

## Investigation of Groundwater Quality in Gotvand Aquifer with Emphasis on Nitrate Concentration

N. Kalantari<sup>1\*</sup>, A. Sheikhzadeh<sup>2</sup>, and H.  
Mohammadi<sup>3</sup>

### Abstract

Gotvand Aquifer is one of the aquifers, water resources of which are mainly used for agricultural purposes. To evaluate the water quality of this aquifer with emphasis on nitrate pollution, samples were taken from eleven wells in June 2020. Field parameters (temperature, pH and EC) were recorded and the concentrations of major elements ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ , and  $\text{HCO}_3^-$ ) and nitrate were measured. The results showed that the spatial distribution of nitrate ion almost follows the direction of groundwater flow in Gotvand aquifer and shows a decreasing trend as moving from the upstream in the northern and western parts to the end of the flow lines in the east and southeast. Ion ratios,  $\frac{\text{NO}_3^-}{\text{Cl}^-}$ ,  $\frac{\text{K}^+}{\text{Cl}^-}$ , and  $\frac{\text{SO}_4^{2-}}{\text{Cl}^-}$ , showed that the increase in chloride and sulfate ions, beside the natural tectonic factors, is caused by human activities. In the statistical analysis of the main components, the first and second factors respectively contributed to 47.7% and 32.2% of the total changes. The predominant type of groundwater is sulfate-calcium. In general, changes in nitrate ion concentration in groundwater of Gotvand aquifer have been affected by the size of soil texture in the area, groundwater depth, irrigation and drainage network, domestic sewage leakage and the use of chemical fertilizers.

**Keywords:** Gotvand Aquifer, Nitrate Contamination, Principal Component Analysis (PCA).

Received: February 16, 2021

Accepted: May 22, 2021

## بررسی کیفیت آب زیرزمینی آبخوان گتوند با تأکید بر غلظت نیترات

نصرالله کلانتری<sup>۱\*</sup>، علاهن شیخزاده<sup>۲</sup> و هادی محمدی<sup>۳</sup>

### چکیده

آبخوان گتوند یکی از آبخوان‌هایی است که از منابع آب آن، عمدتاً برای مصارف کشاورزی بهره‌برداری می‌شود. برای بررسی کیفیت آب این آبخوان با تأکید بر آلودگی نیتراته، در خرداد ماه سال آبی ۹۹-۱۳۹۸ از یازده حلقه چاه نمونه‌برداری انجام شد. پارامترهای صحرایی (دما، pH و EC) اندازه‌گیری و غلظت عناصر عمده ( $\text{Ca}^{2+}$ ،  $\text{Mg}^{2+}$ ،  $\text{Na}^+$ ،  $\text{K}^+$ ،  $\text{Cl}^-$ ،  $\text{SO}_4^{2-}$ ،  $\text{CO}_3^{2-}$  و  $\text{HCO}_3^-$ ) و نیترات نیز مورد سنجش شیمیایی قرار گرفت. توزیع مکانی یون نیترات، تقریباً از جهت جریان آب زیرزمینی آبخوان گتوند تبعیت نموده و از ابتدای جهت جریان در بخش‌های شمالی و غربی به سمت انتهای جهت جریان در شرق و جنوب شرقی روند کاهشی را نشان داده است. نسبت‌های یونی  $\frac{\text{NO}_3^-}{\text{Cl}^-}$ ،  $\frac{\text{K}^+}{\text{Cl}^-}$  و  $\frac{\text{SO}_4^{2-}}{\text{Cl}^-}$  نشان دادند که افزایش یون کلرید و سولفات به غیر از عامل طبیعی زمین‌زاد، ناشی از فعالیت‌های انسانی می‌باشد. در تحلیل آماری مؤلفه‌های اصلی، عامل اول ۴۷/۷ درصد و عامل دوم ۳۲/۲ درصد از کل تغییرات را نشان داده‌اند. تیپ غالب آب زیرزمینی سولفات-کلسیک است. به طور کلی تغییرات غلظت یون نیترات در آب زیرزمینی آبخوان گتوند متأثر از اندازه ذرات خاک موجود در منطقه، عمق آب زیرزمینی، شبکه آبیاری و زهکشی، نشت فاضلاب خانگی و استفاده از کودهای شیمیایی بوده است.

**کلمات کلیدی:** آبخوان گتوند، آلودگی نیترات، تحلیل مؤلفه اصلی (PCA).

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۱۱/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۳/۱

1- Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Email: nkalantari@hotmail.com

2- M.Sc. Graduate in Hydrogeology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

3- Ph.D. Student Hydrogeology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

\*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1400.17.1.14.5](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.1.14.5)

۱- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲- دانش‌آموخته هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۳- دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۰ امکانپذیر است.

فصول غیر بارانی است و افزایش فعالیت‌های انسانی باعث روند افزایشی یون نیترات طی یک بازه‌ی زمانی ۵ ساله شده است. (Ramaroson et al., 2020) آلودگی نیترات آب زیرزمینی در منطقه‌ای در ماداگاسکار را با استفاده از روش‌های تجزیه و تحلیل چند متغیره بررسی کردند و دریافتند که فعالیت‌های انسانی (فاضلاب خانگی) عامل اصلی آلودگی نیترات است. (Shirani et al., 2013) در ارزیابی منابع آلودگی آب‌های زیرزمینی در محیط شهری (مطالعه موردی: منطقه ۱۴ شهرداری تهران)، آلودگی نیترات را ناشی از عواملی مانند وجود بافت شنی- ماسه‌ای و شنی- رسی، عدم رعایت حریم چاه‌ها، عمق کم چاه‌های حفاری برای آبیاری فضای سبز و استفاده از چاه‌های جذبی جهت دفع فاضلاب‌های خانگی دانسته‌اند. Mozafari and Sajadi (2014) در بررسی آلودگی شیمیایی آب زیرزمینی آبخوان برازجان دریافتند که، آلودگی شدید نیترات تا بیش از ۱۶۰ میلی‌گرم بر لیتر در بخش جنوبی آبخوان به وسیله فعالیت‌های کشاورزی و همچنین چاه‌های جذبی و ورود آب آلوده از مرغداری‌ها رخ داده است و ۴۲ درصد از نمونه‌های آب زیرزمینی غلظت نیترات بیش‌تر از مقدار استاندارد دارند. (Afzali and Shahedi, 2014) به بررسی روند تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی دشت امل- بابل پرداخته‌اند و نتایج تحقیق بیانگر کاهش ناچیز سطح آب زیرزمینی و بهبود وضعیت کیفی آب زیرزمینی در منطقه یاد شده می‌باشد. Jafari and Kalatgi (2016) در بررسی آب زمین‌شیمی آبخوان شاهرود و بررسی عوامل کنترل‌کننده آلودگی نیترات، نشت فاضلاب را عامل تغییر کیفیت آب آبخوان می‌دانند. (Darkhor and Shaban, 2018) در بررسی آلودگی میکروبی و نیترات در سفره‌های آب زیرزمینی شهر یاسوج، دریافتند که افزایش غلظت نیترات بر اثر بافت درشت دانه، فاضلاب خانگی و استفاده از کودهای کشاورزی بوده است. (Chitsazan et al., 2018) در ارزیابی آلودگی نیترات آب زیرزمینی آبخوان کرج بر اساس روش مؤلفه‌های اصلی و تحلیل عاملی، عوامل آلودگی ژئوتئیک (زمین‌زاد) و عامل انسان‌زاد که به علت فعالیت‌های انسانی به خصوص فاضلاب بوده است، را تشخیص داده‌اند. Bosalil and Jafari (2020) در شناسایی منشأ یون‌ها و فرآیندهای کنترل‌کننده کیفیت آب آبخوان شاهرود با استفاده از تکنیک‌های ژئوشیمیایی به این نتایج رسیده‌اند که، فرآیندهای انحلال هالیت و ژیبس، رسوب‌گذاری کلسیت و دولومیت و تبدلات کاتیونی مستقیم و معکوس، از مهم‌ترین فرآیندهای کنترل‌کننده کیفیت آب آبخوان شاهرود هستند. در سال‌های اخیر، افزایش فعالیت‌های کشاورزی و مناطق روستایی و به دنبال آن استفاده از کودهای شیمیایی نیتروژنه و دفع فاضلاب خانگی به آب زیرزمینی آبخوان گتوند بیش‌تر شده است. از این رو در این پژوهش به بررسی کیفیت آب زیرزمینی با تأکید بر یون نیترات، تعیین منشأ آلودگی نیترات و مناطق دارای بیش‌ترین

