

# گاه‌نگاری جوان‌ترین جنبش لرزه‌ای گسل فیروز کوه با استفاده از روش کرین ۱۴

حمید نظری<sup>۱\*</sup>، زان فرانسوا ریتز<sup>۲</sup>، ریچارد واکر<sup>۳</sup>، رضا سلامتی<sup>۴</sup>، عباس قاسمی<sup>۴</sup> و علیرضا شافعی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

<sup>۲</sup> آزمایشگاه علوم زمین مونت‌پلیه، دانشگاه مونت‌پلیه، مونت‌پلیه، فرانسه

<sup>۳</sup> دپارتمان علوم زمین، دانشگاه اکسفورد، انگلستان

<sup>۴</sup> سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۱۰/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۰۱/۲۹

## چکیده

گسل فیروز کوه در بیشتر بخش خود در لبه جنوبی دره فیروز کوه در باختر البرز مرکزی قرار دارد. گسل فیروز کوه با درازای ۷۰ کیلومتر و راستای جنوب باختری - شمال خاوری و سازوکار کار چپ‌گرد - کششی از جمله ساختارهای گسله و مهم در ناحیه البرز مرکزی است. از این گسل در گذشته به عنوان گسل فشاری با شیب به سوی جنوب یاد شده است. پژوهش‌های پارینه لرزه‌شناسی و سن سنجی رادیو کرین در راستای گسل راستالغز - چپ‌گرد فیروز کوه نشانگر رخداد زمین لرزه‌های بزرگ در البرز مرکزی در طی هولوسن است. در این نوشتار داده‌های به دست آمده از یکی از دو ترانشه حفر شده با درازای ۴۵ متر، پهنای ۲ متر و ژرفای ۴ متر واقع در خاور فیروز کوه ارائه می‌شود. در محلی که اثرات به جای مانده از آخرین زمین لرزه رخ داده بر اثر جنبش گسل فیروز کوه در دومین ترانشه (F2) یافت شده است. رخداد آخرین زمین لرزه با اثرات به جای مانده از گسل خوردگی جوان بر روی نهشته‌های سطحی که خود به طور چینه‌ای پوشاننده آبرفت‌های دارای قطعاتی از استخوان‌های انسانی است، قابل رهگیری است. سن به دست آمده برای این قطعات استخوانی که در ژرفای ۷۰-۶۰ سانتی متری ترانشه یافت شده است بر اساس روش کرین ۱۴ برابر  $28 \pm 1159$  سال (پیش از ۱۹۵۰ میلادی، BP) برآورد می‌شود. با توجه به نرخ لغزش برآورد شده در هر رخداد لرزه‌ای که از بررسی نگاهت (لوگت) پارینه لرزه‌شناسی دیواره خاوری ترانشه (F1) به دست آمده است، بزرگای برآورد شده برای هر لرزه کهن نزدیک به ۷ است.

**کلیدواژه‌ها:** فیروز کوه، پارینه لرزه‌شناسی، کرین ۱۴، ترانشه

\* نویسنده مسئول: حمید نظری

E\_mail: h.nazari@gsi.ir

## ۱- مقدمه

گسل فیروز کوه با درازایی نزدیک به ۷۰ کیلومتر از پایانه خاوری گسل مشا در باختر روستای امین‌آباد تا گردنه گدوک بر روی تصاویر ماهواره‌ای و هوایی در مقیاس‌های گوناگون دیده می‌شود (Nazari, 2006)، (شکل ۱). از دیدگاه زمین‌شناسی، این گسل بین سنگ نهشته‌های ژوراسیک - کرتاسه در بخش خاوری (فرادیواره) و نهشته‌های پلیو کواترنری در بخش باختری (فرو دیواره) گسل قرار دارد (Aghanabati and Hamed, 1994) (شکل ۲). این گسل با راستای جنوب باختری - شمال خاوری در دامنه شمالی بلندی‌های جنوب فیروز کوه قرار دارد که با بخشی از خطواره مغناطیسی F-16 (Yossefi and Friedburg, 1977) برابر است. از این گسل در ابتدا به عنوان گسل راندگی با صفحه‌ای به سوی جنوب (Berberian et al., 1996) و پس از آن در شمار گسل‌های راستالغز با برش چپ‌گرد، (Allen et al., 2003; Jackson et al., 2002) و سپس چپ‌گرد با مؤلفه نرمال یاد شد (Nazari et al., 2005; Nazari, 2006) (شکل ۳).

اگر چه تعیین هندسه و سازوکار جنبش جوان گسل فیروز کوه به سبب الگوی پراکنش دگرشکلی بر روی پاره گسل‌های گوناگون گاه مشکل می‌نماید (شکل ۴). در بزرگ مقیاس وجود بلندی‌های خاوری و الگوی دگرشکلی جوان در پهنه گسل بویژه در گستره حوزه فیروز کوه نشان از سازوکار راستالغز چپ‌گرد با مؤلفه قائم برای گسل فیروز کوه دارد. در یک رژیم زمین ساخت فشاری می‌توان چنین انگاشت که مؤلفه یاد شده یک مؤلفه راندگی است که سبب شکل‌گیری و برپایی ریختار عمومی ناحیه بر روی صفحه‌ای گسلی با شیب به سوی جنوب خاوری شده است. داده‌های تاریخی لرزه‌ای و پارینه لرزه‌شناسی بزرگ دستگامی زیادی از این منطقه که بتوان آن را منسوب به گسل فیروز کوه دانست در دست نیست. از دیدگاه تاریخی اگر چه گسل فیروز کوه در پهنه لرزه‌ای زمین لرزه کومس (  $856 \text{ AD}$ ,  $I_0 = X$ ,  $M_s = 7.9$  ) قرار دارد، ولی با توجه به جایگاه میان کوهستانی فیروز کوه، زمین لرزه تاریخی شناخته شده و مشخص دیگری برای آن ارائه نشده است. با توجه به گستره لرزه‌ای هر زمین لرزه

در گستره کارکرد این گسل در نظر گرفت (Ambrasys and Melville, 1982). بیشتر این زمین لرزه‌ها بزرگایی کمتر از  $mb = 4.8$  دارند و از این میان زمین لرزه گدوک (1990 AD,  $I_0 = VII$ ,  $M_s = 5.8$ ) به عنوان بزرگ‌ترین زمین لرزه دستگامی شناخته شده در گستره این گسل جای می‌گیرد. برخلاف نبود داده لرزه‌ای تاریخی مشخص در منطقه فیروز کوه، بررسی‌های زمین ریخت‌شناسی و پارینه لرزه‌شناسی انجام شده ۵ ساله گذشته بر روی گسل فیروز کوه (Nazari, 2006) داده‌های آشکاری از سابقه لرزه‌خیزی و نرخ لغزش جوان این گسل جنبی  $(\leq 2 \text{ mm/yr})$  را به دست داد. از این رو با توجه به نزدیکی گستره اثر گسل فیروز کوه به شهرهایی چون فیروز کوه، دماوند، سمنان و تهران، شناخت هر چه بیشتر هندسه، سازوکار و ویژگی‌های لرزه‌ای گسل جنبی فیروز کوه امکان برآورد فاکتورهای خطر زمین لرزه احتمالی از جنبش دوباره این گسل را فراهم می‌آورد. با این هدف شناخت و گاه‌نگاری آخرین زمین لرزه روی داده از اهمیت بسیاری برخوردار است. در نوشتار پیش روی، برای دست یافتن به چنین مهمی از تعیین سن قطعات استخوان‌های انسانی یافت شده در یکی از ترانشه‌های حفر شده بر روی پهنه گوژ گسل فیروز کوه باروش کرین ۱۴ به همراه چینه‌نگاری کواترنری نهشته‌های آبرفتی جوان در خاور فیروز کوه بهره گرفته شده است.

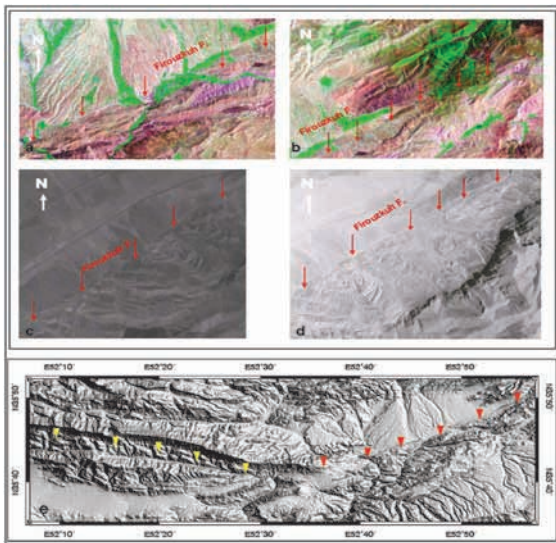
## ۲- ترانشه‌زنی و چینه‌نگاری کواترنری

پژوهش‌های پارینه لرزه‌شناسی بر روی گسل فیروز کوه با ۳ ترانشه موفق و ۲ ترانشه کنترلی به صورت عمود بر راستای عمومی گسل بین سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۶ به اجرا در آمد که از این میان دو ترانشه (F1, F2) با درازای ۷۰ و ۴۰ متر و میانه ژرفای ۴ متر در خاور روستای شمس‌آباد و در بخش خاوری گسل فیروز کوه بر روی پرتگاه گسلی با بیشینه بلندی ۳ متر در دامنه شمالی کوه "نولی" طی سال ۲۰۰۴ حفر شد. ترانشه F1 با ترانشه خاوری در مختصات جغرافیایی  $35^{\circ}47'03'' \text{ W}$  &  $52^{\circ}51'05'' \text{ E}$

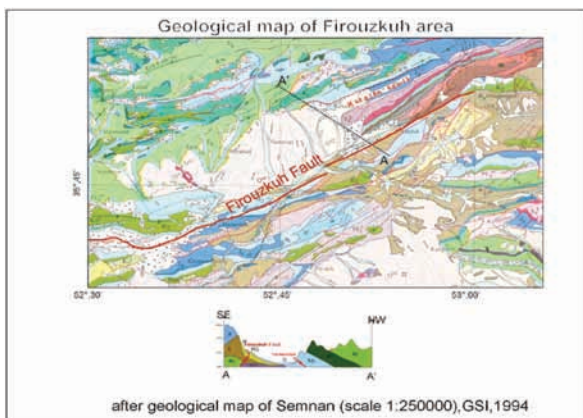
بقایای آلی یافت شده، ناهمسانی به دست آمده در نرخ رسوبگذاری را می‌توان به محیط رسوبگذاری رودخانه و دشت‌های سیلابی و شرایط حاصل از طغیان‌های فصلی نیز نسبت داد. در انگاره‌ای دیگر یعنی درجا نبودن استخوان‌های یافت شده نیز در صورت فرض انتقال و جایگیری دوباره قطعات استخوانی، ناچار به پذیرش جوان‌تر بودن سن ته نشست نهشته‌های میزبان بقایای آلی خواهیم بود که در این صورت نرخ رسوبگذاری به مراتب بیش از مقدار برآورد شده می‌شود. به هر روی، با فرض درست بودن این انگاره نیز در برآورد پیشینه زمان آخرین رخداد لرزه‌ای منسوب به گسل فیروزکوه تغییری به وجود نمی‌آید.

### سیاسکزاری

با سیاس بسیار از م. قرضی و ع. سعیدی از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور به سبب پشتیبانی‌های بسیار از پژوهش‌های پارینه لرزه‌شناسی و ح. علی‌محمدی به سبب همفکری و ایجاد انگیزش در انجام آزمایش‌های کربن ۱۴ همین طور با سیاس ویژه از علوم زمین مونت‌پلیه برای همراهی و حمایت‌های مالی و علمی.



