# بررسی روند تکامل کیفی آب‌های سطحی حوزه آبریز رودخانه هلیل رود با استفاده از پارامترهای فیزیکوشیمیایی و تکنیک‌های آماری چند متغیره

محمد فاریابی[۱]

تاریخ ارسال:۱۳۹۵/۱۱/۰۶
تاریخ پذیرش:۱۳۹۶/۱۱/۱۱

## چکیده

رودخانه هلیل‌رود مهمترین رودخانه استان کرمان است و نقش مهمی در تامین نیاز آبی منطقه ایفا می‌کند. بنابراین مطالعات ارزیابی کیفی آن اهمیت ویژه‌ای دارد. در این تحقیق با استفاده از نتایج آنالیز شیمیایی آب در ۱۲ ایستگاه آب‌سنجی، روند تکامل هیدروشیمیایی آب‌های سطحی حوزه آبریز رودخانه هلیل رود بررسی شده است. در این مطالعه از روش‌های کیفی معمول در مطالعات کیفی و روش‌های آماری جهت بررسی کیفیت آب رودخانه استفاده شده است. نمودارهای هیدروشیمیایی مانند دیاگرام پایپر و سری‌های مکانی جهت بررسی روند تغییرات کیفی آب رودخانه بکار گرفته شده‌اند. جهت بررسی اندرکنش بین سنگ‌ها، رسوبات و آب رودخانه از نرم افزار PHREEQC استفاده شده و شاخص اشباع مهمترین کانی‌های محلول در آب محاسبه شده است. همچنین روش‌های آماری چند متغیره مانند آنالیز خوشه‌ای و تحلیل عاملی جهت بررسی عوامل موثر بر کیفیت شیمیایی آب رودخانه بکار گرفته شده‌اند. نتایج حاصل از این تحقیق بیانگر آن است که میزان مجموع املاح از ارتفاعات به سمت دشت در مسیر رودخانه اصلی افزایش می‌یابد که علت این امر انحلال مواد موجود در مسیر رودخانه است. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق انحلال سنگ ها و رسوبات در آب رودخانه، نزولات جوی و تبخیر سطحی مهمترین عوامل موثر بر کیفیت آب های سطحی در منطقه مورد مطالعه هستند.

**واژه های کلیدی: تکامل هیدروشیمیایی، روش‌های آماری، رودخانه هلیل رود، کیفیت آب.**

[۱]دکتری هیدروژئولوژی، استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت. آدرس: گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، کیلومتر ۸ جاده بندرعباس، تلفن: ۰۹۱۳۳۴۹۴۶۹۴، پست الکترونیک: Faryabi753@yahoo.com

## مقدمه

حدود یک درصد از منابع آب شامل آب‌های جاری، تالاب ها و دریاچه ها است که توسط انسان قابل بهره‌برداری و استفاده مستقیم می باشد ( Dodds et al, 2002) رودخانه‌ها از مهمترین منابع آب سطحی بوده و یکی از اجزای مهم چرخه هیدرولوژی هستند. کاهش کیفیت رودخانه‌ها که به شدت تحت تاثیر عوامل محیطی قرار دارند، یکی از نگرانی های حال حاضر در مدیریت کیفی منابع آب می‌باشد ( Singh et al, 2004). رودخانه‌ها یکی از منابع مهم تأمین آب کشاورزی، شرب و صنعتی هستند. با گسترش مناطق شهری و بهره‌برداری از منابع آب، آلودگی رودخانه‌ها نیز افزایش یافته است (حسینی و همکاران، ۱۳۸۸). بنابراین مطالعه عوامل موثر بر کیفیت آب رودخانه‌ها و روند تغییرات کیفی آن برای مدیریت بهینه منابع آب ضروری به نظر می رسد.

استفاده از شاخص‌های کیفیت آب[1] یکی از روش-های معمول در بررسی کیفیت آب رودخانه‌ها است. اگرچه شاخص های کیفیت آب روش مفیدی را برای پیش بینی تغییرات کیفیت آب فراهم می کنند اما شواهدی از عوامل موثر بر کیفیت آب را بیان نمی‌کنند (Razmkhah et al., 2010). بنابراین برای ارزیابی کیفیت آب رودخانه‌ها، باید پارامترهای کیفی مختلف در طول زمان اندازه‌گیری شده و مورد بررسی قرار گیرند.

مطالعات زیادی در خصوص بررسی کیفیت آب رودخانه‌ها در ایران و جهان انجام شده است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود. Simeonov et al., 2003 به منظور ارزیابی کیفیت آب سطحی در شمال یونان ۲۷ پارامتر کیفی مربوط به پنج رودخانه و آبراهه‌های آن‌ها را با استفاده از روش‌های آماری بررسی کردند. این محققان براساس ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی ، کیفیت آب رودخانه را در چهار گروه طبقه بندی کردند. Samantray et al., 2009 کیفیت آب رودخانه‌های ماهانادیا و آتاوابانکی در هندوستان را با استفاده از پارامترهایی مانند اکسیژن محلول، هدایت الکتریکی، pH، دما و BOD بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که کیفیت آب رودخانه‌ها به دلیل فعالیت‌های انسانی و صنعتی تخریب شده است. فریادی و همکاران (۱۳۹۱) کیفیت آب رودخانه تجن را با استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که زمین‌شناسی منطقه مهمترین عامل موثر بر کیفیت آب رودخانه است. صادقی و همکاران (۱۳۹۴) کیفیت آب رودخانه زرین گل در استان گلستان را با استفاده از شاخص‌های کیفی مطالعه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد پارامترهای تاثیرگذار بر کیفیت آب رودخانه شامل کل جامدات محلول، کدورت، نیترات، درجه حرارت و کلی فرم مدفوعی است. همچنین کیفیت آب رودخانه برای کشاورزی مناسب بوده ولی برای مصارف شرب باید تصفیه شود. میرسجادی و همکاران (۱۳۹۴) از روش‌های آماری چندمتغیره و شاخص‌های اشباع در برررسی کیفیت آب زیرزمینی دشت مرند استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که عواملی مانند تغذیه از رودخانه، رسوبات آبخوان و تبخیر از آبخوان، ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی را تحت تاثیر قرار داده-اند. زهری شیل‌سر و غلامی سفیدکوهی (۱۳۹۴) هدایت هیدرولیکی اشباع خاک اراضی شمالی رودخانه-های قره سو-گرگانرود را با استفاده از توابع انتقالی مطالعه کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب منطقه به صورت توأمان تأثیر بیشتری بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک دارد و ترکیب این پارامترها در اعماق مختلف باعث افزایش دقت در تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع می-شود.

هدف از این تحقیق بررسی کیفیت، تکامل هیدروشیمیایی و عوامل موثر بر آب رودخانه هلیل رود در استان کرمان است. بدین منظور از تلفیقی از روش-های هیدروشیمیایی و آماری استفاده شده است. روش-های تفسیر داده‌های کیفی بکار گرفته شده در این تحقیق شامل نمودار سری مکانی، نمودار پایپر و شاخص اشباع مهمترین کانی‌های محلول در آب

[1] Water Quality Index (WQI)

هستند. این روش‌ها برای تعیین تعیین منشاء املاح مختلف در آب رودخانه و بررسی روند تکامل هیدروشیمیایی آب‌های سطحی حوزه آبریز رودخانه هلیل‌رود مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بدلیل حجم زیاد داده‌های هیدروشیمیایی این داده با استفاده از نرم‌افزار Spluss مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و از روش-های آماری مانند آنالیز خوشه ای و تحلیل عاملی جهت تعین عوامل موثر بر کیفیت آب‌های سطحی حوزه آبریز رودخانه و بررسی سهم عوامل مختلف در تعیین کیفیت آب استفاده شده است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

