

مدل‌سازی ریاضی تنش موثر ناشی از مخزن سد کرخه و اثر آن در ایجاد گسیختگی

روی گسل دالپری

مریم هدهدی^{۱*} و نصرالله کمالیان^۲

^۱ دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران
^۲ استادیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۷/۹/۲، پذیرش نهایی: ۸۸/۲/۲۲)

چکیده

در تحقیق حاضر امکان بروز گسیختگی ناشی از اثر تنش دریاچه سد روی یک گسل مشخص به صورت مدل‌سازی ریاضی با شیوه‌ای نوین تشریح شده است. با استفاده از این روش امکان بروز گسیختگی القایی ناشی از اثر دریاچه سد کرخه روی گسل دالپری که یکی از مهم‌ترین و فعال‌ترین چشمه‌های لرزه‌زا، با استفاده از قاعده موهور-کلمب، در محدوده پیرامون ساختگاه سد کرخه است، مدل‌سازی شد و رابطه آن با شرایط مخزن مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. با همین هدف، بخشی از این گسل که در محدوده موثر ساختگاه واقع شده است، به صورت صفحه گسیختگی با طول، شیب، روند و بردار لغزش مشخص به صورت دوبعدی مدل شد و پارامترهای متفاوت تنش روی آن مورد محاسبه، تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در این منطقه از زاگرس، هنوز تحقیقات دقیقی از شیب گسل‌ها در دست نیست، از این رو برای تحلیل بهتر تنش القایی، گسل پیش‌گفته در شیب‌های متفاوت بین ۱۵ تا ۶۰ درجه مدل شده است. دریاچه سد کرخه نزدیک به بخش فرادیواره گسل رورانده دالپری قرار گرفته است، انتظار می‌رود مخزن براساس پاسخ کشسانی محیط بتواند موجب تاخیر در زمان بروز گسیختگی این گسل و در نتیجه افزایش پایداری پوسته شود، این موضوع به خوبی در تحلیل نظری تنش ناشی از مخزن در گسل دالپری نیز مشاهده شده است؛ نتایج حاصل در قطعه‌ای از گسیختگی سطحی گسل دالپری نشانگر افزایش پایداری پوسته در همه شیب‌ها و در قطعه‌ای از گسیختگی پنهان این گسل که تا نزدیکی پایین دست ساختگاه سد ادامه یافته، مبین امکان وقوع زمین‌لرزه القایی تنها در شیب ۱۵ درجه و در اعماق کمتر از ۲٫۵ کیلومتر است؛ در این شیب بیشینه توان برشی القایی ناشی از اثر دریاچه سد در راستای بردار لغزش تقریباً ۰٫۱۲ بار برآورد شده که در عمق تقریباً ۱ کیلومتری قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: لرزه خیزی القایی مخازن، تنش کلمب، پایداری گسل، سد کرخه

Mathematical modeling on the Karkheh reservoir stresses and its application to the Dalpari fault

Hodhodi, M.¹ and Kamalian, N.²

¹Ph.D. Student of Geophysics, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

²Assistant Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 22 Nov 2008, Accepted: 12 May 2009)

Abstract

In this research, a new mathematical modeling on strength changes due to reservoir elastic stresses across the preexisting fault plane is introduced. The method has been applied to the Dalpari fault, which is one of the potential seismic sources in the vicinity of the Karkheh reservoir. In this method the distribution of total stress across the fault cannot

be determined because the initial stress is unknown; the pore pressure due to the reservoir is also not considered. The mathematical modeling method has been explained briefly in the following.

The lake first is divided into small rectangles of sides a and b by two sets of orthogonal straight lines, one set conveniently east-west and the other north-south. The mean water depth h in each rectangle with area S is estimated, and the water pressure on the floor of the rectangle is replaced by a vertical force $F = \rho g S h$ at the center of rectangle. It is clear that rather smaller rectangles lead to more precise modeling, hence, each rectangle with increasing h is divided into some parts. The water pressure of the lake is simulated by a set of point forces F which applied in the -X3 direction and acting on the rectangles. We define now a mathematical model of the single force F in the elastostatic fields using the delta function conception: The point force F is defined as:

$$F = F \bar{a} \delta(r)$$

The *i*th component of displacement at point $P(x_1, x_2, x_3)$ due to F in the *j*th direction, u_i^j , is given by:

$$u_i^j = F/8\pi\mu (\delta_{ij}r_{,kk} - \Gamma r_{,ij})$$

where $j=3$, for the water pressure of the lake, and $r = ((x_1)^2 + (x_2)^2 + (x_3)^2)^{1/2}$ is the distance from origin to point P. The general three dimensional relationships between nine Cartesian strain component ϵ_{ij} and three Cartesian displacements (u_1, u_2, u_3) are given by:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$$

These nine terms constitute the infinitesimal strain tensor, a symmetric tensor with six independent quantities. The stress tensor is given by stress-strain relationships based on constitutive law called Hooke's law is given by:

$$\sigma_{ij} = \lambda(\epsilon_{kk})\delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij}$$

Using the conception of the stress tensor and well-known relationships in elastostatic theory the various stress parameters such as shear and normal stresses due to reservoir can be determined at the point P in a plane with normal n. In this way, we would be able to achieve the strength values due to the reservoir across the specified preexisting fault plane. The shear stress (τ_{nr}) and strength (S_{nr}) due to the reservoir across the preexisting fault plane are, respectively, as follows.

$$\tau_{nr} = \tau_n \cdot \cos(\theta)$$

$$S_{nr} = \tau_{nr} - \mu \sigma_n$$

θ is angle measured in the preexisting fault plane between resolved shear stresses due to reservoir and ambient causes, and it is measured from the direction of the latter coefficient of friction along the fault plane, μ is coefficient of friction across the preexisting fault plane. The earthquakes near new reservoirs is classified into the following three cases on the basis of positive, negative and zero values of S_{nr} ; a reservoir based on this classification may stabilize some parts and destabilize other parts of the same nearby fault surface.

Case I: induced or reservoir assisted natural earthquakes; $S_{nr} > 0$. This situation will arise when $0 \leq \theta < 90$ and the reservoir stresses have a net destabilizing influence on

some parts of fault plane in which τ_{nr} has a suitably large component in the same direction as initial tectonic shear stress, therefore the earthquake occurs earlier than its natural time.

Case II: natural tectonic earthquakes despite the inhibiting influence of the new reservoir; $s_{nr} < 0$. This situation will arise when $90 < \theta \leq 180$ and the reservoir stresses have a net stabilizing influence on some parts of fault plane in which a component of τ_{nr} acts opposite to initial tectonic shear stress, therefore the earthquake occurs later than its natural time.

Case III: natural tectonic earthquakes with no influence of the reservoir; $s_{nr} = 0$. The reservoir exerts neither a stabilizing nor a destabilizing influence on the fault plane. The earthquake occurs neither hindered nor assisted by the reservoir; its occurrence time is the same as the natural time. Hence there is again a natural earthquake near the reservoir.

We have applied these concepts to the Karkheh reservoir and discussed fault stability analysis on the Dalpari fault plane. For this, we identify the strength equation as the main operational relation and list here the inputs required for its evaluation. Firstly, the location and orientation of the segment of the Dalpari fault in the vicinity of the reservoir should be specified. An estimate of the coefficient of friction, Poisson's ratio, shear and Young's modulus in the crustal rocks beneath and around the reservoir should be available also. Secondly, we should specify the direction of resolved shear stress on the fault due to ambient crustal stresses. If the fault plane solution for the earthquake is available, or can be modeled, then the direction of slip on the chosen nodal plane may be taken as the estimate of the desired shear stress direction. Thirdly, we should have estimates based on computations of the elastic stresses due to the Karkheh reservoir on the Dalpari fault plane. It is observed that in the Zagros high angle reverse faults (dips > 30) appeared to be more common than low angle thrust (dips < 30); there is a peak in the distribution in the range 30-60 and very few nodal plane dips corresponding to low angle thrusts which would plot in the ranges 0-30 and 60-90. It is observed that in this region the seismogenic depths vary from 4 to 20 km, with typical uncertainties being ± 4 km. As a result, due to unavailable valuable information needed about the Dalpari fault plane parameters, we have considered different dips between 15° to 60° and the maximum depth 15 km for analysis.

The Karkheh reservoir is situated on the hillwall part of the Dalpari fault. Based on the analysis it is observed that the reservoir may exert a stabilizing influence and delay the time of earthquake occurrence associated with this segment. These observations are in agreement with the theoretical stress analysis due to the reservoir in this segment. This results in a more crustal stability at all dips of the surface segment of the Dalpari fault. The possibility of induced earthquake may occur at the 15° dip of the hidden segment of this fault and at depths shallower than 2.5 kilometer, which continues until nearby down the dam site. In this segment the maximum reservoir induced strength in the direction of the slip vector fault is estimated about 0.12 bar at a depth of ~ 1 kilometer.

Key words: Reservoir Induced Seismicity, Coloumb stress, Stability fault, Karkheh Dam

۱ مقدمه

نقاط گوناگون دنیا با بزرگ‌های متفاوت و قابل توجه مشاهده شده است (گوپتا، ۱۹۹۲). در اواخر دهه ۶۰ و اوایل دهه ۷۰ بعد از توافق کلی محققان روی این مسئله

از زمان شناسایی وابستگی لرزه‌خیزی القایی به حجم ذخیره‌شده آب و ارتفاع سطح آب در دریاچه مید در اوایل دهه ۱۹۴۰، بیش از ۱۰۰ مورد زمین‌لرزه القایی در

که آب‌گیری مخازن بزرگ می‌تواند یکی از دلایل مسبب زمین‌لرزه‌های القایی با بزرگای بین ۵ تا ۶٫۵ که دارای قدرت تخریبی نیز هستند باشد، مسئله لرزه‌خیزی القایی مورد توجه جدی علمی قرار گرفت. به زودی مشخص شد که نواحی بدون فعالیت لرزه‌ای و نواحی که از نظر لرزه‌خیزی دارای آهنگ کمی هستند، در مقایسه با مناطق فعال الزاماً از پتانسیل کمتری در رویداد زمین‌لرزه‌های القایی برخوردار نیستند. برای نمونه در سد کرامستا در یونان با ارتفاع ۱۶۰ متر و حجم مخزن ۴۸ میلیارد متر مکعب، پس از آب‌گیری در ۱۹۶۶، زمین‌لرزه مهمی با بزرگای ۶٫۲ در فاصله ۲۰ کیلومتری از مخزن به وقوع پیوست. زمین‌لرزه‌ای با بزرگای ۶٫۳ که در فاصله ۹ کیلومتری از سد کونینا در هند با ارتفاع حدود ۱۰۳ متر و حجم مخزن ۲٫۷ میلیارد متر مکعب در ۱۹۶۷ به وقوع پیوست. سد کاریبا در مرز زامبیا و زیمبابوه با ارتفاعی حدود ۱۲۸ متر و حجم مخزن ۱۷۵ میلیارد متر مکعب که از ۱۹۵۶ تا ۱۹۷۱ آب‌گیری شده است، شاهد زمین‌لرزه‌هایی بوده که با تداوم آب‌گیری همخوانی داشته است. بزرگ‌ترین زمین‌لرزه با بزرگای ۶ هنگامی اتفاق افتاد که سطح تراز آب به حداکثر مجاز خود رسیده بود. زمین‌لرزه‌های القایی ناشی از بارگذاری مخزن سد در سایر مناطق دنیا مثل امریکا، فرانسه، ژاپن، ایتالیا، یونان، برزیل و دیگر کشورها مشاهده شده است (گوپتا، ۲۰۰۲).