شکل ۱- (a, b) بخش باختری و خاوری گسل فیروزکوه بر روی تصاویر ماهواره‌لندست (c, d) عکس‌های هوایی گستره فیروزکوه در مقیاس ۱:۵۵۰۰۰. پیکان‌های سرخ نشانگر گسل فیروزکوه است. (e) عکس نقشه رقمی ارتفاعی دره‌مشا و دره فیروزکوه بر اساس داده‌های SRTM است. سه گوش‌های زرد و سرخ بر روی این تصویر به ترتیب نشانگر گسل‌های مشا در باختر و گسل فیروزکوه در خاور DEM هستند. چهار گوش سفید نشانگر گستره مورد بررسی بر روی گسل فیروزکوه در باختر شهر فیروزکوه است.

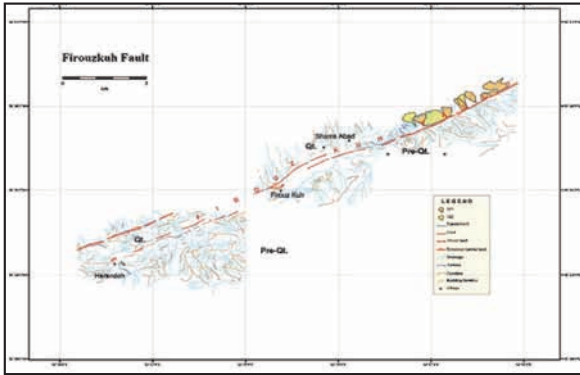


شکل ۲- بخشی از نقشه زمین‌شناسی (۱:۲۵۰۰۰۰) سمnan در راستای گسل فیروزکوه به همراه برش ساختمانی ساده شده از دره فیروزکوه در فاصله AA'.

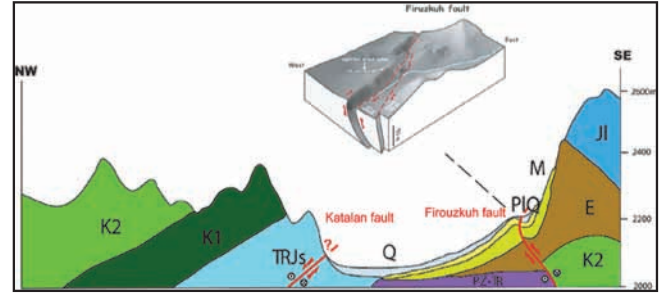
بر روی نهشته‌های دریاچه‌ای حوضه‌ای فرو افتاده و مسدود شده در اثر جنبش احتمالی گسل فیروزکوه به اجرا در آمد و تحلیل نگاشت تهیه شده از دیواره خاوری ترانشه F1 نشان از وجود ۲-۳ رخداد کهن لرزه‌ای با بزرگایی نزدیک به ۷ بر روی گسل فیروزکوه دارد، (Nazari, 2006) (شکل ۵). برش رسوبات جوان سطحی واحد ۵ در دو پهنه گسل خورده در بخش شمالی و هم در بخش جنوبی ترانشه نشانگر اثرات به جای مانده از جوان‌ترین رخداد لرزه‌ای حاصل از جنبش گسل فیروزکوه در این ناحیه است (شکل ۵). ترانشه F2 با فاصله‌ای نزدیک به ۵۰۰ متر در باختر ترانشه اول که رخنمونی کشیده از نهشته‌های کهن، برشی شده و هم راستا با گسل فیروزکوه بر روی و پشت بلندی پرتگاه گونه‌ای مشتمل بر سنگ نهشته‌های ائوسن - میوسن با ساختاری گوزگون در کناره یک آبراه حفر شد (شکل ۶-a, b). جایی که در ژرفای ۷۰-۶۰ سانتی متری آن بقایایی از اسکلت انسان در میان نهشته‌های آبرفتی یافت شد، (شکل ۷ و ۸-a). تحلیل نگاشت رسم شده از دیواره باختری ترانشه یاد شده به ژرفای نزدیک به ۳ متر آشکارا نشانگر وجود گسل‌های کهن در میان سنگ‌های برشی و گوژی شده منسوب به ائوسن - میوسن با شیبی به سوی جنوب است (شکل ۸-b). گسل یاد شده در بخش شمالی ترانشه F2 با پوششی نزدیک به ۳۰ سانتی متر از نهشته‌های جوان سطحی پوشیده می‌شود. اگر چه سترای کم نهشته‌های سطحی (واحد ۱) بر روی پهنه گسل خورده، تجزیه دقیق وضعیت ساختاری رسوبات جوان را مشکل می‌نماید، اما وجود درزه‌هایی پیش‌رونده در راستای گسل کهن در میان این آبرفت‌های سطحی (کوآترنری) را می‌توان در نتیجه اثرات به جای مانده از رخداد‌های جوان حاصل از جنبش گسل فیروزکوه دانست که با شواهد داده‌های به دست آمده از ترانشه F1 در هماهنگی است. جایگاه چینه‌ای آبرفت‌های در بردارنده استخوان‌های انسانی (واحد ۴) و نهشته‌های سطحی (واحد ۱)، جوان و گسل خورده این باور را فراهم می‌آورد که پیشینه زمان رخداد لرزه‌ای باید جوان‌تر از سن رادیومتریک به دست آمده برای بقایای آلی انسانی به دست آمده با روش کربن ۱۴ (۲۸ ± ۱۱۵۹) باشد. با این دیدگاه دوره بازگشت لرزه‌ای در بازه زمانی نزدیک به ۱۰۰۰ سال برای گسل فیروزکوه در همخوانی قابل قبولی با داده‌های برآورد شده برای گسل‌های مشا و آستانه در دو سوی باختری و خاوری آن و همچنین داده‌های GPS است، (Ritz et al., 2003; Nazari, 2006; Djamour et al., 2008; Talebian et al., 2008).

### ۳- نتیجه‌گیری

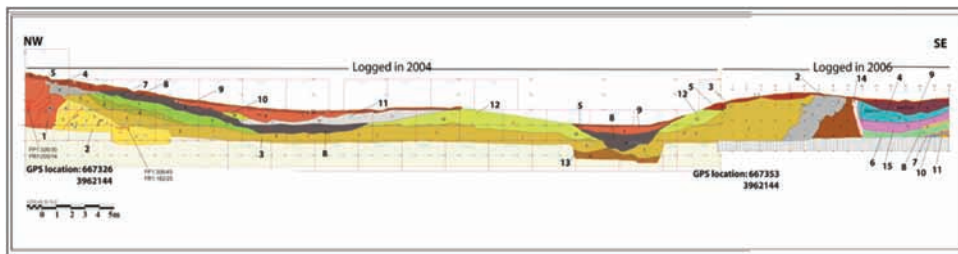
گاه به دست آمده با روش کربن ۱۴ برای استخوان‌های انسانی یافت شده در ترانشه پارینه لرزه‌شناسی F2 بر روی گسل فیروزکوه، نشانگر سنی بین ۱۱۳۱ تا ۱۱۸۷ سال برای نهشته‌های آبرفتی میزبان این بقایای آلی است. از آن جا که این رسوبات آبرفتی (واحد ۱) از دیدگاه چینه‌ای در زیر بالاترین افق چینه‌ای از نهشته‌های جوان و گسل خورده سطحی (واحد ۱) قرار می‌گیرند و چون نهشته‌های سطحی بر اثر جنبش جوان گسل فیروزکوه بریده شده‌اند و این نهشته‌ها همان گونه که اشاره شد از نهشته‌های در بردارنده قطعات استخوانی جوان‌تر هستند، پس می‌توان پیشینه زمان رخداد آخرین زمین لرزه منسوب به جنبش دوباره گسل فیروزکوه را پس از زمان به دست آمده (۲۸ ± ۱۱۵۹) برای بقایای استخوانی دانست. از دیگر سوی، با توجه به ژرفای استخوان‌های یافت شده در ترانشه F2 (۷۰-۶۰ سانتی متر) و این که اسکلت انسان یافت شده در ساختمانی گور مانند نبوده است می‌توان چنین انگاشت که زمان مرگ و جایگاه جسد همان سطح زمین در زمان حادثه! بوده است. حال با فرض برابرانگاشتن نرخ فرسایش و برپایی احتمالی ناحیه می‌توان نرخ رسوبگذاری محلی را برای دوره یاد شده در بازه ۱/۷-۱ میلی متر بر سال در نظر گرفت که مقدار برآورد شده از دو برابر نرخ برآورد شده برای نهشته‌های سازند هزار دره (۰/۶۲ mm/yr) در ناحیه جوان‌کلی در جنوب تهران است، (Ballato et al., 2008). در صورت پذیرش درجا بودن



شکل ۴- کارتوگرافی گستره گذر گسل فیروزکوه با استفاده از عکس‌های هوایی ۱:۵۵۰۰۰.



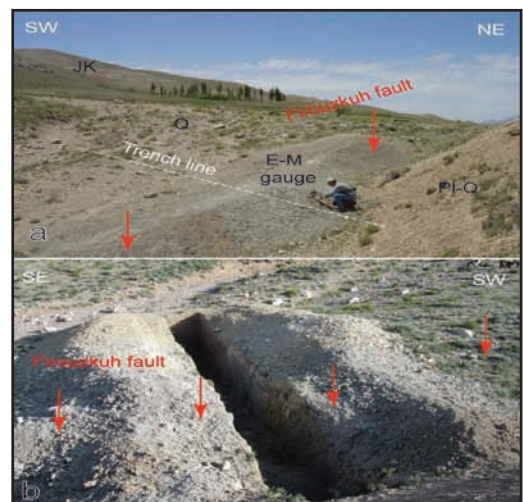
شکل ۳- برش ساختمانی ساده شده دره فیروزکوه در گذر گسل‌های فیروزکوه در جنوب دره و کتلان در شمال آن به همراه مدل ۳ بعدی رقمی - ارتفاعی گستره مورد پژوهش بر روی گسل فیروزکوه فراهم آمده با استفاده از جی‌پی‌اس کینماتیک.



