



Impact of CO₂ Gas Leakage on Anomalous Groundwater Level Fluctuation in Northern Aquifers of Hamadan Province

B. Delkhahi¹, H.R. Nassery^{2*}, and Farshad Alijani³

Abstract

There are a number of aquifers in the northern half of Hamadan province that, deepening of water wells into the bedrock resulted in CO₂ leakage into the aquifers. Groundwater level data near gas charged water wells indicating abnormal behavior in groundwater level fluctuation. Comparison of observation well hydrographs, variance inflation factor and field evidence in the gas charged and background areas shows that the observed abnormal behavior in water level fluctuation is not influenced by rainfall and groundwater pumpage variables. Due to high pH buffering capacity in the aquifers and decrease of P_{CO2} correlation with pH and TDS in the gas charged waters compared to the background ones, the main factor for increasing salinity in the gas charged waters is the intrusion of deep saline water with gas into the aquifers. In fact, the deepening of the wells into the bedrock, by lowering hydrostatic pressure, causes gas-rich saline water to enter the aquifer. As wells begin pumping during the irrigation season, the aquifer recharge rate by saline water exceeds the discharge rate of the wells, resulting in elevation of groundwater levels around the gas charged wells.

Keywords: CO₂ Gas Leakage, Abnormal Groundwater Level Fluctuation, Saline Water Intrusion, Hydrostatic Pressure.

Received: October 15, 2019

Accepted: December 16, 2019

تأثیر نشت گاز دی اکسید کربن بر نوسان غیرعادی سطح آب زیرزمینی در آبخوان‌های شمال استان همدان

بهزاد دلخواهی^۱، حمیدرضا نصری^{۲*} و فرشاد علیجانی^۳

چکیده

در تعدادی از آبخوان‌های نیمه شمالی استان همدان کف شکنی چاه‌های بهره‌برداری در داخل سنگ کف، منجر به نشت گاز دی اکسید کربن به داخل آبخوان شده است. بررسی داده‌های سطح آب زیرزمینی در نزدیکی چاه‌های گازدار، بیانگر وجود رفتار غیرعادی در نوسان سطح آب زیرزمینی می‌باشد. مقایسه هیدروگراف چاه‌های مشاهده‌ای، شاخص تورم وارپانس و شواهد صحرایی در مناطق گازدار با مناطق فاقد گاز نشان می‌دهد که رفتار غیرعادی مشاهده شده در نوسان سطح آب، تحت تأثیر متغیرهای بارش و برداشت از آبخوان نمی‌باشد. با توجه به ظرفیت خنثی‌کنندگی بالای pH در آبخوان‌ها و کاهش همبستگی P_{CO2} با pH و TDS در آب‌های گازدار نسبت به آب‌های فاقد گاز، عامل اصلی افزایش شوری در آب‌های گازدار، نفوذ آب شور عمیق همراه با گاز به داخل آبخوان می‌باشد. در واقع کف‌شکنی چاه‌های بهره‌برداری در داخل سنگ کف، از طریق کاهش فشار هیدرواستاتیک، سبب ورود آب شور گازدار به داخل آبخوان می‌شود. با شروع بهره‌برداری از چاه‌ها در فصل آبیاری، میزان تغذیه آبخوان توسط آب شور بر میزان تخلیه آن توسط چاه‌ها پیشی گرفته و در نتیجه سطح آب زیرزمینی در اطراف چاه‌های گازدار بالا می‌آید.

کلمات کلیدی: نشت گاز دی اکسید کربن، نوسان غیر عادی سطح آب زیرزمینی، نفوذ آب شور، فشار هیدرواستاتیک.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۷/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۹/۲۵

1- Ph.D. Student in Hydrogeology, Department of Minerals and Groundwater Resources, School of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2- Professor, Department of Minerals and Groundwater Resources, School of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Email: h-nassery@sbu.ac.ir

3- Assistant Professor, Department of Minerals and Groundwater Resources, School of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی.

۲- استاد گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی.

۳- استادیار گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

مخزن زیرزمینی (عمدتاً آبخوان‌های عمیق محتوی آب شور یا مخازن نفت و گاز تخلیه شده)، فشار هیدرواستاتیک در داخل مخزن افزایش می‌یابد که در صورت وجود گسل، چاه‌های عمیق و لایه‌های محبوس کننده نیمه تراوا، این افزایش فشار می‌تواند سبب انتقال آب شور و CO_2 محلول در آن به آبخوان‌های بالایی محتوی آب شیرین شود. در صورت نشست گاز CO_2 و آب شور به داخل آبخوان‌های بالایی، علاوه بر کیفیت آب زیرزمینی، به دلیل تغییر فشار در داخل آبخوان، سیستم جریان به ویژه سطح آب زیرزمینی نیز تحت تاثیر قرار خواهد گرفت. بسته به میزان گاز تزریق شده به داخل مخزن، ویژگی‌های هیدرولیکی مخزن و لایه محبوس کننده (پوش سنگ)، مکانیسم نشست گاز به داخل آبخوان و فاصله آبخوان بالایی تا مخزن ذخیره گاز، سطح آب زیرزمینی در آبخوان می‌تواند بین چند میلیمتر تا چند ده متر بالا بیاید (Cavanagh and Wildgust, 2011; Birkholzer et al., 2011; Nicot, 2008; Mi et al., 2019).

در این پژوهش برای اولین بار تأثیر نشست گاز CO_2 با منشأ طبیعی بر نوسان سطح آب زیرزمینی بررسی شده است. ضمن اینکه بر خلاف مطالعات بین‌المللی انجام شده که صرفاً بر نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل‌های عددی استوار می‌باشند؛ مبنای اصلی این پژوهش، مشاهده نوسان واقعی سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای مجاور چاه‌های گازدار می‌باشد. همچنین تا کنون مطالعاتی در خصوص تأثیر نشست گاز CO_2 به داخل آبخوان بر کیفیت آب زیرزمینی در سطح کشور انجام شده است (Amiri et al., 2009; Barati, 2014; Sotodeh et al., 2011; Raei, 2012). در این پژوهش برای اولین بار در سطح کشور، تأثیر پدیده نشست گاز CO_2 به داخل آبخوان بر نوسان سطح آب زیرزمینی معرفی و مورد بررسی قرار گرفته است. در تعدادی از آبخوان‌های نیمه شمالی استان همدان از جمله آبخوان‌های چهاردولی، همدان- بهار، رزن- قهاوند و کمیجان کف شکنی و ادامه حفاری چاه‌های بهره‌برداری در داخل سنگ کف شیستی و مارنی، منجر به نشست گاز دی اکسید کربن با منشأ درونی به داخل آبخوان شده است (Delkhahi et al., In press; Amiri et al., 2009; Barati, 2014). این پدیده علاوه بر افزایش شوری و تغییر رنگ و مزه آب زیرزمینی، سبب خوردگی پمپ و تاسیسات چاه‌های بهره‌برداری، صدمه به محصولات کشاورزی و کاهش راندمان آنها و حتی بروز تلفات انسانی و حیوانی شده است (Delkhahi et al., In press). همچنین بررسی داده‌های سطح آب زیرزمینی در تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای واقع در نزدیکی چاه‌های گازدار در سه آبخوان همدان- بهار، رزن- قهاوند و چهاردولی، بیانگر وجود ناهنجاری و رفتار غیرعادی در نوسان فصلی سطح آب زیرزمینی می‌باشد. بطوری که در طول فصل آبیاری و با به حداقل رسیدن بارش در اواخر بهار و در طول

نوسان سطح آب زیرزمینی در یک آبخوان منعکس کننده تعادل دینامیک بین تغذیه، ذخیره و تخلیه آب زیرزمینی می‌باشد. اگر تغذیه در آبخوان بیشتر از تخلیه شود، حجم آب ذخیره شده در آبخوان افزایش می‌یابد و سطح آب زیرزمینی بالا خواهد آمد. بالعکس، اگر تخلیه از تغذیه پیشی بگیرد، ذخیره آبخوان کاهش و سطح آب زیرزمینی پایین می‌آید. با توجه به اینکه توزیع تغذیه و تخلیه در یک آبخوان به لحاظ مکانی و زمانی یکنواخت نیست، لذا سطح آب زیرزمینی بطور پیوسته در نوسان می‌باشد تا تعادل بین تغذیه، تخلیه و ذخیره آبخوان برقرار شود (Conlon et al., 2005). بنابراین هر عاملی که بتواند سبب تغییر در ذخیره آبخوان شود (از طریق تغییر در تغذیه و تخلیه)، می‌تواند باعث نوسان در سطح آب زیرزمینی شود. از طرف دیگر، اگر چاهی در داخل آبخوان حفر نشده باشد، فشار آب در داخل آبخوان با فشار اتمسفر در تعادل می‌باشد. با حفر چاه و بهره‌برداری از آب زیرزمینی، فشار آب داخل آبخوان نسبت به فشار اتمسفر کاهش می‌یابد که به منظور ایجاد تعادل جدید، سطح آب زیرزمینی پایین می‌آید. بنابراین هر پدیده‌ای که سبب تغییر فشار در داخل یک آبخوان شود، باعث تغییر در سطح آب زیرزمینی خواهد شد (Weider, 2014).