آب زیرزمینی یک منبع مهم آب شیرین می‌باشد که در صنعت، کشاورزی و مصارف خانگی استفاده می‌شود. افزایش جمعیت و استفاده روزافزون از مواد شیمیایی محلول و به‌دنبال آن تولید و گسترش فاضلاب‌های صنعتی و خانگی و در نهایت نشت آن‌ها به داخل منابع آبی در سال‌های اخیر، کیفیت آب زیرزمینی را به شدت کاهش داده است. نیترات به عنوان یکی از شاخص‌های آلودگی آب‌های زیرزمینی که بیش‌تر توسط فعالیت‌های بشری صورت می‌گیرد، همواره مورد توجه محققان بوده است. در بیش‌تر موارد رخداد آلودگی نیترات در آب‌های زیرزمینی با فاضلاب‌های کشاورزی و استفاده بیش از حد کودهای نیتروژنه و همچنین فاضلاب‌های خانگی و فضولات حیوانی در ارتباط است. نیترات در آب محلول است و توسط خاک‌های غنی از رس جذب نمی‌شود (Kenney, 1989). نیترات پس از ورود به آب‌های زیرزمینی به صورت یک هاله به سمت اعماق بیش‌تر و در جهت جریان حرکت می‌کند، اما نفوذپذیری و دانه‌ریز بودن مواد متشکله آن می‌تواند در روند پخش آلودگی تأثیر داشته باشد (Chitsazan et al., 2018). به طور معمول غلظت نیترات در بالای سطح ایستابی بیش‌تر است و با افزایش عمق و حرکت به سمت نواحی پایین‌دست جریان به دلیل فرآیند انتشار، اختلاط و رقیق شدن با آب‌های کم نیترات، مقدار آن کاهش می‌یابد (Clawges and Vowinkel, 1996; Pawar and Shaikh, 1995; Kehew et al., 1996). شناخت و بررسی کیفیت منابع آب در مدیریت و استفاده بهینه از آن از اهمیت فراوانی برخوردار است. از این رو بررسی ارتباط میان کاتیون‌ها و آنیون‌ها می‌تواند بسیاری از ویژگی‌های آب را نشان داده و به کمک آن‌ها، سایر خصوصیات آب نیز تعیین گردد. یافتن این ارتباط با روش‌های آزمایشگاهی هزینه‌های سنگینی را در بر دارد. برای کاهش این هزینه‌ها می‌توان از روش‌های آماری چند متغیره هم‌چون تحلیل مؤلفه اصلی (PCA)<sup>۱</sup> و تجزیه تحلیل خوشه‌ای<sup>۲</sup> استفاده نمود. PCA یکی از تکنیک‌های چند متغیره آماری است و هنگامی که حجم داده‌ها زیاد باشد، می‌تواند به عنوان روشی مناسب برای کاهش تعداد ورودی استفاده شود به گونه‌ای که این تعداد ورودی، قادر به توصیف خوبی از تغییرات جامعه آماری باشند. محققان زیادی برای بررسی کیفیت منابع آبی از روش‌های آماری استفاده کرده‌اند (Kura et al., 2013; Isa et al., 2014; Suresh et al., 2017; Kalantari et al., 2018; Naderi et al., 2018). مطالعات گسترده در سراسر دنیا نشان می‌دهد که عوامل مختلف طبیعی و انسانی بر غلظت نیترات آب زیرزمینی مؤثر بوده است. (Qian et al., 2014) با استفاده از تحلیل‌های آماری چند متغیره، تغییرات مکانی و زمانی یون نیترات در زمین‌های کشاورزی را بررسی نموده‌اند و نشان دادند غلظت نیترات در فصول بارانی کم‌تر از

پتانسیل آلودگی با استفاده از روش‌های گرافیکی و آماری پرداخته شده است.

## ۲- موقعیت محدوده مورد مطالعه

آبخوان آبرفتی گتوند یک آبخوان آزاد در شمال استان خوزستان و در غرب رودخانه کارون واقع شده و جزء زاگرس چین‌خورده می‌باشد (شکل ۱). سازندهای اطراف این آبخوان شامل گچساران، میشان، بختیاری، آغاچاری و بخش لهری است. منشأ رسوبات تشکیل‌دهنده آبخوان گتوند، رسوبات نهشته شده رودخانه کارون و سازندهای موجود در منطقه می‌باشد. آبخوان گتوند دارای آب و هوای خشک، متوسط

سالیانه بارش، تبخیر و دمای هوا به ترتیب ۳۳۹/۷ و ۲۸۶۰/۷ میلی‌متر و ۲۷/۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. عمق رسیدن به سطح ایستابی در آبخوان گتوند، بین ۱/۹ تا ۳۳/۱ متر متغیر است و عمق آب از غرب به شرق کاهش می‌یابد. در آبخوان گتوند بالاترین تراز سطح ایستابی در شمال غرب آبخوان (حدود ۱۳۹/۳ متری از سطح دریا) و پایین‌ترین تراز (حدود ۵۴/۴ متری) در بخش‌های جنوب شرق آبخوان مشاهده می‌شود. روند کلی جهت جریان از توپوگرافی منطقه تبعیت می‌کند و از بخش‌های شمالی به سمت نواحی مرکزی و شمال غربی و از بخش‌های غربی به سمت نواحی جنوب شرقی و شرق آبخوان می‌باشد. سازند گچساران در شمال و همچنین سازند کنگلومرای بختیاری در شمال، غرب و جنوب غربی آبخوان گتوند را تغذیه می‌کنند (شکل ۲).

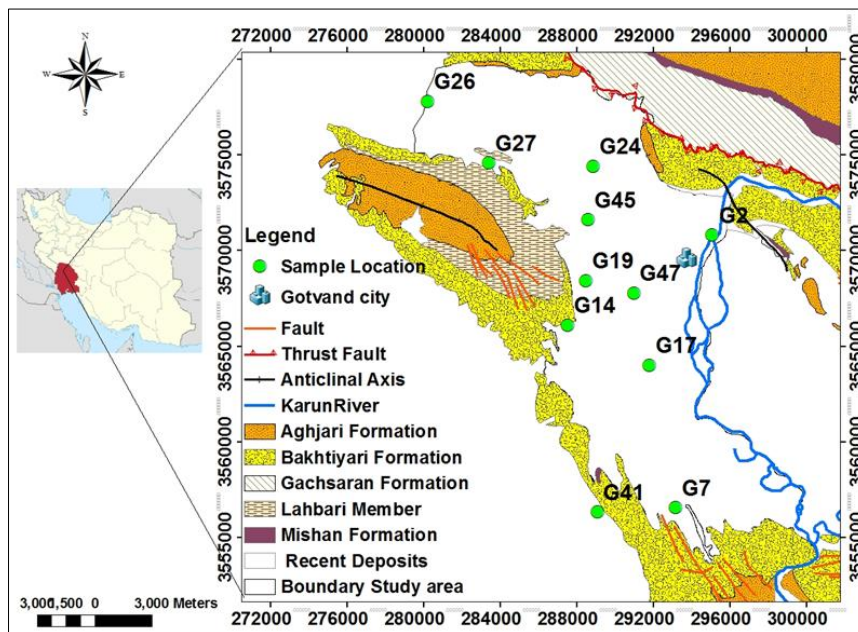


Fig. 1- Geolocation of the Gotvand aquifer and the groundwater sampling points

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و محل نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان گتوند