تحقیق اسنو (۱۹۷۲) مرحله مهمی در بررسی زمین‌لرزه‌های القایی به شمار می‌آید. این محقق روشن ساخت که سازوکار زمین‌لرزه‌ها با توجه به اینکه وابسته به مخزن و یا طبیعی باشند، یکسان است. این نظریه براساس اثر آبی در نتیجه بار مخزن و ۲) تأخیر در نتیجه انتشار فشار آب منفذی است. چاندر و کالپنا (۱۹۹۷) مدل ریاضی تأثیر مخزن محدود در فضای سه‌بعدی را عرضه کردند. مفهوم پایداری گسل تابعی از تنش‌های تأثیرگذار روی صفحه گسل معرفی شد. طبق این نظریه مخزن

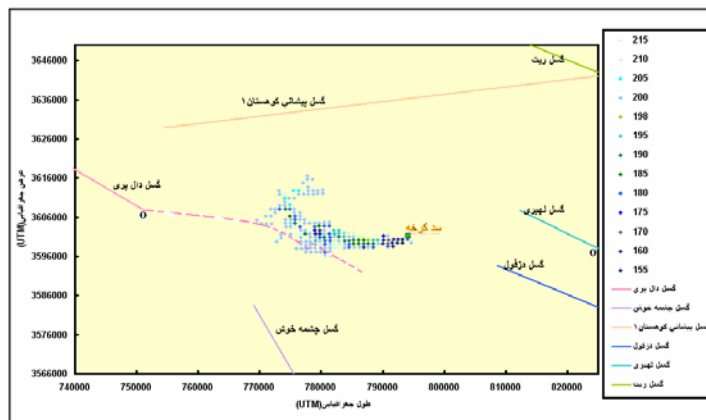
به‌تنهایی نمی‌تواند عامل وقوع زمین‌لرزه باشد، اما تنش‌های اعمال شده با بار مخزن، می‌تواند وقوع زمین‌لرزه را روی گسل نزدیک به آن به جلو یا به تأخیر بیاورد. با توجه به تحقیقات و تجهیز دستگاهی چندین ساله اخیر، امروزه زمین‌لرزه‌های القایی در مقایسه با گذشته بیشتر شناخته شده‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌های القایی عموماً در نزدیکی مخزن (اکثراً تا فاصله ۳۰ کیلومتری مخزن) و در اعماق کانونی کم رخ می‌دهند (تلوانی و همکاران، ۱۹۸۰). پارامتر b زمین‌لرزه‌های القایی بسته به شرایط زمین‌ساخت منطقه‌ای معمولاً بزرگ‌تر از زمین‌لرزه‌های طبیعی گزارش شده است (اتسو، ۱۹۶۵). عموماً زمین‌لرزه‌های متوسط تمایل دارند در مناطقی رخ دهند که اولاً ارتفاع آب بیشتر از ۱۰۰ متر و ثانیاً حجم مخزن قابل ملاحظه باشد و دست‌کم بیشتر از ۱ میلیارد متر مکعب باشد (اتسو، ۱۹۶۵). برخی از مخازن بلافاصله بعد از تکمیل آب‌گیری موجب وقوع زلزله می‌شوند (به علت تغییرات تنش کشسانی) و بعضی از آنها با تأخیر (به علت پخش سیال منفذی) و بعضی چندین سال بعد، هنگامی که سطح آب مخزن تغییر کرد موجب رخداد زلزله می‌شوند (تلوانی، ۲۰۰۰).

زمین‌لرزه‌هایی که بلافاصله پس از اتمام آب‌گیری اولیه رخ می‌دهند، عموماً کم‌عمق‌اند و مراکز آنها معمولاً در کف مخزن یا در مجاورت کف آن در عمق کانونی صفر تا ۱۰ کیلومتری قرار دارد. آن دسته از زمین‌لرزه‌هایی که با تأخیر پس از چندسال از شروع آب‌گیری رخ می‌دهند عمیق‌ترند و ممکن است در عمق کانونی بین ۱۰ تا ۲۰ کیلومتر قرار داشته باشند (سیمسون و همکاران، ۱۹۸۸). هدف از این تحقیق معرفی و تشریح روشی جدید در مدل‌سازی ریاضی تنش ناشی از مخازن سدها روی صفحه گسیختگی یک گسل خاص است. با استفاده از روش مورد بررسی و مفهوم قاعده موهور-کلمب، اولین بار در کشور مدل ریاضی پارامترهای متفاوت تنش

پیش گفته) مورد مقایسه، بحث و نتیجه‌گیری قرار گرفته است.

گسل رورانده دالپری به طول حدود ۲۰ کیلومتر در غرب تاقدیس دالپری قرار دارد و در امتداد آن سازند آغاچاری روی نهشته‌های سازند بختیاری و رسوبات جوان‌تر (مربوط به کواترنر بالایی) رانده شده‌اند. این راندگی حدود ۲۱ کیلومتری باختر دریاچه سد واقع است (طرح مطالعات سد مخزنی کرخه، مرحله اول، ۱۳۷۰). براساس مشاهدات رومرکز زمین‌لرزه‌ها احتمال می‌رود گسل دالپری که در غرب ساختگاه سد کرخه قرار دارد، طولی بیشتر از آنچه که در نقشه زمین‌شناسی کشیده شده، داشته باشد. این قطعه پنهان با عنوان "گسل پنهان تاقدیس دالپری" وابسته به تاقدیس دالپری است که با توجه به طول موج و درازای بیش از ۵۰ کیلومتری تاقدیس دالپری، به احتمال زیاد تا عمق ۱۰ کیلومتری (لایه نمک هرمز) ادامه می‌یابد. گسیختگی پنهان وابسته به تاقدیس دالپری (نشان داده شده با امتداد خط‌چین در شکل ۱) را می‌توان با توجه به ریخت‌شناسی آن در سطح زمین به حداقل دوپاره تقسیم کرد، به‌طوری‌که محل پاره‌بندی آن در مجاورت تغییر جهت دریاچه سد کرخه از شرقی- غربی به شمالی- جنوبی تغییر می‌یابد (شرکت لرزه‌نگار پارسیان، ۱۳۸۵) (شکل ۱).

(سه مولفه اصلی تنش، بیشینه تنش برشی، بیشینه تنش برشی، بدون برشی، مولفه تنش برشی و توان (استعداد) برشی، بدون توجه به راستای بردار لغزش در صفحه گسیختگی گسل (به‌طور خالص) یا در هر راستای مشخص تعریف شد ناشی از مخزن سد روی صفحه گسیختگی یک گسل مشخص عرضه شده است. در ادامه برای نمونه، براساس روش نظری معرفی شده، تنش ناشی از مخزن سد کرخه روی گسل دالپری مدل‌سازی ریاضی می‌شود. برای این منظور پارامترهای متفاوت تنش ناشی از مخزن سد کرخه در سطوح گوناگون تراز آب (۱۶۰، ۱۷۰، ۱۸۰، ۱۹۰، ۲۰۰، ۲۱۰ و ۲۲۰ متر نسبت به سطح تراز آب‌های آزاد) روی صفحه گسیختگی گسل دالپری در شیب‌های متفاوت، برآورد شده و از این طریق امکان وقوع زمین‌لرزه القایی در صفحه گسیختگی گسل دالپری مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. میزان تغییرات سطح آب مخزن سد کرخه و رابطه آن با روند لرزه‌خیزی منطقه به خصوص در مورد گسل دالپری مورد تحقیق قرار گرفته و مروری اجمالی بر پاره‌ای از بررسی آماری صورت گرفته روی زمین‌لرزه‌های گستره پیرامون سد کرخه به انجام رسیده است. در پایان نتایج آماری و مشاهده‌ای با نتایج حاصل از مدل‌سازی ریاضی تنش ناشی از مخزن سد کرخه در صفحه گسیختگی گسل دالپری (در خصوص امکان وقوع زمین‌لرزه القایی در صفحه گسیختگی گسل



شکل ۱. نقشه توپوگرافی دریاچه سد کرخه به همراه گسل‌های شناخته شده در منطقه مورد بررسی پیرامون مخزن است؛ ابعاد نقشه برحسب UTM و توپوگرافی دریاچه نسبت به سطح آب‌های آزاد برحسب متر، است.