رودخانه هلیل رود پرآب‌ترین رودخانه استان کرمان بوده که از دامنه‌های جنوبی کوه‌های لاله‌زار و بیدخان سرچشمه می‌گیرد. شاخه‌های اولیه این رودخانه شامل رودخانه‌های سلطانی، بافت، رابر و سید مرتضی می‌باشند. این رودخانه پس از زهکشی فلات مرتفع بافت به سمت جنوب‌شرقی حوزه جازموریان غربی جریان می‌یابد. مسیر رودخانه در این بخش کاملاً کوهستانی است و در منتهی‌الیه این بخش سد مخزنی جیرفت واقع شده است. رودخانه پس از عبور از دره هلیل و شهر جیرفت وارد دشت رودبار شده و سپس در امتداد مشرق جریان یافته و به هامون جازموریان متصل می‌گردد. میانگین دبی سالانه رودخانه هلیل‌رود در ایستگاه کهنک شیبانی (آخرین ایستگاه هیدرومتری بر روی رودخانه هلیل) ۴۱۶/۸ میلیون متر مکعب می-باشد. طول رودخانه هلیل رود از سرچشمه تا هامون جازموریان ۴۴۰ کیلومتر و مساحت حوزه آبریز آن در حدود ۳۱۴۶۲ کیلومتر مربع است (مهندسین مشاور یکم، ۱۳۸۶). دوازده ایستگاه آبسنجی بر روی این رودخانه و سرشاخه‌های آن در استان کرمان در فاصله سال‌های ۱۳۴۹ تا ۱۳۵۷ احداث شده است. موقعیت این ایستگاه‌ها در شکل ۱ ارائه شده است.

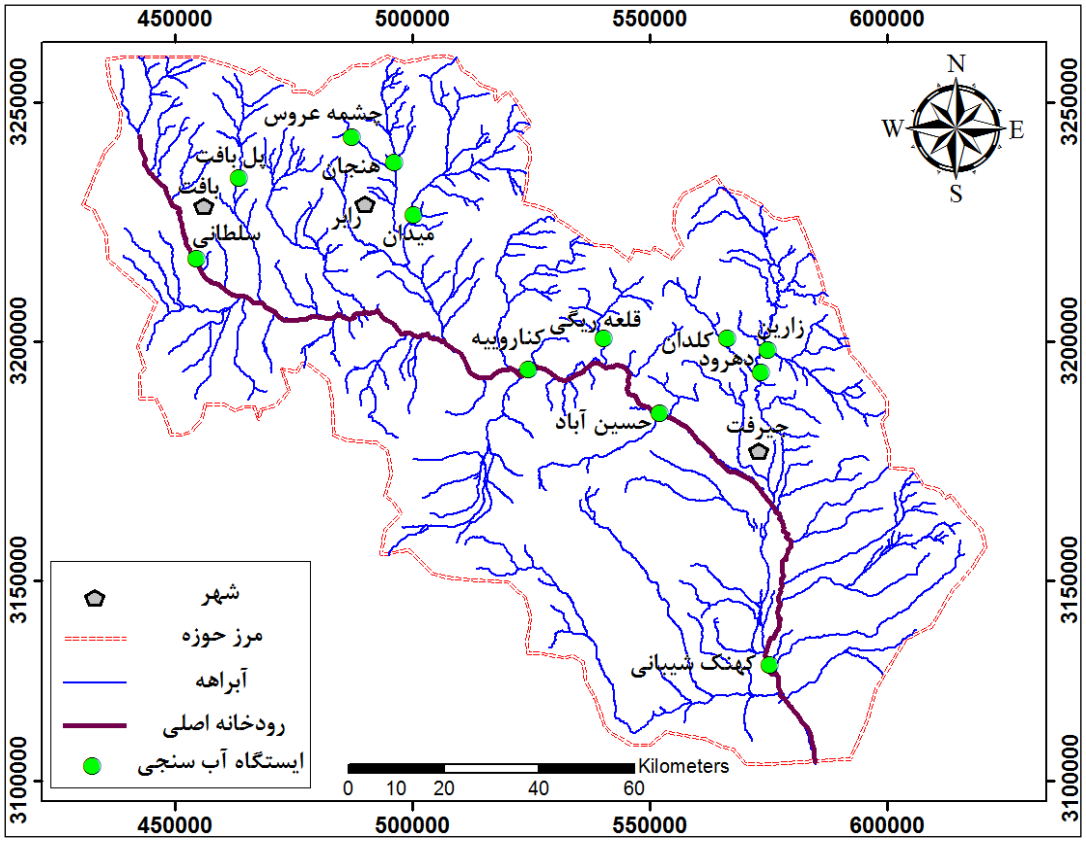
لیتولوژی سازندهای موجود در حوزه آبریز رودخانه هلیل رود ترکیبی از سنگهای دگرگونی (مرمر، شیست، آمفیبولیت و گنیس) سنگ‌های آذرین (گرانیت، دیوریت، آندزیت، گابرو و بازالت) و سنگ‌های رسوبی (آهک، ماسه سنگ، کنگلومرا، شیل و مارن ژیپس‌دار) است. بخشی از حوزه بخصوص در مناطق کم ارتفاع نیز از رسوبات آبرفتی پوشیده شده است (عباس‌نژاد، ۱۳۸۷).

### روش مطالعه

جهت بررسی کیفیت شیمیایی آب‌های سطحی در حوزه رودخانه هلیل رود از آمار کیفیت آب در دوازده ایستگاه آب‌سنجی استفاده شده است (شکل ۱). پارامترهای کیفی آب رودخانه شامل هدایت الکتریکی، مجموع مواد جامد محلول، کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی (شامل کلسیم، منیزیوم، سدیم، بی‌کربنات، سولفات و کلراید) در ایستگاه‌ها به صورت ماهانه اندازه‌گیری می-شود. از آنجایی که زمان تاسیس ایستگاه‌های آب‌سنجی متفاوت می‌باشد (۱۳۴۹ تا ۱۳۵۷)، جهت بررسی کیفیت آب رودخانه، یک دوره آماری مشترک که همه ایستگاه‌ها دارای داده‌های مناسبی بودند در نظر گرفته شد. این دوره آماری از فروردین‌ماه ۱۳۷۵ آغاز شده و تا فرودین ماه ۱۳۹۴ ادامه دارد. بدلیل حجم زیاد داده-ها، میانگین کیفیت شیمیایی آب رودخانه در ایستگاه-های آب‌سنجی محاسبه شده است (جدول ۱). جهت بررسی صحت آنالیز نمونه‌های آب از روش توازن جرمی طبق رابطه ۱ استفاده شده است. طبق این رابطه در صورتی که خطای آزمایش کمتر از پنج درصد باشد می‌توان به صحت آنالیزها اطمینان داشت (Todd and Mays, 2005).

$$Error = \frac{|\sum Cations - \sum Anions|}{\sum Cations + \sum Anions} \times 100 \qquad (1)$$

در این رابطه، Σ Cations و Σ Anions به ترتیب نشاندهنده مجموع کاتیون‌ها و مجموع آنیون ها است. نتایج حاصل از تعیین صحت آنالیز نمونه‌های آب در این مطالعه نشان داد که خطای آنالیز همه نمونه‌های آب رودخانه کمتر از پنج درصد است. بنابراین از نتایج آنالیز همه ایستگاه‌ها در این تحقیق استفاده شده است.

