

الله الرحمن الرحيم



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده علوم زمین

رساله دکتری هیدروژئولوژی

عنوان:

هیدرواستراتیگرافی سازند تیرگان در بخشی از کپه‌داغ (شمال شرق بجنورد)

دانشجو:

فیروز شکیبا

استاد راهنما:

دکتر غلامحسین کرمی

استاد مشاور:

دکتر عزیزالله طاهری

اسفند ماه ۱۳۹۹



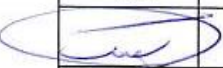
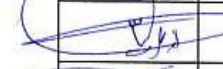
|         |             |                                                                                     |
|---------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| شماره:  |             |  |
| تاریخ:  | باسمه تعالی |                                                                                     |
| ویرایش: |             | مدیریت تحصیلات تکمیلی                                                               |

|                                                                                     |                   |         |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------|
| شماره: ۰۰۲۸۰                                                                        | تاریخ: ۱۳۹۹/۰۲/۱۹ | ویرایش: |
|  |                   |         |
| مدیریت تحصیلات تکمیلی                                                               |                   |         |

فرم شماره ۱۱: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)  
(تعیین درجه نمره رساله برای ورودی‌های ۹۴ و سال‌های قبل از آن)

بدینوسیله گواهی می‌شود آقای فیروز شکبیا دانشجوی دکتری رشته زمین‌شناسی آب‌شناسی به شماره دانشجویی ۹۳۰۰۷۹۵ و ورودی مهر ماه سال ۱۳۹۳ در تاریخ ۱۳۹۹/۱۲/۰۶ از رساله نظری ☐ عملی ☒ خود با عنوان: هیدرواستراتیگرافی سازند تیرگان در بخشی از کپه داغ (شمال شرق بجنورد) دفاع و با اخذ نمره ..... به درجه ..... نائل گردید.

|                                                                |                                                            |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹ <input checked="" type="checkbox"/> | ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷ <input type="checkbox"/> |
| ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵ <input type="checkbox"/>          | د) مردود: کمتر از ۱۵ <input type="checkbox"/>              |

| ردیف | هیئت داوران                    | نام و نام خانوادگی   | مرتبه علمی | امضاء                                                                               |
|------|--------------------------------|----------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| ۱    | استاد راهنمای اول              | دکتر غلاحسین کرمی    | دانشیار    |  |
| ۳    | استاد مشاور اول                | دکتر عزیزالله طاهری  | استاد      |  |
| ۵    | استاد مدعو خارجی               | دکتر حسین وزیری مقدم | استاد      |  |
| ۶    | استاد مدعو خارجی               | دکتر حسین محمدزاده   | استاد      |  |
| ۷    | استاد مدعو داخلی               | دکتر هادی جعفری      | دانشیار    |  |
| ۸    | نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده | دکتر مهدی جعفرزاده   | استادیار   |  |

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای فیروز شکبیا بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

  
۱۳۹۹/۰۲/۱۹



تقدیم به:

همسرم

همراه مهربان و صبور زندگیم

## سپاسگزاری

سپاس پروردگار بزرگ که مرا یاری رساند تا بتوانم گامی کوچک در راه علم و دانش بردارم. سپاسگزارم از استاد راهنما، دانشمند فرهیخته جناب آقای دکتر غلامحسین کرمی که معلم علم و اخلاق است و از محضر پرفیض ایشان بهره‌ها بردم و اگر نبود اشارات و رهنمودهای ایشان انجام این پایان نامه امکان‌پذیر نمی‌شد. قدردانی می‌کنم از جناب آقای دکتر طاهری استاد برجسته دانشکده علوم که شاگردی در محضرشان از بزرگ‌ترین افتخارات زندگی علمی من است.

با تقدیر و درود فراوان خدمت پدر و مادر بسیار عزیزم که فروغ چشمانشان را فراسوی من نهادند تا افق روشنی را ترسیم کنم. دستان پر مهرشان را می‌بوسم. از همسر مهربان و دختران نازنینم که همیشه در کنار من بودند و در این چند سال با بردباری و مهربانی‌هایشان سختی راه را بر من هموار کردند سپاسگزارم. هم چنین از اعضای هیئت داوران که نظرات ایشان در غنای رساله بسیار موثر افتاد سپاسگزارم.

از همه دوستان و همکلاسی‌هایم که در کنار آنها روزهای خوشی سپری شد سپاسگزارم. از دوست و همکار گرامی جناب آقای مهندس صمدی به خاطر همراهی در عملیات صحرایی تشکر می‌کنم.

خدایا مرا یاری کن تا از اندک دانشی که به من دادی در آبادانی میهن عزیزم بهره جویم. در پایان و با احترام بار دیگر از پدر و مادر گرامیم، همسر صبور و مهربانم و فرزندان نازنینم به سبب دلگرمی‌هایشان سپاسگزارم.

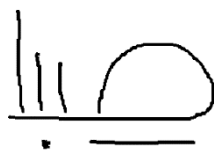
تو خشنود باشی و ما رستگار

خدایا چنان کن سرانجام کار

برگ اصالت و مالکیت اثر

اینجانب فیروز شکبیا دانشجوی دوره دکتری رشته زمین‌شناسی - هیدروژئولوژی دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده پایان نامه "هیدرواستراتیگرافی سازند تیرگان در بخشی از کپه‌داغ (شمال شرق بجنورد)" به راهنمایی جناب آقای دکتر غلامحسین کرمی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام دانشگاه صنعتی شاهرود یا (Shahrood University of Technology) به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در بدست آوردن نتایج اصلی این پایان نامه تاثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج شده از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده گردیده ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل راز داری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.



امضاء دانشجو: فیروز شکبیا

تاریخ ۱۳۹۹/۱۱/۰۶

#### مالکیت و نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد، این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد

سازند کربناته تیرگان در زون ساختاری کپه‌داغ حاوی منابع آب زیرزمینی قابل توجهی است. به منظور بررسی هیدرواستراتیگرافی و تفکیک لایه‌های تراوا در سازند تیرگان این مطالعه انجام شده است. یک برش چینه‌شناسی در شمال شرق بجنورد انتخاب شده و از ۹۰ برش نازک سنگ برای تحلیل محیط رسوبی، از اطلاعات لاگ‌های ژئوفیزیک درون‌چاهی، اطلاعات ۲۷۰ درزه در سه ایستگاه، آزمایش‌های پمپاژ پله‌ای در کنار یکدیگر استفاده شده است. سازند تیرگان یک سازند همگن نبوده بلکه از پنج واحد سنگی با تراوایی متفاوت تشکیل شده است. این واحدهای سنگی از قدیم به جدید شامل واحدهای آهکی، مارنی-آهکی، آهکی، مارنی-آهکی و آهکی می‌باشند. نتایج به‌دست آمده از بررسی‌های گوناگون نشان می‌دهد که خلوص لایه‌های آهکی بالایی بیشتر شده است. ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی سازند تیرگان در افق‌های مختلف متفاوت بوده که ناشی از نقش پارامترهای چینه‌شناسی سازند است. با توجه به داده‌های پمپاژ آنالیز شده، بیشترین و کمترین مقادیر قابلیت انتقال حدود ۱۰۴۰ و ۱۳۰ متر مربع بر روز برآورد شده‌اند. هم‌چنین مقادیر هدایت هیدرولیکی حداکثر و حداقل به ترتیب حدود ۱۵ و ۱/۲ متر بر روز محاسبه شده‌اند. عمده‌ترین دلیل اختلاف زیاد پارامترهای هیدرولیکی در این منطقه به تاثیر پارامترهای چینه‌شناسی مربوط می‌شود. با استفاده از روش ترسیمی ارائه شده به وسیله کرمی (Karami 2002)، شاخص مجرای کارست (Karst conduit index) که بیان کمی سیستم غالب جریان است، در این تحقیق معرفی شده است. این شاخص بین کرانه +۱ و -۱ قرار می‌گیرد که مقادیر بین صفر و +۱ غلبه جریان مجرای و مقادیر بین صفر و -۱ غلبه جریان افشان را بیان می‌کنند. نتایج به‌دست آمده از ارزیابی شاخص مجرای کارست در محدوده چاه‌های پمپاژ منطقه بیانگر این مطلب هستند که جریان غالب افشان می‌باشد. در این مطالعه و برای اولین بار یک شاخص جدید برای ارزیابی کمی پارامترهای چینه‌شناسی تاثیرگذار بر خصوصیات هیدرولیکی کارست معرفی شده که "شاخص چینه‌شناسی (Stratigraphic index)" نامیده شده است. این شاخص تاثیر ویژگی‌های مهم چینه‌شناسی مانند ضخامت، لایه‌بندی و شیب لایه را بر روی خصوصیات هیدرولیکی کارست به صورت کمی محاسبه می‌کند. ارزیابی‌های انجام شده بیانگر این است که درجه ناهمگنی، بعد جریان، شاخص مجرای کارست، آبدهی چاه، افت ویژه و قابلیت انتقال آبخوان با شاخص چینه‌شناسی روابط معنی‌داری را نشان می‌دهند. در نهایت، می‌توان این چنین اظهار نظر نمود که ارزیابی اولیه پارامترهای چینه‌شناسی و کاربرد معیاری نظیر شاخص چینه‌شناسی می‌تواند به مکان‌یابی دقیق‌تر حفر چاه در آبخوان‌های کارستی کمک شایانی نماید.

**واژه‌های کلیدی:** هیدرواستراتیگرافی، سازند تیرگان، شاخص چینه‌شناسی، کپه‌داغ

## مقاله‌های استخراج شده از پایان نامه

۱- شکیبا، ف.، کرمی، غ.، طاهری، ع.، ۱۳۹۸. بررسی نقش چینه‌شناسی سازند تیرگان در آبدهی چاه‌های آب در شمال و شرق بجنورد، مجله علمی - پژوهشی، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، دانشگاه اصفهان، دوره ۳۵، شماره ۱ صفحه ۱۰۸-۹۱

<http://dx.doi.org/10.22108/jssr.2019.116167.1091>

۲- شکیبا، ف.، کرمی، غ.، طاهری، ع.، ۱۳۹۹. بررسی تاثیر محیط رسوبی و دیاژنز در پتانسیل توسعه کارست در سازند تیرگان در غرب کپه‌داغ (شمال شرق بجنورد) مقالات آماده انتشار، پذیرفته شده، انتشار آنلاین از تاریخ ۲۰ دیماه ۱۳۹۹

**Doi: 10.22084/PSJ.2021.21764.1240**

۳- تعیین ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی بخشی از سازند تیرگان با استفاده داده‌های آزمایش پمپاژ. فیروز شکیبا، غلامحسین کرمی، عزیزالله طاهری، ارسال شده به مجله پژوهش آب ایران.

۴- ارزیابی رابطه بین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان کارستی با چینه‌شناسی، مطالعه موردی: سازند تیرگان، خراسان شمالی. فیروز شکیبا، غلامحسین کرمی، عزیزالله طاهری، ارسال شده به مجله هیدروژئولوژی.

## فهرست مطالب

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| فصل اول: مقدمه .....                                                          | ۱  |
| ۱-۱ بیان مسئله .....                                                          | ۱  |
| ۲-۱ هدف از انجام تحقیق .....                                                  | ۳  |
| ۳-۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه .....                                  | ۴  |
| ۴-۱ هواشناسی منطقه مورد مطالعه .....                                          | ۵  |
| ۵-۱ زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه .....                                        | ۷  |
| ۵-۱-۱ چینه‌شناسی منطقه .....                                                  | ۸  |
| ۵-۱-۲ زمین‌شناسی ساختاری منطقه مورد مطالعه .....                              | ۱۶ |
| ۶-۱ ژئومورفولوژی محدوده مورد مطالعه .....                                     | ۲۰ |
| ۷-۱ هیدرولوژی منطقه .....                                                     | ۲۱ |
| ۸-۱ هیدروژئولوژی منطقه .....                                                  | ۲۲ |
| فصل دوم: مروری بر مطالعات پیشین در ارتباط با نقش چینه‌شناسی در توسعه کارست .. | ۲۵ |
| ۱-۲ آبخوان‌های کارستی و اهمیت آنها .....                                      | ۲۵ |
| ۱-۱-۲ تعریف کارست .....                                                       | ۲۶ |
| ۲-۱-۲ طبقه‌بندی آبخوان‌های کارستی .....                                       | ۲۶ |
| ۳-۱-۲ جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های کارستی .....                            | ۲۷ |
| ۴-۱-۲ اهمیت آبخوان‌های کارستی .....                                           | ۲۸ |
| ۲-۲ انواع سنگ‌های کربناته و پتانسیل انحلال آنها .....                         | ۲۸ |
| ۱-۲-۲ سنگ‌های آهکی .....                                                      | ۲۹ |
| ۲-۲-۲ آهک‌های مارنی .....                                                     | ۳۰ |
| ۳-۲-۲ دولومیت‌ها .....                                                        | ۳۰ |
| ۳-۲ ارزیابی نقش چینه‌شناسی در توسعه آبخوان‌های کارستی .....                   | ۳۱ |
| ۱-۳-۲ نقش چینه‌شناسی در تغذیه آبخوان‌های کارستی .....                         | ۳۲ |
| ۲-۳-۲ نقش چینه‌شناسی در کنترل جریان .....                                     | ۳۲ |
| ۳-۳-۲ نقش چینه‌شناسی در ناهمگنی آبخوان کارستی .....                           | ۳۵ |
| ۴-۲ تعیین تراوایی آبخوان‌های کارستی .....                                     | ۳۶ |
| ۱-۴-۲ آزمایش پمپاژ .....                                                      | ۳۷ |
| ۲-۴-۲ چاه پیمایی .....                                                        | ۳۹ |
| ۳-۴-۲ هیدرواستراتیگرافی .....                                                 | ۴۳ |

## فصل سوم: روش انجام کار ..... ۴۸

- ۳-۱ جمع آوری آمار، اطلاعات و مطالعات انجام شده در منطقه ..... ۴۸
- ۳-۲ مطالعات چینه‌شناسی ..... ۴۹
- ۳-۲-۱ اندازه‌گیری برش چینه‌شناسی انتخاب شده ..... ۵۰
- ۳-۲-۲ نمونه‌برداری و مطالعه مقاطع نازک ..... ۵۰
- ۳-۲-۳ بررسی موقعیت چینه‌شناسی چاه‌های حفاری شده در سازند تیرگان ..... ۵۰
- ۳-۳ بررسی لاگ‌های ژئوفیزیکی چاه‌های حفاری شده در سازند تیرگان ..... ۵۱
- ۳-۳-۱ تعیین نوع واحدهای سنگی ..... ۵۱
- ۳-۳-۲ تقسیم‌بندی توالی چینه‌شناسی سازند تیرگان در برش مورد مطالعه ..... ۵۳
- ۳-۳-۳ برآورد تراوایی ..... ۵۴
- ۳-۴ بررسی داده‌های آزمایش پمپاژ چاه‌های حفاری شده در سازند تیرگان ..... ۵۴
- ۳-۴-۱ برآورد تراوایی واحدهای سنگی ..... ۶۰
- ۳-۴-۲ بررسی آبدهی چاه‌ها ..... ۶۰
- ۳-۴-۳ تعیین سیستم غالب جریان ..... ۶۱
- ۳-۵ تلفیق اطلاعات چینه‌ای، ژئوفیزیک و پمپاژ به منظور ارزیابی هیدرواستراتیگرافی سازند تیرگان ..... ۶۳

## فصل چهارم: ارزیابی هیدرواستراتیگرافی سازند تیرگان ..... ۶۴

- ۴-۱ بررسی چینه‌شناسی سازند تیرگان ..... ۶۴
- ۴-۱-۱ بررسی چینه‌شناسی برش مطالعه شده ..... ۶۴
- ۴-۱-۲ تطابق برش مورد مطالعه با سایر برش‌های سازند تیرگان ..... ۶۶
- ۴-۱-۳ ارزیابی توالی‌های چینه‌ای ..... ۷۲
- ۴-۱-۴ ارزیابی ناپیوستگی‌ها ..... ۷۵
- ۴-۲ بررسی محیط رسوبی سازند تیرگان ..... ۷۵
- ۴-۲-۱ بررسی ریزرخساره‌ها ..... ۷۵
- ۴-۲-۲ بررسی رخدادهای دیاژنز ..... ۸۱
- ۴-۲-۳ ارزیابی محیط رسوبی سازند تیرگان ..... ۸۶
- ۴-۳ بررسی عوارض کارستی و خصوصیات سیستم ورودی در سازند تیرگان ..... ۸۹
- ۴-۳-۱ عوارض کارستی سازند تیرگان ..... ۸۹
- ۴-۳-۲ ارزیابی نوع نفوذ در سازند تیرگان ..... ۹۴
- ۴-۴ بررسی لاگ‌های ژئوفیزیکی چاه‌های حفاری شده در سازند تیرگان ..... ۹۸
- ۴-۴-۱ تعیین نوع واحدهای سنگی ..... ۱۰۵
- ۴-۴-۲ زون‌بندی ستون چینه‌شناسی سازند تیرگان ..... ۱۰۶
- ۴-۴-۳ ارزیابی تراوایی مناطق مختلف ..... ۱۰۹

|                                           |                                                                    |     |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----|
| ۵-۴                                       | بررسی داده‌های آزمایش پمپاژ چاه‌های حفاری شده در سازند تیرگان..... | ۱۱۰ |
| ۴-۵-۱                                     | برآورد تراوایی واحدهای سنگی .....                                  | ۱۱۴ |
| ۴-۵-۲                                     | بررسی توان آبدهی چاه‌ها.....                                       | ۱۱۵ |
| ۴-۵-۳                                     | تعیین سیستم غالب جریان .....                                       | ۱۱۷ |
| ۴-۶-۱                                     | ارزیابی کمی هیدرواستراتیگرافی سازند تیرگان .....                   | ۱۱۹ |
| ۴-۶-۱                                     | معرفی شاخص چینه‌شناسی .....                                        | ۱۱۹ |
| ۴-۶-۲                                     | ارزیابی رابطه خصوصیات هیدرولیکی با شاخص چینه‌شناسی .....           | ۱۲۰ |
| فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها..... ۱۲۶ |                                                                    |     |
| ۵-۱                                       | نتیجه‌گیری .....                                                   | ۱۲۷ |
| ۵-۱-۱                                     | هیدرواستراتیگرافی واحدهای سنگی سازند تیرگان .....                  | ۱۲۸ |
| ۵-۱-۲                                     | نقش هیدرواستراتیگرافی در توسعه کارست .....                         | ۱۳۰ |
| ۵-۱-۳                                     | نقش هیدرواستراتیگرافی در سیستم غالب جریان .....                    | ۱۳۱ |
| ۵-۱-۴                                     | نقش هیدرواستراتیگرافی در آبدهی پایدار چاه‌ها .....                 | ۱۳۱ |
| ۵-۱-۵                                     | نقش هیدرواستراتیگرافی در تعیین محل چاه‌های کارستی .....            | ۱۳۲ |
| ۵-۱-۶                                     | ارزیابی کمی هیدرواستراتیگرافی .....                                | ۱۳۳ |
| ۵-۲                                       | پیشنهادهایی جهت کار بیشتر .....                                    | ۱۳۳ |

- شکل ۱-۱- محدوده جغرافیایی منطقه مورد مطالعه ..... ۴
- شکل ۱-۲- تصویر ماهواره‌ای محل چاه‌ها و راه‌های دسترسی به آنها ..... ۵
- شکل ۱-۳- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی ..... ۶
- شکل ۱-۴- توالی چینه‌شناسی سازندهای کپه‌داغ از کرتاسه تا کواترنری ..... ۹
- شکل ۱-۵- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه ..... ۱۵
- شکل ۱-۶- وضعیت چین‌خوردگی در منطقه مورد مطالعه و اطراف آن ..... ۱۶
- شکل ۱-۷- گسل‌های اصلی منطقه مورد مطالعه ..... ۱۸
- شکل ۱-۸- نمودارهای گل‌سرخ‌ی ترسیم شده از درزه‌ها ..... ۲۰
- شکل ۱-۹- موقعیت منطقه مورد مطالعه نسبت به محور اصلی رودخانه اترک و سر شاخه‌های آن ..... ۲۲
- شکل ۲-۱- عوامل موثر بر کنترل‌های چینه‌ای ..... ۳۳
- شکل ۲-۲- فراوانی روش‌های به‌دست آوردن هدایت هیدرولیکی ..... ۳۶
- شکل ۲-۳- تفکیک واحدهای هیدرواستراتیگرافی بر مبنای تراوایی ..... ۳۹
- شکل ۲-۴- تبدیل لیتواستراتیگرافی به هیدرواستراتیگرافی ..... ۴۷
- شکل ۳-۱- نقشه میزان ضخامت سازند تیرگان ..... ۵۰
- شکل ۳-۲- برش چینه‌شناسی سازند تیرگان در کوه باباموسی ..... ۵۳
- شکل ۳-۳- تصحیح داده‌های پرت پمپاژ ..... ۵۶
- شکل ۳-۴- روش جدا کردن افت چاه از افت سفره در آزمایش افت پله‌ای ..... ۵۷
- شکل ۳-۵- اصلاح داده‌های افت بر اساس پله اول. روش کرمی و یانگر ..... ۵۸
- شکل ۳-۶- برنامه اکسل برای محاسبه ضریب قابلیت انتقال متوسط و بعد جریان ..... ۵۹
- شکل ۳-۷- طبقه‌بندی گرافیکی پیشنهاد شده از سیستم جریان آبخوان کارست ..... ۶۲
- شکل ۴-۱- نقشه برخی برش‌های چینه‌شناسی مطالعه شده در غرب کپه‌داغ ..... ۶۷
- شکل ۴-۲- مقایسه برش باباموسی و برش الگو در روستای تیرگان ..... ۶۸
- شکل ۴-۳- مقایسه برش باباموسی با برش بیگان ..... ۶۹
- شکل ۴-۴- مقایسه برش باباموسی با برش کوه مسی‌نو ..... ۷۰
- شکل ۴-۵- مقایسه برش باباموسی با برش مرجع جوزک ..... ۷۱
- شکل ۴-۶- مقایسه برش باباموسی با برش چمن بید ..... ۷۲
- شکل ۴-۷- مقایسه برش باباموسی با برخی از برش‌های منطقه غرب کپه‌داغ ..... ۷۴
- شکل ۴-۸- ریزرخساره‌های ساحلی یا پهنه جزر و مدی ..... ۷۷
- شکل ۴-۹- ریزرخساره‌های لاگون ..... ۷۹
- شکل ۴-۱۰- ریزرخساره‌های سد ..... ۸۰

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| شکل ۴-۱۱- ریزرخساره دریای باز .....                                     | ۸۱  |
| شکل ۴-۱۲- سیمان و فرایندهای دیاژنژی .....                               | ۸۴  |
| شکل ۴-۱۳- نمایش ریزرخساره‌ها و محیط رسوبی سازند تیرگان .....            | ۸۸  |
| شکل ۴-۱۴- مورفولوژی دره‌های خشک. در تاقدیس بابابلند .....               | ۹۰  |
| شکل ۴-۱۵- مورفولوژی دره خشک نمای نزدیک. در تاقدیس بابابلند .....        | ۹۰  |
| شکل ۴-۱۶- فروچاله‌ها به همراه دره‌های خشک .....                         | ۹۲  |
| شکل ۴-۱۷- حفرات انحلالی در لایه‌های ضخیم آهکی .....                     | ۹۲  |
| شکل ۴-۱۸- مورفولوژی لایه‌بندی سازند تیرگان در منطقه مورد مطالعه .....   | ۹۳  |
| شکل ۴-۱۹- گرایک و کارن در سازند تیرگان .....                            | ۹۴  |
| شکل ۴-۲۰- نفوذ مستقیم در برش عرضی سازند تیرگان .....                    | ۹۵  |
| شکل ۴-۲۱- تغذیه از طریق دره‌های خشک در شمال شرق منطقه .....             | ۹۶  |
| شکل ۴-۲۲- نفوذ از طریق فروچاله‌ها و دره‌های خشک .....                   | ۹۶  |
| شکل ۴-۲۳- لاگ‌ها چاه‌های پتروشیمی .....                                 | ۹۹  |
| شکل ۴-۲۴- لاگ ژئوفیزیک در منطقه قارلق .....                             | ۱۰۰ |
| شکل ۴-۲۵- لاگ ژئوفیزیک چاه‌های W08, W09 .....                           | ۱۰۱ |
| شکل ۴-۲۶- لاگ ژئوفیزیک چاه‌های W09, W10 .....                           | ۱۰۲ |
| شکل ۴-۲۷- مقایسه لاگینگ چاه‌های منطقه مورد مطالعه .....                 | ۱۰۴ |
| شکل ۴-۲۸- نحوه قرارگیری چاه‌ها در ارتباط با سازند تیرگان .....          | ۱۰۸ |
| شکل ۴-۲۹- ترسیم افت- زمان دو حلقه چاه (W01 و W02) .....                 | ۱۱۱ |
| شکل ۴-۳۰- ترسیم افت- زمان دو حلقه چاه (W04 و W05) .....                 | ۱۱۲ |
| شکل ۴-۳۱- ترسیم افت- زمان دو حلقه چاه (W07 و W08) .....                 | ۱۱۲ |
| شکل ۴-۳۲- ترسیم افت- زمان چاه (W09) .....                               | ۱۱۳ |
| شکل ۴-۳۳- ناهمگنی و بعد جریان چاه‌های پمپاژ شده در منطقه .....          | ۱۱۸ |
| شکل ۴-۳۴- رابطه نسبت ناهمگنی و شاخص چینه‌شناسی .....                    | ۱۲۱ |
| شکل ۴-۳۵- رابطه بعد جریان و شاخص چینه‌شناسی .....                       | ۱۲۲ |
| شکل ۴-۳۶- رابطه شاخص مجرای و شاخص چینه‌شناسی .....                      | ۱۲۲ |
| شکل ۴-۳۷- رابطه آبدهی و شاخص چینه‌شناسی با چاه W09 .....                | ۱۲۳ |
| شکل ۴-۳۸- رابطه دبی و شاخص چینه‌شناسی بدون چاه W09 .....                | ۱۲۳ |
| شکل ۴-۳۹- رابطه ضریب قابلیت انتقال با شاخص چینه‌شناسی با چاه W09 .....  | ۱۲۴ |
| شکل ۴-۴۰- رابطه ضریب قابلیت انتقال و شاخص چینه‌شناسی بدون چاه W09 ..... | ۱۲۴ |
| شکل ۴-۴۱- رابطه افت ویژه و شاخص چینه‌شناسی با چاه W09 .....             | ۱۲۵ |

شکل ۴-۴۲- رابطه افت ویژه و شاخص چینه‌شناسی بدون چاه W09 ..... ۱۲۵

### فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱- مشخصات هواشناسی ایستگاه‌ها در منطقه مورد مطالعه ..... ۷
- جدول ۱-۲- کانیهای اصلی سنگ‌های آهکی ..... ۲۹
- جدول ۱-۳- مشخصات عمومی چاه‌های منطقه مورد مطالعه ..... ۶۰
- جدول ۱-۴- انواع نفوذ و ارتباط آنها با محل حفر چاه‌ها ..... ۹۷
- جدول ۲-۴- اطلاعات پمپاژ چاه‌ها ..... ۱۱۰
- جدول ۳-۴- ضریب قابلیت انتقال، ناهمگنی، بعد جریان، نوع جریان و ویژگی‌های هیدرولیکی چاه‌ها ... ۱۱۴
- جدول ۴-۴- مقادیر تراوایی چاه‌های حفر شده ..... ۱۱۵
- جدول ۵-۴- مشخصات آبدهی، محل حفر، تغییرات افت آبدهی لحظه‌ای و بلند مدت چاه‌ها ..... ۱۱۶
- جدول ۶-۴- مقادیر درجه ناهمگنی و بعد جریان و شاخص *KCI* در سازند تیرگان ..... ۱۱۸
- جدول ۷-۴- خصوصیات چینه‌ای و شاخص چینه‌شناسی در سازند تیرگان ..... ۱۲۰



## فصل اول: مقدمه

در ده‌های اخیر و به دلیل کاهش شدید منابع آب زیرزمینی آبرفتی، توجه به منابع کارست برای تامین آب دو چندان شده است. در حال حاضر ۲۰ تا ۲۵ درصد آب شرب در دنیا از منابع آب کارستی تامین می‌شود (Ford and Williams 2007) و در ایران نیز حدود ۶۵ درصد نیاز شرب کشور (از این میزان منابع آب کارستی دقیقاً مشخص نشده) از منابع آب زیرزمینی تامین می‌شود. حدود ۱۱ درصد از واحدهای زمین‌شناسی پهنه ایران زمین را سازندهای کربناته و کارستی دربر می‌گیرند (Raeisi 2008). گفتنی‌ست از این سازندها چشمه‌های بسیاری نیز جاری بوده که دبی پایه رودخانه‌ها را تامین می‌کنند و همچنین چاه‌های متعددی برای تامین آب در حال بهره‌برداری است. شناخت نحوه حرکت آب زیرزمینی در نواحی کارستی و بررسی تفاوت در هدایت هیدرولیکی لایه‌های مختلف برای تامین آبدهی مناسب چاه‌ها بسیار مهم است. در منطقه کپه‌داغ به سبب شرایط چینه‌شناسی و ساختاری و کارستی به نظر می‌رسد واحدهایی در درون سازند تیرگان با هدایت هیدرولیکی متمایز (هیدرواستراتیگرافی) شکل گرفته‌اند. چاه‌های حفر شده در لایه‌های مختلف سازند کارستی تیرگان دارای دبی‌های متفاوتی هستند که به نظر می‌رسد از عوامل موثر بر هیدرواستراتیگرافی ناشی می‌شوند.

### ۱-۱ بیان مسئله

در حدود یک چهارم آب آشامیدنی جهان از منابع آب کارستی تامین می‌شود (Ford and Williams 2007). در مدیترانه و کشورهای جنوب شرق آسیا آبخوان‌های کارستی اصلی‌ترین منابع تامین آب شرب هستند. حدود ۱۱ درصد از سطح کشور ایران (۹۰ درصد ارتفاعات زاگرس) را سازندهای کربناته و کارستی می‌پوشانند

(افراسیابیان ۱۳۷۷). بسیاری از چشمه‌های دایمی و بزرگ پهنه زاگرس دارای منشاء کارست هستند و دبی پایه رودخانه‌ها را تامین می‌کنند.

با توجه به اهمیت منابع آب در آبخوان‌های کارستی، مطالعه و شناخت مخازن آب زیرزمینی و مسیر جریان آب در این آبخوان‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. این سازندها غالبا یک‌پارچه از آهک خالص تشکیل نشده‌اند بلکه در بین آنها لایه‌های کم‌تراوای آهکی ناخالص و یا ناتراوای رسی و مارنی وجود دارند، زیرا محیط رسوبی در تشکیل انواع لیتولوژی سازند نقش کلیدی بازی می‌کند. شایان ذکر است در بیشتر سازندهای آهکی، سنگ‌های گوناگون آهکی با تراوایی متفاوت، تا رسوبات ناتراوای رسی و مارنی در توالی با یکدیگر نهشته شده‌اند. بنا بر این، شناخت دقیق و همه جانبه توالی چینه‌شناسی سازندهای آهکی می‌تواند در شناخت توسعه کارست در افق‌های مستعد کارستی بسیار راهگشا بوده و اکتشاف منابع آب از طریق حفر چاه را با هزینه بسیار کم و موفقیت بیشتری روبرو سازد.