## ۳- روش تحقیق

جهت بررسی تغییرات مکانی و ارزیابی آلودگی یون نیترات آب زیرزمینی آبخوان گتوند از تعداد ۱۱ حلقه چاه‌های بهره‌برداری که دارای پراکنش نسبی در منطقه مورد مطالعه هستند، در خرداد ماه سال ۱۳۹۸-۹۹) نمونه‌برداری مطابق شکل ۱ صورت گرفت. آنالیز شیمیایی آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $CO_3^{2-}$  و  $HCO_3^-$ ) و یون نیترات در آزمایشگاه سازمان آب و برق خوزستان انجام گردید. در آزمایشگاه مذکور، یون‌های کلسیم، منیزیم، کلرید، کربنات و بی‌کربنات به روش تیتراسیون، سدیم و پتاسیم به روش شعله‌سنجی و سولفات و نیترات به روش اسپکتروفتومتری (UV-Vis مدل Dr2800) مورد سنجش قرار گرفته

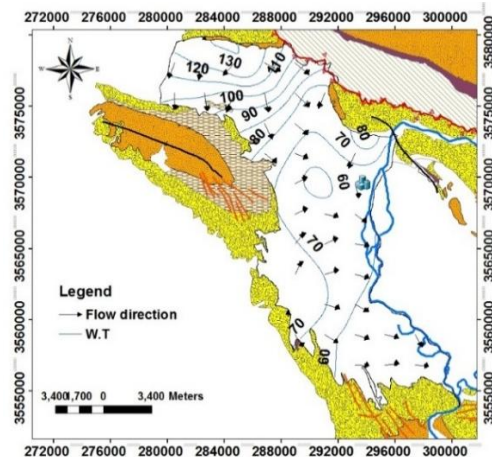


Fig. 2- Groundwater flow direction in the Gotvand aquifer

شکل ۲- جهت جریان آب زیرزمینی در آبخوان گتوند

هیدروشیمیایی مقادیر KMO برابر با ۰/۶۸ را دارا بودند (در محدوده قابل قبول بین ۰/۵ و ۰/۷) و برای تحلیل آماری مناسب می‌باشند. همچنین بر اساس تست بارتلت، در صورتی انجام تحلیل آماری قابل قبول است که  $p\text{-value} < \alpha$  باشد. مقدار احتمال خطا  $\alpha$  سطح خطا می‌باشد که معمولاً ۰/۰۵ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به جدول ۲ مقدار احتمال خطا  $p\text{-value} < ۰/۰۰۰۱$  و از ۰/۰۵ سطح خطا کم‌تر است و انجام تحلیل آماری امکانپذیر می‌باشد. برای بررسی آلودگی یون نیترات در آب زیرزمینی آبخوان گتوند، از نقشه توزیع مکانی یون نیترات، نقشه‌های جهت جریان، عمق آب زیرزمینی، موقعیت شبکه آبیاری و زهکشی، نسبت‌های یونی نمودار پایپر و روش آماری تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شده است. جهت دستیابی به اهداف این پژوهش، نرم‌افزارهای Excel، Aq.QA، Arc GIS10.3 و Surfer، XLSTAT مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

است. مقدار pH و هدایت الکتریکی در محل نیز توسط دستگاه دیجیتالی هدایت‌سنج الکتریکی اندازه‌گیری شد. در ابتدا غلظت کل آنیون‌ها و کاتیون‌ها بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر سنجیده شد و میزان درصد خطا محاسبه گردیده است (جدول ۱). میزان خطا ۱/۸ درصد محاسبه و از حد مجاز ۵ درصد خطا کم‌تر بوده که این میزان خطا قابل قبول می‌باشد. در روش آماری، برای استانداردسازی داده‌ها از روش کایزر<sup>۳</sup> استفاده شده است که بر اساس آن، نرمال بودن توزیع داده‌ها مشخص می‌شود. در مرحله بعدی مناسب بودن داده‌ها برای انجام تحلیل‌های آماری بررسی شده است که در این پژوهش، از شاخص کایزر-مایر-الکین (KMO)<sup>۴</sup> و آزمون کرویت بارتلت<sup>۵</sup> استفاده شده است (جدول ۲). شاخص کایزر-مایر-الکین در بازه صفر تا یک قرار دارد. اگر مقدار شاخص KMO نزدیک به یک باشد، داده‌های موردنظر (اندازه نمونه) برای تحلیل آماری مناسب هستند (Chitsazan et al., 2018). در این پژوهش، تمام پارامترهای

**Table 1- Calculate the percentage difference between the sum of anions and cations**

Well	Sum of cations (meq/l)	Sum of anions (meq/l)
G2	14.75	16.17
G7	14.23	15.26
G14	31.29	31.33
G17	15.06	15.56
G19	32.77	33.86
G24	20.8	20.11
G26	14.13	14.34
G27	7.82	8.09
G41	31.85	32.83
G45	25.56	26.77
G47	29.21	31.69
SUM	237.47	246.01
%Difference	$\frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}} * 100 = \frac{237.47 - 246.01}{237.47 + 246.01} * 100 = \%1.8$	

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- توزیع مکانی غلظت نیترات نمونه‌های آب زیرزمینی

جهت ارزیابی آلودگی آب‌های زیرزمینی آبخوان آبرفتی گتوند، نقشه توزیع مکانی یون نیترات تهیه گردیده است (شکل ۳). نیترات در آب‌های زیرزمینی برای محصولات کشاورزی بسیار سودمند می‌باشد و غذای بسیار خوبی برای گیاه محسوب می‌شود. از طرفی نیز اگر مقدار آن در گیاهان خیلی زیاد شود، مصرف این گیاهان باعث بیماری‌هایی در بدن انسان می‌شود (مانند: بیماری متهموگلوبینمیا). طبق استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO, 2011) افزایش غلظت نیترات به بیش از ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر در آب آشامیدنی، آلودگی محسوب می‌شود.

**Table 2- Bartlett's sphericity test**

جدول ۲- آزمون کرویت بارتلت	
Bartlett's sphericity test:	
Chi-square (Observed value)	128.364
Chi-square (Critical value)	50.998
DF	36
p-value	< 0.0001
alpha	0.05

نمونه‌های G19 و G17 با میزان غلظت نیترات به ترتیب ۳۸/۳ و ۳۷/۸ میلی‌گرم بر لیتر در بخش‌های کشاورزی واقع شده‌اند و عمق کم آب در این نواحی باعث آبشویی و انتقال نسبتاً سریع یون نیترات به آب زیرزمینی در این بخش‌ها شده است. نمونه‌های G7 و G27 با میزان نیترات به ترتیب ۲۲/۷ و ۲۰/۶ میلی‌گرم بر لیتر نیز به دلیل قرار گرفتن در مناطق با آب زیرزمینی نسبتاً عمیق آبخوان دارای غلظت کم یون نیترات می‌باشند. در آبخوان گنوند علاوه بر استفاده از چاه‌های بهره‌برداری از شبکه آبیاری و زهکشی نیز در بخش کشاورزی استفاده می‌شود که عمده تمرکز این شبکه در نواحی مرکزی و شرق آبخوان می‌باشد (شکل ۵). مطابق شکل ۵ نمونه‌های G2، G14، G17، G45 و G47 در محدوده این شبکه آبیاری و زهکشی قرار گرفته‌اند. همان‌طور که قبلاً ذکر شده است، نمونه G2 به دلیل قرارگیری در قسمت با بافت درشت‌دانه، عمق کم آب زیرزمینی و همچنین استفاده از شبکه آبیاری و زهکشی برای فعالیت‌های کشاورزی در این ناحیه که خود باعث افزایش پساب کشاورزی و به دنبال آن افزایش غلظت یون نیترات در آب زیرزمینی می‌شود، دارای بیش‌ترین غلظت یون نیترات می‌باشد. نمونه‌های G45 و G47 به دلیل بافت ریزدانه ناشی از هوازگی سازندهای تبخیری گچساران، آغاچاری و بخش لهری موجود در آن نواحی و آبشویی محدود، کم‌تر تحت تأثیر شبکه آبیاری و زهکشی قرار گرفته و میزان نیترات کمی را نشان می‌دهند. نمونه G17 به دلیل عمق کم آب زیرزمینی (کم‌تر از ۱۰ متر) و نمونه G14 به علت واقع شدن در بافت درشت‌دانه و همچنین تأثیر استفاده از شبکه آبیاری و زهکشی موجود در آبخوان که همگی آبشویی یون نیترات را تسریع می‌بخشند، مقادیر نسبتاً زیاد یون نیترات را نشان می‌دهند.