عوامل مؤثر بر نوسان سطح آب زیرزمینی به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند. گروه اول شامل عوامل طبیعی مانند باران، تبخیر و ترقق، نفوذ از رودخانه و دریاچه، باد، جزر و مد، تغییر فشار اتمسفر، زمین‌لرزه و نیروی جاذبه ماه می‌باشند. دامنه نوسان سطح آب زیرزمینی ناشی از عوامل طبیعی معمولاً کمتر از یک متر می‌باشد. گروه دوم عوامل بشرزاد مانند بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، بارهای خارجی وارد بر آبخوان (مانند عبور قطار و وسایل نقلیه سنگین)، آزمایش‌های هسته‌ای و ذخیره گاز دی‌اکسید کربن (CO_2) تولید شده از فعالیت‌های صنعتی در داخل لایه‌های عمیق زمین^۱ (CCS) می‌باشند. برخلاف عوامل طبیعی، عوامل بشرزاد سبب نوسان سطح آب زیرزمینی گاهی به میزان چندین ده متر می‌شوند (Opatz and Dinicola, 2018; Vongphachanh et al., 2017; Abiye et al., 2018; Nicot, 2008; Khalaj et al., 2019; Bayat-Varkeshi and Gheysari, 2018). تاکنون مطالعات متعددی در خصوص تأثیر اجرای پروژه‌های CCS بر نوسان سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌سازی عددی جریان-انتقال تک و چند فازی انجام شده است (Nicot et al., 2009; Birkholzer et al., 2009; Leetaru et al., 2009; Zhou et al., 2010; Szabo et al., 2018; Yamamoto et al., 2009; Person et al., 2010; Smith et al., 2010; Yihdego et al., 2017; Tian, 2016). نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهد بر اثر تزریق گاز CO_2 به داخل

تابستان، برخلاف روند معمول، سطح آب زیرزمینی روند صعودی دارد. در حالی که پس از پایان فصل آبیاری و در طول فصل بارندگی، سطح آب روند نزولی پیدا می‌کند و در اواخر زمستان تا اواسط بهار به پایین‌ترین مقدار خود می‌رسد. با توجه به اینکه تاکنون چنین پدیده‌ای در کشور مورد بررسی قرار نگرفته است، هدف اصلی در این مطالعه، بررسی علت رفتار غیرعادی مشاهده شده در نوسان سطح آب زیرزمینی و ارتباط آن با پدیده نشت گاز در آبخوان‌های مورد مطالعه، می‌باشد. به همین منظور، علاوه بر بررسی شرایط محل چاه‌های مشاهده‌ای در طی بازدید صحرایی، از سه روش هیدروگراف، شاخص تورم واریانس و کیفیت شیمیایی آب استفاده شده است. ضمن اینکه، به منظور مقایسه با نوسان عادی سطح آب زیرزمینی، از اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای در مناطق فاقد گاز نیز استفاده شده است.

کمیجان و چهاردولی واقع شده است. از نظر زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در بخش شمالی کمر بند تکتونیکی و دگرگونی سندج-سیرجان قرار دارد (Shakerardakaniet al., 2015). به همین دلیل، بخش وسیعی از منطقه مورد مطالعه را سنگ‌های حاصل از دگرگونی ناحیه‌ای (شیست همدان) و حرارتی (شیست لکه دار، هورنفلس، مرمر، اسکارن و میگماتیت) می‌پوشانند (شکل ۱). با توجه به فعال بودن منطقه به لحاظ تکتونیکی، سیستم گسل‌ها و درز و شکستگی منطقه می‌توانند نقش مؤثری در تغذیه آبخوان‌های آهکی و سازند سخت و احتمالاً انتقال سیالات با منشاء عمیق (ناشی از فعالیت‌های ماگمایی و گرمایی) به نواحی کم عمق و سطح زمین ایفا کنند.

سنگ‌های آهکی تبلور مجدد یافته، مرمرهای دولومیتی شده و انواع شیست‌ها با سن تریاس-ژوراسیک، قدیمی‌ترین سازندهای زمین‌شناسی دارای رخنمون در منطقه می‌باشند. همچنین توده‌های آذرین نفوذی مانند باتولیت الوند (فاز کوهزایی کرتاسه-پالئوسن)، سنگ‌های آهکی ضخیم لایه کرتاسه، سنگ‌های آهکی-مارنی سازند قم (الیگو-میوسن) و تراورتن‌ها از جمله سایر سازندهای زمین‌شناسی مهم در منطقه می‌باشند.

۲- روش تحقیق

۲-۱- زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی

منطقه مورد مطالعه با وسعت حدود ۶۲۰۰ کیلومتر مربع در نیمه شمالی استان همدان و محدوده‌های مطالعاتی همدان-بهار، رزن-قهاوند،

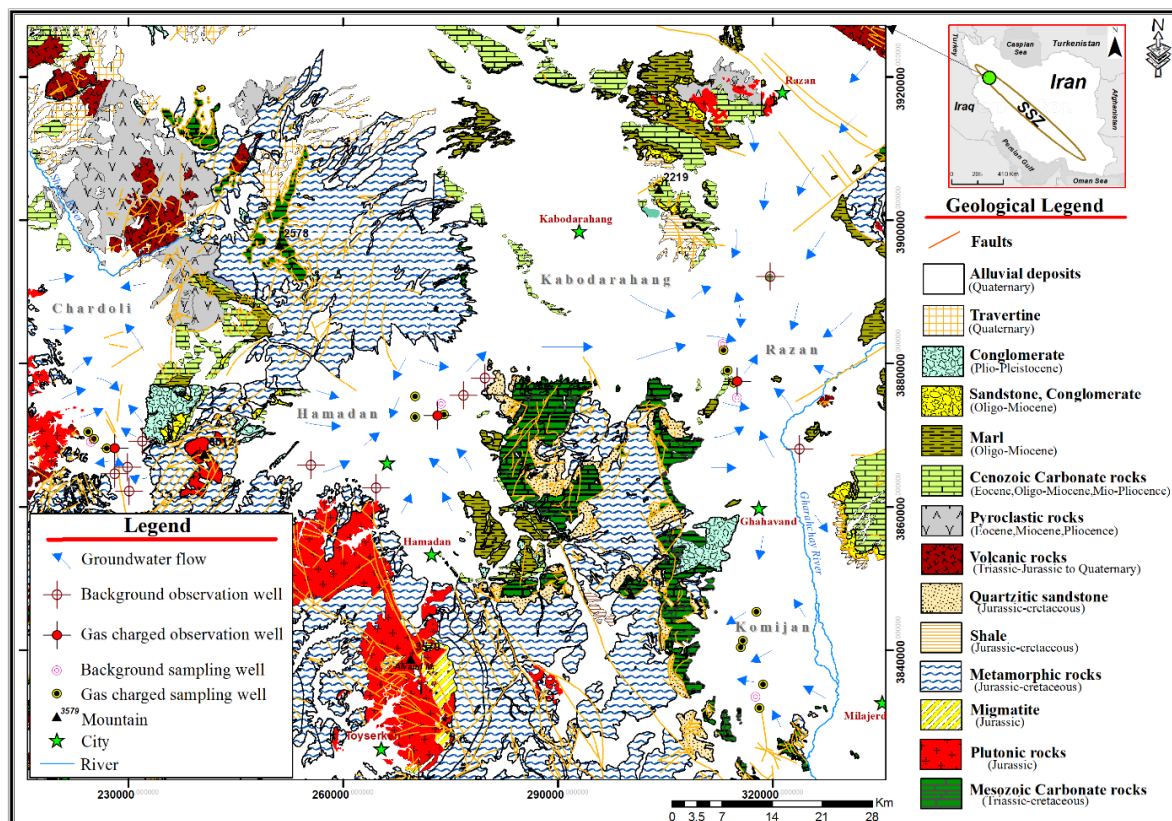


Fig. 1- Geology and groundwater flow direction in the study area

شکل ۱- زمین‌شناسی و جهت جریان آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه

موجود در نزدیکی چاه‌های گازدار، در سه آبخوان همدان- بهار، رزن- قهقوند و چهاردولی مورد بررسی قرار گرفت. براین اساس، سه چاه مشاهده‌ای که دارای رفتار متفاوتی نسبت به بقیه چاه‌ها بودند؛ جهت بررسی در این مطالعه انتخاب شدند که شامل دو چاه مشاهده‌ای در آبخوان‌های آبرفتی چهاردولی و همدان- بهار و یک چاه مشاهده‌ای در آبخوان آهکی رزن- قهقوند می‌باشند (شکل ۱). روند نوسان سالانه سطح آب زیرزمینی در این سه چاه مشاهده‌ای کاملاً برعکس سایر چاه‌های مشاهده‌ای در آبخوان‌های مذکور می‌باشد. همچنین به منظور مقایسه نوسان سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای فوق‌الذکر با نوسان معمول سطح آب زیرزمینی، از داده‌های ۱۰ حلقه چاه مشاهده‌ای در سه آبخوان مورد مطالعه نیز استفاده شده است. در جدول ۱ مشخصات چاه‌های مشاهده‌ای مورد مطالعه ارائه شده است. از میان سه حلقه چاه مشاهده‌ای واقع در مناطق گازدار، چاه‌های GC-CW1 و GC-HW1 به ترتیب در آبخوان‌های آبرفتی چهاردولی و همدان- بهار و چاه مشاهده‌ای GC-RW1 در آبخوان آهکی سازند قم (الیگومیوسن)، در دشت رزن- قهقوند و در مجاورت فروچاله‌ها و عوارض کارستی مربوط به این سازند (روستای همه کسی) واقع شده اند. همچنین چاه‌های مشاهده‌ای GC-HW1، GC-RW1 و GC-CW1 به ترتیب در فاصله‌های ۲۱۳، ۵۰۶ و ۱۰۸۰ متر نسبت به چاه‌های گازدار قرار دارند (جدول ۱).

۲-۳- نمونه برداری و آنالیز

به منظور شناخت کیفیت آب‌های گازدار و بررسی ارتباط آن با نوسان سطح آب زیرزمینی، از آب تعداد ۱۴ حلقه چاه بهره‌برداری گازدار و ۵ حلقه چاه فاقد گاز، در مهر ماه ۱۳۹۷ نمونه برداری شد. موقعیت نمونه‌های برداشت شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه عمدتاً از طریق حفر چاه در آبخوان‌های آبرفتی و آهکی (سازند قم) صورت می‌گیرد. عمق چاه‌های حفر شده در سه آبخوان آبرفتی مورد مطالعه بین کمتر از ۵۰ متر تا بیش از ۲۵۰ متر می‌باشد. سنگ کف آبخوان‌های آبرفتی در دشت چهاردولی و بخش‌های وسیعی از دشت همدان از نوع شیست‌های تیره با سن ژوراسیک می‌باشد، ولی در بخش‌های شرقی منطقه مورد مطالعه (دشت رزن- قهقوند)، سنگ‌های آهکی کرتاسه و سنگ‌های آهکی- مارنی الیگو- میوسن، سنگ کف آبخوان‌های آبرفتی را تشکیل می‌دهند. آبدهی چاه‌های بهره‌برداری در آبخوان‌های آبرفتی بین کمتر از ۵/۰ لیتر در ثانیه تا بیش از ۷۰ لیتر در ثانیه متغیر است. در بخش‌هایی از دشت رزن- قهقوند، چاه‌هایی که به سنگ کف آهکی برخورد کرده‌اند از آبدهی بیشتری برخوردار می‌باشند. سنگ‌های آهکی الیگو- میوسن (سازند قم) به واسطه توسعه درز و شکستگی‌های فراوان، از نفوذپذیری بالایی برخوردار هستند و هر جا که از درصد ناخالصی‌های مارنی کاسته شده است، شرایط لازم جهت تشکیل آبخوان کارستی بوجود آمده است (حوالی روستای همه کسی در دشت رزن). به جز اطراف روستای همه کسی در گستره رزن- قهقوند که عوارض مشخصه مناطق کارستی به وضوح قابل مشاهده است؛ در اکثر نواحی مورد بررسی، کارست ایجاد شده از نوع کارست مدفون^۲ بوده که توسط ضخامت قابل توجه‌ای از رسوبات آبرفتی پوشانده شده است (Hamadan Regional Water Authority, 2015). در شکل ۱ جهت عمومی جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های آبرفتی مورد مطالعه نشان داده شده است.