چنانچه مطالعات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی در یک منطقه کارستی ناکافی باشد بسیاری از حفاری‌های انجام شده در سازندهای آهکی با موفقیت روبرو نخواهد شد. یکی از مهم‌ترین دلایل این مسئله عدم شناخت دقیق چینه‌شناسی سازند آهکی است. برای حفر موفق یک چاه، در مرحله جانمایی چاه‌ها در مناطق کارستی، از تلفیق داده‌های زمین‌شناسی مانند وضعیت تکتونیکی شامل: مطالعه گسل‌ها، چین‌ها، درز و شکافها، ژئومورفولوژی کارست، چینه‌شناسی و ژئوفیزیک استفاده می‌شود. اما بدون بررسی و مطالعه دقیق توالی چینه‌شناسی درون یک سازند آهکی نمی‌توان افق‌های تراوا را از ناتراوا جدا نمود. ممکن است به سبب چینه‌شناسی، یک لایه مستعد کارستی شدن در بین دو لایه ناتراوا قرار بگیرد و اصولا جریان سیالی در آن اتفاق نیفتاده باشد.

بنا بر این، شناخت هیدرواستراتیگرافی در کنار بررسی‌های پیش‌گفته در شناسایی دقیق‌تر مناطق دارای جریان کارستی بسیار پر اهمیت خواهد بود. یک بررسی هیدرواستراتیگرافی دقیقا افق‌هایی را مشخص می‌کند که دارای تمامی خصوصیات یک افق آبدار کارستی خواهند بود. افق‌های هیدرواستراتیگرافی و دارای آب را به

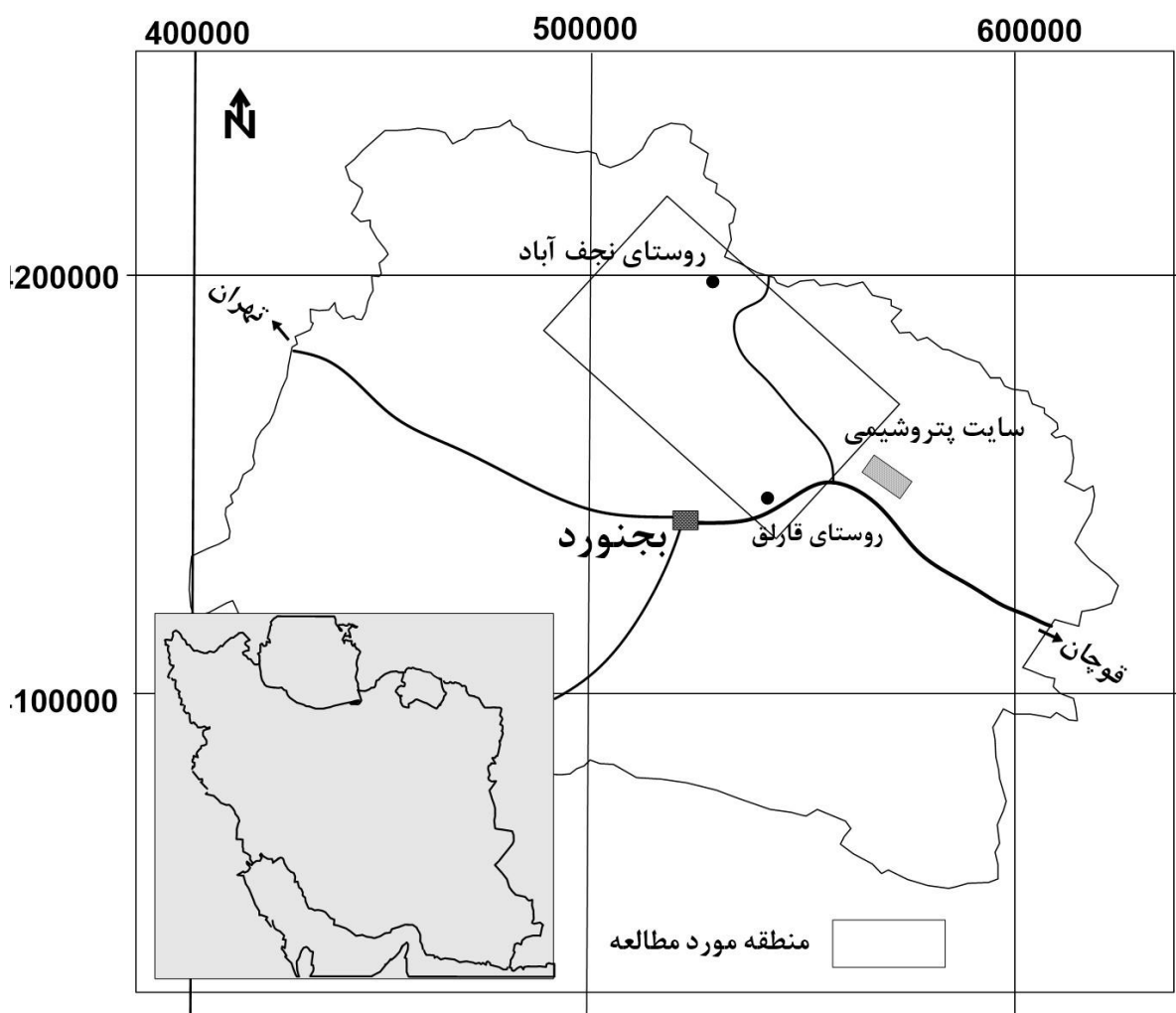
لحاظ چینه‌شناسی می‌توان در سایر مناطق که سازند گسترش جانبی دارد دنبال نمود. در این مطالعه سازند تیرگان به لحاظ هیدرواستراتیگرافی برای اولین بار در غرب کپه‌داغ مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۱-۲ هدف از انجام تحقیق

با توجه به اهمیت منابع آب در آبخوان‌های کارستی، مطالعه و شناخت این آبخوان‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. از عوامل بسیار مهم در توسعه کارست توالی چینه‌شناسی، فرآیندهای دیاژنز و نوع ریزرخساره‌ها (به‌ویژه کربناتی) می‌باشند. بنا بر این، شناخت دقیق و همه‌جانبه ویژگی‌های چینه‌شناسی، محیط رسوبی و تغییرات دیاژنتیک سازندهای کارستی می‌تواند ابتدا در شناخت پتانسیل توسعه کارست و در مراحل بعد در بررسی توسعه کارست بسیار مفید باشد. متأسفانه در موضوع ارتباط چینه‌شناسی و نقش آن در توسعه کارست و به‌ویژه تمرکز زون‌های تراوا و گسترش جانبی آن کارهای زیادی در کشور انجام نشده است. هدف اساسی از انجام این تحقیق تلفیق داده‌های چینه‌شناسی، محیط رسوبی (ریزرخساره‌های کربناته)، دیاژنز، لاگینگ با نتایج حاصله از آزمایش پمپاژ به منظور بررسی هیدرواستراتیگرافی در توسعه زون‌های تراوا می‌باشد. شناسایی هیدرواستراتیگرافی کارست و لایه‌های مستعد کارستی شده و دارای تراوایی بالا در مدیریت بهره‌برداری از چاه‌ها و اثرات احتمالی آنها بر آبدهی چشمه‌ها و سایر منابع آبی نیز بسیار کارآمد خواهد بود. از طرفی انتقال آلاینده‌ها (به عنوان مثال شیرابه حاصل از محل‌های دفن زباله شهری) در مسیرهای تغذیه منتهی به مخازن کارستی و زون‌های تراوا بسیار سریع و در نتیجه بسیار مشکل ساز خواهد شد. مدیریت بر این عوامل در گرو شناسایی هر چه بیشتر لایه‌های تراوا و ناتراوا می‌باشد. همچنین طراحی شبکه رفتارسنجی که بتواند داده‌های قابل اطمینانی از روند تغییرات در آبخوان در آینده را به‌دست بدهد، یکی از هدفهای اصلی این تحقیق می‌باشد.

### ۳-۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در بخش شمال شرق شهر بجنورد (مرکز استان خراسان شمالی) قرار دارد که بخشی از کپه‌داغ غربی است. این منطقه در حدود ۷ کیلومتری شمال شرق بجنورد واقع شده است (شکل ۱-۱). جاده دسترسی اصلی راه بجنورد به مشهد است. بعد از طی ۱۵ کیلومتر و رد شدن از تونل بابا امان می‌توان به روستای قارلق رسید که محل حفر چاه‌های منطقه قارلق است. پس از طی ۵ کیلومتر دیگر و در شمال مجتمع پتروشیمی بجنورد چاه‌های پتروشیمی قرار دارند. از مجتمع پتروشیمی و از جاده غلامان در حدود ۱۸ کیلومتر به سمت شمال چاه‌های نجف‌آباد قرار دارند.



شکل ۱-۱- محدوده جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

در تصویر ماهواره‌ای محل چاه‌ها و راه دسترسی به آنها نشان داده شده است (شکل ۱-۲). چاه‌های واقع در شمال مجتمع پتروشیمی شامل چاه‌های W01, W02 است. چاه‌های واقع در روستای قارلق در شمال شرق این روستا حفر شده‌اند و شامل W03, W04, W05, W06 هستند و چاه‌های نجف‌آباد در شمال شرق روستای نجف‌آباد شامل W07, W08, W09, W10 می‌باشند. برای دستیابی به برش اندازه‌گیری شده باباموسی، می‌توان به سمت شرق شهر بجنورد عزیمت کرده و در کوه باباموسی به پای برش رسید. همچنین می‌توان از روستای قارلق به سمت غرب رفته و از بخش بالایی سازند تیرگان به سمت کوه باباموسی حرکت کرد.

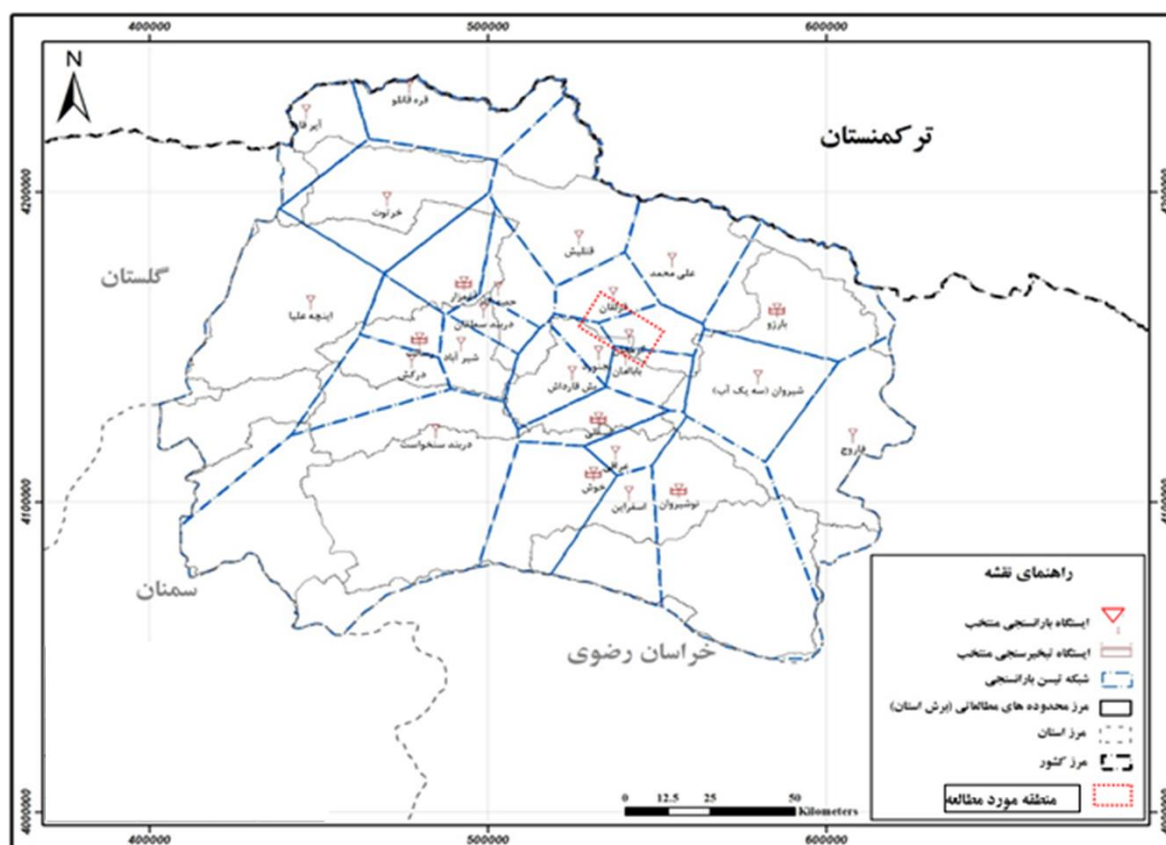


شکل ۱-۲- تصویر ماهواره‌ای محل چاه‌ها و راه‌های دسترسی به آنها

#### ۴-۱ هواشناسی منطقه مورد مطالعه

در تقسیم‌بندی حوضه‌های آبریز کشور منطقه مورد مطالعه در حوضه آبریز درجه ۲ اترک و در بخش شرقی استان خراسان شمالی قرار گرفته است. حوضه آبریز اترک که در شمال شرقی کشور در استان‌های خراسان رضوی، شمالی و گلستان از شرق به غرب امتداد دارد یکی از حوضه‌های دریای مازندران می‌باشد. استان

خراسان شمالی خود به ۸ محدوده مطالعاتی کوچکتر تقسیم می‌شود که منطقه مورد مطالعه در محدوده مطالعاتی مانه به شماره ۱۷۰۴ واقع می‌شود. این محدوده مطالعاتی ۴۹۳۲/۴ کیلومتر مربع وسعت دارد، که ۴۸۵۳/۱۷۷ کیلومتر مربع آن را ارتفاعات و ۷۹/۲۷ کیلومترمربع را دشت تشکیل می‌دهد. در حوضه آبریز اترک تعداد ۱۶۰ ایستگاه هواشناسی وجود دارد، که از اطلاعات چهار ایستگاه در مطالعه اخیر استفاده شده است. شکل ۱-۳ موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی (شرکت آب منطقه‌ای خراسان شمالی)

ایستگاه‌های هواشناسی بابا امان، گرمخان، بجنورد و قزلقان در مجاورت منطقه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و از اطلاعات آنها برای تحلیل هواشناسی استفاده شده است. در جدول شماره ۱-۱ پارامترهای اصلی هواشناسی ایستگاه‌های یاد شده نشان داده شده است. با توجه به جدول ۱-۱ حداکثر میزان بارندگی (۲۰ ساله اخیر) در ایستگاه قزلقان ۵۲۶ میلی‌متر و حداقل بارندگی ۷۹ میلی‌متر در ایستگاه بابا امان مشاهده شده است. میانگین

بارندگی در کل منطقه مورد مطالعه ۲۷۲ میلی متر محاسبه شده است. در منطقه مورد مطالعه به دلیل وجود ارتفاعات، عمده بارش‌ها دارای گرادیان کوه بارشی است. شایان ذکر است در سالیان اخیر همانند بیشتر مناطق کشور الگوی بارندگی در این منطقه هم از بارش برف به بارش باران تغییر کرده، با اینحال در مجموع بارش سالانه، کاهش محسوسی اتفاق نیفتاده است.

جدول ۱-۱- مشخصات هواشناسی ایستگاه‌ها در منطقه مورد مطالعه

| نام ایستگاه | بارندگی<br>(متوسط ۲۰ ساله) | دما<br>(متوسط ۲۰ ساله) | تبخیر<br>(متوسط ۲۰ ساله) | تراز ارتفاعی<br>(متر) |
|-------------|----------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|
| بجنورد      | حداکثر                     | ۴۰۳/۱                  | ۱۴/۸۲                    | ۱۱۲۳                  |
|             | حداقل                      | ۱۰۸/۵                  | ۱۲/۷۸                    |                       |
|             | میانگین                    | ۲۲۷/۴۵                 | ۱۳/۹۳                    |                       |
| گرمخان      | حداکثر                     | ۵۰۲                    | ۱۵/۶۷                    | ۹۴۷                   |
|             | حداقل                      | ۱۶۷                    | ۱۳/۵۲                    |                       |
|             | میانگین                    | ۲۸۳/۵                  | ۱۴/۷۸                    |                       |
| قزلقان      | حداکثر                     | ۵۲۶                    | ۱۴/۰۲                    | ۱۲۹۰                  |
|             | حداقل                      | ۱۳۶                    | ۱۲/۰۷                    |                       |
|             | میانگین                    | ۲۷۸/۵                  | ۱۳/۱۲                    |                       |
| بابا امان   | حداکثر                     | ۴۱۶/۵                  | ۱۵/۳۲                    | ۱۰۱۹                  |
|             | حداقل                      | ۷۹                     | ۱۳/۲۲                    |                       |
|             | میانگین                    | ۲۸۶/۶۷                 | ۱۴/۴۴                    |                       |

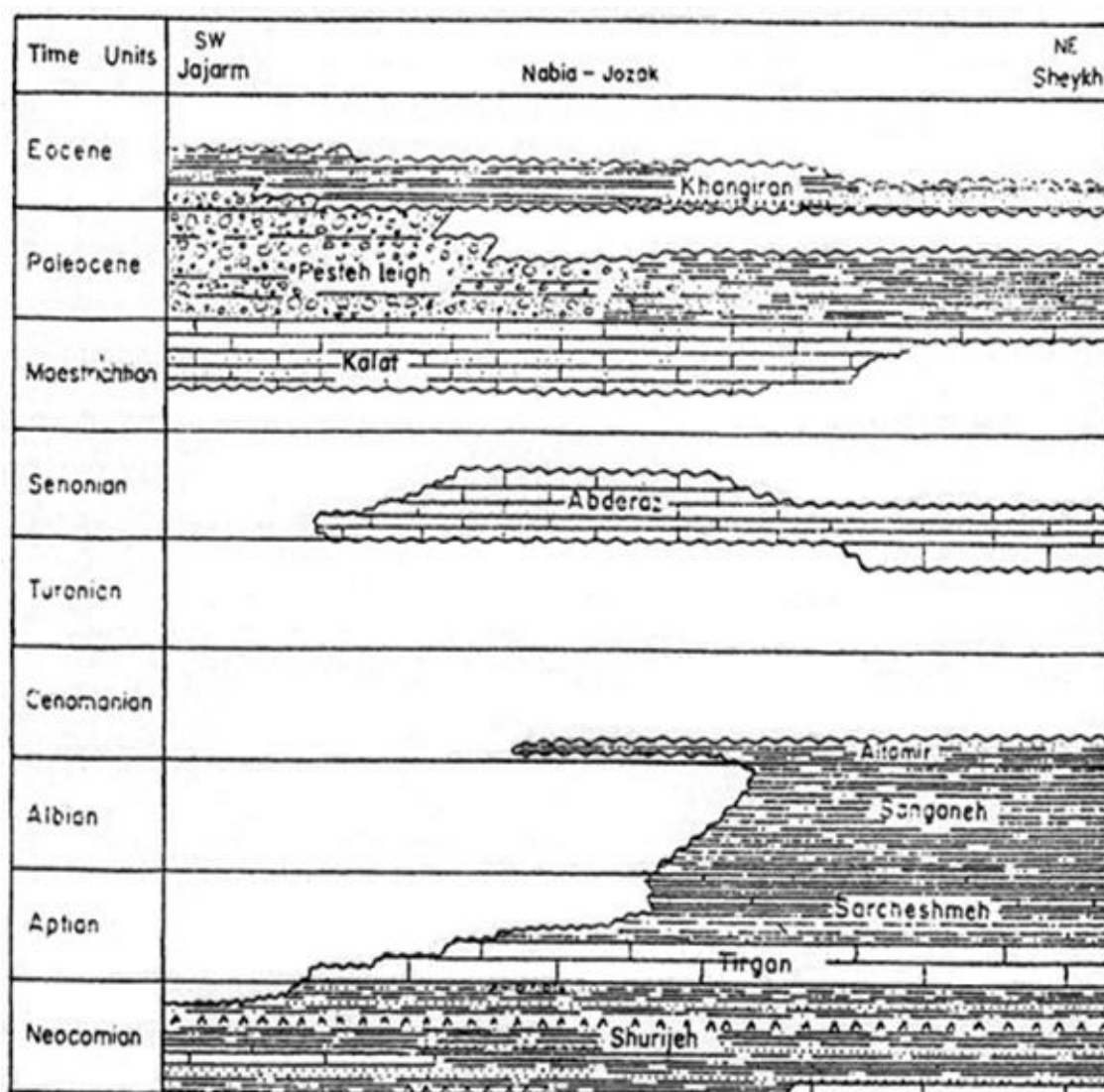
#### ۱-۵ زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در بخش غربی زون ساختاری کپه‌داغ قرار دارد. این زون ساختاری در شمال شرق ایران و در جنوب جمهوری ترکمنستان با وسعتی در حدود ۵۵۰۰۰ کیلومتر مربع واقع شده است و شامل حدود ۶۰۰۰ متر سنگ‌های رسوبی می‌باشد. این حوضه پس از بسته شدن اقیانوس پالئوتتیس در اثر کوهزایی سیمیرین پیشین و در زمان تریاس پیشین شکل گرفته است. رسوبگذاری در این حوضه از ژوراسیک تا ابتدای الیگوسن تقریباً پیوسته و مداوم صورت گرفته است. مهم‌ترین رشته کوه‌های کپه‌داغ شامل کوه‌های کپه‌داغ و کوه‌های هزار مسجد در شمال شرق و کوه‌های آلا‌داغ، بینالود در بخش جنوب غربی است. این دو رشته کوه در غرب منطقه به هم می‌پیوندند و منطقه مورد مطالعه تقریباً در محل این اتصال قرار دارد. زون ساختاری کپه‌داغ به سه بخش شرقی، مرکزی و غربی تقسیم‌بندی می‌شود. بخش غربی کپه‌داغ از نواحی بجنورد شروع شده و تا نواحی گرگان ادامه دارد. زمین‌شناسی این منطقه شامل تاقدیس‌ها، نادویس‌ها و دشت‌های میان‌کوهی‌ست. ارتفاعات اکثراً از سازندهای کربناته ژواسیک (سازند کربناته مزدوران) و کرتاسه (سازند تیرگان) تشکیل شده‌اند. در این منطقه دشت‌ها دارای وسعت چندانی نیستند و سیمای غالب منطقه کوهستانی است. در این حوضه سنگ‌های رسوبی کرتاسه از توسعه و گسترش زیادی برخوردار هستند (افشارحرب ۱۳۷۳). به عبارت دیگر تنوع سازندها وجود ندارد و ارتباط آنها بایکدیگر کنتاکتی و در برخی موارد گسلی می‌باشد. در منطقه مورد مطالعه سازندهای کرتاسه زیرین تا کرتاسه میانی بیشترین برونزد را دارند که شامل سازندهای شوريجه، تیرگان، سرچشمه، سنگانه، آیتامیر و آبدراز است.

#### ۱-۵-۱ چینه‌شناسی منطقه

بر اساس نقشه زمین‌شناسی چهارگوش بجنورد با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ که منطقه مورد مطالعه را نیز شامل می‌شود و بازدیدهای صحرایی، واحدهای سنگ چینه‌ای غالب در منطقه مربوط به کرتاسه و به ویژه کرتاسه زیرین می‌باشند. بررسی چینه‌شناسی واحدهای زمین‌شناسی رخمون یافته در سطح محدوده نشان می‌دهد که سازندهای سخت و رسوبات تحکیم نیافته در سطح منطقه از تنوع چندانی برخوردار نمی‌باشند.

قدیمی‌ترین واحد سنگ‌چینه‌ای منطقه سازند آواری و سرخ رنگ شوریه است. سازندهای سخت و ارتفاع‌ساز موجود شامل سازند کربناته تیرگان و سازندهای کم ارتفاع‌تر شامل شیل‌ها و مارنهای خاکستری و سبز کمرنگ سازند سرچشمه و شیل‌های تیره سنگانه می‌باشند. بقیه سازندها گسترش بسیار کمی دارند. رسوبات تحکیم نیافته نیز عمدتاً شامل نهشته‌های نئوژن، تراس‌ها و پادگانه‌های آبرفتی قدیمی و آبرفتهای رودخانه‌ای می‌باشند که مناطق پست و کم ارتفاع حوضه را پوشش داده‌اند. شکل ۱-۴ توالی چینه‌شناسی واحدهای زمین‌شناسی رخنمون یافته در کپه‌داغ و از جمله در منطقه مورد مطالعه و ارتباط بین آنها را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۴- توالی چینه‌شناسی سازندهای کپه‌داغ از کرتاسه تا کواترنری (اقتباس از افشار حرب ۱۳۷۳)

وفق نقشه زمین‌شناسی تهیه شده، منطقه مورد مطالعه که از نقشه چهارگوش بجنورد انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور (۱۳۶۳) اقتباس شده است، سازندهای اصلی و توالی چینه‌ای در محدوده مورد مطالعه عبارتند از:

**الف- سازند شوريجه (Ksh):** در نقاط زیادی از کپه‌داغ، از جمله در منطقه مورد مطالعه و در شمال و شرق شهر بجنورد سازند آواری سُرخ‌رنگی دیده می‌شود که از آن به نام "سازند شوريجه" یاد می‌شود. نام این سازند از روستای شوريجه گرفته شده، ولی بُرش الگوی رسمی آن در کنار راه مشهد به کلات (درهٔ خور)، به ضخامت ۹۸۰ متر، مطالعه شده است. سازند شوريجه بیشتر از نوع رسوب‌های آواری، شیل، رُس‌سنگ، ماسه‌سنگ، کنگلومرا، کمی سنگ گچ و لایه‌های ناچیز سنگ‌های کربناتی است که سیمای قهوه‌ای-سُرخ دارد و به صورت لایه راهنما و قرمز رنگ، سنگ آهک‌های صخره‌ساز ژوراسیک بالا (مزدوران) را از سنگ آهک‌های سازند تیرگان جدا می‌کند. در محل بُرش الگو (درهٔ خور)، سازند شوريجه به سه بخش تقسیم شده است (افشارحرب ۱۳۷۳).

گرچه سازند شوريجه بیشتر از نهشته‌های قاره‌ای - مردابی تشکیل شده ولی زبانه‌هایی از رسوب‌های دریایی حاوی سنگواره دارد. در مورد سن دقیق سازند شوريجه اتفاق نظر وجود ندارد اما بیشتر پژوهشگران از جمله افشار حرب (۱۳۷۳) برای آن سن کرتاسه پایین (نئوکومین) را در نظر می‌گیرند. در منطقه مورد مطالعه رخنمون کمی از سازند شوريجه در کوه باباموسی در شرق بجنورد (برش چینه‌شناسی انتخاب شده در این مطالعه) به چشم می‌خورد که از لایه‌های ماسه سنگی قرمز رنگ تشکیل شده است. این سازند در تماس با سازند تیرگان رخنمون شده و قاعده آن گسلی بوده و دیده نمی‌شود. گذر از این سازند به سازند تیرگان روشن و قابل تفکیک است گرچه بر اساس برخی مطالعات گذر تدریجی بین این سازند و سازند تیرگان وجود دارد.

**ب- سازند تیرگان (Ktr):** سازند تیرگان از سنگ آهک الیتی اوربیتولین‌دار، سنگ آهک متوسط تا ضخیم لایه (ضخامت تا ۳۱ متر در این مطالعه) به همراه میان لایه‌های سنگ آهک رسی، مارنی و شیلی-آهکی تشکیل

شده است. این سازند تقریباً تمامی ارتفاعات (تاقدیس‌ها) منطقه مورد مطالعه را در بر می‌گیرد و سازند اصلی مورد مطالعه است. نام سازند تیرگان از روستای تیرگان واقع در ۳۹ کیلومتری جنوب شرق شهرستان دره‌گز گرفته شده و برش الگوی این سازند نیز در همین منطقه و در کوه تیرگان مطالعه شده است (افشار حرب ۱۳۷۳). در ضمن این سازند دارای برش مرجعی است که در جنوب غربی روستای جوزک (شمال غرب منطقه مورد مطالعه) در غرب کپه‌داغ قرار دارد (آقانباتی ۱۳۸۳). در تمام رخنمون‌های سازند، لایه‌هایی از سنگ آهک‌های اوریتولین‌دار وجود دارد (افشار حرب ۱۳۷۳). در واقع اوریتولین شاخص‌ترین سنگواره سازند تیرگان است که اغلب هسته آهکی را تشکیل می‌دهد. بر پایه سنگواره‌های موجود، سن سازند تیرگان نئوکومین (بارمین) تا آپسین است.

سازند تیرگان یکی از واحدهای سنگی و پایدار پهنه کپه‌داغ و منطقه مورد مطالعه است، سازند تیرگان در برخی نواحی تا ۷۰۰ متر ضخامت دارد. در شرق کپه‌داغ در برش شوراب، سازند تیرگان کمترین ضخامت (۲۰ متر) را دارد ولی به سمت غرب، ضخامت سازند افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که در محل برش مرجع، ۳۱۰ متر و در برش الگو ۷۸۰ متر ضخامت دارد و حتی در چاه قزل‌تپه شماره ۲ ضخامت تیرگان ۱۰۰۵ متر است (آقانباتی ۱۳۸۳). در محل برش الگو و برش مرجع، مرزهای پایینی و بالایی تیرگان با تغییر رخساره ناگهانی گزارش شده است، ولی بررسی‌های رسوب‌شناسی جدید، حاکی از تدریجی بودن مرزهای زیرین و بالایی این سازند است و حتی گاهی سازند تیرگان ممکن است با واحد کهن‌تر (سازند شورجه) و یا جوان‌تر (سازند سرچشمه) پیوند بین‌انگشتی داشته باشد.

**ج- سازند سرچشمه (Ksr):** مقطع تیپ سازند سرچشمه در روستای سرچشمه واقع در شرق بجنورد در حدود ۲۷۶ متر ضخامت دارد که از دو بخش زیرین با مارنهای خاکستری سبز و میان لایه‌های آهک مارنی و بخش بالایی با شیل‌های آهکی خاکستری و چندین لایه سنگ آهک تشکیل شده است (افشار حرب ۱۳۷۳). سازند سرچشمه در منطقه مورد مطالعه شامل شیل‌های مارنی مدادی شکل سبز کم‌رنگ است. این سازند به صورت هم‌شیب بر روی سازند تیرگان قرار گرفته است و ستبرای آن تا حداکثر ۱۳۰۰ متر اندازه‌گیری شده

است. سازند سرچشمه به دلیل مقاومت اندک در برابر فرسایش عمدتاً دارای مورفولوژی پست و فرسایش تپه ماهوری بوده و به دلیل داشتن میان لایه‌های کربناته از فرسایش تفریقی برخوردار است. رخنمون سازند سرچشمه در منطقه در خط‌القعر ناودیس‌ها و با امتداد شمال غرب- جنوب شرق می‌باشد. سن این سازند بر پایه سنگواره‌ها آپسین (کرتاسه پیشین) تعیین شده است. این سازند نشانه عمیق‌تر شدن حوضه رسوبگذاری می‌باشد. در برخی مناطق به سبب عملکرد تراستی گسل‌ها، سازند سرچشمه بر روی سازند تیرگان رانده شده است.

