخص میدان تنش نیز به دست آمد که با آن

احداث سد جدید پیشنهاد می‌شود.

منابع

مهندسين مشاور لار، ۱۳۸۳، گزارش مطالعات لرزه‌خیزی در اطراف سد لار.

نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ دماوند، ۱۳۷۵، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ شرق تهران، ۱۳۷۶، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

Allenbach, P., 1966, Geologic und petrography des Damavand und Seiner umgebung (Zentral Elburz), Iran. Geol. Mitt., Inst. Eth univ.

Anderson, E. M., 1951, The dynamics of faulting and dyke formation with application to Britain, Olivier & Boyd, Edinburgh, p. 206.

Angelier, J., 1994, Fault slip analysis and paleostress reconstruction: In Continental Deformation p. L. Hancock, ed., p. 53-100. pregamon, Oxford.

Angelier, J., 1990, Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress III: a new rapid direct inversion method by analytical means. Geophys. J. Int., **103**, 363-376.

Assereto, R., 1966, Geological map of upper Djajrud and Lar valleys (Central Elburz, Iran). Inst. Geol. Univ. Milano, Serie G, Publ. No. 232, 86 p.

Axen, G. J., Lam, P. S., Grove M., Stocklin, D. F., and Hassanzadeh, J., 2001, Exhumation of the West-Central Alborz Mountains, Iran, Caspian Subsidence, and Collision-related tectonics: Geophysics, **29**, 559-562.

Berberian, M., 1976, An explanatory note on the first seismotectonic map of Iran; A seismotectonic review of the country. In Contribution to the seismotectonics of Iran (Part II). Geological Survey of Iran, p. 518.

Bishop, A. W., 1966, The strength of soils as engineering materials: Geotechnique, **16**, 91-128.

Bott, M. H. P., 1959, The mechanics of oblique slip faulting, Geol. Mag., **96**, 109-117.

Carey-Gailhardis, E., and Mercier, J. L., 1987, A numerical method for determining the state of stress using focal mechanism of earthquake populations. Application to Tibetan teleseisms and microseismicity of southern Peru. Earth

مسیرهای دارای ساختارهای پنهان قابل پی‌گیری است. این مسیر کوتاه مشخص‌کننده تغییرات بارزی در میدان است. با توجه به نبود تغییرات بارز در توالی سنگی حریم سد، احتمالاً تفاوت ساختاری زیرسطحی عامل این پدیده است. همان‌گونه که مشاهدات صحرائی نیز نشان می‌دهد، از دو مسیر شناخته شده فرار آب، قطعاً یکی با این عامل پنهان ساختاری منطبق است. لازم به ذکر است که در تأیید این مطلب، روند پیوسته قرارگیری حفره‌های فروکش و محل فرار آب از زیر تاج سد (واقع در شمال غرب دریاچه) با روند تغییرات شکل میدان تنش که به صورت ناگهانی و سریع از شکل کلوچه‌ای در شمال سد به دوکی در جنوب سد تغییر یافته، هم راستا است. با استفاده از داده‌های میدانی و تحلیل رایانه‌ای نتایج آن، وجود مسیرهای بارز شکستگی در فرار آب شناسایی شد.

۷ پیشنهادات

در این محدوده، بررسی سازوکار گسل‌های مهم در خلال عمر مفید سازه سد بدیهی به نظر می‌رسد. به علاوه، با توجه به اقدام به تغییر حوضه سد لار به سمت غرب موقعیت کنونی (گزل دره) عملی ساختن تحقیقات گسترده برای شناسایی گسل‌ها و شکستگی‌های زیرسطحی ضروری است. نتایج حاصل از تحلیل تحقیقات صحرائی در حاشیه شرقی سد، قابل تعمق است. در این منطقه که برای محل احداث سد جدید پیشنهاد شده، توسعه شبکه درز و شکاف و زون‌های برشی در مقیاس بسیار وسیع، نمایانگر تأثیر همه‌جانبه این منطقه از تحولات البرز مرکزی است. از این‌رو مشکلات کنونی سد لار که صرفاً به دلیل جایگاه خاص تکتونیکی این سازه است، با تغییر مکان آن به درون همین حوضه، تکرار خواهد شد. به همین دلیل استفاده از کاوش‌های عمقی در کنار تحقیقات صحرائی، با هدف تعیین دقیق موقعیت ساختارهای پنهان و دستیابی به مناسب‌ترین محل برای

- Planet. Sci. Lett., **82**, 165-179.
- Dellenbach, J., 1964, Contribution a l'etude geologique de la region situee a l'est de Tehran (Iran): Fac. Sci., Univ. Strassbourg (France), 117p.
- Lisle, R. J., 1989, Paleostress analysis from sheared dike sets: Geol. Soc. Am., **101**, 968-972.
- Summerfield, Michael A., 2000, Geomorphology and Global Tectonics John Willey & Sons.
- Stocklin, J., 1974, Northern Iran: Alborz Mountains, in A.M., Spencer, ed., Mesozoic-Cenozoic orogenic belts data for orogenic studies; Alpin-Himalayan Orogens: Geological Society (London) Special Publication, **4**, 212-234.
- Tchalenko, J. S., 1975, Seismotectonics framework of the north Tehran fault. Tectonophysics, **29**, 411-420.
- Wallace, R. E., 1951, Geometry of shearing stress and relation to faulting: J. Geol., **59**, 118-130.
- Yamaji, A., 2000b, The multiple inverse methods: a new technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data. J. Struct. Geol., **22**, 441-452.
- Yamaji, A., 2002a, Are the solution of stress inversion correct? Visualization of their reliability and the separation of stresses from heterogeneous fault-slip data. J. Struct. Geol., **25**, 241-252.