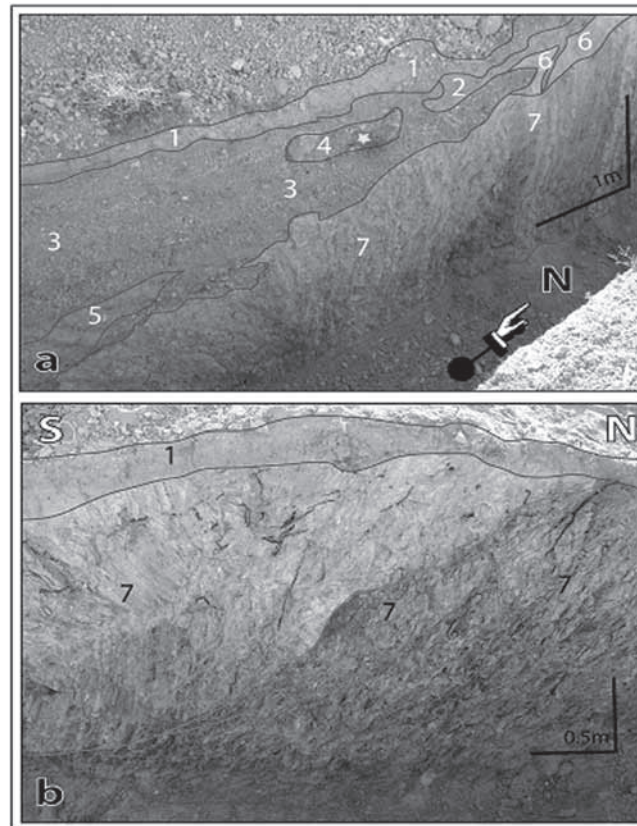
شکل ۵- نگاشت تهیه شده از دیواره خاوری ترانشه F1 حفر شده در خاور شهر فیروزکوه و روستای شمس‌آباد. (۱) سنگ آهک سرخ تا قهوه‌ای (گوژ) با ۱۰ درصد از قطعات گرد شده در اندازه ۰/۵ تا ۱۵ سانتی‌متر، بدون چینه‌بندی. (۲) سیلت‌های سفید تا کرم رنگ آهکی- گچی با ۵۰ درصد از قطعات گرد شده در اندازه ۰/۵ تا ۱۰ سانتی‌متر بدون چینه‌بندی. (۳) سیلت رسی قهوه‌ای روشن با ۳۰ درصد از قطعات گرد شده در اندازه ۳-۴ سانتی‌متر، چینه‌بندی ضعیف. (۴) سیلت گچی خاکستری روشن با ۵ درصد قطعه در اندازه ۲-۳ سانتی‌متر، گرد شده بدون چینه‌بندی. (۵) سیلت قهوه‌ای با ۴۰ درصد از قطعات گرد شده در اندازه ۳-۱۰ سانتی‌متر، بدون چینه‌بندی با گردش‌دگی میانه. (۶) سیلت قهوه‌ای روشن با گچ و ماسه خاکستری و ۳۰ درصد از قطعات گرد شده در اندازه ۲-۳ سانتی‌متر، چینه‌بندی و گردش‌دگی ضعیف. (۷) سیلت گچ‌دار ماسه‌ای خاکستری روشن با ۳۰ درصد از قطعات گرد شده در اندازه ۳-۲/۵ سانتی‌متر، بدون چینه‌بندی. (۸) سیلت گچ‌دار خاکستری روشن با ۲ درصد قطعه در اندازه کوچک‌تر از ۲ سانتی‌متر. (۹) ماسه لیمونیتی شده قهوه‌ای روشن، در پاره‌های بخش‌ها دارای گچ با ۲۵ درصد از قطعات نیمه گرد شده در اندازه ۳-۷ سانتی‌متر، بدون چینه‌بندی. (۱۰) سیلت ماسه‌ای گچ‌دار قهوه‌ای روشن با ۱۰ درصد از قطعات گرد شده در اندازه ۳-۱ سانتی‌متر، بدون چینه‌بندی با گردش‌دگی میانه. (۱۱) سیلت گچ‌دار سفید رنگ با کمتر از ۲ درصد قطعه. (۱۲) سیلت گچ‌دار ماسه‌ای خاکستری روشن با ۵ درصد از قطعات گرد شده در اندازه کوچک‌تر از ۰/۵ سانتی‌متر، بدون چینه‌بندی. (۱۳) سیلت ماسه‌ای قهوه‌ای روشن با کمی گچ، ۳۰ درصد از قطعات با گردش‌دگی میانه در اندازه ۰/۵-۵ سانتی‌متر، بدون چینه‌بندی. (۱۴) گوژ گسل کرم رنگ با زمینه سیلتی. (۱۵) مشابه واحد ۴ با یک لایه نازک از کنگلومرا در کف واحد و قطعاتی بین ۷-۱ سانتی‌متر و لکه‌های گچی در متن.



شکل ۷- قطعاتی جا به جا شده از استخوان‌های باقیمانده از اسکلت انسانی یافت شده در ترانشه F2.



شکل ۶- (a) نهشته‌های رنگین گوژ منسوب به زمان ائوسن- میوسن برآمده در راستای گسل فیروزکوه (پیکان‌های سرخ)، پاره خط سفید نشانگر راستای ترانشه حفر شده (نشان داده شده در عمود بر راستای گذر گسل است).



شکل ۸- (a,b) نشانگر دو نگاه متفاوت از نگاشت رسم شده از عکس دیواره باختری ترانشه F2 بر روی پهنه گسل خورده گوژ، ستاره زرد در میان واحد ۴ مکان استخوان‌های یافت شده است. (۱) خاک سطحی شامل سیلت و بقایای آلی گیاهی با درز و ترک (گسل خورده) در ادامه سطحی گسل فیروزکوه حاصل از جنبش احتمالی دوباره گسل فشاری کهن با سازوکار جوان چپ‌گرد و نرمال. (۲) نهشته‌های سیلتی کرم رنگ به ندرت دارای قطعات بزرگ‌تر از ۲ سانتی‌متر و چینه‌بندی بسیار ضعیف، منشأ گرفته از پرتگاه شمالی حاصل از عملکرد مؤلفه نرمال گسل فیروزکوه. (۳) آبرفت‌های خاکستری دارای چینه‌بندی، اندازه پاره‌ای قطعات تا ۱۵ سانتی‌متر. (۴) پرشدگی کانال آبراهه، خاکستری با قطعاتی در اندازه میانه ۱۵ سانتی‌متر و زمینه ماسه‌ای. (۵) نهشته‌های ریز دانه کرم تا خاکستری روشن از عدسی در میان کانال آبراهه. (۶) واحد هوازده روشن، کرم رنگ از دگرسانی سطح واحد سنگی (V, V۷). سنگ نهشته‌های دگر شکل، برشی شده و گوژی شده (انوسن - میوسن) بر اثر جنبش چند باره گسل فیروزکوه با شیب به سوی جنوب خاوری.

## References

- Aghanabati, A., Hamed, A. R., (compilers) 1994- Geological map of Semnan quadrangle, GSI.
- Allen, M. B., Ghassemi, M. R., Shahrabi, M., Qorashi, M., 2003- "Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran." *Journal of Structural Geology* 25: 659-672.
- Ambraseys, N. N., Melville, C. P., 1982- "A history of Persian earthquakes." Cambridge University press, New York: 219.
- Ballato, P., Nowaczyk, N. R., Landgraf, A., Strecker, M. R., Friedrich, A. H., Tabatabaei, S., 2008- "Tectonic control on sedimentary facies pattern and sediment accumulation rates in the Miocene foreland basin of the southern Alborz mountains, northern Iran." *Tectonics*, Vol. 27, TC6001, doi:10.1029/2008TC002278.
- Berberian, M., Ghorashi, M., Shoja Taheri, J., Talebian, M., 1996- Seismotectonic and Earthquake-Fault hazard investigations in the Semnan region (In Persian), GSI. VII: 268.
- Djamour, Y., Bayer, R., Vernant, P. h., Hatam, Y., Ritz, J. F., Hinderer, J., Luck, B., Le Moigne, N., Sedighi, M., Boy, J. P., 2008- "The present-day deformation in Alborz (Iran) depicted by GPS and gravity observations." *SGF*, 6-7 October, Paris.
- Jackson, J., Priestley, K., Allen, M., Berberian, M., 2002- "Active tectonics of the South caspian Basin." *Geophys. J. Int.* 148: 214-245.
- Nazari, H., 2006- Analyse de la tectonique recente et active dans l'Alborz Central et la region de Teheran: Approche morphotectonique et paleoseismologique. Science de la terre et de l'eau. Montpellier, Montpellier II: 247.
- Nazari, H., Ritz, J-F, Talebian, M., Moosavi, A., 2005- Seismotectonic map of the Central Alborz (1:250,000). Tehran, GSI.
- Ritz, J. F., Balescu, S., Soleymani, S., Abbassi, M., Nazari, H., Feghhi, K., Shabanian, E., Tabassi, H., Farbod, Y., Lamothe, M., Michelot, J. L., Massault, M., Chery, J., Vernant, P., 2003- Determining the long-term slip rate along the Moshaf Fault, Central Alborz, Iran. 4th. International Conference on Seismology and Earthquake Engineering. (See 4), Tehran, Iran.
- Talebian, M., Ghorashi, M., Nazari, H., 2008- Seismotectonic map of the Central Alborz (1:750,000). (Proof copy) Tehran, GSI.
- Yousefi, E., Friedberg, J. L., 1977- Aeromagnetic map of the Amol quadrangle. Tehran, GSI.

# بررسی اثرات اجرای تغذیه مصنوعی بر روی آبخوان دشت گوهر کوه

محسن رضایی<sup>۱\*</sup> و امین سرکزی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه تربیت معلم، گروه زمین شناسی، تهران، ایران.

<sup>۲</sup> اداره امور آب زابل، زابل، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۰۹/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۰۳/۰۳

## چکیده

برداشت بیش از حد مجاز از آبخوان آبرفتی دشت گوهر کوه در جنوب باختر زاهدان، منجر به کاهش تراز آب زیرزمینی شده است. به منظور شناخت کامل تر آبخوان و بررسی اثرات احتمالی اجرای طرح تغذیه مصنوعی، جریان آب زیرزمینی این دشت، با مدل ریاضی شبیه سازی شده است. در این مطالعه از نگاهت (لاگ) های حفاری، آماربرداری از منابع آبی، داده های پیژومتری و آزمایش های پمپاژ، استفاده شده است. مدل عددی جریان برای پیش بینی تغییرات سطح آب در آینده، مورد استفاده قرار گرفته است. به علت نوسانات کمتر در تراز آب زیرزمینی، بهمن ماه ۱۳۸۱ به عنوان شرایط پایدار مورد واسنجی قرار گرفت. سپس از اسفند ۱۳۸۱ تا اسفند ۱۳۸۲ واسنجی برای شرایط ناپایدار انجام شد. در انتها نیز تحلیل حساسیت و صحت سنجی (برای اسفند ۱۳۸۲ تا اسفند ۱۳۸۳) بر روی مدل اعمال شد. پس از اتمام ساخت مدل برای آبخوان دشت گوهر کوه، به بررسی اثرات اجرای طرح تغذیه مصنوعی بر روی آبخوان دشت گوهر کوه پرداخته شد که بر اساس شرایط موجود، بهترین محل برای اعمال تغذیه مصنوعی بخش های شمالی آبخوان (مجاور چاه مشاهده ای P9) است. واکنش آبخوان در برابر اعمال تغذیه مصنوعی مثبت است و تغذیه مصنوعی اثر مخربی روی آبخوان ندارد.

**کلیدواژه ها:** مدل سازی، آب های زیرزمینی، مدل Modflow، آبخوان دشت گوهر کوه

\* نویسنده مسئول: محسن رضایی

E-mail: m\_rezaei@tmu.ac.ir

## ۱- مقدمه

خشکی در ایران یک واقعیت اقلیمی است که لازم است راه کارهای سازگار با آن را جستجو نمود. این امر برپایه در دشت گوهر کوه که از نظر اقلیمی جزو مناطق خشک و کم باران کشور است، از اهمیت بیشتری برخوردار است. این دشت در استان سیستان و بلوچستان و حدفاصل شهرستان زاهدان به شهرستان خاش قرار دارد و به عنوان یک آبخوان مهم مطرح است. با خشکسالی های اخیر، کمبود منابع آبی در این دشت نمود بیشتری پیدا کرده است و همچنین به دلیل پراکندگی نامناسب زمانی و مکانی، بارندگی ها در زمان خاصی به صورت سیلاب جاری شده، از دسترس خارج و گاه سبب بروز خساراتی نیز می شوند. افزون بر این، پیشنهاد ساخت سد نیز در محدوده این دشت وجود دارد. از رواناب های موجود در دشت و آب مازاد شبکه سد در حال ساخت، می توان در تغذیه مصنوعی به دشت و جلوگیری از افت بیشتر آبخوان استفاده کرد. در این نوشتار، سعی شده تا ضمن مدل سازی عددی آبخوان دشت، اثرات احتمالی اجرای طرح تغذیه مصنوعی، مورد پیش بینی و ارزیابی قرار گیرد.