**د- سازند سنگانه (Ksn):** سازند سنگانه از شیل‌های تیره تا خاکستری سبز تیره رنگ با میان لایه‌های سنگ آهک خاکستری و ماسه سنگ تشکیل شده است. مقطع تیپ آن در شمال شرق مشهد ضخامتی در حدود ۷۰۰ متر دارد. اما در غرب کپه‌داغ تا ۱۴۰۰ متر می‌رسد. سازند سنگانه به صورت هم‌شیب و پیوسته بر روی سازند سرچشمه جای گرفته است. رسوبات شیلی سنگانه در منطقه در هسته ناودیس‌ها رخنمون دارد. سن این سازند بر پایه سنگواره‌های یافت شده آپسین بالایی تا آلبین (کرتاسه پیشین) تعیین شده است. این سازند در منطقه گسترش سطحی زیادی دارد اما بیشتر ضخامت آن توسط فرسایش از بین رفته است. در دشت گرمخان که جزیی از منطقه مورد مطالعه است این سازند در اطراف رودخانه اترک باقیمانده است. تماس آن با سازند سرچشمه شارپ است و بیشتر تپه‌ماهورهای این منطقه را تشکیل می‌دهد. سازند آیتامیر از دو عضو تشکیل شده است. عضو زیرین، شامل ماسه سنگ به رنگ سبز خاکستری است. عضو بالایی شامل شیل گلاکونیتی است. سازند آبدراز دارای لیتولوژی سنگ آهک‌های مارنی و مارن سفید رنگ است. این دو سازند گسترش بسیار کمی در منطقه دارند.

**ه- رسوبات نئوژن (N):** رسوبات نئوژن با همبری ناهمساز بر روی سازند خانگیران قرار گرفته است. رسوبات نئوژن متشکل از دو واحد است که واحد زیرین از مارن قرمز و ماسه سنگ و واحد زیرین از کنگلومرای قرمز، مارن و ماسه سنگ تشکیل شده است. این رسوبات گسترش بسیار وسیعی دارند و در اطراف روستای

عبدل آبادل، قلعه عزیز در جنوب دشت بجنورد و در تاقدیس شیخ در شمال شرق منطقه مورد مطالعه برونزد دارند.

**و- رسوبات کواترنر (Qt):** نهشته‌های کواترنر به طور گسترده در تمام منطقه رخنمون دارند و به طور دگر شیب بر روی واحدهای پیشین نهشته شده‌اند. رسوبات کواترنر عمدتاً شامل رسوبات آواری تحکیم نیافته می‌باشند که به واسطه فرسایش تشکیلات سنگی توسط عوامل فرسایش آب، باد و نیروی ثقل (واریزه‌ها) در مناطق پست حوضه نهشته شده‌اند. رسوبات کواترنر در منطقه مورد مطالعه شامل تراس‌ها و مخروط افکنه قدیمی و آبرفت‌های رودخانه‌ای می‌باشند.

**ز- تراس‌ها و مخروط افکنه قدیمی (Qt1):** این رسوبات تراس‌ها، مخروط‌افکنه‌ها و به‌ویژه دشت‌های آبرفتی قدیمی را شامل می‌شوند. در منطقه مورد مطالعه این رسوبات آبخوان آبرفتی نه‌چندان وسیع دشت گرمخان را تشکیل می‌دهند. آبرفت این دشت ضخامت کمی دارد و محور اصلی رودخانه اترک در آن قرار دارد. عرض کم دشت و عملکرد رودخانه اترک عدم توسعه این رسوبات و تشکیل دشت آبرفتی را در پی داشته است.

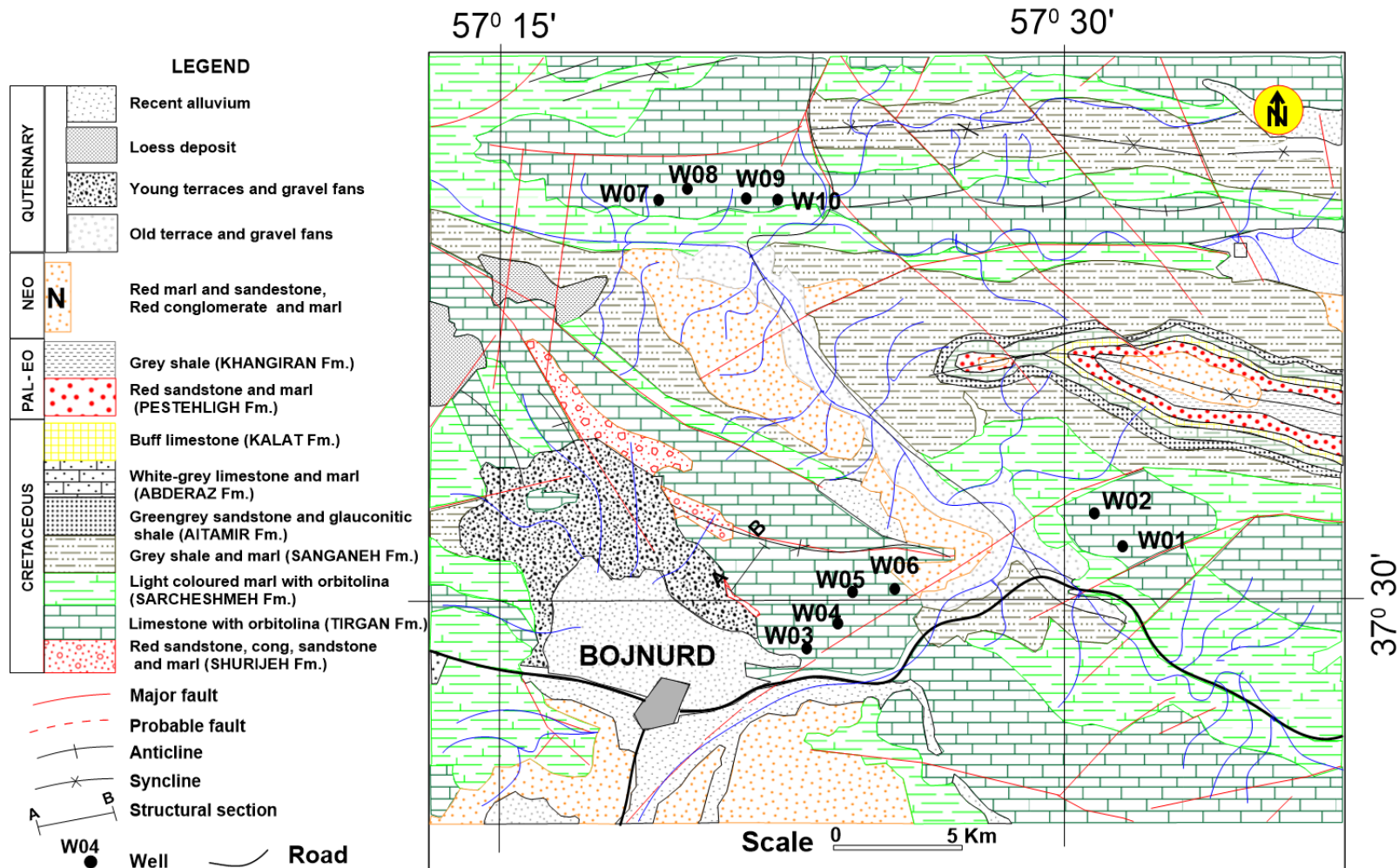
**ح- تراس‌ها و مخروط افکنه جوان (Qt2):**

انباشت‌هایی از قطعات کنگلومرایی، گراول، ماسه و رسوبات سیلتی هستند که بر فراز واحدهای سنگی در پای ارتفاعات و یا دامنه‌های پرشیب بر اثر فرسایش تشکیلات سنگی نهشته شده‌اند. این رسوبات گستره وسیعی از بخش‌های شمالی شهر بجنورد را به خود اختصاص داده و بر روی واحدهای سنگی تیرگان و سرچشمه قرار گرفته‌اند. پادگانه‌های آبرفتی مرتفع با مورفولوژی تپه ماهوری در سطح محدوده مورد مطالعه بخش اعظم اراضی قابل کشت (عمدتاً کشت دیم) را به خود اختصاص داده‌اند. در سایر بخش‌های منطقه این تراس‌ها، پهنه‌هایی پراکنده را در بر گرفته‌اند.

**ط- آبرفت‌های رودخانه‌ای (Qal):** جوانترین رسوبات در سطح گستره مورد مطالعه هستند که عمدتاً درشت دانه بوده و بستر مسیل‌های اصلی منطقه را پوشش داده‌اند. اندازه این رسوبات در حد گراول و بزرگتر بوده و قطعات در حد چند سانتی‌متر نیز در آنها به وفور یافت می‌شود. به دلیل تکاپوی بیشتر جریانات سطحی

رودخانه‌ها در بخش مرکزی منطقه بیشترین گسترش و ضخامت را دارند. بیشترین گسترش این آبرفتها در دشت بجنورد و هم‌چنین در کناره غربی محور اصلی اترک و در پای ارتفاعات جنوب روستای عبدالآباد دیده می‌شود که بعد از تراس‌ها و آبرفت‌های جوان قرار گرفته‌اند.

شکل ۱-۵ نقشه زمین‌شناسی محدوده مطالعه که از نقشه زمین‌شناسی چهارگوش بجنورد انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور (توسط افشارحرب، بلورچی، مهر پرتو ۱۳۶۳) اقتباس شده است را نشان می‌دهد.

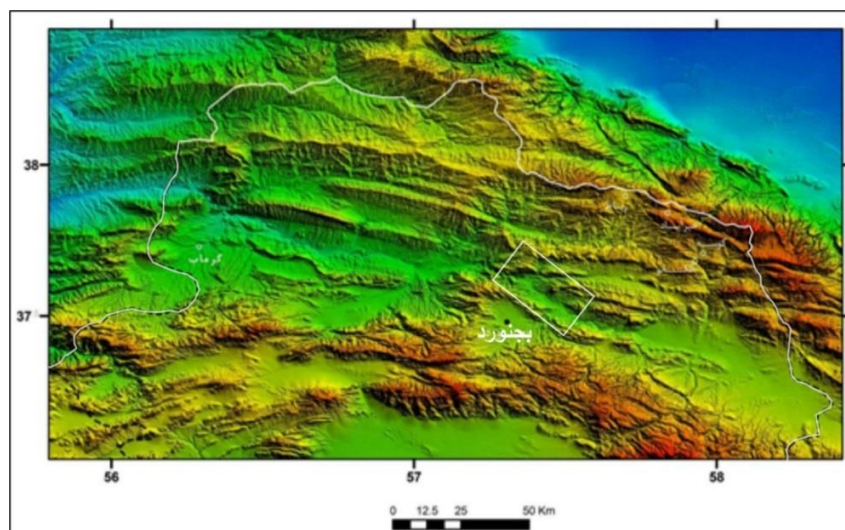


شکل ۱-۵- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه. اقتباس از نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ زمین‌شناسی چهارگوش بجنورد (انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور ۱۳۶۳).

## ۱-۵-۲ زمین‌شناسی ساختاری منطقه مورد مطالعه

در بسیاری از گزارش‌های زمین‌شناسی، الگوی چین‌خوردگی کپه‌داغ با پهنه زاگرس مقایسه شده است، چرا که بیشتر چین‌ها نامتقارن، پیوسته و کم و بیش با یکدیگر موازی هستند و در یک روند شمال غرب- جنوب شرق آرایش یافته‌اند. هم‌چنین روند عمومی گسل‌ها شمال شرق- جنوب غرب، شمال غرب- جنوب شرق و شرقی- غربی هستند و بیشتر گسل‌ها محور تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها قطع کرده و با یکدیگر موازی هستند.

**الف- چین‌ها:** روند کلی محور چین‌خوردگی‌ها در غرب کپه‌داغ در راستای شرقی غربی، شمال غرب- جنوب شرق، می‌باشند. در غرب کپه‌داغ تاقدیس‌های بزرگ وجود دارند و در جنوب این ناحیه تاقدیس‌های نامتقارنی مشاهده می‌شوند که همگی در دامنه جنوبی خود گسلی شده‌اند. الگوی چین‌خوردگی کنونی کپه‌داغ حاصل عملکرد رخداد کوهزایی اواخر پلیوسن می‌باشد (آقانباتی ۱۳۸۳). چین‌خوردگی در منطقه شامل تاقدیس‌ها و ناودیس‌های موازی بوده که به صورت متوالی قرار گرفته‌اند (شکل ۱-۶). بر اساس بررسی‌های صورت گرفته سازوکار چین‌خوردگی‌ها خمشی- لغزشی بوده و در حین چین‌خوردگی طبقات بر روی یکدیگر حرکت نموده‌اند. تاقدیس بابلند و ناودیس یکه‌شاخ اصلی‌ترین چین‌های منطقه مورد مطالعه را تشکیل می‌دهند.



شکل ۱-۶- وضعیت چین‌خوردگی در منطقه مورد مطالعه و اطراف آن

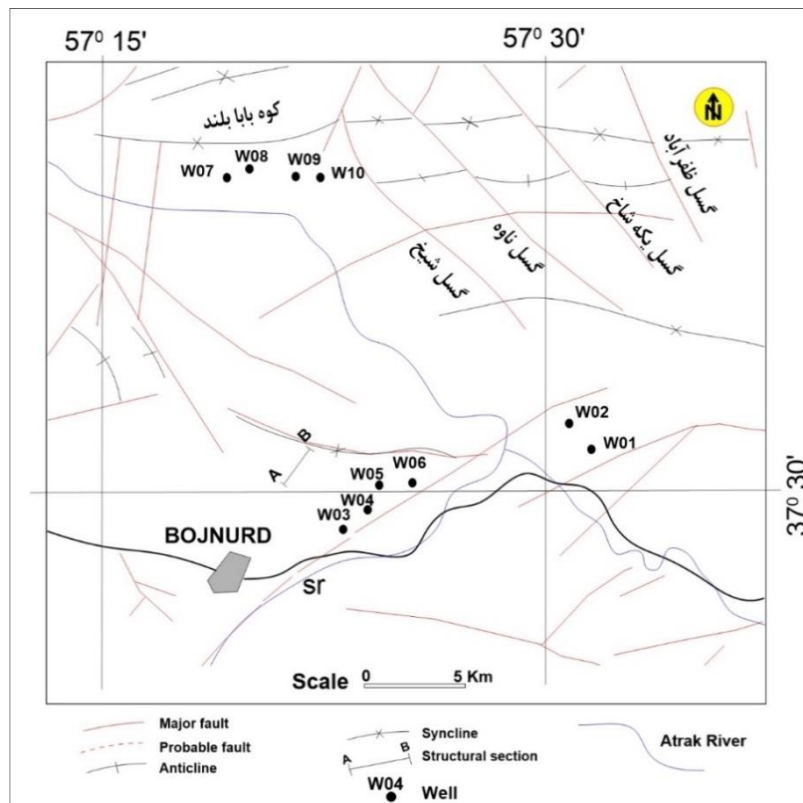
ب- **گسل‌ها:** گسل‌ها یکی از عوارض مهم در تعیین جهت جریان آبهای زیرزمینی هستند. اثرات هیدرولوژیکی گسل‌ها به سه عامل وابسته است: باز شدگی عرضی صفحه گسل، حضور و نفوذپذیری مواد پرکننده و جابجایی گسل (Herold et al. 2000 به نقل از Goldscheider & Drew 2007).

از نظر زمان تشکیل و سازوکار حرکتی، گسل‌های کپه‌داغ را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد. گروه نخست گسل‌های همزمان با فرونشست حوضه است که به طور عمومی روند شرقی- غربی و یا شمال‌شرقی- جنوب‌غربی دارند. این گسل‌ها در ابتدا سازوکار حرکتی نرمال داشته‌اند، ولی پس از برقراری رژیم‌های فشارشی به انواع برگشته با شیب رو به شمال تبدیل شده‌اند. گروه دوم گسل‌ها، محور چین‌ها را قطع می‌کنند و از نوع همگرا هستند که ممکن است امتداد لغز راستگرد، با روند شمال‌غربی و یا امتداد لغز چپگرد، با روند شمال‌شرقی باشند (آقانباتی ۱۳۸۳). در شمال‌شرق بجنورد یک زون گسلی وجود دارد که به سبب نزدیکی به منطقه مورد مطالعه مورد بررسی بیشتر قرار می‌گیرد.

این زون گسلی شامل گسل‌های ظفرآباد، یکه شاخ، ناوه و شیخ می‌باشند. طول گسل ظفرآباد که شرقی‌ترین گسل این زون است، حدود ۱۲ کیلومتر بوده و حرکت امتدادی راستگرد دارد. گسل یکه‌شاخ با امتداد شمال‌غربی- جنوب‌شرقی بین گسل ظفرآباد و ناوه قرار گرفته است. این گسل که از محل روستای یکه‌شاخ عبور می‌نماید تا محور تاکدیس بابابلند (شمالی‌ترین تاکدیس در منطقه مورد مطالعه) ادامه یافته است. گسل ناوه با طول حدود ۳۲ کیلومتر دارای امتداد شمال‌غربی جنوب‌شرقی می‌باشد. این گسل از سمت جنوب ناودیس شیخ را قطع نموده است. تاکدیس جنوب قزلقان، ناودیس یکه شاخ و تاکدیس کوه بابابلند به ترتیب توسط گسل ناوه قطع و جابجا شده‌اند. میزان جابجایی راستگرد گسل حدود ۱۲۰۰ متر می‌باشد.

گسل شیخ با طول حدود ۱۸ کیلومتر یکی دیگر از گسل‌های زون گسلی شمال‌شرق بجنورد بوده که از غرب ناودیس شیخ شروع شده و به سمت شمال‌غرب تا روستای قلعه اجاق می‌رسد. جابجایی راستگرد این گسل در تاکدیس قزلقان (سازند تیرگان) به میزان حدود ۷۰۰ متر دیده می‌شود. روند عمومی گسل‌ها در این زون گسلی شمال‌غرب جنوب‌شرقی است.

در سمت جنوب شرق منطقه مورد مطالعه چند گسل دیده می‌شوند که راستای آنها بر خلاف زون گسلی بجنورد شمال شرق- جنوب غرب می‌باشد. مهم‌ترین این گسل‌های شامل گسل قارلق و گسل بجنورد است. در بخش غربی کوه بابا بلند چند گسل با راستای شمالی جنوبی هم وجود دارند (شکل ۷-۱).



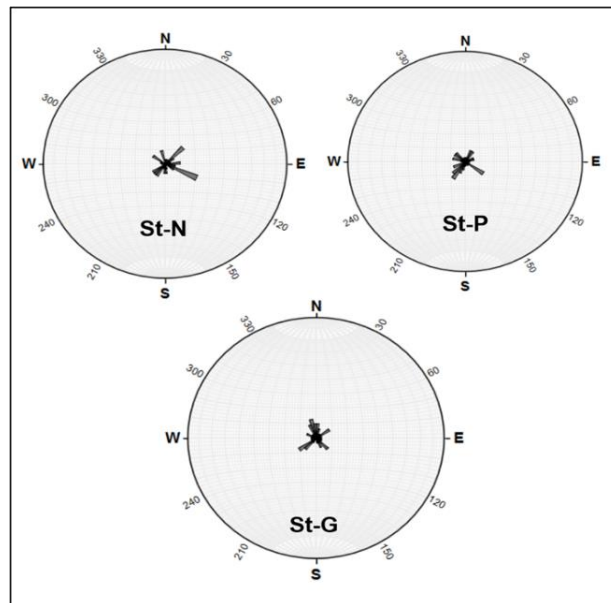
شکل ۷-۱- گسل‌های اصلی منطقه مورد مطالعه. (اقتباس از نقشه زمین‌شناسی چهارگوش بجنورد سازمان زمین‌شناسی کشور ۱۳۶۳)

ج- درزه‌ها و شکستگی‌ها: درزه‌ها، شکستگی‌های بدون جابجایی قابل توجه هستند که در نتیجه تغییر شکل شکننده سنگ و به طور معمول توسط نیروهای تکتونیکی ایجاد می‌شوند. درزه‌ها متداول‌ترین عنصر زمین‌شناسی ساختمانی هستند که در تمام سازندهای کارستی حضور دارند (Ford and Williams 2007). بر خلاف پیچیدگی‌ها و ابهامات بسیار زیاد آبخوان‌های کارستی، مطمئناً آبخوان‌های کارستی مناسب‌ترین محیط برای حفظ اثر درزه‌ها هستند. در نتیجه امکان تعیین منشأ آنها وجود دارد فراوانی درزه‌ها باعث افزایش نفوذ آب‌های سطحی به زیر زمین می‌گردد و با ضخامت لایه رابطه مستقیم دارد. سنگ آهک‌های با لایه‌بندی

ضخیم دارای چگالی شکستگی کم و بازشدگی خوب، سنگ آهک‌های نازک لایه دارای درزه‌های با چگالی بالا ولی بازشدگی کم هستند (Goldscheider & Drew 2007).

با برداشت ۲۷۰ درزه در سه ایستگاه، شمال مجتمع پتروشیمی (St-P)، منطقه قارلق (St-G)، شمال شرق روستای نجف‌آباد (St-P) نمودار گل‌سرخ‌ی آنها ترسیم شده است. روند دسته درزه‌های اندازه‌گیری شده بر روند اصلی گسل‌ها در زون گسلی بجنورد و گسل‌های سمت جنوب شرق منطقه تقریباً عمود است. البته یک روند شمالی جنوبی نیز به چشم می‌خورد. علاوه بر روند درزه‌ها نکته حائز اهمیت دیگر شیب تند درزه‌هاست. بر اساس نمودارها شیب درزه‌ها ۸۰ تا ۸۵ درجه بوده که ۶۵ درصد شیب درزه‌هاست. این شیب مناسب نفوذ به صورت اتوژنیک است. البته در بخش‌هایی از منطقه مورد مطالعه وجود خاک پوششی سازند تا حد زیادی بر روی این نفوذ تاثیر منفی دارد.

بازشدگی درزه‌ها در ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده متفاوت می‌باشد. در کوه بابابلند این بازشدگی تا ۷۰ سانتی‌متر هم رسیده است. در ایستگاه پتروشیمی بازشدگی کمتر و تا حد ۳۰ سانتی‌متر و در ایستگاه قارلق تا ۲۰ سانتی‌متر می‌رسد. پوشش خاک درزه‌ها در مناطقی که سازند سرچشمه وجود داشته باشد، حاصل فرسایش این سازند است. در سایر مناطق به‌خصوص در برش‌های عرضی یال تاقدیس‌ها خاک حاصل از فرسایش سازند تیرگان در درزه‌ها قرار گرفته است. به طوریکه در مقطع اندازه‌گیری شده باباموسی واریزه‌های حاصل از لایه‌های بالایی و مارنی به پایین حمل شده و دهانه درزه‌ها را مسدود کرده است. این مسئله بر نفوذ آب تاثیر منفی گذاشته است. تنها در مناطقی که شیب یال تاقدیس‌ها بسیار زیاد است خاک شسته شده و از دسترس خارج شده است (شکل ۸-۱).



شکل ۱-۸- نمودارهای گل سرخی ترسیم شده از درزه‌ها

#### ۶-۱ ژئومورفولوژی محدوده مورد مطالعه

از عوامل مهم و تعیین کننده در توسعه کارست ژئومورفولوژی هر منطقه است که به طریق مستقیم و یا غیر مستقیم، بر روی توسعه کارست اثر می‌گذارد. شایان ذکر است مطالعات ژئومورفولوژی شامل بررسی تمامی سیمای زمین‌شناسی، توپوگرافی و سیستم زهکشی منطقه می‌شود، که در تعیین مناطق تغذیه و مناطق مستعد جهت برداشت آب‌های زیرزمینی نقش مهمی دارد (Singhal and Gupta 2010). سیمای ژئومورفولوژیکی موثر بر جریان و توسعه کارست را می‌توان در مناطق کارستی به دو گروه سیمای توپوگرافی و سیمای کارستی تقسیم‌بندی کرد.

یکی از عوامل مهم که در توسعه کارست، غالباً به طور غیر مستقیم اثر می‌گذارد ارتفاع است. اختلاف ارتفاع نقش موثری در میزان وقوع بارندگی، تبخیر و تعرق، دما و وضعیت پوشش گیاهی نیز دارد که پوشش گیاهی به نوبه خود از عوامل مؤثر در مقدار نفوذ و رواناب است. بلندترین نقطه ارتفاعی در کوه بابابلند قرار دارد که ۱۵۶۸ متر از سطح دریا ارتفاع دارد و پست‌ترین نقطه با ۸۱۱ متر در بستر رودخانه اترک و در خروجی شمال غرب منطقه قرار دارد بنا بر این اختلاف ارتفاع در منطقه ۵۷۵ متر است.

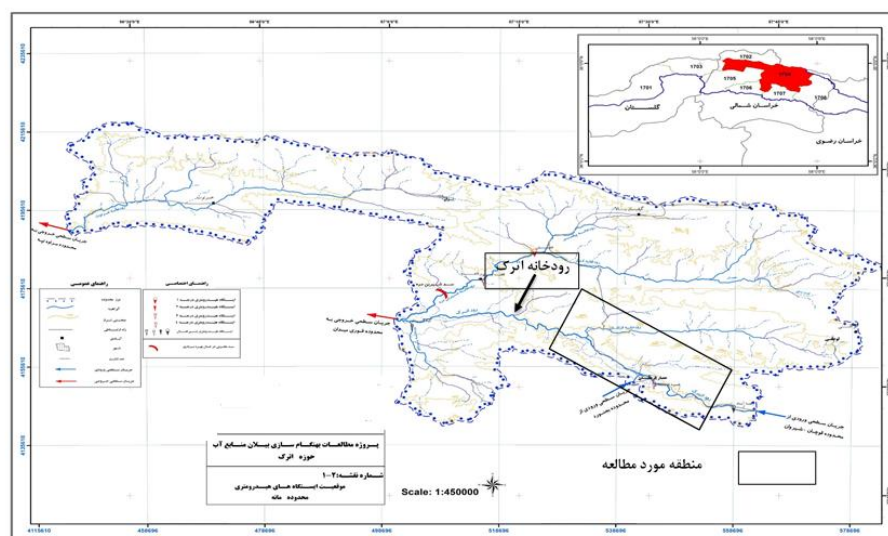
عامل مهم دیگر شیب توپوگرافی است. توپوگرافی معمولاً با چین خوردگی انطباق دارد به طوری که ناودیس‌ها عموماً دره‌ساز و تاقدیس‌ها تپه سازند. با این وجود گاهی نیز حالت دره‌ساز در مورد تاقدیس‌ها دیده می‌شود شرایط توپوگرافی اثرات زیادی بر روی پارامترهای هیدرولیکی می‌گذارد. ماندگاری آب در نقاط کم شیب به دلیل ایجاد شیب هیدرولیکی کم نسبت به مناطق پرشیب که باعث ایجاد شیب هیدرولیکی زیاد می‌شود بیشتر است. در مناطق دارای شیب زیاد امکان باقی ماندن خاک با ضخامت زیاد فراهم نمی‌باشد و بارندگی در کارست برهنه بیشتر نفوذ می‌کند. تاقدیس‌ها و یالهای آن دارای بالاترین شیب در منطقه هستند. بیشترین شیب حدود ۵۶ درجه و در یال شرقی تاقدیس کوه باباموسی دیده می‌شود. در این منطقه ناودیس‌ها دره‌ساز و تاقدیس‌ها ارتفاع‌ساز هستند.

#### ۷-۱ هیدرولوژی منطقه

منطقه مورد مطالعه در بخشی از حوضه آبریز اترک قرار دارد که در شمال شرقی کشور در استان‌های خراسان رضوی، شمالی و گلستان از شرق به غرب امتداد دارد یکی از حوضه‌های درجه ۲ ریزنده به دریای مازندران می‌باشد. این حوضه با وسعت ۲۶۳۹۵/۷ کیلومترمربع در بین طول شرقی ۵۷' - ۵۳' تا ۵' - ۵۹° و عرض شمالی ۵۵' - ۳۶° تا ۱۶' - ۳۸° قرار گرفته و از شمال به جمهوری ترکمنستان، از شرق به حوضه آبریز قره‌قوم، از جنوب به حوضه‌های کویر مرکزی و گرگانرود و از غرب به دریای خزر محدود می‌شود. حوضه اترک هفتمین حوضه آبریز درجه ۲ از حوضه درجه یک کشور (دریای خزر با کد ۱۷) می‌باشد. این حوضه دارای ۸ محدوده مطالعاتی است که منطقه مورد مطالعه در محدوده مطالعاتی مانه واقع می‌شود.

رودخانه اترک از سمت جنوب شرق و از محدوده مطالعاتی شیروان وارد منطقه می‌شود. میزان متوسط جریانات ورودی ۳۰ ساله اخیر در محل ایستگاه قره‌خان‌بندی (جنوب سایت پتروشیمی) ۵۰/۲ میلیون مترمکعب در سال محاسبه شده است. از سمت جنوب غرب نیز در ایستگاه بابا امان آبهای سطحی وارد منطقه مورد مطالعه می‌شود که متوسط آورد ۳۰ ساله اخیر از این حوضه نیز ۳۵/۶۶ میلیون مترمکعب در سال است. از سایر شاخه‌های فرعی که از سمت شمال و شمال شرق به محور اصلی اترک می‌پیوندند زیر شاخه قزلقان می‌باشد

که متوسط ورودی آن حداکثر ۵/۹ و حداقل ۲/۸ میلیون مترمکعب در سال محاسبه شده است. مجموع خروجی این ورودیها که از دشت گرمخان خارج می‌شود حداکثر ۷۴/۷۴ و حداقل ۳۵/۷ میلیون متر مکعب برآورد شده است (شکل ۱-۹). لازم به ذکر است که آمار منتهی به ۱۰ سال اخیر در جریانات سطحی (به جز ایستگاه بابا امان) به شدت کاهش یافته است. یکی از دلایل کم شدن جریان سطحی در حوضه آبریز بالادست ایستگاه هیدرومتری قره‌خان‌بندی برداشت بی‌رویه در بالادست و سرشاخه‌ها، احداث سد (سدهای تبارک آباد، بارزو، چری و شورک) و کاهش سطح آب زیرزمینی در شرق منطقه مورد مطالعه (دشت شیروان و قوچان) است که باعث جذب بیشتر جریانهای سطحی در سطح دشت شده و تغذیه رودخانه در محدوده دشت اتفاق نمی‌افتد و همیشه جریان رودخانه باعث تغذیه دشت می‌شود. در حوضه آبریز قزلقان علیرغم بزرگ بودن حوضه آبریز جریان سطحی موثری در زمان بارش و سیلاب اتفاق نمی‌افتد.



شکل ۱-۹- موقعیت منطقه مورد مطالعه نسبت به محور اصلی رودخانه اترک و سر شاخه‌های آن  
(شرکت آب منطقه‌ای خراسان شمالی)

## ۸-۱ هیدروژئولوژی منطقه

در محدوده مطالعاتی مانه که منطقه مورد مطالعه در آن جای گرفته، دشت و آبخوان آبرفتی گرمخان با وسعت ۱۱/۹ کیلومتر مربع واقع می‌باشد. آبخوان کارستی اصلی منطقه نیز سازند تیرگان است که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. در آبخوان‌های آبرفتی این محدوده مطالعاتی چاه‌های مشاهده‌ای شبکه رفتارسنجی سطح آب زیرزمینی وجود ندارد. با توجه به اینکه محدوده مورد مطالعه فاقد شبکه چاه‌های مشاهده‌ای می‌باشند امکان تهیه نقشه‌های کمی آب زیرزمینی و هیدروگراف معرف آبخوان آبرفتی دشت مربوطه وجود ندارد.