ج- تغییر فشار مایع به دنبال جابه‌جایی مایع ناشی از اختلاف سطح آب در ناحیه قبل و بعد از آب‌گیری مخزن. در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی ریاضی فشار آب دریاچه، تنها به بررسی و تحلیل نظری اولین اثر، یعنی میزان تغییر تنش کشسانی ناشی از دریاچه در صفحه گسیختگی گسل پرداخته می‌شود و براساس قاعده گسیختگی موهور-کلمب میزان پایداری یا تضعیف پوسته ناشی از تغییر تنش برشی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

به‌منظور مدل‌سازی ریاضی فشار آب دریاچه، در مرحله نخست با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی گستره مورد بررسی، توپوگرافی دریاچه سد کرخه تعیین می‌شود (شکل ۱)؛ سپس کف دریاچه به‌صورت شبکه‌ای از مستطیل‌های کوچک به ابعاد a و b ($b > a$) تقسیم‌بندی می‌شود. برای تعیین فشار آب وارد بر سطح هر مستطیل برحسب اینکه چند درصد مساحت آن را آب فرا می‌گیرد، ضریبی به‌صورت درصد به هر یک اختصاص داده می‌شود. این ضریب برای هر مستطیل با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی منطقه برآورد می‌شود. بدیهی است که هرچه این تقسیم‌بندی ریزتر صورت گیرد، مدل‌سازی دقیق‌تر و به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود. در مجموع، توپوگرافی ۱۷۹ نقطه از دریاچه سد کرخه برای محاسبات در نظر گرفته شد؛ این نقاط در مرکز مستطیل‌هایی به ابعاد $750 \text{ m} \times 800 \text{ m}$ برای دریاچه سد کرخه قرار گرفته‌اند. برای بالا بردن دقت کار، نقاط توپوگرافی براین اساس که با کاهش عمق سهم کمتری در القای تنش ایفا می‌کنند، برحسب عمقشان در سه دسته عمیق، نیمه‌عمیق و کم‌عمق تقسیم شده‌اند. نقاط واقع در دسته عمیق، نیمه‌عمیق و کم‌عمق به‌ترتیب تقسیم به هشت، شش و چهار مستطیل مساوی با همان میزان توپوگرافی و ضریب مساحت می‌شوند. بیشینه عمق آب در دریاچه سد کرخه در بیشینه سطح تراز آب (۲۲۰ متر) ۶۵ متر خواهد بود. در مرحله بعد، فشار آب دریاچه به صورت ستون‌های مکعبی شکل در نظر گرفته

نقشه توپوگرافی دریاچه سد کرخه به همراه گسل‌های شناخته‌شده در منطقه مورد بررسی (مستطیلی با اضلاع 85×65 کیلومتر با مرکزیت دریاچه سد) است؛ همان‌گونه که مشخص است، محل ساختگاه سد در عمیق‌ترین بخش دریاچه واقع شده است، قطعه پنهان و احتمالی گسل دالپری با امتداد خط‌چین نشان داده شده و ابعاد نقشه برحسب UTM است. نقطه ۵ در گسل دالپری نشانگر ابتدای طول سطحی گسل (انتخابی) است که در فاصله حدوداً ۲۱ کیلومتری مخزن سد قرار دارد و برای محاسبه و تحلیل پارامترهای گوناگون تنش القایی در صفحات این گسل (نشان داده شده در شکل‌های بعدی) به کار رفته است.

۲ مبانی نظری تنش القایی ناشی از فشار مخازن مصنوعی آب

عوامل به‌وجودآورنده و سازوکار زمین‌لرزه‌های منتسب به سدها به دلیل نبود شناخت کافی از وضعیت نیروهای زمین‌ساختی منطقه، هنوز به‌طور کامل مانند زمین‌لرزه‌های طبیعی شناخته نشده است. تحقیقاتی که در این زمینه صورت گرفته نشان می‌دهد که عملاً فعالیت زمین‌لرزه‌ای شدید وقتی شروع می‌شود که ارتفاع آب ذخیره شده از صد متر تجاوز کند (گوپتا، ۱۹۹۲)، بطور کلی ارتفاع آب و تغییرات ناگهانی و قابل توجه در رقوم دریاچه موثرتر از حجم کل دریاچه است. سه اثر اصلی و مهم فشار و بار مخازن در ایجاد زمین‌لرزه‌های القایی عبارت‌اند از (گوپتا، ۱۹۹۲):

الف- تنش کشسانی که با پرکردن مخزن افزایش می‌یابد.
ب- افزایش فشار مایع منفذی در سنگ‌ها و لایه‌های اشباع شده در پاسخ به تنش کشسانی. این مسئله باعث کاهش تنش نرمال مؤثر و منجر به کاهش نیروی اصطکاک و افزایش توان برشی در صفحه گسل می‌شود.

تعداد در یک محیط کشسان به صورت زیر به دست می‌آید (لی و والاس، ۱۹۹۵):

$$u_i^j = F/8\pi\mu \left(\delta_{ij} r_{,kk} - \Gamma r_{,ij} \right) \quad (۴)$$

که در آن

$$\Gamma = \frac{\lambda + \mu}{\lambda + 2\mu}$$

$$r = \left((x_1)^2 + (x_2)^2 + (x_3)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

در رابطه (۴)، i راستای جابه‌جایی و j راستای نیروی واحد و نقطه ای F (در دستگاه مختصات دکارتی) است. به این ترتیب بردار جابه‌جایی (u_1, u_2, u_3) حاصل از هر یک از ستون‌های آب دریاچه در یک نقطه مشخص با استفاده از این رابطه به دست می‌آید.

تانسور تغییر شکل نسبی (تنجش) حاصل از آب دریاچه در هر نقطه دلخواه (ε_{ij}) تحت میدان جابه‌جایی، با رابطه زیر مشخص می‌شود.

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_i} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) & \frac{\partial u_j}{\partial x_i} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_j} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_i} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_j} \right) & \frac{\partial u_3}{\partial x_i} \end{bmatrix} \quad (۵)$$

ε_{ij} یک تانسور متقارن مرتبه ۲ و دارای ۹ مولفه است و در حالتی که $i=j$ اختیار شود مولفه‌های تغییر طول نسبی و اگر $i \neq j$ باشد مولفه‌های تنجش برشی را مشخص می‌کند. به این ترتیب با جای‌گذاری رابطه (۴) در رابطه (۵)، می‌توان مولفه‌های تانسور تغییر شکل نسبی، ε_{ij} ، ناشی از آب دریاچه را در یک نقطه مشخص محاسبه کرد.

رابطه خطی تنش - تنجش $(\sigma_{ij} - \varepsilon_{ij})$ در شرایط همسانگرد کشسان تحت عنوان قانون کلی هوک به شکل زیر تعریف می‌شود:

می‌شود که قاعده آنها همین مستطیل‌های کوچک تقسیم‌بندی شده در کف دریاچه است و ارتفاع آنها، h ، عمق متوسط ستون آب در مرکز هر یک از مستطیل‌ها است. نیروی ناشی از فشار آب دریاچه، F ، در هر ستون به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F = \rho g S h \quad (۱)$$

$$S = a.b$$

که در آن S مساحت قاعده مستطیل شکل در هر ستون، ρ چگالی حجمی آب (۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب) و g شتاب گرانی زمین (۹.۸ متر بر مجذور ثانیه) است. نیروی ناشی از فشار آب دریاچه در هر ستون مکعبی شکل F با فرض نقطه‌ای بودن به صورت رابطه ریاضی (۲) تعریف می‌شود (لی و والاس، ۱۹۹۵)؛ فرض نقطه‌ای بودن F مستلزم آن است که مساحت نقطه اثر نیرو بسیار کوچک باشد ($S \rightarrow 0$)؛ یعنی هر چه سطح قاعده مکعب‌ها کوچک‌تر باشد، مدل‌سازی دقیق‌تر و به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود.

$$F = \lim_{\delta V \rightarrow 0} \rho f \delta V \quad (۲)$$

$$\delta V = \delta S.h$$

در رابطه بالا f نیرو بر واحد جرم، ρf نیروی داخلی بر واحد حجم و δV جزء کوچک حجم جسم تحت اثر نیرو است. مطابق این رابطه، نیروی نقطه‌ای F را می‌توان با استفاده از تابع دلتای دیراک $\delta(r)$ به صورت زیر شبیه‌سازی کرد:

$$F = F \bar{a} \delta(r) \quad (۳)$$

در واقع رابطه (۳) همان مدل ریاضی استفاده شده در تعیین نیروی ناشی از فشار آب دریاچه در هر ستون مکعبی شکل است.

میدان جابه‌جایی کشسانی ایجاد شده براساس مدل ریاضی تعریف شده F در رابطه (۳) با استفاده از معادله

$$\sigma_t = T \cdot t \quad (10)$$

سه مولفه تنش اصلی $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ را با حل معادله زیر می توان به دست آورد.

$$([\sigma] - [I]\sigma)\{n\} = \{0\} \quad (11)$$

معادله فوق که به شکل ماتریسی است یک دستگاه خطی همگن یا دستگاه معادلات خطی بدون طرف راست است و فقط در حالتی که دترمینان ضرایب آن صفر باشد، سه جواب غیرصفر خواهد داشت که همان سه مولفه تنش اصلی (بیشینه، متوسط و کمینه تنش اصلی) است، در معادله فوق $[I]$ ماتریس قطری واحد است. بیشینه تنش برشی مطابق رابطه (۱۲) مساوی نصف اختلاف بین بزرگترین و کوچکترین تنش های اصلی است و روی دو سطح متعامد بر هم عمل می کند که نسبت به سطوح این دو تنش اصلی، موقعیت زاویه ای $\pm \frac{\pi}{4}$ دارند. مشابه این تعریف برای بیشینه تنش (تغییر شکل) برشی وجود دارد که با استفاده از تانسور تنش قابل محاسبه است.

$$\tau_{max} = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (12)$$

با استفاده از روش تبدیل تانسوری می توان به تانسور تنش در دستگاه مختصات گسل دست یافت؛ به این ترتیب با در دست داشتن تانسور تنش در دستگاه مختصات گسل با شیب δ و روند ϕ می توان با استفاده از روابط فوق پارامترهای متفاوت تنش ناشی از مخزن مصنوعی آب در روی سطح گسل (نظیر دو مولفه مماسی تنش در روی سطح گسل و مولفه قائم بر آن) را به دست آورد. همچنین می توان با معلوم بودن بردار لغزش در صفحه گسل (λ) ، مولفه مماسی تنش روی سطح گسل در راستای بردار لغزش (τ_{nr}) را با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه کرد.

$$\tau_{nr} = \tau_n \cdot \cos(\theta) \quad (13)$$

$$\sigma_{ij} = \lambda(\epsilon_{kk})\delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij} \quad (6)$$

که در آن σ_{ij} تانسور تنش، ϵ_{ij} تانسور تنش، λ و μ ضرایب لامه و δ_{ij} دلتای دیراک است. در این رابطه $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ و نشانگر تقارن تانسور تنش همچون تانسور تنش است؛ اندیس اول در σ_{ij} راستای سطحی را نشان می دهد که بردار تنش برای آن سطح مورد نظر و اندیس دوم نشان دهنده راستاهای سه گانه دستگاه مختصات دکارتی است.