مدل سازی عددی در آب زیرزمینی مبانی شناخته شده ای دارد و این مبانی در کتاب های متعدد به خوبی تبیین شده است (Boonstra and Deridder, 1981) و (Kinzelbach, 1986). آبخوان های متعددی در دنیا مورد مدل سازی عددی قرار گرفته اند. در ایران نیز استفاده از روش های عددی برای شبیه سازی جریان آب زیرزمینی از سال ۱۹۶۲ با شبیه سازی دشت ورامین آغاز شده است و پس از آن استفاده از این روش در مطالعه آبخوان های آب زیرزمینی مورد توجه بوده است (خوشنامی، ۱۳۷۲؛ دهقان قهفرخی، ۱۳۸۲؛ کاظمی گلیان، ۱۳۸۱؛ اصلانی، ۱۳۸۲؛ شفیع مطلق، ۱۳۸۴ و رشیدی، ۱۳۸۵).

هدف از این پژوهش، در مرحله اول بررسی و شناخت دقیق وضع موجود آبخوان گوهر کوه بوده است که در این راستا از نرم افزار مدل سازی ریاضی Visual MODFLOW 4.2 Premium استفاده شده است. مدل Modflow در واقع یک حل تفاضل محدود برای معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر جریان آب زیرزمینی است (Doherty, 2001). این مدل برای شبیه سازی جریان آب زیرزمینی در آبخوان های با شرایط مرزی مشخص و با فرض مقادیر لازم برای هدایت هیدرولیکی

و دیگر پارامترهای سفره کاربرد دارد (Hoaglund, 2002). پس از مدل سازی دشت، تأثیر اجرای طرح تغذیه مصنوعی در دو حالت «با و بدون تأمین آب تغذیه از سد در حال ساخت گوهر کوه» مورد پیش بینی و ارزیابی قرار گرفته است.

## ۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه

دشت گوهر کوه در استان سیستان و بلوچستان با موقعیت جغرافیایی  $28^{\circ}07'$  تا  $28^{\circ}45'$  شمالی در  $17^{\circ}$  کیلومتری جنوب باختر زاهدان واقع شده است و به وسیله یک جاده آسفالتی که از جاده آسفالتی زاهدان به خاش منشعب می شود، با شهرستان زاهدان ارتباط پیدا می کند. این دشت قسمتی از حوضه آبریز گوهر کوه و قله بید است. این حوضه از خاور به حوضه آبریز لادیز و خاش، از باختر به کویر لوت و از شمال به کویرین و شور و محدود است. آبخوان دشت گوهر کوه در مرز جنوبی این حوضه قرار دارد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی محدوده دشت گوهر کوه را نشان داده است. حوضه آبریز گوهر کوه در حدفاصل واحدهای زمین ساختی نهندان، خاش، مکران، بلوک لوت و ایران مرکزی واقع شده است. سازندهای سنگی موجود در محدوده مورد مطالعه را از نظر ساختمانی می توان به دو زون فلیش خاور ایران و زون لوت وابسته به ایران مرکزی دانست. ناحیه مورد مطالعه، از نهشته های فلیش و سنگ های آمیزه رنگین خاور و جنوب خاوری ایران تشکیل شده و بیرون زدگی های موجود، ترکیب و ویژگی های خاص سنگ های این بخش از ایران را دارا هستند. رسوبات دشت به سن کواترن هستند و بر اساس نگاهت چاه های حفاری رسوبات دشت دارای اندازه های مختلف از سیلت تا شن است. تحرک های زمین ساختی باعث ایجاد گسل ها و درزها و شکاف های به نسبت فراوان در مجموعه سازندهای زمین شناسی حوضه آبریز شده است. جهت گسل ها عموماً در سه امتداد شمال- جنوب، شمال باختر- جنوب خاور و شمال خاور- جنوب باختر است. کوه آتشفشان تفتان واقع در ضلع شمال خاوری حوضه گوهر کوه محصول فعالیت های آتشفشانی در کواترن و ترشیر است و در حال حاضر فعالیت آن منحصر به خروج گازهای گوگردی از دهانه و اطراف دهانه است. گدازه ها و نفوذی های آتشفشانی بخشی از سازندهای مربوط به ترشیر را در حوضه آبریز پوشانده است.

پیزومتری موجود در دشت گوهرکوه تهیه شده است (شکل ۳). جهت جریان آب زیرزمینی از شمال باختر و جنوب به سمت جنوب‌خاور محدوده مدل‌سازی است. میزان شیب هیدرولیکی در بخش‌های شمالی بیشتر و در بخش‌های جنوبی کمتر است. با استفاده از نتایج آزمون پمپاژ چاه‌های بهره‌بردار و اکتشافی میزان توانایی انتقال از ۳۶۱۴ مترمربع بر روز در بخش‌های شمالی تا ۴۲۳۰ مترمربع بر روز در بخش‌های جنوبی در تغییر است. میزان قابلیت انتقال اندازه‌گیری شده به صورت منطقه‌ای به کل دشت بسط داده شده است. بیشترین آبدهی ویژه ۰/۱۷ مربوط به نواحی مرکزی دشت و کمترین آن ۰/۱۲ مربوط به نواحی خاوری اندازه‌گیری شده است. با روش تیسن و بر اساس داده‌های پیزومتری خردادماه ۱۳۸۱ تا تیرماه ۱۳۸۵ هیدروگراف واحد دشت تهیه شده است (شکل ۴). نتیجه نشان می‌دهد که تراز آب زیرزمینی در طی ۴ سال ۱/۶۳ متر کاهش یافته است.

در یک دوره زمانی از اسفند ۱۳۸۱ تا بهمن ۱۳۸۲ مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی محاسبه شده است. مؤلفه‌های ورودی به محدوده بیلان شامل نفوذ از بارش‌های جوی در سطح دشت، برگشت آب مصرفی، جریان ورودی زیرزمینی و نفوذ از رواناب‌های سطحی در نظر گرفته شده است. برای محاسبه میزان نفوذ از نزولات جوی، با توجه به بارش انجام شده در سال آبی ۸۲-۱۳۸۱ (۶۶ میلی‌متر)، حجم بارش در محدوده بیلان ۱۵/۴ میلیون مترمکعب برآورد شده است. بر اساس میزان تبخیر و تعرق پتانسیل بالای دشت و جنس رسوبات دشت، ۱۵٪ از این حجم معادل ۲/۳ میلیون مترمکعب به عنوان نفوذ از طریق بارش‌های جوی در محاسبات بیلان استفاده شده است. برای محاسبه آب برگشتی مصرفی، ۲۰٪ از آب مصرفی کشاورزی و ۷۰٪ از آب مصرفی شرب به عنوان آب برگشتی به محدوده بیلان و معادل ۶/۹۲ میلیون مترمکعب برآورد شده است. برای محاسبه ورودی و خروجی زیرزمینی از محدوده بیلان، از نقشه تراز آب زیرزمینی بهمن‌ماه سال ۸۲ (شکل ۳) و قابلیت انتقال مقاطع ورودی و خروجی که از نتایج آزمون‌های پمپاژ استخراج شده‌اند، استفاده شده است. بر این اساس، حجم ورودی به محدوده بیلان در سال بیلان ۳۳/۱ میلیون مترمکعب محاسبه شد. با توجه به عدم ایستگاه‌های هیدرومتری در سطح دشت، امکان برآورد قابل قبولی از مؤلفه نفوذ از جریان‌های سطحی در سطح دشت وجود ندارد.

مؤلفه‌های خروجی از محدوده بیلان شامل تخلیه توسط چاه‌های بهره‌بردار و قنات‌ها، خروجی زیرزمینی و تبخیر احتمالی از آب زیرزمینی است. بر اساس اطلاعات آماربرداری از منابع آب در سال ۸۲-۱۳۸۱، میزان بهره‌برداری در محدوده بیلان ۳۴/۶ میلیون مترمکعب گزارش شده است (شرکت سهامی آب منطقه‌ای سیستان و بلوچستان، ۱۳۸۲). با روش بیان شده در پاراگراف پیش، حجم خروجی زیرزمینی از محدوده بیلان معادل ۱۴ میلیون مترمکعب محاسبه شد. با توجه به این که ژرفای آب زیرزمینی در آبخوان بیشتر از ۵ متر است، تبخیر از آب زیرزمینی انجام نمی‌شود. نتیجه محاسبات بیلان (جدول ۲) نشان می‌دهد که بر آبخوان گوهرکوه در سال آبی ۸۲-۱۳۸۱ بیلان منفی معادل ۶/۳- میلیون مترمکعب در سال حاکم بوده است. هیدروگراف واحد دشت نیز در محدوده زمانی محاسبه بیلان ۲۵ سانتی‌متر کاهش نشان داده است. با اعمال آبدهی ویژه ۱۲٪ برای آبخوان کاهش حجم آبخوان ۵/۲- میلیون مترمکعب محاسبه می‌شود که با نتایج بیلان همخوانی دارد. اختلاف بین تغییر حجم مخزن به‌دست آمده از هیدروگراف دشت و نتیجه بیلان، می‌تواند مربوط به مؤلفه نفوذ از جریان‌های سطحی باشد که در محاسبات بیلان اعمال نشده است.

#### ۴-۲. معادله حاکم و انتخاب کد کامپیوتری

فرم کلی معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی از دیدگاه سیستم جریان به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \cdot h \cdot \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \cdot h \cdot \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \cdot h \cdot \frac{\partial h}{\partial z}) = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \pm R$$

بلندترین نقطه ارتفاعی موجود در حوضه آبریز دشت با ارتفاع ۳۱۲۶ متر از سطح دریا، در دامنه‌های تفتان، واقع در شمال خاوری حوضه و پست‌ترین آن، در خروجی دشت با ارتفاع ۱۲۵۰ متر قرار دارد. ارتفاع متوسط حوضه ۱۶۲۳ متر و ارتفاع متوسط دشت ۱۳۵۰ متر است.

برای بررسی شرایط آب و هوایی حوضه آبریز گوهرکوه و نوسانات مربوط به آن، از آمار میانگین ماهانه ایستگاه سینوپتیک خاش از فروردین سال ۱۳۶۵ تا اسفند سال ۱۳۸۶ استفاده شده است. نتایج بررسی آماری پارامترهای هواشناسی در جدول ۱ ارائه شده است. براساس این آمار میانگین بارندگی سالیانه، ۱۴۴/۳ میلی‌متر در سال، دمای میانگین سالانه در طول دوره آماری حدود ۱۹/۹ درجه سانتی‌گراد و میانگین سالیانه تبخیر از تشت، ۱۱۱/۵ میلی‌متر در سال است. تغییرات میانگین ماهیانه این پارامترها در طول سال نیز در شکل ۲ نشان داده شده است. گرم‌ترین ماه سال تیرماه با درجه حرارت میانگین ۳۰/۴ درجه سانتی‌گراد، سردترین ماه سال نیز دی ماه، با میانگین دمای ۹ درجه سانتی‌گراد است. کمترین میانگین ماهانه بارش ۰/۹ میلی‌متر مربوط به مرداد ماه و بیشترین آن ۳۹ میلی‌متر مربوط به اسفند ماه است. بیشترین میانگین تبخیر مربوط به ماه مرداد و با ۱۵/۱ میلی‌متر تبخیر، کمترین میانگین تبخیر مربوط به ماه دی و با ۳/۱ میلی‌متر تبخیر است. بر اساس اقلیم‌نمای دومارتن محدوده مورد مطالعه دارای اقلیم خشک بیابانی و بر اساس اقلیم‌نمای آمبرژه در اقلیم خشک معتدل قرار می‌گیرد.

