

بررسی تأثیر زمین‌لرزه بر تراز آب‌های زیرزمینی و آبدهی چاه‌های آب ناشی از زمین‌لرزه ۲۰ فروردین‌ماه ۱۳۹۲ کاکي با بزرگای گشتاوری ۶/۳ در استان بوشهر

سارا گودرزی^۱، سعید زارعی^۲ و رضا منصوری^{*۲}

^۱ دانش‌آموخته ارشد، گروه ژئوفیزیک، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

^۲ استادیار، گروه ژئوفیزیک، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۸)

چکیده

با وقوع زمین‌لرزه، بخشی از انرژی آزادشده به‌صورت امواج کشسان از کانون زمین‌لرزه منتشر می‌شود. سرعت این امواج به جنس محیط کشسان و الگوی انتشار آنها به سازوکار گسلش بستگی دارد. پاسخ محیط به امواج طولی به‌صورت تراکم و انبساط محیط ظاهر می‌شود. تراکم و انبساط محیط می‌تواند منجر به تغییراتی در محیط انتشار امواج از جمله تغییر در سطح تراز آب و تغییرات آبدهی در آبخوان‌ها، چاه‌ها و چشمه‌ها قبل، حین و بعد از وقوع یک رویداد لرزه‌ای شود. تغییرات تراز آب می‌تواند در ایجاد دگرشکلی در پوسته، تأثیر بر منابع آبی و تولیدات نفتی، شروع روانگرایی، کنترل توزیع پس‌لرزه‌ها، چکانش زمین‌لرزه‌های جدید و فوران گل‌فشان‌ها مؤثر باشد؛ از این‌رو، این تغییرات نسبت به دیگر اثرهای هیدرولوژیکی زمین‌لرزه از اهمیت بیشتری برخوردار است. در این مطالعه، اثر زمین‌لرزه کاکي (Mw ۶/۳) واقع در استان بوشهر (۲۰ فروردین‌ماه ۱۳۹۲) بر تراز و آبدهی چاه‌های مناطق مجاور کانون زمین‌لرزه در محدوده‌ای با شعاع ۵۰ کیلومتر از رومرکز بررسی شده است. به این منظور، سطح تراز آب چاه‌های پیرامون رومرکز در ماه‌های متوالی در سال‌های قبل، حین و بعد از وقوع رویداد با هم مقایسه شدند. با توجه به سازوکار کانونی زمین‌لرزه، با برآورد مناطق کشش و فشارش در منطقه مطالعاتی، به بررسی همخوانی اثر رویداد در این مناطق با تغییرات سطح تراز آب و آبدهی چاه‌ها و چشمه‌ها پرداخته شد. ارزیابی‌ها بیانگر بالا آمدن سطح آب چاه‌ها و افزایش آبدهی چاه‌ها و چشمه‌هایی است که در محدوده تشعشع امواج فشاری واقع شده‌اند. به عبارت دیگر، بیشتر چاه‌هایی که در راستای تابش امواج تراکمی هستند، در یک بازه زمانی چندماهه (حداکثر چهار ماه) افزایش سطح تراز را نشان می‌دهند. در مقابل، چاه‌هایی که در راستای تنش برشی قرار دارند، یا با افت سطح تراز آب مواجه شده‌اند یا تغییر محسوسی نداشته‌اند.

واژه‌های کلیدی: امواج طولی، تنش، کرنش، سازوکار کانونی، تغییرات تراز آب، آبدهی

۱.... مقدمه

پاسخ‌های هیدرولوژیکی پس از وقوع یک رویداد لرزه‌ای در فواصل دور و نزدیک از رومرکز زمین‌لرزه در نقاط مختلف جهان مطالعه شده‌اند (نور و بورکر، ۱۹۷۲؛ بسل و نور، ۲۰۰۲؛ هولزر و همکاران، ۲۰۰۵ و ونگ و همکاران، ۲۰۰۷). این نوع پاسخ‌ها بسیار متنوع هستند (سیتق، ۲۰۰۸ و چن و ونگ، ۲۰۰۹). از جمله این پاسخ‌ها می‌توان تغییر در تراز آب (بک و همکاران، ۲۰۰۳؛ سُرّی و همکاران، ۲۰۰۳ و شی و همکاران، ۲۰۱۵)، تغییرات دما (شی و همکاران، ۲۰۱۵ و اتو و همکاران، ۱۹۸۹)، تغییرات در ترکیب شیمیایی چشمه و چاه (شی و همکاران، ۲۰۱۵؛ هولمکوئیست و همکاران، ۲۰۰۴ و وان در ول و همکاران، ۲۰۱۴)، تغییرات جریان سیال (شی و همکاران، ۲۰۱۵؛ مویر وود و کینگ، ۱۹۹۳؛ رجستازر و همکاران، ۱۹۹۵؛ بردسکی و همکاران، ۲۰۰۳ و مونتگمری و مانگا، ۲۰۰۳)، تغییر در خصوصیات چشمه و شکل‌گیری یا ناپدید شدن آنها (اتو و همکاران، ۱۹۸۹ و بلانچارد و بایرلی، ۱۹۳۵) و تغییر در فعالیت آتشفشان (بلانچارد و بایرلی، ۱۹۳۵) را نام برد. در میان پاسخ‌های هیدرولوژیکی زمین‌لرزه، تغییرات تراز آب به‌طور گسترده‌ای گزارش شده‌اند. تأثیر زمین‌لرزه بر تغییر تراز آب‌های زیرزمینی از سال ۱۹۳۰ مورد توجه زلزله‌شناسان قرار گرفته است (باور و هیتن، ۱۹۷۸؛ رلفز، ۱۹۹۸؛ کینگ و بگلن، ۱۹۹۹؛ ونگ و همکاران، ۲۰۰۹ و فرنسی و همکاران، ۲۰۱۴).

عمده تحقیقات انجام‌شده و در دسترس، تجربیات بر پایه مطالعات میدانی چاه‌هایی است که تحت تأثیر زمین‌لرزه قرار گرفته‌اند و سطح تراز در آنها تغییر کرده است؛ برای مثال، رادنیکی و همکاران (۲۰۰۳) افت ناگهانی تراز آب چاه در مجاورت گسل سن‌آندریاس را بررسی کردند. نتایج بررسی، انطباق کامل بین اندازه‌گیری‌های تراز آب و داده‌های خزش‌سنج (creepmeter) را نشان دادند. چیا و همکاران (۲۰۰۸)

تأثیر زمین‌لرزه چی‌چی با بزرگای ۷/۶ را در فاصله ۱۰۰ کیلومتری از رومرکز زمین‌لرزه در ۲۷۶ چاه بررسی کردند. نتایج، توزیع تغییرات تراز آب مشاهده‌شده را وابسته به توزیع میدان تنش نشان دادند. ونگ و چیا (۲۰۰۸) با به‌کارگیری روابط تجربی بین بزرگای و چگالی انرژی زمین‌لرزه و فاصله رومرکزی، تغییر حجم را سازوکار حاکم برای توضیح تغییرات ناگهانی تراز آب در میدان نزدیک رویداد و افزایش نفوذپذیری را علت تغییر تدریجی تراز آب در میدان‌های دورتر معرفی کرد. ژائولانگ و همکاران (۲۰۱۱) با بررسی اثر زمین‌لرزه ژاپن بر تراز آب‌های زیرزمینی، تغییرات تنش را با توجه به نظریه کشسان خطی محاسبه کردند. مارکاسیو و مارتینلی (۲۰۱۲) با بررسی افزایش ناگهانی در سطح آب برخی چاه‌ها در ایتالیا نشان دادند که اندازه و شکل ناهنجاری‌های مرتبط با زمین‌لرزه، تابعی از فاصله نسبی از ناحیه رومرکزی زمین‌لرزه است. ژانگ و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر سه زمین‌لرزه بزرگ سوماترا، ونچوان و توهوکو را در یک چاه بررسی کردند. مطالعه مذکور به این نتیجه منجر شد که شوک لرزه‌ای می‌تواند موجب تراکم یا اتساع در چاه شود و با تغییرات نفوذپذیری به افزایش تراز آب در چاه منجر شود. شالو و همکاران (۲۰۱۶) با بررسی تغییرات تراز آب دو چاه میزار و گوم، واقع در فلسطین اشغالی نشان دادند که تنش حجمی در نتیجه تراکم ایجاد و تنش برشی موجب تخریب و آوار می‌شود. فرایند غالب به خواص سنگ وابسته است.