T_i^n مؤلفه های بردار تنش روی سطحی با بردار یکه n بر حسب مؤلفه های تانسور تنش (در دستگاه مختصات دکارتی) با استفاده از رابطه (۷) به دست می آید (لانگو و لفشیز، ۱۹۵۹).

$$T_i^n = \sigma_{ji} n_j \quad (7)$$

σ_n مؤلفه عمودی بردار تنش روی سطحی با بردار یکه n از راه زیر قابل محاسبه است:

$$\sigma_n = \sigma_{ij} n_j n_i \quad (8)$$

برای تعیین مؤلفه مماسی تنش از رابطه فیثاغورس استفاده می شود (لانگو و لفشیز، ۱۹۵۹):

$$\tau_n^2 = \left| \frac{n}{T} \right|^2 - \sigma_n^2 = T_i^n T_i^n - \sigma_n^2 \quad (9)$$

برای تعیین راستای مؤلفه برشی یا مماسی بردار تنش، ابتدا با استفاده از حاصل ضرب خارجی بردار یکه n در بردار یکه منطبق بر بردار تنش (T) ، بردار یکه s که عمود بر سطح گذرنده از n و T است به دست می آید. سپس از حاصل ضرب خارجی بردار یکه s و بردار یکه n ، بردار یکه t که منطبق بر مؤلفه برشی بردار تنش است، به دست می آید. با مشخص شدن بردار یکه t ، به جای معادله (۹) می توان از معادله زیر برای تعیین مؤلفه برشی (خالص بدون در نظر گرفتن راستای مشخص) بردار تنش استفاده کرد:

$$S_{nr} = \tau_{nr} - \mu \sigma_n \quad (15)$$

در رابطه فوق S_{nr} توان برشی ناشی از اثر دریاچه سد روی سطح گسل در راستای بردار لغزش است که با معلوم بودن بردار لغزش در صفحه گسل و محاسبه مولفه مماسی تنش روی سطح گسل در راستای بردار لغزش (τ_{nr}) با استفاده از رابطه (۱۳)، همچنین مولفه قائم تنش نرمال، رابطه (۸)، قابل محاسبه است.

به‌طور کلی زمین‌لرزه‌های رخ داده اطراف یک سد جدید، در صفحه گسیختگی که از قبل در منطقه موجود است و در حالت بحرانی قرار دارد، برحسب میزان تغییر توان برشی ناشی از فشار مخزن در سه دسته مشخص زیر تقسیم بندی می‌شوند (چاندر و کالپنا، ۱۹۹۷):

الف- حالتی که مخزن موجب تسریع در زمان وقوع زمین‌لرزه شود ($S_{nr} > 0$)؛ مطابق رابطه (۱۵) افزایش توان برشی در راستای بردار لغزش گسل (S_{nr}) به منزله پایین آمدن قدرت تحمل سنگ‌ها در برابر گسیختگی، در نتیجه تضعیف پوسته و تسریع در زمان بروز گسیختگی و وقوع زمین‌لرزه القایی است. افزایش S_{nr} به این مفهوم است که مولفه تنش برشی ناشی از فشار مخزن در راستای بردار لغزش گسل، بزرگ و هم‌جهت با آن است ($0 < \theta < 90$) و می‌تواند باعث وقوع زمین‌لرزه در زمانی زودتر از موعد مقرر (در غیاب فشار مخزن) شود.

ب- حالتی که مخزن موجب تأخیر در زمان وقوع زمین‌لرزه شود ($S_{nr} < 0$)؛ مطابق رابطه (۱۳) کاهش S_{nr} به منزله پایداری بیشتر پوسته بوده که موجب تأخیر در زمان بروز گسیختگی و رخداد زمین‌لرزه طبیعی علی‌رغم ممانعت فشار آب مخزن شود. کاهش S_{nr} به دو طریق امکان پذیر است؛ می‌تواند به دلیل کوچکی مولفه تنش برشی ناشی از فشار مخزن در راستای بردار لغزش گسل باشد که در خلاف جهت آن ($90 < \theta < 180$) قرار دارد، یا ممکن است هم جهت با آن، اما کوچک‌تر از نیروی

که در آن θ زاویه بین بردار لغزش و بردار مولفه مماسی تنش روی سطح گسل (هم‌جهت با بردار لغزش) است. مطابق این رابطه محدوده بیشینه این پارامتر فقط زمانی رخ می‌دهد که θ بین ۰ تا ۹۰ درجه باشد. در این مرحله با استفاده از مفهوم قاعده گسیختگی موهور-کلمب و مولفه مماسی تنش روی سطح گسل در راستای بردار لغزش (رابطه (۱۳))، براساس میزان تغییر تنش برشی ناشی از دریاچه در صفحه گسیختگی گسل، مسئله پایداری یا تضعیف پوسته مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۲ قاعده موهور - کلمب

جهت فهم سازوکار زمین‌لرزه القایی همانند زمین‌لرزه‌های طبیعی می‌توان از ملاک گسیختگی موهور-کلمب کمک گرفت. از جمله نارسایی‌های این قاعده نبود شناخت کافی از وضعیت نیروهای زمین‌ساختی و هیدرولیکی موجود در منطقه است (چاندر و کالپنا، ۱۹۹۷). رابطه موهور - کلمب در صفحه گسیختگی با بردار یکه n که از قبل در منطقه وجود داشته و از لحاظ زمین‌ساختی در وضعیت بحرانی قرار داشته است، به‌صورت زیر توصیف می‌شود (تلوانی، ۲۰۰۰):

$$\Delta S = \Delta \tau - \mu (\Delta \sigma_n - \Delta P) \quad (14)$$

$$\Delta P = \Delta P_u + \Delta P_{diff}$$

در این رابطه ΔS ، $\Delta \sigma_n$ و $\Delta \tau$ به ترتیب تغییر توان برشی (توان در اینجا به معنی استعداد یا امکان داشتن است که در اینجا خالص بدون در نظر گرفتن راستای مشخص مدنظر است)، تنش نرمال و برشی در صفحه گسیختگی، ΔP_u ، ΔP_{diff} و ΔP به ترتیب تغییر فشار مایع منفذی ناشی از تغییر تنش کشسانی (معروف به اثر آنی)، فشار مایع منفذی گسترش یافته القایی و کل فشار مایع منفذی است. توان برشی ناشی از اثر دریاچه سد روی سطح گسل در راستای بردار لغزش (λ)، به صورت زیر تعریف می‌شود.

کیلومتر لحاظ شده است (شکل ۱). با توجه به نبود اطلاعات کافی از شیب این گسل، صفحه گسیختگی گسل پیش گفته با شیب‌های متفاوت بین ۱۵ تا ۶۰ درجه مدل شده است. طالبیان و جکسون (۲۰۰۴) براساس مدل‌سازی مصنوعی امواج حجمی زمین‌لرزه‌های دورلرزه‌ای قابل دسترس در منطقه زاگرس، شیب محتمل در منطقه زاگرس را بین ۳۰ تا ۶۰ درجه و عمق لرزه‌زا در این گستره را کمتر از ۲۰ کیلومتر گزارش کرده‌اند، از این رو عمق لحاظ شده برای همه صفحات با توجه به عمق لرزه‌زا و مشخصه عمقی زمین‌لرزه‌های القایی، ۱۵ کیلومتر لحاظ شده است. متوسط بردار لغزش در صفحه فرودپواره گسل با توجه به سازوکار زمین‌لرزه‌های منطقه مورد بررسی $N 15^{\circ} E$ در نظر گرفته شده است. در جدول (۱) ضرایب کشسانی در ناحیه سد کرخه براساس تحقیقات لرزه‌نگاری درون‌گالری (شرکت مه‌اب قدس ۱۳۷۰ الف) و برخی مشخصات دیگر سد (شرکت لرزه‌نگار پارسیان، ۱۳۸۵) که به نوعی در مدل‌سازی مهم بوده‌اند آمده است.

جدول ۱. ضرایب کشسانی در منطقه و مشخصات سد کرخه.

اندازه	پارامتر
2.75×10^9 پاسکال	مدول برشی (μ)
6.778×10^9 پاسکال	مدول یانگ (E)
۰٫۲۶	ضریب پواسون (ν)
۱۲۷ متر	ارتفاع سد از پی
390381 میلیون مترمکعب	حجم مخزن
۳۰۳۰ متر	طول تاج سد
۱۱۰۰ متر	طول کف

به دلیل استفاده از تابع دلتای دیراک در مدل ریاضی تعریف شده نیرو (رابطه (۳))، فشار آب دریاچه در هر یک از ستون‌های مکعبی شکل آب، نقطه‌ای فرض شده است. خطای ناشی از این فرض موجب می‌شود تا میزان

اصطکاک ایجاد شده بر اثر فشار آب مخزن در سطح گسیختگی باشد.

ج- حالتی که مخزن نقشی در وقوع زمین‌لرزه ندارد ($S_{nr} = 0$)؛ به عبارت ساده‌تر زمین‌لرزه به‌طور طبیعی در موعد مقرر خود (در غیاب فشار مخزن) رخ می‌دهد.

۳ مدل‌سازی ریاضی تنش موثر ناشی از مخزن سد کرخه و اثر آن در ایجاد گسیختگی روی گسل دالپری روش صورت گرفته در این پژوهش برای تحلیل نظری امکان بروز گسیختگی القایی ناشی از اثر دریاچه سد در صفحه گسیختگی گسل دارای محدودیت‌هایی نیز است؛ با توجه به نبود بررسی‌های کافی ژئوتکنیکی در تعیین مدل مناسب سرعت انتشار امواج در لایه‌های گوناگون زمین برای کاهش خطای تعیین محل وقوع زمین‌لرزه‌ها (شرکت لرزه‌نگار پارسیان، ۱۳۸۵)، نبود تحقیقات کافی زمین‌شناسی و لرزه‌زمین‌ساختی در زمین هنوز اطلاع دقیقی از هندسه دقیق گسل‌ها (در سه‌بعد)، سازوکار دقیق زمین‌لرزه‌ها و ارتباط این دو با یکدیگر در دست نیست، همچنین وضعیت نیروهای لرزه‌زمین‌ساخت موجود در منطقه به‌طور کامل معلوم نیست (چاندر و کالینا، ۱۹۹۷).