#### ۳- مواد و روش‌ها

اطلاعات مورد نیاز این مدل‌سازی از منابع مختلف تأمین شده است. در محدوده مدل‌سازی ۸۶ حلقه چاه بهره‌بردار، دو رشته قنات و ۱۷ چاه پیزومتری موجود است. توپوگرافی سطح آبخوان با استفاده از ارتفاع مطلق اندازه‌گیری شده در ۱۷ حلقه پیزومتر تهیه شده است. برای رسم نقشه توپوگرافی سنگ کف از نتایج مطالعات ژئوفیزیک انجام شده، نگاشت‌های اکتشافی و اطلاعات مربوط به چاه‌های بهره‌بردار استفاده شده است. آمار موجود سالیانه چاه‌های بهره‌بردار و ماهیانه اندازه‌گیری تراز آبی آبخوان در محاسبات بیلان مورد استفاده قرار گرفته است. اطلاعات تغذیه به آبخوان با استفاده از آمار بارندگی دشت گوهرکوه و آب برگشتی از چاه‌ها و قنات‌ها به دست آمده است. ضرایب هیدروپدینامیکی شامل هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه با استفاده از نتایج آزمایش‌های پمپاژ سازمان آب منطقه‌ای استان سیستان و بلوچستان، در مناطق مختلف دشت به صورت منطقه‌ای به مدل داده شد (شرکت سهامی آب منطقه‌ای سیستان و بلوچستان، ۱۳۸۳).

#### ۴- بحث

##### ۴-۱. توسعه مدل مفهومی

آبخوان دشت گوهرکوه در نهشته‌های آبرفتی و مخروط‌افکنه‌ای قرار دارد. این آبخوان از نوع آزاد است. آبخوان از سمت شمال خاور و خاور به واحدهای سنگی از نوع آمیزه‌های رنگین محدود می‌شود؛ که با توجه به نوع ژنز و ترکیب سنگ‌شناختی، این مجموعه نفوذپذیر و مؤثر در تغذیه آبخوان است. از جنوب نیز به واحدهای سنگی آهکی تکنونیزه محدود می‌شوند که پتانسیل آبی نسبتاً خوبی دارند. شرایط مرزی مدل بر اساس این اطلاعات استخراج شده‌اند. سنگ کف محدوده مطالعاتی در بخش‌های مختلف و همچنین ستبرای آبخوان متفاوت هستند. با توجه به نگاشت‌های حفاری، ستبرای آبخوان در شمال دشت ۸۹ متر و جنس سنگ کف مارن سبزرنگ، در جنوب آبخوان ۹۶ متر و جنس سنگ کف، مارن، در خاور آبخوان ۶۰ متر و جنس سنگ کف آهک، در مرکز دشت ۷۵ متر و جنس سنگ کف مارن سنگ است. نقشه تراز آب زیرزمینی بر اساس اطلاعات ۱۷ حلقه چاه

که  $Kz$  و  $Kx$ ،  $Ky$  مؤلفه‌های تنسور هدایت هیدرولیکی،  $S$  ظرفیت ویژه و  $R$  مؤلفه تغذیه یا تخلیه به آبخوان است.

در انتخاب کد کامپیوتری به معیارهایی مانند کارایی مدل، عمومیت مدل و سهولت کاربرد مدل توجه می‌شود. همچنین مدلی که مراحل مختلف ورود و خروج داده‌ها، تنظیم و ارائه نتایج با استفاده از ابزارهای گرافیکی با دقت قابل قبول را داشته باشد؛ برتری دارد. با توجه به موارد بالا و اهداف این نوشتار، از نسخه پیشرفته مدل MODFLOW یعنی Visual MODFLOW 4.2 که تمامی معیارهای بالا را دارد؛ استفاده شده است. این نرم‌افزار دارای قابلیت‌های بسیاری از جمله اعمال بسیاری از بسته‌های نرم‌افزاری مورد نیاز آبخوان، توانایی ورود داده‌هایی با پسوند‌های مختلف، توانایی نمایش سه‌بعدی، توانایی محاسبه سلول‌های بیشتر و افزایش چشمگیر در سرعت محاسبات نسبت به نسخه پیشین است.

#### ۴-۳. طراحی مدل دشت، تعیین مرزها

برای مدل‌سازی آب زیرزمینی منطقه مورد نظر، سلول‌ها با ابعاد ۵۰۰ متر انتخاب شده‌اند؛ که در ۳۴ ستون و ۵۸ ردیف قرار می‌گیرند. سطح آبخوان به عنوان مرز بالایی و واحدهای کف آبخوان به عنوان مرز پایینی مدل در نظر گرفته شده‌اند. در محدوده مورد مطالعه، به دلیل نبود توده نفوذناپذیر سنگی و حجم زیادی از آب سطحی، تنها می‌توان از مرزهای هیدرولیکی استفاده کرد. مرزهای آبخوان در دشت گوهرکوه از نوع بار ثابت انتخاب شده‌اند؛ و برای وارد کردن مرزهای مدل، از نقشه‌های تراز آبی مربوط به هر دوره استفاده شده است. در حالت پایدار مرزها با بار آبی ثابت (Constant Head) و در حالت ناپایدار در خروجی‌ها چاه با دبی منفی و در ورودی‌ها چاه با دبی مثبت و در بقیه نقاط مرز با بار صفر در نظر گرفته می‌شود (شکل ۵).

#### ۴-۴. ورود اطلاعات به مدل

با استفاده از ارتفاع مطلق پیزومترها، نقشه توپوگرافی سطح آبخوان تهیه و به مدل داده می‌شود (شکل ۶- الف). مرز زیرین آبخوان آب زیرزمینی را سنگ کف تشکیل می‌دهد. در شکل ۶- ب توپوگرافی سنگ کف آبخوان دشت گوهرکوه نشان داده شده است. این نقشه با توجه به مطالعات ژئوفیزیکی، نگاشت‌های اکتشافی و چاه‌های بهره‌برداری رسم شده است. مؤلفه‌های تخلیه و تغذیه به مدل بر اساس نتایج مطالعات هیدروژئولوژیکی توسط بسته‌های نرم‌افزاری مربوطه به مدل وارد شده‌اند. در محدوده مدل‌سازی ۸۶ حلقه چاه بهره‌برداری دو رشته قنات و ۱۷ چاه پیزومتری موجود است (شکل ۷). برای ورود اطلاعات آنها به مدل، از بسته نرم‌افزاری Wells استفاده می‌شود. تغذیه ناشی از بارش، آب برگشتی از چاه‌های بهره‌برداری، قنات‌ها و چشمه‌ها محاسبه و توسط بسته تغذیه به مدل وارد می‌شوند. چنانچه در مبحث بیان توضیح داده شد، در دشت گوهرکوه میزان تغذیه ناشی از بارندگی ۱۵ درصد بارندگی در نظر گرفته شده است. در هر دوره ۱۵ درصد بارندگی محاسبه و در مناطقی که منبع تغذیه دیگری وجود ندارد، همین مقدار به عنوان تغذیه به آن سلول منظور شده است. ضرایب هیدروپنایمیک شامل هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه با استفاده از نتایج آزمایش‌های پمپاژ در مناطق مختلف دشت به صورت منطقه‌ای به مدل داده می‌شود. اطلاعات وارد شده به مدل در جدول ۳ ارائه شده است.

برای اجرای مدل باید شرایط اولیه بار آبی به مدل داده شود؛ تا مدل بتواند بر اساس بار آبی اولیه داده شده به آن برای حل معادلات دیفرانسیل، بار آبی در کل آبخوان را محاسبه نماید. بدین منظور، آمار سطح آب آبخوان دشت گوهرکوه در بهمن ماه ۱۳۸۱ که دارای کمترین نوسان است، به عنوان بار آبی اولیه به مدل داده شد. زمان اجرای مدل و مراحل زمانی موازنه (کالیبراسیون) نیز به تعدادی تنش دوره تناوب و گام زمانی تقسیم می‌شود؛ برای شبیه‌سازی دشت گوهرکوه، زمان واسنجی شرایط ناپایدار به مدت

یک سال از اسفند ۱۳۸۱ تا اسفند ۱۳۸۲ در ۱۲ دوره تنش در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۵. واسنجی مدل

در واسنجی حالت ماندگار، از داده‌های سطح آب بهمن ماه ۱۳۸۱ که دارای کمترین نوسان است، استفاده شده است. در این مرحله با اجرای پیمایی مدل هدایت هیدرولیکی بهینه شود تا بین سطح آب محاسبه‌ای توسط مدل و سطح آب مشاهده‌ای (سطح آب در بهمن ماه ۱۳۸۱) انطباق مطلوبی حاصل شود. مقادیر اولیه هدایت الکتریکی با توجه به نتایج آزمایش‌های پمپاژ و بررسی نگاشت‌های اکتشافی انتخاب شد. بر این اساس، مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی اولیه از  $0.0049$  متر بر ثانیه در بخش‌های شمالی تا  $0.0050$  متر بر ثانیه در بخش‌های جنوبی منظور شده است. نقشه هدایت هیدرولیکی بهینه‌شده بعد از واسنجی در شکل ۸- الف نشان داده شده است. در واسنجی پایدار NormalizedRMS برابر  $0.59\%$  است، که مقدار قابل قبولی است. شکل ۸- ب انطباق مناسب بین ترازهای مشاهده‌ای و محاسباتی در حالت پایدار را نشان داده است.

بعد از واسنجی مدل در حالت پایدار، این کار در حالت ناپایدار صورت می‌گیرد. در این مرحله آبدهی ویژه بهینه شد. مقادیر اولیه آبدهی ویژه بر اساس آزمون‌های پمپاژ و از بیشینه  $0.17$  مربوط به نواحی مرکزی دشت تا کمینه  $0.12$  مربوط به نواحی خاوری دشت منظور و به صورت منطقه‌ای به مدل وارد شد. برای واسنجی مدل در حالت ناپایدار از آمار سطح آب مربوط به اسفند ۱۳۸۱ الی اسفند ۱۳۸۲ استفاده شده است. نقشه آبدهی ویژه بهینه شده در شکل ۹ نشان داده شده است. در جدول ۴ خطاهای محاسباتی در طی ۱۲ دوره تنش در واسنجی ناپایدار و در شکل ۱۰ مقایسه ترازهای مشاهداتی و محاسباتی برای دوره‌های ۶۰ روزه از شروع شبیه‌سازی نشان داده شده است. خطاها در محدوده قابل قبول واقع شده است.

#### ۴-۶. تحلیل حساسیت

در حالت پایدار حساسیت مدل نسبت به تغییر میزان هدایت هیدرولیکی و در حالت ناپایدار نسبت به تغییرات تغذیه، تخلیه و آبدهی ویژه بررسی شد. نتیجه بررسی نشان داده است که مدل، بیشترین حساسیت را به تغییر در هدایت هیدرولیکی دارد و میزان تغذیه و تخلیه و ضریب آبدهی ویژه از نظر حساسیت، در رده‌های بعدی هستند. شکل ۱۱ میزان حساسیت مدل را نسبت به پارامترهای مختلف نشان می‌دهد.