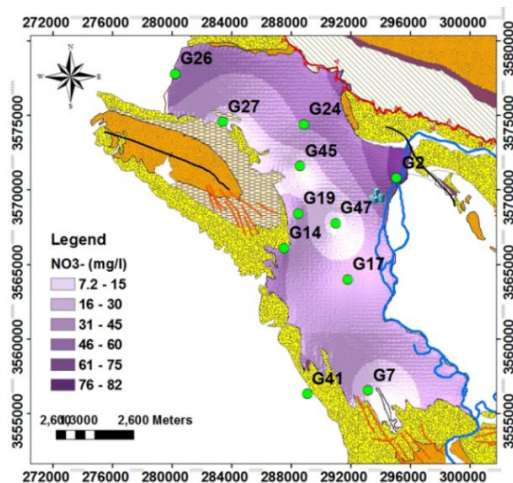


Fig. 3- Spatial distribution of Nitrate ion in groundwater of Gotvand aquifer

شکل ۳- نقشه توزیع مکانی یون نیترات آب زیرزمینی آبخوان گنوند

در نتیجه در این پژوهش، مناطق با پتانسیل آلودگی یون نیترات از نقطه‌نظر استفاده برای شرب مورد بررسی قرار گرفته است. دامنه تغییرات غلظت یون نیترات بین ۳/۸ و ۸۳/۳ میلی‌گرم بر لیتر به ترتیب مربوط به نمونه‌های G47 (مرغ‌داری طاووس ۲) در مرکز آبخوان و G2 (روستای امیر الیاسی) واقع در شمال شرق آبخوان می‌باشد. با توجه به شکل ۳ توزیع مکانی یون نیترات، تقریباً از جهت جریان آب زیرزمینی آبخوان گنوند تبعیت نموده و از ابتدای جهت جریان در بخش‌های شمالی و غربی به سمت انتهای جهت جریان در شرق و جنوب شرقی روند کاهشی را نشان می‌دهد. غلظت نیترات نمونه‌های G2، G26 و G41 به ترتیب ۸۳/۳، ۵۸/۸ و ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر بوده است و بیش‌تر از مقدار استاندارد سازمان بهداشت جهانی ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. نمونه‌های G14 و G24 دارای غلظت یون نیترات به ترتیب ۳۷/۸ و ۴۷/۴ میلی‌گرم بر لیتر و نزدیک به میزان حد مجاز یون نیترات در آب آشامیدنی می‌باشند. نمونه‌های یاد شده در رسوبات آبرفتی دانه‌درشت حاصل از هوازگی سازند کنگلومرای بختیاری موجود در محدوده مطالعه، قرار گرفته‌اند. بافت دانه‌درشت و ماسه‌ای خاک باعث افزایش آبشویی نیترات می‌شود (Abdesselam et al., 2012; Heumesser et al., 2012). بافت درشت‌دانه و ماسه‌ای خاک باعث افزایش نفوذپذیری رسوبات و به دنبال آن کاهش زمان ماندگاری نیترات در بخش غیر اشباع آبخوان شده است. نیترات خاک موجود در محدوده این نمونه‌ها بدون این که فرصت استفاده توسط گیاهان و نیترات‌زدایی توسط باکترها پیدا کند توسط جریان‌ات عمودی خاک آبشویی شده و به آب زیرزمینی منتقل گردیده است. علاوه بر استفاده از کودهای شیمیایی در بخش کشاورزی، نمونه‌های با غلظت زیاد نیترات در قسمت با تمرکز مناطق روستایی واقع شده‌اند و به نظر می‌رسد ورود فاضلاب خانگی به آب زیرزمینی، یکی دیگر از منابع افزایش غلظت نیترات در آب زیرزمینی گنوند باشد. لازم به ذکر است نمونه G2 که بیش‌ترین غلظت یون نیترات (۸۳/۳ میلی‌گرم بر لیتر) را دارا می‌باشد، علاوه بر قرارگیری در بافت درشت‌دانه حاصل از هوازگی سازند کنگلومرای بختیاری، در قسمت با میزان عمق آب کم‌تر از ۱۰ متر قرار گرفته است (شکل ۴). بافت درشت‌دانه به همراه عمق کم، منجر به آبشویی سریع یون نیترات و افزایش غلظت آن در آب این نمونه شده است. با توجه به شکل ۴ نمونه G47 با مقدار نیترات ۳/۸ میلی‌گرم بر لیتر (مرغ‌داری طاووس ۲) در منطقه‌ی با عمق آب کم‌تر از ۱۰ متر و نمونه G45 با مقدار نیترات ۱۹/۷ میلی‌گرم بر لیتر (مرغ‌داری اسدی) در بخش با عمق کم‌تر از ۱۵ متر قرار دارد. غلظت کم نیترات نمونه‌های یاد شده با وجود قرارگیری در بخش‌های کم عمق آبخوان، به دلیل بافت ریزدانه خاک سطحی که از هوازگی سازندهای ریزدانه گچساران، آغاچاری و بخش لهری حاصل می‌شود و آبشویی یون نیترات در این نواحی را محدود ساخته است، می‌باشد.



می‌توان به انحلال کانی‌های تبخیری مانند هالیت و سیلیت موجود در سازند تبخیری گچساران، رسوبات ریزدانه سازند آغاچاری و بخش لهری نسبت داد. افزایش هماهنگ غلظت نیترات و کلرید در آب زیرزمینی و افزایش آن‌ها نسبت به بی‌کربنات نیز، نشان‌دهنده تأثیر فعالیت‌های انسانی در کیفیت منابع آب زیرزمینی می‌باشد (Liu et al., 2004). از این رو در شکل ۶ نمودار نسبت مجموع نیترات و کلرید به بی‌کربنات ( $\frac{NO_3^-+Cl^-}{HCO_3^-}$ ) در مقابل کل املاح جامد (TDS) برای نمونه‌های آب زیرزمینی گتوند ترسیم شده است (Jafari and Kalatgi, 2016). با توجه به شکل ۶ دو پارامتر ذکر شده همبستگی ضعیف را نشان می‌دهند و نمی‌توان زیاد بودن نسبت ( $\frac{NO_3^-+Cl^-}{HCO_3^-}$ ) را فقط ناشی از فعالیت‌های انسانی دانست. همانطور که قبلاً ذکر شد غلظت زیاد یون کلرید ناشی از انحلال کانی‌های تبخیری هالیت و سیلیت موجود در سازندهای موجود در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. دلیل دیگر افزایش یون کلرید نیز فاضلاب خانگی و کودهای شیمیایی است. با توجه به جدول ۳، زیاد بودن نسبت  $\frac{SO_4^{2-}}{Cl^-}$  در اکثر نمونه‌ها را با استفاده از نمودار پایپر می‌توان توضیح داد. نمودار پایپر، یکی از روش‌های متداول جهت تعیین نوع آب‌ها، رخساره‌های هیدروشیمیایی و مسیرهای تکامل هیدروژئوشیمیایی آب زیرزمینی می‌باشد (Fetter, 1999). بر اساس نمودار پایپر (شکل ۷)، آنیون و کاتیون غالب به ترتیب سولفات و کلسیم می‌باشند و تیپ اکثر نمونه‌ها سولفات-کلسیک تشخیص داده شده است. غلظت زیاد یون‌های کلسیم و سولفات در آب زیرزمینی گتوند ناشی از وجود رسوبات آهکی، گچی و دولومیتی در سازندهای کنگلومرای بختیاری و گچساران، در محدوده آبخوان و تغذیه آب زیرزمینی توسط این سازندها بوده است. آبخوان گتوند جزء مناطق خشک ایران می‌باشد و در نواحی خشک فروشویی سولفات از لایه‌های فوقانی خاک در خور توجه است و سبب می‌شود که سولفات آنیون اصلی آب‌های زیرزمینی واقع در زیر آن نواحی باشد (Freeze and Cherry, 1979). عامل دیگر افزایش یون سولفات در آب زیرزمینی گتوند نیز، ناشی از فاضلاب خانگی و کودهای شیمیایی استفاده شده در بخش کشاورزی است.