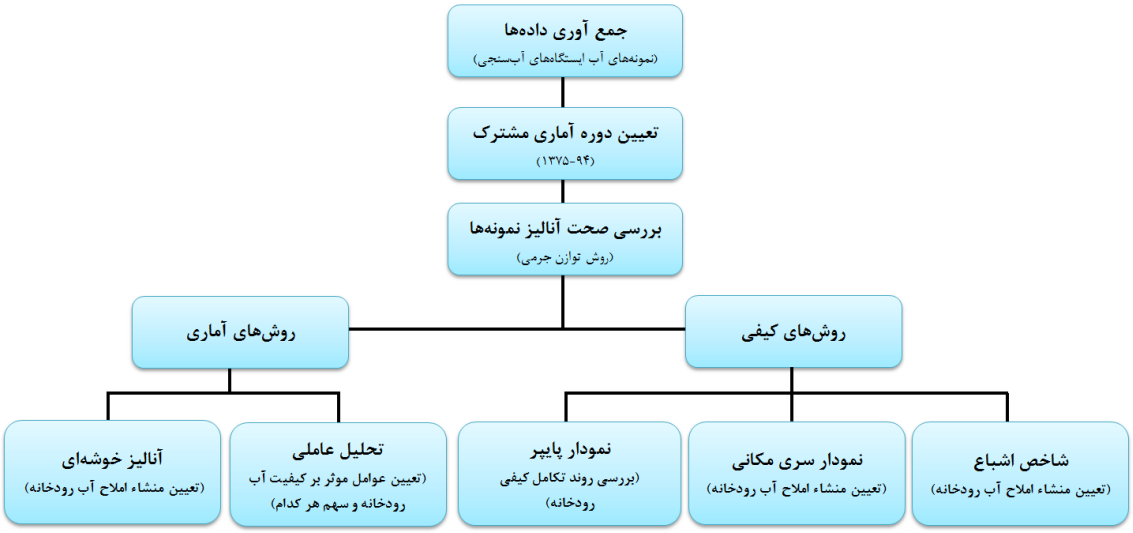



**شکل (۱): موقعیت ایستگاه‌های آب‌سنجی در منطقه مورد مطالعه**

**جدول (۱): میانگین نتایج آنالیز شیمیایی ایستگاه‌های آبسنجی رودخانه هلیل‌رود و سرشاخه‌های آن (دوره آماری۹۴ -۱۳۷۵)**

| نام ایستگاه | نام رودخانه | EC | pH | $HCO_3$ | Cl | $SO_4$ | Ca | Mg | Na |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | µmohs/cm | | meq/l | | | | | |
| سلطانی | سلطانی | ۷۵۱/۵۰ | ۷/۹۳ | ۴/۰۱ | ۱/۶۷ | ۲/۱۰ | ۲/۱۲ | ۱/۹۳ | ۳/۷۲ |
| پل بافت | بافت | ۴۵۴/۲۵ | ۷/۸۰ | ۳/۵۰ | ۰/۵۶ | ۰/۷۰ | ۲/۱۴ | ۱/۸۳ | ۰/۷۷ |
| چشمه عروس | رابر | ۴۵۳/۲۱ | ۷/۸۴ | ۳/۰۸ | ۰/۶۷ | ۰/۹۳ | ۲/۱۸ | ۱/۵۵ | ۰/۹۶ |
| کلدان | دلفارد | ۵۹۱/۰۶ | ۷/۶۴ | ۳/۶۷ | ۰/۷۹ | ۱/۷۶ | ۳/۲۴ | ۱/۸۱ | ۱/۱۴ |
| کناروئیه | هلیل | ۷۹۲/۶۳ | ۷/۷۳ | ۳/۱۹ | ۳/۰۶ | ۶/۰۶ | ۳/۲۶ | ۲/۴۰ | ۶/۶۸ |
| قلعه ریگی | رمون | ۵۶۶/۰۶ | ۷/۷۷ | ۲/۸۱ | ۰/۶۸ | ۲/۴۸ | ۲/۵۷ | ۱/۶۸ | ۱/۷۳ |
| میدان | سید مرتضی | ۴۳۲/۵۰ | ۷/۷۶ | ۲/۰۸ | ۰/۴۶ | ۱/۰۴ | ۲/۱۲ | ۱/۲۸ | ۱/۱۹ |
| هنجان | رودر | ۹۳۹/۱۲ | ۷/۶۹ | ۳/۷۲ | ۲/۳۴ | ۳/۷۵ | ۳/۵۶ | ۲/۵۹ | ۳/۶۳ |
| زارین | سغدر | ۹۳۹/۷۳ | ۷/۶۸ | ۴/۹۶ | ۲/۶۷ | ۲/۰۹ | ۲/۴۹ | ۲/۱۷ | ۵/۰۷ |
| حسین آباد | هلیل | ۸۴۲/۴۵ | ۷/۹۶ | ۲/۹۶ | ۱/۹۴ | ۳/۷۹ | ۲/۶۳ | ۱/۶۶ | ۴/۴۰ |
| دهرود | شور | ۱۲۴۲/۶۷ | ۷/۹۵ | ۳/۶۹ | ۵/۸۳ | ۳/۲۲ | ۲/۱۵ | ۱/۸۲ | ۸/۸۲ |
| کهنک شیبانی | هلیل | ۱۳۷۴/۶۴ | ۷/۸۲ | ۳/۶۴ | ۴/۲۰ | ۶/۵۶ | ۳/۰۱ | ۲/۶۲ | ۸/۷۶ |

در این مطالعه جهت تعیین تیپ آب در ایستگاه-های آب‌سنجی و بررسی روند تکامل کیفی آب رودخانه از نمودار پایپر استفاده شده است. بدلیل حجم زیاد داده‌های هیدروشیمیایی این داده با استفاده از نرم‌افزار Splussمورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و از روش-های آماری مانند آنالیز خوشه ای و تحلیل عاملی جهت تعین عوامل موثر بر کیفیت آب‌های سطحی حوزه استفاده شده است. شکل ۲ فلوچارت روش کار در این تحقیق را نشان می‌دهد.




**شکل(۲): فلوچارت روش تحقیق**

### دیاگرام پایپر

دیاگرام پایپر برای نمایش گرافیکی نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های آب، دسته بندی نمونه‌ها، تعیین تیپ و رخساره شیمیایی آب و بررسی روندهای تکامل کیفی نمونه‌های آب بکار برده می‌شود (Piper, 1944). این نمودار از دو مثلث و یک لوزی تشکیل شده است. یکی از مثلث‌ها مربوط به کاتیون‌ها و مثلث دیگر مربوط به آنیون‌ها است. درصد یون‌های مختلف روی مثلث‌ها علامتگذاری شده و نقاط متناظر مثلث‌ها بر روی لوزی میانی تصویر می‌شود. با توجه به موقعیت نمونه‌های آب روی دیاگرام پایپر می‌توان به طور تجربی منشاء نمونه‌های آب و واکنش‌های رخ داده در مسیر جریان آب را شناسایی کرد (Fetter, 2001). چهار نتیجه اساسی را می‌توان از دیاگرام پایپر استنباط کرد که عبارتند از نوع (تیپ) آب، رسوبگذاری یا انحلال، اختلاط و تبادل یونی. برای مثال اگر یک سری از نمونه‌های آب در امتدا یک خط راست قرار گیرند، این روند نشان‌دهنده رسوبگذاری یا انحلال است. اگر دو آب با یکدیگر مخلوط شوند، ترکیب آب اختلاطی روی یک خط راست منتهی به دو ترکیب آب اولیه قرار می-گیرد (Hounslow, 1995).

### شاخص اشباع[1] کانی‌ها

شاخص اشباع برای یک کانی از رابطه ۲ محاسبه می-شود :

$$SI = \log \frac{IAP}{Ksat} \quad (۲)$$

در این رابطه SI نشانده میزان شاخص اشباع، IAP اکتیویته کانی مورد نظر (ضریب فعالیت یونی) و Ksat ثابت تعادل برای انحلال یک کانی که معمولاً ضریب انحلال‌پذیری نامیده می‌شود. اگر مقدار شاخص اشباع کمتر از صفر باشد، نشان‌دهنده این است که آب نسبت به کانی مورد نظر تحت اشباع است و این کانی در حال انحلال در آب است. در صورتی که شاخص اشباع کانی بزرگتر از صفر باشد، آب نسبت به آن کانی

[1] Saturation Index

فوق اشباع بوده و کانی مورد نظر در حال رسوبگذاری در آب است. اگر شاخص اشباع برابر با صفر باشد نشان‌دهنده این است که آب نسبت به آن کانی اشباع و در حال تعادل است (Hounslow, 1995). در مباحث مربوط به شاخص اشباع ذکر این مطلب ضروری است که شاخص اشباع فقط نشان می‌دهد که چه واکنشی به لحاظ ترمودینامیکی اتفاق می‌افتد، ولی نرخ انجام فرآیند را مشخص نمی‌نماید (رحیمی، ۱۳۸۳). جهت محاسبه شاخص اشباع کانی‌ها در این مطالعه از نرم افزار PHREEQC استفاده شده است. شاخص اشباع کانی‌هایی مانند کلسیت، آراگونیت، دلومیت، ژیپس، انیدریت و هالیت با استفاده از نتایج آنالیز نمونه‌های آب محاسبه شده است. با استفاده از مقدار شاخص اشباع کانی‌ها در این تحقیق مشخص شده که وضعیت انحلال و رسوبگذاری کانی‌های مختلف در آب رودخانه-ها به چه صورت است.