ارتفاعات مشرف به دشت گرمخان را سازندهای تیرگان به عنوان بلندترین سازند ارتفاع‌ساز تشکیل می‌دهد. در منطقه مورد مطالعه به غیر از چاه‌های حفاری شده در این سازند خروجی به صورت چشمه از این سازند وجود ندارد. تنها یک چشمه در داخل محدوده مورد مطالعه وجود دارد که از سازند سرچشمه خارج می‌شود. سازند سرچشمه به دلیل لیتولوژی شیلی-مارنی قابلیت فرسایش زیاد داشته و از طرفی به لحاظ هیدروژئولوژیکی نقش یک واحد محدود کننده توسعه کارست را در منطقه ایفا نموده و از نفوذپذیری اندکی برخوردار است. هم‌چنین به دلیل قرارگیری بر روی سازند تیرگان مانع از نفوذ آب بارندگی می‌شود و در واقع مانع اصلی توسعه کارست در این سازند به شمار می‌آید. تنها در رخنمون‌هایی که به سبب وضعیت ساختاری و یا فرسایش این سازند وجود ندارد نفوذ آب به سازند تیرگان امکان پذیر است و به این موضوع در مطالعات بایستی به دقت توجه شود. از طرفی در محور ناودیس‌ها چون سازند تیرگان در زیر این سازند قرار می‌گیرد ممکن است آبخوان‌های تحت فشار شکل بگیرند که بررسی این موضوع خود به مطالعات وسیع‌تری نیازمند است. سازند سنگانه که بر روی سازند سرچشمه قرار گرفته و به سبب لیتولوژی نفوذناپذیر و مساحت اندک نقش کمی و کیفی ناچیزی بر آب زیرزمینی منطقه داشته و به لحاظ هیدروژئولوژیکی از اهمیت اندکی برخوردار است. سایر سازندهای کرتاسه (مانند سازند آیتامیر، آبدراز و ....) رخنمون بسیار اندکی در منطقه مورد مطالعه دارند.



## فصل دوم: مروری بر مطالعات پیشین

### در ارتباط با نقش چینه‌شناسی در توسعه کارست

سنگ‌های کارستی در بیشتر مناطق دنیا از جمله ایران به صورت یکدست از آهک خالص یا ضخیم لایه تشکیل نشده‌اند، بلکه سرزمین‌های کارستی از انواع سنگ‌های دارای قابلیت انحلال و با درجات مختلف از آهک خالص و ضخیم لایه گرفته تا آهک مارنی، مارن آهکی، دولومیت و نظایر اینها و به صورت توالی تشکیل شده است. بررسی‌های هیدرواستراتیگرافی در دنیا با مقیاس‌های گوناگونی انجام شده است. از این مطالعات برای بررسی زون‌های تراوا در سازندهای ناهمگن، توسعه کارست، پیش‌بینی مهاجرت سیال‌ها، بررسی منشاء آلودگی، سرعت انتقال آلودگی، رفع آلودگی، جداکردن آبخوان‌های مختلف و... استفاده شده است. هدف نهایی مطالعات هیدرواستراتیگرافی به‌دست آوردن و امکان جدایش لایه‌های تراوا و ناتراوا در مقیاس ناحیه‌ای می‌باشد. چنانچه اطلاعات مورد نیاز و کافی موجود باشد امکان بسط این ویژگی‌ها به صورت جانبی میسر خواهد شد. بنا بر این تفکیک سازندهای زمین‌شناسی بر اساس تراوایی نسبی و تبدیل آنها به واحدهای هیدرواستراتیگرافی در بررسی آبخوان‌های کارستی لایه‌لایه کارگشا خواهد بود. از طرفی به دلیل هزینه‌های بالای مطالعات و حفاری چاه‌های آب برای مقاصد شرب و فوریت تامین آن نیاز است قبل از حفاری برای تعیین محل چاه‌های آینده مطالعات کافی از افق‌های آبدار یا زون‌های کارستی وجود داشته باشند.

#### ۲-۱ آبخوان‌های کارستی و اهمیت آنها

منابع آب کارست به سبب کمی و کیفی و محل تشکیل کارست که عموماً در ارتفاعات هستند دارای اهمیت ویژه‌اند. این ویژگی‌ها را می‌توان به صورت زیر برشمرد: منابع آب کارست دارای کیفیت بهتر و مناسب‌تر از منابع آبرفتی هستند و تغییرات کیفی در آنها بسیار کمتر از منابع آبرفتی‌ست. امکان آلودگی این منابع به سبب تشکیل در ارتفاعات نسبت به منابع آبرفتی کمتر است. تامین آب از این منابع نسبت به ساخت سازه‌های

عظیم و پر هزینه مانند سدها بسیار ازران‌تر هستند. در بسیاری از مناطق سازندهای کارستی پراکندگی مناسبی دارند، از جمله در بیشتر مناطق ایران مانند رشته کوه‌های زاگرس، البرز، ایران مرکزی و کپه‌داغ سازندهای کارستی وجود دارند. منابع آب کارستی در بسیاری مناطق منابع آب آبرفتی را تغذیه می‌کنند. علاوه بر موارد پیش گفته به دلیل وجود غار در کارست می‌توان مطالعات بیشتری در عمق زمین انجام داد.

## ۲-۱-۱ تعریف کارست

بر اساس تعریف، کارست حوضه‌ای با هیدرولوژی و مورفولوژی خاص می‌باشد که در اثر انحلال زیاد سنگ و توسعه‌ی بالای تخلخل ثانویه به وجود آمده است (Ford and Williams 2007). واژه کارست به مجموعه‌ای از فرایندهای زمین‌شناسی و پدیده‌های حاصل از آنها در پوسته و سطح زمین گفته می‌شود که عمدتاً شامل پدیده‌های ناشی از انحلال سنگ‌ها می‌باشد و با تشکیل بازشدگی‌ها، تخریب و تجزیه‌ی ساختمان سنگ‌ها، و ایجاد نوع ویژه‌ای از رژیم گردش آب، نوع خاص توپوگرافی منطقه و بالاخره تشکیل رژیم خاصی از زهکشی آشکار می‌گردد.

## ۲-۱-۲ طبقه‌بندی آبخوان‌های کارستی

بر اساس شرایط ژئومورفولوژیکی سه نوع کارست معرفی شده‌اند (Cvijič, J., 1925, 1957). الف- کارست کامل ب- کارست ناقص ج- کارست انتقالی. الف- کارست کامل: این نوع کارست در مناطقی و یا سازندهایی توسعه پیدا می‌کند که تماماً از سنگ‌های کربناته باشند و اشکال سطحی مانند دولین و پولیه و اشکال زیرسطحی مانند غارها در آنها دیده می‌شوند. ب- کارست ناقص: این کارست در مناطقی ایجاد می‌گردد که دارای سنگ‌های آهکی- مارنی و دولومیتی باشند. رسوبات آهکی توسط خاک سطحی و پوشش گیاهی پوشیده شده که به آن کارست پوششی هم می‌گویند. اشکال ناشی از انحلال مانند پولیه و فروچاله در این نوع کارست

دیده نمی‌شوند. ج- کارست انتقالی: همانطور که از نام آن پیداست این نوع کارست بین کارست کامل و ناقص قرار دارد، اشکالی مانند پولیه در آن دیده نمی‌شود ولی اشکال زیر سطحی مانند غارها در آن به وجود می‌آیند.

## ۲-۱-۳ جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های کارستی

وایت (White 1988) شکستگی‌ها، شکاف‌ها، فضاهای خالی و دیگر حفره‌ها را در سنگ‌ها تعریف کرده است. فضاهای خالی بین دانه‌ها که قبل از دیاژنز در سنگ‌ها وجود دارند "تخلخل اولیه" می‌باشند و شکستگی‌های تکتونیکی، شکاف‌ها، سطوح لایه‌بندی و دیگر بازشدگی‌های بزرگ که در سنگ‌ها توسعه می‌یابند، "تخلخل ثانویه" یا "تخلخل شکستگی" هستند.

جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های کارستی می‌تواند از طریق فضاهای خالی، شکاف‌ها، شکستگی‌ها، مجاری و دیگر کانال‌های بزرگ رخ دهد. وایت (White 1988)، فورد و ویلیامز (Ford and Williams 1989) طبقه‌بندی جریان کارست را به دو دسته جریان افشان و جریان مجرای انجام داد. پژوهشگران دیگر مانند شاستر و وایت (Shuster and White 1971; White 1988) اشاره کردند که بسیاری از آبخوان‌ها شامل هر دو سیستم جریان یاد شده هستند.

کوین لن و همکاران (Quinlan et al. 2010) آبخوان‌های کارست را بر اساس ویژه‌گی‌های ژئومورفولوژیک نواحی کارستی، به عنوان شاخص‌های قابل اعتماد طبقه‌بندی کردند. سازندهای کربناتی که شامل فروچاله، دره‌های خشک، جریان‌های غرق‌شده یا کارن باشند، جریان مجرای غالب بوده و یا حداقل وجود دارد البته عکس مطلب صادق نیست. وایت (White 1998) استدلال می‌کند که آبخوان‌های دارای جریان مجرای دارای ورودی‌های متمرکز شده هستند و جریان از طریق سینکول‌ها صورت می‌گیرد و در مقابل، آبخوان‌های دارای سیستم افشان، آبخوان‌هایی هستند که سیستم مجرای آن ضعیف است و یا وجود ندارد.

شاستر و وایت (Shuster and White 1971) بیان می‌کنند جریان افشان در امتداد درزه‌ها، شکستگی‌ها، سطوح لایه‌بندی و دیگر بازشدگی‌های کوچک متصل به هم وجود دارد که معمولاً اندازه یک سانتی متر یا کمتر دارند. در مقابل، جریان در سیستم مجرای در فضاهایی بیشتر از یک سانتی متر اتفاق می‌افتد. جریان

افشان به صورت جریان ورقه‌ای در یک محیط متخلخل رفتار می‌کند، گرچه ممکن است محیط بسیار غیر همروند باشد. تخلیه طبیعی از یک سیستم افشان معمولاً از طریق چندین چشمه نسبتاً کوچک صورت می‌گیرد و یا اگر چندین چشمه بزرگ وجود داشته باشد به دلیل ویژگی‌های خاص زمین‌شناسی منطقه خواهد بود. در عوض، جریان در سیستم‌های مجرای به صورت متمرکز ظاهر می‌شود که از طریق فرایندهای انحلال تشکیل شده است. جریان‌های با دبی بالا در سیستم مجرای به علت هدایت هیدرولیکی بسیار بالا صورت می‌گیرد و جریان اغلب در رژیم آشفته رخ می‌دهد. تخلیه طبیعی در یک سیستم مجرای معمولاً از طریق یک چشمه بزرگ صورت می‌گیرد. مطالعات بعدی که توسط پژوهشگرانی چون اد (Ede 1972) نیوسون (Newson 1972) و ترنان (Ternan 1972) جاکوبسن و لانگ مویر (Jacobson and Langmuir 1974) انجام شد به طور کلی طبقه‌بندی پیشنهاد شده توسط شاستر و وایت (Shuster and White 1971) را تایید کرد.

## ۲-۱-۴ اهمیت آبخوان‌های کارستی

سنگ‌های کارستی حدود ۲۰ درصد از سطح قاره‌ها را می‌پوشانند (White 1988) و تقریباً یک چهارم مردم جهان، آب آشامیدنی خود را از منابع آب کارستی تأمین می‌کنند (Ford and Williams 1989). سنگ‌های کارستی کربناته ۱۱ درصد مساحت کل کشور (۱۸۵۰۰۰ کیلومتر مربع) را فرا گرفته است که از این میزان ۵۵ درصد در زاگرس، ۲۵ درصد در ایران مرکزی و ۱۵ درصد در البرز و ۵ درصد در شرق، جنوب شرق و کپه داغ ایران قرار دارد (ناصری ۱۳۷۰).

## ۲-۲ انواع سنگ‌های کربناته و پتانسیل انحلال آنها

به سنگ‌هایی که بیش از ۵۰ درصد یون کربنات در ترکیب شیمیایی آنها وجود داشته باشد سنگ‌های کربناتی می‌گویند (Ford & Williams 2007). کلسیت و آراگونیت و دولومیت فراوان‌ترین سنگ‌های آهکی هستند.

کلسیت اکثراً با  $MgCO_3$  دیده می‌شود و در دریای عمیق به دلیل کاهش  $Mg$  بیشتر کلسیت رسوب می‌کند. آراگونیت نسبت به کلسیت بهتر در آب حل می‌شود. این کانی ناپایدار بوده و به کلسیت تبدیل می‌شود این تبدیل با کاهش تخلخل همراه است. البته سنگ‌های کارستی در گروه‌های اصلی کربناته، سولفات، کلروره و آواری معرفی می‌شوند. در شکل ۱-۲ برخی از مشخصات فیزیکی و شیمیایی آنها به تفکیک هر گروه آورده شده است.

جدول ۱-۲-۱- کانیهای اصلی سنگ‌های آهکی

| نام کانی | ترکیب شیمیایی  | جوشش با اسید         | وزن مخصوص | سختی   | رنگ              |
|----------|----------------|----------------------|-----------|--------|------------------|
| کلسیت    | $CaCO_3$       | جوشش شدید            | ۲/۷       | ۳      | سفید-زرد-قهوه‌ای |
| آراگونیت | $CaCO_3$       | می جوشد              | ۲/۹       | ۳/۳۵-۴ | سفید-زرد         |
| دولومیت  | $CaMg(CO_3)_2$ | جوشش جزئی            | ۲/۸       | ۳/۳۵-۴ | سفید-قهوه‌ای     |
| مگنیزیت  | $MgCO_3$       | جوشش فقط با اسید گرم | ۳/۲-۳     | ۳/۵-۵  | سفید-زرد         |

## ۱-۲-۲ سنگ‌های آهکی

سنگ‌های آهکی به ندرت به صورت خالص در طبیعت دیده می‌شوند. در طبیعت تقریباً  $CaCO_3$  خالص نداریم و بر اساس ناخالصی به سه دسته کلسیت خالص، کلسیت با منیزیم کم و کلسیت با منیزیم زیاد تقسیم‌بندی می‌شوند. سنگ آهک در کارست معمولاً به سنگ‌هایی گفته می‌شود که از کانیهای کلسیت و آراگونیت تشکیل شده باشند. به طور معمول اگر شرایط را یکسان در نظر بگیریم کلسیت خالص سریعتر از دولومیت حل می‌شود. برآوردهایی که بر اساس اندازه‌گیری‌های صحرایی انجام شده است نشان می‌دهد که سنگ‌های آهکی و دولومیتی ۱/۴ تا ۱/۵ درصد از ستون چینه‌شناسی را تشکیل می‌دهند (کریمی وردجانی ۱۳۸۹).

کلسیت در سنگ‌های آهکی، هم به صورت اجزای اصلی تشکیل دهنده و هم به صورت کانی دیاژنتیکی وجود دارد. ساختمان اسکلتی موجودات زنده‌ی سنگ‌ساز از کانیهای کلسیت و آراگونیت تشکیل شده است. مواد اسکلتی برخی از موجودات آراگونیتی، و بعضی منحصراً کلسیتی است و در برخی از آنها بخشی آراگونیتی و بخشی کلسیتی می‌باشد.

از دیدگاه رسوب شناسی کربناتها، هر قدر اندازه دانه‌های متشکله سنگ ریزتر باشند، می‌تواند انحلال بیشتری صورت گیرد چون سطح واکنش با آب زیادتر است. البته به شرطی که آب بتواند وارد فضاها شود. مثلاً بایومیکرایت (ریزدانه) انحلال بیشتری از اسپارایت (درشت دانه) دارد. هر چه سنگ هتروژن باشد انحلال بیشتر خواهد بود. بنا بر این بایومیکرایت انحلال بیشتری نسبت به میکرایت دارد.

## ۲-۲-۲ آهک‌های مارنی

بین آهک خالص و مارن طیف پیوسته از سنگ‌ها وجود دارد. میزان رس اضافه شده به محیط رسوبی که در ته‌نشینی کربناتها شرکت کند باعث کاهش خلوص آهک شده و آهک را به سمت آهک مارنی برده و بعد از آن مارن آهکی تشکیل می‌شود. رس به لحاظ انحلال بسیار مقاوم است. بنا بر این در توالی چین‌شناسی آهک‌های مارنی سرعت انحلال و درجه انحلال کمتری نسبت به آهک‌های خالص دارند. حضور لایه‌های مارنی در بین لایه‌های آهکی به عنوان لایه دارای نفوذپذیری کم تا نفوذناپذیر تلقی می‌شوند.

## ۲-۲-۳ دولومیت‌ها

دولومیت با فرمول شیمیایی  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  دارای ساختمان شیمیایی همانند سنگ‌های آهکی است. کلسیت و دولومیت را به سختی می‌شود از یکدیگر تشخیص داد. بیشتر دولومیت‌ها ثانویه هستند و به صورت بلوری در اثر جانشینی کربناتها تشکیل می‌شوند (Jennings 1971). معمولاً سنگ‌شناسان برای تشخیص دولومیت از شکل رمبوه‌درال آن استفاده می‌کنند. هیچ یک از ساختمان‌های فسیلی در اصل دولومیتی نیستند بلکه در اثر جانشینی بعد از رسوب‌گذاری حاصل شده‌اند. اگر میزان  $\text{MgO}$  در ترکیب شیمیایی آهک بیش از ۱ یا ۲ درصد باشد احتمالاً دال بر وجود کانی دولومیت است. البته برخی، واژه سنگ آهک منیزمدار را برای سنگ آهک‌هایی که چند درصد  $\text{MgO}$  دارند به کار می‌برند که فاقد دولومیت هستند. فراوان‌ترین سنگ‌های آهکی سنگ‌هایی هستند که حاوی کمتر از ۴ درصد  $\text{MgCO}_3$  می‌باشند.

## ۲-۳ ارزیابی نقش چینه‌شناسی در توسعه آبخوان‌های کارستی

عوامل متعددی در پدیده کارستی شدن سازندهای کربناته نقش دارند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به مواردی از قبیل لیتولوژی، میزان بارندگی، ویژگی‌های چینه‌شناسی، عوامل ساختاری و توپوگرافی منطقه اشاره نمود (White 1988; Eisenlohr *et al.* 1999; Veni 2008). از بین عوامل مختلف تاثیرگذار در توسعه کارست، لیتولوژی و خصوصیات چینه‌شناسی سازندهای موجود در هر منطقه از اهمیت زیادی برخوردار هستند (Dreybrodt 2005; Zuber and Motyka 1996). در مناطقی که سنگ‌های آهکی ضخیم لایه و توده‌ای وجود دارند، معمولاً پدیده کارستی شدن با شدت بیشتری انجام می‌شود (Ford and Williams 1989). در این قبیل مناطق معمولاً شرایط حاکم بر رسوبگذاری به نحوی‌ست که ناخالصی‌ها نسبتاً اندک بوده و به همین دلیل برای فرایند کارستی شدن بسیار آماده هستند. علاوه بر لیتولوژی و ضخامت لایه‌ها، چگونگی قرارگیری لایه‌ها نسبت به یکدیگر که در حقیقت بیانگر وضعیت چینه‌شناسی منطقه مورد نظر نیز می‌باشد، نقش مهمی را ایفا می‌نماید. به عنوان مثال ممکن است که در بعضی از مناطق لایه‌های شیلی یا مارنی، که نفوذپذیری ناچیزی دارند، نسبت به لایه‌های آهکی ضخیم و توده‌ای به گونه‌ای قرار گرفته باشند که جریان آب زیرزمینی در داخل آنها را مانع شوند و یا حداقل کاهش دهند. در چنین شرایطی اگر چه لایه‌های آهکی ضخیم و توده‌ای مستعد برای فرایند کارستی شدن وجود دارند، ولی در این لایه‌ها توسعه کارست قابل توجه نخواهد بود.

مطالعات چینه‌شناسی متعدد در کپه‌داغ نشان می‌دهد سازند تیرگان در این منطقه به صورت یکدست از لایه‌های آهکی تشکیل نشده، بلکه به صورت توالی از لایه‌های آهکی با ضخامت‌های متفاوت، لایه‌های آهکی - مارنی، مارن آهکی، مارن و حتی شیل تشکیل شده است. از طرفی وضعیت ساختاری و وجود چین‌ها و ساختارهای تاق‌دیزی ناودیزی و گسل خوردگی باعث می‌شود لایه‌های آهکی در بین لایه‌های غیر آهکی که عموماً به عنوان لایه غیر قابل نفوذ یا با نفوذپذیری کم تلقی می‌شوند، قرار گیرند و این وضعیت باعث جلوگیری از گردش آب و در انتها باعث کاهش انحلال و در پی آن کاهش توسعه کارست می‌شود.

## ۲-۳-۱ نقش چینه‌شناسی در تغذیه آبخوان‌های کارستی

بر اساس نظر وایت (White 2002) چهار حالت مختلف در تغذیه کارست وجود دارد. ۱- تغذیه خودزا: که صرفاً ورودی به آبخوان کارستی در اثر نفوذ از بارندگی که مستقیماً بر روی سطح منطقه کارستی می‌بارد صورت می‌گیرد. ۲- تغذیه دگرزا: که رواناب‌های سنگ‌های غیر کارستی مجاور و یا لایه‌های پوشاننده کارست به درون آبخوان کارستی جریان می‌یابد. این نوع تغذیه به صورت یک ورودی نقطه‌ای است که از طریق حفره‌های بلعنده صورت می‌گیرد. ۳- رواناب درونی: هنگامی اتفاق می‌افتد که آب باران سریعاً از طریق فروچاله‌ها وارد آبخوان شود. ۴- آب باران در سنگهای پوشاننده کارستی تجمع می‌یابد و مازاد آن از طریق شفت‌های عمودی یا شکافهای توسعه یافته وارد آبخوان می‌شود. البته بسیاری از پژوهشگران ورودی‌ها را به سه دسته تقسیم می‌کنند و شامل خودزا، دگرزا و مخلوط می‌دانند (Jacques 1999, Williams 2007).

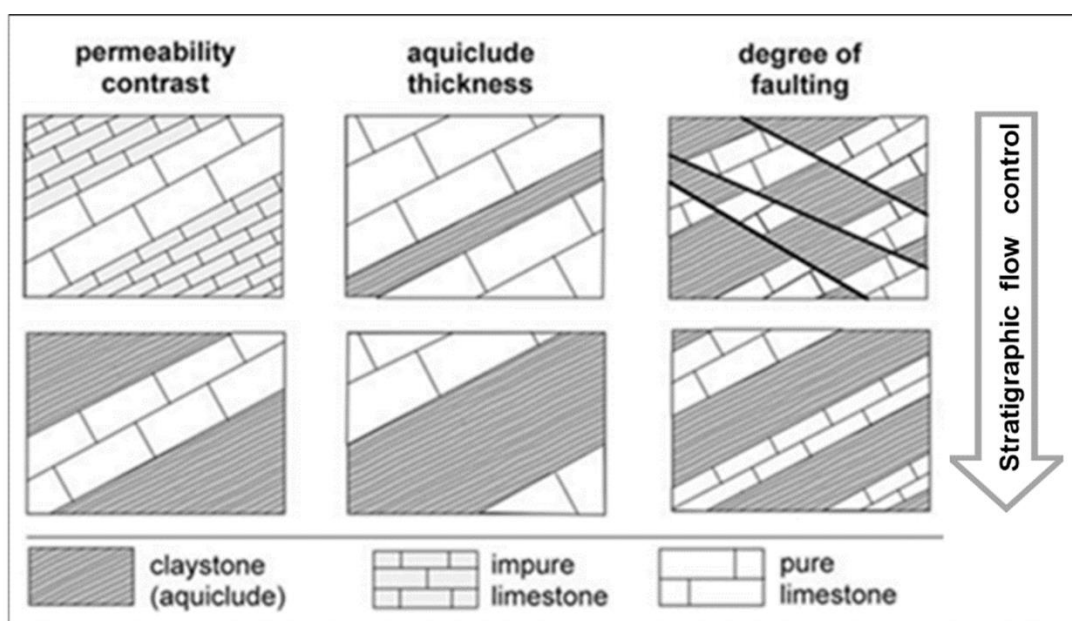
سازندهای سنگی نفوذپذیر و یا نفوذناپذیر در توالی چینه‌شناسی به فراوانی دیده می‌شوند، که به تناسب نقش خود می‌تواند هم باعث نفوذ مستقیم شده و هم از نفوذ جلوگیری کند. کنترل چینه‌شناسی در تغذیه آبخوان کارستی هم به لیتولوژی و هم به ساختار تکتونیکی منطقه بستگی دارد، به گونه‌ایکه ممکن است لایه قابل نفوذ به سبب وضعیت چین خوردگی در زیر لایه غیر قابل نفوذ قرار بگیرد و گردش آب در آن اتفاق نیفتد. به منظور بررسی دقیق مناطق تغذیه در کارست بررسی وضعیت ساختاری به همراه بررسی لیتولوژی صورت می‌گیرد.

جاکم و همکاران (Juckem. P F. et al. 2006) در مطالعه‌ای در جنوب غرب ویسکانسین به بررسی اثر مقیاس و هیدرواستراتیگرافی تغذیه و زون‌بندی آن در تولید جریان پایه پرداختند. در این مطالعه با استفاده از اندازه‌گیری جریان پایه و سطح آب زیرزمینی و مدل‌سازی (MODFLOW) به بررسی مرز بحرانی تغذیه پرداخته شده و مشخص گردیده که لایه‌بندی هیدرواستراتیگرافی (با در نظر گرفتن مقیاس) در تغذیه بسیار موثر است.

## ۲-۳-۲ نقش چینه‌شناسی در کنترل جریان

عوامل متعددی در توسعه پدیده کارستی شدن نقش ایفا می کنند که یکی از مهم ترین آنها چینه شناسی است. کنترل های چینه ای جریان را می توان بر اساس درجه جریان آب زیرزمینی که توسط لایه بندی کنترل می شود بیان نمود. درجه کنترل چینه ای آب زیرزمینی بستگی به تفاوت هدایت هیدرولیکی بین لایه آبخوان و ضخامت و شکستگی های لایه غیرقابل نفوذ دارد (Goldscheider 2005).

با توجه به شکل ۱-۲ نشان داده شده است که در صورتی عبور جریان آب زیرزمینی در عرض لایه بندی امکان دارد که تفاوت در هدایت هیدرولیکی کم، یا لایه ناتراوا کم ضخامت، یا درجه گسل خوردگی شدید باشد (ردیف بالا) و جریان آب زیرزمینی در امتداد لایه بندی وقتی امکان دارد که تفاوت در هدایت هیدرولیکی بالا، لایه ناتراوا ضخیم و یا درجه گسل خوردگی پایین است (ردیف پایین) (Goldscheider 2005).



شکل ۱-۲- عوامل موثر بر کنترل های چینه ای (Goldscheider 2005)

اغلب می توان چند سازند کنار هم را به عنوان یک واحد هیدروژئولوژی در نظر گرفت و بر عکس. برخی مواقع لازم است یک سازند را به واحدهای مجزای هیدروژئولوژی تقسیم بندی نمود. لایه های مارنی و رسی کنار هم لایه ناتراوا و چند لایه آهکی کنار هم تشکیل یک آبخوان را می دهند. به این ترتیب که یک سازند ممکن است شامل لایه های آهکی (تراوا) و لایه های مارنی (ناتراوا) باشد. در برخی موارد ممکن است یک لایه نازک آهکی که در بین لایه ضخیم مارنی قرار دارد یک آبخوان محلی مهمی باشد. حتی تغییر در لیتولوژی یک سازند

کربناته می‌تواند باعث تغییر در رفتار هیدرولیکی آن بشود. وایت (White 1969) برای سیستم‌های آبخوان کربناته تقسیم‌بندی بر مبنای هیدرواستراتیگرافی انجام داده است اگر یک لایه سنگی آهکی از بالا و پایین بین لایه‌های ناتراوا قرارگیرد اصطلاح "جریان ساندویچی" را به کار برده است. وی ذکر نموده است که لیتولوژی نقش بسیار مهمی در بروز ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی یک سازند دارد.

گرچه سازندهای کربناته پتانسیل کارستی شدن را دارند اما تبدیل آنها به آبخوان مناسب کارستی به سایر عوامل به ویژه چینه‌شناسی بستگی دارد. تغییرات رخساره‌ها نیز ممکن است محدود به حد کنترل چینه‌ای باشند. مثلاً اگر توده ریف سازند مارنی و آهکی را قطع کرده باشد اجازه عبور جریان را در عرض توالی چینه‌ای میسر می‌سازد (Batsche *et al.* 1970). این تغییرات رخساره می‌تواند آثار شگرفی بر هیدروژئولوژی کارست بگذارد، مثلاً یک لایه مارنی ناتراوا می‌تواند دو آبخوان کارستی را از هم جدا کند در حالیکه اگر این لایه در تغییر جانبی رخساره تشکیل نشده باشد کارست یکپارچه شکل خواهد گرفت.

پالمر (Palmer 1986) در بررسی‌هایی که در کوه‌های ماموت در کارست‌های ایالت کنتاکی آمریکا انجام داد، بیان کرد که ارتباط نزدیکی بین توسعه گذرگاه‌های غار با لایه‌های مشخصی وجود دارد. حدود ۶۰ درصد غار کریستال محدود به حد لیتولوژی مشخصی است و بیشتر گذرگاه در یک افق چینه‌شناسی قرار گرفته است. شناخت ناکافی از پیچیدگی‌های چینه‌شناسی می‌تواند مانعی جدی در اکتشاف منابع آب کارستی ایجاد نماید. در شمال غربی آریزونا، آمریکا در یک توالی رسوبی سازند آهکی موا توسط تونتر (Twenter 1962) مطالعه شده است که در بالای یک لایه رسی قرار دارد و چشمه‌هایی از این سازند به گراندکانیون تخلیه می‌شوند. این لایه شیلی با سازند آهکی تداخل بین انگشتی دارد و در برخی مناطق هم در بالا و هم در پایین سازند آهکی قرار می‌گیرد. شناخت نادقیق و ناکافی از چینه‌شناسی این ارتباط باعث شده که بسیاری از حفاری‌ها به محض برخورد به لایه شیلی متوقف شوند، حال آنکه در زیر لایه شیلی آهک موا وجود داشته است و چنانچه حفاری بعد از لایه شیلی هم ادامه می‌یافت چاه به لایه آهکی دارای آب برخورد می‌نمود (Huntoon 1977).

در هیدروژئولوژی کارست حتی بین آهک‌های مختلف هم تفاوت قایل شده‌اند، به طوریکه آهک‌های با درجه حلالیت بالا ممکن است در کنار آهک‌هایی با درجه حلالیت پایین قرار گیرند بنا بر این شناخت دقیق لیتولوژی

هر یک از لایه‌های آهکی و میزان بازشدگی شکستگی‌ها از درجه اهمیت بالایی برخوردار است چون این تفاوت‌ها در میزان تراوایی هر سازند تاثیر مستقیمی بر جای می‌گذارد ( LeGrand and Stringfold 1971, 1966). در هیدروژئولوژی، لایه‌های آبدار یا آبخوان با نام چینه‌شناسی آن شناخته می‌شوند و معمولاً با لایه‌های تراوا یا ناتراوای محض هم سروکار نداریم بلکه با ترکیبی از لایه تراوا- ناتراو روبرو هستیم که مجموعاً محیطی ناهمروند و ناهمگن کارستی را شکل می‌دهند (Freeze and Cherry 1979).

## ۲-۳-۳ نقش چینه‌شناسی در ناهمگنی آبخوان کارستی

حقیقت این است که آبخوان‌های کارستی بسیار ناهمگن هستند پژوهشگران زیادی در این باره مطالعه کرده‌اند ( Castany 1984; Ford and Williams 1989; Hiscock and Lloyd 1992; White 1999; Worthington 1999; Streltsova, T.D., 1976b, 1988; Milanovic 1981; Gabrovsek and Dreybrodt 2000; Mace and Hovorka 2000; etc.). جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های کارستی می‌تواند از طریق فضاها، شکاف‌ها، شکستگی‌ها، مجاری و دیگر کانال‌های بزرگ رخ دهد. از آنجا که این ویژگی‌های هدایت جریان معمولاً به طور یکسان توزیع نمی‌شوند، آبخوان‌های کارستی عموماً ناهمگن و ناهمروند هستند. بنا بر این توزیع فضایی تخلخل‌های مختلف و نفوذپذیری (و نوع غالب آن) بر ویژگی‌های ناهمگنی و سیستم‌های جریان آبخوان تاثیر می‌گذارد. بنا بر این، شناخت سیستم‌های ناهمگنی و جریان، در ارزیابی حرکت آب‌های زیرزمینی و انتقال آلودگی در آبخوان‌های کارستی بسیار مهم هستند.