#### ۴-۷. صحت‌سنجی

بعد از واسنجی در حالت ناپایدار مدل نیازمند تأیید یا صحت‌سنجی است تا بتوان به آن اطمینان کرد. بدین منظور از اسفند ۱۳۸۲ تا اسفند ۱۳۸۳ صحت‌سنجی صورت گرفت. جدول ۵ خطاهای محاسباتی در طی ۱۲ دوره تنش در حالت صحت‌سنجی نشان می‌دهد. مقایسه بین ارتفاع آب مشاهداتی و محاسباتی در طول دوره صحت‌سنجی در شکل ۱۲ برای پیزومترهای انتخابی، نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در دوره صحت‌سنجی روند تغییرات ترازهای محاسباتی به‌طور کامل از روند تغییرات ترازهای مشاهداتی پیروی نموده است. بیشترین اختلاف بین تراز مشاهداتی و محاسباتی در این دوره  $0.5$  متر بوده است و در بیشتر موارد این اختلاف به کمتر از  $20$  سانتی‌متر رسیده است. این موضوع نشان می‌دهد که مدل‌سازی با خطای قابل قبولی انجام شده است و نتایج پیش‌بینی را می‌توان از صحت قابل قبولی برخوردار دانست.

#### ۴-۸. بررسی اثرات تغذیه مصنوعی بر روی آبخوان

بررسی اثرات اجرای تغذیه مصنوعی، در قالب دو حالت متفاوت: یکی بدون در نظر گرفتن اجرای سد گوهرکوه و دیگری با در نظر گرفتن اجرای سد گوهرکوه انجام شده است. لازم به یادآوری است که اثر سد گوهرکوه تنها به عنوان تأمین‌کننده آب مورد نیاز برای تغذیه در نظر گرفته شده است.

**حالت اول:** برای تعیین مکان مناسب برای تغذیه مصنوعی به آبخوان دشت گوهرکوه ضمن بازدید صحرایی به هدف شناخت محل مناسب، عوامل تأثیرگذار در موفقیت

نفوذپذیری نیز در همین جهت افزایش می‌یابد.

- جهت جریان آب زیرزمینی از شمال باختر و جنوب به سمت جنوب‌خاور محدوده مدل‌سازی است. میزان شیب هیدرولیکی در بخش‌های شمالی بیشتر و در بخش‌های جنوبی کمتر است.

- روند کلی هیدروگراف واحد دشت نزولی است. از خردادماه ۱۳۸۱ تا تیرماه ۱۳۸۵ به میزان ۱/۶۳ متر افت سطح آب زیرزمینی را در آبخوای دشت گوهرکوه شاهد هستیم.

- نبود مطابقت هیدروگراف واحد با بارندگی از آذر ۱۳۸۳ تا فروردین ۱۳۸۴ به دلیل افزایش بی‌رویه برداشت از آب زیرزمینی در این دوره زمانی است.

- بیلان آبخوای دشت گوهرکوه در طی دوره بیلان (از اسفند ۱۳۸۱ تا بهمن ۱۳۸۲) منفی است. تغییرات ذخیره آبخوای که بر اساس هیدروگراف واحد دشت محاسبه شده است نیز، ۵/۲ میلیون مترمکعب کاهش نشان می‌دهد.

- در حالت واسنجی پایدار ۰/۵۹٪ Normalized RMS% محاسبه شد. کمترین مقدار هدایت هیدرولیکی بهینه شده برای بخش‌های شمالی آبخوای (۰/۰۰۰۴۴ m/s) و بیشترین مقدار آن برای جنوب آبخوای (۰/۰۰۰۴۸ m/s) محاسبه شد.

- در واسنجی ناپایدار، آبدهی ویژه بهینه شد که از ۰/۱ در بخش‌های خاوری تا ۰/۱۶ در بخش‌های مرکزی در تغییر است.

- بیشترین افت در بخش خاوری آبخوای رخ می‌دهد؛ که دارای ستبرای رسوب کمی است و تراکم چاه‌های بهره‌برداری نیز در منطقه زیاد است.

- تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که مدل بیشترین حساسیت را به تغییر در هدایت هیدرولیکی دارد و میزان تغذیه و تخلیه و ضریب آبدهی ویژه از نظر حساسیت در رده‌های بعدی هستند.

- واکنش آبخوای دشت گوهرکوه نسبت به طرح تغذیه مصنوعی مثبت است. در حالت اول، آب مورد نیاز برای تغذیه مصنوعی از طریق مهار رواناب‌های سطحی و در حالت دوم، آب مورد نیاز از طریق سد در حال ساخت گوهرکوه تأمین می‌شود. اگرچه در حالت دوم، میزان بالا آمدن تراز آب کمتر از حالت اول است، اما اعتماد بیشتری به تأمین آب مورد نیاز تغذیه از طریق سد وجود دارد. به عبارتی حالت اول را می‌توان فقط مربوط به یک سال ترسالی دانست در حالی که حالت دوم در تمامی سال‌ها قابل پیش‌بینی است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه گوهرکوه

تغذیه مصنوعی مانند امکان تأمین آب مورد نیاز برای تغذیه، نفوذپذیری مناسب، ضریب آبدهی ویژه مناسب، داشتن ستبرای غیراشباع کافی، داشتن فاصله مناسب از محل چاه‌های بهره‌برداری، حفظ ژرفای مناسب از سطح ایستابی (بیش از ۷ متر) برای جلوگیری از آلودگی آب زیرزمینی پس از تغذیه مصنوعی، فاصله مناسب از خروجی آب زیرزمینی، فاصله کوتاه‌تر تا محل سدی که در آینده بتواند آب تغذیه‌ای را تأمین نماید و کاربری اراضی از نظر امکان تأمین زمین کافی برای ایجاد حوضچه‌های تغذیه، مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به این عوامل، محل تغذیه مصنوعی تعیین شد. در شکل ۱۳ - ج محل مناسب برای تغذیه مصنوعی نشان داده شده است. در حالی که امکان انتقال آب از سد به منظور تغذیه در نظر گرفته نشود، آب مورد نیاز از راه مهار رواناب‌های سطحی تأمین می‌شود. میزان میانگین ماهیانه آب سطحی محل ساختگاه قابل تأمین و انتقال به محل حوضچه‌های تغذیه در جدول ۶ آورده شده است. بر اساس این جدول سالیانه معادل ۱۴/۳ میلیون مترمکعب از رواناب‌های سطحی می‌توان به آب‌های زیرزمینی تغذیه نمود. با توجه به نبود ایستگاه هیدرومتری در منطقه میزان رواناب سطحی با محاسبه بیلان هیدروکلیماتولوژی در محدوده مطالعاتی گوهرکوه برآورد شده است. اعمال این حالت و تغذیه ۱۴/۳ میلیون مترمکعب آب به سلول‌های تغذیه مصنوعی باعث افزایش در تراز آب زیرزمینی شده است. مقایسه نقشه‌های تراز آبی بهمن ۸۴ (شکل ۱۳- الف) و بهمن ۸۶ (شکل ۱۳- ب) نشان می‌دهد؛ که بیشترین افزایش سطح آب در محل تغذیه رخ داده است. در عین حال این افزایش به گونه‌ای نیست که منجر به تخریب آب زیرزمینی یا افزایش پتانسیل آلودگی در آب‌های زیرزمینی شود. این امر در نقشه هم‌ژرفا و تراز آبی بهمن ۸۶ که در شکل ۱۳-د به نمایش درآمده، مشخص است. شبیه‌سازی با اعمال سناریوی تغذیه مصنوعی نشان داده است که، به طور میانگین از بهمن ۸۴ به بهمن ۸۶ میزان افزایش سطح ایستابی ۱/۱۸ متر محاسبه شده است.

**حالت دوم:** از آنجا که منطقه مورد مطالعه از نظر اقلیمی یک منطقه خشک است، اعتماد کافی برای تأمین آبدهی سطحی ارائه شده در جدول ۶ در تمامی سال‌ها وجود ندارد. بر این اساس مطمئن‌ترین است که آب مورد نیاز تغذیه از طریق سد در حال ساخت تأمین شود. بر این اساس در حالت دوم بدون مهار سیلاب‌های سطحی فرض می‌شود، که سالیانه ۱۴ میلیون مترمکعب آب را بتوان از سد به محل اجرای تغذیه مصنوعی منتقل نمود. در حالت تأمین آب تغذیه از طریق سد، می‌توان مقدار تغذیه را تعیین کرد و در هر دوره تنش حجم خاصی از آب را به آبخوای تغذیه نمود. فرض شده است که ۵٪ از آب انتقالی از سد، در زمان انتقال و تغذیه کاهش یابد. با کم کردن مقدار هدر رفت آب، حجم ورودی به حوضچه‌های تغذیه تعیین شد. در این حالت مقدار مساوی به تمام دوره‌های زمانی نسبت داده شد. شکل ۱۴- الف منحنی‌های تراز آبی بهمن ۸۴ و در شکل ۱۴- ب منحنی‌های تراز آب بهمن ۸۶ را نشان می‌دهد. میانگین افزایش سطح آب از بهمن ۸۴ به بهمن ۸۶، ۱/۱۲ متر است. نتیجه نهایی افزایش تراز آب در این حالت کمتر از حالت بدون در نظر گرفتن سد به دست آمده است. این امر به این دلیل است که آب قابل تأمین از سد کمتر از آب قابل تأمین از رواناب سطحی فرض شده است. با توجه به این که وقوع رواناب سطحی در سال‌های خشک قابل انتظار نیست، نتیجه حالت دوم از اعتماد بالاتری برخوردار است. از طرفی چنانچه میزان آب قابل تأمین از سد افزایش یابد (بیشتر از ۱۴ میلیون مترمکعب در سال)، تغییر تراز آب نیز افزایش خواهد یافت. در شکل ۱۴-د نقشه هم‌ژرفای سطح ایستابی و تراز آبی بهمن ۸۶ نشان داده شده‌اند. در این حالت نیز پس از افزایش تراز آب، سطح ایستابی با فاصله مناسبی از سطح زمین قرار می‌گیرد.