### آنالیز خوشه‌ای[1]

آنالیز خوشه‌ای یک عنوان کلی برای یک سری از روش‌های ریاضی است که برای پیدا کردن شباهت بین افراد در یک مجموعه بکار می‌روند. هدف از آنالیز خوشه‌ای اولاً پیدا کردن دسته‌های واقعی افراد و ثانیاً کاهش تعداد داده‌ها است (قدیمی، ۱۳۹۵). در آنالیز خوشه‌ای هیچ فرض مرتبط با تعداد گروه‌ها یا ساختار آن‌ها وجود ندارد (اسلامیان و همکاران، ۱۳۸۴). در این مطالعه برای سنجش میزان تشابه متغیرهای کیفیت شیمیایی آب رودخانه‌ها و تعیین یون‌های مشابه از روش آنالیز خوشه‌ای و فاصله اقلیدسی آن‌ها استفاده شد. برای این‌کار از نرم‌افزار Spluss کمک گرفته شد. نتایج حاصل از آنالیز خوشه‌ای در این مطالعه یون‌های با رفتار مشابه در آب‌های سطحی حوزه را شناسایی کرده و می‌تواند به تعیین منشاء املاح آب کمک کند.

### تحلیل عاملی[2]

تحلیل عاملی یک روش آماری چند متغیره است که هدف آن ساده کردن روابط پیچیده ای است که بین متغیرهای مشاهده‌ای وجود دارد (قدیمی، ۱۳۹۵). این روش یک روش مفید برای تفسیر داده‌های کیفی آب و ارتباط دادن آنها با فرآیندهای خاص هیدرولوژیکی است. هدف اصلی از چنین آنالیزهایی یافتن چند عامل یا فاکتور است که می‌توانند پراکندگی داده‌های هیدروشیمیایی را توجیه کنند. در مطالعات کیفیت آب، نتایج آنالیزهای شیمیایی نمونه‌های آب به عنوان متغیرهای مشاهده‌ای در نظر گرفته می‌شود (رحیمی، ۱۳۸۳). همبستگی هر متغیر با هر عامل، بار عاملی[3] نامیده می‌شود (Jaukumar and Siraz, 1997). تفسیر و تعیین منشاء هر یک از فاکتورها بر اساس بارهای عاملی، شرایط هیدرولوژیکی، شرایط زمین‌شناختی و فرآیندهای هیدروشیمیایی صورت می-گیرد (قدیمی، ۱۳۹۵). هدف از بکارگیری روش تحلیل عاملی در این مطالعه، تعیین فاکتورها و عواملی است که بر کیفیت آب سطحی حوزه آبریز رودخانه هلیل‌رود تاثیر می‌گذارند.

## نتایج و بحث

### روند تکامل کیفی آب های سطحی

نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های آب رودخانه‌ها در جدول ۲ بیانگر این است که یون‌های سولفات و کلراید بیشترین و یون سدیم کمترین مقدار تغییرات را در آب‌های سطحی حوزه نشان می‌دهند. با توجه به نمودار پایپر میانگین آب ایستگاه‌های آب‌سنجی (شکل ۳)، تیپ آب در ایستگاه‌های سلطانی، پل بافت، چشمه عروس، زارین، کلدان و میدان بی‌کربناته است، این ایستگاه‌ها در سرشاخه‌های رودخانه هلیل رود در ارتفاعات منطقه قرار گرفته‌اند. تیپ آب در ایستگاه‌های هنجان، حسین‌آباد، قلعه‌ریگی، کناروئیه و کهنک شیبانی، سولفاته است، که مهمترین علت آن انحلال

[1] Cluster Analysis

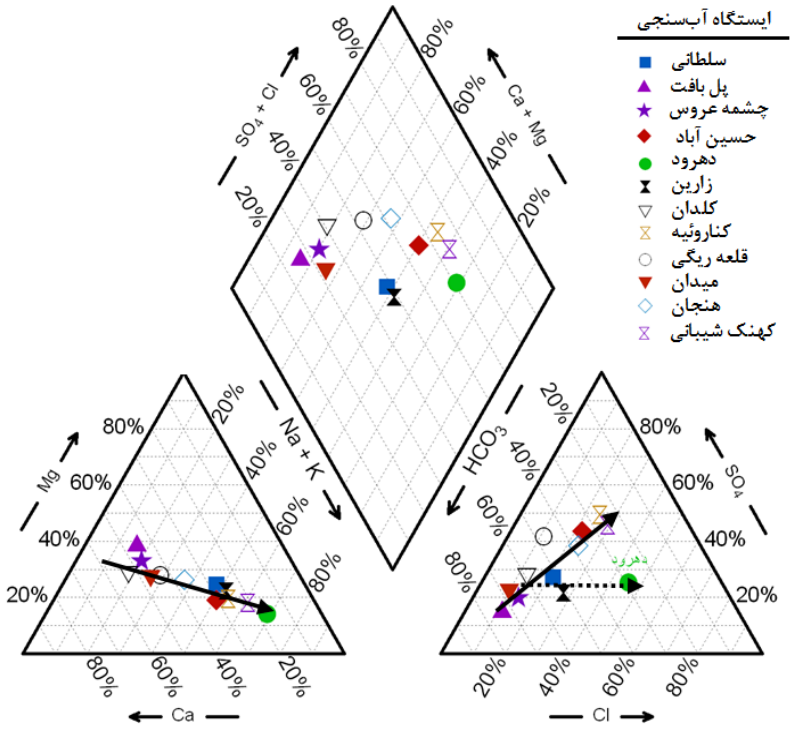
[2] Factor Analysis
[3] Factor loading

رسوبات سولفاته در مسیر رودخانه است. تیپ آب در ایستگاه دهرود کلروره است. با توجه به اینکه تیپ آب در ایستگاه‌های بالا دست آن (زارین و کلدان) بی-کربناته می‌باشد، مهمترین دلیل این امر تغییر اقلیم منطقه با ورود این شاخه از رودخانه به دشت جیرفت و انحلال کانی‌های تبخیری مانند هالیت (NaCl) در مسیر رودخانه است. ورود رودخانه از بخش کوهستانی به دشت و افزایش میزان تبخیر باعث ایجاد تیپ کلروره در این ایستگاه شده است. جهت مقایسه تبخیر در بخش کوهستانی و دشت از داده‌های ایستگاه‌های تبخیرسنجی زارین و حسین آباد استفاده شد. ایستگاه زارین در بخش کوهستانی قرار گرفته و ایستگاه حسین‌آباد در ابتدای دشت جیرفت واقع شده است. این مقایسه نشان داد که میزان تبخیر در دشت بیش از ۹۰۰ میلی‌متر بیشتر از بخش کوهستانی است. به علاوه مسیر رودخانه در بخش کوهستانی کم عرض بود و آب از میان مسیر نسبتاً تنگی عبور می‌کند اما با ورود آب به دشت، سطح بستر رودخانه افزایش یافته و با توجه به میزان تبخیر بالا در دشت، میزان یون کلراید محلول در آب رودخانه افزایش می‌یابد.

با توجه به نمودار پایپر (شکل ۳) روندهای تکاملی آب های سطحی در منطقه مورد مطالعه به شرح زیر است:

الف- افزایش یون سدیم نسبت به کلسیم و منیزیوم در مسیر رودخانه، که این موضوع بخوبی در مثلث مربوط به کاتیون‌ها در نمودار پایپر مشاهده می-شود.

ب- در مثلث آنیون‌ها دو روند مشهود است: ۱- روند اصلی در جهت افزایش سولفات آب در مسیر رودخانه اصلی است ۲- مسیر فرعی مربوط به تغییر رخساره از بی‌کربناته به کلروره در ایستگاه دهرود است.