تغییرات تراز آب به دو روش تجزیه و تحلیل می‌شود: بررسی چگونگی پاسخ یک چاه ویژه به چند زمین‌لرزه (شی و همکاران، ۲۰۱۵ و نسپلی و همکاران، ۲۰۱۶) و بررسی چگونگی پاسخ‌های تعدادی چاه به یک زمین‌لرزه معین (شی و همکاران، ۲۰۱۵ و واکیتا، ۱۹۷۵). هر دو دیدگاه فرایندهایی را توصیف می‌کنند که ناشی از برهم‌کنش‌های زمین‌ساختی و هیدرولوژیکی است (شی و

دیگر از تقسیم‌بندی پاسخ‌ها، کاهش یا افزایش ناگهانی بسیار شبیه به سیگنال پله‌ای تراز آب (باور و هیتن، ۱۹۷۸؛ واکیتا، ۱۹۷۵ و کیلتی و رولف، ۱۹۹۷) یا افزایش یا کاهش تدریجی ناپایدار برای یک هفته یا چند روز است (کیلتی و رولف، ۱۹۹۷ و بک و همکاران، ۲۰۰۳). در حوزه نزدیک زمین لرزه، تغییرات تراز آب مشاهده شده، که اغلب پله‌ای است، با فشار کشسانی توجیه می‌شود که هنگام وقوع زمین لرزه به میدان کرنش استاتیکی وارد می‌شود، اما سازوکار کرنش استاتیکی به سستی می‌تواند تغییرات تراز آب زیرزمینی را در حوزه منطقه‌ای یا دور توضیح دهد (کنگ و همکاران، ۲۰۰۰). هر دو اثر هیدرولوژیکی تغییرات تنش استاتیکی و دینامیکی، به بزرگا و فاصله زمین لرزه مسبب وابسته هستند (بسل و نور، ۲۰۰۲ و ونگ و همکاران، ۲۰۰۹).

در حوزه نزدیک (فاصله قابل مقایسه با گسیختگی در طول گسل)، تغییرات تنش دینامیکی و استاتیکی شایان توجه است درحالی که در حوزه دور (خیلی بزرگ‌تر از ابعاد گسیختگی گسل)، تغییرات نفوذپذیری به وجود آمده از کرنش دینامیکی، اثرهای هیدرولوژیکی را کنترل می‌کند (بسل و نور، ۲۰۰۲ و باور و هیتن، ۱۹۷۸). معمولاً فرض بر این است که تراز آب در حوزه دور، تنها به امواج P و ریلی پاسخ می‌دهد که به طور متناوب فشرده و منبسط می‌شوند (ونگ و مانگا، ۲۰۱۰) و پاسخ تراز آب به موج S با مد تبدیلی موج برشی (Sv) به موج فشاری در سطح آزاد و پاسخ کشسان مرتبط است (مویر وود و کینگ، ۱۹۹۳ و باور و هیتن، ۱۹۷۸). برخی مطالعات نشان می‌دهند که تراز آب همچنین در پاسخ به موج لاو نوسان می‌کند که این پاسخ را به پاسخ کشسان ناهمسانگرد چاه نسبت دادند (مویر وود و کینگ، ۱۹۹۳ و ونگ و مانگا، ۲۰۱۰).

تأثیر تنش دریک بازه بلندمدت (چندساله)، منجر به تغییر درخواص سنگ‌ها از جمله تخلخل و نفوذپذیری

همکاران، ۲۰۱۵ و رکسین و همکاران، ۱۹۶۲). رویکرد اول با حذف اثرهای غیرلرزه‌ای، نقش تنشی را بررسی می‌کند که زمین لرزه ایجاد کرده است (سُری و همکاران، ۲۰۰۳ و اتو و همکاران، ۱۹۸۹) و در رویکرد دوم با ایجاد یک توزیع فضایی از پاسخ‌های تراز آب، روابط بین تغییرات تراز آب و کرنش، تنش و جابه‌جایی بررسی می‌شود (اتو و همکاران، ۱۹۸۹ و فرنسی و همکاران، ۲۰۱۴).

فرایندهای مختلفی برای پاسخ‌گویی به زمین لرزه وجود دارند نظیر: پاسخ کشسان به کرنش استاتیکی لرزه‌ای (نسپلی و همکاران، ۲۰۱۶ و شی و همکاران، ۲۰۱۵)، تثبیت رسوبات (شی و همکاران، ۲۰۱۵ و واکیتا، ۱۹۷۵)، مسدود شدن منافذ و شکستگی‌ها با جریان‌های تولیدی ناشی از عبور امواج (بک و همکاران، ۲۰۰۳؛ شی و همکاران، ۲۰۱۵ و رکسین و همکاران، ۱۹۶۲)، رشد حباب گازی لرزه‌ای (شی و همکاران، ۲۰۱۵ و ان‌جی، ۲۰۱۴) و شوک ناشی از تراکم و تغییر حجم (شی و همکاران، ۲۰۱۵ و کرووز و کوپر، ۲۰۱۴).

پاسخ تراز آب به زمین لرزه، متفاوت و پیچیده است. در گزارش‌های موجود، این پدیده به صورت پالس‌های نوسانی افزایشی و کاهشی، افزایش و کاهش پله‌ای بیان شده است. سطح تراز آب بعد از عبور موج لرزه‌ای با توجه به برگشت به حالت اولیه یا پایداری در آن، تغییرات گذرا یا پایدار نشان می‌دهد (کنگ و همکاران، ۲۰۰۰). به طور کلی، پاسخ تراز آب به زمین لرزه به لحاظ زمانی به نوسانات دینامیکی گذرای همالرز و تغییرات پایدار پس‌لرزه‌ای تقسیم‌بندی می‌شود (کنگ و همکاران، ۲۰۰۰؛ ربرترز و همکاران، ۲۰۰۳؛ رولف، ۱۹۹۸؛ رزه و همکاران، ۲۰۰۸ و باور و هیتن، ۱۹۷۸). تغییرات دائمی تراز آب اغلب در اثر زمین لرزه‌های بزرگ و در فواصل نزدیک به گسیختگی گسل اتفاق می‌افتند؛ جایی که تغییرات تنش استاتیکی بزرگ است (رزه و همکاران، ۲۰۰۸). نوعی

می‌شود. تنش تراکمی منجر به فشرده‌سازی سنگ و در نتیجه، افزایش فشار منفذی می‌شود، اما تنش کششی منجر به کشیدگی سنگ و انبساط آن و در نتیجه، افت فشار منفذی می‌شود (ونگ و همکاران، ۲۰۰۹). افزایش فشار سیال، بازتاب‌دهنده تنش نرمال است. فشار مایعات تنش نرمال را تغییر می‌دهد؛ بنابراین افزایش فشار خالص می‌تواند شروع یک لرزه‌خیزی باشد و کاهش فشار می‌تواند لرزه‌خیزی را به تأخیر اندازد (نسپویل و همکاران، ۲۰۱۶).

نوسانات فشار منفذی با تغییرات تنش حجمی (دینامیکی و استاتیکی)، به جزرومد و عبور امواج لرزه‌ای مربوط است (ونگ و مانگا، ۲۰۱۰). از طرف دیگر، تغییرات تنش برای بررسی و مطالعه فشار منفذی همالرز نیز به کار می‌رود (ونگ و همکاران، ۲۰۰۹).

تغییرات نفوذپذیری که ناشی از تنش (استاتیکی یا دینامیکی) باشد، می‌تواند افزایش پاسخ تراز آب را حین رویدادهای لرزه‌ای توجیه کند (ونگ و همکاران، ۲۰۰۹). در حین وقوع زمین‌لرزه کم‌عمق، افزایش نفوذپذیری می‌تواند سازوکاری معمول برای پاسخ‌های هیدرولوژیکی در حوزه دور و منطقه‌ای باشد. در محیط‌های رسوبی، برای چاه‌های کم‌عمق، تراکم یا روانگرایی ناشی از افزایش فشار سیال توجیه‌کننده تغییرات است (باور و هیتن، ۱۹۷۸ و ونگ و همکاران، ۲۰۰۹). به نظر می‌رسد علت اصلی تغییرات تراز آب در یک آبخوان هنگام عبور امواج لرزه‌ای، ناشی از تغییر شکل کشسان پوسته باشد (باور و هیتن، ۱۹۷۸ و ونگ و همکاران، ۲۰۰۹). توجه به این نکته ضروری است که پاسخ تراز آب به امواج لرزه‌ای را فقط با یک سازوکار نمی‌توان توضیح داد و بین امواج لرزه‌ای، سامانه هیدرولوژیکی محلی، خصوصیات شکستگی و گسل و زمین‌شناسی محل، اندرکنش پیچیده‌ای وجود دارد (رجستاز و همکاران، ۱۹۹۵).

در مطالعه حاضر، تغییرات تراز آب و آبدهی چاه‌ها و

چشمه‌های آب واقع در فاصله‌های محلی (محدوده ۵۰ کیلومتری اطراف رومرکز زمین‌لرزه) یک چشمه زمین‌لرزه در ایالت لرزه‌خیز زاگرس در جنوب غرب ایران بر اثر عبور امواج لرزه‌ای مطالعه شد. با استفاده از الگوریتم‌های مربوط به محاسبه جابه‌جایی و کرنش‌ها در محیط نیم‌فضا در نرم افزار Coulomb 3.4 و تعیین مناطق کشش و فشارش در ناحیه و داده‌های آماری سطح آب، مقایسه در ماه‌های مختلف صورت گرفته و بررسی‌های تراز آب انجام شده است. مشاهدات نشان می‌دهد تراز آب چاه‌ها و چشمه‌ها به جابه‌جایی استاتیکی و کرنش محیط تحت تأثیر امواج لرزه‌ای تا حد زیادی پاسخ می‌دهد و داده‌های آماری در دسترس از تراز آب چاه‌های مختلف، این مورد را تأیید می‌کنند. داده‌های آماری شامل سطح تراز آب چاه‌ها در سال‌های مختلف است. با توجه به وقوع زمین‌لرزه در فروردین ماه سال ۹۲، سطح تراز آب چندین چاه در ماه‌های بهمن و اسفند (قبل از رویداد)، فروردین (حین رویداد) و اردیبهشت و خرداد (بعد از رویداد) در سه سال متوالی ۹۱، ۹۲ و ۹۳ رسم و با هم مقایسه شدند. تصاویر به‌خوبی گویای تغییرات پس‌لرزه‌ای تعدادی چاه واقع در محدوده امواج تراکمی است.