۲-۲- مشخصات چاه‌های مشاهده‌ای

به منظور انجام این مطالعه، داده‌های سری زمانی ۱۰ ساله (سال‌های ۸۷-۸۶ تا ۹۷-۹۶) سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای

Table 1- Characteristics of the observation wells in the study area

جدول ۱- مشخصات چاه‌های مشاهده‌ای در منطقه مورد مطالعه

Aquifer name	Aquifer type	Well name	Field code	UTMx	UTMy	Depth (m)	Drilling year	² IDGW (m)	Distance (m)
Chardoli	Alluvial	Qouchtapeh	¹ GC-CW1	228083	3868188	54	1382	11.0	³ 1080
Chardoli	Alluvial	Siakamar	BG-CW1	228075	3864585	42.5	1382	2.8	-
Chardoli	Alluvial	Dobraleh	BG-CW2	229842	3865548	280	1383	48.0	-
Chardoli	Alluvial	Pirmaloo	BG-CW3	231899	3869177	78	1382	35.0	-
Chardoli	Alluvial	Seimaran	BG-CW4	230105	3862195	42	1382	1.6	-
Hamadan-Bahar	Alluvial	Dahangerd	GC-HW1	273156	3872730	30	1369	4.6	213
Hamadan-Bahar	Alluvial	Jadeh Kermanshah	BG-HW1	264564	3862659	30	1378	20.7	-
Hamadan-Bahar	Alluvial	Latgah	BG-HW2	276806	3875548	30	1369	5.0	-
Hamadan-Bahar	Alluvial	Hosseinaab	BG-HW3	279785	3877956	30	1366	5.4	-
Hamadan-Bahar	Alluvial	Abroumand	BG-HW4	255487	3865818	30	1369	4.9	-
Razan-Ghahavand	Limestone	Hamekasi	GC-RW1	315009	3877513	35	1368	8.5	506
Razan-Ghahavand	Limestone	Haji abad	BG-RW1	319629	3892131	79.5	1381	46.8	-
Razan-Ghahavand	Limestone	Ahmad abad	BG-RW2	323677	3868030	38	1383	17.5	-

¹ Background (BG) and Gas charged (GC) observation wells

² Initial depth to groundwater

³ Distance from gas charged water wells

برای نمونه برداری آب از بطری‌های پلی اتیلنی ۵۰ میلی لیتری استفاده شد. از محل هر چاه انتخابی، دو نمونه آب شامل یک نمونه برای آنالیز آنیون‌ها و دیگری برای کاتیون‌ها جمع‌آوری شد. نمونه‌های مربوط به هر دو بطری، با استفاده از فیلتر سرسنگی ۰/۴۵ میکرون، فیلتر شدند و به نمونه‌های آب مربوط به کاتیون‌ها، به منظور تثبیت غلظت یون‌ها، اسید نیتریک (HNO₃) اضافه شد. همچنین از بطری‌های پلی اتیلنی یک لیتری برای نمونه برداری جهت آنالیز یون‌های کربنات (CO₃²⁻) و بی کربنات (HCO₃⁻) محلول در آب زیرزمینی استفاده شد. نمونه‌ها قبل از انجام آنالیز در دمای کمتر از چهار درجه سانتیگراد نگهداری شدند. علاوه بر جمع‌آوری نمونه‌های آب، pH و کل مواد جامد محلول (TDS) نیز در محل هر چاه اندازه‌گیری شد. همچنین به منظور شناخت ترکیب کانی شناسی مواد تشکیل دهنده آبخوان، تعداد ۴۰ نمونه رسوب از عمق‌های مختلف چاه‌های در حال حفر، در سه آبخوان مورد نظر جمع‌آوری شد. TDS و pH با استفاده از دستگاه چند پارامتر قابل حمل شرکت WTW مدل ۳۳۲۰ در محل نمونه برداری اندازه‌گیری شد. آنالیز کاتیون‌ها و آنیون‌ها به ترتیب با استفاده از دستگاه‌های ICP-OES و IC در آزمایشگاه‌های موسسه ارزیابی زیست محیطی و تحقیقات آب و موسسه تحقیقات آب کاتالان واقع در شهر بارسلونا، کشور اسپانیا، انجام شد. آنیون‌های CO₃²⁻ و HCO₃⁻ در همان روز نمونه برداری، در آزمایشگاه شرکت آب منطقه‌ای همدان و با روش تیتراسیون با اسید HNO₃ ۰/۰۱ نرمال آنالیز شد. به منظور محاسبه فشار جزیی دی اکسید کربن از نرم‌افزار PHREEQC استفاده شده است (Parkhurst and Appelo, 1999). نمونه‌های رسوب در آزمایشگاه XRD سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران و با استفاده از دستگاه Inel مدل EQUINOX3000 مورد آنالیز قرار گرفتند. همچنین، به منظور اندازه‌گیری میزان گاز خروجی از داخل چاه‌های گازدار، از لوله تشخیص گاز CO₂⁴ متصل به پمپ نمونه برداری گاز، ساخت شرکت GASTEC مدل GV-100 استفاده شد.

۲-۴- شاخص تورم واریانس

در روش آماری از تکنیک‌های مبتنی بر سنجش وابستگی، همچون تورمواریانس^۵ استفاده می‌شود که اقدام به شناسایی متغیرهای ورودی ناهمبسته مستقل میکند (Riahi Modavar et al., 2017). در این پژوهش از روش آماری تورم واریانس به منظور انتخاب متغیرهای مؤثر بر نوسان تراز سطح آب زیرزمینی استفاده شده است. با توجه به عمق آب زیرزمینی، موقعیت جغرافیایی چاه‌های مشاهده‌ای و داده‌های موجود، از میان متغیرهای مؤثر بر نوسان سطح آب زیرزمینی، متغیرهای میزان بارندگی (P)، میزان آبدی رودخانه (R)، میزان

برداشت از چاه بهره‌برداری (Q) و میزان تغذیه جانبی (Rt) به منظور مشخص کردن نقش آنها در رفتار غیرعادی نوسان سطح آب در سه حلقه چاه مشاهده‌ای مورد نظر، مورد تجزیه و تحلیل تورم واریانس قرار گرفتند. شاخص تورم واریانس طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$VIF = \frac{1}{1-R^2} \quad (1)$$

در این رابطه، VIF شاخص تورم واریانس و R ضریب تعیین مدلی است که در آن متغیر مستقل روی سایر متغیرهای دیگر برازش شده است و بر اساس ضرایب و پارامترهای مختلف آماری از طریق نرم‌افزار SPSS قابل محاسبه است.

در روش تورم واریانس همبستگی یک متغیر وابسته (سطح آب زیرزمینی در این پژوهش) با متغیرهای مستقل (شامل بارندگی، پمپاژ از چاه، جریان رودخانه و تغذیه جانبی) محاسبه می‌شود. هرچه ضریب VIF متغیر مورد نظر از عدد یک بزرگتر باشد بدان معنی است که تأثیر کمتری در نوسان سطح آب زیرزمینی در چاه مشاهده‌ای دارد (Riahi Modavar et al., 2017). به عبارت دیگر، هرچه شاخص VIF هریک از متغیرهای مستقل مذکور به عدد یک نزدیک‌تر باشد آن متغیر نقش بیشتری در نوسانات سطح آب زیرزمینی بازی می‌کند. در این مطالعه از نرم‌افزار IBM SPSS Statistics 25 جهت محاسبه شاخص VIF استفاده شده است.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- شواهد صحرائی

به منظور بررسی شرایط محلی و احتمال وجود پدیده‌های خاص مؤثر در نوسان سطح آب زیرزمینی، از چاه‌های مشاهده‌ای مورد مطالعه بازدید به عمل آمد. نکته مشترک بین اکثر چاه‌های مشاهده‌ای در مناطق گازدار و فاقد گاز، قرارگیری آنها در مجاورت اراضی کشاورزی می‌باشد (شکل ۲). لذا با فرض نقش آب برگشتی حاصل از آبیاری در بالا آمدن سطح آب، چنین وضعیتی می‌بایست حداقل در تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای دور از مناطق گازدار نیز مشاهده می‌شد. همچنین در بازدید انجام شده، وجود هرگونه نهر یا کانال آب و یا حوضچه تغذیه مصنوعی در مجاورت چاه‌های مشاهده‌ای مورد نظر مشاهده نشد. همانگونه که در شکل ۲-A نشان داده شده است چاه مشاهده‌ای GC-HW1 توسط چاه‌های بهره‌برداری گازدار احاطه شده است. همچنین منصوبات و لوله جدار چاه‌های گازدار این منطقه شدیداً دچار خوردگی شده است (شکل ۲-B). چاه مشاهده‌ای GC-CW1 در آبخوان چهاردولی، علاوه بر مجاورت با چاه‌های گازدار، در فاصله حدود ۵۲۰ متری رودخانه شور واقع شده است (شکل ۲-C) که خروج

۳-۲- هیدروگراف

روش معمول جهت نمایش و بررسی نوسان سطح آب زیرزمینی نسبت به زمان، رسم هیدروگراف با استفاده از داده‌های سطح آب اندازه‌گیری شده در چاه‌های مشاهده‌ای می‌باشد. در شکل ۳ هیدروگراف سه حلقه چاه مشاهده‌ای واقع در مناطق گازدار با چاه‌های مشاهده‌ای دور از مناطق گازدار برای یک دوره زمانی ۱۰ سال (۸۷-۸۶ تا ۹۷-۹۶) مقایسه شده است. با توجه به اختلاف فاحش عمق برخورد به آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای واقع در آبخوان آهکی رزن-قهاوند، برای ترسیم هیدروگراف این چاه‌ها از تراز آب به جای عمق آب زیرزمینی استفاده شده است (شکل ۳-۳). براساس شکل ۳، نوسان سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای دور از مناطق گازدار در آبخوان‌های آبرفتی چهاردولی و همدان (۳-۳-A و ۳-۳-B) و آبخوان آهکی رزن-قهاوند (۳-۳-C)، تقریباً مشابه و متأثر از تغییر رژیم فصلی بارندگی می‌باشد. بدین ترتیب که با آغاز فصل بارندگی در اواسط پاییز، سطح آب زیرزمینی روند صعودی پیدا می‌کند و این وضعیت تا اواسط بهار تداوم می‌یابد. سپس با پایان فصل بارندگی، سطح آب زیرزمینی دچار روند نزولی می‌شود که این روند تا آغاز فصل بارندگی بعدی ادامه می‌یابد.