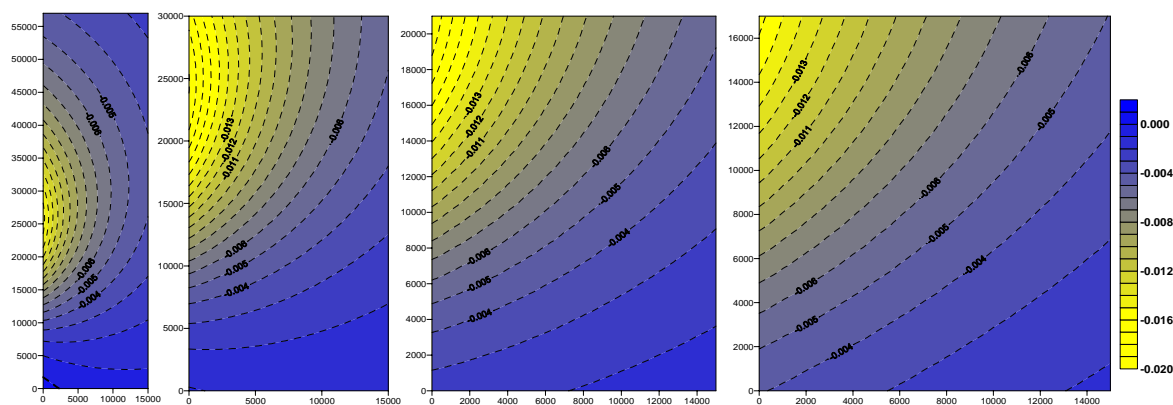
با توجه به روابط ذکر شده در بخش پیشین، بخشی از صفحه گسل رورانده دالپری واقع در منطقه مورد بررسی (مستطیلی با اضلاع 85×65 کیلومتر با مرکزیت دریاچه سد) با طول، شیب، روند و بردار لغزش از پیش تعیین شده، برای محاسبه و تحلیل پارامترهای متفاوت (تنش برشی ناشی از اثر دریاچه سد در راستای بردار لغزش گسل T_{nr} ، تنش نرمال σ_n و توان برشی ناشی از اثر دریاچه سد در راستای بردار لغزش گسل S_{nr}) به‌صورت ریاضی مدل شده‌اند. طول گسیختگی سطحی این گسل با توجه به محدوده مورد بررسی و با استفاده از نقشه گسل‌های منطقه (طرح مطالعات سد مخزنی کرخه، مرحله اول، ۱۳۷۰) ۱۵

۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه ترسیم شده‌اند؛ مقیاس رنگی برحسب بار و ابعاد نمودارها برحسب UTM در دستگاه مختصات صفحه گسل است. محور افقی در راستای طول سطحی و محور قائم در راستای طول عمقی صفحه گسل تعریف می‌شود. توجه شود که مقادیر عمقی آورده شده در این بخش همگی در دستگاه مختصات دکارتی‌اند؛ رابطه ریاضی تبدیل طول عمقی در دستگاه مختصات صفحه گسل (Z')، با شیب δ ، به دستگاه مختصات دکارتی (Z) به صورت $Z = Z' \cdot \sin(\delta)$ مشخص می‌شود.

براساس شکل ۲ تنش برشی ناشی از اثر دریاچه سد در راستای بردار لغزش سطح گسیختگی دالبری تنها در شیب ۱۵ درجه به صورت ناحیه بسیار کوچک و ناچیزی اطراف نزدیک‌ترین نقطه گسل به دریاچه (واقع در نزدیکی سطح زمین) مثبت است. ملاحظه می‌شود که کمینه مقدار این پارامتر به ترتیب سیر صعودی در شیب‌های ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۱۵ درجه است، محل آن در شیب ۱۵ درجه در عمق تقریباً ۶ کیلومتری قرار دارد و به تدریج با افزایش شیب به سمت اعماق، بیشتر مهاجرت می‌کند؛ پارامتر پیش‌گفته در همه شیب‌ها به تدریج با دور شدن از این محل به طور یکنواخت افزایش می‌یابد.

پارامترهای متفاوت تنش محاسبه شود در بخش‌هایی از پوسته واقع در مجاورت کف دریاچه یا در فواصل بسیار نزدیک به آن، به یکباره به طور غیرمنطقی زیاد شود که طبیعتاً جواب‌های صحیحی نخواهد بود. به منظور بالا بردن دقت، محاسبه تنش در نقاطی از پوسته به فاصله حداقل ۶۵۰ متر یا بیشتر نسبت به عمیق‌ترین بخش دریاچه سد کرخه صورت گرفته است. مقدار تنش محاسبه نشده در نقاط نزدیک‌تر از این فاصله به کف دریاچه، به راحتی در بررسی منحنی پربندی‌های تنش با استفاده از امتداد کنتورها تا کف دریاچه قابل پیش‌بینی است (گو و گو، ۱۹۷۰). این پارامترها در ۷ سطح تراز آب (۱۶۰، ۱۷۰، ۱۸۰، ۱۹۰، ۲۰۰، ۲۱۰ و ۲۲۰ متر نسبت به سطح آب‌های آزاد) برآورد شده است که نتایج آن به طور خلاصه در این بخش بیان می‌شود.

شکل‌های ۲، ۳ و ۴ نمودارهای (منحنی پربندی) به ترتیب: تنش برشی ناشی از اثر دریاچه سد در راستای بردار لغزش، تنش نرمال و توان برشی ناشی از اثر دریاچه سد در راستای بردار لغزش، در بیشینه سطح تراز آب (۲۲۰ متر) در صفحه گسیختگی سطحی گسل دالبری هستند که در شیب‌های متفاوت به ترتیب از چپ به راست



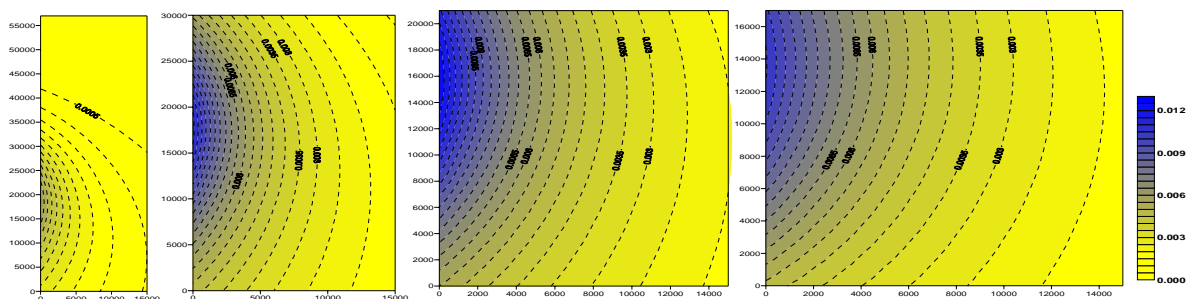
شکل ۲. نمودارهای (منحنی پربندی) تنش برشی ناشی از اثر دریاچه سد در راستای بردار لغزش گسیختگی سطحی دالبری در بیشینه سطح تراز آب (۲۲۰ متر) هستند که در شیب‌های متفاوت به ترتیب از چپ به راست ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه ترسیم شده‌اند، مقیاس رنگی برحسب بار و ابعاد نمودارها برحسب UTM به صورت محور افقی طول سطحی گسیختگی و محور قائم طول عمقی گسیختگی است.

گسیختگی و در نتیجه وقوع زمین‌لرزه القایی در سطح این قطعه از گسل تا عمق کمتر از ۲٫۵ کیلومتر خواهد بود؛ در این شیب بیشینه مقدار پارامتر مورد نظر تقریباً ۰٫۱۲ بار برآورد شده و در عمق تقریباً ۱ کیلومتر قرار گرفته است. برای زمین‌لرزه‌های القایی ناشی از مخازن، تغییرات تنشی در حدود ۰٫۰۱ مگاپاسکال (۰٫۱ بار) نیز کفایت می‌کند (تلوانی، ۲۰۰۰).

به‌طور کلی براساس تحلیل نظری تنش ناشی از مخزن در مورد بخشی از گسل دالپری واقع در منطقه مورد بررسی می‌توان این‌طور نتیجه‌گیری کرد که چنانچه دریاچه سد نزدیک به بخش فرادیواره گسل از نوع معکوس و رورانده یا فرودیواره گسل از نوع نرمال قرار گرفته باشد، انتظار می‌رود که مخزن براساس پاسخ کشسانی محیط بتواند موجب افزایش پایداری پوسته و در نتیجه تاخیر در زمان بروز گسیختگی گسل شود. با استدلالی مشابه، چنانچه دریاچه سد نزدیک به بخش فرودیواره گسل از نوع معکوس یا فرادیواره گسل از نوع نرمال قرار گرفته باشد، انتظار می‌رود که بار مخزن بتواند موجب کاهش پایداری پوسته و در نتیجه تسریع در زمان بروز گسیختگی و رخداد زمین‌لرزه القایی شود. همه این موارد، با افزایش شیب گسل یا کاهش فاصله صفحه گسل نسبت به دریاچه سد (به‌خصوص موقعیت آن در نزدیک یا زیر بخش عمیق مخزن) ملموس‌تر خواهند شد.

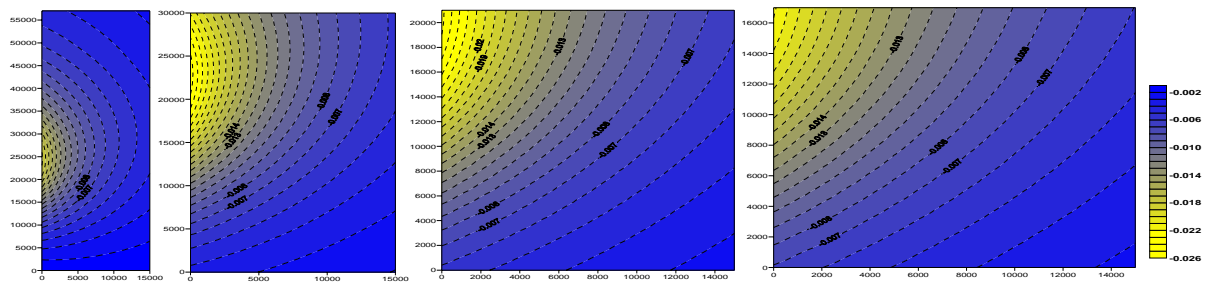
براساس شکل ۳ بیشینه مقدار تنش نرمال ناشی از اثر دریاچه سد در شیب ۱۵ درجه، گسیختگی سطحی دالپری در نزدیک‌ترین نقطه گسل به دریاچه در عمق تقریباً ۷ کیلومتری قرار داشته که با افزایش شیب به سمت اعماق بیشتر مهاجرت می‌کند. ملاحظه می‌شود که پارامتر پیش‌گفته در همه شیب‌ها به تدریج با دور شدن از این محل کاهش می‌یابد.