۲ روش تحقیق

در مطالعه حاضر، با تحلیل ریاضی دگرشکلی استاتیکی لرزه‌ای، توزیع تنش و پاسخ محیط پیرامون چشمه زمین‌لرزه ارزیابی شده است. دگرشکلی‌های استاتیکی براساس محاسبات جابه‌جایی کرنش و تنش در محیط نیم‌فضا و با استفاده از توسعه روابط چشمه نقطه‌ای به چشمه محدود محاسبه می‌شود. نظریه این روش را اولین بار اوکادا (۱۹۸۵، ۱۹۹۲) بسط داد و محاسبه کرد. از این مطالعات برای تعیین جابه‌جایی تغییرات تنش و کرنش در میدان نزدیک مانند مطالعات GPS قبل و بعد از وقوع زمین‌لرزه استفاده می‌شود.

$$u_x = -\frac{u_2}{2\pi} \left[\frac{q}{R} - I_3 \sin \delta \cos \delta \right] \quad (۶)$$

$$(۷)$$

$$u_y = -\frac{u_2}{2\pi} \left[\frac{\tilde{y}q}{R(R+\xi)} + \cos \delta \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} - I_1 \sin \delta \cos \delta \right] \quad (۸)$$

$$u_z = -\frac{u_2}{2\pi} \left[\frac{\tilde{d}q}{R(R+\xi)} + \sin \delta \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} - I_5 \sin \delta \cos \delta \right]$$

که در آنها داریم:

$$I_1 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{-1}{\cos \delta R + \tilde{d}} \frac{\xi}{\tilde{d}} \right] - \frac{\sin \delta}{\cos \delta} I_5 \quad (۹)$$

$$I_2 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} [-\ln(R + \eta)] - I_3 \quad (۱۰)$$

$$I_3 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{1}{\cos \delta R + \tilde{d}} \frac{\tilde{y}}{\tilde{d}} - \ln(R + \eta) \right] + \frac{\sin \delta}{\cos \delta} I_4 \quad (۱۱)$$

$$I_4 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{\cos \delta} [\ln(R + \tilde{d}) - \sin \delta \ln(R + \eta)] \quad (۱۲)$$

$$(۱۳)$$

$$I_5 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{2}{\cos \delta} \tan^{-1} \frac{\eta(X + q \cos \delta) + X(R + X) \sin \delta}{\xi(R + X) \cos \delta} \quad (۱۴)$$

$$p = y \cos \delta + d \sin \delta \quad (۱۵)$$

$$q = y \sin \delta - d \cos \delta \quad (۱۶)$$

$$\tilde{y} = \eta \cos \delta + q \sin \delta \quad (۱۷)$$

$$R^2 = x^2 + y^2 + d^2 = x^2 + p^2 + q^2$$

$$x^2 = \xi^2 + q^2 \quad (۱۸)$$

$$\tilde{d} = \eta \sin \delta - q \cos \delta \quad (۱۹)$$

مناطق تحت تراکم و انبساط، براساس ارزیابی‌های نظری انجام‌شده در توزیع تنش ناشی از امواج زمین لرزه و تغییرات تنش‌های محیطی وابسته به آنها مشخص می‌شوند. از داده‌های میدانی سطح تراز و آبدهی چندساله موجود چاه‌ها و چشمه‌های مناطق پیرامون رومرکز برای اعتبارسنجی نتایج نظری استفاده می‌شود. برای چشمه نقطه‌ای، میدان جابه‌جایی $u_i(x_1, x_2, x_3)$ ناشی از جابه‌جایی $u_j(l_1, l_2, l_3)$ در یک مساحت A از گسل در محیط همسانگرد (همسانگرد) با رابطه زیر بیان می‌شود (اکادا، ۱۹۸۵):

$$(۱)$$

$$u_i = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} \Delta u_j \left[\lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^n}{\partial l_n} + \mu \left(\frac{\partial u_i^j}{\partial l_n} + \frac{\partial u_i^k}{\partial l_j} \right) \right] v_k dA$$

که δ_{ij} دلتای کرونیکر، λ و μ ثابت‌های لامه، v_k

کسینوس بردار عمود بر عنصر سطح، F نیروی نقطه‌ای در (l_1, l_2, l_3) و A سطح در یک محیط همسانگرد است.

۲-۱ چشمه مستطیلی محدود

برای یک چشمه مستطیلی محدود با طول L و عرض W میدان جابه‌جایی را با در نظر گرفتن $\xi' - x$ ، $y - \eta' \cos \delta$ و $d - \eta' \sin \delta$ به جای x ، y و d در معادلات بخش قبلی می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$\int_0^L d\xi' \int_0^W d\eta' \quad (۲)$$

گسل امتداد لغز:

$$u_x = -\frac{u_1}{2\pi} \left[\frac{\xi q}{R(R+\eta)} + \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} + I_1 \sin \delta \right] \quad (۳)$$

$$u_y = -\frac{u_1}{2\pi} \left[\frac{\tilde{y}q}{R(R+\eta)} + \frac{q \cos \delta}{R+\eta} + I_2 \sin \delta \right] \quad (۴)$$

$$u_z = -\frac{u_1}{2\pi} \left[\frac{\tilde{d}q}{R(R+\eta)} + \frac{q \sin \delta}{R+\eta} + I_4 \sin \delta \right] \quad (۵)$$

گسل شیب لغز:

۲-۲ تغییرات تنش کولن

حرکت بلوک‌های دوطرف یک گسیختگی باعث ایجاد تغییراتی در تنش ایستایی محیط اطراف آن می‌شود که در هر نقطه با مقدار کرنش ایجادشده در آن نقطه متناسب است. این تغییر تنش روی سطوح گیرنده اطراف گسیختگی دو مؤلفه نرمال و برشی دارد که نسبت آنها به ویژگی‌های هندسی این سطح بستگی دارد. معیار

گسیختگی کولن یکی از معیارهایی است که گسیختگی جدید و به جنبش درآمدن گسل‌های قدیمی را در حالت شکننده، در یک محیط کشسان تحت تاثیر تنش کنترل می‌کند و تابع هر دو نوع تنش نرمال و برش اعمال شده روی سطوح گیرنده است.

الگوریتم محاسبات در این مقاله منطبق بر مطالعات اکادا (۱۹۸۵) است که با انجام یک سری محاسبات پیچیده ریاضی، کرنش و تشیی را که چشمه‌های لرزه‌ای نقطه‌ای و صفحه‌ای ایجاد کرده‌اند با استفاده از نظریه جابه‌جایی، در یک نیم‌فضای کشسان به صورت روابط تجزیه‌ای بسته محاسبه می‌کند. در این مقاله از میان برنامه‌های کامپیوتری که مراکز مختلف بر پایه این روابط و روابط پیش از این نوشته‌اند، از برنامه Coulomb 3.4 استفاده شد (کینگ و همکاران، ۱۹۹۴).

در ساده‌ترین شکل، تغییر تنش گسیختگی کولن $\Delta\sigma_f$ که به صورت ΔCFS یا ΔCFF نیز نوشته می‌شود برابر است با:

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau\beta - \mu'\Delta\sigma_n \quad (20)$$

که $\Delta\sigma_f$ تغییرات تنش کولن، $\Delta\tau\beta$ و $\Delta\sigma_n$ به ترتیب تغییرات تنش برشی و نرمال اعمال شده روی سطوحی است که با تنش اصلی بیشینه σ_1 زاویه β می‌سازند. μ' ضریب اصطکاک مؤثر، از رابطه زیر به دست می‌آید:

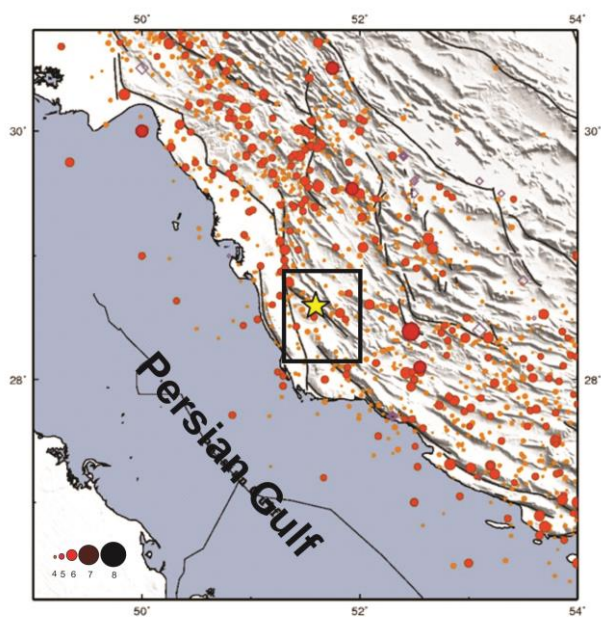
$$\mu' = \mu(1 - \beta) \quad (21)$$

که μ ضریب اصطکاک است و بین صفر تا یک تغییر می‌کند (اشتاین، ۱۹۹۹ و هریس، ۱۹۹۸). ضریب اصطکاک مؤثر روی گسل اصلی، کم ($\mu' \leq 0.2$) و روی گسل فرعی زیاد ($\mu' \leq 0.8$) است (اشتاین، ۱۹۹۹). μ' معمولاً برای گسل‌هایی با لغزش تجمعی ناچیز ۰/۴ تا ۰/۸ در نظر گرفته می‌شود که در این حالت سطح گسل معمولاً زبر است و برای گسل‌هایی با لغزش تجمعی زیاد که سطوح گسلی صاف‌تری دارند، ۰/۴ تا ۰/۴ فرض می‌شود (ما و همکاران، ۲۰۰۵). گسل‌های بالغ مانند سن‌آندریاس

ضریب اصطکاک کمی دارند (اشتاین، ۱۹۹۹)؛ بنابراین، براساس مطالب گفته شده، در این مطالعه از ضریب اصطکاک مؤثر ۰/۴ و برای مدل‌سازی تغییرات تنش کولن، از مقدار لغزش به دست آمده برای قسمت‌های مختلف صفحه گسلی الیوت و همکاران (۲۰۱۵) استفاده شده است. در این مطالعه مقدار لغزش بیشینه در عمق شش کیلومتری معادل ۱۸۰ سانتی‌متر محاسبه شده است. محاسبات در یک فضای کشسان با مدول یانگ 8×10^5 بار، مدول برشی $10^5 \times 3/2$ بار و نسبت پواسون ۰/۲۵ انجام گرفته است.

۳ زمین‌لرزه کاکي و تغییرات تراز و آبدهی مشاهده شده برخی از چاه‌ها و چشمه‌ها ۱-۳ زمین‌لرزه کاکي

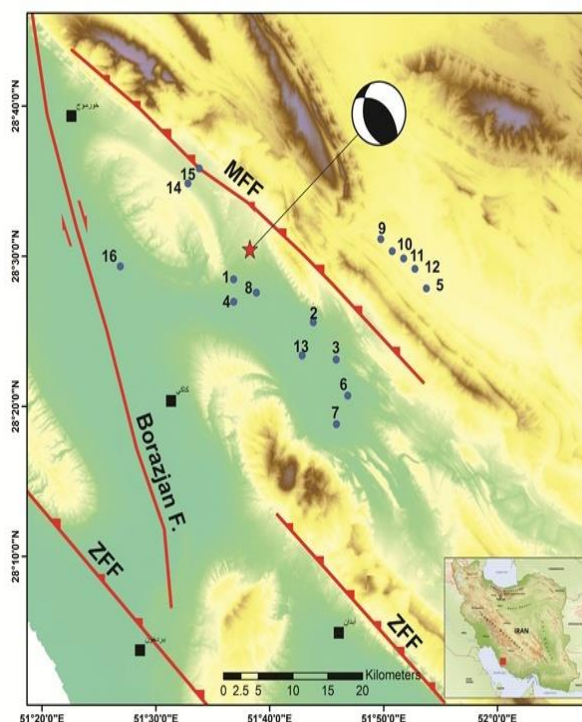
در ساعت ۴ و ۲۲ دقیقه و ۵۰ ثانیه بعد از ظهر به وقت محلی روز ۲۰ فروردین‌ماه ۱۳۹۲ (ساعت ۱۱ و ۵۲ دقیقه و ۵۰ ثانیه صبح به وقت GMT روز ۹ آوریل ۲۰۱۳)، زمین‌لرزه‌ای به بزرگای گشتاوری ۶/۳ در عمق ۱۱/۳ کیلومتر (مرکز لرزه‌نگاری کشوری) منطقه وسیعی از جنوب کشور به ویژه استان بوشهر را به لرزه درآورد (شکل ۱). این زمین‌لرزه در بخش کاکي از توابع شهرستان دشتی و به فاصله حدود ۸۰ کیلومتری از بندر بوشهر روی داد. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، مختصات این زمین‌لرزه را ۵۱/۵۹ درجه طول جغرافیایی و ۲۸/۴۸ درجه عرض جغرافیایی و عمق ۱۲ کیلومتر گزارش کرد. سازوکار کانونی این زمین‌لرزه، معکوس (فشاری) با مؤلفه فرعی امتداد لغز گزارش شد. نگاهی به فعالیت لرزه‌خیزی پیشین منطقه نشان می‌دهد این زمین‌لرزه در منطقه‌ای اتفاق افتاده است که تا پیش از آن تا شعاع ۲۵ کیلومتری شاهد هیچ زمین‌لرزه بزرگ‌تر از ۵ نبوده است. وقوع این زمین‌لرزه به فوت ۳۷ نفر و مجروح شدن بیش از ۸۶۰ نفر انجامید. بزرگ‌ترین پس‌لرزه،



شکل ۱. نقشه لرزه‌خیزی ناحیه مطالعاتی (فقط زمین‌لرزه‌هایی نشان داده شده‌اند که بزرگای گشتاوری بیش از ۴ دارند). دایره‌های قرمز رنگ نشان‌دهنده زمین‌لرزه‌ها و ستاره زرد رنگ معرف رومرکز زمین‌لرزه کاکي در فروردین‌ماه ۱۳۹۲ با بزرگای گشتاوری ۶/۳ واقع در استان بوشهر است. مقیاس بزرگا با اندازه دایره مشخص شده است.

جدول ۱. موقعیت جغرافیایی چاه‌های واقع در محدوده و شماره معرف هر چاه.

محدوده چاه	شماره چاه	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)
رزم آباد	۱	۲۸/۴۷	۵۱/۶۱
حاج احمدی	۲	۲۸/۴۲	۵۱/۷۳
شنبه	۳	۲۸/۳۸	۵۱/۷۶
پایین رزم آباد	۴	۲۹/۵۷	۵۰/۵۸
دشت پلنگ ۵	۵	۲۸/۴۶	۵۱/۹
اسلام آباد	۶	۲۸/۳۴	۵۱/۷۸
درویشی کهنه	۷	۲۸/۳۱	۵۱/۷۶
چاهگاه	۸	۲۸/۴۵	۵۱/۶۵
دشت پلنگ ۱	۹	۲۸/۵۱	۵۱/۸۳
دشت پلنگ ۲	۱۰	۲۸/۵۰	۵۱/۸۵
دشت پلنگ ۳	۱۱	۲۸/۴۹	۵۱/۸۶
دشت پلنگ ۴	۱۲	۲۸/۴۸	۵۱/۸۸
چم دشت صفری	۱۳	۲۸/۴۴	۵۰/۶۰
لاور ۵	۱۴	۲۸/۵۸	۵۱/۵۵
لاور ۶	۱۵	۲۸/۵۹	۵۱/۵۶
گوری	۱۶	۲۸/۵۰	۵۱/۴۵



شکل ۲. توزیع چاه‌ها (دایره‌های آبی) و رومرکز زمین‌لرزه (ستاره قرمز) کاکلی. خط‌های قرمز، گسل‌ها را نشان می‌دهند. شماره چاه‌ها مطابق جدول ۱ است.

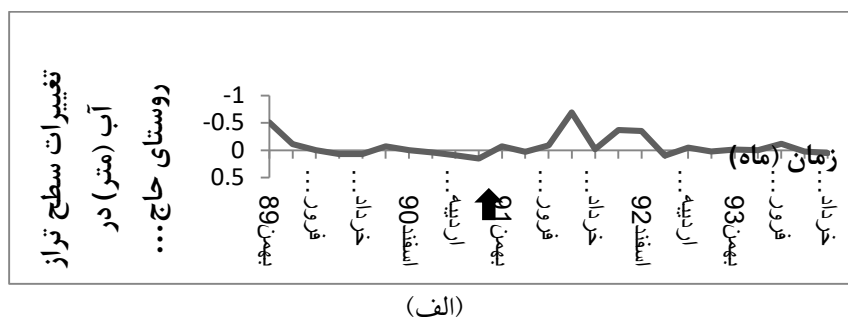
نیمه عمیق محسوب می‌شوند (جدول ۱). از جمله چشمه‌های واقع در محدوده مطالعاتی می‌توان به چشمه‌های سیدعلی و گل اشاره کرد.