#### ۳-۴- تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

روش‌های آماری چند متغیره، برای یافتن رابطه بین پارامترهای مختلف فیزیکی و شیمیایی تأثیرگذار بر کیفیت منابع آبی کاربرد فراوانی دارند. یکی از روش‌های تحلیل آماری چند متغیره، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) است که، از خانواده بردارهای ویژه می‌باشد و به عنوان یک روش ریاضی برای کاهش حجم داده‌ها به کار گرفته می‌شود (Chitsazan et al., 2018).

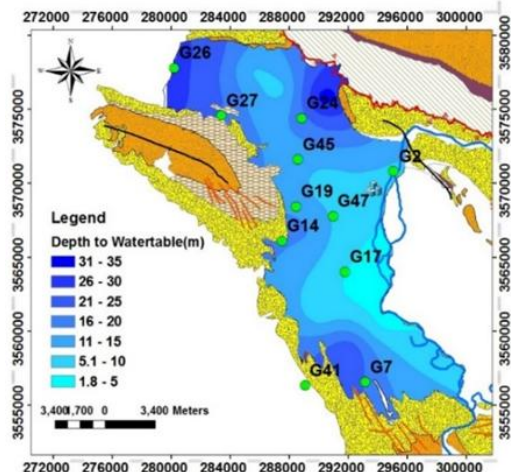


Fig. 4- Groundwater depth in Gotvand aquifer  
شکل ۴- نقشه عمق آب زیرزمینی آبخوان گتوند

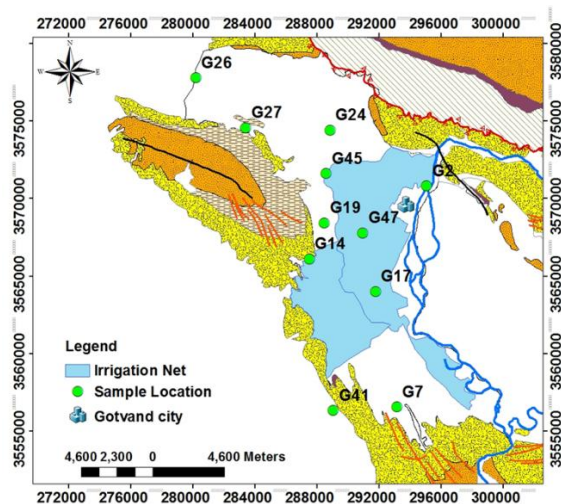


Fig. 5- Irrigation network in Gotvand aquifer extent  
شکل ۵- نقشه شبکه آبیاری موجود در آبخوان گتوند

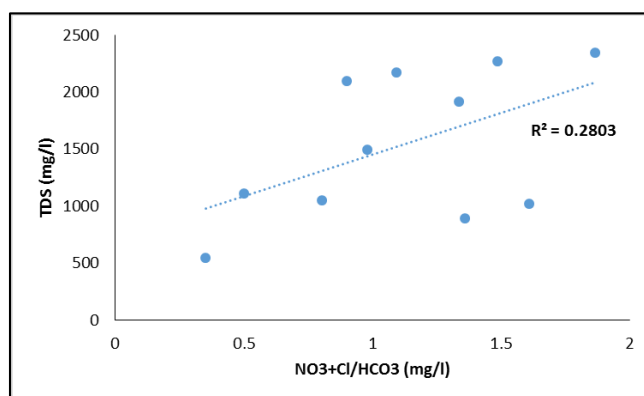
#### ۲-۴- منشأیابی آلودگی نیترات در آب زیرزمینی

یکی از راه‌های تعیین منشأ یون نیترات در آب زیرزمینی استفاده از نسبت‌های یونی  $\frac{NO_3^-}{Cl^-}$ ،  $\frac{K^+}{Cl^-}$  و  $\frac{SO_4^{2-}}{Cl^-}$  (Mozafari and Sajadi, 2014; Darkhor and Shaban, 2018) می‌باشد. به همین منظور مقادیر این نسبت‌ها برای آب زیرزمینی آبخوان گتوند محاسبه گردید (جدول ۳). منشأ کلرید و پتاسیم در آب زیرزمینی می‌تواند ناشی از فعالیت‌های انسانی (فاضلاب خانگی و کود شیمیایی) باشد. افزایش غلظت کلرید به همراه کاهش غلظت نیترات بیان‌کننده این مطلب است که منشأ کلرید به غیر از کود شیمیایی می‌باشد (Pawar and Shaikh, 1995). با توجه به جدول ۳ ملاحظه می‌شود که نسبت‌های یونی  $\frac{K^+}{Cl^-}$  و  $\frac{NO_3^-}{Cl^-}$  کم‌تر از ۱ بوده و افزایش غلظت کلرید، می‌تواند دلیلی به غیر از فعالیت‌های انسانی داشته باشد. افزایش کلرید را

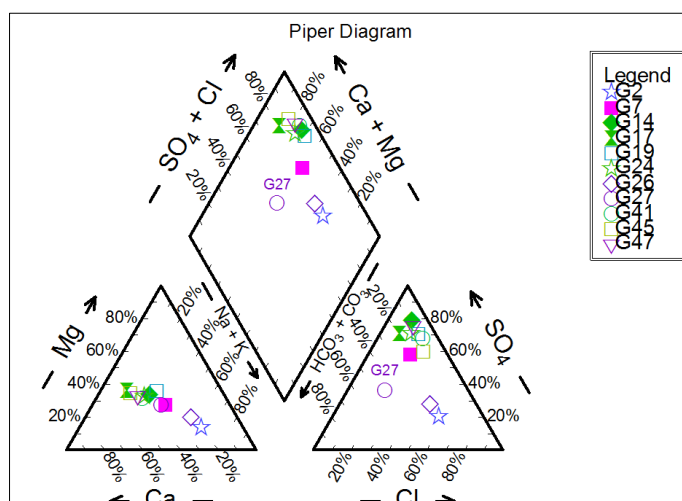
در تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، بر مبنای معیار کایزر، مؤلفه‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرند که مقدار بردار ویژه آنها بزرگ‌تر یا مساوی ۱ باشد (Stat Soft, 2004). عامل‌ها به ترتیب ارزش، درجه‌بندی می‌شوند. عامل اول یا مؤلفه‌های که دارای بیش‌ترین مقدار بردار ویژه هستند، دارای بیش‌ترین اهمیت در منشأ تغییرات در داده‌ها می‌باشند و آخرین عامل به عنوان حداقل فرآیند ایجاد کننده تغییرات شیمیایی است. در این پژوهش بر اساس میزان غلظت پارامترهای شیمیایی، تحلیل‌های آماری توسط نرم‌افزار XLSTAT برای نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان گنوند که شامل ۱۰ متغیر است، صورت گرفت. مقدار کربنات نمونه‌ها صفر بوده و غلظت بقیه عناصر اصلی بر حسب میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد.