## ۵- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش، به صورت زیر خلاصه می‌شود:

از شمال به جنوب آبخوای رسوبات موجود در دشت درشت دانه‌تر می‌شوند و



جدول ۱- پارامترهای هواشناسی منطقه مورد مطالعه

پارامتر	کمینه	زمان اتفاق	بیشینه	زمان اتفاق	میانگین	زمان اتفاق
بارش سالیانه	۲۸/۹	۱۳۸۴	۵۱۳/۱	۱۳۷۴	۱۴۴/۳	۱۳۶۵-۸۶
دمای سالیانه	۱۸/۸	۱۳۷۵	۲۰/۹	۱۳۸۱	۱۹/۹	۱۳۶۵-۸۶
تبخیر از تشکک	۹۳/۴	۱۳۷۶	۱۲۲	۱۳۸۳	۱۱۱/۵	۱۳۶۵-۸۶

جدول ۲- نتایج محاسبات بیلان آبی آبخوان دشت گوهرکوه (سال آبی ۸۲-۱۳۸۱)

پارامترهای بیلان	تغذیه (میلیون متر مکعب)	تخلیه (میلیون متر مکعب)
جریان ورودی آب زیرزمینی	۳۳/۱	-
ورودی از طریق نزولات جوی و برگشت آب مصرفی	۹/۲۲	-
نفوذ از طریق جریان‌های سطحی	X	-
جریان خروجی آب زیرزمینی	-	۱۴/۰
تخلیه از طریق چاه‌ها و قنات	-	۳۴/۶
تبخیر از آبخوان	-	۰
مجموع	۴۲/۳۱	۴۸/۶
تغییرات حجم مخزن	-۶/۳	

جدول ۳- پارامترهای مورد استفاده در مدل

پارامتر	کمینه	بیشینه	واحد
هدایت هیدرولیکی اولیه	۴۰	۴۳/۲	متر بر روز
ضریب ذخیره	۰/۱۲	۰/۱۷	درصد
ارتفاع سطح آبخوان	۱۳۵۰	۱۴۳۰	متر
ارتفاع سنگ کف	۱۲۹۰	۱۳۳۰	متر

جدول ۴- خطاهای محاسباتی در طی ۱۲ دوره تنش در واسنجی ناپایدار

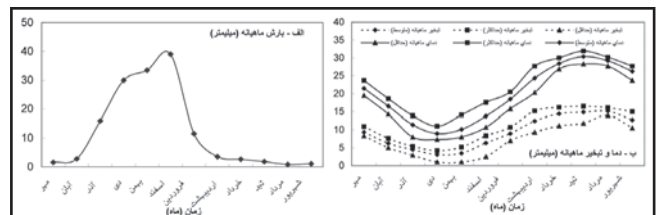
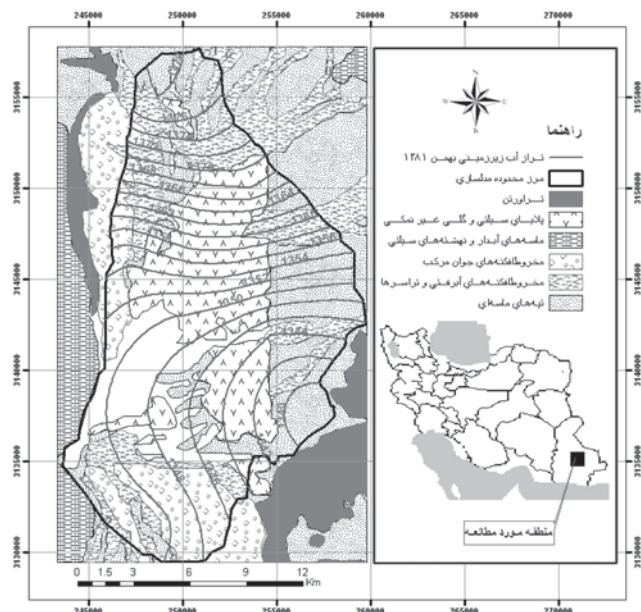
دوره	مرداد ۸۲	تیر ۸۲	خرداد ۸۲	اردیبهشت ۸۲	فروردین ۸۲	اسفند ۸۱
درصد خطای محاسباتی	۰/۲۹۹	۰/۵۴۹	۰/۵۰۵	۰/۵۷۸	۰/۶۴۲	۰/۵۴۵
دوره <th>بهمن ۸۲</th> <th>دی ۸۲</th> <th>آذر ۸۲</th> <th>آبان ۸۲</th> <th>مهر ۸۲</th> <th>شهریور ۸۲</th>	بهمن ۸۲	دی ۸۲	آذر ۸۲	آبان ۸۲	مهر ۸۲	شهریور ۸۲
درصد خطای محاسباتی	۰/۴۹۳	۰/۴۱۳	۰/۵۱۳	۰/۳۵۸	۰/۵۲۰	۰/۷۰۷

جدول ۵- خطاهای محاسباتی در طی ۱۲ دوره تنش در حالت صحت‌سنجی

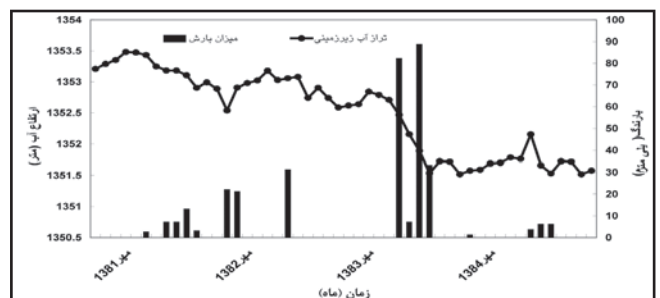
دوره	مرداد ۸۳	تیر ۸۳	خرداد ۸۳	اردیبهشت ۸۳	فروردین ۸۳	اسفند ۸۲
درصد خطای محاسباتی	۰/۶۰۱	۰/۵۴۶	۰/۵۱۸	۰/۵۷۶	۰/۶۶۸	۰/۵۶۹
دوره <th>بهمن ۸۳</th> <th>دی ۸۳</th> <th>آذر ۸۳</th> <th>آبان ۸۳</th> <th>مهر ۸۳</th> <th>شهریور ۸۳</th>	بهمن ۸۳	دی ۸۳	آذر ۸۳	آبان ۸۳	مهر ۸۳	شهریور ۸۳
درصد خطای محاسباتی	۰/۵۴۵	۰/۵۳۱	۰/۵۳۱	۰/۵۹۲	۰/۵۶۳	۰/۵۶۸

جدول ۶- میانگین آبدهی ماهانه (مترمکعب بر ثانیه) محل پیشنهادی طرح تغذیه مصنوعی در دشت گوهرکوه

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
آبدهی	۰/۰۱۶	۰/۰۱۲	۰/۷۴۳	۱/۶۰۴	۱/۲۶۹	۱/۴۳۳	۰/۲۳۹	۰/۰۰۵	۰/۰۴۴	۰/۰۳۳	۰/۰۲۸	۰/۰

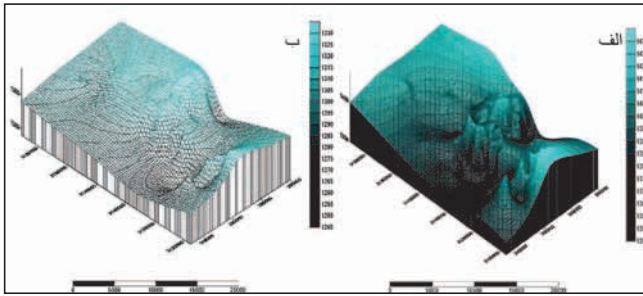


شکل ۲- نوسانات ماهیانه پارامترهای هواشناسی حوضه آبریز گوهرکوه

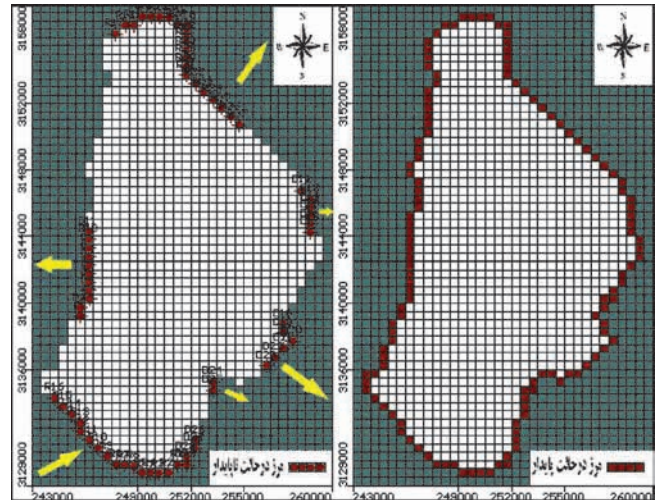


شکل ۳- خطوط تراز آب زیرزمینی نشان‌دهنده جهت جریان آب زیرزمینی

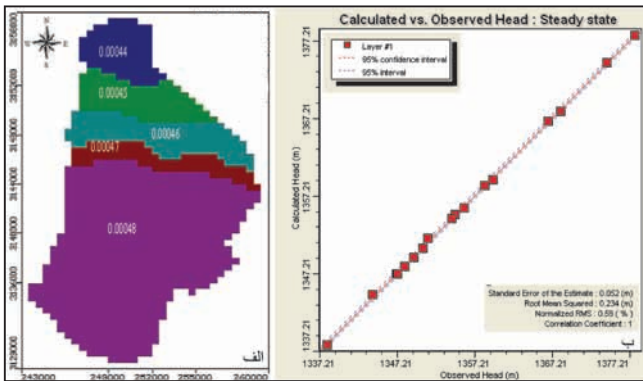
شکل ۴- هیدروگراف اولیاد دشت گوهرکوه



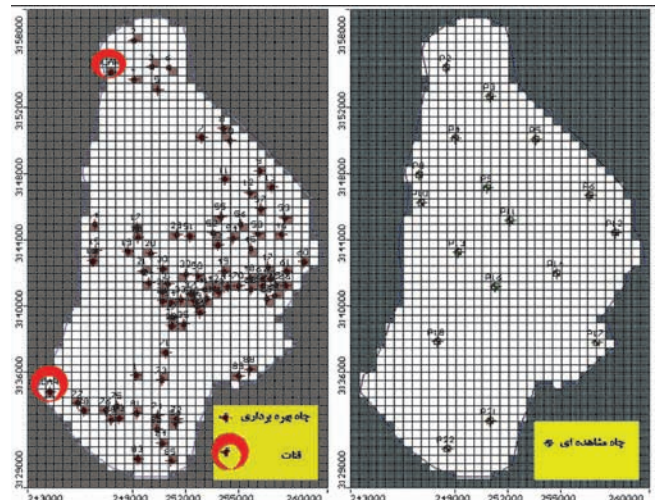
شکل ۶- الف) توپوگرافی سطح آبخوان و ب) توپوگرافی سنگ کف



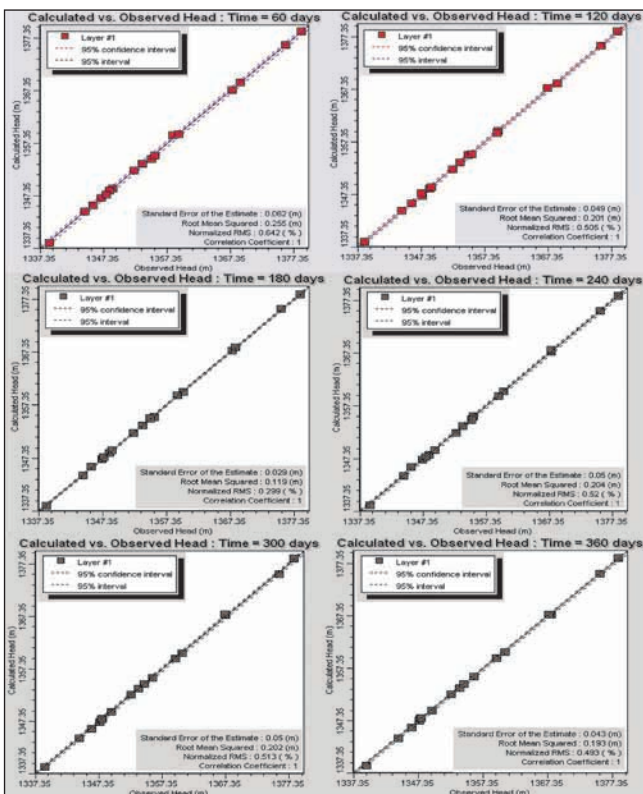
شکل ۵- مرزهای مدل



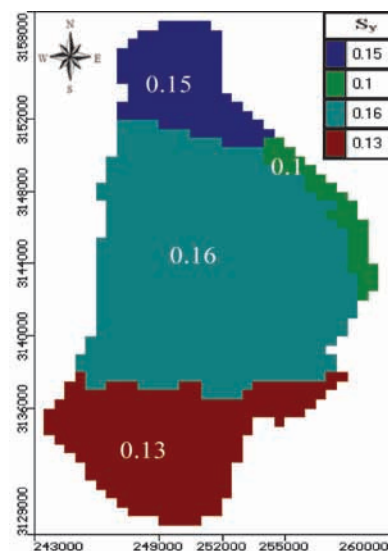
شکل ۸- الف) نقشه هدایت هیدرولیکی بهینه شده (بر حسب متر بر ثانیه) مقایسه تراز مشاهداتی و محاسباتی