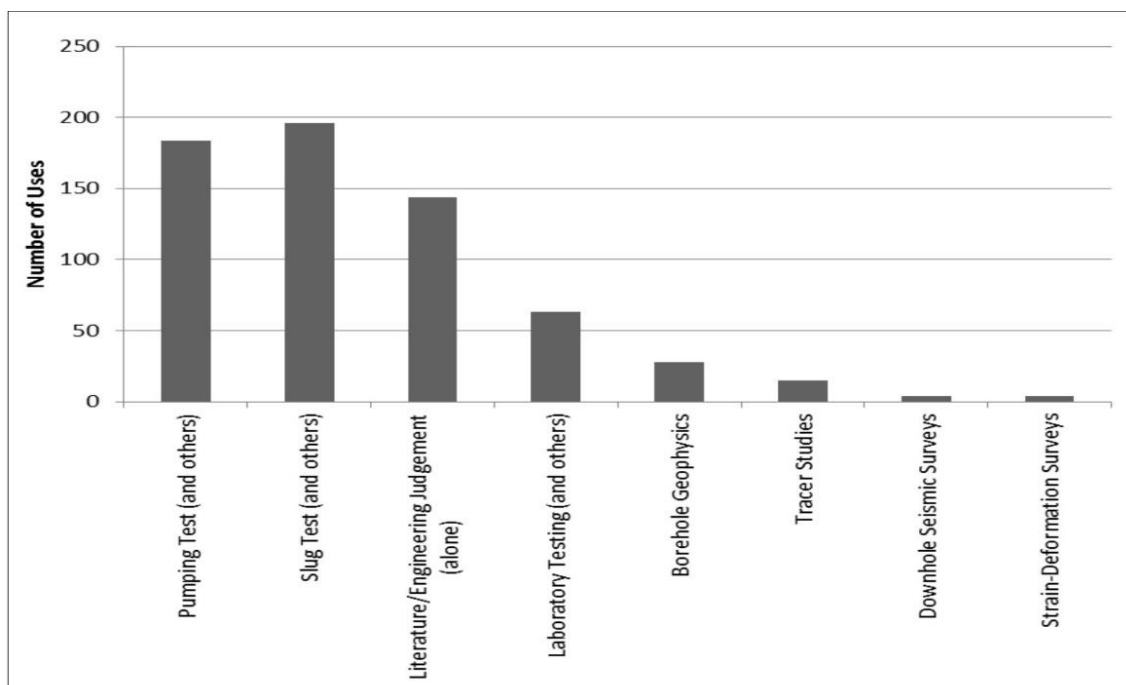
مطالعات مرتبط با ناهمگنی در آبخوان‌های کارستی در طیف گسترده‌ای انجام شده است. کراجوسکی (Krajewsky 1996) توزیع خواص هیدروژئولوژیکی در درز و شکافهای سازند کربناته در شرق لهستان را مطالعه کرد. داده‌های آزمایش پمپاژ در این سازند نشان می‌دهد که پهنه‌بندی در هدایت هیدرولیکی افقی و عمودی ایجاد شده است، که ناشی از تاثیر لیتولوژی و عوامل تکتونیک می‌باشد.

دیلون و همکاران (Dillon et al 2001) ناهمگنی یک آبخوان کربناته محصور در مقیاس مغزه‌های حفاری برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی عمودی و افقی را بررسی کردند. آنها دریافتند که مقادیر هدایت

هیدرولیکی تغییر قابل ملاحظه‌ای در جهت‌های افقی  $K_x$  و  $K_y$  و بیش از دو برابر در جهت عمودی  $K_z$  را نشان می‌دهد. همانطور که از آثار فوق برمی‌آید، واضح است که آبخوان‌های کارستی بسیار ناهمگن هستند. ناهمگنی در این آبخوان‌ها ممکن است به صورت عمودی و یا به صورت افقی اتفاق بیافتد و ناشی از خواص سنگ‌ها و یا کارکرد چندین فرآیند مانند انحلال (به ویژه)، نیروهای تکتونیکی و هوازدگی باشد.

## ۲-۴ تعیین تراوایی آبخوان‌های کارستی

اساس تقسیم‌بندی واحدهای هیدرواستراتیگرافی (HSU) (Hydrostratigraphic Units) در اختیار داشتن هدایت هیدرولیکی " $K$ " می‌باشد. در این مطالعه هدایت هیدرولیکی سنگ یا مواد زمین‌شناسی سخت شده و دارای شکستگی مورد نظر می‌باشد. برای تعیین هدایت هیدرولیکی از روش‌های متعددی استفاده می‌شود که فراوانی کاربرد مهمترین آنها در شکل ۲-۲ آمده است (USEPA 1993 and 2001; Burbey and Murdoch, 2010).



شکل ۲-۲- فراوانی روش‌های به‌دست آوردن هدایت هیدرولیکی (USEPA 1993 and 2001, Burbey and Murdoch, 2010).

برای به دست آوردن هدایت هیدرولیکی سنگ‌ها عمدتاً هشت روش مورد استفاده قرار می‌گیرد که استفاده از هر روش به شرایط ویژه خود بستگی دارد. این شرایط عبارتند از: مقیاس مطالعه، امکانات موجود، دقت مطالعه، هزینه، داده‌های موجود. باتوجه به روش‌های یاد شده از روش شماره یک تا هشت، مقیاس مطالعه افزایش می‌یابد. با توجه به داده‌های موجود و مقیاس مطالعه که در این مطالعه ناحیه‌ای است از روش‌های آزمایش پمپاژ و لاگهای ژئوفیزیکی به‌طور همزمان استفاده شده است.

## ۲-۴-۱ آزمایش پمپاژ

معتبرترین و رایج‌ترین روش به دست آوردن خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان‌های آب زیرزمینی انجام آزمایش پمپاژ است. دلیل این مطلب از این قرار است که این روش ویژه‌گی‌های بخش بسیار بزرگی از آبخوان‌های آبدار را منعکس می‌کند (Kruseman & Ridder 1994, Todd 1980, Walton 1962, 1970). در آبخوان‌های ناهمگن مانند آبخوان‌های درز و شکافدار و کارستی تعیین ویژگی‌های هیدرودینامیکی آبخوان‌های آبدار بر اساس داده‌های به دست آمده از مغزه‌های حفاری تعداد معدودی چاهک آزمایشی، مشکل و یا غیرممکن است. آزمایش پمپاژ می‌تواند در این آبخوان‌ها تخمین نسبتاً خوبی از خواص هیدرودینامیکی را به دست دهد هم‌چنین آزمایش پمپاژ می‌تواند اطلاعات اساسی برای ویژگی‌های چاه، پارامترهای آبخوان‌ها و مرزهای هیدرولوژیکی در اختیار ما قرار دهد (Karami 2002).

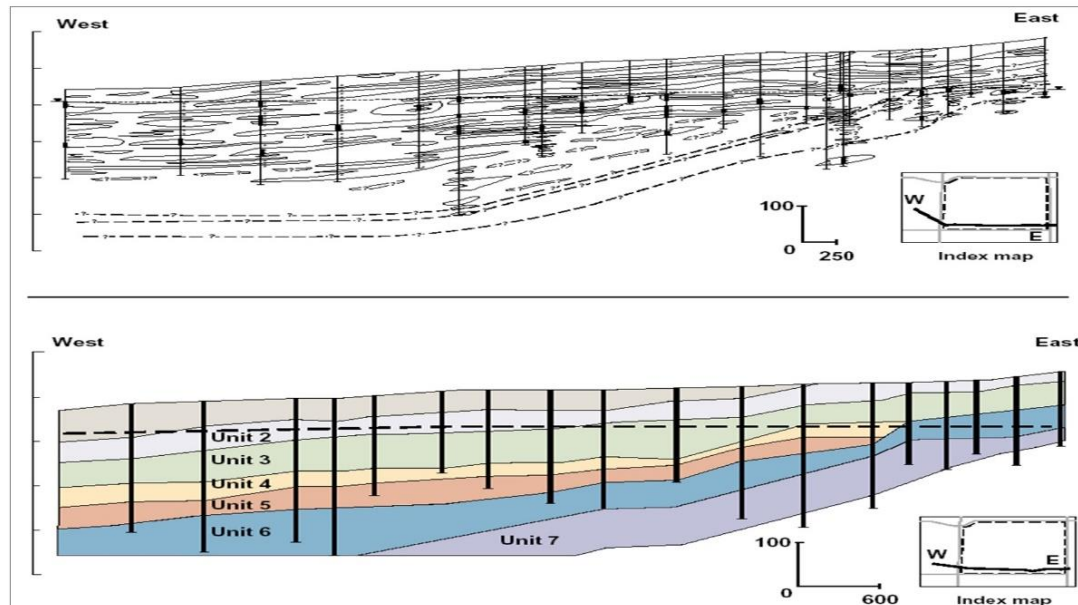
بر اساس مطالعات انجام گرفته، روش‌های استفاده شده برای تجزیه تحلیل آبخوان‌های کارستی همان روش‌های آبخوان‌های آبرفتی می‌باشند، چون رفتار کلی بیشتر این آبخوان‌ها با آبخوان‌های کارستی مشابهت دارد. از طرفی بررسی این آبخوان‌ها با روش‌های دیگر، نیاز به داده‌هایی دارند که غالباً در دسترس نیستند و شامل ویژگی‌های مهندسی سنگ، اندازه‌گیری و تحلیل درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها، اندازه‌گیری نفوذپذیری شکافها و .... می‌شوند. روش‌های تاپس (Theis 1935) و کوپر-ژاکوب (Cooper and Jacob 1946) متداولترین روش‌های بررسی آبخوان‌های کارستی نیز هستند (Michalski and Britton 1997; Jones 1999; Dillon *et al.* 2001; )

Karami 2002). برخی پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که روش کوپر-ژاکوپ گرچه برای آبخوان‌های همگن ارایه شده اما نتایج مفیدی هم در آبخوان‌های ناهمگن ارایه می‌دهد.

به عقیده سامانی و پسندی (Samani and Pasandi 2006) پاسخ یک آبخوان به آزمایشات بلند مدت توسط وضعیت‌های مرزی و ناهمگنی کنترل می‌شود در چنین آزمایشاتی نمودار نیمه لگاریتمی مربوط به روش کوپر-ژاکوپ (Cooper and Jacob 1946) نسبت به روش تایس (Theis 1935) ارجح‌تر است. زیرا در روش کوپر-ژاکوپ که محور افقی زمان و محور عمودی افت می‌باشد تغییرات به صورت خط راست نمایش داده می‌شود و هرکجا شیب تغییر کند و دبی پمپاژ ثابت باشد معرف ناهمگنی است. در مورد داده‌های زمان اولیه پمپاژ در چاه‌های مشاهده‌ای نه چاه بهره‌برداری روش کوپر-ژاکوپ (Cooper and Jacob 1946) غیر معتبر بوده و از روش تایس استفاده می‌شود (Karami 2002). ناهمگنی در آبخوان‌های درز و شکافدار امکان دارد تا محدوده وسیعی توسعه یافته باشد. گرچه آزمایش پمپاژ بهترین روش ارزیابی ضریب قابلیت انتقال و ضریب ذخیره است اما از مهم‌ترین مشکلات آزمایش پمپاژ در چاه‌های عمیق اثر ذخیره چاه و اثر پوسته گذاری است.

در خصوص انتخاب روشی مناسب به منظور ارزیابی خصوصیات هیدرودینامیک آبخوان‌های درز و شکافدار کرمی (Karami 2002) بیان داشته است در زمانی که داده‌های افت-زمان شامل سه بخش شود کاربرد روش تایس (Theis 1935) و کوپر-ژاکوپ (Cooper and Jacob 1946) خطای قابل ملاحظه‌ای خواهند داشت. در اینگونه آبخوان‌ها منحنی افت-زمان که شامل سه بخش است از نظریه تخلخل دوگانه پیروی خواهد کرد به همین دلیل داده‌های آزمایش پمپاژ در آبخوان‌های یاد شده بایستی از روش مانش (Moench 1984) تحلیل شوند. روش‌های به‌دست آوردن قابلیت انتقال فراوان است اما جدایش هدایت هیدرولیکی از ضخامت به‌خصوص در سازندهای هتروژن (سازندهای درز و شکافدار) پیچیده است. چون در این سازندها "K" به صورت همگن توزیع نشده است. بنا بر این طی روش‌های مختلفی بایستی "K" را بتوان از "T" جدا نموده و به ضخامت مورد نظر نسبت داد. برخی پژوهشگران با وجود داده‌هایی چون لاگ چاه‌ها و برخی اطلاعات هیدروژئولوژی مانند شیب لایه‌ها، شیب و جهت درز و شکافها و شکستگیها و فراوانی و تراکم آنها، ضریب قابلیت انتقال و ظرفیت ویژه توانستند در آبخوان‌های هتروژن هدایت هیدرولیکی را بسط دهند (Laurencelle, Morin Beaudry, )

Christine 2011). در شکل ۳-۲ نحوه جدایش واحدهای هیدرواستراتیگرافی بر مبنای هدایت هیدرولیکی نشان داده شده است.



شکل ۳-۲- تفکیک واحدهای هیدرواستراتیگرافی بر مبنای تراوایی ( Laurencelle, Morin Beaudry, Christine )  
(2011)

## ۲-۴-۲ چاه پیمایی

یکی از روش‌های مهم بررسی‌های زیرسطحی، چاه پیمایی یا لاگینگ (Well logging) می‌باشد. یک نمودار چاه‌پیمایی گرافی است در مقابل عمق که پارامترها و یا کمیت‌های فیزیکی اندازه‌گیری شده در یک چاه و یا پارامترهای مشتق شده از آنها را به صورت منحنی عرضه می‌کند. از این لاگ‌ها برای بررسی ویژگی‌های فیزیکی سازندها مانند نفوذپذیری، تخلخل، فاکتور سازندی و ویژه‌گی لایه‌های زیر سطحی مانند لیتولوژی، درزه و شکستگی‌ها، مایعات درون چاه مانند ویسکوزیته، شوری و دانسیته استفاده می‌شود (Jorgensen 1991). گرچه شناسایی درز و شکستگی‌ها به لاگ‌های زیادی نیاز دارند اما منطقه‌ای که دارای درز و شکستگی هست ناهنجاری‌هایی در لاگ ایجاد می‌کند و باعث افزایش نفوذپذیری، افزایش سرعت حفاری، هدرروی گل حفاری افزایش قطر حفاری و... می‌شود. گرچه ناهمگنی در سازندهای کارستی چالش جدی برای برداشت و تفسیر

لاگ‌ها ایجاد می‌کند (Paillet 2001). اما لاگ‌های گامای طبیعی و لاگ‌های الکتریکی به صورت غیر مستقیم اطلاعاتی را در باره هدایت هیدرولیکی سازند در اختیار ما می‌گذارند. چنانچه به تعداد کافی لاگ‌هایی در یک منطقه برداشت شده باشند با تمهیداتی می‌توان از آنها برای تطابق چینه‌شناسی استفاده نمود. فرید و همکاران (Farid, A. et al. 2012) برای اطمینان از دسترسی به منابع آب در شمال شرق پاکستان و در منطقه مایرا با استفاده از نتایج آزمایش پمپاژ و ژئوفیزیک سطحی با روش ژئوالکتریک (مقاومت ظاهری) مطالعه‌ای انجام دادند. در این بررسی انطباق مناسبی بین پارامترهای آبخوان و مقاومت الکتریکی وجود دارد. در این منطقه اطمینان ترکیب این دو روش از ۶۰ تا ۹۰ درصد به دست آمده است. در بخش شرقی این منطقه لایه ضخیم ماسه‌ای با قابلیت انتقال مناسب و به عنوان آبخوان به وجود آمده است در حالیکه در غرب منطقه تنوع لیتولوژی و تنوع تراوایی وجود دارد.

ویلهلمسن و همکاران (Vilhelmsen, T. et al. 2018) در بخش شمال شرق دانمارک رسوباتی از یک دره مدفون را مورد بررسی قرار دادند. این دره با روش الکترومگنتیک نقشه برداری شده است. اما حفاری‌ها نشان می‌دهد که رسوبات این دره شامل گراول، رس و نهشته‌های یخچالی هستند. این دره محل تامین آب شرب منطقه است و به همین سبب اهمیت دارد و به صورت محلی آبخوان‌های کوچکی در این دره تشکیل شده‌اند. اما هیدرواستراتیگرافی در جنوب منطقه پیچیده بوده به طوریکه حداقل پنج دره کوچکتر تشکیل شده‌اند که برخی به صورت آبخوان و برخی به صورت آکی کلود و آکی تارد عمل می‌کنند. برای بررسی هیدرواستراتیگرافی از داده‌های چاه گمانه، داده‌های ژئوفیزیک و مقاومت استفاده شده است. در این بررسی با استفاده از یک روش ابتکاری و ارتباط دادن مقاومت به رس، هیدرواستراتیگرافی آبخوان در سطح ۴۷۰ کیلومتر مربع به دست آمده است.

#### الف- لاگ پتانسیل خودزا (Spontaneous Potential Log)

این لاگ تفاوت جریان در یک نقطه از روی زمین و یک نقطه در درون چاه را اندازه می‌گیرد. این لاگ برای جدایش رس از ماسه سنگ استفاده می‌شود. بنا بر این یک لاگ لیتولوژیکی است. اما برای شناسایی درز و

شکافها کاربرد ندارد. در این مطالعه چون لایه‌های رسی و مارنی در سازند تیرگان وجود دارد برای شناسایی نسبی آنها در مقابل آهک‌ها استفاده شده است. همراه این لاگ و برای تایید وجود رس از لاگ گامای طبیعی استفاده می‌شود. کارائی این لاگ در سازندهایی که کاملاً آهکی هستند و ناهمگنی کمی دارند کاهش می‌یابد. انحراف به سمت چپ نمودار نشانگر وجود ماسه و به سمت راست نشانگر رس یا شیل خواهد بود. واحد اندازه‌گیری میلی ولت می‌باشد. لاگ SP نسبت به عمق چاه دارای نوعی انحراف می‌شود بنا بر این با افزایش عمق دقت آن کاهش می‌یابد اما خط شیل و ماسه خود را حفظ می‌کند.

#### ب- لاگ گامای طبیعی (Gamma Ray Log)

موثرترین عناصری که از خود اشعه گاما ساطع می‌کنند شامل پتاسیم، اورانیم و توریم می‌باشند. نمودار گاما کل اشعه ساطع شده را دریافت می‌کند. عناصری که اشعه گاما ساطع می‌کنند در مواد دانه ریز مانند سیلت و رس تجمع حاصل می‌کنند. بنا بر این لاگ گاما نشان دهنده یا نمایانگر رس است (Singhal 2010). پاسخ حاصل از هر دستگاه تابعی از غلظت وزنی کانی پرتوزا در سازند و نیز چگالی آن است. این لاگ نوعی لاگ لیتولوژیک است. کاربردها:

الف) تعیین لیتولوژی یا جنس سنگ (شناخت رس‌ها، نمک‌های تبخیری، کانی‌های سنگین و پرتوزا)

ب) ارزیابی درصد رس ماسه، آهک موجود در لایه‌ها (Doveton 1986)

ج) همبستگی چاه‌ها

د) کنترل عمق حفاری و دستگاه‌های آزمایش‌کننده سیال و نیز استفاده از آن بجای SP زمانی که این اندازه‌گیری قابل اجرا نیست (چاه‌های سیمانی شده و دارای لوله جداری)

ه) ارزیابی تقریبی تراوایی

تعیین تقریبی تراوایی به صورت غیر مستقیم صورت می‌گیرد در واقع هرچه میزان رس بیشتر باشد نشان دهنده لایه‌های غیر قابل نفوذ و یا دارای نفوذپذیری کم می‌باشد. در تفسیر لاگ گاما توجه به لاگ SP نیز صورت می‌گیرد و تا حد زیادی این دو باید یکدیگر را تایید نمایند.

### ج- لاگ مقاومت (Resistivity Log)

لاگ الکتریکی مقاومت ظاهری لایه‌های زیرسطحی را نسبت به عمق اندازه‌گیری می‌کند. لاگهای مقاومت را نمی‌توان در چاه‌های لوله‌گذاری شده برداشت کرد. اندازه‌گیری لاگ مقاومت بستگی به وضعیت هندسی درز و شکافها و پرشدگی آنها توسط مایع حفاری دارد. این لاگ تحت تاثیر جهت‌گیری شکستگی‌ها، اندازه، بازشدگی آنها قرار دارد. در سازندهای سخت دامنه مقاومت وسیع است و اگر درزه‌ها توسط آب پر شوند مقاومت آنها کاهش می‌یابد. یک انتشار دهنده جریان الکتریکی را به درون سازند می‌فرستند گیرنده که در فاصله مشخصی نسبت به چشمه انتشار جریان الکتریکی قرار دارد عکس‌العمل این جریان را در درون سازند ثبت می‌کند. فاصله میان چشمه (فرستنده) و گیرنده را «بازه» گویند. هر چه این فاصله بیشتر باشد شعاع بررسی بزرگ‌تر، اما جداسازی قائم کم‌تر می‌شود. بر مبنای بزرگی بازه، سوندهای مختلفی قابل ارائه می‌باشند. یکی از آنها سوندهای لاترولاگ (LL) هستند.

در این آرایش (Latero Log) جریان را با الکترودهای محافظ به طور متمرکز داخل سازند مورد نظر می‌فرستند سیستم مورد استفاده در این سوندها به گونه‌ای است که جریان به صورت سفره‌ای از خطوط موازی و عمود بر محور سنگ، به سنگ واقع در جدار چاه وارد می‌شود. جواب‌های حاصل از این دستگاه‌ها نسبت به سوندهای نرمال و جانبی بسیار کمتر تحت تاثیر گل حفاری و سازندهای مجاور است زیرا جریان به صورت متمرکز در ضخامت کمی از سازند اصلی وارد شده و در نتیجه جواب حاصل به واقعیت نزدیک است. چندین دستگاه از این نوع وجود دارد:

لاترولاگ دو تایی (DLL): این دستگاه دو لاگ با شعاع بررسی کم LLS و زیاد LLD را به دست می‌آورد. با توجه به آنچه گفته شد بیشترین شعاع بررسی با استفاده از LLD و به دنبال آن LLS به دست می‌آید.

در برخی چاه‌های منطقه (۷ حلقه) از کنار هم قراردادن لاگ‌های یاد شده در سه زون مختلف می‌توان تا حد قابل قبولی جدایش لایه‌های رسی و مارنی غیر قابل نفوذ یا با نفوذپذیری کم را از لایه‌های آهکی جدا کرد. از سوی دیگر در کنار لاگ‌های یاد شده لاگ زمین‌شناسی از خرده‌های سنگ نیز ترسیم شده است. در گزارش

حفاری هریک از چاه‌ها سرعت حفاری و مخصوصاً برخورد مته حفاری به درز و شکافها به دقت آورده شده است. بنا بر این خرد شدگی و عمق آن توسط حفار ثبت شده است.

## ۲-۴-۳ هیدرواستراتیگرافی

زمین‌شناسانی مانند دارتون، لورت، چمبرلین و کینگ (Darton 1906; Leverett 1896; Chamberlin 1897, King 1897) قبل از سال ۱۹۲۳ توانستند واحدهای زمین‌شناسی را به دو صورت واحدهای حاوی آب و واحدهای بدون آب طبقه‌بندی کنند. البته این بیان ساده فقط به وجود آب زیرزمینی بدون اشاره به خصوصیات هیدرولیکی در زمان خود مفید بود. مینزر (Meinzer 1923) عبارت "آبخوان" را به عنوان سازند یا قسمتی از یک سازند حاوی آب در چارچوب زمین‌شناسی تعریف کرد. تعریف مینزر کاربردی و عملی بود و مخازن آب زیرزمینی، لایه‌های آبدار، افق‌های آبدار، نهشته‌های حاوی آب همه در ردیف "آبخوان" تعریف شدند. وی لایه‌های بدون آب را به عنوان "لایه‌های ناتراوا" تعریف نمود که به سبب محل قرارگیری و ضریب نفوذپذیری پایین نسبت به آبخوان بود. در مطالعات سنگ‌چینه‌نگاری واحدهای سنگی بر اساس ویژه‌گی سنگ‌شناسی به سازندهای مختلف تقسیم می‌شوند.

برای اولین بار مکسی (Maxey 1964) واحد هیدرواستراتیگرافی را بیان کرد بر اساس تعریف مکسی "یک واحد هیدرواستراتیگرافی واحد لیتواستراتیگرافی نامگذاری شده و کد داری‌ستکه خصوصیات آن اجازه می‌دهد به صورت دقیق ارتباط بین لایه و آب زیرزمینی را مشخص نماید و قابل نقشه برداری باشد". در سالهای ۱۹۸۲ تا ۱۹۸۶ سیبر (Seaber 1982-1986) توسعه مفهوم نقشه‌های آب زیرزمینی و رابطه آنها با لایه آبدار و بدون آب را در ارتباط با خصوصیات فیزیکی سنگ‌ها (تخلخل و نفوذپذیری) و رژیم هیدرولیکی را به عهده داشت. این تعریف باعث ایجاد نگرش مجدد به واحدهای هیدرواستراتیگرافی مکسی شد.

وایت (White 1969) نوعی طبقه‌بندی برای آبخوان‌های کربناته پیشنهاد کرد که عمدتاً بر پایه هیدرواستراتیگرافی قرار دارد. به عنوان مثال جریان در یک لایه نازک آهک قابل انحلال و واقع در بین لایه‌های ناتراوا را تحت عنوان "جریان ساندویچی" نامید. بسته به اینکه جریان آب زیرزمینی توسط چینه‌شناسی کنترل

شود اصطلاح "کنترل چینه‌شناسی جریان" تعریف می‌شود. میزان این کنترل به هدایت هیدرولیکی سفره و لایه ناتروای مجاور، ضخامت لایه ناتروا و درجه کارستی شدن وابسته است. تغییرات رخساره‌ها در میزان کنترل چینه‌ای بسیار موثر هستند (کریمی وردنجانی ۱۳۸۹).

بنا بر این هدف نهایی مطالعات هیدرواستراتیگرافی بدست آوردن و امکان جدایش لایه‌های تراوا و ناتراوا در مقیاس ناحیه‌ای می‌باشد. چنانچه اطلاعات مورد نیاز موجود باشند امکان بسط این ویژگی‌ها به صورت جانبی میسر خواهد شد. بنا بر این تفکیک سازندهای زمین‌شناسی بر اساس تراوایی نسبی و تبدیل آنها به واحدهای هیدرواستراتیگرافی در پیش‌بینی امکان تشکیل مخازن موثر خواهد بود. از طرفی به دلیل هزینه‌های بالای مطالعات و حفاری چاه‌های آب برای مقاصد شرب و فوریت تامین آن نیاز است قبل از حفاری برای تعیین محل چاه‌های آینده مطالعات کافی از افق‌های آبدار یا زون‌های کارستی وجود داشته باشند. بسط مباحث واحدهای هیدرواستراتیگرافی در سال ۱۹۷۷ در کنفرانس محیط زیست یونسکو انجام گرفت ( UNESCO 1977) که چهار مرحله توسعه نقشه‌برداری آب زیرزمینی را بیان می‌کند:

– برقراری ارتباط پیدایش آب زیرزمینی با زمین‌شناسی کلاسیک (لیتواستراتیگرافی) بدون بیان جزئیات هدایت هیدرولیکی

– برقراری ارتباط پیدایش آب زیرزمینی با خصوصیات هیدرولیکی در چارچوب زمین‌شناسی کلاسیک  
– توجه به آب زیرزمینی به عنوان منبعی مهم.

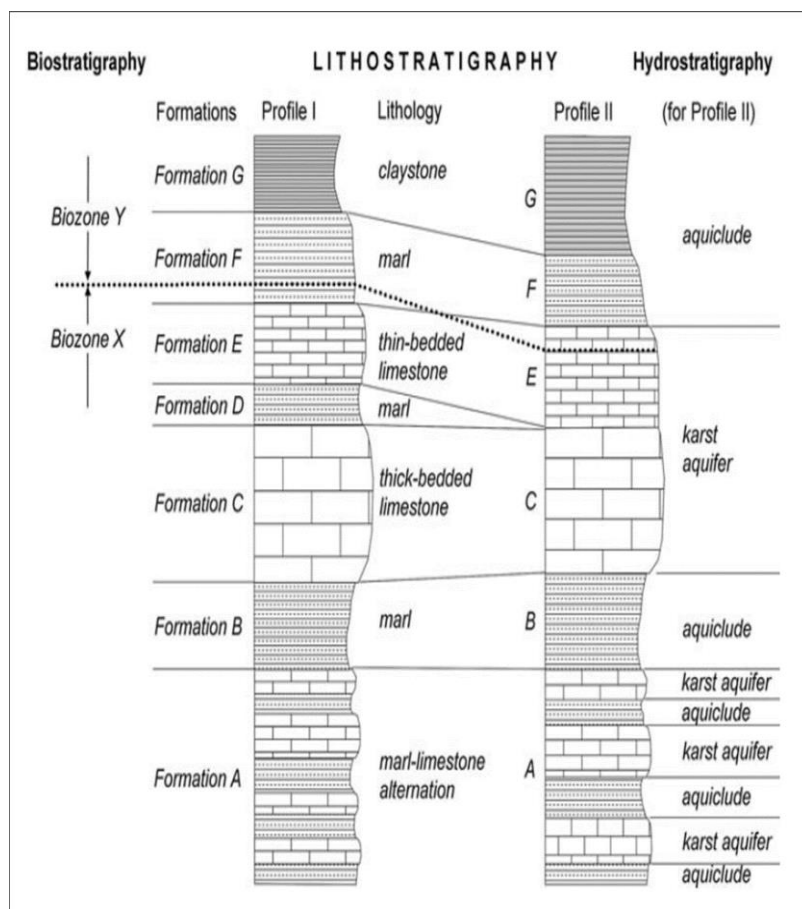
– توجه به آب زیرزمینی و برقراری ارتباط بین خصوصیات لایه‌های آبدار و رژیم‌های هیدرولوژیک  
بررسی‌های هیدرواستراتیگرافی در دنیا در مقیاس گسترده انجام شده است. از این مطالعات برای بررسی زون‌های تراوا در تشکیلات آبرفتی و سازند سخت، بررسی منشاء آلودگی، سرعت انتقال آلودگی، رفع آلودگی، جدا کردن آبخوان‌های مختلف، بررسی نحوه توزیع تخلخل ثانویه در سازندها، مدل‌سازی آب زیرزمینی، تاثیر دولومیتی‌شدن در کاهش تخلخل ثانویه، ناهمگنی و ناهمسانگردی سازندها، توسعه کارست، پیش‌بینی مهاجرت سیالها و... استفاده شده است.