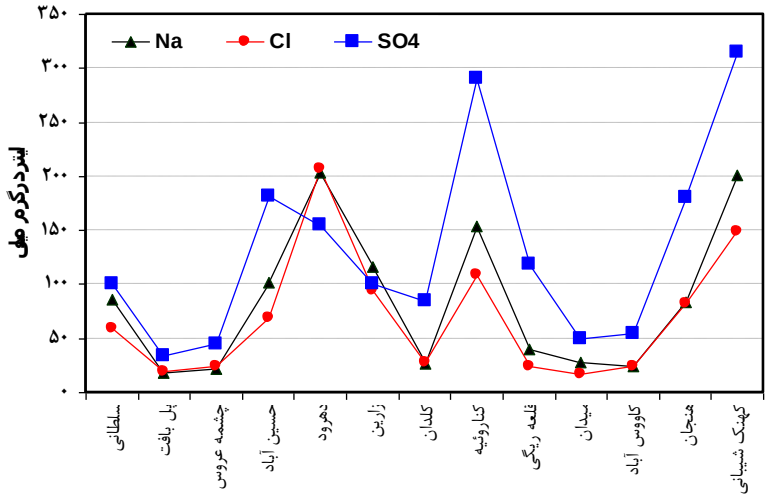

**شکل (۳): نمودار پایپر متوسط نمونه های آب در ایستگاه‌های آب‌سنجی در منطقه مورد مطالعه**

در شکل ۴، سری مکانی یون‌های سدیم، کلراید و سولفات ارائه شده است. همان‌طور که دراین شکل مشاهده می‌شود توزیع مکانی یون‌های سدیم و کلر شباهت بسیار زیادی با هم دارد. این موضوع نشان دهنده منشاء یکسان این دو یون در آب رودخانه‌ها است که می‌توان آن را به انحلال هالیت نسبت داد.

مقدار یون سدیم در بعضی از ایستگاه‌ها مانند حسین آباد و کناروئیه بیش از یون کلسیم می‌باشد و در ایستگاه کهنک شیباتی (آخرین ایستگاه) این اختلاف به بیش از ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد، مهمترین دلیل این موضوع وقوع فرآیند تبادل یونی است. در این فرآیند یون سدیم موجود در رسوبات و کانی‌های رسی جایگزین یون‌های کلسیم و منیزیوم آب رودخانه می‌شود. فرآیند تبادل یونی بر حسب واکنش زیر صورت می‌گیرد (Hounslow, 1995):

Na clay + Mg2+ === 2Na2+ + Mg Clay (۲)

در ایستگاه دهرود میزان اختلاف بین یون‌های کلراید و سدیم به کمترین مقدار خود (نزدیک به صفر) می‌رسد که تبخیر شدید و انحلال هالیت در آب رودخانه در محل این ایستگاه را تائید می‌کند. با توجه به شکل ۴ الگوی پراکندگی مکانی یون سولفات نیز شباهت زیادی را با یون سدیم نشان می‌دهد که می‌تواند بیانگر انحلال کانی‌های سولفاته غنی از سدیم در آب رودخانه باشد (Hounslow, 1995).



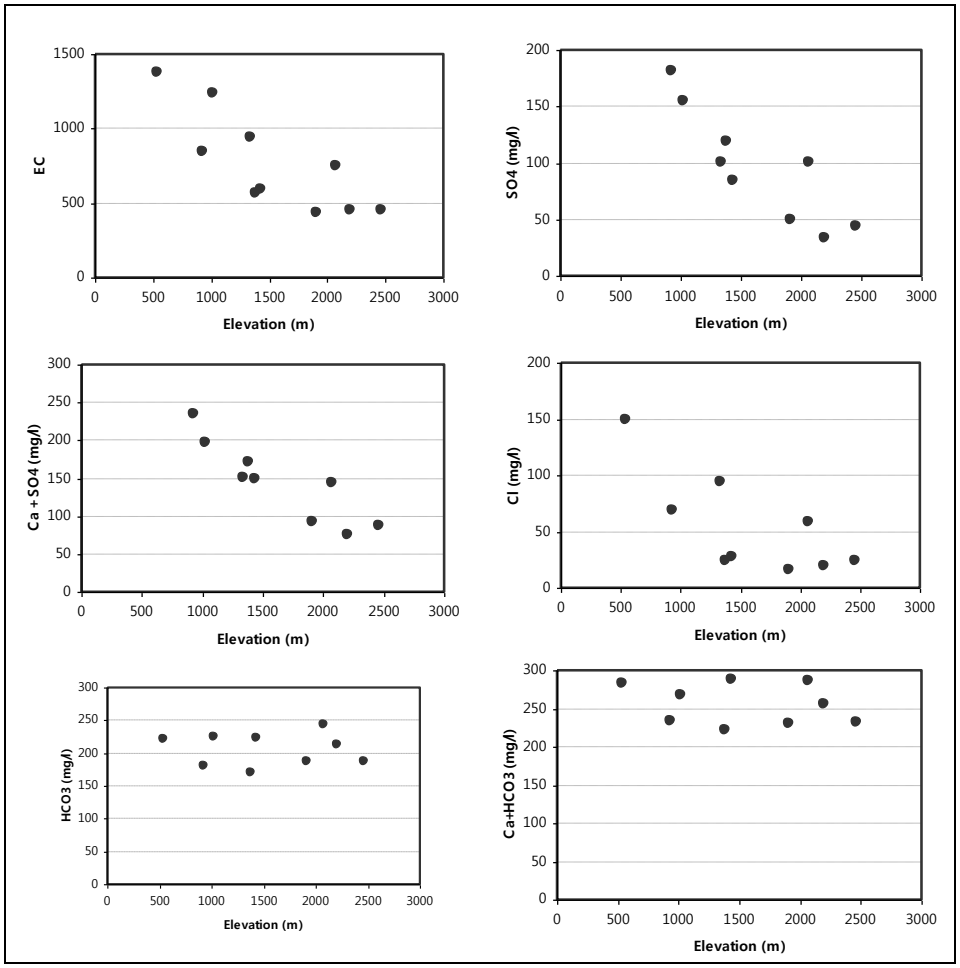

**شکل (۴): سری مکانی یون‌های سدیم، کلراید و سولفات نمونه‌های آب در ایستگاه‌های آب‌سنجی**

در شکل۵ میزان یون‌های محلول آب رودخانه در برابر ارتفاع ایستگاه‌های آب‌سنجی نشان داده شده است. مقدار هدایت الکتریکی و یون‌های سولفات و کلراید با افزایش ارتفاع ایستگاه‌های آبسنجی کاهش می‌یابد اما یون‌های بی‌کربنات و کلسیم روند خاصی با افزایش ارتفاع ایستگاه‌ها نشان نمی‌دهند، دلیل این موضوع به علت منشاء متفاوت این یون‌ها است. منشاء یون‌های سولفات و کلر سازندهای موجود در مسیر رودخانه است، بنابراین با افزایش مسیر جریان رودخانه (کاهش ارتفاع ایستگاه‌های آبسنجی) میزان این یون‌ها افزایش می‌یابد ولی منشاء یون بی‌کربنات عمدتاً بارندگی است. به همین دلیل روند تقریباً یکسانی در مقدار یون بی‌کربنات در ایستگاه‌های آبسنجی مشاهده می‌شود.