براین اساس، حداکثر عمق آب زیرزمینی معمولاً در ماه‌های شهریور و مهر و حداقل آن در ماه‌های اردیبهشت و خرداد مشاهده می‌شود. عواملی مانند ناهمگنی بافت خاک در محل تغذیه، نوع و میزان پوشش گیاهی، توپوگرافی سطح زمین، میزان رطوبت خاک و عمق برخورد به آب زیرزمینی باعث می‌شود تا پاسخ سطح آب زیرزمینی به بارندگی در نقاط مختلف آبخوان‌های مورد مطالعه با تاخیر زمانی متفاوتی انجام شود، ولی در مجموع علیرغم اختلافات جزئی، نوسان سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای از روند کلی فوق‌الذکر تبعیت می‌کند. در چاه‌های مشاهده‌ای GC-RW1، GC-CW1، GC-HW1 و GC-RW1 که در مناطق گازدار واقع شده‌اند روند نوسان سطح آب زیرزمینی مغایر با بخش‌های دیگر آبخوان می‌باشد (شکل ۳). براین اساس، در طول دوره بارش، سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای مورد نظر، سیر نزولی دارد و با پایان فصل بارش، سطح آب زیرزمینی شروع به بالا آمدن می‌کند. حداکثر عمق آب زیرزمینی در سه حلقه چاه مشاهده‌ای در ماه‌های اسفند تا اردیبهشت و حداقل مقدار آن در ماه‌های مرداد تا آبان مشاهده می‌شود. بنابراین به نظر می‌رسد برخلاف انتظار، میزان بارندگی عامل اصلی کنترل‌کننده نوسان سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای مورد نظر نمی‌باشد.

حباب‌های گاز در بخش‌هایی از آن در تمام طول سال قابل مشاهده می‌باشد (شکل ۲-D). چاه مشاهده‌ای GC-RW1 برخلاف دو چاه مشاهده‌ای دیگر در داخل روستای همه کسی (دشت رزن-قهاوند) قرار گرفته است (شکل ۲-E). با توجه به وجود تعداد زیاد چاه‌های بهره‌برداری در پیرامون روستا و مهاجرت بخش قابل توجه‌ای از اهالی به دلیل ایجاد فروچاله‌های متعدد در منطقه و گازدار شدن چاه‌های بهره‌برداری در سال‌های اخیر، نقش چاه‌های جذبی فاضلاب در بالا آمدن سطح آب زیرزمینی در طول دوره آبیاری (نه در تمام‌های سال)، کم رنگ می‌باشد.

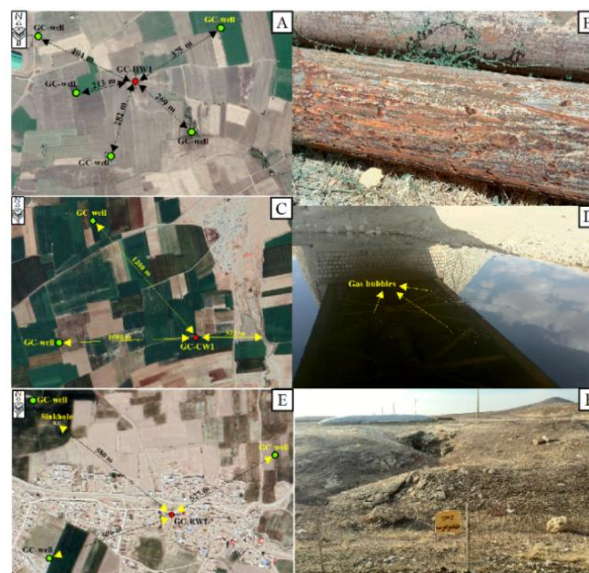


Fig. 2- Field evidence of the gas leakage and situation of observation wells: A) and B) GC-HW1, C) and D) GC-CW1 and E) and F) GC-RW1
شکل ۲- شواهد صحرایی نشت گاز و موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای: A و B) GC-HW1، C و D) GC-CW1 و E و F) GC-RW1

نزدیکترین فروچاله به چاه مشاهده‌ای در فاصله حدود ۵۸۰ متری آن قرار دارد. انتشار گاز دی اکسید کربن از فروچاله، درز و شکستگی و غارهای اطراف روستای همه کسی گزارش شده است (شکل ۲-F). در آزمایش‌های انجام شده در منطقه، غلظت گاز دی اکسید کربن بیشتر از اکسیژن (بیش از ۱۰ درصد) و فشار جزئی آن بیش از یک اتمسفر اندازه‌گیری شده است (Riahi Khoram et al., 2011). بطوریکه تاکنون تعدادی از اهالی روستا به دلیل خفگی ناشی از استنشاق گاز دی اکسید کربن در داخل غار، فروچاله و گودال‌های مجاور، جان خود را از دست داده‌اند (Riahi Khoram et al., 2011; Delkhahi et al., In press).

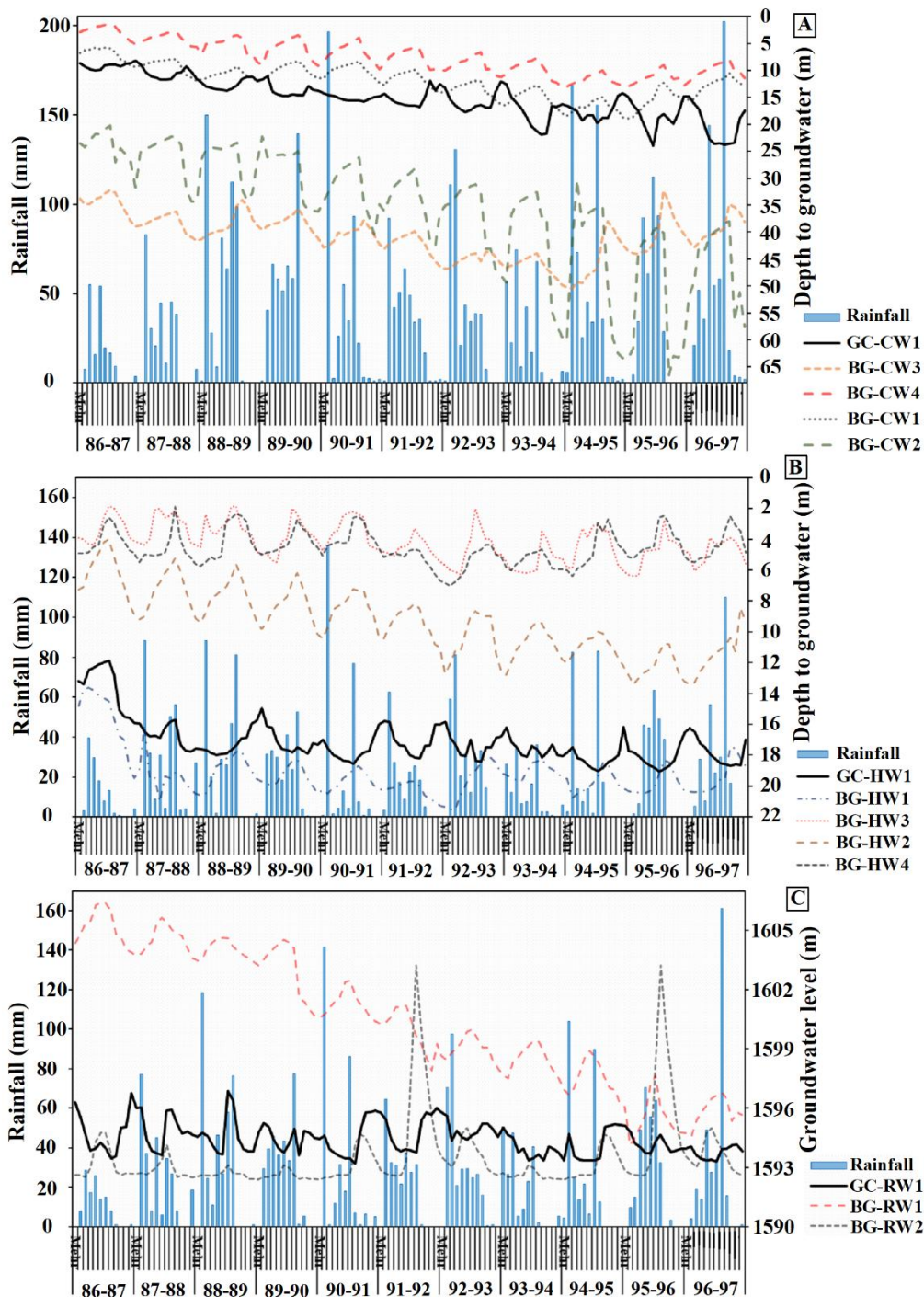


Fig. 3- Comparing the hydrograph of observation wells with rainfall variations in the gas charged (GC) and background (BG) areas: A) Chahardoli, B) Hamadan and C) Razan

شکل ۳- مقایسه هیدروگراف چاه‌های مشاهده‌ای با تغییرات بارش در مناطق گازدار (GC) و فاقد گاز (BG): A) چهاردولی، B) همدان و C) رزن

می‌یابد. روند معمول نوسان سطح آب زیرزمینی در آبخوان‌های مورد مطالعه بدین صورت می‌باشد که در آغاز دوره آبیاری، سطح آب زیرزمینی در نزدیکترین فاصله نسبت به سطح زمین قرار دارد. سپس

در شکل ۴ تأثیر برداشت از چاه‌های بهره‌برداری بر روند نوسان سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای نشان داده شده است. دوره آبیاری در مناطق مورد مطالعه معمولاً از اواسط بهار آغاز و تا اوایل پاییز ادامه

تأثیری بر کاهش افت سالانه و درازمدت سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای مورد نظر نداشته است.