وارن، مورین و راجر (Warren, B. Roger H. Morin, (1987) مطالعات "هیدرواستراتیگرافی و توزیع تخلخل ثانویه" در سازند برل در ناحیه نبراسکا را انجام دادند. طی این مطالعات با استفاده از داده‌های حفاری، لاگینگ ژئوفیزیکی درون‌چاهی دریافتند یک لایه نیمه افقی با ضخامت ۲ تا ۳ متر وجود دارد که دچار شکستگی شدیدی شده و لیتولوژی سیلت‌استون دارد و یک واحد هیدرواستراتیگرافی مهم در منطقه است و تا غرب ناحیه نیز ادامه دارد. میزان تراوایی بدست آمده برای لایه یاد شده  $K = 10^{-6}$  m/s که در مقایسه با لایه‌های اطراف بسیار بالا می‌باشد. گودیچی و همکاران (Giudici et al. 2012) طی مطالعات "مدلسازی هیدرواستراتیگرافی و جریان آب زیرزمینی در آبخوان کارستی و درز و شکافدار در حوضه مدیترانه در جنوب غربی ایتالیا" با مدلسازی آبخوان ساحلی از طریق تجزیه و تحلیل لیتولوژیکی، خصوصیات فیزیکی سنگ‌های زیرسطحی و انواع رسوبات تطابق هیدرواستراتیگرافی سطحی و زیرسطحی را انجام دادند. لاگ‌های ژئوفیزیکی از ۵۱۵ حلقه چاه مورد بررسی قرار گرفته و مدل مفهومی تهیه شده است. در این مطالعه هفت واحد هیدرواستراتیگرافی تعیین گردیده که دو هدف اساسی مورد نظر که یکی تعیین مدل حرکت آب زیرزمینی در آبخوان عمیق آهکی و دیگری بررسی ناهمگنی در این سازند بوده، محقق شده است.

کلارک، بلوم و موریس (Clark, Blome, Morris 2014) طی انجام مطالعاتی در تگزاس گزارشی تحت عنوان "زمین‌شناسی و هیدرواستراتیگرافی رودخانه گوادلوپ" اعلام داشتند سنگ‌هایی در منطقه رخنمون دارند که متعلق به کرتاسه زیرین بوده و شامل آهک فسیل‌دار، ماسه‌سنگ، شیل می‌باشند که با پکستون و وکستون و گرینستون تداخل بین‌انگشتی دارند. در این مطالعه شش واحد هیدرواستراتیگرافی شناسایی شد. انواع تخلخل بین دانه‌ای، شکستگی غاری و گسل‌خوردگی در منطقه وجود دارند. روش مطالعه استفاده از لاگ‌های ژئوفیزیکی و مقایسه آن با داده‌های حاصل از مغزه‌های حفاری بوده است. هم‌چنین داده‌های درز و شکافها، سطوح لایه‌بندی نیز برداشت شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مطالعات پتروفیزیکی و نامگذاری بر اساس طبقه‌بندی دانه‌ام انجام شده و بررسی‌های تخلخل نیز بر اساس طبقه‌بندی چاکت و پری (Coquette, P.W. and Perry, L.C 1970) صورت گرفته و نهایتاً واحدهای هیدرواستراتیگرافی بر اساس تخلخل طبقه‌بندی شدند.

اغلب می‌توان چند سازند کنار هم را به عنوان یک واحد هیدروژئولوژی در نظر گرفت و بر عکس. برخی مواقع لازم است یک سازند را به واحدهای مجزای هیدروژئولوژی تقسیم‌بندی نمود (شکل ۲-۴). لایه‌های مارنی و رسی کنار هم لایه ناتراوا و چند لایه آهکی کنار هم تشکیل یک آبخوان را می‌دهند. به این ترتیب که یک سازند ممکن است شامل لایه‌های آهکی (تراوا) و لایه‌های مارنی (ناتراوا) باشد. حتی تغییر در لیتولوژی یک سازند کربناته می‌تواند باعث تغییر در رفتار هیدرولیکی آن بشود.

در برخی موارد چند سازند را به عنوان یک واحد هیدروژئولوژی می‌توان در نظر گرفت (G+F و C+E). در موارد دیگر یک سازند را می‌توان به چند واحد هیدروژئولوژی تقسیم کرد. تغییرات جانبی رخساره و نازک‌شدگی سازند را بایستی در نظر گرفت. مرزهای بایواستراتیگرافی لزوماً بر مرزهای سازند منطبق نیستند و تشکیل "آبخوان کارستی" با وجود لایه آهکی فقط نشان دهنده پتانسیل کارستی شدن است اما درجه واقعی کارستی شدن به دیگر عوامل از جمله شکستگی‌ها و ساختار هیدرولوژیکی بستگی دارد سازند D در شکل (۲-۴).



شکل ۲-۴- تبدیل لیتواستراتیگرافی به هیدرواستراتیگرافی (Batsche et al. 1970).

البته بررسی‌های چینه‌شناسی سازندهای آهکی شامل تجزیه و تحلیل محیط رسوبی قدیمی آنها نیز می‌شود. بیشتر سنگ‌های آهکی در پلت‌فرم‌های کربناته، در کمربندهای رخساره‌ای متفاوتی از قبیل پهنه جزر و مدی، لاگون، ریف و سد تشکیل می‌شوند. در محیط‌های رسوبی کمربندهای رخساره‌ای متفاوتی برای تشکیل سنگ‌های کربناته شناسایی شده‌اند و شامل ساب‌تایدال، پری‌تایدال، تبخیری، باتلاقی، ریف و شیب قاره‌ای هستند. حد انتقالی بین ریف تا شیب قاره‌ای مترادف با رخساره آهک ضخیم لایه، برش آهکی تا آهک خوب لایه‌بندی شده بین آنها می‌شود (Füchtbauer 1988).

## فصل سوم: روش انجام کار

مطالعات دقیق هیدرواستراتیگرافی نیاز به داده‌ها و اطلاعات بسیار و تلفیق آنها دارد. قدم اول شناسایی دقیق چینه‌شناسی و قدم دوم شناسایی ارتباط چینه‌شناسی با تراوایی است. در این مطالعه که بررسی ناحیه‌ای محسوب می‌شود برای مطالعه دقیق‌تر سازند تیرگان یک برش چینه‌شناسی انتخاب، اندازه‌گیری و مورد مطالعه چینه‌شناسی قرار گرفته و از پایین به بالای سازند نمونه‌برداری سیستماتیک از لایه‌های سنگی انجام شده است. با مطالعه ریزرخساره‌های آهکی محیط رسوبی نهشته شدن سازند تیرگان بازسازی و پتانسیل لایه‌های سازند برای توسعه کارست مورد بررسی قرار گرفته است.

از لاگهای ژئوفیزیکی تهیه شده از چاه‌ها برای بررسی لیتولوژی و تعیین میزان نسبی رس و افق‌های خرد شده استفاده شده، همچنین امکان تطابق چینه‌ای چاه‌ها نیز بررسی شده است. از اطلاعات آزمایش پمپاژ بلند مدت چاه‌ها برای تعیین ضرایب هیدرولیکی چاه‌ها و نسبت دادن این ضرایب به لایه‌های حفر شده، از داده‌های بهره‌برداری چاه‌ها برای بررسی میزان افت بلند مدت و کوتاه مدت آنها استفاده شده است. در پایان و در صورت وجود اطلاعات سایر برش‌های برداشت شده از سازند تیرگان در اطراف منطقه مورد مطالعه تطابق هیدرواستراتیگرافی صورت گرفته است. نتیجه نهایی، تفکیک سازند تیرگان به آبخوان و غیر آبخوان می‌باشد.

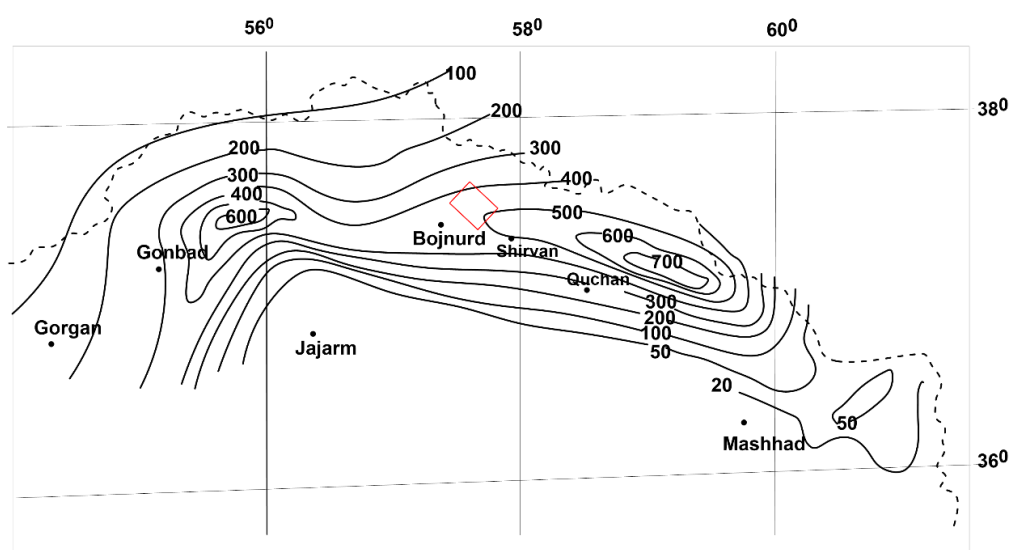
### ۳-۱ جمع‌آوری آمار، اطلاعات و مطالعات انجام شده در منطقه

برای انجام این تحقیق ابتدا کلیه اطلاعات شامل نقشه‌های زمین شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰ و ۱:۲۵۰,۰۰۰ نقشه‌های منابع آب، داده‌های هواشناسی، داده‌های حفاری چاه‌های حفر شده قبلی، داده‌های ژئوفیزیک لاگ

درون چاهی، داده‌های پمپاژ، داده‌های سطح آب چاه‌ها، پروفیل‌های ترسیم شده از سازند تیرگان، نقشه‌های هم ضخامت سازند تیرگان، ستون چینه‌شناسی تطابق داده شده این سازند، جمع‌آوری شده‌اند.

### ۲-۳ مطالعات چینه‌شناسی

در منطقه مورد مطالعه سنگ‌های رسوبی کرتاسه زیرین بیشترین گسترش را دارند که شامل سازندهای شوريجه، تیرگان، سرچشمه، سنگانه و بخش پایینی سازند آیتامیر هستند. برای مطالعه چینه‌شناسی برش باباموسی در کوهی به همین نام در شرق بجنورد انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت. در این محل برونزد کاملی از سازند تیرگان که بالا و پایین آن برونزد دارد انتخاب شد. هم‌چنین کامل‌ترین برش و نزدیک به چاه‌های مورد مطالعه است. در کوه باباموسی برونزد اندکی از سازند شوريجه نیز وجود دارد که بر روی آن سازند تیرگان قرار گرفته است. بر روی آن سازند سرچشمه که از فرسایش در امان مانده برونزد اندکی دارد. کمی به سمت شرق و در نزدیک محور اصلی رودخانه اترک سازند سنگانه در مرکز ناودیس‌ها رخنمون شده است. گفتنی‌ست هر دو سازند سرچشمه و سنگانه نقش لایه‌های نفوذناپذیر را در منطقه بازی می‌کنند و چون بر روی سازند تیرگان واقع شده‌اند، تنها در محل‌هایی که به سبب ساختاری یا فرسایش این سازندها وجود ندارند تغذیه بارندگی به تیرگان میسر شده است. گسترش عمقی و سطحی سازند تیرگان توسط افشارحرب (۱۳۷۳) نشان داده شده است (شکل ۱-۳).



شکل ۳-۱- نقشه میزان ضخامت سازند تیرگان، اقتباس از افشارحرب (۱۳۷۳)

### ۳-۲-۱ اندازه‌گیری برش چینه‌شناسی انتخاب شده

در فاصله حدود ۷ کیلومتری شمال شرق شهر بجنورد برای این مطالعه یک برش چینه‌شناسی با نام برش باباموسی اندازه‌گیری شده است. در این برش سازند تیرگان ۵۱۰ متر ضخامت دارد. مشابه مطالعات سیستماتیک چینه‌شناسی بررسی‌های چینه‌ای انجام شد و اندازه‌گیری ضخامت ظاهری در جهت شیب اصلی لایه‌بندی و تبدیل آنها به ضخامت واقعی صورت گرفته است. ویژگی‌های چینه‌شناسی، رسوب‌شناسی نیز یادداشت شده است. در بازدید جداگانه در سه ایستگاه از درزه‌ها نیز برداشت صورت گرفته است.

### ۳-۲-۲ نمونه‌برداری و مطالعه مقاطع نازک

به منظور مطالعات میکروسکوپی و برای شناسایی ریزرخساره‌ها، از برش چینه‌شناسی باباموسی ۹۰ نمونه سنگ برداشت و از آنها برش نازک میکروسکوپی تهیه شد. نمونه‌ها از لایه‌های سنگی و با تغییر لیتولوژی صورت گرفته است. در کنار برداشت نمونه، ویژگی‌های چینه‌شناسی، ساخت رسوبی، محتوی فسیلی، رنگ لایه در سطح هوازده و سطح تازه نیز یادداشت شد. ریزرخساره‌ها بر پایه تفاوت‌های بافتی، نوع و میزان فراوانی دانه‌های اسکلتی و غیر اسکلتی، فراوانی خمیره و سیمان نمونه‌ها شناسایی و بر پایه روش دانهام (Dunham 1962) نام‌گذاری شده‌اند. مطالعه برش نازک سنگ با میکروسکپ پلاریزان و درصد دانه‌ها بر مبنای چارتهای استاندارد صورت گرفت.

### ۳-۲-۳ بررسی موقعیت چینه‌شناسی چاه‌های حفاری شده در سازند تیرگان

بررسی‌ها نشان داده است، زمانی بالاترین آبدهی در حفاری چاه‌ها بدست آمده که محور چاه بر لایه‌های آبدار عمود بوده به این معنی که بیشترین آبدهی چاه‌ها در سازندهای کارستی مربوط به چاه‌هایی خواهد بود که

بیشترین لایه‌ها را قطع کرده باشند. اما در منطقه مورد مطالعه به سبب تکتونیک و چین خوردگی سازند تیرگان به نوعی رخنمون پیدا کرده است که برخی چاه‌ها از جمله چاه‌های مورد بررسی با زاویه نسبت به سطح لایه حفاری شده‌اند به‌طوری‌که کل چاه در آهک حفاری شده اما ممکن است فقط در یک واحد سنگی یا لایه باشند. چاه‌های مورد بررسی به سبب محل حفر و شرایط تقریباً یکسان چینه‌شناسی در چهار دسته طبقه‌بندی شده‌اند. چاه‌های پتروشیمی (A) که شامل چاه‌های شماره W01, W02 هستند. چاه‌های منطقه قارلق (B) که شامل چهار حلقه چاه هستند W03, W04, W05, W06. چاه‌های نجف آباد که دو جفت چاه هستند و به نام چاه‌های نجف آباد یک (C) که شامل چاه‌های W07, W08 و چاه‌های نجف آباد دو (D) که شامل چاه‌های W09, W10 می‌شوند.

### ۳-۳ بررسی لاگ‌های ژئوفیزیکی چاه‌های حفاری شده در سازند تیرگان

از میان ده حلقه چاه موجود در منطقه تنها ۷ حلقه چاه دارای لاگ ژئوفیزیکی هستند، که شامل چاه‌های شماره W01, W02, W06, W07, W08, W09, W10 می‌شوند. در زون یک یا چاه‌های پتروشیمی (A) دو حلقه چاه، در زون دو یا چاه‌های منطقه قارلق (B) یک حلقه و چاه‌های نجف آباد یک (C) و نجف آباد دو (D) هر چهار حلقه چاه دارای لاگ هستند. لاگ‌ها شامل لاگ پتانسیل خودزا (SP) لاگ مقاومت (R) و لاگ گامای طبیعی (Y) هستند.

### ۳-۳-۱ تعیین نوع واحدهای سنگی

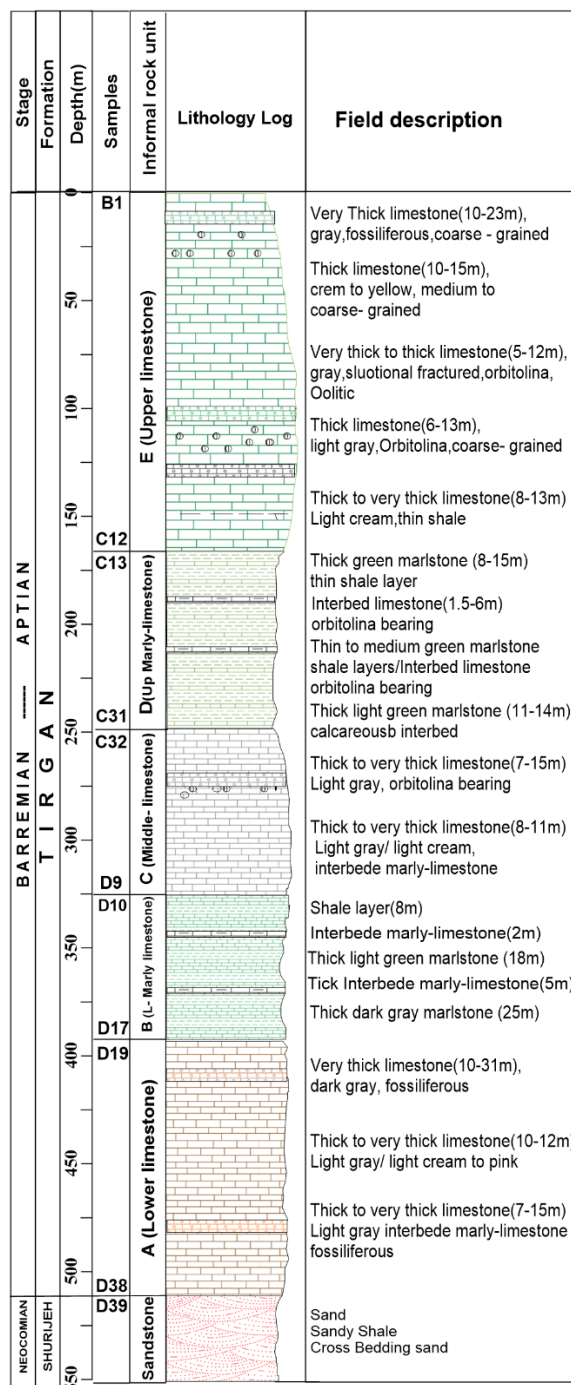
بر پایه ویژگی‌های سنگ‌شناسی می‌توان در این محل سازند تیرگان را به پنج بخش تقسیم نمود. مشابه این تقسیم‌بندی در برش گلیان (در حدود ۵۵ کیلومتری جنوب شرق این برش) نیز انجام شده است (پورسلطانی ۱۳۹۸). با این تفاوت که ضخامت هریک از واحدهای سازند در برش گلیان بسیار کمتر است. بخش آهکی پایینی (A=L-Limst.) شامل حدود ۱۱۵ متر آهک الییدی و آهک ماسه‌ای بسیار ضخیم است که در پایین

قرمز رنگ و به سمت بالا خاکستری تیره رنگ می‌شود. ضخامت لایه‌های آهکی این بخش بین ۷ تا ۳۱ متر می‌باشند که دارای فسیل فراوان دوکفه‌ای است.

بخش آهکی-مارنی پایینی (B= L M-Limst.) حدود ۹۰ متر ضخامت دارد و شامل لایه‌های مارنی زیتونی رنگ روشن با میان لایه‌های آهکی-مارنی است که در انتها شیلی می‌شود. ضخامت این میان لایه‌ها از ۵ تا ۱۸ متر است. به سبب لیتولوژی این واحد نقش لایه نفوذناپذیر را بر عهده دارد. بخش سوم سازند تیرگان از آهک حاوی اوریتولین تشکیل شده است. این بخش واحد آهکی میانی (C= M- Limst.) است که ۵۰ متر ضخامت دارد و حاوی لایه‌های آهکی به رنگ خاکستری کم رنگ تا کرم کمرنگ و با ضخامت ۸ تا ۱۵ متر است.

بخش آهکی-مارنی بالایی (D= Up M-Limst.) حدود ۸۵ متر ضخامت داشته و شامل لایه مارنی، مارنی آهکی و میان لایه‌های آهکی اوریتولین دار با ضخامت ۱.۵ تا ۱۴ متر است. این بخش نیز در انتها حاوی لایه‌های شیلی است.

بخش آهکی بالایی (E= Up- Limst.) حدود ۱۷۰ متر ضخامت دارد و آهک کرم رنگ در قسمت پایینی با لایه‌هایی به ضخامت ۸ تا ۱۳ متر، در قسمت میانی متشکل از آهک الییدی خاکستری تیره و در قسمت بالایی از آهک خاکستری حاوی اوریتولین تشکیل شده که به طور هم‌شیب در زیر سازند مارنی سرچشمه قرار دارد (شکل ۲-۳).



شکل ۳-۲- برش چینه‌شناسی سازند تیرگان در کوه باباموسی

### ۳-۲-۳ تقسیم‌بندی توالی چینه‌شناسی سازند تیرگان در برش مورد مطالعه

بر اساس تعیین نوع واحدهای سنگی به واحدهای آهکی و غیر آهکی که شامل واحدهای مارنی، آهکی- مارنی و حتی شیلی می‌شود سه بخش مهم واحد آهکی پایینی (A) واحد آهکی میانی (C) و واحد آهکی بالایی (E)

را تفکیک کرد. بر اساس این تقسیم‌بندی و حفر و نفوذ چاه‌ها ویژه‌گی‌های هیدرولیکی آنها را مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۳-۳-۳ برآورد تراوایی

از آنجا که ویژه‌گی‌های سنگ شناسی و محیط رسوبی هریک از واحدهای آهکی مورد بررسی قرار گرفته و از سوی دیگر لاگ‌های ژئوفیزیکی نیز بررسی شده است، تا حدی می‌توان در باره برآورد تراوایی واحدهای سنگی اظهار نظر نمود. وجود شیل و مارن که در لاگ‌های ژئوفیزیک قابل بررسی است و در نمونه‌های میکروسکوپی نیز وجود ناخالصی‌هایی مانند کوارتز بررسی شده است می‌توان از پایین بالا در باره افزایش تراوایی نسبی اظهار نظر نمود.

### ۳-۴ بررسی داده‌های آزمایش پمپاژ چاه‌های حفاری شده در سازند تیرگان

به منظور بررسی داده‌های آزمایش پمپاژ ابتدا لازم است این داده‌ها آماده شوند. آزمایش پمپاژ در این منطقه به صورت پله‌ای طولانی مدت بوده و هم‌چنین داده‌های برگشت نیز در برخی چاه‌ها وجود دارند. اندازه‌گیری توسط لوله هادی و در داخل چاه صورت گرفته است. مهم‌ترین مراحل آماده‌سازی شامل تبدیل داده‌ها، حذف داده‌های غیر واقعی، حذف اثر ذخیره داخل چاه و حذف اثر پوسته‌ای می‌باشند.

#### الف-تبدیل داده‌ها

داده‌های افت، سطح آب و دبی پمپاژ بایستی به واحدهای مناسبی تبدیل گردند تا در روابط مختلف بتوان از آنها استفاده نمود. بنا بر این دبی بر حسب لیتر بر ثانیه و افت بر حسب متر، ضریب قابلیت انتقال بر حسب متر مربع در روز و ضریب ذخیره بر حسب درصد بیان شده‌اند.

## ب- حذف داده‌های غیرواقعی

در نمودارهای افت- زمان پس از درج داده‌ها برخی از آنها در چاه‌های مشاهده‌ای یا چاه پمپاژ دارای مقادیر غیر واقعی هستند که نشان از بالا آمدگی سطح آب یا افت ناگهانی دارند و با داده‌های اطراف خود هم‌خوانی ندارند که در برخی مراحل امکان دارد خطای اندازه‌گیری یا خطای قرائت باشند. حضور این داده‌ها خطای قابل ملاحظه‌ای در ارزیابی پارامترهای آبخوان خواهند داشت. بنا بر این بایستی این داده‌ها از دسته داده‌های درست حذف گردند. همچنین امکان دارد نفوذ از بارندگی یا آب انتقالی از چاه مجدداً در منطقه اطراف چاه نفوذ کرده و باعث بالا آمدگی در سطح آب شوند.

## ج- حذف اثر ذخیره داخل چاه

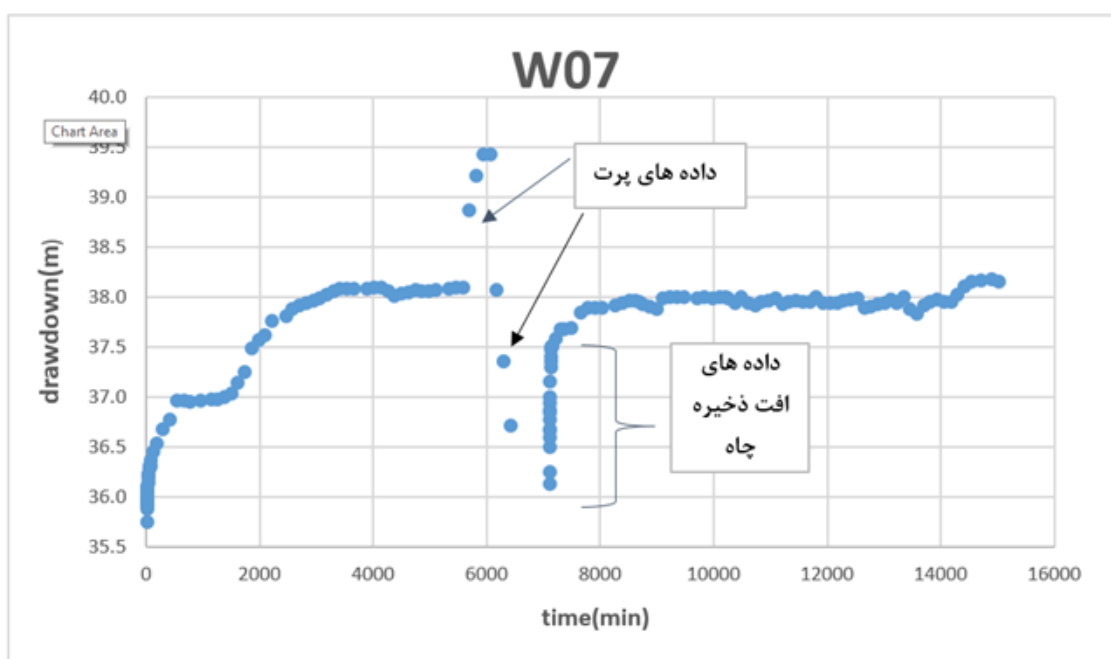
در همه روش‌های استاندارد آنالیز داده‌های آزمایش پمپاژ، ذخیره آب داخل چاه را ناچیز فرض می‌نمایند. گرچه در چاه‌های دهانه گشاد (قطر زیاد) مقدار آب ذخیره داخل چاه اهمیت دارد، که برای بررسی افت روش خاص خود را دارند. در این تحقیق قطر چاه زیاد نبوده اما با توجه به میزان دبی پمپاژ داده‌های ۱ تا ۱۵ دقیقه اول هر منحنی در نظر گرفته نشده‌اند و هرچه دبی اولیه پمپاژ زیاد باشد این اثر کمتر شده و داده‌های مدت زمان کوتاه‌تری حذف خواهند شد.

## د- آماده سازی و تصحیح داده‌های پمپاژ

چون در این مطالعه از روش کرمی و یانگر (Karami and Younger 2002) برای به‌دست آوردن ضرایب هیدرولیکی استفاده شده است هر پله ابتدا به صورت مجزا رسم شده و داده‌های پرت حذف شده‌اند. همچنین به منظور حذف اثر ذخیره داخل چاه افت حدود ۱۵ تا ۱۵ دقیقه اول افت در هر چاه در پله‌ها نادیده گرفته شده‌اند و یا در نرم افزار (Aquifer Win3.2) در محاسبات دخالت داده نشده است. در این چاه‌ها چون حفاری با فوم انجام گرفته و گل حفاری استفاده نشده اثر پوسته‌ای (Skin effect) داخل چاه موثر نبوده است. همچنین در روش کرمی یانگر لازم است هم برای افت و هم برای دبی تصحیح انجام شود که این اصلاحات جزء روش کار محسوب می‌شود و به شرح زیر خواهند بود.

## ۱- تصحیح اثر افت چاه

با بررسی داده‌های افت در درون چاه می‌توان مشاهده نمود که بخش بزرگی از افت کلی مربوط به افت داخل چاه است. این مقدار افت به عواملی از جمله افت مربوط به گراول پک، افت شبکه لوله جدارچاه (اسکرین) و دبی پمپاژ است. چون هریک از این عوامل در چاه‌های مختلف متفاوت هستند بنا بر این هر چاه افت مختص به خود را دارد شکل (۳-۳).



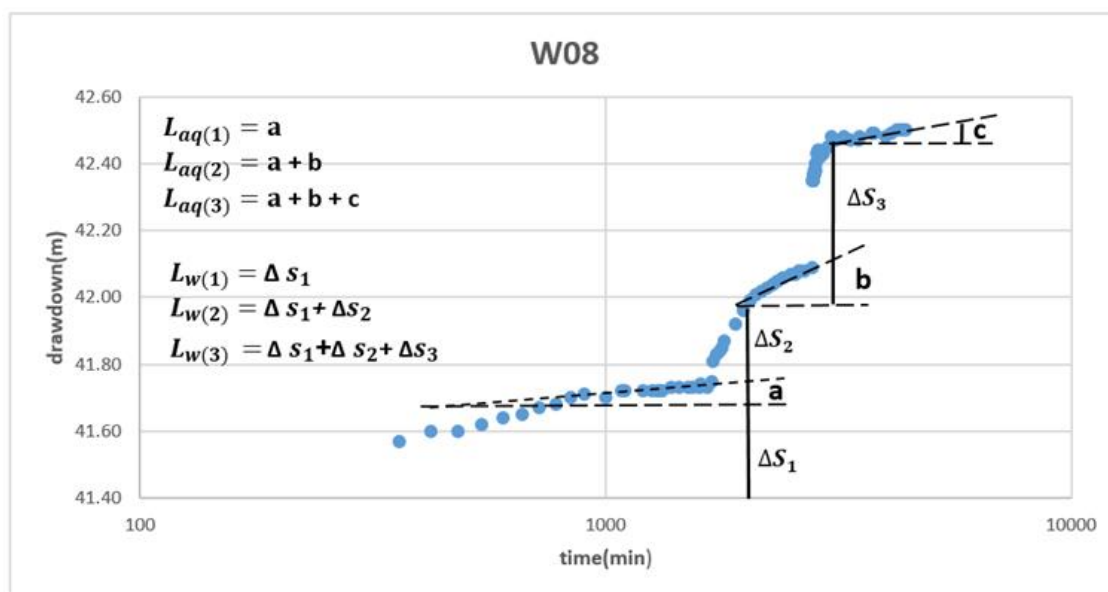
شکل ۳-۳- تصحیح داده‌های پرت پمپاژ

## ۲- جداسازی افت چاه و افت سازند

کرمی و یانگر (Karami and Younger 2002) روشی را برای جدا کردن افت چاه از افت آبخوان هم در افت با دبی ثابت و افت پله‌ای ارائه دادند. در روش افت با دبی ثابت داده‌های پمپاژ بر روی نمودار نیمه لگاریتمی، محور افقی زمان (لگاریتمی) و محور عمودی داده‌های افت ترسیم می‌شود. با توجه به شکل ۳-۴ از نقطه‌ای

که میزان افت ثابت می‌شود خطی به موازات محور افقی ترسیم می‌شود و خطی هم بر روی داده‌ها برازش داده می‌شود، سپس می‌توان افت آبخوان را از افت چاه جدا نمود.

در آزمایشات افت پله‌ای هم روش کار مشابه است یعنی بر روی هر پله مانند روش قبل با دبی ثابت خطی به روی داده‌ها و خطی هم به موازات محور زمان ترسیم می‌گردد و بر روی هر پله میزان افت چاه و افت آبخوان اندازه‌گیری می‌گردد. حال افت کلی چاه از مجموع افت‌های داخل چاه محاسبه می‌شود.