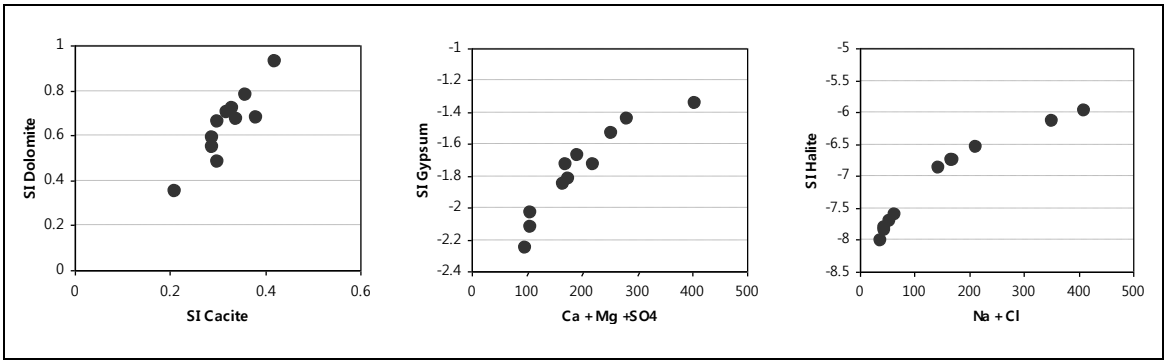
## شاخص اشباع کانی‌ها در آب رودخانه

شاخص اشباع کانی‌های کلسیت، دلومیت، آراگونیت، ژیپس، انیدریت و هالیت آب رودخانه در ایستگاه‌های آب‌سنجی محاسبه شده است. نتایج این محاسبات نشان داد که آب‌های سطحی حوزه آبریز رودخانه هلیل رود نسبت به کانی‌های کلسیت، دلومیت و آراگونیت فوق‌اشباع هستند، بنابراین این کانی‌ها عموماً در آب رودخانه‌ها در حال رسوبگذاری هستند. آب‌های سطحی منطقه مورد مطالعه نسبت به کانی‌های ژیپس، انیدریت و هالیت تحت اشباع هستند، بنابراین این کانی‌ها در آب رودخانه‌ها انحلال می‌یابند و دلیل اصلی ایجاد رخساره‌های سولفاته و کلروره در آب ایستگاه‌های آب‌سنجی منطقه مورد مطالعه می‌باشند.

در شکل ۶ روابط بین شاخص اشباع کانی‌ها و یون‌های موجود در آب رودخانه‌ها ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، رابطه مستقیمی بین شاخص اشباع کانی‌های کلسیت و دلومیت مشاهده می‌شود. از طرفی شاخص اشباع کانی‌های ژیپس و هالیت به ترتیب با افزایش یون سولفات و مجموع یون-های سدیم و کلر افزایش می‌یابند (شکل ۶).



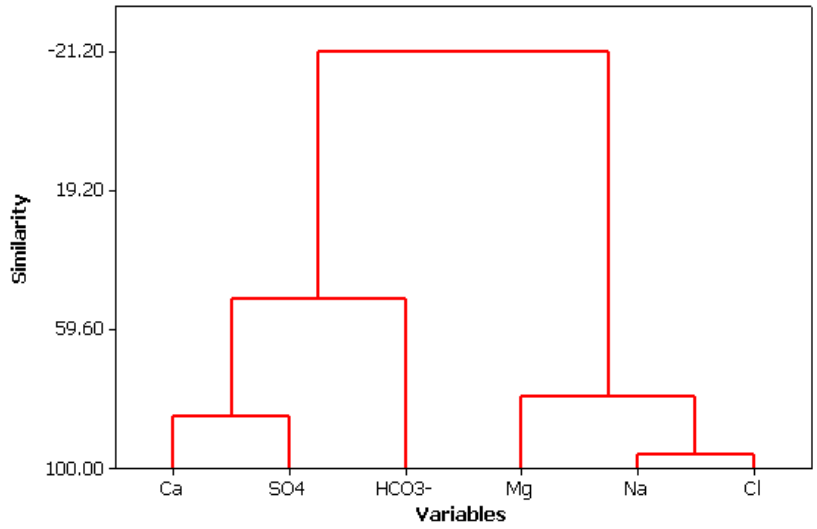

**شکل (۵): نمودارهای غلظت یون‌های مختلف آب‌های سطحی در مقابل ارتفاع ایستگاه‌های آب‌سنجی**




**شکل (۶): روابط بین شاخص‌های اشباع در ایستگاه‌های آب‌سنجی رودخانه هلیل رود**

### آنالیز خوشه‌ای

نمودار درختی تشابه یون‌های موجود در آب رودخانه‌ها در شکل ۷ ارائه شده است. با توجه به این نمودار، یون‌های سدیم و کلراید دارای بیشترین تشابه هستند. در مرحله بعدی یون‌های کلسیم و سولفات قرار دارند. این میزان تشابه زیاد می‌تواند نشان‌دهنده منشاء مشترک این یون‌ها باشد بطوریکه مورد اول را می‌توان به انحلال رسوبات تبخیری مانند هالیت و مورد دوم را می‌توان به انحلال رسوبات سولفاته مانند ژیپس و انیدریت نسبت داد. در واقع نتایج آنالیز خوشه‌ای متغییرهای کیفی آب‌های سطحی حوزه آبریز نشان-دهنده این است که انحلال رسوبات گچی (ژیپس و انیدریت) و رسوبات کلروره (هالیت) از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر کیفیت آب هستند.




**شکل (۷): نمودار درختی متغیرهای کیفیت شیمیایی متوسط آب رودخانه هلیل رود در ایستگاه‌های آب‌سنجی**

### تحلیل عاملی

اولین گام در روش تحلیل عاملی، تهیه یک ماتریس همبستگی از تمام متغیرهای مورد مطالعه می‌باشد (Guler et al., 2002). جـــدول ۲ ماتریس همبستگی پارامترهای شیمیایی نمونه آب ایستگاه‌های آب‌سنجی را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول بیشترین میزان همبستگی بین یون‌های سدیم و کلر مشاهده می‌گردد ($R^2$ =۰/۹۶). همبستگی خوبی نیز بین یون‌های کلسیم و منیزیوم ($R^2$ =۰/۷۱)، سدیم و سولفات ($R^2$ =۰/۸۱) و سولفات و کلراید (R2=۰/۶۸) وجود دارد که به‌نوعی نشان دهنده منشاء یکسان این یون‌ها است.

**جدول (۲): ماتریس ضرایب همبستگی پارامترهای شیمیایی نمونه آب ایستگاه‌های آب‌سنجی**

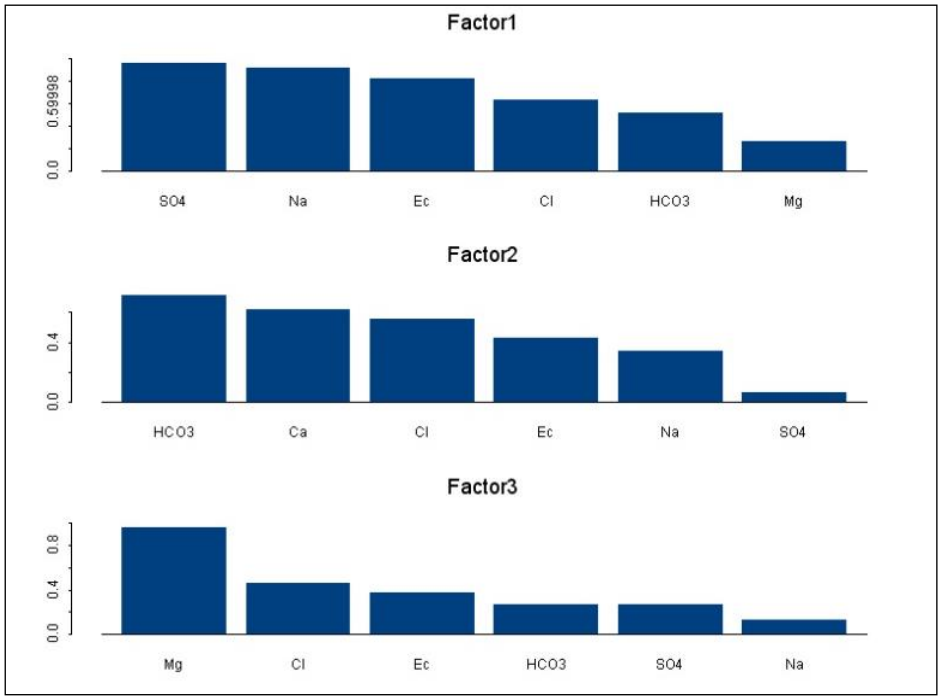
| | EC | pH | $Ca^{2+}$ | $Mg^{2+}$ | Na | $HCO_3^-$ | $Cl^-$ | $SO_4^{2-}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| EC | ۱ | | | | | | | |
| pH | ۰/۵۷ | ۱ | | | | | | |
| $Ca^{2+}$ | ۰/۰۵ | -۰/۴۱ | ۱ | | | | | |
| $Mg^{2+}$ | ۰/۳۵ | -۰/۳۶ | ۰/۷۱ | ۱ | | | | |
| $Na^+$ | ۰/۶۰ | -۰/۲۹ | ۰/۲۵ | ۰/۶۱ | ۱ | | | |
| $HCO_3^-$ | ۰/۴۵ | ۰/۱۵ | ۰/۰۴ | ۰/۴۴ | ۰/۳۱ | ۱ | | |
| $Cl^-$ | ۰/۶۵ | -۰/۱۸ | ۰/۱۹ | ۰/۵۴ | ۰/۹۶ | ۰/۳۵ | ۱ | |
| $SO_4^{2-}$ | ۰/۳۲ | -۰/۵۲ | ۰/۶۴ | ۰/۷۵ | ۰/۸۱ | -۰/۰۱ | ۰/۶۸ | ۱ |