براساس شکل ۴ توان برشی ناشی از اثر دریاچه سد در راستای بردار لغزش سطح گسیختگی گسل دالپری در همه شیب‌ها منفی بوده که مطابق توضیحات داده شده و همچنین رابطه (۱۵) نشانگر نقش تاخیری مخزن در زمان بروز گسیختگی دالپری است. در شیب ۱۵ درجه محل کمترین تاخیر (محل کمینه توان برشی در راستای بردار لغزش) در نزدیک‌ترین نقطه گسل به دریاچه مخزن در عمق تقریباً ۶ کیلومتر قرار گرفته است و با افزایش شیب، به سمت اعماق بیشتر مهاجرت می‌کند. به‌طور کلی بیشترین تاخیر زمانی در بروز گسیختگی به ترتیب متعلق به شیب‌های ۴۵، ۳۰، ۶۰ و ۱۵ درجه (واقع در نقاط ابتدایی گسل) است، ملاحظه می‌شود که هرچه به سمت نقاط انتهایی گسل حرکت کنیم، بیشینه تاخیر زمانی با افزایش دریاچه سد کرخه روی قطعه پنهان این گسل که تا پایین دست ساختگاه سد ادامه یافته نشانگر آن است که مخزن فقط در شیب ۱۵ درجه موجب تسریع در زمان بروز



شکل ۳. نمودارهای (منحنی پربندی) تنش نرمال در گسیختگی سطحی دالپری ناشی از اثر دریاچه سد در بیشینه سطح تراز آب (۲۲۰ متر) هستند که در

شیب‌های متفاوت به ترتیب از چپ به راست ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه ترسیم شده‌اند، مقیاس رنگی برحسب بار و ابعاد نمودارها برحسب UTM به صورت محور افقی طول سطحی گسیختگی و محور قائم طول عمقی گسیختگی است.



شکل ۴. نمودارهای (منحنی پرنبدی) توان برشی ناشی از اثر دریاچه سد در راستای بردار لغزش گسیختگی سطحی دالبری در بیشینه سطح تراز آب (۲۲۰ متر) هستند که در شیب‌های متفاوت به ترتیب از چپ به راست ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه ترسیم شده‌اند، مقیاس رنگی برحسب بار و ابعاد نمودارها برحسب UTM به صورت محور افقی طول سطحی گسیختگی و محور قائم طول عمقی گسیختگی است.

نمودارهای الف): بیشینه تنش برشی، ب): بیشینه تنجش برشی، ج): بیشینه تنش اصلی، د): کمینه تنش اصلی، ه): تنش برشی و): متوسط تنش اصلی، ز): تنش نرمال، ح): توان برشی، ط): توان برشی در راستای بردار لغزش گسل، ی): تنش برشی در راستای بردار لغزش گسل نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که منحنی تغییر همه پارامترها به استثنای منحنی خطی متوسط تنش اصلی که مقدار آن در همه سطوح تراز آب، مستقل از شیب است، در سطوح تراز آب کمتر از ۲۰۰ متر به شکل خطی ظاهر می‌شوند؛ همه پارامترها با کاهش سطح تراز آب از لحاظ قدرمطلق عددی به سمت صفر می‌گریند. با توجه به بیشینه ارتفاع آب در سطح تراز ۱۹۰ متر (۳۵ متر) و موقعیت این قطعه از گسل نسبت به دریاچه سد، می‌توان این‌طور نتیجه‌گیری کرد که در سطوح تراز ۱۶۰ تا ۱۹۰ متر بیشینه گسترش اثر دریاچه در نزدیک‌ترین نقطه گسل به دریاچه (واقع در نزدیکی سطح زمین) است. روند تغییرات در نمودارهای الف تا ه مشابه است و همگی در شیب ۳۰ درجه بیشینه هستند. ملاحظه می‌شود که بیشینه تنش نرمال در شیب ۴۵ درجه است (براساس شکل ۳ این مقدار در نزدیک‌ترین نقطه گسل به دریاچه واقع در عمق حداقل ۷ کیلومتر یا بیشتر مشاهده می‌شود) که براساس قاعده موهور-کلمب موجب افزایش نیروی اصطکاک در سطح گسل و در

از مقایسه شکل‌های ۲، ۳ و ۴ موارد زیر ملاحظه

می‌شود:

الف- انحنا و روند کنتورها همگی متمایل به سمت دریاچه سد (منشا نیرو) است، که به دلیل فاصله نسبتاً زیاد این گسل از مخزن سد (از نقطه نظر زمین‌لرزه‌های القایی) شکلی یکنواخت به خود گرفته‌اند.

ب- به دلیل دوری صفحه گسل از بخش عمیق دریاچه، کنتورهای دو پارامتر تنش و توان برشی در راستای بردار لغزش کاملاً مشابه یکدیگر و عکس تنش نرمال‌اند، به طوری که محل کمینه این دو پارامتر همان بیشینه تنش نرمال است.

ج- محل بیشترین تأخیر زمانی در بروز گسیختگی در همه شیب‌ها همواره در نزدیک‌ترین نقاط گسل به دریاچه سد بوده است که با افزایش سطح تراز آب، افزایش می‌یابد.

د- گرادیان پارامترهای متفاوت تنش در محل بیشینه تأخیر زمانی در بروز گسیختگی بسیار بیشینه از سایر نقاط گسل بوده است (در این بخش از گسل فاصله کنتورها بسیار کم است) و به تدریج با دور شدن از این نقاط کاهش می‌یابد.

در شکل ۵ میزان تغییر بیشینه پارامترهای متفاوت تنش ناشی از اثر دریاچه سد در هفت سطح تراز آب (۱۶۰، ۱۷۰، ۱۸۰، ۱۹۰، ۲۰۰، ۲۱۰ و ۲۲۰ متر) برحسب تغییر شیب صفحه گسیختگی سطحی گسل دالبری به ترتیب در

نتیجه توان برشی خواهد شد. این نتیجه به خوبی با بیشینه تاخیر زمانی در بروز گسیختگی در شیب ۴۵ درجه مطابقت می‌کند. همان‌گونه که مشخص است علی‌رغم مقدار زیاد تنش برشی خالص در سطح گسل، مولفه تنش برشی در راستای بردار لغزش گسل فقط در شیب ۱۵ درجه مقداری مثبت و بسیار کوچک دارد و در سایر شیب‌ها کاملاً خلاف جهت و البته بسیار کوچک است (شکل ۵- نمودارهای ه و ی). متعاقباً مشابه این نتیجه در توان برشی خالص و در راستای بردار لغزش نیز دیده می‌شود (شکل ۵- نمودارهای ی و ط).

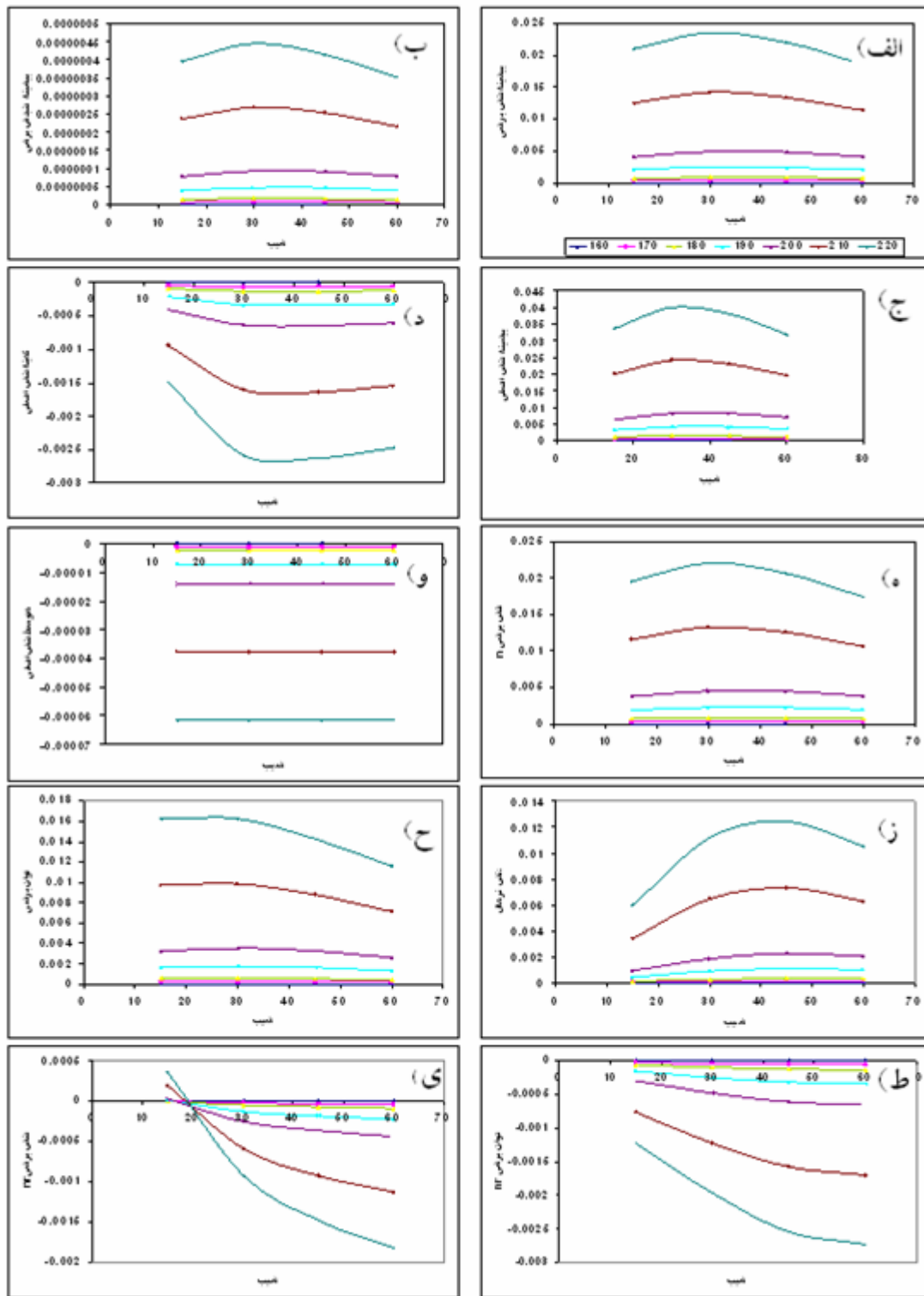
۴ بحث

در این بخش ابتدا میزان تغییرات سطح آب مخزن سد کرخه و رابطه آن با روند لرزه‌خیزی منطقه، به‌خصوص در مورد گسل دالپری مورد بررسی قرار گرفته است، سپس مروری اجمالی بر پاره‌ای از بررسی‌های آماری صورت گرفته روی زمین‌لرزه‌های گستره پیرامون سد کرخه خواهد شد و در نهایت نتایج آماری و مشاهده‌ای با نتایج حاصل از مدل‌سازی ریاضی تنش ناشی از مخزن سد کرخه در صفحه گسیختگی گسل دالپری (آورده شده در بخش پیشین) مورد مقایسه و بحث قرار می‌گیرد.