۳-۳- تحلیل شاخص VIF

در شکل ۵ نتایج محاسبات شاخص تورم واریانس (VIF) برای متغیرهای بارندگی (P)، بهره‌برداری از آب زیرزمینی (Q)، جریان رودخانه (R) و تغذیه از مقاطع زیرزمینی (R_t) در چاه‌های مشاهده‌ای مناطق گازدار و فاقد گاز نشان داده شده است. براین اساس، در چاه‌های مشاهده‌ای BG-RW1، BG-HW2 و BG-CW2 که دور از مناطق گازدار قرار دارند مقدار شاخص VIF برای متغیرهای بارندگی بین ۲/۰۴ تا ۲/۶۹، برداشت از آب زیرزمینی بین ۲/۷۱ تا ۳/۴۰، جریان رودخانه بین ۲/۱۸ تا ۳/۷۱ و تغذیه جانبی از مقاطع زیرزمینی بین ۲/۲۱ تا ۲/۹۳ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که از میان عوامل مؤثر بر نوسان سطح آب زیرزمینی، تغذیه از بارندگی مهمترین نقش را در رفتار سطح آب زیرزمینی دارد و متغیرهای دیگر شامل تغذیه توسط آب‌های سطحی، مقاطع ورودی زیرزمینی و بهره‌برداری از آبخوان در مرحله بعدی اهمیت قرار دارند. در چاه‌های مشاهده‌ای GC-RW1، GC-CW1 و HW1 که در مناطق گازدار واقع شده‌اند مقدار شاخص VIF بین ۱۹ درصد برای متغیرهای برداشت از آب زیرزمینی و تغذیه جانبی (چاه مشاهده‌ای GC-RW1) تا حدود ۱۴۰ درصد برای متغیر تغذیه از رودخانه و بارندگی (چاه‌های مشاهده‌ای GC-CW1 و GC-RW1) افزایش یافته است (شکل ۵).

در واقع این نتایج نشان می‌دهد که نقش عوامل فوق‌الذکر در نوسان سطح آب زیرزمینی در مناطق گازدار کمتر از سایر نقاط آبخوان می‌باشد و رفتار غیرعادی مشاهده شده در نوسان سطح آب زیرزمینی در این مناطق، تحت تأثیر متغیرهای دیگری غیر از متغیرهای مورد انتظار می‌باشد.

۳-۴- ویژگی‌های شیمیایی آب‌های گازدار

در جدول ۲ متوسط ترکیب کانی‌شناسی آبخوان‌های آبرفتی همدان، چهاردولی و آبخوان آهکی رزن ارائه شده است. براین اساس، ترکیب کانی‌شناسی مواد تشکیل‌دهنده آبخوان‌های آبرفتی، منطبق بر سازندهای زمین‌شناسی احاطه‌کننده دشت‌ها می‌باشد. کانی کلسیت در ارتباط با سنگ‌های کربناته کرتاسه و الیگو-میوسن هستند. کانی‌های رسی نیز عمدتاً شامل کانی‌های ایلیت و کائولینیت می‌باشند که از هوازدگی شیمیایی کانی‌های موجود در سنگ‌های منطقه بوجود آمده‌اند.

با شروع دوره آبیاری، سطح آب زیرزمینی با شیب قابل توجه‌ای کاهش می‌یابد (عمیق می‌شود)، بطوری‌که در پایان دوره آبیاری سطح آب زیرزمینی در عمیق‌ترین موقعیت نسبت به سطح زمین قرار دارد. چنین رفتاری در چاه‌های مشاهده‌ای BG-HW2، BG-CW4 و BG-RW1 که دور از مناطق گازدار آبخوان قرار دارند کاملاً مشهود می‌باشد (شکل ۴). اما در سه چاه مشاهده‌ای واقع در مناطق گازدار، روند نوسان سطح آب زیرزمینی کاملاً متفاوت می‌باشد. براین اساس، در طول دوره آبیاری، علیرغم بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، عمق آب زیرزمینی کاهش می‌یابد و با پایان دوره آبیاری، عمق آب زیرزمینی شروع به افزایش می‌کند. در واقع همانند بارندگی، برداشت از منابع آب زیرزمینی نیز تأثیر چندانی بر نوسان سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای واقع در مناطق گازدار ندارد. براساس شکل ۴-A، تا قبل از سال آبی ۸۸-۸۹، روند نوسان سطح آب زیرزمینی در چاه مشاهده‌ای GC-HW1 تقریباً مشابه چاه مشاهده‌ای BG-HW2 و طبق روند طبیعی مورد انتظار می‌باشد. ولی در سال آبی ۸۸-۸۹ (برخلاف روند سال‌های قبل)، عمق آب زیرزمینی در شهریور ماه به کمترین مقدار خود و در دی ماه به بیشترین مقدار خود رسیده است که این رفتار غیر طبیعی تا سال آبی ۹۷-۹۶ همچنان ادامه دارد. در چاه مشاهده‌ای GC-CW1، رفتار غیرعادی در نوسان سطح آب زیرزمینی از سال آبی ۸۷-۸۶ شروع شده است (شکل ۴-B). در این سال، همانند چاه مشاهده‌ای GC-HW1، عمق برخورد به آب زیرزمینی در شهریور ماه به کمترین میزان خود می‌رسد.

در چاه مشاهده‌ای GC-RW1 با توجه به آهکی بودن آبخوان و پیچیدگی بیشتر نوسان سطح آب زیرزمینی نسبت به آبخوان‌های آبرفتی، شناسایی زمان شروع ناهنجاری اندکی مشکل می‌باشد (شکل ۴-C).

بررسی سوابق چاه‌های گازدار موجود در مجاورت چاه‌های مشاهده‌ای، نشان می‌دهد که اکثر آنها در طول دهه ۸۰ مورد کف شکنی قرار گرفته و گازدار شده‌اند. این موضوع احتمال نقش پدیده گازدار شدن چاه‌ها، در ایجاد ناهنجاری‌های موجود در نوسان سطح آب زیرزمینی را تقویت می‌کند. لازم به توضیح است که افت ۱۰ ساله سطح آب زیرزمینی (مهر ۸۶ تا مهر ۹۷) در سه حلقه چاه مشاهده‌ای مناطق گازدار، اختلاف چندانی با افت سطح آب در چاه‌های دور از مناطق گازدار ندارد. در واقع با توجه به حجم قابل ملاحظه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، به نظر می‌رسد صعود سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای مناطق گازدار، صرفاً به صورت فصلی و مقطعی است و

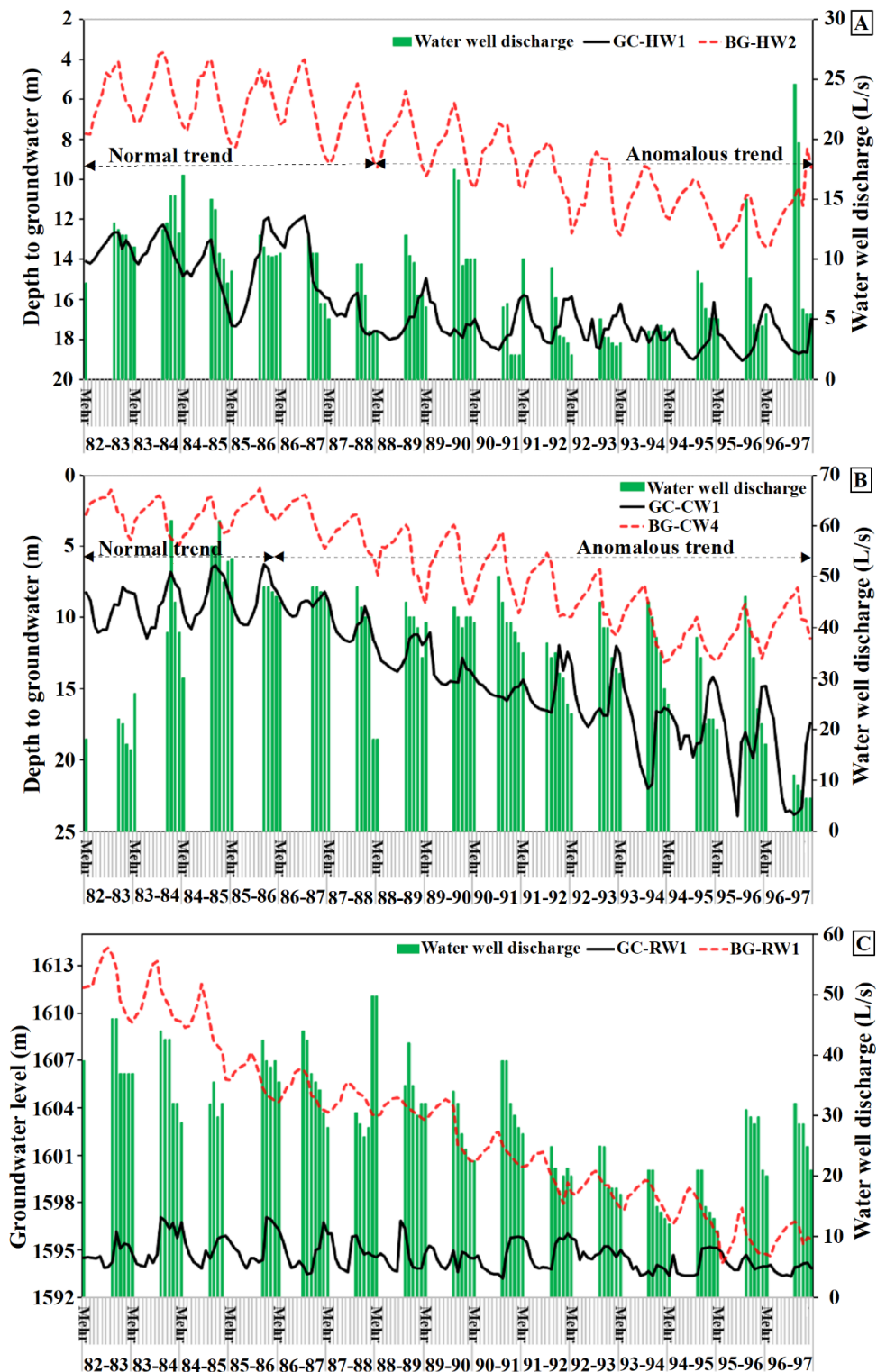


Fig. 4- Comparing the hydrograph of observation wells with water well discharge variations in the gas charged (GC) and background (BG) areas: A) Hamadan, B) Chahardoli and C) Razan
 شکل ۴- مقایسه هیدروگراف چاه‌های مشاهده‌ای با تغییرات آبدی چاه‌های بهره‌برداری در مناطق گازدار (GC) و فاقد گاز (BG): (A) همدان، (B) چهاردولی و (C) رزن