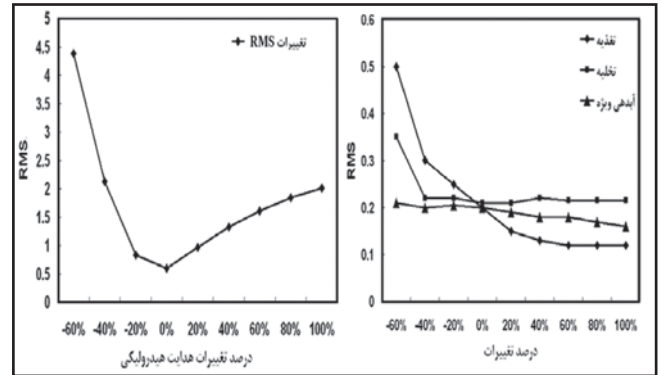
شکل ۷- موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای، چاه‌های بهره‌برداری و قنات در محیط مدل



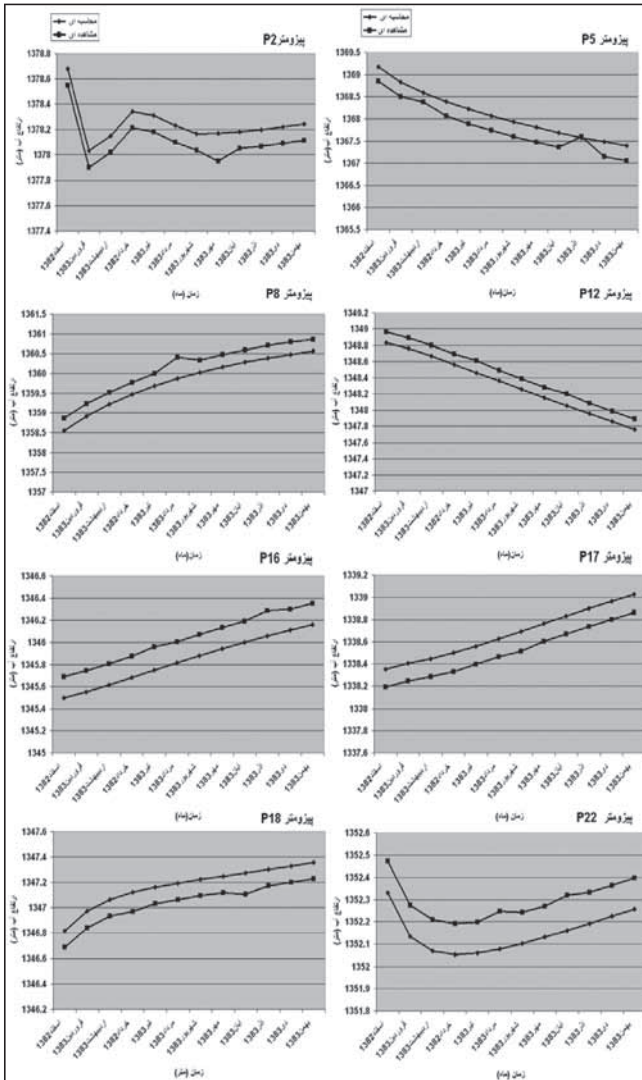
شکل ۱۰- مقایسه ترازهای محاسباتی و مشاهداتی طی دوره‌های ۶۰ روزه از واسنجی در حالت ناپایدار



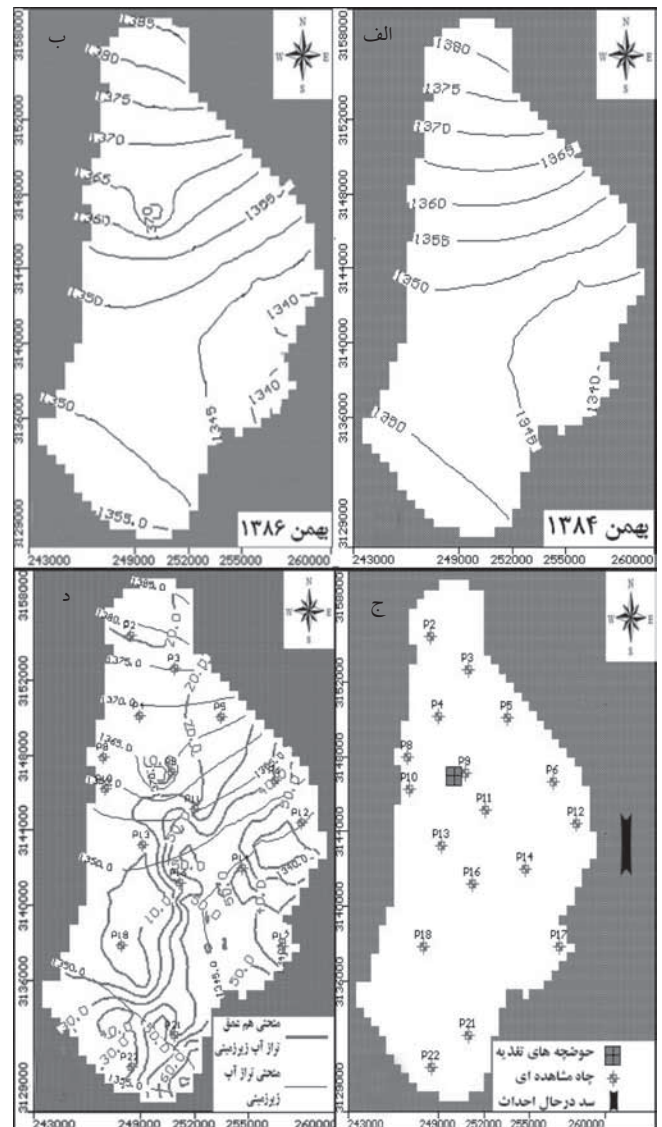
شکل ۱۱- نقشه آبدهی ویژه بهینه شده



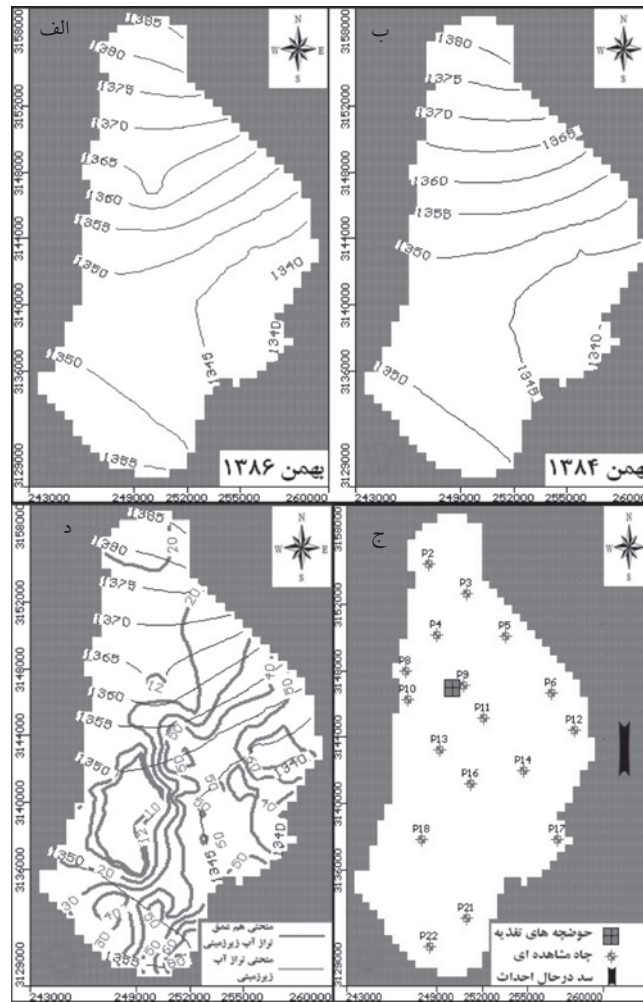
شکل ۱۱- میزان حساسیت مدل نسبت به پارامترهای مختلف



شکل ۱۲- مقایسه تراز مشاهداتی و محاسباتی در چاه‌های مشاهده‌ای



شکل ۱۳- الف) منحنی تراز بهمین ۸۴ ب) منحنی تراز بهمین ۸۶ در حالت تغذیه مصنوعی به آبخوان ج) محل حوضچه‌های تغذیه، سد در حال ساخت و چاه‌های مشاهده‌ای د) نقشه هم‌زرفا و تراز آبی بهمین ۸۶ در حالت تغذیه مصنوعی به آبخوان بدون فرض تأمین آب از سد



شکل ۱۴- الف) منحنی‌های تراز بهمن ۸۴ ب) منحنی‌های تراز بهمن ۸۶ در حالت تغذیه مصنوعی ج) محل حوضچه‌های تغذیه، سد در حال ساخت و چاه‌های مشاهده‌ای (د) نقشه هم‌ارتفاع و تراز آبی بهمن ۸۶ در حالت تغذیه مصنوعی به آبخوان با فرض تأمین آب تغذیه از سد

### کتاب‌نگاری

- اصلائی، ح.، ۱۳۸۲- شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی دشت لادیز، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- خوشنامی، م.، ۱۳۷۲- کاربرد روش شبیه‌سازی در مدیریت منابع آب دشت خفر با تأکید بر بهره‌برداری تلفیقی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز.
- دهقان‌قهرخی، ا.، ۱۳۸۲- کاربرد مدل ریاضی آب‌های زیرزمینی در مدیریت آبخوان دشت شهرکرد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- رشیدی، م.، ۱۳۸۵- تهیه مدل آبخوان دشت سرچاهان شرقی و بررسی اثر طرح تغذیه مصنوعی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- شرکت سهامی آب منطقه‌ای سیستان و بلوچستان، ۱۳۸۳- گزارش مطالعات آب زیرزمینی دشت گوهرکوه.
- شرکت سهامی آب منطقه‌ای سیستان و بلوچستان، ۱۳۸۳- مطالعات تکمیلی مرحله اول و دوم سد گوهرکوه (گزارش هواشناسی).
- شرکت سهامی آب منطقه‌ای سیستان و بلوچستان، ۱۳۸۲- مطالعات آماربرداری از منابع آب استان.
- شفیعی مطلق، خ.، ۱۳۸۴- کاربرد مدل ریاضی آب‌های زیرزمینی در مدیریت آبخوان دشت حصاروئیه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- کاظمی‌گیلان، ر.، ۱۳۸۱- ارزیابی هیدروژئولوژیکی و مدیریت آبخوان قوچان- شیروان با استفاده از مدل عددی Modflow 2000، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز.

### References

- Boonstra, J., de Ridder, N. A., 1981- Numerical modeling of Ground Water basins userOriented manual, International Institute Foreland Reclamation and Improvement/ ILRI P.O.Box 45,67000 AA Wageningen, The Netherlands.
- Doherty, G., 2001- QuantitativeHydrogeology, Academic Press.Inc, Orlando, Florida.
- Hoaglund, T. N., 2002- Artificial water recarge,Pitman Advanced Publishing Program.
- Kinzelbach, W., 1986- Groud water modeling:An introduction with sample programes in BASIC Developments in water Science, Elsevier.