گام دوم در تحلیل عاملی، مشخص کردن عوامل موثر بر متغیرهای آماری است. مدل عاملی بکار گرفته در این تحقیق شامل سه عامل و هشت متغیر است. نتایج حاصل از تحلیل عاملی برای ایستگاه‌های آب-سنجی در جدول ۳ ارائه شده است. برای مثال در ایستگاه آب‌سنجی سلطانی (شکل۸) این عامل‌ها حدود ۸۶٪ از کل میزان اشتراک را در بر دارند. بطوری که از این مقدار ۴۵٪ بوسیله عامل یک، ۲۱٪ توسط عامل دو و۲۰٪ بوسیله عامل سه تبیین می‌شود (جدول۳). بر این اساس عامل یک را می‌توان به فرآیند انحلال کانی-های سولفاته غنی از سدیم (ژیپس) نسبت داد، زیرا یون سولفات و سدیم دارای بار عاملی بالا هستند. عامل دوم را می‌توان به بارندگی نسبت داد زیرا یون‌های کلسیم و بی‌کربنات بار عاملی بالایی دارند. در عامل سوم، کلر بالاترین بار عاملی را نشان می‌دهد که نشان-دهنده انحلال کانی‌های کلروره باشد. عوامل مهم و موثر بر کیفیت آب به همین صورت برای سایر ایستگاه-ها تعیین شده‌اند (جدول ۳). با توجه به جدول ۳ مهمترین عوامل موثر بر کیفیت شیمیایی آب‌های سطحی حوزه آبریز رودخانه هلیل‌رود عبارتند از:

**بارندگی**: بارندگی یکی از مهمترین عوامل موثر بر کیفیت آب رودخانه هلیل است. در قسمت‌های مرتفع منطقه که میزان بارندگی بیشتر است، تاثیر بارندگی بر کیفیت شیمیایی آب نیز بیشتر است. برای مثال بارندگی در ایستگاه هنجان، که ارتفاع بیشتری نسبت به ایستگاه حسین آباد و کهنک شیبانی دارد، ۶۴ درصد از کل میزان اشتراک فاکتورهای موثر بر کیفیت آب را داراست، در حالی که این میزان در ایستگاه حسین آباد به ۳۸ درصد و در ایستگاه کهنک شیبانی به ۱۳ درصد از کل میزان اشتراک فاکتورها کاهش می‌یابد.

**انحلال کانی‌های سولفاته**: با توجه به جدول ۲ و ۳ انحلال کانی‌های سولفاته کلسیم دار، سدیم‌دار و منیزیوم‌دار کیفیت آب رودخانه‌ها را تحت تاثیر قرار داده است.

**انحلال کانی‌های کلروره**: بر اساس نتایج حاصله، انحلال کانی‌های کلروره و بخصوص هالیت نقش مهمی در تغییر کیفیت آب دارد به طوری‌که در ایستگاه دهرود باعث ایجاد تیپ کلروره سدیک شده است.




**شکل (۸): تعین عوامل موثر بر کیفیت آب ایستگاه سلطانی با استفاده از روش تحلیل عاملی**

**جدول (۳): نتایج حاصل از تحلیل عاملی نمونه‌های آب ایستگاه‌های آب‌سنجی**

| نام ایستگاه و رودخانه | عامل اول / درصد اشتراک | عامل دوم / درصد اشتراک | عامل سوم / درصد اشتراک |
|---|---|---|---|
| سلطانی (رودخانه سلطانی) | انحلال سولفات‌های سدیم دار ۴۵ | بارندگی ۲۱ | انحلال کانی‌های کلروره ۲۰ |
| پل بافت (رودخانه بافت) | انحلال کانی‌های کلروره ۳۵ | بارندگی ۲۳ | انحلال سولفات‌های سدیم‌دار ۲۱ |
| چشمه عروس (رودخانه رابر) | انحلال کانی‌های کلروره (هالیت) ۵۹ | انحلال سولفات‌های کلسیم دار ۱۹ | بارندگی ۱۶ |
| هنجان (رودخانه رودر) | بارندگی ۶۴ | انحلال سولفات‌های کلسیم دار ۱۷ | انحلال سولفات‌های منیزیوم دار ۱۷ |
| میدان (رودخانه سید مرتضی) | انحلال سولفات‌های سدیم دار ۳۲ | بارندگی ۰/۴۴ | |
| قلعه ریگی ( رودخانه رمون) | انحلال کانی‌های کلروره و سولفات‌های سدیم‌دار ۶۰ | انحلال سولفات‌های کلسیم دار ۱۹ | بارندگی ۱۵ |
| کناروئیه ( رودخانه هلیل) | انحلال سولفات‌های سدیم‌دار ۴۹ | انحلال سولفات‌های منیزیوم دار ۱۹ | بارندگی ۱۷ |
| کلدان (رودخانه دلفارد) | بارندگی ۲۹ | انحلال سولفات‌های منیزیوم دار ۲۸ | بارندگی ۱۶ |
| زارین (رودخانه سغدر) | انحلال کانی‌های کلروره (هالیت) ۵۱ | بارندگی ۳۷ | |
| دهرود (رودخانه شور جیرفت) | انحلال کانی‌های کلروره (هالیت) ۴۲ | انحلال سولفات‌های سدیم‌دار و کلسیم دار ۳۶ | |
| حسین آباد (رودخانه هلیل) | انحلال سولفات‌های سدیم‌دار ۵۳ | بارندگی ۳۸ | |
| کهنک شیبانی (رودخانه هلیل) | انحلال کانی‌های کلروره ۴۲ | انحلال سولفات‌های سدیم‌دار ۴۱ | بارندگی ۱۳ |

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق روند تکامل کیفی و عوامل موثر بر کیفیت آب‌های سطحی در حوزه آبریز رودخانه هلیل-رود، با استفاده از داده‌های آنالیز شیمیایی آب ایستگاه-های آب‌سنجی موجود در منطقه، بررسی شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که یون‌های سولفات و کلراید بیشترین و یون سدیم کمترین مقدار تغییرات را در آب‌های سطحی حوزه رودخانه هلیل‌رود نشان می‌دهند. همین یون‌ها نیز تعیین کننده تیپ آب رودخانه هستند. تیپ آب در ایستگاه‌های سلطانی، پل بافت، چشمه عروس، زارین، کلدان و میدان بی‌کربناته است که علت این موضوع قرار گرفتن این ایستگاه‌ها در سرشاخه‌های رودخانه هلیل رود و در ارتفاعات منطقه است. تیپ آب در ایستگاههای هنجان، حسین‌آباد، قلعه‌ریگی، کناروئیه و کهنک شیبانی سولفاته است، که مهمترین علت آن انحلال رسوبات سولفاته در مسیر رودخانه است و سرنجام تیپ آب در ایستگاه دهرود، به علت تبخیر زیاد و انحلال هالیت، کلروره است. با توجه به نتایج این تحقیق دو روند در تکامل هیدروشیمیایی در آب‌های سطحی منطقه مورد مطالعه می‌توان تشخیص داد: در مورد کاتیون‌ها، افزایش یون سدیم نسبت به کلسیم و منیزیوم در مسیر رودخانه مشاهده می‌شود. در مورد آنیون‌ها روند اصلی در جهت افزایش سولفات آب در مسیر رودخانه اصلی است و مسیر فرعی مربوط به تغییر رخساره از بی‌کربناته به کلروره در ایستگاه دهرود است. مهمترین دلیل این امر تغییر اقلیم منطقه با ورود این شاخه از رودخانه به دشت جیرفت و انحلال کانی‌های تبخیری مانند هالیت در مسیر رودخانه است. آب‌های سطحی منطقه مورد مطالعه نسبت به کانی‌های کلسیت، دلومیت و آراگونیت فوق‌اشباع بوده و بنابراین این کانی‌ها در آب رودخانه در حال رسوب‌گذاری هستند، اما آب رودخانه هلیل

نسبت به کانی‌های ژیپس، انیدریت و هالیت تحت اشباع است، بنابراین این کانی‌ها در آب رودخانه انحلال می‌یابند و دلیل اصلی ایجاد رخساره‌های سولفاته و کلروره در آب‌های سطحی حوزه رودخانه هلیل رود می‌باشند.