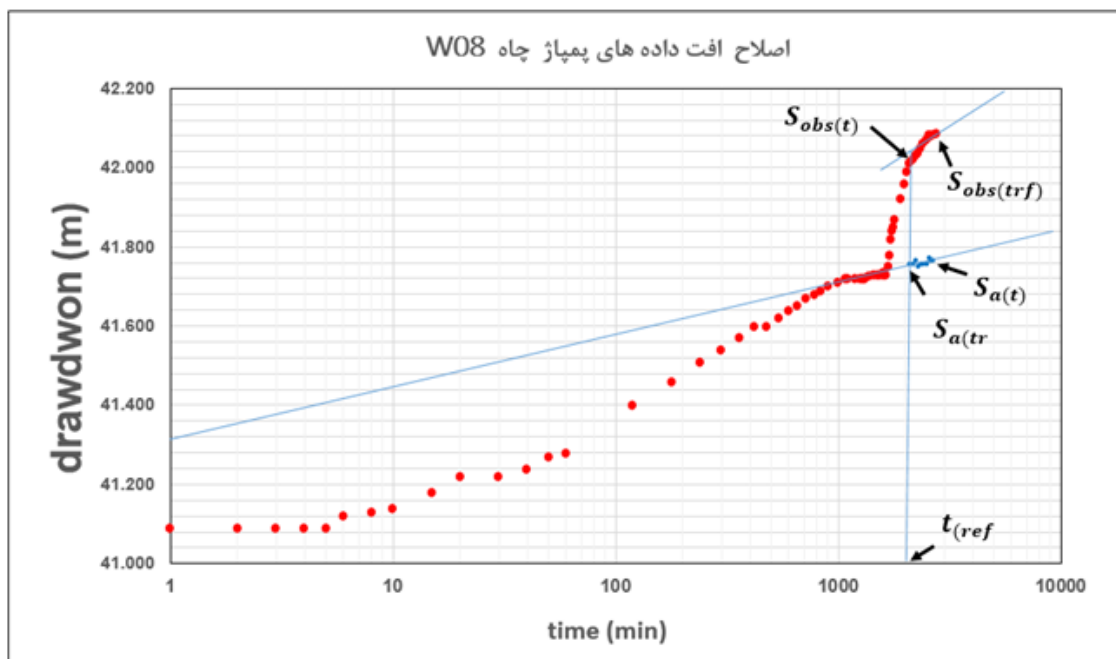


شکل ۳-۴- روش جدا کردن افت چاه از افت سفره در آزمایش افت پله‌ای (Karami and Younger 2002)

### ۳- تصحیح دبی و افت بر مبنای پله اول

کرمی و یانگر (Karami and Younger 2002) بیان کرده‌اند که شمار اندکی از چاه‌ها هستند که دبی پمپاژ ثابت دارند. اما در بیشتر چاه‌های پمپاژ دبی با زمان تغییر می‌کند، که البته این تغییرات عمدتاً ناشی از نحوه عملکرد پمپ است. چنانچه اثرات مربوط به دبی متغیر پمپاژ وابسته به میزان تغییر دبی پمپاژ اصلاح نگردد در تولید ضرایب خطا ایجاد خواهد کرد. به منظور تصحیح داده‌های آزمایش پمپاژ از معادله ۳-۱ که توسط کرمی و یانگر (Karami and Younger 2002) برای همگن سازی داده‌های آزمایش پمپاژ ارائه کرده‌اند استفاده شده است. شکل ۳-۵ پارامترهای کلیدی به کار رفته در این معادله را نشان می‌دهد. در این روش داده‌های

افت پله‌ای بر روی یک منحنی نیمه لگاریتمی رسم می‌شوند (محور زمان لگاریتمی) سپس بر روی داده‌های انتهای پله اول که افت حال ثابتی به خود گرفته است یک خط برازش داده می‌شود. داده اولین نقطه‌ای که افت از آنجا حالت ثابت به خود می‌گیرد به عنوان داده رفرانس پله اول در نظر گرفته خواهد شد.



شکل ۳-۵- اصلاح داده‌های افت بر اساس پله اول. روش کرمی و یانگر (Karami and Younger 2002)

بر اساس معادله ۳-۱ سایر داده‌ها به همراه افت تصحیح می‌شوند. سپس پله اول که داده‌های پله دوم در انتهای آن قرار می‌گیرد به صورت یک پله درخواهد آمد. به همین منوال سایر پله‌ها اصلاح می‌شوند. حال تمام داده‌ها روی یک پله خواهند بود. در حال حاضر یک منحنی و داده‌های پمپاژ طولانی مدت به دست می‌آید و از روش خط راست کوپر-ژاکوپ برای به دست آوردن ضرایب آبخوان استفاده می‌شود.

$$S_a(t) = \frac{[S_{obs}(t) - S_{obs}(t_{ref})]}{Q_{obs}/Q_{ref}} + S_a(t_{ref}) \quad \text{معادله ۳-۱}$$

که در آن:

$S_a(t)$  = افت اصلاح شده در زمان  $(t)$

$S_{obs}(t)$  = افت مشاهده شده در زمان  $(t)$

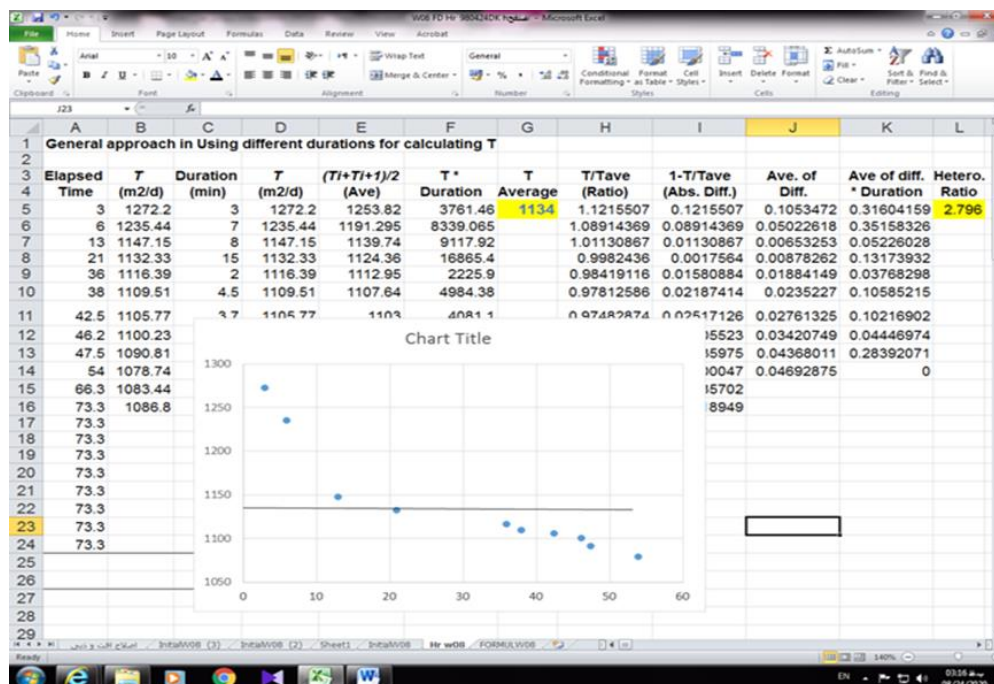
$$S_{a(t_{ref})} = (t) \text{ افت اصلاح شده در زمان مرجع}$$

منحني نیمه لگاریتمی بر آن خط راستی را برازش داد)  $t_{(ref)} = (t)$

دبی، اندازه گیری شده  $Q_{obs} =$

دیے، مرجع =  $Q_{ref}$

سپس با استفاده از روابط پیش گفته بعد جریان و نسبت ناهمگنی به دست می‌آید که برای این کار می‌توان از نرم افزار اکسل استفاده کرد که در شکل ۳-۶ نحوه درج معادله نشان داده شده است.



شکل ۳-۶- برنامه اکسل برای محاسبه ضریب قابلیت انتقال متوسط و بعد جریان

پس از به دست آمدن بعد جریان و نسبت ناهمگنی اعداد در نمودار نوع جریان پلات می شود. بدین ترتیب برای هر چاه نسب ناهمگنی و بعد جریان نسبت به سایر چاه ها در همان منطقه به دست خواهد آمد.

### ۳-۴-۱ برآورد تراوایی واحدهای سنگی

پس از انجام آزمایش پمپاژ اطلاعات مربوط به ضریب قابلیت انتقال و برخی کمیت‌های دیگر از جمله نسبت ناهمگنی و بعد جریان نیز به دست می‌آیند. از آنجا که ضریب قابلیت انتقال حاصل ضرب ضخامت لایه آبدار در هدایت هیدرولیکی می‌باشد و از طرفی ضخامت اشباع واحد آهکی از داده‌های حفاری و چینه‌شناسی تصحیح شده است، بنا بر این امکان برآورد تراوایی هر واحد سنگی مهیا شده است. هریک از برآوردها تا حدی با سایر اطلاعات نیز مورد مقایسه قرار گرفته است این داده‌ها شامل لاگ‌های ژئوفیزیک و آبدهی چاه‌ها و افت کوتاه مدت آنها می‌شود.

### ۳-۴-۲ بررسی آبدهی چاه‌ها

برای تامین آب مجتمع پتروشیمی بجنورد مطالعات گسترده‌ای در سال‌های ۱۳۷۳ تا ۱۳۷۵ در منطقه انجام شده است و در سالهای بعد به منظور تامین آب شرب در منطقه چاه‌های زیادی در سازند تیرگان حفر شده است. اطلاعات عمومی این چاه‌ها در جدول ۳-۱ نشان داده شده است

جدول ۳-۱- مشخصات عمومی چاه‌های منطقه مورد مطالعه

| چاه | عمق | زمان ساعت | سال انجام پمپاژ | برگشت |
|-----|-----|-----------|-----------------|-------|
| W01 | ۲۵۰ | ۷۶        | ۱۳۹۰            | دارد  |
| W02 | ۲۰۱ | ۳۵۴       | ۱۳۷۵            | دارد  |
| W04 | ۲۰۱ | ۹۶        | ۱۳۸۸            | ندارد |
| W05 | ۲۵۰ | ۱۳۲       | ۱۳۷۳            | ندارد |
| W07 | ۱۴۰ | ۴۷۴       | ۱۳۷۳            | دارد  |
| W08 | ۱۳۹ | ۷۷        | ۱۳۷۳            | ندارد |
| W09 | ۱۴۰ | ۳۳۹       | ۱۳۷۳            | دارد  |

برخی از این چاه‌ها موفق و بسیاری نیز ناموفق بوده‌اند. از آنجا که غالباً چاه‌های بدون آب از سوی متولیان امر رها می‌شوند و اطلاعات آنها نیز به درستی نگهداری نمی‌شود، اطلاعاتی از محل دقیق حفاری این دسته از چاه‌ها به دست نیامد. تنها بر اساس مذاکره با کارشناسان قدیمی حدود جغرافیایی این چاه‌ها به دست آمده که تعداد آنها به ۴ حلقه می‌رسد. اما داده‌های قابل اطمینانی از آنها به دست نیامد.

### ۳-۴-۳ تعیین سیستم غالب جریان

جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های کارستی به یک طیف پیوسته تقسیم می‌شود که از سیستم جریان مستقیم به جریان به طور کامل پخش تبدیل می‌شود. در سیستم‌های افشان جریان آب زیرزمینی در شکستگی‌ها، شکاف‌ها و منفذهای متصل باریک برقرار است. جریان افشان به صورت ورقه‌ای و مانند جریان در محیط دانه‌ای است، با توجه به ویژگی‌های سیستم جریان کارست ذکر شده در بالا، در قدم اول دو ویژگی سیستم‌های جریان کارست می‌تواند به طور مستقیم با داده‌های آزمون پمپاژ منعکس شود:

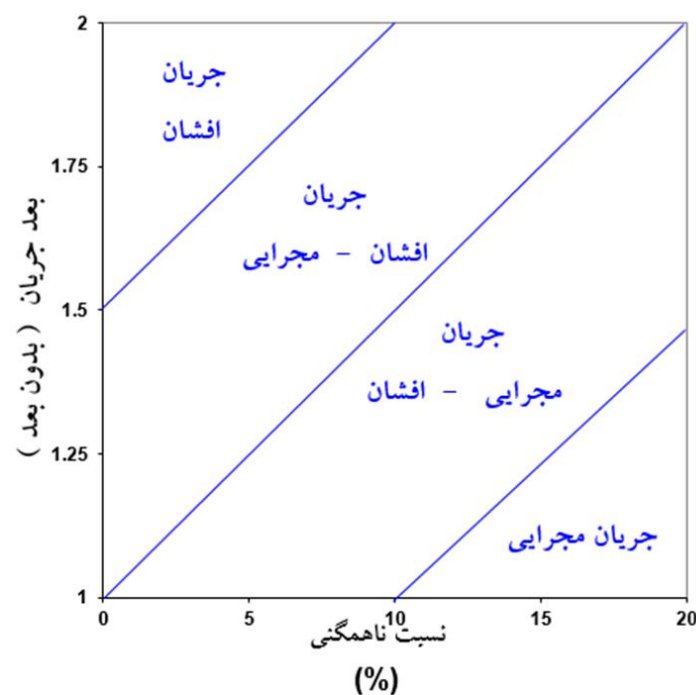
۱- درجه ناهمگنی، که با تغییرات در روند داده‌های زمان تخلیه نشان داده شده است.

۲- میزان اتصالات، که در هندسه جریان منعکس شده است.

بنا بر این، نتیجه‌گیری می‌شود که اگر ناهمگنی و بعد جریان را برای هر آزمایش پمپاژ به دست آوریم، از آنها می‌توان به منظور تعیین سیستم جریان در آبخوان‌ها استفاده کرد. در استفاده از یک روش برای طبقه‌بندی سیستم‌های جریان در کارست، پیش شرط تعریف حدود پایین و بالا در بعد جریان و نسبت ناهمگنی است. بیشترین ابعاد جریان بین عدد یک و دو قرار می‌گیرد. محدوده مشخص شده برای طبقه‌بندی سیستم جریان کارست به چهار بخش تقسیم می‌شود (Karami 2002). با توجه به نسبت ناهمگنی، حد پایین‌تر بدون شک ۰٪ (صفر درصد) است (برای آبخوان‌های هیدرولیکی همگن). مقادیر نسبت ناهمگنی برای آزمایش‌های مختلف پمپاژ با استفاده از روش‌های مختلف تایس و کوپر -ژاکوپ و مونش (Theis 1935, Cooper-Jacop 1946; Moench 1964) مقادیری را بین ۰ درصد و ۱۸/۶ درصد به دست آوردند.

با توجه به مقادیر به دست آمده و ویژگی‌های مربوط به آزمون پمپاژ مربوطه (به عنوان مثال تغییرات شیب در منحنی نیمه لگاریتمی)، به نظر می‌رسد که آبخوان‌های ناهمگن درجه ناهمگنی را بین مقادیر ۱۰ تا ۲۰ درصد نشان می‌دهند. مقادیر بیش از ۲۰٪ احتمالاً تنها در آبخوان‌های بسیار ناهمگن کارستی وجود دارد.

در نهایت، بر اساس بعد جریان و نسبت ناهمگنی، یک طبقه‌بندی گرافیکی برای ارزیابی سیستم‌های جریان کارست معرفی شده است (شکل ۳-۷). پیشنهاد شده که این طرح می‌تواند به طور کلی مورد استفاده قرار گیرد تا از قبل اطلاعاتی در مورد انواع جریان‌های غالب در یک آبخوان در یک مکان خاص به دست آورد. چنین اطلاعاتی می‌تواند به راحتی برای اجرای مدل‌های مناسب برای اهداف مدل‌سازی منابع آب مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۳-۷- طبقه‌بندی گرافیکی پیشنهاد شده از سیستم جریان آبخوان کارست (Karami 2002)

### ۳-۵ تلفیق اطلاعات چینهای، ژئوفیزیک و پمپاژ به منظور ارزیابی هیدرواستراتیگرافی سازند

#### تیرگان

برای ارزیابی هیدرواستراتیگرافی و امکان تفکیک لایه‌های مختلف سازند تیرگان از یکدیگر، تراوایی هر لایه نیاز است. تراوایی لایه‌هایی که در آنها چاه پمپاژ وجود دارد بر اساس روش‌های معمول به‌دست آمده است. از بررسی‌های چین‌شناسی، لیتولوژی، ضخامت، ارتباط لایه‌ها با یکدیگر در توالی رسوبی به‌دست آمده و بررسی‌های رسوب‌شناسی و ریزرخساره‌ها امکان تعیین دقیق‌تر لیتولوژی، تخلخل، فشردگی، درصد مواد تخریبی و پتانسیل اولیه لایه‌ها به انحلال را فراهم ساخته است. از بررسی‌های لاگ‌های ژئوفیزیک، برای ارزیابی لیتولوژی، وجود رس، تراکم و فشردگی لایه‌ها در کنار سایر داده‌های پیش‌گفته استفاده شده است. این بررسی‌ها در کنار یکدیگر و با هم مقایسه و تجزیه تحلیل شدند و اصلاحات لازم صورت گرفت. در پایان و بر اساس ستون چین‌شناسی اندازه‌گیری شده، اطلاعات هر لایه به لایه مشابه خود در سازند تعمیم داده شد. کل ستون چین‌شناسی اندازه‌گیری شده نیز در بخش انتهایی و به صورت نسبی به لایه‌های تراوا و ناتراوا و یا نیمه تراوا تقسیم‌بندی شده است. اطلاعات ستون چین‌شناسی مطالعه شده با دیگر برش‌های اندازه‌گیری شده سایر پژوهشگران در مناطق غربی کپه‌داغ و بر مبنای چین‌شناسی و ویژگی‌های رسوب‌شناسی تا حد ممکن تطابق داده شد.

## فصل چهارم: ارزیابی هیدرواستراتیگرافی سازند تیرگان

به منظور ارزیابی هیدرواستراتیگرافی سازند تیرگان از تجزیه و تحلیل تمامی داده‌ها و اطلاعات به‌دست آمده در کنار یکدیگر و در تلفیق با هم استفاده شده است. این اطلاعات شامل: بررسی چینه‌شناسی برش اندازه‌گیری شده، بازسازی محیط رسوبی و بررسی ریزرخساره‌ها و تعیین نوع آهک و درجه خلوص آن به طور سیستماتیک و از پایین به بالای سازند، اطلاعات ژئوفیزیک لاگ‌های برداشت شده و در انتها اطلاعات حاصل از پمپاژ و سرانجام بررسی‌های ژئومورفولوژی کارست هستند.

### ۴-۱ بررسی چینه‌شناسی سازند تیرگان

بر اساس مطالعات انجام شده سازند تیرگان در منطقه مورد مطالعه شامل تناوبی از واحدهای سنگی آهکی، آهکی-مارنی، مارنی و میان لایه‌های نازک شیل است. از سمت شرق به غرب در کپه‌داغ ضخامت این سازند افزایش می‌یابد. بر اساس مطالعات سایر پژوهشگران به سمت شمال غرب کپه‌داغ حداقل بخش بالایی آن از آهک‌های ضخیم لایه تشکیل می‌شود و در واقع از لایه‌های مارنی کاسته می‌شود. در شمال غرب بجنورد و در منطقه جوزک و چمن بید و در شمال منطقه در کوه مسی‌نو این سازند از آهک ضخیم لایه و حتی دولومیتی شده تشکیل شده است.

### ۴-۱-۱ بررسی چینه‌شناسی برش مطالعه شده

سازند تیرگان در برش مطالعه شده ۵۱۰ متر ضخامت دارد. در قاعده تیرگان سازند شوربچه و با برونزد کمی دیده می‌شود. بخش پایین سازند شوربچه گسلی است و قاعده آن دیده نمی‌شود. این سازند تاثیر زیادی بر بخش‌های پایینی سازند تیرگان بر جای گذاشته است. بر مبنای مطالعه افشار حرب (۱۳۷۳) سازند شوربچه ساحل دریای تشکیل سازند تیرگان بوده است.

سازند تیرگان در این برش شامل ۵ بخش یا واحد سنگی است. در پایین با یک واحد سنگی آهکی ضخیم به رنگ خاکستری روشن تا نخودی کرم رنگ که در بالا به خاکستری تیره تبدیل می‌شود، شروع شده که بر روی سازند شوريجه واقع شده است. لیتولوژی این لایه حاوی مولفه‌هایی از سازند شوريجه است به طوریکه ذرات کوارتز به عنوان مهم‌ترین ذرات تخریبی در ریزرخساره‌ها دیده می‌شود. ساختمان چینه‌بندی متقاطع به فراوانی در این بخش به چشم می‌خورد. در این بخش لایه‌های آهکی به سمت بالاتر ضخامت بیشتری پیدا می‌کنند. گسترش جانبی این واحد سنگی در منطقه مورد مطالعه قابل توجه است و به سادگی قابل ردیابی است. بر روی این واحد یک بخش مارنی خاکستری روشن تا سبز زیتونی نهشته شده و مرز آن در پایین و بالا شارپ است و در انتها شیلی می‌شود. در این واحد میان لایه‌هایی از آهک مارنی کرم رنگ تشکیل شده که نشانگر تغییرات سطح دریا در زمان تشکیل و حضور موقت پلاتفرم کربناته است. گسترش جانبی این واحد نیز در منطقه قابل توجه است و به راحتی قابل تفکیک از لایه‌های بالایی و پایینی است. این واحد سنگی در برابر فرسایش مقاوم نبوده و فرسایش زیادی یافته است.

مجدداً در بخش سوم یک واحد سنگی آهکی کرم رنگ تا خاکستری روشن تشکیل شده است که نسبت به واحد آهکی اول دارای ذرات تخریبی کم‌تر و محتوی فسیل بیشتری است. لایه‌های آهکی متوسط تا ضخیم لایه در آن دیده می‌شود. این بخش هم در برابر فرسایش مقاوم است و هم دارای گسترش جانبی بسیار خوبیست. از نظر لیتولوژی این بخش در بین دو واحد سنگی مارنی و مارنی-آهکی نفوذناپذیر قرار گرفته است، در برابر فرسایش مقاوم بوده و نسبت به لایه‌های بالا و پایین برونزد خوبی دارد.

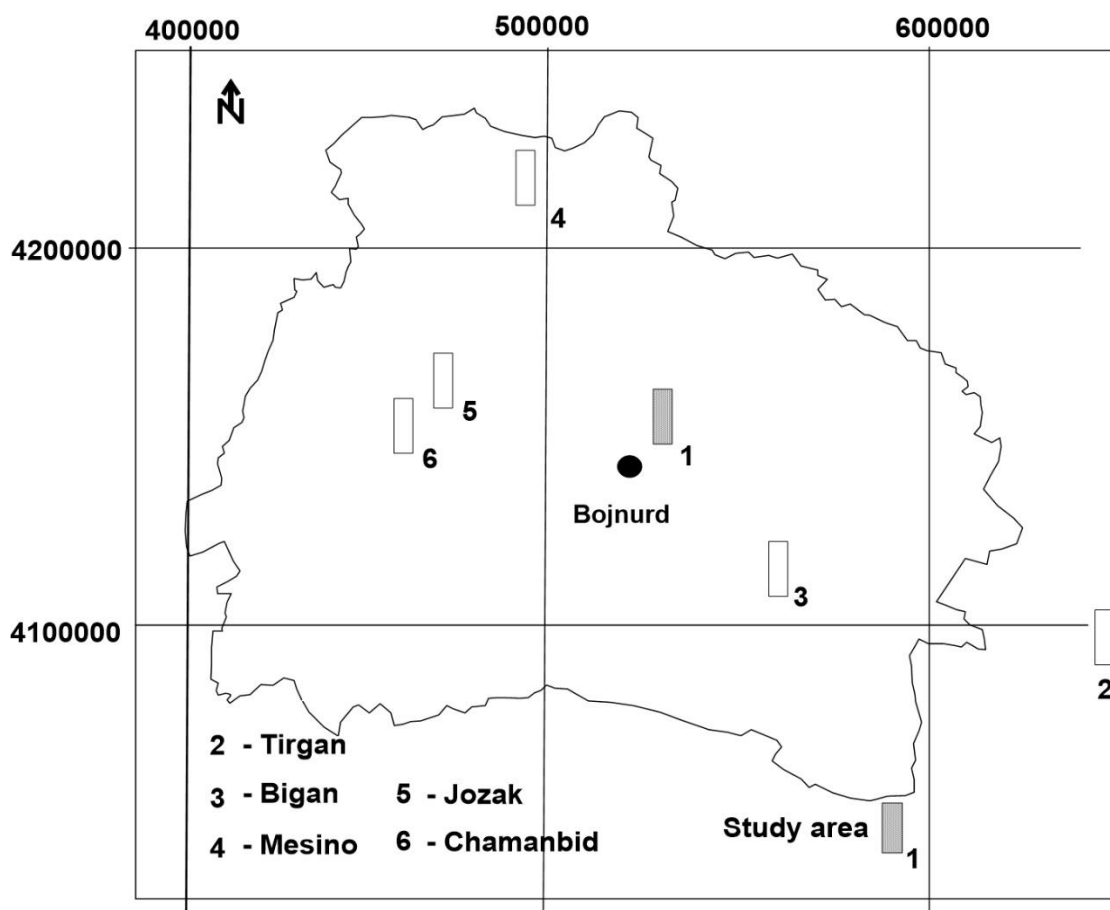
واحد سنگی چهارم هم یک واحد سنگی مارنی آهکی سبز روشن با ضخامت ۸۵ متر برونزد دارد که به سمت بالا تیره‌تر می‌شود و در این واحد هم میان لایه‌های آهکی تشکیل شده‌اند. در قسمت میانی لایه‌های مارنی نازک لایه‌تر می‌شوند که با لایه‌های شیلی در تناوب هستند. به سمت بالاتر میان لایه‌های آهکی مارنی حاوی فسیل، فراوان‌تر می‌شوند. این واحد سنگی با یک لایه مارنی سبز که در انتها شیلی می‌شود به پایان می‌رسد. این بخش هم در برابر فرسایش نامقاوم بوده و فقط میان لایه‌های آهکی-مارنی کمتر فرسایش یافته‌اند. این بخش هم گسترش جانبی خوبی در منطقه دارد. این واحد به سبب لیتولوژی یک لایه ناتراوا محسوب می‌شود.

سازند تیرگان در این منطقه و در انتها با یک واحد آهکی کرم رنگ بسیار ضخیم لایه حاوی فسیل و به ویژه اوربیتولین به انتها می‌رسد که مرزهای مشخص با لایه‌های بالا و پایین دارد. در بخش قاعده یک لایه آهکی بسیار ضخیم وجود دارد. در بخش میانی یک لایه آهکی حاوی اوربیتولین دیده می‌شود. مرز این واحد آهکی با سازند سرچشمه بسیار شارپ است زیرا هم تغییر لیتولوژی و هم تغییر رنگ بسیار واضح است. این واحد آهکی دارای گسترش بسیار مناسب در کل محدوده مورد مطالعه است. در برابر فرسایش مقاوم بوده و در یال تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها و در تماس با سازند سرچشمه قابل مشاهده است، چون ممکن است بخش‌های زیرین سازند تیرگان برونزد نداشته باشند، در مناطقی که شیب تاقدیس‌ها زیاد است این لایه برهنه بوده و سبب وجود درز و شکافها در برابر نفوذ بارندگی بسیار مستعد است. شایان ذکر است برش چینه‌شناسی توصیف شده در منطقه دارای تغییرات در گسترش جانبی بوده که امری معمول در چینه‌شناسی است. اما چون در این برش امکان تفکیک واحدهای سنگی به وجود آمده به نظر می‌رسد در سایر مناطق تغییرات در رخساره و ضخامت صورت گرفته باشد. نکته حایز اهمیت آنکه این برش تا حد زیادی با برش الگو در روستای تیرگان شباهت دارد

#### ۴-۱-۲ تطابق برش مورد مطالعه با سایر برش‌های سازند تیرگان

پژوهشگران بسیاری در منطقه کپه‌داغ چینه‌شناسی سازند تیرگان را مورد بررسی قرار داده‌اند که البته در شرق کپه‌داغ این مطالعات نسبت به غرب بسیار بیشتر بوده است (آقاداتشی ۱۳۸۰، غیاثوند. م. و همکاران ۱۳۹۸، جوانبخت.م. و همکاران ۱۳۹۷ و برخی دیگر). اما برای تطابق این سازند در غرب کپه‌داغ کوشش‌های زیادی انجام نشده است (به جز تطابق برش جوزک و چمن‌بید و مقایسه آن با شرق که توسط موسوی‌زاده و همکاران در سال ۱۳۷۸ انجام شده است). از بین این مطالعات علاوه بر مقطع تیپ در روستای تیرگان و برش مرجع در روستای جوزک که توسط افشار حرب (۱۳۷۳) اندازه‌گیری و معرفی شده‌اند، سه برش دیگر به نام‌های برش بیگان در جنوب شرق منطقه، برش مسی‌نو در شمال و برش چمن‌بید و جوزک در شمال غرب

منطقه مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این مطالعات توسط عباسی. م. و همکاران (۱۳۹۲)، ریوندی، ب. و همکاران (۱۳۸۹) شاهمیر و همکاران (۱۳۹۵) موسوی‌زاده؛ و همکاران (۱۳۸۷) به انجام رسیده است. در شکل ۴-۱ محل برش‌های مطالعه شده و برش باباموسی نشان داده شده است.