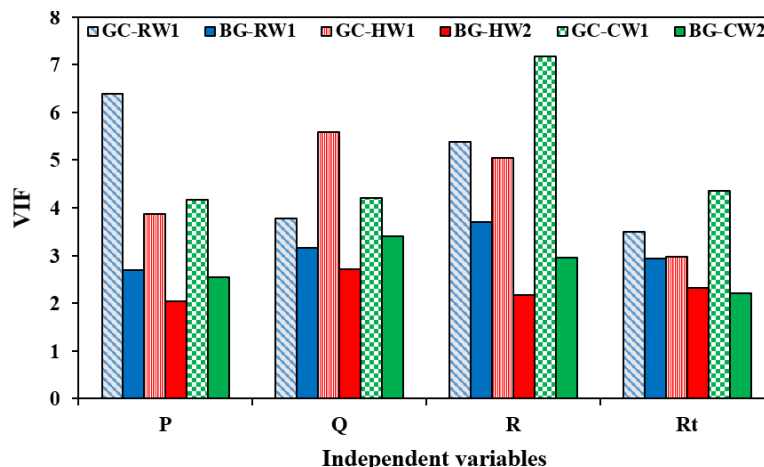


Fig. 5- VIF for effective independent variables on groundwater level fluctuations in the observation wells in Hamadan (H), Chahardoli (C) and Razan (R) aquifers

شکل ۵- شاخص تورم واریانس برای متغیرهای مستقل موثر بر نوسان سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان همدان (H)، چهاردولی (C) و رزن (R)

(Alkalinity) در مقایسه با نمونه‌های فاقد گاز افزایش بیشتری داشته‌اند. با توجه به حاکم بودن شرایط احیایی در آب‌های گازدار، مقدار اکسیژن محلول (DO) بین ۷۵ تا ۹۵ درصد کاهش یافته است. در طی نشت گاز CO₂ به داخل آبخوان، به دلیل تولید اسید کربنیک (H₂CO₃) انتظار می‌رود که مقدار pH آب به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد. با این حال، در آب‌های زیرزمینی گازدار شده مقدار pH بطور متوسط تنها در حدود یک واحد کاهش یافته است (جدول ۳). به نظر می‌رسد به دلیل فراوانی کانی‌های کربناته در داخل آبخوان‌ها و در نتیجه ظرفیت خنثی‌کنندگی بالای pH، نشت گاز به داخل آبخوان نتوانسته است سبب کاهش قابل ملاحظه pH آب شود. بنابراین افزایش قابل ملاحظه میزان شوری (TDS) و غلظت اکثر یون‌ها در آب‌های گازدار، نمی‌تواند تنها مربوط به افزایش هوازدگی کانی‌های تشکیل‌دهنده آبخوان بر اثر کاهش جزئی pH آب باشد.

مقدار فشار جزئی دی اکسید کربن (Pco₂) در آب‌های زیرزمینی معمولاً بین ۱۰ تا ۱۰۰ برابر مقدار آن در اتمسفر می‌باشد (Macpherson, 2009). طبق جدول ۳، در نمونه‌های آب فاقد گاز منطقه، مقدار Pco₂ بین ۱۰^{-۲/۵۸} تا ۱۰^{-۱/۵۵} بار (۷ تا ۷۶ برابر مقدار آن در اتمسفر) می‌باشد که این مقدار در دامنه طبیعی و مورد انتظار در آب‌های زیرزمینی است. ولی در آب‌های زیرزمینی گازدار، Pco₂ بین ۳۰۰ تا بیش از ۱۲۰۰ برابر بیشتر از Pco₂ در اتمسفر و ۳ تا بیش از ۱۲۰ برابر بیشتر از حد معمول در آب‌های زیرزمینی می‌باشد (۱۰^{-۱/۹} تا ۱۰^{-۱/۳۵} بار) که بیانگر فشار بالای وارد بر آب‌های زیرزمینی از محل نشت گاز (چاه‌های گازدار) می‌باشد.

Table 2-Mean Mineralogical composition of the aquifers in the study area

جدول ۲- ترکیب کانی‌شناسی متوسط آبخوان‌ها در منطقه مورد مطالعه

Phases	Hamadan	Chardoli	Komijan	Razan
Quartz (%)	39	36	41	10
Calcite (%)	39	22	31	70
Dolomite (%)	-	1	4	-
Hematite (%)	5	3	1	-
Clay minerals (%)	17	38	23	20

در مورد آبخوان آهکی رزن، کانی‌های اصلی شامل کوارتز، کلسیت و کانی‌های رسی می‌باشند که درصد آنها تابع درجه خلوص آهک می‌باشد. بطوری که در برخی نواحی مانند حوالی روستای همه کسی (دشت رزن)، ۱۰۰ درصد سنگ‌های آهکی را کلسیت تشکیل می‌دهد. طبق جدول ۲، کانی‌های کربناته بطور متوسط حدود ۲۳ تا ۳۹ درصد کانی‌های موجود در آبخوان‌های ابرفتی را تشکیل می‌دهد که نشان‌دهنده ظرفیت خنثی‌کنندگی^۶ بالای pH در آبخوان‌ها می‌باشد.

در جدول ۳ نتایج آنالیز نمونه آب چاه‌های گازدار و فاقد گاز چهار آبخوان چهاردولی، همدان، رزن و کمیجان در شهریور ماه ۱۳۹۷ ارائه شده است. براین اساس، به غیر از یون سولفات (SO₄²⁻)، غلظت اکثر یون‌های اصلی و فرعی در چاه‌های گازدار بین یک (Ca²⁺، Na⁺، HCO₃⁻ و SiO₂) تا بیش از ۱۸۰ برابر (Fe) افزایش یافته است.

همچنین شکل ۶ نشان می‌دهد که در نمونه‌های آب گازدار، از میان پارامترهای فیزیکی‌وشیمیایی، کل مواد جامد محلول (TDS) و قلیابیت

Table 3- Chemical composition of groundwater samples (temperature, alkalinity, log(P_{CO2}), TDS and ions are in °C, mg/L as CaCO₃, bar and mg/L, respectively.)

جدول ۳- ترکیب شیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی (درجه حرارت، قلیائیت، فشار جزیی دی اکسید کربن، کل مواد جامد محلول و غلظت یون‌ها به ترتیب بر حسب °C، mg/L as CaCO₃ و bar/mg/L می‌باشد).

Sample	pH	TDS	T	DO	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	SiO ₂	Fe	Mn	F	Alk	² log(P _{CO2})
H-GC1	6.5	1620.3	16.7	3.06	202.06	84.41	116.79	1.16	1098.3	59.29	58.22	28.73	1.01	0.678	-	900.25	-0.54
H-GC2	5.94	701.4	15.1	1.95	102.39	27.1	53.12	0.88	457.63	29.86	30.43	27.06	2.14	0.438	1	375.1	-0.35
H-GC3	6.43	1067.3	12.5	1.2	123.29	55.45	114.38	1.98	579.66	53.84	138.74	16.42	1.55	0.112	0.6	475.13	-0.76
H-BG1	7.49	1109.4	13.9	8.31	114.62	79.73	107.49	2.39	549.15	88.81	167.18	15.49	0.01	0.066	0.6	450.12	-1.84
R-GC1	6.6	3272.4	17.9	1.04	418.14	89.72	395.48	2.33	1952.5	141.46	272.79	26.8	5.31	0.086	-	1600.44	-0.4
R-GC4	6.47	2670.1	18.8	1.14	329.82	76.23	329.06	2.12	1464.4	115.63	352.86	19.2	2.25	0.053	-	1200.33	-0.39
R-GC5	6.91	5835.3	18.4	0.86	657.84	212.56	683.26	17.56	3355.9	93.43	814.66	13.27	14.27	0.152	0.1	2750.76	-0.46
R-BG2	7.33	1664.9	16.7	5.53	97.32	37.99	380.72	0.96	732.2	181.67	233.97	15.99	0.05	0.024	-	600.17	-1.55
R-BG3	7.55	1749.7	16	5.97	114.02	58.42	353.2	1.42	793.22	202.47	226.98	14.75	0.03	<0.001	1.4	650.18	-1.74
K-GC1	7.28	1334.4	18.5	7.6	76.52	40.55	269.14	0.48	671.18	131.42	145.24	19.57	3.79	0.055	0.5	550.15	-1.52
K-GC3	6.47	1986	20.5	0.36	266.58	78.05	176.52	1.32	1342.4	35.04	86.05	29.01	6.41	0.851	1.7	1100.3	-0.41
K-GC4	6.47	2406.3	20.7	0.28	334.22	83.79	212.9	2.57	1586.4	61.11	125.32	32.21	7.51	0.082	0.3	1300.36	-0.34
K-GC5	6.53	4490.2	18.4	1.46	359.18	164.6	738.38	3.45	1952.5	140.7	1131.3	25.51	4.41	0.064	2.2	1600.44	-0.34
K-GC6	6.78	2264.1	20.4	4.3	314.36	84.78	205.46	2.19	1464.4	65.82	126.98	31.05	1.63	0.024	0.5	1200.33	-0.68
K-BG2	7.83	877.8	18.3	6.45	88.21	28.65	142.63	0.79	427.12	60.19	130.34	17.45	0.09	0.005	0.4	350.1	-2.26
C-GC1	6.78	3121.3	18.1	0.04	167.89	247.86	363.94	1.81	2013.6	81.41	244.78	34.54	5.47	2.72	3.3	1650.45	-0.57
C-GC2	6.89	1895.4	17.3	1.14	131.4	68.37	315.82	6.9	1159.3	51.01	162.61	37.69	1.29	0.87	-	950.26	-0.9
C-GC4	6.73	1815.6	17.6	0.11	4.3	105.5	334.9	1.6	1220.3	45.0	104.0	43.4	1.6	1.4	0.7	1000.28	-0.72
C-BG3	7.92	344.3	16.3	8.82	59.3	12.9	13.9	0.2	244.1	5.0	8.9	23.3	0.0	0.0	0.1	200.06	-2.58

¹ Background (BG) and Gas charged (GC) samples

² Calculated using the PHREEQC software and the Wateq database

زیرزمینی گازدار، با افزایش P_{CO2} مقدار pH به مقدار کمی کاهش یابد. به همین دلیل همبستگی P_{CO2} با pH در آب‌های گازدار نسبت به آب‌های فاقد گاز کاهش یافته است. همچنین براساس شکل ۷-۵، علیرغم افزایش قابل ملاحظه شوری در آب‌های گازدار در مقایسه با نمونه‌های فاقد گاز، از همبستگی P_{CO2} با میزان شوری به شدت کاسته شده است.