میدانی که معرف عمق آب چاه اندازه‌گیری شده در چندین ماه متوالی (بهمن‌ماه تا خردادماه) از سال ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۴ هستند، می‌توان تغییرات عمق چاه را که معرف تغییر در سطح تراز آب چاه است، در برخی از چاه‌های اطراف رومرکز زمین‌لرزه به‌ویژه بعد از زمان وقوع زمین‌لرزه (فروردین‌ماه) به‌وضوح مشاهده کرد (شکل ۳). چاه‌های واقع در روستاهای شنبه، حاج احمدی، ابلهان، درویشی کهنه و باغان واقع در شعاع ۵۰ کیلومتری زمین‌لرزه، افزایش سطح تراز آب را به‌خوبی نشان می‌دهند که با گذشت زمان در ماه‌های بعد از زمین‌لرزه کاهش می‌یابد، اما آبدهی این چاه‌ها نسبت به قبل از وقوع زمین‌لرزه تا چند سال پس از زمین‌لرزه افزایش زیادی نشان می‌دهد. آبدهی چاه‌ها مستند به پاسخ به سؤالی است که از

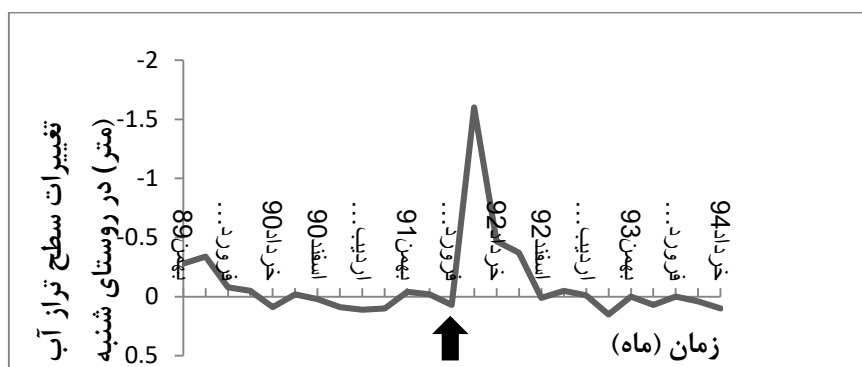
چهارده ساعت پس از رخداد اصلی با بزرگای ۵/۴ در مقیاس امواج محلی در فاصله نزدیکی از رویداد اول و در جنوب شرقی آن رخ داده است. تعداد ۳۱۰ پس‌لرزه با بزرگای بیش از ۳ طی یک ماه پس از وقوع زمین‌لرزه ثبت شد (الیوت و همکاران، ۲۰۱۵).

۲-۳ تغییرات تراز و آبدهی مشاهده‌شده برخی از چاه‌ها و چشمه‌ها

محدوده مطالعاتی، طول جغرافیایی ۴۲ تا ۵۰ درجه جغرافیایی و ۲۸ تا ۳۰ درجه عرض جغرافیایی در ایالت زمین‌ساختی زاگرس را شامل می‌شود. گسل‌های پیشانی کوهستان، گسل اصلی زاگرس، برازجان و کازرون از گسل‌های مهم و فعال واقع در محدوده هستند (شکل ۲). در این مطالعه بر پاسخ چاه‌ها به این زمین‌لرزه تمرکز شد. شانزده چاه با عمق کمتر از ۱۰۰ متر در محدوده ۵۰ کیلومتری از رومرکز زمین‌لرزه واقع شده‌اند که چاه‌های



(الف)



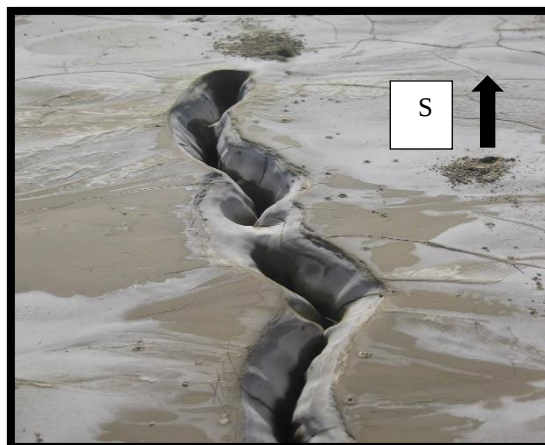
(ب)

شکل ۳. تغییرات ماهانه تراز سطح آب (الف) چاه شماره ۲ واقع در روستای حاج احمدی (ب) چاه شماره ۳ واقع در روستای شنبه. این تغییرات در چاه‌های اطراف رومرکز زمین‌لرزه کاکي طی پنج ماه متوالی (بهمن - اسفند - فروردین - اردیبهشت - خرداد) از سال ۸۹ تا ۹۴ مشاهده شده‌اند. محور عمودی نمودار، عمق چاه یعنی فاصله سطح تراز آب را از لبه چاه نشان می‌دهد. کاهش این فاصله (منفی شدن عمق)، نشان‌دهنده بالا آمدن سطح آب در چاه و افزایش این فاصله، نشان‌دهنده کاهش یا افت ارتفاع سطح آب است. پیکان سیاه، زمان وقوع رویداد ۲۰ فروردین ماه ۱۳۹۲ را نشان می‌دهد.

ایجادشده در ناحیه مطالعاتی مشخص شد. با توجه به نقشه‌های رسم‌شده، چاه‌های واقع در شعاع ۵۰ کیلومتری رومرکز، اغلب در محدوده افزایش تنش واقع شده‌اند. طرح جابه‌جایی استاتیکی تولیدشده ناشی از موج لرزه‌ای نیز در چند ماه متوالی (اسفند - فروردین - اردیبهشت) در سال ۹۲ ایجاد شد. تغییرات تراز آب در چاه‌ها با توجه به داده‌های آماری در ماه‌های نام‌برده مشخص شدند. با توجه به جابه‌جایی استاتیکی رسم‌شده و مقایسه آنها با هم نسبت به ماه قبل و بعد از زمین‌لرزه، به‌وضوح می‌توان تغییرات افزایشی سطح تراز آب را بعد از فروردین ماه سال ۹۲ در تعداد بیشتری از چاه‌ها در محدوده الگوی فشارش (افزایش تنش) زمین‌لرزه مشاهده کرد (شکل ۵).

کشاورزان درباره میزان برداشت آب در مقایسه با قبل از زمین‌لرزه پرسیده شده بود. پاسخ چاه‌ها به عبور موج لرزه‌ای یادشده از نوع تغییرات پسالرزه‌ای، اغلب افزایشی، تدریجی و پایدار است. از طرف دیگر، احیای چشمه‌های کل و سیدعلی از جمله اثرهای وقوع این زمین‌لرزه است. علاوه بر این موارد، مشاهده روانگرایی دلیلی بر روند انتشار موج فشاری به سمت شنبه است (شکل ۴).

۳-۳ پاسخ تراز آب چاه‌ها به جابه‌جایی استاتیکی میدان نزدیک ناشی از زمین‌لرزه کاکي
با استفاده از مشخصات و سازوکار کانونی زمین‌لرزه و به کمک نرم افزار Coulomb 3.4، مناطق کشش و فشارش



شکل ۴. نمونه‌ای از روانگرایی‌های ثبت‌شده در غرب منطقه شنبه بعد از رویداد کاکي در استان بوشهر (دید به سمت جنوب).

به عبارت دیگر، تغییرات پس‌لرزه‌ای در سطح تراز آب در تعداد بیشتری چاه محسوس است.

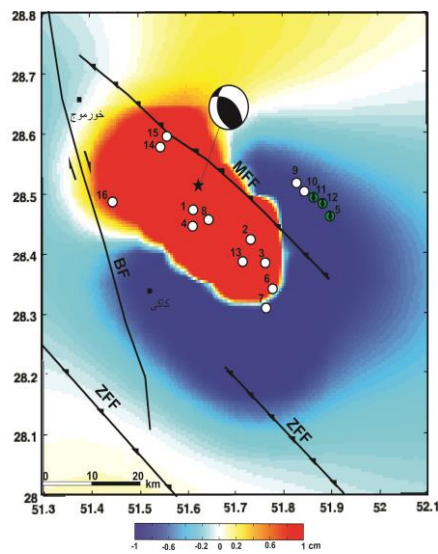
۳-۴ پاسخ چاه‌ها با توجه به کرنش ایجادشده ناشی از زمین‌لرزه شنبه

در یک محیط کشسان، کرنش و فشار منفذی با هم در ارتباط هستند. با تغییر کرنش حجمی در اثر یک رویداد لرزه‌ای، تخلخل محیط دستخوش تغییر می‌شود و تغییرات تراز آب را به دنبال خواهد داشت. با توجه به سازوکار کانونی زمین‌لرزه، کرنش فشاری و کششی در منطقه مورد مطالعه تعیین شد و با توجه به داده‌های آماری در دسترس، چاه‌های همراه با تغییرات سطح تراز آب در نقشه مشخص شدند. مقایسه مناطق فشارش و کشش و چاه‌هایی که تغییرات سطح تراز آب داشتند، حاکی از تغییرات افزایشی برخی چاه‌ها در ناحیه فشاری بعد از وقوع زمین‌لرزه است. کرنش فشاری با کاهش تخلخل، افزایش تراز آب و کرنش کششی با افزایش تخلخل، افت تراز آب را در پی دارد. در بررسی انجام‌شده با توجه به قرارگیری بیشتر چاه‌ها در ناحیه فشارش، تعداد زیادی چاه افزایش تراز آب دارند. مؤلفه e_{yy} - که معرف تغییرات شکلی در

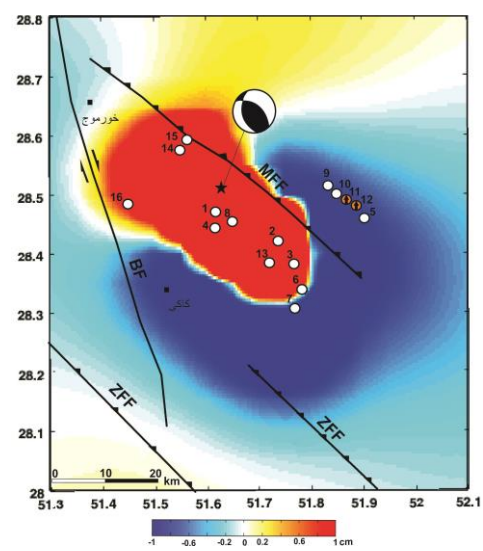
راستای شمال در صفحه‌ای است که خط قائم بر آن در جهت شمال است - سازگاری خوبی با تغییرات ایجادشده تراز آب چاه‌ها دارد (شکل ۶). توجه به این نکته ضروری است که سازگاری نسبی تغییرات تراز آب با کرنش‌های ایجادشده (e_{xx} , e_{yy} , e_{zz}) با توجه به خطاهای مربوط به سه‌بعدی نبودن صفحات گسلی و قرارگیری روی نیم‌فضا دور از انتظار نیست.