سد مخزنی کرخه در ۲۴ کیلومتری شمال غرب اندیمشک در استان خوزستان (در جنوب غربی ایران) در ۴۸ درجه و ۸٫۷ دقیقه طول شرقی و نیز ۳۲ درجه و ۶٫۲۹ دقیقه شمالی در منطقه کرخه واقع شده است. شبکه لرزه‌نگاری سد به‌منظور مشاهده نحوه توزیع و تغییرات فراوانی رویداد زمین‌لرزه‌ها، قبل و بعد از آب‌گیری مخزن سد کرخه و امکان وقوع زمین‌لرزه‌های القائی طراحی و نصب شده است. اولین شبکه موقت لرزه‌نگاری در تاریخ مهرماه ۱۳۷۵ به صورت آنالوگ در گستره پیرامون طرح سد کرخه با پنج ایستگاه شروع به کار کرد. شبکه موقت رقمی تله‌متری در تیرماه ۱۳۷۶ شروع به کار کرد، به نظر می‌رسد تعویض شبکه از آنالوگ به دیجیتال سبب شده تا

امکان ثبت رخدادها بهتر شود. شبکه دائمی لرزه‌نگاری رقمی سد کرخه از سال ۱۳۷۸ با پنج ایستگاه شروع به کار کرد که کار این شبکه تا امروز به صورت دائم ادامه یافته است. آب‌گیری سد کرخه در دو مرحله صورت گرفت، اولین مرحله در تاریخ ششم ژوئیه ۱۹۹۷ شروع شد که به‌دلیل وجود نشتی و عملیات عمرانی دیوار آب‌بند به تعویق افتاد تا اینکه در سیزده فوریه ۲۰۰۰ مجدداً آغاز شد. منحنی سطح آب مخزن سد کرخه (ترسیم شده براساس گزارش‌های رسیده از سد کرخه به‌طور دستی) به‌همراه تعداد روزانه زمین‌لرزه‌های ثبت شده شبکه لرزه‌نگاری سد کرخه از اواسط ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۶ در شکل ۶ نشان داده شده است؛ در برخی زمان‌ها (ب‌طور مثال: سوم آوریل ۲۰۰۱) در شیب منحنی سطح آب، افزایش و کاهش‌های تندی مشاهده می‌شود (در شکل با دایره مشخص شده) که مقارن با افزایش تعداد روزانه زمین‌لرزه‌ها است. ملاحظه می‌شود که هم‌زمان با شروع اولین مرحله آب‌گیری سد تعداد زمین‌لرزه‌ها افزایش یافته ولی بعد از پرشدن سد، تعداد لرزش‌ها به‌طور محسوسی کاسته شده است. فراوانی زمین‌لرزه‌ها در سال ۲۰۰۰ (شروع دومین مرحله آب‌گیری مخزن سد)، نسبت به سال‌های قبل افزایش قابل توجهی داشته که بی‌ربط با مسئله آب‌گیری نیست.

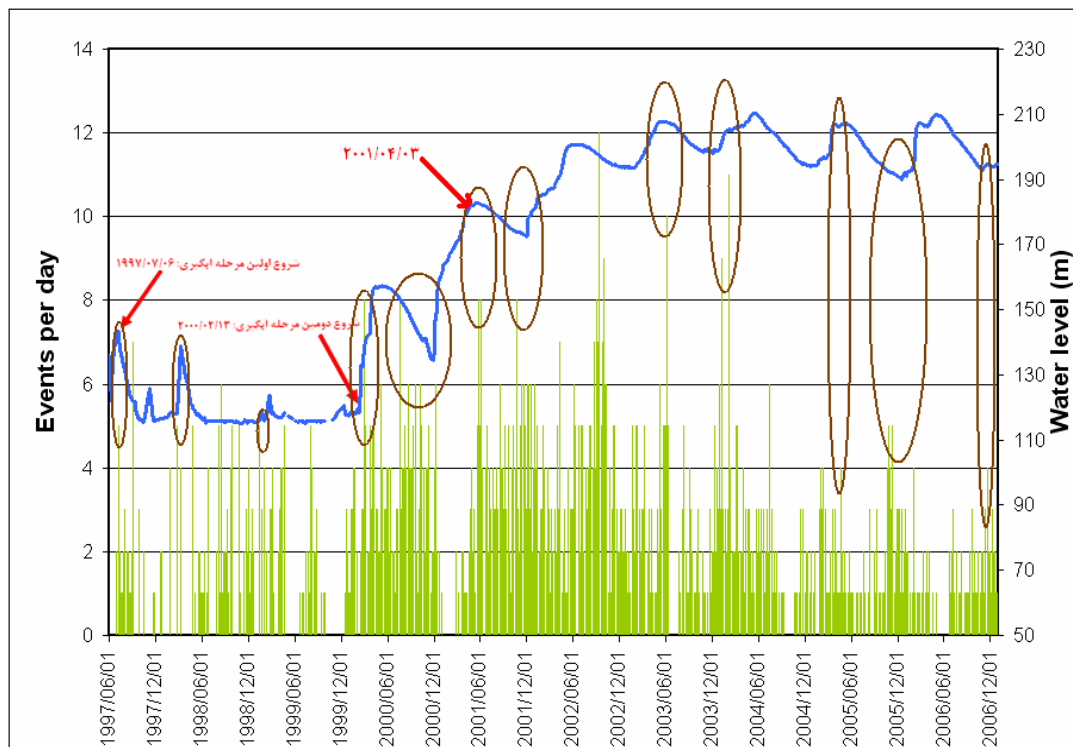
بررسی‌ها نشان می‌دهد که تعداد زمین‌لرزه‌های مشاهده شده در منطقه کرخه با مشخصه بزرگای کمتر از ۴ و عمق کانونی بین ۵ تا ۱۵ کیلومتر به‌طور محسوسی بعد از آب‌گیری سد افزایش یافته است. این موضوع با قبول بحرانی بودن منطقه (در برابر وقوع زمین‌لرزه) می‌تواند مدعی وقوع زمین‌لرزه‌های القایی باشد (حسینی و همکاران، ۱۳۸۵). شکل ۷ نقشه لرزه زمین‌ساخت گستره پیرامون سد کرخه در منطقه مورد بررسی (مستطیلی با اضلاع ۸۵ × ۶۵ کیلومتر با مرکزیت دریاچه سد) ۱۸ ماه قبل و بعد از دومین مرحله آب‌گیری سد را نشان می‌دهد.



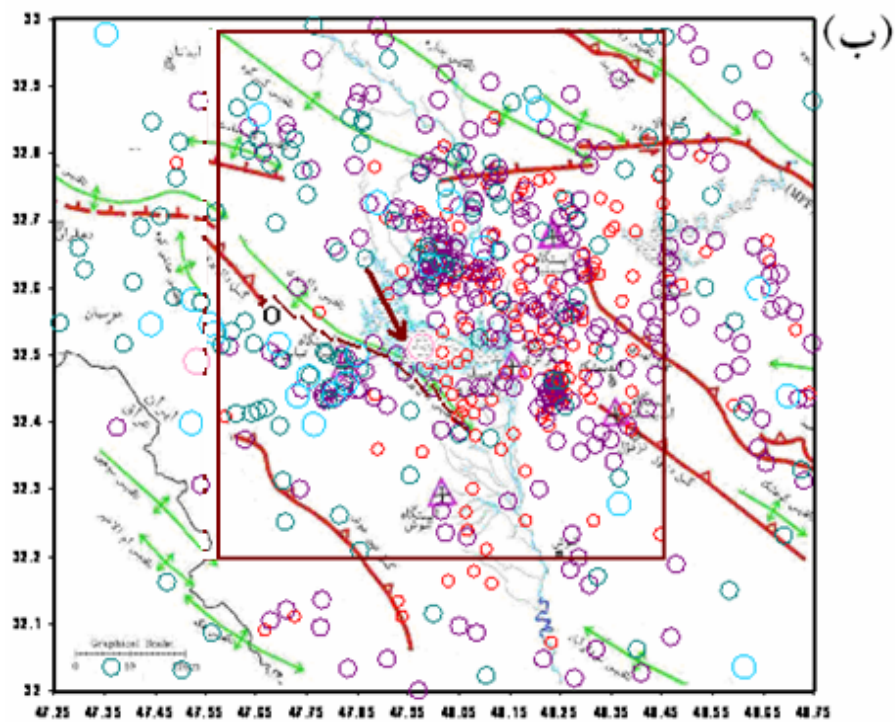
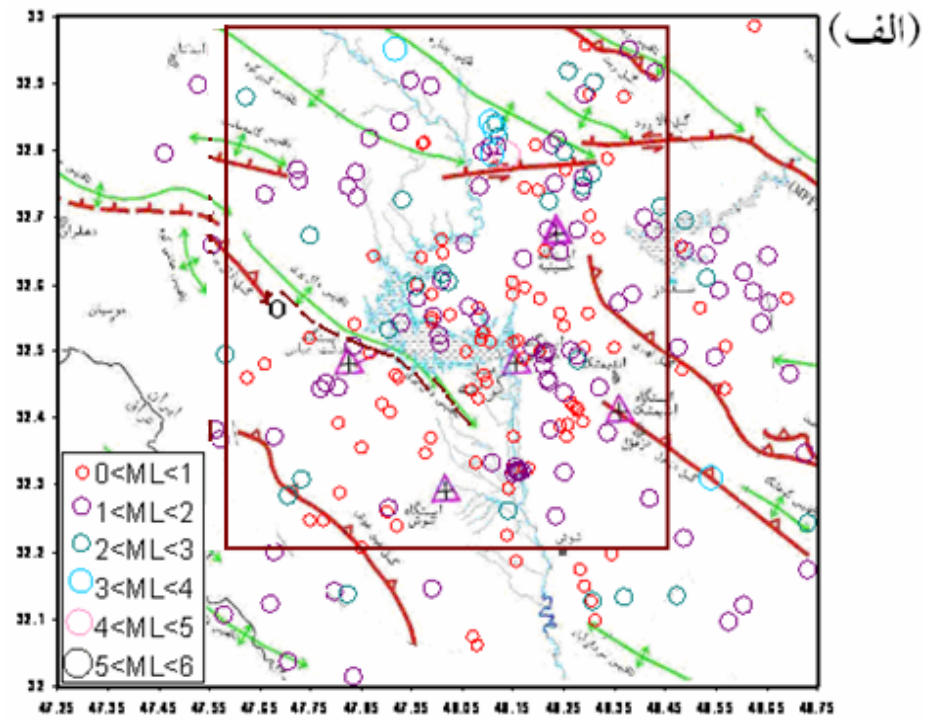
شکل ۵. بیشینه پارامترهای مختلف تنش ناشی از اثر دریاچه سد در هفت سطح تراز آب (۱۶۰، ۱۷۰، ۱۸۰، ۱۹۰، ۲۰۰، ۲۱۰ و ۲۲۰ متر) بر حسب تغییر شیب صفحه گسیختگی سطحی گسل دالبری به ترتیب در نمودارهای الف): بیشینه تنش برشی، ب): بیشینه تنجش برشی، ج): بیشینه تنش اصلی، د): کمینه تنش اصلی، ه): تنش برشی و): متوسط تنش اصلی، ز): تنش نرمال، ح): توان برشی، ف): توان برشی در راستای بردار لغزش گسل و ی): تنش برشی در راستای بردار لغزش گسل نشان داده شده است.