در واقع افزایش شوری در آب‌های گازدار، ناشی از عاملی غیر از هوازدگی و انحلال کانی‌های تشکیل‌دهنده آبخوان می‌باشد. بنابراین به نظر می‌رسد عامل اصلی افزایش شوری و غلظت یون‌ها در آب‌های گازدار، نفوذ آب‌های شور عمیق همراه با گاز CO₂ به داخل آبخوان می‌باشد.

۵-۳- منشأ نوسانات غیرعادی سطح آب زیرزمینی

در شکل ۸ مدل مفهومی مربوط به مکانیسم بالا آمدن سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای مجاور چاه‌های گازدار نشان داده شده است. یکی از عوامل مؤثر بر انحلال پذیری^۷ گاز فشار می‌باشد (Clark, 2015). بدین صورت که با افزایش فشار، میزان انحلال گاز افزایش می‌یابد. با توجه به فشار هیدرواستاتیک بالا در داخل مخزن آب شور، CO₂ نمی‌تواند به صورت فاز مستقل گازی در داخل آب وجود داشته باشد و حالت غالب آن به صورت محلول است (CO_{2(aq)}).

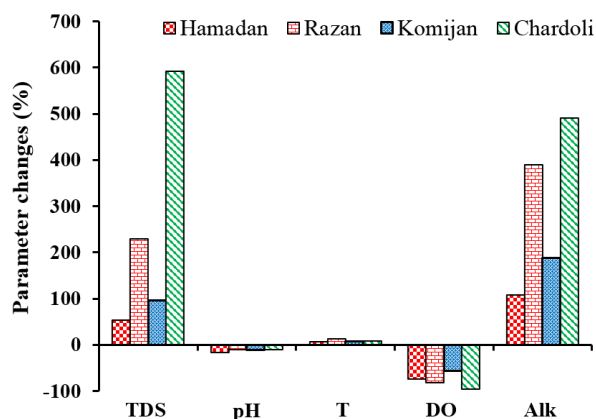


Fig. 6- The rate of change of physicochemical parameters in groundwater due to the gas leakage

شکل ۶- میزان تغییر پارامترهای فیزیکیوشیمیایی در آب زیرزمینی بر اثر نشت گاز

شکل ۷ رابطه P_{CO2} با pH و TDS (شوری) را نشان می‌دهد. بطور طبیعی، ورود گاز CO₂ همراه با آب تغذیه کننده از منطقه غیراشباع به داخل آبخوان، باعث افزایش انحلال و هوازدگی مواد تشکیل‌دهنده آبخوان و در نتیجه افزایش شوری و غلظت یون‌های اصلی در آب‌های زیرزمینی می‌شود. چنین وضعیتی در مورد نمونه‌های آب فاقد گاز در شکل ۷-۵ و ۷-۶ کاملاً مشهود می‌باشد. بدین صورت که P_{CO2} دارای همبستگی بالایی با pH و شوری می‌باشد. طبق شکل ۷-۵، ظرفیت بالای خنثی‌کنندگی آبخوان باعث شده است تا در آب‌های

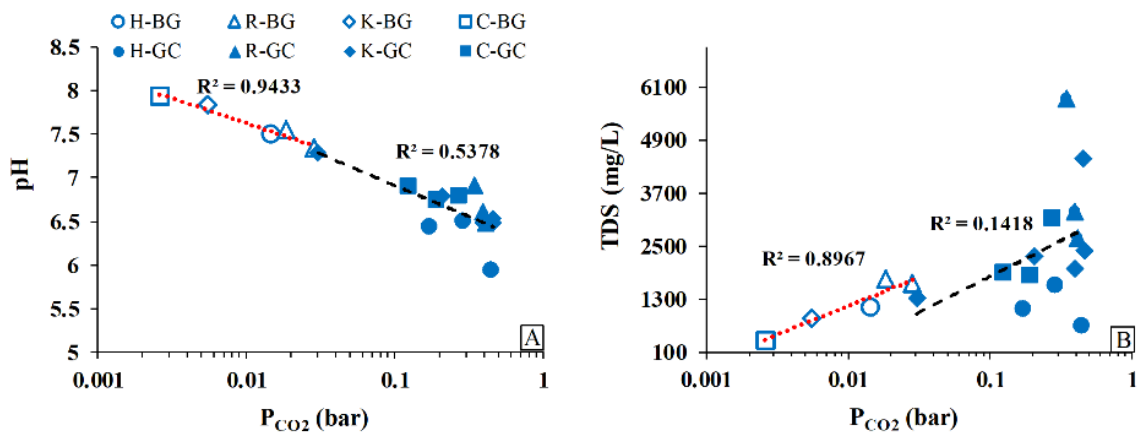


Fig. 7- Correlation of P_{CO_2} with A) pH and B) TDS in the gas charged (GC) and background (BG) groundwaters

شکل ۷- همبستگی P_{CO_2} با pH (A) و BTDS در آب‌های زیرزمینی گازدار (GC) و فاقد گاز (BG)

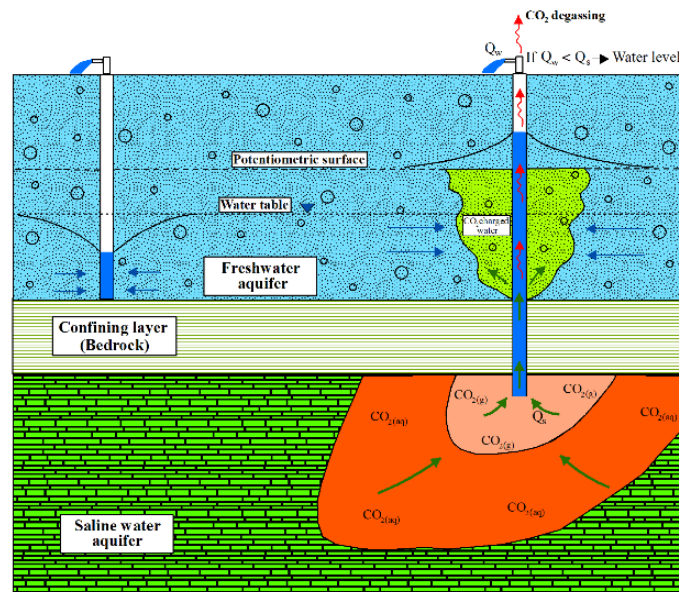


Fig. 8- Simplified conceptual model of the mechanism of water level rise in the observational wells near gas charged water wells

شکل ۸- مدل مفهومی ساده شده مکانیسم صعود سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای مجاور چاه‌های گازدار

داخل مخزن آب شور تشدید می‌شود که این موضوع سبب ورود بیشتر آب شور و گاز CO_2 به داخل آبخوان خواهد شد. زمانی که میزان جریان آب شور ورودی به داخل آبخوان، بیشتر از میزان تخلیه آب توسط چاه بهره‌برداری شود ($Q_s > Q_w$)، سطح آب زیرزمینی در اطراف چاه مورد بهره‌برداری بالا خواهد آمد. به منظور بررسی تأثیر پمپاژ بر میزان خروج گاز از داخل چاه، غلظت گاز CO_2 خروجی از دهانه لوله آبد شش حلقه چاه گازدار در آبخوان‌های همدان- بهار، رزن- قهاوند و چهاردولی در دو نوبت اندازه‌گیری شد. در نوبت اول (مرداد ۹۷)، بلافاصله بعد از خاموش کردن چاه، مقدار گاز خروجی از دهانه لوله آبد اندازه‌گیری شد. در نوبت دوم (آذر ۹۷)، پس از اتمام دوره آبیاری

کف‌شکنی چاه‌های بهره‌برداری در داخل سنگ کف (پوش سنگ مخزن آب شور)، باعث کاهش شدید فشار هیدرواستاتیک در داخل مخزن آب شور می‌شود که این پدیده سبب کاهش قابلیت انحلال پذیری CO_2 و نهایتاً فوق اشباع شدن سریع آب از آن و تشکیل CO_2 به صورت فاز گازی مستقل به ویژه در اطراف چاه بهره‌برداری می‌شود ($CO_{2(g)}$). سپس گاز همراه با آب شور از طریق چاه به داخل آبخوان بالایی راه پیدا می‌کند (شکل ۸). نهایتاً گاز CO_2 به صورت حباب همراه با آب پمپاژ شده از داخل چاه خارج می‌شود. به همین دلیل در اکثر چاه‌های گازدار منطقه مورد مطالعه، خروج گاز با جوشش^۸ همراه می‌باشد. با شروع بهره‌برداری از چاه، کاهش فشار هیدرواستاتیک در

و در زمان غیرفعال بودن چاه‌ها، غلظت گاز خروجی اندازه‌گیری شد. نتایج ارائه شده در جدول ۴ نشان می‌دهد که غلظت گاز خروجی از چاه‌های بهره‌برداری در زمان پمپاژ، بین ۴ (نمونه H-GC2) تا بیش از ۱۱ برابر (نمونه R-GC1) بیشتر از مقدار آن در زمان عدم فعالیت آنها می‌باشد. بنابراین با توجه به اینکه صعود سطح آب زیرزمینی تنها در فصل آبیاری رخ می‌دهد؛ به نظر می‌رسد نفوذ آب شور گازدار به داخل آبخوان از طریق چاه‌های بهره‌برداری، علیرغم کاهش کیفیت آب زیرزمینی، سبب تغذیه آبخوان و بالا آمدن سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای در زمان فعالیت چاه‌های گازدار می‌شود.