۴ بحث

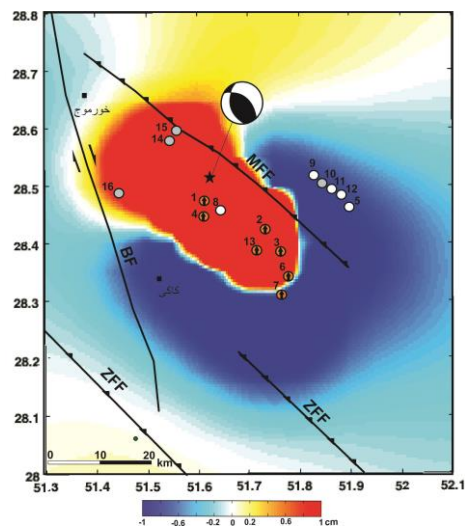
در این مطالعه برای اینکه مشخص شود تغییر تراز آب زیرزمینی ناشی از تغییرات ایجادشده از زمین‌لرزه بوده یا دلایل دیگری مثل افزایش میزان ورودی به سفره‌های آب زیرزمینی طی بارندگی‌ها داشته است، به بررسی نمودارهای تغییرات میزان بارندگی در ماه‌های منتهی به زمین‌لرزه و بعد از آن پرداخته و با توجه به زمان رویداد زمین‌لرزه کاکي، در فروردین ماه سال ۱۳۹۲، میزان بارش‌های ماهانه در چهار ماه متوالی (اسفند، فروردین، اردیبهشت و خرداد) سه سال متوالی (۹۱ تا ۹۳) در چند ناحیه اطراف رومرکز زمین‌لرزه بررسی و مقایسه شده است. با توجه به داده‌های آماری، بارش در فروردین سال



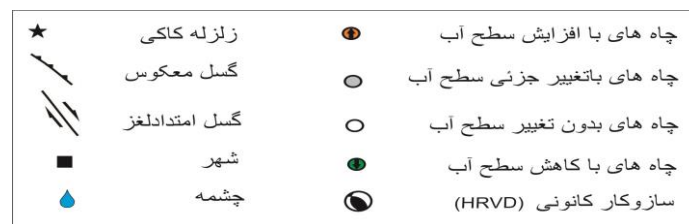
(ب)



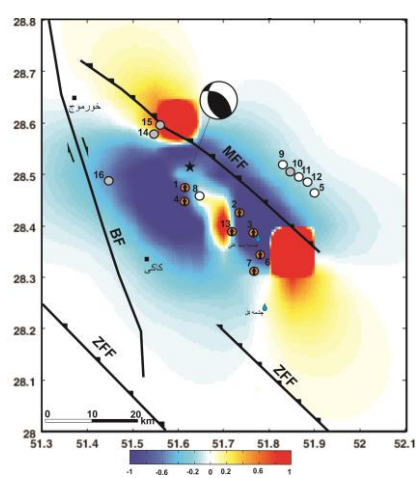
(الف)



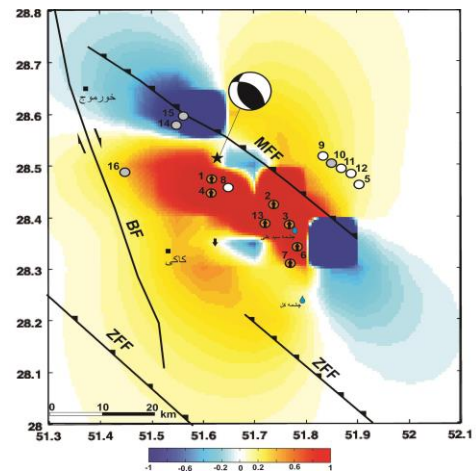
(ج)



شکل ۵. تغییرات تراز آب چاه‌ها با توجه به جابه‌جایی استاتیکی ناشی از مؤلفه Z. (الف) تغییرات تراز آب چاه‌ها ناشی از جابه‌جایی استاتیکی ایجادشده در اسفندماه ۱۳۹۱ پیش از زمین‌لرزه کاکي (ب) تغییرات همالرز تراز آب در چاه‌ها ناشی از جابه‌جایی استاتیکی رخ داده به‌دلیل زمین‌لرزه کاکي در فروردین‌ماه ۱۳۹۲ (ج) تغییرات پس‌لرزه‌ای تراز آب در چاه‌ها در اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۲ ناشی از جابه‌جایی استاتیکی رخ داده به‌دلیل زمین‌لرزه کاکي. چاه‌ها با دایره، گسل‌ها با خطوط سیاه‌رنگ، رومرکز زمین‌لرزه با ستاره مشکی و شهرها با مربع‌های سیاه‌رنگ نشان داده شده‌اند.

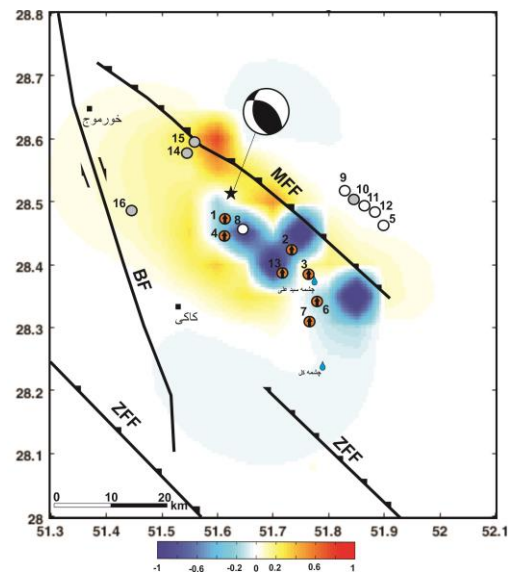


(ب)



(الف)

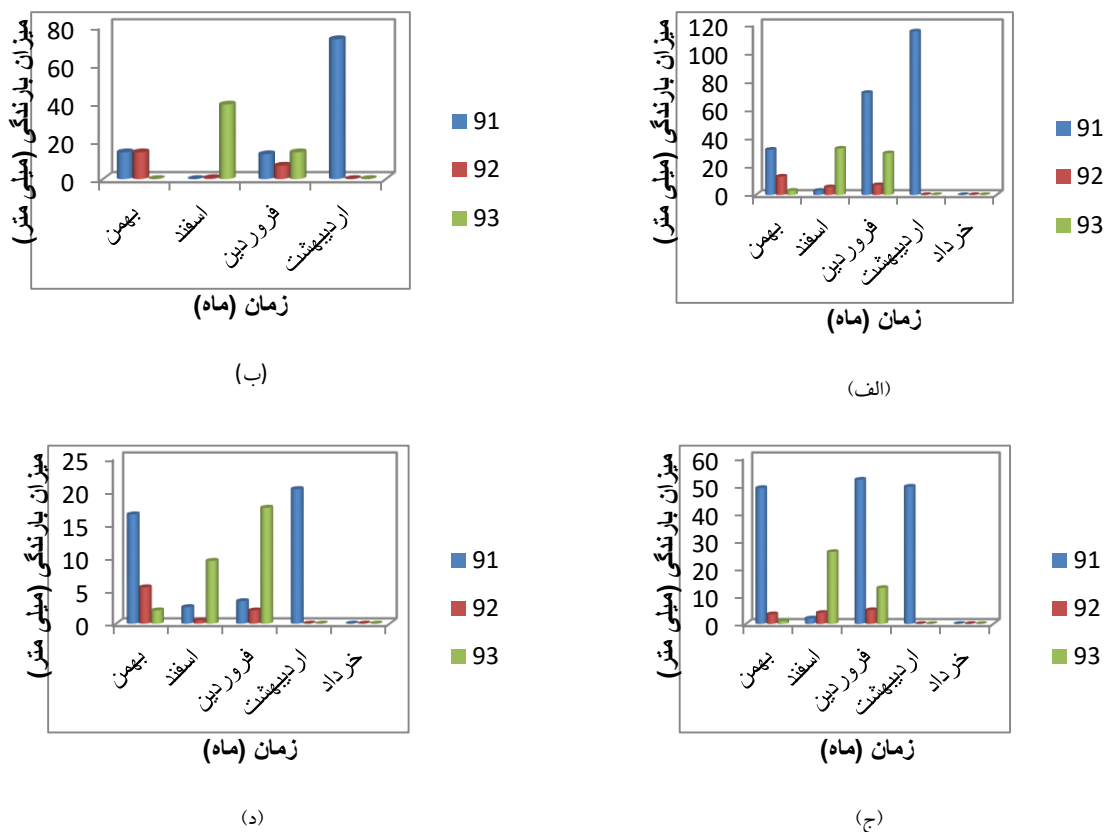
:



(ج)



شکل ۶. تغییرات کرنش ایجادشده در اثر زمین‌لرزه کاکي در اردیبهشت‌ماه سال ۱۳۹۲ (الف) e_{yy} (ب) e_{xx} (ج) e_{zz} . کرنش فشارشی با رنگ قرمز و کرنش کششی با رنگ آبی نشان داده شده است.