**Table 3- Ion ratios of the Gotvand aquifer groundwater samples**  
جدول ۳- نسبت‌های یونی نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان گنوند

Well	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /Cl <sup>-</sup>	K <sup>+</sup> /Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /Cl <sup>-</sup>
G2	0.9	0.01	0.3
G7	3.4	0.01	0.2
G14	8.1	0.01	0.3
G17	9.2	0.02	0.7
G19	4.5	0.0	0.1
G24	5.8	0.01	0.4
G26	0.8	0.02	0.2
G27	2.4	0.01	0.4
G41	3.8	0.01	0.2
G45	2.8	0.01	0.1
G47	6.5	0.0	0.02



**Fig. 6- Ratio graph (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>+Cl<sup>-</sup> / HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) VS (TDS)**  
شکل ۶- نمودار نسبت (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>+Cl<sup>-</sup> / HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) در مقابل (TDS)



**Fig. 7- Piper diagram of the Gotvand aquifer groundwater samples**  
شکل ۷- نمودار پایپر نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان گنوند

ابتدا مقادیر آماری شامل بیشینه و کمینه مقدار، میانگین و انحراف معیار برای عناصر به دست آمد (جدول ۴). سپس جدول ماتریس همبستگی بر اساس ضریب پیرسون برای پارامترهای شیمیایی تهیه گردید (جدول ۵). در آخر نیز مؤلفه‌های اصلی، مقادیر ویژه، درصد تغییرات و درصد تغییرات تجمعی محاسبه شد (جدول ۶). مطابق با ماتریس همبستگی جدول ۵ ملاحظه می‌شود که بیش‌ترین همبستگی میان هدایت الکتریکی و یون‌های منیزیم، سولفات و کلسیم وجود دارد. این همبستگی زیاد نشان‌دهنده این مطلب است که عامل شوری و نامطلوب شدن کیفیت آب، زیاد بودن غلظت عناصر ذکر شده در فوق می‌باشد. همبستگی زیاد یون سولفات با منیزیم و کلسیم نشان‌دهنده انحلال سولفات منیزیم، ژپس و انیدریت، همبستگی خوب میان یون کلرید با یون‌های سدیم و پتاسیم انحلال‌هالیت و سیلویت را در آب زیرزمینی آبخوان گتوند نشان می‌دهد. همبستگی متوسط یون پتاسیم با نیترات نیز می‌تواند ناشی از استفاده کودهای نیترا ته و پتاسیم‌دار در اثر فعالیت‌های انسانی در بخش کشاورزی دانست.

تحلیل مؤلفه‌های اصلی PCA محاسبه شده در جدول ۶ نشان داد که دو عامل مقدار ویژه بیش از ۱ (عامل‌های اول و دوم با مقادیر ویژه

۴/۸ و ۳/۲) را دارا می‌باشند. این تحلیل همچنین نشان داد دو عامل که در مجموع ۷۹/۹ درصد کل تغییرات را شامل می‌شوند، کیفیت منابع آب آبخوان گتوند را کنترل می‌کنند. برای استخراج پارامترهای اصلی مؤثر بر کیفیت آب از درون این عامل‌ها، از بار عاملی چرخانده شده با دوران واریماکس<sup>۶</sup> استفاده شده است. دوران واریماکس به منظور بهبود روابط بین ورودی‌ها و عامل‌های اولیه و نیز تفکیک بهتر آن‌ها جهت عضویت در عامل‌ها استفاده می‌شود (Noori et al., 2010). عامل اول با ۴۷/۷ درصد کل تغییرات و بیش‌ترین تأثیر بر کیفیت آب زیرزمینی، مربوط به یون‌های  $Ca^{2+}$ ،  $SO_4^{2-}$ ،  $Mg^{2+}$  و  $HCO_3^-$  و عامل دوم با ۳۲/۲ درصد از کل تغییرات متعلق به یون‌های  $Cl^-$ ،  $K^+$ ،  $Na^+$ ،  $NO_3^-$  و pH می‌باشند. همان‌طور که اشاره شده است پارامترهای منیزیم، سولفات و کلسیم بیش‌ترین تأثیر را در مؤلفه اول دارند. این مؤلفه نشان‌دهنده انحلال کانی‌های با غالب بودن یون منیزیم و کلسیم است و می‌توان آن را مؤلفه ناشی از فعالیت‌های زمین‌زاد نامید. این امر را می‌توان ناشی از انحلال منیزیم سولفات و کانی تبخیری ژپس و انیدریت موجود در سازند گچساران، آهک و دولومیت موجود در سازند گنکومرای بختیاری که دارای سیمان آهکی است، دانست.

Table 4- Variables summary statistics

جدول ۴- خلاصه آماری متغیرها

Variable	Minimum	Maximum	Mean	Std. deviation
Ca	56.1	282.5	171.5	88.4
Mg	24.3	139.8	80.8	43.4
Na	48.3	227.6	145.8	59.9
K	0.8	4.7	2.1	1.5
SO4	139.3	1172.0	669.4	412.1
Cl	56.7	319.1	185.3	92.2
HCO3	167.8	250.2	200	25.1
NO3	3.8	83.3	39.1	22.0
EC	868.0	3450.0	2268.9	929.3
pH	7.2	8.1	7.5	0.3

Table 5- Correlation matrix (Pearson (n))

جدول ۵- ماتریس همبستگی عناصر شیمیایی بر اساس ضریب پیرسون

Variable	Ca	Mg	Na	K	SO <sub>4</sub>	Cl	HCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	EC	pH
Ca	1									
Mg	0.953	1								
Na	0.182	0.314	1							
K	-0.142	-0.259	0.386	1						
SO <sub>4</sub>	0.947	0.982	0.323	-0.289	1					
Cl	0.215	0.197	0.733	0.737	0.135	1				
HCO <sub>3</sub>	-0.554	-0.583	0.141	0.463	-0.621	0.430	1			
NO <sub>3</sub>	-0.332	-0.286	0.547	0.571	-0.308	0.474	0.294	1		
EC	0.955	0.970	0.451	-0.068	0.963	0.382	-0.491	-0.163	1	
pH	-0.549	-0.510	-0.329	-0.199	-0.437	-0.512	-0.080	-0.354	-0.562	1



مختص به خود است. در ربع اول، نمونه‌های G19، G41 و G45 قرار گرفته و دارای غلظت زیاد یون‌های  $Mg^{2+}$ ،  $SO_4^{2-}$ ،  $Ca^{2+}$  و  $Cl^-$ ، غلظت متغیر یون‌های  $K^+$ ،  $Na^+$ ،  $NO_3^-$  و  $HCO_3^-$  می‌باشند. نمونه‌های G2 و G26 با غلظت زیاد یون‌های  $K^+$ ،  $Cl^-$ ،  $NO_3^-$  و  $HCO_3^-$ ، غلظت کم یون‌های  $Mg^{2+}$ ،  $SO_4^{2-}$  و  $Ca^{2+}$  مقدار pH متغیر در ربع دوم واقع شدند. نمونه‌های موجود در ربع سوم دارای غلظت بالای یون  $HCO_3^-$  و pH نسبتاً قلیایی، به همراه غلظت پایین بقیه یون‌های اصلی شامل نمونه‌های G7، G17 و G27 می‌باشند. در ربع چهارم نمونه‌های G14، G24 و G47 واقع شده است و دارای غلظت زیاد یون‌های  $Mg^{2+}$ ،  $SO_4^{2-}$  و  $Ca^{2+}$ ، غلظت کم یون‌های  $Cl^-$  و  $K^+$  و غلظت متغیر یون‌های  $NO_3^-$  و  $HCO_3^-$  می‌باشند. بر اساس مطالب بیان شده، تحلیل‌های آماری چند متغیره همانند روش تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) نشان می‌دهند که توانایی برقراری ارتباط میان آنیون‌ها و کاتیون‌ها را دارند. تجزیه و تحلیل آماری صورت گرفته در این پژوهش به بهترین شکل ممکن نتایج نمودارهای گرافیکی را تأیید می‌کند.