Table 4- Measured CO₂ emissions from the gas charged wells

جدول ۴- میزان گاز CO₂ خروجی اندازه‌گیری شده از دهانه چاه‌های گازدار

¹ Sample	CO ₂ (ppm)	
	Mordad 97	Azar 97
H-GC1	² > 5000	830
H-GC2	3800	920
R-GC1	> 5000	450
R-GC5	4000	670
C-GC1	3400	380
C-GC4	4750	545

¹ Gas charged (GC) samples

² Maximum detection limit is 5000 ppm

۴- خلاصه و جمع‌بندی

نشت گاز CO₂ از طریق چاه‌های بهره‌برداری در تعدادی از آبخوان‌های نیمه شمالی استان همدان، علاوه بر مشکلات زیست‌محیطی و اثرات نامطلوب بر کیفیت آب زیرزمینی، سبب ایجاد ناهنجاری در نوسان سطح آب زیرزمینی در تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای واقع در مجاورت چاه‌های گازدار شده است. نتیجه بازدیدهای صحرایی، تجزیه و تحلیل و مقایسه هیدروگراف و شاخص آماری VIF برای چاه‌های مشاهده‌ای واقع در مناطق گازدار و فاقد گاز نشان می‌دهد که اولاً سطح آب زیرزمینی در طول دوره آبیاری و فعالیت چاه‌های کشاورزی، روند صعودی دارد و با اتمام دوره آبیاری و آغاز دوره بارندگی روند نزولی پیدا می‌کند. ثانیاً رفتار غیرعادی در نوسان سطح آب زیرزمینی در مناطق گازدار، تنها به متغیرهای معمول کنترل‌کننده نوسان سطح آب زیرزمینی شامل میزان بارندگی، برداشت از آب زیرزمینی و تغذیه از جریان‌های سطحی وابسته نمی‌باشد. طبق اندازه‌گیری انجام شده، میزان گاز خروجی از چاه‌های گازدار در زمان فعالیت، بیشتر از زمان خاموشی آنها می‌باشد. همچنین نمونه‌برداری و تجزیه و تحلیل نتایج

آنالیز شیمیایی آب چاه‌های گازدار و مقایسه آن با آب چاه‌های فاقد گاز، نشان می‌دهد که افزایش شوری در آب‌های گازدار، ناشی از نفوذ آب شور همراه با گاز به داخل آبخوان می‌باشد. لذا با توجه به مستندات و شواهد موجود، کف‌شکنی چاه‌های بهره‌برداری در داخل سنگ کف و رسیدن آنها به سنگ مخزن CO₂، به دلیل کاهش فشار هیدرواستاتیک، باعث ورود آب شور گازدار به داخل آبخوان می‌شود. با شروع بهره‌برداری از چاه‌ها در فصل آبیاری، میزان تغذیه آبخوان توسط آب شور بر میزان تخلیه آن توسط چاه‌ها پیشی گرفته و در نتیجه سطح آب زیرزمینی در اطراف چاه‌های گازدار بالا می‌آید. اجرای مدل جریان انتقال دو فاز (آب و گاز) با لحاظ وجود منبع عمیق گاز CO₂، اندازه‌گیری و آنالیز گازهای خروجی به همراه اندازه‌گیری میزان شار^۹ گاز خروجی از دهانه چاه‌های گازدار در فصول مختلف سال از جمله راهکارهای پیشنهادی جهت بررسی دقیق‌تر پدیده گازدار شدن آب‌های زیرزمینی و ناهنجاری موجود در نوسان سطح آب زیرزمینی در تحقیقات آتی می‌باشد. ضمن اینکه به منظور تعیین شعاع تأثیر چاه‌های گازدار و برآورد میزان صعود سطح آب در طول دوره آبیاری، حفر چاه‌های مشاهده‌ای بیشتر در اطراف چاه‌های مذکور پیشنهاد می‌گردد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Carbon Capture and Storage
- 2- Buried Karst
- 3- Total Dissolved Solids
- 4- Gas Detector Tube
- 5- Variance Inflation
- 6- pH Buffering Capacity
- 7- Solubility
- 8- Effervesce
- 9- Flux

۵- مراجع

- Abiye T, Masindi K, Mengista H, Demile M (2018) Understanding the groundwater level fluctuations for better management of groundwater resource: A case in the Johannesburg region. *Groundwater for Sustainable Development* 7:1-7
- Amiri M, Asadian GH, Amiri AM (2009) Factors affecting gaseous agricultural wells used in the North plains of Hamedan province and corrosion of their equipments. *Iranian Water Research Journal* 3(4):51-62 (In Persian)
- Barati M (2014) Evaluation of gas origin in water wells in the Bahar plain, north of Hamadan city, Iran. *Iran-Water Resources Research* 9(3):99-102 (In Persian)
- Bayat-Varkeshi M, Gheysari P (2018) The effect of Enso phenomenon on groundwater table (Case study:

- Texas Gulf Coast Basin. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 2(4):582-593
- Nicot JP, Hovorka SD, Choi JW (2009) Investigation of water displacement following large CO₂ sequestration operations. *Energy Procedia* 1(1):4411-4418
- Opatz CC, Dinicola RS (2018) Analysis of groundwater response to tidal fluctuations, Operable Unit 2, Area 8, Naval Base Kitsap, Keyport, Washington. U.S. Geological Survey Open-File Report 2018-1082, 20p
- Parkhurst DL, Appelo CAJ (2011) PHREEQC for windows: A hydrogeochemical transport model, version 2.18.00. Retrieved from https://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC_coupled/phreeqc/
- Person M, Banerjee A, Rupp J, Medina C, Lichtner P, Gable C, Pawar R, Celina M, McIntosh J, Bense V (2010) Assessment of basin-scale hydrologic impacts on CO₂ sequestration, Illinois basin. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 4(5):840-854
- Raeem M (2012) The nature of the gases in the aquifer and the impact of these gases on the water quality of Kariz region, Yazd. M.Sc. Thesis, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshti University
- Riahi Khoram M, Naenian J, Vafaei H (2011) Investigation of natural gas emission in Hamekasi area in Hamadan province. In: 1st National Conference On Health, Environment and Sustainable Development, 2-3 March, Islamic Azad university of Bandar Abbas, Iran, 36-46 (In Persian)
- Riahi Modavar H, Khashei-Siuki A, Seifi A (2017) Accuracy and uncertainty analysis of artificial neural network in predicting saffron yield in the south Khorasan province based on meteorological data. *Saffron Agronomy & Technology* 5(3):255-271 (In Persian)
- Shakerardakani F, Neubauer F, Genser J, Masoudi F, Mehrabi Behzad, Monfaredi Behzad, Friedl G (2015) Tectonic history of the central Sanandaj-Sirjan zone, Iran: Potentially Permian to Mesozoic polymetamorphism and implications for tectonics of the Sanandaj-Sirjan zone. In: EGU General Assembly, 12-17 April, Vienna, Austria, 348-357
- Smith M, Campbell D, Mackay E, Poulson D (2012) CO₂ aquifer storage site evaluation and monitoring: understanding the challenges of CO₂ storage. Results of the CASSEM Project, 198p
- Sotodeh M, Yaghoobi B, Abdolsalehi SE (2011) Causes of flowing and eruption of water wells in the village of Amman and proving solutions. In: 5th Isfahan and Hormozgan provinces). *Iran-Water Resources Research* 14(2):1-11 (In Persian)
- Birkholzer JT, Zhou Q, Tsang CF (2009) Large-scale impact of CO₂ storage in deep saline aquifers: A sensitivity study in pressure response in stratified systems. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 3(2):181-194
- Birkholzer JT, Zhou Q, Cortis A, Finsterle S (2011) A sensitivity study on regional pressure buildup from large-scale CO₂ storage projects. *Energy Procedia* 4:4371-4378
- Cavanagh A, Wildgust N (2011) Pressurisation and brine displacement issues for deep saline formation storage. *Energy Procedia* 4:4814-4821
- Clark I (2015) *Groundwater geochemistry and isotopes*. First Edition, CRC Press: Boca Raton, Florida, United States, 421p
- Conlon TD, Wozniak KC, Woodcock D, Herrera NB, Morgan DS, Lee KK, Hinkle SR (2005) Groundwater hydrology of the Willamette Basin, Oregon: fluctuations in groundwater levels and changes in storage. U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-5168, 83p
- Delkhahi B, Nassery HR, Nakhaei M, Alijani F (In press) Influence of CO₂ leakage into alluvial aquifers on the mobilization of Trace elements, northern part of Hamadan province. *Hydrogeology*, in Press (In Persian)
- Hamadan Regional Water Authority (2015) Hydrogeology survey report of hamadan aquifers. Department of Water Resource Study, 185 p (In Persian)
- Khalaj M, Kholghi M, Saghafian B, Bazrafshan J (2019) Investigating effect of climate change and human activities on groundwater level and quality in semiarid regions. *Iran-Water Resources Research* 15(2):278-290 (In Persian)
- Leetaru HE, Frailey SM, Edward Mehnert JD, Birkholzer JT (2009) Understanding CO₂ plume behavior and basin-scale pressure changes during sequestration projects through the use of reservoir fluid modeling. *Energy Procedia* 1(1):1799-1806
- Macpherson GL (2009) CO₂ distribution in groundwater and the impact of groundwater extraction on the global C cycle. *Chemical Geology* 264(1-4):328-336
- Mi Z, Wang F, Yang Z, Li X, Diao Y, Ma X, Tian H (2019) Numerical simulation of the influence of geological CO₂ storage on the hydrodynamic field of a reservoir. *Geofluids* 83:1-21
- Nicot JP (2008) Evaluation of large scale CO₂ storage on fresh-water sections of aquifers: An example from

- Weider KM (2014) A data-driven study of the water table fluctuation in New England over the last 60 years. M.Sc. Thesis, University of Massachusetts Amherst
- Yamamoto H, Zhang K, Karasaki K, Marui A (2009) Large-scale numerical simulation of CO₂ geologic storage and its impact on regional groundwater flow: A hypothetical case study at Tokyo Bay, Japan. *Energy Procedia* 1(1):1871-1878
- Yihdego Y, Danis C, Paffard A (2017) Why is the groundwater level rising? A case study using HARTT to simulate groundwater level dynamic. *Water Environmental Research* 12(89):2142-2152
- Zhou Q, Birkholzer JT, Mehnert E, Lin YF, Zhang K (2010) Modeling basin and plume-scale processes of CO₂ storage for full-scale deployment. *Groundwater* 48(4):494-514
- Environmental Engineering Conference, 21 November, Tehran, Iran, 52-63 (In Persian)
- Szabo Z, Gal NE, Kun E, Szocs T, Falus G (2018) Accessing effects and signals of leakage from a CO₂ reservoir to a shallow freshwater aquifer by reactive transport modelling. *Environmental Earth Sciences* 77:460-472
- Tian L (2016) CO₂ storage in deep saline aquifers: Models for geological heterogeneity and large domains. Ph.D. Thesis, Faculty of Science and Technology, Uppsala University
- Vongphachanh S, Milne-Home W, Gupta AD, Ball JE (2017) Seasonal groundwater level fluctuations in Sukhuma district of southern Laos. In: *Proceedings of the 37th IAHR world congress*, 13-18 August, Kuala Lumpur, Malaysia, 5006-5014