نتایج حاصل از آنالیز خوشه‌ای پارامترهای فیزیکوشیمیایی نمونه‌های آب رودخانه‌ها نشان داد که بیشترین میزان تشابه بین یون‌های سدیم و کلر وجود دارد. البته تشابه زیادی نیز بین یون‌های کلسیم، منیزیوم و سولفات وجود دارد که به نوعی نشان دهنده منشاء یکسان این یون‌ها است. با توجه به شرایط منطقه یکی از منابع مهم این یون‌ها را می‌توان انحلال کانی‌های سولفاته و کلروره دانست. این مورد موید مطالعات فریادی و همکاران (۱۳۹۱) و فخری و همکاران (۱۳۹۴) است. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل عامل، مهمترین عوامل موثر بر کیفیت آب رودخانه هلیل‌رود در محدوده مورد مطالعه بارندگی و انحلال رسوبات سولفاته و کلروره هستند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که بکارگیری روش‌های معمول تفسیر داده‌های کیفی آب همراه با روش‌های آماری، روش مناسبی جهت بررس کیفیت منابع آب است.

## منابع

اسلامیان، س.س.، س. سلطانی و ع. زارعی. ۱۳۸۴. کاربرد روش‌های آماری در علوم زیست محیطی. انتشارات ارکان. ۲۴۰ص.

حسینی، پ.، ا. ر. ایلدرومی و ا.ر حسینی. ۱۳۸۸. بررسی کیفیت آب رودخانه ی کارون با استفاده از شاخص NSFWQI در بازه زرنگان تا کوت امیر در دوره ۵ ساله. مجله انسان و محیط زیست، سال یازدهم، شماره ۲۵، ص ۱۱-۱.

رحیمی، م.ح. ۱۳۸۳. بررسی هیدروژئولوژیکی دشت‌های زویرچری و خران. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز.

زهری شیل‌سر س. و م.ع. غلامی سفیدکوهی.۱۳۹۴. توسعه توابع انتقالی با استفاده از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی اعماق مختلف خاک جهت برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع. نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک، جلد ۲۲، شماره۳، ص ۳۷-۲۱.

صادقی، م.، ا. بای، ن. بای، ن. سفلایی، م. ه. مهدی نژاد و م. ملاح. ۱۳۹۴. تعیین وضعیت کیفیت آب رودخانه زرین گل استان گلستان با کاربرد شاخص کیفی آب (NSFWQI) و شاخص کیفیت آبهای سطحی ایران (IRWQI). فصلنامه بهداشت در عرصه، دوره سوم، شماره ۳، ص ۳۳-۲۷.

عباس نژاد، ا. ۱۳۸۷. پهنه بندی خطر سیل در حوضه آبریز هلیل رود با استفاده از GIS. گزارش طرح تحقیقاتی، دانشگاه شهید باهنر، ۳۰۹ ص.

فخری، م.س.، ا. اصغری مقدم و م. نجیب. ۱۳۹۴. کاربرد آنالیزهای چندمتغیره و شاخص‌های اشباع در ارزیابی کیفی آب‌های زیرزمینی دشت مرند. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۲۲، شماره ۶، ص ۱۳۳-۱۱۷.

فریادی، س.، ک. شاهدی و م. نباتپور. ۱۳۹۱. مطالعه پارامترهای کیفیت آب رودخانه تجن با استفاده از تکنیک‌های آماری چند متغیره. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز سال سوم، شماره ۶، ص۹۲ -۷۵.

قدیمی، ف. ۱۳۹۵. کاربرد روش‌های آماری چند متغیره در تحلیل داده‌های علوم زمین و محیط زیست. انتشارات دانشگاه صنعتی اراک، ۲۵۰ ص.

مهندسین مشاور یکم. ۱۳۸۶. مطالعات زیست محیطی حوزه جارموریان غربی، مطالعات هیدرولوژی. ۷۰۰ص.

Dodds, W.K. 2002. Freshwater Ecology: Concepts and Environmental Applications. Academic press, 456 p.

Fetter, C.W. 2001. Applied Hydrogeology. Prentice Hall Publishers.
Guler, C., G. D. Thyne, J. E. McCray and A. K. Turner. 2002. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. Hydrogeology, 10: 455-474.
Hounslow, A.W. 1995. Water Quality Data Analysis and Interpretation. CRC Press LLC, Lewis Publishers.
Jaukumar, R. and L. Siraz. 1997. Hydrogeochemical evaluation of coastal aquifers using factor analysis. Environmental Geology, 31:174-177.
Piper A.M. 1944. A graphic procedure in geochemical interpretation of water analyses. Transactions American Geophysical Union journal, 25: 914–923.
Razmkhah, H., A. Abrishamchi and A. Torkian. 2010. Evaluation of spatial and temporal variation in water quality by pattern recognition techniques: A case study on Jajrood River (Tehran, Iran). Environmental Management, 91: 852- 860.
Samantray, P., K. B. Mishra, R. P. Chitta and P. R. Swoyam. 2009. Assessment of water quality index in Mahanadi and Atharabanki Rivers and Taldanda Canal in Paradip area, Indian Journal of Human Ecology, 26(3): 153-161.
Simeonov, V., J.A. Stratis, C. Samara, G. Zachariadis, D. Voutsa, A. Anthemidis, M. Sofoniou and Th. Kouimtzis. 2003. Assessment of the surface water quality in northern Greece. Water Research, 37: 4119-4124.
Singh, K.P., A. Malik, D. Mohan and S. Sinha. 2004. Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India): A case study. Water Research, 38(18):3980-92.
Todd, D.K., L.W. Mays. 2005. Groundwater Hydrology. 3rd Edition. John Wiley & Sons polishers.

# Assessing the hydrochemical evolution of surface waters in Halilrood basin: The use of physicochemical parameters and multivariate statistical techniques

**M. Faryabi**[1]

**Abstract**

The Halilrood River is the most important river in the Kerman province and plays an important role in supplying the water needs. Thus, the study of this river quality has a particular importance. This study investigates the hydrochemical evolution of surface waters in Halilrood river basin using chemical analysis of water samples in 12 hydrometric stations. The commonly used hydrochemical methods and statistical techniques were used to this aim. Hydrochemical diagrams such as Piper diagram and series plots were used to evaluate the water quality changes along the river course. The PHREEQC code was used to investigate the interaction between the rocks, sediments and river water. The saturation indexes were calculated for the most important dissolved minerals in river water. Also, the multivariate statistical techniques such as cluster analysis and factor analysis were used to determine factors affecting river water quality. The results of this study show that the total dissolved solids in the river water increases from the highlands to the plains (Due to the dissolution of the rocks and sediments in the river course). Based on the results of this study, the dissolution of rocks and sediments in river water, precipitation and surface evaporation are the most important factors affecting the surface waters quality in the study area.

**Keywords: Halilrood River, Hydrochemical evolution, Statistical methods, Water quality.**

[1] Assistant professor, College of Natural Resources, University of Jiroft, Tell: 989133494694, Email: Faryabi753@yahoo.com