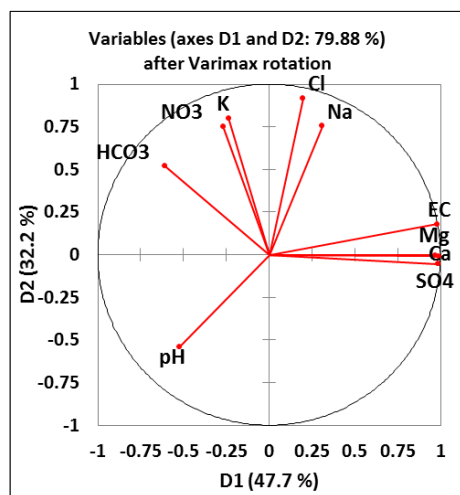


Fig. 8- Circle of correlation of chemical parameters  
شکل ۸- دایره همبستگی پارامترهای شیمیایی

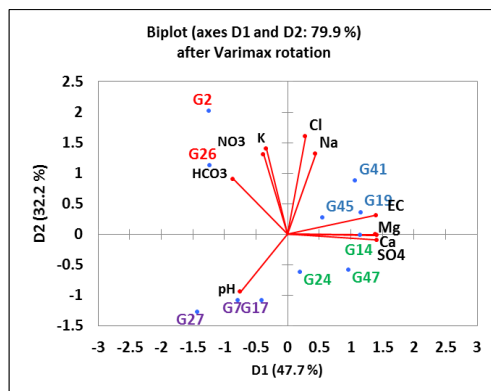


Fig. 9- Biplot D1 on D2  
شکل ۹- نمودار D1 Biplot بر روی D2

در مؤلفه دوم یون‌های کلرید، پتاسیم، سدیم، نیترات و pH مؤثر هستند. یون کلرید به دلیل بار عاملی بیش‌تر نسبت به سدیم و پتاسیم تأثیر بیش‌تری داشته و به نظر می‌رسد که علاوه بر عامل طبیعی زمین‌زاد (انحلال کانی‌های تبخیری مانند هالیت و سیلویت موجود در سازند تبخیری گچساران و همچنین میان‌لایه‌های موجود در سازند آغاچاری و بخش لهری)، فعالیت‌های انسان‌زاد نیز در افزایش آن نقش دارند. pH نمونه‌های آب زیرزمینی نیز بین ۷/۲ (G45) و ۸/۱ (G7) است و نشان‌دهنده نسبتاً قلیایی بودن منابع آب آبخوان گتوند می‌باشد.

Table 6- Analysis results of the factors (after rotation varimax)

Variable	F1	F2
Ca	<b>0.944</b>	0.000
Mg	<b>0.985</b>	0.000
Na	0.096	<b>0.568</b>
K	0.056	<b>0.642</b>
SO4	<b>0.977</b>	0.003
Cl	0.040	<b>0.844</b>
HCO3	<b>0.367</b>	0.270
NO3	0.072	<b>0.566</b>
EC	<b>0.959</b>	0.032
pH	0.275	<b>0.294</b>
Eigenvalue	<b>4.8</b>	<b>3.2</b>
Variability (%)	<b>47.7</b>	<b>32.2</b>
Cumulative %	<b>47.7</b>	<b>79.9</b>

نتایج آنالیز مؤلفه‌های اصلی بر روی دایره‌ی همبستگی مطابق شکل ۸ نشان داده شده است. این شکل تصویر متغیرهای اولیه را در فضای فاکتورها نشان می‌دهد. هنگامی که دو متغیر دور از مرکز و نزدیک به یک‌دیگر باشند، همبستگی آن‌ها با یک‌دیگر به طور درخور توجهی مثبت (r نزدیک به ۱) است. اگر بردار متغیرها متعامد باشد، متغیرها بدون همبستگی با یک‌دیگرند (r نزدیک به صفر). به عکس اگر بردار متغیرها در طرف مقابل مرکز قرار داشته باشند، همبستگی آن‌ها با یک‌دیگر منفی (r نزدیک به -۱) است (Chitsazan et al., 2018). بر این اساس و همانطور که در شکل ۸ مشخص است، پارامترهای منیزیم، سولفات و کلسیم که تقریباً بر هم‌دیگر منطبق بوده و به محور D1 نزدیک هستند، به همراه بی‌کربنات بیش‌ترین تأثیر را بر عامل اول دارند که عامل درونی و زمین‌زاد است. بردار پارامترهای کلرید، پتاسیم، سدیم و نیترات به محور D2 نزدیک بوده و بیش‌ترین تأثیر را بر عامل دوم، که علاوه بر تأثیر عامل زمین‌زاد، عامل آلودگی نیترات است، دارد. همچنین نمودار بای پلات<sup>۷</sup> مجموع دو عامل D1 بر روی D2 نمونه‌های آب زیرزمینی تهیه گردید (شکل ۹). بر اساس شکل ۹ نمونه‌ها در ۴ ربع قرار گرفته‌اند که هر ربع، دارای غلظت عناصر اصلی

## ۵- نتیجه گیری

بر عامل اول دارند که عامل درونی و زمین‌زاد است. همچنین بردار پارامترهای کلرید، پتاسیم، سدیم و نیترات به محور D2 نزدیک بوده و بیش‌ترین تأثیر را بر عامل دوم، که علاوه بر تأثیر عامل زمین‌زاد، عامل آلودگی نیترات است، دارد. نمودار بای پلات مجموع دو عامل D1 بر روی D2، قرارگیری نمونه‌های آب زیرزمینی در ۴ ربع این نمودار را نشان داد به نحوی که، هر ربع دارای ویژگی‌های شیمیایی مختص به خود می‌باشد. نمودارهای گرافیکی و روش آماری چند متغیره (PCA) به کار رفته در این پژوهش به خوبی نتایج یکدیگر را تأیید کرده‌اند و تلفیق نتایج این روش‌ها با یکدیگر اطلاعات سودمندی در مطالعات هیدروژئوشیمیایی به دست می‌دهند. تحلیل‌های صورت گرفته بافت درشت‌دانه، عمق کم آب زیرزمینی، استفاده از شبکه آبیاری و افزایش پساب ناشی از آن، فاضلاب خانگی و کودهای شیمیایی را عوامل آلودگی یون نیترات در آب زیرزمینی آبخوان گتوند دانسته‌اند. لازم به ذکر است که این پژوهش دارای محدودیت تعداد کم نمونه‌ها می‌باشد که بدلیل در دسترس بودن فقط همین تعداد داده و هزینه زیاد آنالیز شیمیایی، با همین تعداد داده آنالیز آماری انجام گردیده است.

## ۶- تشکر و قدردانی

از معاونت پژوهشی و گروه زمین‌شناسی دانشگاه شهید چمران اهواز که در انجام این پژوهش، همکاری و مساعدت کرده‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

## پی‌نوشت‌ها

- 1- Principal Component Analysis
- 2- Cluster Analysis
- 3- Kaiser Criterion
- 4- Kaiser- Meyer- Olkin
- 5- Bartlett's Sphericity Test
- 6- Varimax
- 7- Biplot

## ۷- مراجع

- Abdesselam S, Halitim A, Jan A, Trolard F, Bourrié G (2013) Anthropogenic contamination of groundwater with nitrate in arid region: Case study of Southern Hodna (Algeria). *Environmental Earth Sciences* 70(5):2129-2141
- Afzali A, Shahedi K (2014) Investigation on trend of groundwater quantity-quality variation in Amol-Babol Plain. *Journal of Watershed Management Research* 5(10):144-156 (In Persian)
- Bosalik Z, Jafari H (2020) Use of geochemical techniques in identifying the origin of ions and