شکل ۷. میزان بارش ماهانه برحسب زمان (ماه) در چهار ماه متوالی از سال‌های ۹۱ تا ۹۳ در (الف) روستای شنبه (ب) روستای خورموج (ج) روستای باغان (د) شهر بوشهر.

سیدعلی و کل نیز از دیگر پیامدهای زمین لرزه کاکي است.

۵ نتیجه‌گیری

در این مطالعه، رابطه بین تغییرات تراز آب با عبور موج لرزه‌ای ناشی از رویداد ۲۰ فروردین ۱۳۹۲ بررسی و با توجه به سازوکار کانونی زمین لرزه، جابه‌جایی استاتیکی و کرنش ناشی از زمین لرزه و داده‌های آماری سطح آب مقایسه و بررسی شده است. با توجه به داده‌های میدانی معرف عمق آب و رسم تغییرات سطح آب در چهار ماه متوالی قبل، حین و بعد از زمان رویداد در سه سال متوالی، به‌خوبی تغییر همالرز و پسالرز تراز آب (افزایش یا کاهش) مشهود است که می‌توان دلیل این افزایش یا

۹۲ نسبت به سال‌های قبل و بعد کمتر است (شکل ۷)؛ برای نمونه، میزان بارش ماهانه در فروردین ماه در روستای شنبه ۷ میلی‌متر گزارش شده است که نسبت به مقدار اعلام‌شده در فروردین سال ۹۱ (۷۲ میلی‌متر) و سال ۹۳ (۲۹/۵ میلی‌متر) میزان کمتری است؛ در نتیجه، افزایش تراز آب چاه‌ها در زمان وقوع رویداد در سال ۹۲ باید علتی غیر از بارش داشته باشد.

در گزارش‌های محلی، علاوه بر افزایش تراز آب چاه‌ها، مردم به دوام برداشت آب بعد از وقوع زمین لرزه اشاره کرده‌اند (افزایش آبدهی چاه‌ها)، به‌طوری‌که بعد از گذشت مدت زمان زیادی (بیش از پنج سال) پس از وقوع رویداد، سطح تراز آب چاه‌ها و آبدهی آنها به مقدار قبل از زمین لرزه برگشته است. همچنین احیای دو چشمه

تغییرات تراز آب در برخی از چاه‌ها باشند که به معنای وابستگی تغییرات تراز آب به عبور امواج لرزه‌ای است و داده‌های میدانی نیز این وابستگی را تأیید می‌کنند.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله مراتب سپاس نویسندگان مقاله از دکتر شبیر اشکپور مطلق بابت شکل‌گیری ایده پژوهش، پیشنهادها و همکاری در این تحقیق اعلام می‌شود. از دانشگاه خلیج فارس و شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان بوشهر بابت در اختیار گذاشتن داده‌ها سپاسگزاری می‌شود. در نهایت، از داوران محترم سپاسگزاریم که با نظرات ارزنده خود، ما را در جهت ارتقای کیفی این پژوهش یاری دادند.

منابع

- Beck, R. W., et al., 2003, High-and low-risk profiles for the development of multiple sclerosis within 10 years after optic neuritis: experience of the optic neuritis treatment trial: Archives of ophthalmology (Chicago, Ill: 1960), **121**(7), 944-949.
- Blanchard, F. B., and Byerly, P., 1935, A study of a well gauge as a seismograph: Bulletin of the Seismological Society of America, **25**(4), 313-321.
- Bosl, W. J., and Nur, A., 2002, Aftershocks and pore fluid diffusion following the 1992 Landers earthquake: Journal of Geophysical Research: Solid Earth, **107**(B12), ESE-17.
- Bower, D. R., and Heaton, K. C., 1978, Response of an aquifer near Ottawa to tidal forcing and the Alaskan earthquake of 1964: Canadian Journal of Earth Sciences, **15**(3), 331-340.
- Brodsky, E. E., Roeloffs, E., Woodcock, D., Gall, I., and Manga, M., 2003, A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquakes: Journal of Geophysical Research: Solid Earth, **108**(B8).
- Chen, J. S., and Wang, C. Y., 2009, Rising springs along the Silk Road: Geology, **37**, 243-246.
- Chia, Y., Chiu, J. J., Chiang, Y. H., and Lee, T. P., 2008, Spatial and temporal changes of groundwater level induced by thrust faulting: Pure and Applied Geophysics, **165**(1), 5-16.
- Crews, J. B., and Cooper, C. A., 2014,

کاهش را به عبور موج لرزه‌ای نسبت داد. سازگاری خوبی بین تغییرات تراز آب چاه‌ها و چشمه‌ها با الگوی تابشی امواج لرزه‌ای وجود دارد. به دلیل متفاوت بودن خواص سازندهای مختلف، پاسخ در چاه‌های واقع در الگوی لرزه‌خیزی مشابه، ممکن است یکسان نباشد. به علت رخ دادن زمین‌لرزه در فصل کم‌بارش در ناحیه مورد بررسی، تغییرات سطح آب نمی‌تواند ناشی از بارش باران باشد. از دیگر اثرهای وقوع این زمین‌لرزه بر آب‌های زیرزمینی می‌توان به احیا شدن چشمه‌های خشکیده کل و سیدعلی و افزایش آبدهی بسیاری از چشمه‌های واقع در منطقه اشاره کرد. روانگرایی ایجادشده در منطقه، خود دلیل محکمی بر عبور موج فشارشی است که افزایش تراز آب در چاه‌ها را به دنبال داشته است.

موج لرزه‌ای می‌تواند یک تغییر فشار آبی محسوب شود. این تغییر فشار ناشی از کرنشی است که به دلیل عبور موج لرزه‌ای ایجاد شده است و با تغییر تخلخل محیط، به تغییر تراز آب در چاه‌ها منجر می‌شود. تغییر در چاه‌ها بسته به محل قرارگیری چاه و خصوصیات زمین‌شناسی متفاوت است. مشاهدات این مطالعه حاکی از آن است که تغییرات تراز آب به الگوی تشعشع موج لرزه‌ای بسیار وابسته است به‌طوری که قرارگیری چاه در الگوی تشعشع موج فشاری با کاهش تخلخل محیط، افزایش تراز آب را به دنبال خواهد داشت. درمقابل، چاه‌هایی که در آزیموت‌های امواج کششی واقع شده‌اند به علت افزایش تخلخل محیط، کاهش تراز آب را نشان می‌دهند. میزان کاهش یا افزایش تراز آب به بزرگای و فاصله تا کانون زمین‌لرزه و همچنین خصوصیات زمین‌شناسی چاه وابسته است؛ برای مثال، چاه واقع در روستای شنبه به علت نزدیکی به محل وقوع زمین‌لرزه و قرارگیری در آزیموت موج فشاری، با افزایش چشمگیر تراز آب مواجه شده است. این پژوهش نشان می‌دهد هم جابه‌جایی استاتیکی امواج و هم تغییرات کرنش ناشی از زمین‌لرزه یادشده، می‌تواند دلیلی بر