(شرکت لرزه‌نگار پارسیان، ۱۳۸۵) زمین‌لرزه سوم آوریل ۲۰۰۱ متناسب به قطعه پنهان گسیختگی گسل دالپری، با بزرگای ۴٫۷ رخ داده تقریباً ۱۴ ماه پس از شروع دومین مرحله آب‌گیری، در فاصله تقریباً ۱۲ کیلومتری از سد کرخه (به نقل از مرکز لرزه‌نگاری جهانی (International Seismological Center, ISC) احتمالاً از نوع القایی است. همچنین بهنام و همکاران (۲۰۰۳) نیز براساس پردازش داده‌های لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری ثبت‌شده شبکه‌های شتاب‌نگاری و لرزه‌نگاری محلی سد کرخه حدوداً به مدت شش سال (از ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۲) احتمال القایی بودن زمین‌لرزه سوم آوریل ۲۰۰۱ (متناسب به این قطعه پنهان) را مطرح کرده‌اند. این زمین‌لرزه در شکل‌های ۶ و ۷ با پیکان مشخص شده است. این مشاهدات با نتایج حاصل از مدل‌سازی ریاضی تنش موثر ناشی از مخزن سد کرخه روی قطعات گسل دالپری نیز مطابقت می‌کند.

براساس شکل ۷ و مشاهده رومرکز زمین‌لرزه‌ها احتمال می‌رود که گسل دالپری که در غرب ساختگاه سد قرار دارد طولی بیشتر از آنچه که در نقشه کشیده شده، داشته باشد. گسل لهبری، قطعه پنهان و احتمالی گسل دالپری و گسل چپ‌گرد پیشانی کوهستان از منبع‌های مهم و فعال منطقه هستند که در شکل ۷ کاملاً مشهودند. براساس تحقیقات صورت گرفته در منطقه مورد بررسی، منبع‌های اصلی گسل لهبری و قطعه پنهان گسل دالپری‌اند. قطعه پنهان گسیختگی گسل دالپری (وابسته به تاقدیس دالپری) که با روند تقریباً شمالی-جنوبی تا نزدیکی پایین دست ساختگاه سد ادامه یافته است (شکل ۱) به‌ویژه بعد از آب‌گیری، روند افزایشی در فعالیت خود داشته است. این در حالی است که تغییر واضحی در فعالیت لرزه‌خیزی گسیختگی سطحی گسل دالپری در گستره مورد بررسی مشاهده نمی‌شود (شکل ۷). براساس گزارش جامع شبکه لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری طرح سد و نیروگاه کرخه



شکل ۶. منحنی سطح آب مخزن سد کرخه به همراه تعداد روزانه زمین‌لرزه در بازه زمانی (۱۹۹۷ تا ۲۰۰۶).



شکل ۷. نقشه لرزه‌زمین‌ساخت گستره پیرامون سد کرخه ۱۸ ماه الف): قبل و ب): بعد از دومین مرحله آب‌گیری (۲۰۰۰/۰۲/۱۳)؛ چهارضلعی رسم‌شده نشانگر مستطیلی با اضلاع ۸۵ × ۶۵ کیلومتر با مرکزیت دریاچه سد است.

۵ نتیجه گیری

براساس نتایج حاصل از مدل‌سازی ریاضی تنش موثر ناشی از مخزن سد کرخه روی قطعاتی از گسل دالپری موارد زیر قابل ذکر است:

۱- تنش ناشی از مخزن در قطعه‌ای از گسیختگی سطحی گسل دالپری موجب تاخیر در زمان بروز گسیختگی در همه شیب‌ها و در نتیجه وقوع زمین‌لرزه طبیعی، علی‌رغم ممانعت فشار آب مخزن است.

۲- تنش ناشی از مخزن در قطعه‌ای از گسیختگی پنهان این گسل که با روند تقریباً شمالی-جنوبی تا نزدیکی پایین دست ساختگاه سد ادامه یافته است، موجب تسریع در زمان بروز گسیختگی و در نتیجه وقوع زمین‌لرزه القایی تنها در شیب ۱۵ درجه در اعماق کمتر از ۲٫۵ کیلومتر است. در این شیب بیشینه مقدار توان برشی القایی ناشی از اثر دریاچه سد در راستای بردار لغزش این قطعه تقریباً ۱۲ بار برآورد شده که در عمق تقریباً ۱ کیلومتری قرار گرفته است.

۳- براساس نتایج حاصل از مدل‌سازی ریاضی احتمال القایی بودن زمین‌لرزه سوم آوریل ۲۰۰۱ (منتسب به قطعه پنهان گسل دلپری) است.

این نتایج با بررسی آماری زمین‌لرزه‌های رخ داده در منطقه مورد بررسی که نشانگر افزایش تجمع زمین‌لرزه‌های عموماً از نوع کم‌عمق و بزرگای کمتر از ۴، به‌خصوص پس از آب‌گیری در منطقه مورد بررسی پیرامون مخزن سد (به‌ویژه در راستای قطعه پنهان گسیختگی گسل دالپری) است نیز مطابقت می‌کند.

منابع

حسینی، ز.، حافظی مقدس، ن.، امیدی، پ. و جوان دولویی، غ.، ۱۳۸۵، بررسی آماری زلزله‌های القایی ناشی از آبگیری سد کرخه، بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین. ۳۰ بهمن ماه الی ۲ اسفندماه

۱۳۸۵.

شرکت لرزه‌نگار پارسیان، ۱۳۸۵، گزارش جامع شبکه لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری طرح سد و نیروگاه کرخه، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران.

شرکت مهتاب قدس، ۱۳۷۰ الف، طرح سد مخزنی کرخه (مرحله دوم)، مطالعات و طراحی مکانیک سنگ، جلد دوم، بخش ۶-۲-۵، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران.

شرکت مهتاب قدس، ۱۳۷۰ ب، طرح مطالعات سد مخزنی کرخه (مرحله اول)، لرزه‌خیزی و خطر زمین‌لرزه، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران.

Behnam, M., Nayeb, S. and Mahdavian, A., 2003, Monitoring of Karkheh Damite in the southwest of Iran. Commission Internationale Des Grands Barrages, Montreal, Canada.

Chander, R. and Kalpna, 1997, On categorizing induced and natural tectonic earthquakes near new reservoirs. Eng. Geol., **46**, 81-92.

Gough, D.I. and Gough, W.I., 1970, Stress and deflection in the lithosphere near Lake Kariba. Geophys., J., **21**, 65-78.

Gupta, H. K., 1992, Reservoir-induced Earthquakes, Developments in Geotechnical Engineering (Elsevier).

Gupta, H.K., 2002, A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India, Science Rev. **58**, 279-310.

Landau, L. D. and Liftshitz, E. M., 1959, Theory of elasticity, Addison Wesley. Pergamon Press, London, UK.

Lay, T. and Wallace T. C., 1995, Modern Global Seismology. Academic Press. San Diego.

Simpson, D. W., Leith, W. S. and Scholz, C. H., 1988, Two types of reservoir-induced seismicity, B. Seismol. Soc. Am. **78**, 2025-2040.

Snow, D. T., 1972, Geodynamics of seismic reservoirs. Proc. Symp. Percolation through Fissured Rock. Ges. Erd- und Grundbau. Stuttgart. T2J: 1-9., Germany.

Talebian, M. and Jakson, J., 2004, A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in Zagros mountains of Iran, Geophys. J. Int., **156**, 506-526.

Talwani, P., 2000, Seismogenic properties of the

crust inferred from recent studies of reservoir-induced seismicity- application to Koyna. *Curr Sci.* **79**, 1327-1333.

Talwani, P., Rastogi, B.K. and Stevenson, D., 1980, Induced seismicity and earthquake prediction studies in South Carolina. 10th Tech. Rep., U.S. Geol. Surv. Contract 14-08-0001-17670.

Utsu, T., 1965, A method for determining the value of b in the formula $\log n = a - bM$, showing the magnitude- Frequency relation for earthquakes. *Geophys. Bull., Hokkaido University*, 13: 99-103. in Japanese with English abstract.