در این پژوهش آلودگی یون نیترات در آب زیرزمینی آبخوان گتوند بررسی گردید. نقشه توزیع مکانی یون نیترات نشان داد که تغییرات غلظت این یون تقریباً از روند جهت جریان آب زیرزمینی تبعیت نموده است. بدین صورت که بیش‌ترین مقدار غلظت نیترات در بخش‌های شمالی و غربی و به سمت شرق و جنوب شرقی میزان این یون روند کاهشی را نشان می‌دهد. زیاد بودن میزان یون نیترات در قسمت‌های شمالی و شرقی مربوط به بافت درشت‌دانه حاصل از هوازدگی سازند کنگلومرای بختیاری و عمق کم آب زیرزمینی در بخش شمال شرقی و همچنین بهره‌گیری از شبکه آبیاری و زهکشی در بخش کشاورزی در این نواحی می‌باشد که باعث تسریع آیشویی یون نیترات و انتقال آن به آب زیرزمینی شده است. کاهش میزان یون نیترات در مرکز و جنوب شرقی آبخوان به دلیل افزایش بافت ریزدانه حاصل از هوازدگی سازند آغاچاری و بخش لهری، که منجر به کاهش آیشویی یون نیترات در این نواحی گردیده است. نمودار نسبت مجموع نیترات و کلرید به بی‌کربنات ( $\frac{NO_3^- + Cl^-}{HCO_3^-}$ ) در مقابل کل املاح جامد (TDS) و همچنین کاهش نسبت یونی  $\frac{K^+}{Cl^-}$  و  $\frac{NO_3^-}{Cl^-}$  بیان می‌کند که غلظت زیاد یون کلرید علاوه بر منشأ طبیعی زمین‌زاد (انحلال کانی‌های تبخیری هالیت و سیلویت موجود در سازند گچساران، میان‌لایه‌های موجود در سازندهای آغاچاری و بخش لهری)، منشأ دیگری حاصل از فعالیت‌های انسانی همانند فاضلاب‌های خانگی و کودهای شیمیایی دارد. آنیون و کاتیون غالب در آب زیرزمینی سولفات و کلسیم بوده و تیپ آب اکثر نمونه‌ها سولفات-کلسیک است. زیاد بودن مقدار سولفات و نسبت یونی  $\frac{SO_4^{2-}}{Cl^-}$  نیز نشان‌دهنده انحلال کانی‌های تبخیری ژپیس و انیدریت سازند گچساران، استفاده از کودهای شیمیایی در بخش کشاورزی و فاضلاب خانگی می‌باشد. بر اساس ماتریس همبستگی، همبستگی زیاد یون سولفات با منیزیم و کلسیم انحلال سولفات منیزیم، ژپیس و انیدریت، همبستگی خوب میان یون کلرید با یون‌های سدیم و پتاسیم انحلال هالیت و سیلویت و همبستگی متوسط یون پتاسیم با نیترات نیز استفاده از کودهای نیتراته و پتاسیم‌دار در اثر فعالیت‌های انسانی در بخش کشاورزی را نشان می‌دهد. تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) دو عامل تأثیرگذار بر کیفیت آب زیرزمینی آبخوان گتوند با مجموع ۷۹/۹ درصد از کل تغییرات را تشخیص داد. عامل اول با بیش‌ترین تأثیر و ۴۷/۷ درصد از کل تغییرات، مربوط به یون‌های  $Ca^{2+}$ ،  $SO_4^{2-}$ ،  $Mg^{2+}$ ،  $EC$  و  $HCO_3^-$  و عامل دوم با ۳۲/۲ درصد از کل تغییرات متعلق به یون‌های  $Cl^-$ ،  $K^+$ ،  $Na^+$  و  $NO_3^-$  pH می‌باشند. نمودار دایره همبستگی پارامترهای شیمیایی نیز نشان داد که، پارامترهای منیزیم، سولفات و کلسیم تقریباً بر هم‌دیگر منطبق بوده و به محور D1 نزدیک هستند و به همراه بی‌کربنات بیش‌ترین تأثیر را

- Liu C Q, Han G (2004) Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: a study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province, China. *Chemical Geology* 204(1-2):1-21
- Mozafarizadeh J, Sajadi Z (2014) Survey of groundwater chemical pollution in the Borazjan plain. *Iranian South Medical Journal* 17(5):927-937 (In Persian)
- Naderi K, Nadiri A, Asghari moghadam A, Kord M (2018) Evaluation of hydrogeochemical status of Salmas plain aquifer using multivariate statistical methods. *Echo Hydrology* 5(3):791-800 (In Persian)
- Noori R, Khakpour A, Omidvar B, Farokhnia A (2010) Comparison of ANN and principal component analysis-multivariate linear regression models for predicting the river flow based on developed discrepancy ratio statistic. *Expert Systems with Applications* 37(8):5856-5862
- Pawar N J, Shaikh I J (1995) Nitrate pollution of groundwater from shallow basaltic aquifer. *Deccan Trap Hydrologic Province India Geo* 25:197-204
- Qian J, Wang L, Liu Y, Wu B, Wang X (2014) Distribution of nitrate and its implication for the contaminant source in groundwater of Huaibei Plain, Anhui Province. *Geosciences Journal* 19:537-545
- Ramaroson V, Randriantsivory J, Rajaobelison J, Lahimamy F, Rakotomalala Ch, Rajaobelison J, Razafitsalama F, Rasolofonirina M (2020) Nitrate contamination of groundwater in Ambohidrapeto-narivo-Madagascar using hydrochemistry and multivariate analysis. *Applied Water Science* 10:178 a Antan
- Shirani Z, Abaspour M, Javid A, Taghavi L (2013) Evaluation of ground water pollution in the urban environment (Case study: District 14 of Tehran Municipality). *Quarterly Journal of Man and the Environment* 11(1):1-16 [https://he.srbiau.ac.ir/article\\_3258.html](https://he.srbiau.ac.ir/article_3258.html) (In Persian)
- Shrestha S A, Kazama F (2007) Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan. *Journal of Environmental Modeling & Software* 22(4):464-475
- Stat Soft Inc (2004) STATISTICA (Data Analysis Software System). Version 6
- Suresh Nathan N, Saravanane R, Sundararajan T (2017) Spatial variability of ground water quality using HCA, PCA and MANOVA at Lawspet, Puducherry in India. *Computational Water, Energy, and Environmental Engineering* 6:243-268
- WHO (2011) Guidelines for drinking-water quality, 4th edn. World Health Organization, Geneva Switzerland 398-403
- Shahroud aquifer water quality control processes. *Earth Knowledge Research* 11(44) P181-196 (In Persian)
- Chitsazan M, Ilbaygi M, Pourtabari M (2018) Evaluation of groundwater nitrate pollution based on principal components method and factor analysis (Case study: Karaj plain aquifer). *Echo Hydrology* 5(4):1119-1133 (In Persian)
- Clawges RM, Vowinkel EF (1996) Variables indicating nitrate contamination in bedrock aquifers, Newark Basin, New Jersey. *Water Resources Bulletin* 32(5):1055-1066
- Darkhor M, Shaban M (2018) Study of microbial and nitrate contamination in groundwater aquifers. *Environmental Science Studies* 3(1):607-618 (In Persian)
- Fetter CW (1999) Contaminant hydrogeology. Upper Saddle River, NJ: Prentice hill
- Freeze R A, Cherry J (1979) A Ground water. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ
- Heumesser C, Wick K, Schmid E (2012) Groundwater nitrate contamination: Factors and indicators. *Journal of Environmental Management* 111(3):178-18
- Isa N M, Aris A Z, Lim W Y, Sulaiman W N A W, Praveena S M (2014) Evaluation of heavy metal contamination in groundwater samples from Kapas Island, Terengganu, Malaysia. *Arabian Journal of Geosciences* 7(3):1087-1100
- Jafari H, Kalatgi M (2016) Hydrogeochemistry of Shahroud aquifer and investigation of factors controlling nitrate pollution. *Journal of Advanced Applied Geology* 19, 6(3):63-74 (In Persian)
- Kalantai N, Anbari A, Mohammadi H (2018) Hydrochemical assessment of surface and groundwater resources of the Bostan Plain using multivariate statistical techniques. *Iran-Water Resources Research* 14 (2):236-248 (In Persian)
- Kehew AE, Straw WT, Steinmann WK, Barrese PG, Passarella G, Peng W (1996) Ground-water quality and flow in a shallow glaciofluvial aquifer impacted by agricultural contamination. *Ground Water* 34(3):491-500
- Kenney D R (1989) Sources of Nitrate to ground water. *Developments in Agricultural and Managed Forest Ecology* 21:23-34
- Kura N, Ramli M, Sulaiman W, Ibrahim Sh, Aris A, Mustapha A (2013) Evaluation of factors influencing the groundwater chemistry in a small tropical island of Malaysia. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 10(5):1861-1881