- The 2013 Mw 6.2 Khaki-Shonbe (Iran) Earthquake: Insights into seismic and aseismic shortening of the Zagros sedimentary cover: *Earth and Space Science*, **2**(11), 435-471.
- Ferenci, Peter, et al., 2014, ABT-450/r-ombitasvir and dasabuvir with or without ribavirin for HCV: *New England Journal of Medicine*, **370**(21), 1983-1992.
- Harris, R., 1998, Introduction to special section, stress triggers, stress shadow, and implications for seismic hazard: *Journal of Geophysical Research*, **103**, 24347-24358.
- Holmqvist, K., et al., 2004, The adaptor protein shb binds to tyrosine 1175 in vascular endothelial growth factor (VEGF) receptor-2 and regulates VEGF-dependent cellular migration: *Journal of Biological Chemistry*, **279**(21), 22267-22275.
- Holzer, T. L., Padovani, A. C., Bennett, M. J., Noce, T. E., and Tinsley, J. C., 2005, Mapping NEHRP VS30 site classes: *Earthquake Spectra*, **21**(2), 353-370.
- Kang, Y. T., Kunugi, Y., and Kashiwagi, T., 2000, Review of advanced absorption cycles: performance improvement and temperature lift enhancement: *International Journal of Refrigeration*, **23**(5), 388-401.
- King, A. R., and Begelman, M. C., 1999, Radiatively driven outflows and avoidance of common-envelope evolution in close binaries: *The Astrophysical Journal Letters*, **519**(2), L169.
- King, G. C. P., Stein, R. S., and Lin, J., 1994, Static stress changes and the triggering of earthquakes: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**(3), 935-953.
- Ma, K. F., Chan, C. H., Stein, R. S., 2005, Response of seismicity to Coulomb stress triggers and shadows of the 1999 Mw =7.6 Chi-Chi, Taiwan, earthquake: *Journal of Geophysical Research*, **110**, B05S19, doi: 10.1029/2004JB003389.
- Marcaccio, M., and Martinelli, G., 2012, Effects on the groundwater levels of the May-June 2012 Emilia seismic sequence: *Annals of Geophysics*, **55**(4).
- Montgomery, D. R., and Manga, M., 2003, Streamflow and water well responses to earthquakes: *Science*, **300**(5628), 2047-2049.
- Muir-Wood, R., and King, G. C., 1993, Hydrological signatures of earthquake strain: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **98**(B12), 22035-22068.
- Nespoli, M., Todesco, M., Serpelloni, E., Belardinelli, M. E., Bonafede, M., Marcaccio, Experimental evidence for seismically initiated gas bubble nucleation and growth in groundwater as a mechanism for coseismic borehole water level rise and remotely triggered seismicity: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **119**(9), 7079-7091.
- Elliott, J. R., Bergman, E. A., Copley, A. C., Ghods, A. R., Nissen, E. K., Oveisi, B., Tatar, M., Walters, R. J., and Yamini-Fard, F., 2015, M., Rinaldi, A. P., Anderlini, L., and Gualandi, A., 2016, Modeling earthquake effects on groundwater levels: evidences from the 2012 Emilia earthquake (Italy): *Geofluids*, **16**(3), 452-463.
- Ng, M., Fleming, T., Robinson, M., Thomson, B., Graetz, N., Margono, C., Mullany, E. C., Biryukov, S., Abbafati, C., Abera, S. F., and Abraham, J. P., 2014, Global, regional, and national prevalence of overweight and obesity in children and adults during 1980-2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013: *The Lancet*, **384**(9945), 766-781.
- Nur, A., and Booker, J. R., 1972, Aftershocks caused by pore fluid flow: *Science*, **175**(4024), 885-887.
- Okada, Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **75**(4), 1135-1154.
- Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **82**(2), 1018-1040.
- Otto, H., et al., 1989, Aspartic acid-96 is the internal proton donor in the reprotonation of the Schiff base of bacteriorhodopsin: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **86**(23), 9228-9232.
- Quilty, E. G., and Roeloffs, E. A., 1997, Water-level changes in response to the 20 December 1994 earthquake near Parkfield, California: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **87**(2), 310-317.
- Rexin, E. E., Oliver, J., and Prentiss, D., 1962, Seismically-induced fluctuations of the water level in the Nunn-Bush well in Milwaukee: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **52**(1), 17-25.
- Roberts, H. H., Coleman, J. M., Bentley, S. J., and Walker, N., 2003, An embryonic major delta lobe: A new generation of delta studies in the Atchafalaya-Wax Lake Delta system: *Gulf Coast Association of Geological Societies*, **53**, 690-703.

- Roeloffs, E. A., 1998, Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **103**(B1), 869-889.
- Rojstaczer, S., Wolf, S., and Michel, R., 1995, Permeability enhancement in the shallow crust as a cause of earthquake-induced hydrological changes: *Nature*, **373**(6511), 237.
- Rosé, C., Wang, Y. C., Cui, Y., Arguello, J., Stegmann, K., Weinberger, A., and Fischer, F., 2008, Analyzing collaborative learning processes automatically: Exploiting the advances of computational linguistics in computer-supported collaborative learning: *International journal of computer-supported collaborative learning*, **3**(3), 237-271.
- Rudnicki, J. W., Yin, J., and Roeloffs, E. A., 1993, Analysis of water level changes induced by fault creep at Parkfield, California: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **98**(B5), 8143-8152.
- Shalev, E., Kurzon, I., Doan, M. L., and Lyakhovsky, V., 2016, Sustained water-level changes caused by damage and compaction induced by teleseismic earthquakes: *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, **121**(7), 4943-4954.
- Shi, Z., et al., 2015, Mechanism of co-seismic water level change following four great earthquakes—insights from co-seismic responses throughout the Chinese mainland: *Earth and Planetary Science Letters*, **430**, 66-74.
- Singh, V., 2008, Impact of the Earthquake and Tsunami of December 26, 2004, on the groundwater regime at Neill Island (south Andaman): *Journal of Environmental Management*, **89**(1), 58-62.
- Sorey, M. L., Vicki, S., McConnell, and Roeloffs, E., 2003, Summary of recent research in Long Valley caldera, California: *Journal of volcanology and geothermal research*, **127**(3-4), 165-173.
- Stein, R., 1999, The role of stress transfer in earthquake occurrence: *Nature*, **402**, 605-609.
- Van Der Wel, A., et al., 2014, 3D-HST+ CANDELS: the evolution of the galaxy size-mass distribution since $z=3$: *The Astrophysical Journal*, **788**(1), 28.
- Wakita, H., 1975, Water wells as possible indicators of tectonic strain: *Science*, **189**(4202), 553-555.
- Wang, J., Agrawala, M., and Cohen, M. F., 2007, Soft scissors: an interactive tool for realtime high quality matting: in *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, **26**(3), 9.
- Wang, C. Y. and Chia, Y., 2008, Mechanism of water level changes during earthquakes: Near field versus intermediate field: *Geophysical Research Letters*, **35**(12).
- Wang, L., Feng, Z., Wang, X., and Zhang, X., 2009, DEGseq: an R package for identifying differentially expressed genes from RNA-seq data: *Bioinformatics*, **26**(1), 136-138.
- Wang, C. Y., and Manga, M., 2010, Hydrologic responses to earthquakes and a general metric: *Geofluids*, **10**(1-2), 206-216.
- Xiaolong, S., Yaowei, L., and Hongwei, R., 2011, Influence of the 2011 Mw9.0 Japan earthquake on groundwater levels in Chinese mainland: *Geodesy and Geodynamics*, **2**(4), 33-39.
- Zhang, Y., Fu, L. Y., Huang, F., and Chen, X., 2015, Coseismic water-level changes in a well induced by teleseismic waves from three large earthquakes: *Tectonophysics*, **651**, 232-241.

Investigation of earthquake effects on groundwater level and discharge of water wells following the 2013 Mw 6.3 Kaki earthquake occurred in Bushehr province (Iran)

Sara Goudarzi¹, Saeed Zarei² and Reza Mansouri^{2*}

¹*MSc.Studen, faculty of science, department of geophysics, Persian Gulf University, Boushehr. Iran*

²*Assistant Professor, faculty of science, department of geophysics, Persian Gulf University, Boushehr. Iran*

(Received: 02 December 2019, Accepted: 17 February 2020)

Summary

When an earthquake occurs, a part of the released energy is propagated in the form of elastic waves at a speed that depends on the nature of the propagation environment. The radiated energy from earthquake focus in all directions is called radiation pattern and depends on the fault mechanism. The environment response to longitudinal waves appears as compression and expansion of the environment. This can affect on water levels in aquifers, wells and springs before, during and after the event. The changes of the groundwater levels caused by an earthquake are important with respect to other induced parameters; they may generate crustal deformations, affect on water supplies and production of oil wells, initiate liquefaction, control the distribution of aftershocks, trigger earthquakes and mud volcano eruptions. In this study, the effect of April 2013 Kaki earthquake (Mw6.3) on water levels in wells located in a range of 50 km radius around the earthquake epicenter was compared in successive months in the preceding years, during and after the event. Regarding the earthquake focal mechanism and using the estimated tensile and compressive zones in the study area, the correlation of these areas with changes in water levels and discharge of wells and springs was examined. The results of evaluations indicate that the water levels in wells rose and the discharge of the wells and springs located within the radiation range of the pressure waves increased after the earthquake. The wells located in the direction of compressive radiation showed a level of elevation. In contrast, wells located along the shear strain either experienced a drop in water level or had no significant changes. The results show that there is compatibility between the pattern of seismic waves and the changes in the water levels in wells and springs. Because of the difference in characteristics of geological formations, the response of the wells located in the same seismic pattern may not be the same. On the other hand, since the earthquake occurred in the low rainfall time, changes in water levels cannot be caused by rainfall. Field data shows other recorded effects such as the recovery of the springs of Kale and Seyyed Ali which indicates the increase in discharge of water in the region. The liquefaction created in the area is a reason for the passage of a compressive wave that has led to increase of water levels in the wells. The amount of decrease or increase in water level depends on the magnitude and distance to hypocenter of the earthquake and geological characteristics of the well. The water level in the well located in Shonbe village (28.34°N, 51.76°E) increased 1.6 m after the earthquake.

Keywords: Longitudinal waves, stress, strain, focal mechanism, water level changes, well discharge

*Corresponding author:

s.r.mansouri@pgu.ac.ir