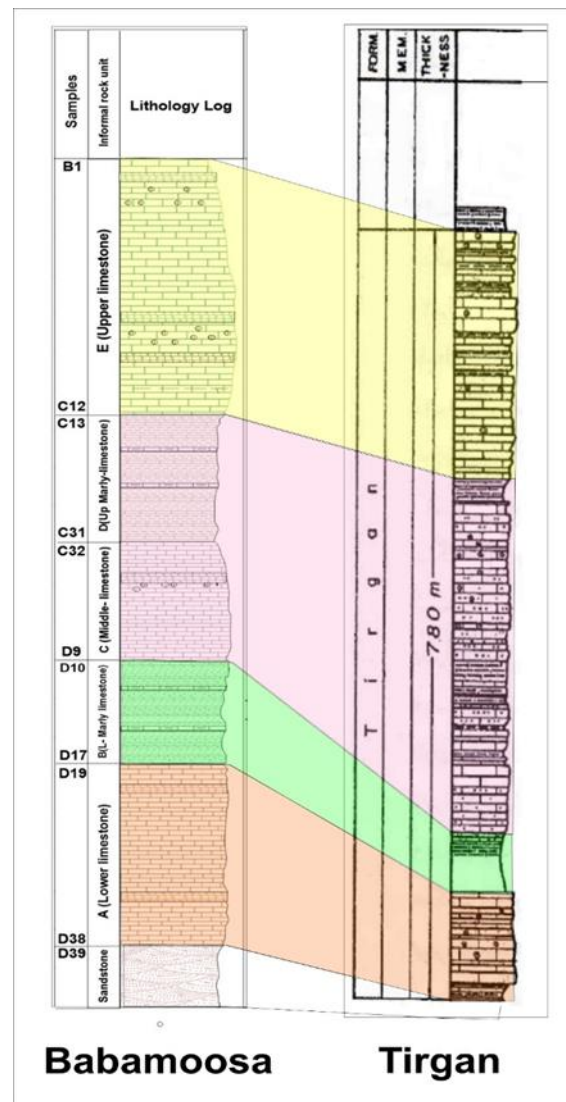


شکل ۴-۱- نقشه برخی برش‌های چینه‌شناسی مطالعه شده در غرب کپه‌داغ

بر اساس اطلاعات حاصل از این مطالعات و در مقایسه با برش اندازه‌گیری شده در این مطالعه در کوه باباموسی می‌توان این برش را تا حد زیادی با برش الگو در اطراف شهر درگز و در روستای تیرگان مقایسه کرد:

**الف- مقایسه برش باباموسی با برش الگو:** واحد آهکی پایینی در کوه باباموسی با بخش زیرین برش الگو هر دو بر روی سازند شوربچه قرار دارند. در برش الگو این بخش از آهک تیره میکراتی و آهک بیواسپارایتی با ضخامت‌های ۲ تا ۵ و حداکثر ۱۸ متر و در ادامه با تناوب لایه‌های آهکی و مارنی دنبال می‌شود. یک واحد مارنی ۵۵ متری در پی آن قرار دارد که قابل مقایسه با واحد مارنی-آهکی برش باباموسی می‌باشد. مشابه سایر

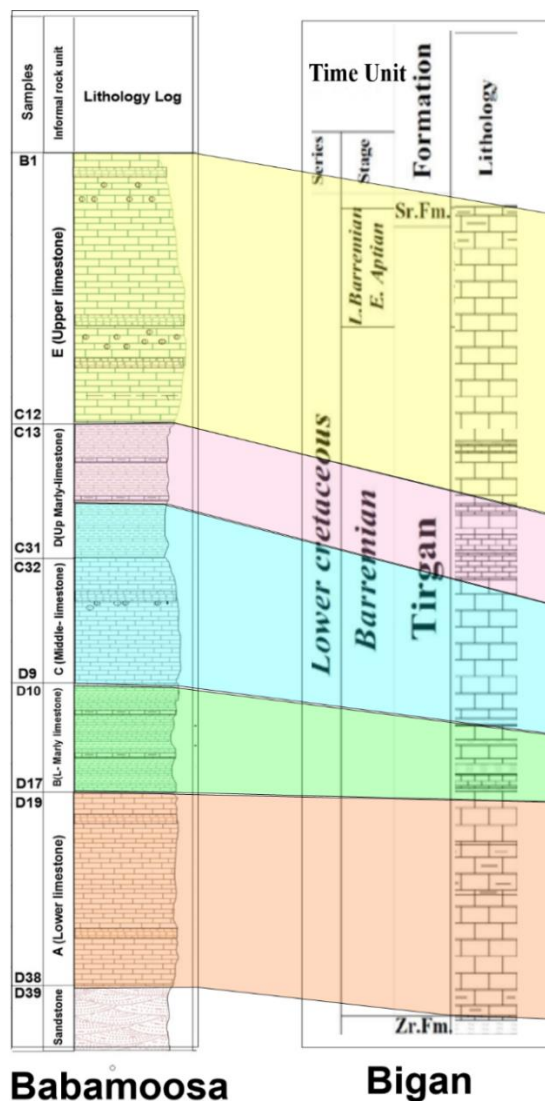
واحدهای برش الگو تا حدی در برش باباموسی قابل ردیابی است از جمله یک واحد مارنی ۴۲ متری (افشارحرب ۱۳۷۳) در برش الگو که مشابه واحد مارنی-آهکی برش باباموسی است. نتیجه این تطابق در شکل ۲-۴ نشان داده شده است



شکل ۲-۴- مقایسه برش باباموسی و برش الگو در روستای تیرگان

ب- مقایسه برش باباموسی و برش بیگان: هم‌چنین در جنوب شرق برش باباموسی یک برش به نام بیگان در شمال روستایی به همین نام اندازه‌گیری شده است که تا حد قابل توجهی مشابهت با برش الگو و برش باباموسی را نشان می‌دهد. برش تیرگان در روستای بیگان ۷۶۱ متر اندازه‌گیری شده است. بر اساس مطالعه

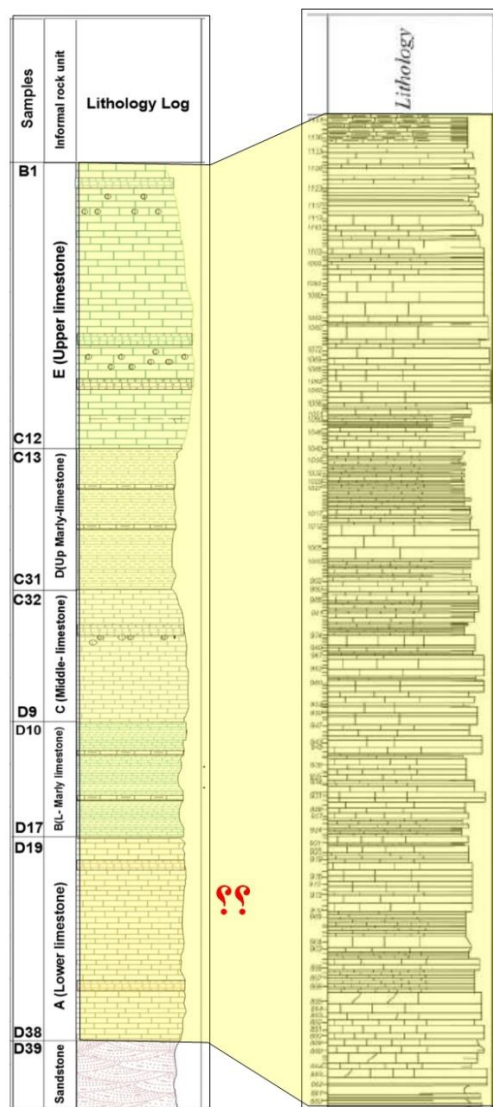
شاهمیر (۱۳۹۵) ستون چینه‌شناسی ترسیم شده در مطالعه وی تا حدی با واحدهای برش الگو و برش باباموسی شباهت دارد. با توجه به فاصله کم این برش با برش منطقه می‌توان این تطابق را انجام داد گرچه تغییرات رخساره هم در این برش قابل توجه است. شکل ۳-۴ مقایسه دو برش را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴- مقایسه برش باباموسی با برش بیگان

ج- مقایسه برش باباموسی با برش مسی‌نو: در برش دیگری به نام مسی‌نو و در شمال برش باباموسی در کوه مسی‌نو آهک‌های تیرگان ۸۴۲ متر ضخامت دارد که از واحدهای سنگی آهکی خاکستری تا خاکستری از نازک لایه تا بسیار ضخیم لایه تشکیل شده است. با توجه به چینه‌شناسی سازند تیرگان در این برش تغییر

رخساره کل سازند به آهک‌ها ضخیم لایه اتفاق افتاده است که ناشی از تغییر در محیط رسوبی و نهشته شدن آهک‌های ضخیم لایه بوده است. نتیجه این مقایسه در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.

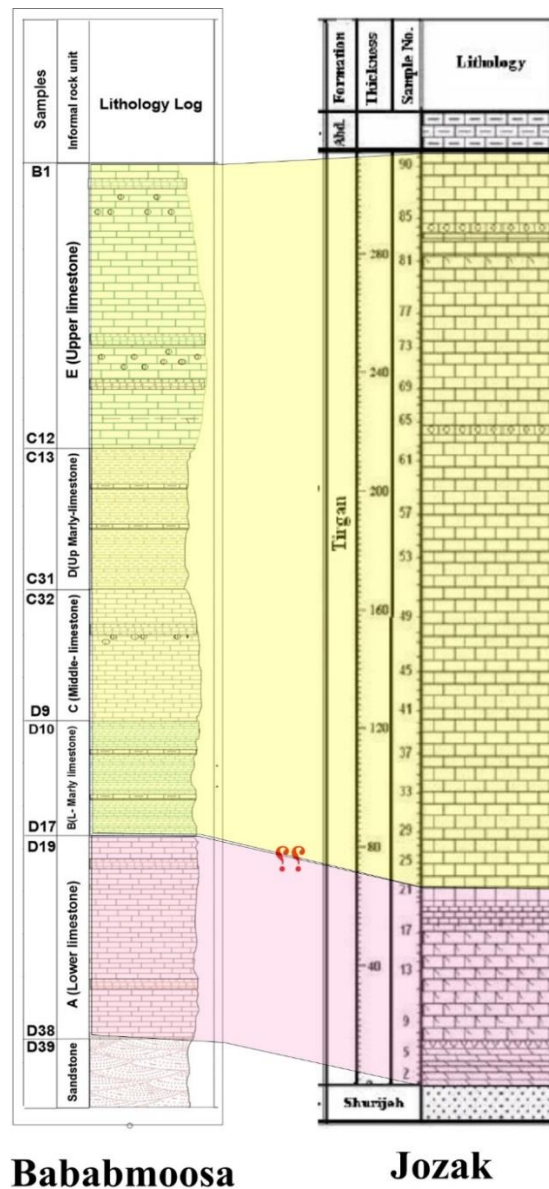


**Bababmoosa      Mesino**

شکل ۴-۴- مقایسه برش باباموسی با برش کوه مسی‌نو

د- مقایسه برش باباموسی با برش جوزک (برش مرجع تیرگان): در برش جوزک سازند تیرگان ۳۱۵ متر ضخامت دارد و شامل دو بخش است بخش پایینی از دولومیت و آهک‌های دولومیتی نازک لایه تشکیل شده و بخش بالایی ۲۶۱ متر آهک ضخیم لایه خاکستری است. کنتاکت پایینی با شورجه تماسی و بالایی با

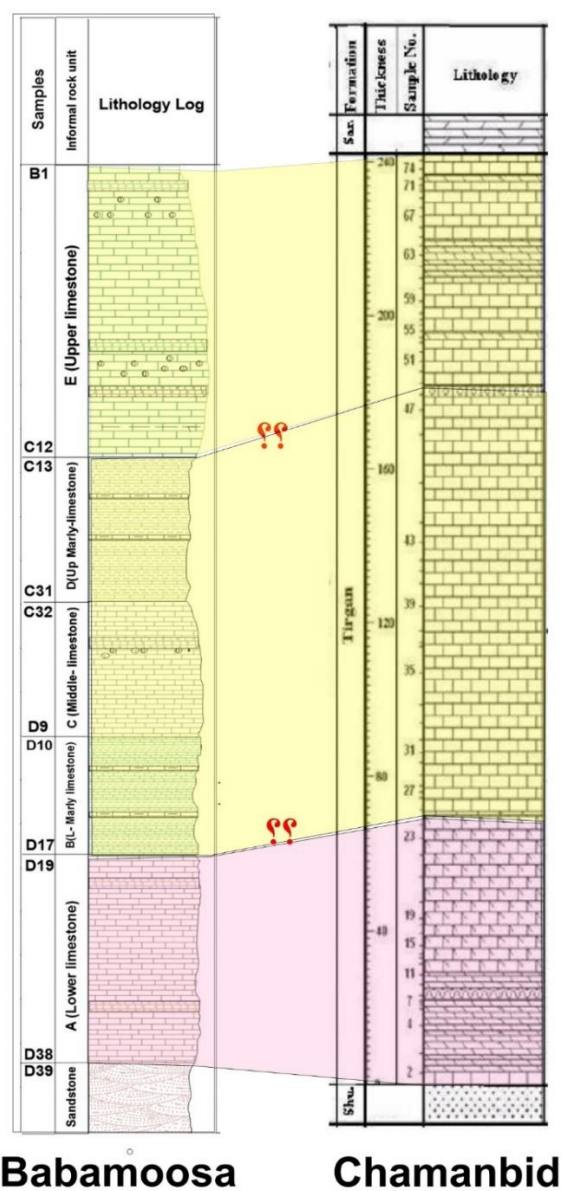
سازند آبدراز گسلی است. تبدیل کل سازند تیرگان به آهک‌های ضخیم لایه و حذف لایه‌های مارنی و مارنی آهکی رخ داده است. دولومیتی شدن از دیگر ویژگی‌های این برش است. نتیجه مقایسه این برش با برش باباموسی در شکل ۴-۵ آمده است.



شکل ۴-۵- مقایسه برش باباموسی با برش مرجع جوزک

ه- مقایسه برش باباموسی با برش چمن‌بید: در برش چمن‌بید سازند تیرگان ۲۴۱ متر ضخامت دارد و در این محل نیز سازند به دو بخش دولومیتی در زیر با ضخامت ۷۰ متر و بخش بالایی با ضخامت ۱۷۲ متر

متشکل از آهک‌های ضخیم لایه خاکستری است که حالت صخره‌ساز دارد. این برش با برش جوزک هم فاصله کمی دارد و هم به لحاظ چین‌های با آن مشابه است تنها تغییر در ضخامت واحدهای آهکی و دولومیتی اتفاق افتاده است. نتیجه این مقایسه در شکل ۴-۶ نشان داده شده است.

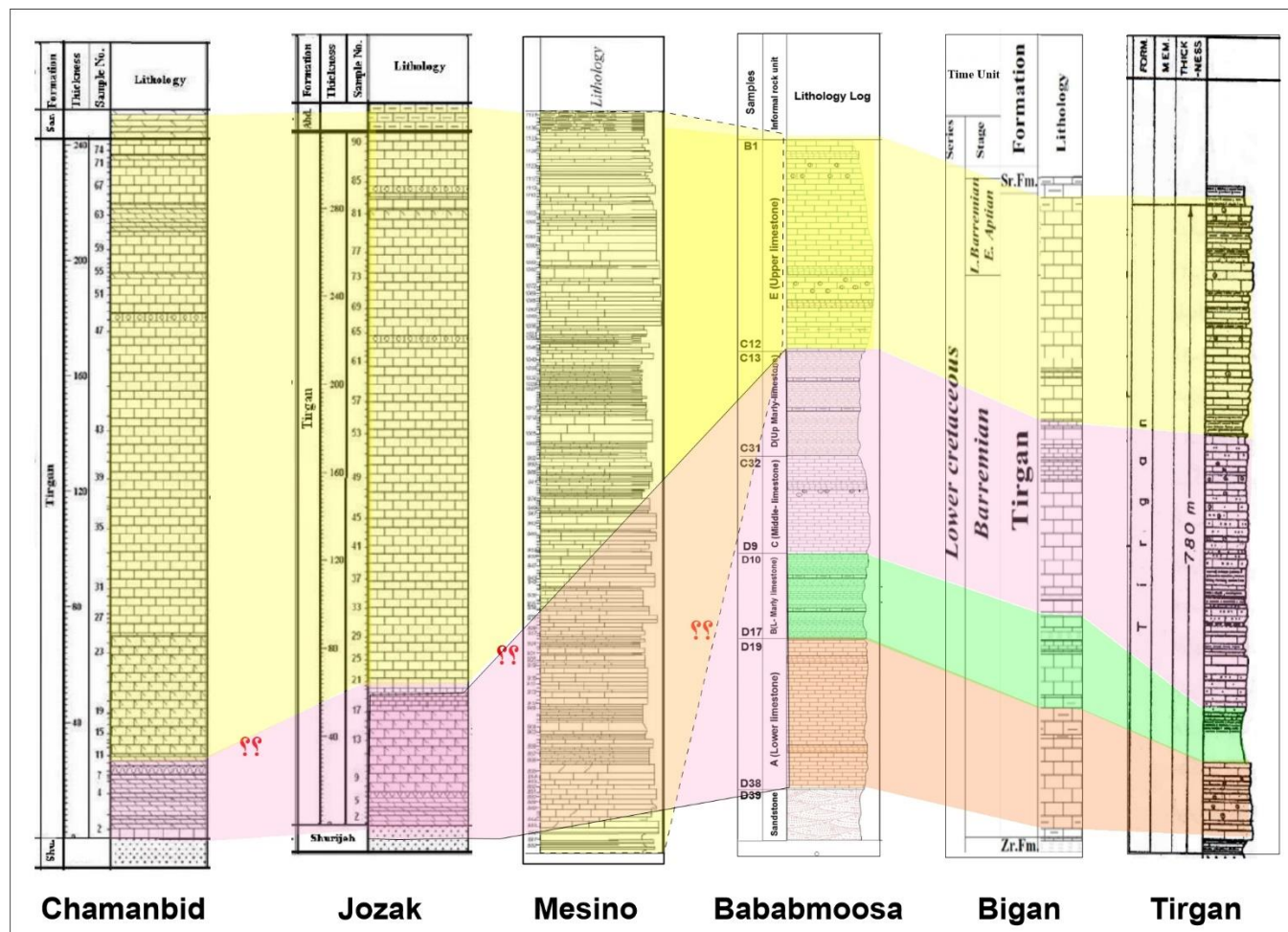


شکل ۴-۶- مقایسه برش باباکوسی با برش چمن بید

#### ۴-۳-۱ ارزیابی توالی‌های چین‌های

بررسی توالی‌های چینه‌شناسی مختلف در منطقه مورد مطالعه و به سمت جنوب شرق نشان می‌دهد واحدهای سنگ چینه‌ای سازند تیرگان تنوع لایه‌بندی و لیتولوژیکی بیشتری نسبت به سایر مناطق غربی کپه‌داغ داشته است. این موضوع بیانگر تغییر در شرایط رسوبگذاری این سازند است. وفق این تطابق سازند تیرگان به سمت شرق و جنوب شرق منطقه مورد مطالعه که به بخش شرقی کپه‌داغ نزدیک می‌شود از لایه‌های مارنی و مارنی-آهکی بیشتری برخوردار است. اما به سمت غرب و شمال غرب از این تنوع کاسته شده و تغییر رخساره به آهک ضخیم لایه اتفاق افتاده است. هم‌چنین پدیده دولومیتی‌شدن به این تغییر رخساره اضافه می‌شود. بر اساس ستون چینه‌شناسی تیرگان در برش باباموسی و ویژگی‌های سنگ‌ها و رسوبات تحکیم یافته سازند تیرگان از سنگ‌های مستعد انحلال و مقاوم در برابر انحلال تشکیل شده است. توالی چینه‌شناسی از آهک و مارن این سازند را به لحاظ هیدروژئولوژیکی به یک سازند لایه لایه تبدیل کرده است. سه بخش آهکی تیرگان به سبب لیتولوژی و در صورت مناسب بودن سایر شرایط می‌توانند به صورت آبخوان کارستی عمل کنند و لایه مارنی-آهکی به عنوان لایه‌های نفوذ ناپذیر در نظر گرفته شده است. این شرایط در برش الگو و برش بیگان وجود دارد اما در برش‌های کوه مسی‌نو و جوزک و چمن‌بید از واحدهای مارنی و یا لایه‌های مارنی-آهکی اثری نیست.

با توجه به ضخیم‌تر شدن آهک‌ها در منطقه غرب و شمال غرب کپه‌داغ ممکن است میزان کارستی شدن این سازند در مناطق یاد شده بیشتر شده باشد. بررسی‌ها و اطلاعات موجود حکایت از وجود چشمه‌هایی با آبدهی بالا در این مناطق دارد از جمله چشمه ارناوه که دبی پایه و ورودی اصلی به سد شیرن‌دره است. برخی چشمه‌های دیگر نیز در شمال غرب منطقه مورد مطالعه وجود دارند. از جنبه دیگری نیز این توالی چینه‌ای اهمیت دارد. در داخل خود سازند تیرگان نیز توالی لایه‌های آهکی و مارنی در کنترل جریان نقش اساسی و با اهمیت دارد نتایج مقایسه سازند تیرگان با برش‌های مطالعه شده قبلی در شکل ۴-۷ نشان داده شده است.



شکل ۴-۷- مقایسه برش کوه باباموسی با برخی از برش‌های منطقه غرب کپه‌داغ

#### ۴-۱-۴ ارزیابی ناپیوستگی‌ها

در منطقه مورد مطالعه سازند تیرگان ناپیوستگی‌های مختلفی دارد و منشأ متفاوت دارند که به ایجاد تخلخل ثانویه کمک کرده‌اند. این ناپیوستگی، شامل شکستگی‌های کششی و برشی و درزه‌ها و لایه‌های رسوبی هستند. ساختار تکتونیکی اصلی منطقه تاقدیسی ناودیسی متناوب و تقریباً به موازات یکدیگر است که توسط گسل‌های عرضی قطع و جابجا شده‌اند. عملکرد گسل‌ها پیچیده نبوده و بهم ریختگی در سازندها از جمله در سازند تیرگان اتفاق نیفتاده است. چند راندگی در منطقه وجود دارد که سازند سرچشمه و شوربچه را بر روی سازند تیرگان رانده است. این مسئله در جای خود حایز اهمیت است اما در توالی زمین‌شناسی موثر بر حرکت آب زیرزمینی تاثیر زیادی نداشته است. با توجه به توالی چینه‌شناسی سازندها در منطقه مورد مطالعه که تناوبی از لایه‌هایی با لیتولوژی مختلف هستند، ناپیوستگی حاصل از لیتولوژی و چینه‌شناسی در ایجاد سیستم کارست و تاثیر بر روی جریان بسیار پراهمیت‌تر می‌باشد.

#### ۴-۲ بررسی محیط رسوبی سازند تیرگان

رخساره‌های رسوبی در سنگ‌های به ویژه کربناته، ابزار مهمی برای شناسایی محیط رسوبی و فرآیندهای موثر بر آن هستند. توالی رخساره‌ها و نحوه جایگیری آنها تغییرات بزرگ و کوچک در متغیرهای محیطی از جمله آب و هوا، شدت جریان آب و یا تغییرات نسبی سطح دریا را نشان می‌دهد. تاثیر محیط رسوبی بر سازند تیرگان نشان می‌دهد شرایط نهشته شدن کربنات از پایین به بالا دچار تغییرات چشمگیری شده است. آهنگ رسوب کربنات، تنوع آلوکم‌ها ورود مواد تخریبی و فرآیندهای دیاژنز بعدی در استعداد کارستی شدن سازند نقش بسزایی داشته‌اند. بررسی‌هایی که توسط پژوهشگران زیادی در کپه‌داغ به انجام رسیده نشان می‌دهد سازند تیرگان از جمله در منطقه مورد مطالعه در یک رمپ هموکلینال (Read 1985) رسوب کرده است.

#### ۴-۲-۱ بررسی ریزرخساره‌ها

از نمونه‌های سنگ برداشت شده از سازند تیرگان ۹۰ برش نازک تهیه شده است. بررسی‌ها شامل شناسایی دانه‌های آواری، کربناته، آلوکم‌ها، ارتوکم‌ها و سیمان و خمیره و بررسی‌های دیاژنز شامل فشردگی، تنوع آلوکم‌ها، ذرات آواری و تخریبی بوده است. در شناسایی کمربندهای رخساره‌های رسوبی از ویلسون (Wilson 1975) و نام‌گذاری ریزرخساره‌ها بر اساس روش دانه‌ام (Dunham 1962) و مقایسه با محیط رسوبی بر اساس روش فلوگل (Flügel 2010) کمک گرفته شده است. رخساره‌های شناسایی شده در سازند شامل رخساره‌های زیر می‌باشد:

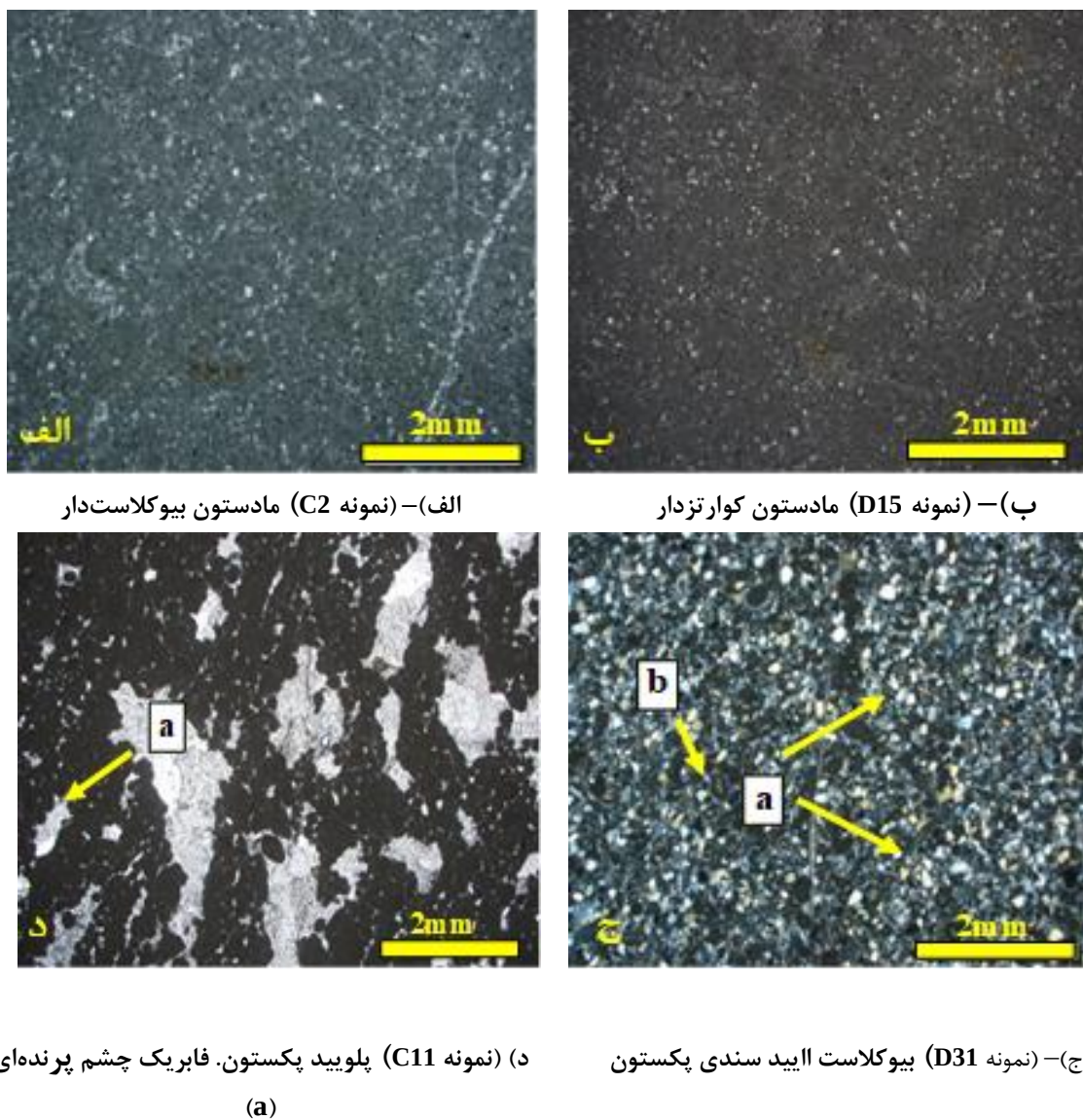
#### کمر بند رخساره‌ای پهنه جزومدی (A = Tidal flat):

(الف) - مادستون بیوکلاست‌دار/کوارتزدار: این رخساره اغلب از گل میکرایتی تشکیل شده و در برخی نمونه‌ها حاوی بیوکلاست و در برخی حاوی کوارتز است. بیوکلاست‌ها شامل خرده‌های صدف و خرده‌های جلبک است. ذرات کوارتز در حد سیلت بوده که از ساحل حمل شده‌اند. این رخساره در بخش‌های پایینی سازند تیرگان دیده می‌شود. لایه آهکی این ریزرخساره یکدست کرم تیره رنگ، در سطح تازه خاکستری و فاقد ساختمان رسوبی است (شکل ۴-۸ الف و ب).

(ب) - بیوکلاست ایید سندی پکستون: این رخساره زمینه تیره میکرایتی دارد و حاوی ۳۰ درصد دانه‌های کوارتز در حد ماسه و سیلت است. هسته بیشتر اییدها را دانه‌های کوارتز تشکیل می‌دهد. دانه‌های کوارتز گردشگری خوبی ندارند. بیوکلاست شامل خرده‌های جلبک و صدف دوکفه‌ای‌ها می‌باشند که گاهی دارای جهت‌یافتگی هستند. در صحرا به صورت آهک‌های قرمز رنگ متوسط تا ضخیم لایه با ساخت رسوبی چینه‌بندی متقاطع دیده می‌شود. لایه‌های حاوی این رخساره در بخش‌های زیرین سازند تیرگان بیشتر دیده می‌شوند (شکل ۴-۸ ج).

(ج) - پلوئید پکستون: این رخساره گل پشتیبان بوده و بافت چشم پرنده‌ای در آن دیده می‌شود. فاقد فسیل است و لامیناسیون در آن دیده نمی‌شود. آهک مارنی بدون ساخت رسوبی به رنگ خاکستری تیره در سطح تازه کرم روشن که در بخش‌های پایینی و میانی سازند تیرگان دیده می‌شود. در بخش میانی نیز این رخساره در لایه آهکی به رنگ خاکستری تیره با لایه‌بندی ۱۰ تا ۵۰ سانتی‌متر دیده می‌شود. وجود بافت فنسترال و

نبود آثار فسیلی نشانه خروج مداوم این رسوبات از آب می باشد که ویژگی محیط پهنه کشندی است (Flügel 2010) (شکل ۴-۸ د).



شکل ۴-۸- ریزرخساره های ساحلی یا پهنه جزر و مدی

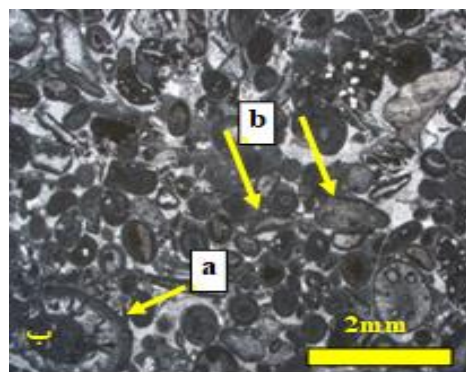
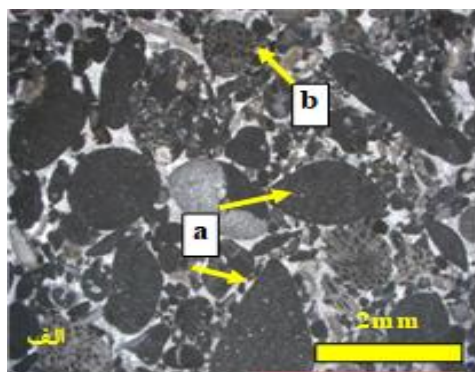
همچنین آثار خروج از آب در بافت چشم پرنده ای به چشم می خورد. بیوکلست ها کم و بدون تنوع هستند. الییدها نیز دارای هسته کواتز می باشند. این رخساره در بخش پایینی سازند تیرگان بیشتر دیده می شود.

کمر بند رخساره ای لاگون (B = Lagoon)

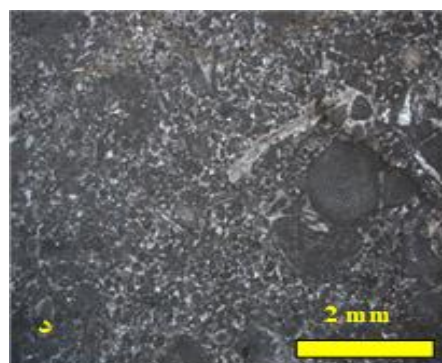
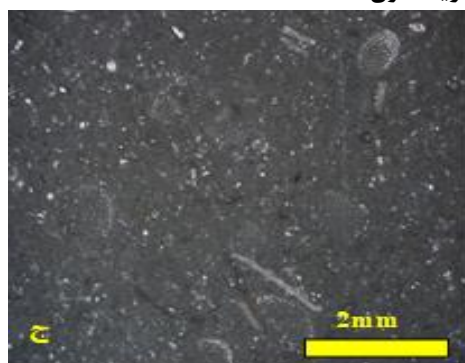
الف) - اینتراکلاست بیوکلاست اوربیتولینا گرینستون: این رخساره دارای بیوکلاست، اوربیتولین، بریوزوئر، شکم‌پا، خرده کرینویید است. دانه‌ها در تماس با یکدیگر بوده و فاقد آثار فشردگی هستند. آهک‌ها کرم رنگ با میان لایه شیلی هستند. این رخساره در بخش میانی و پایانی سازند تیرگان دیده می‌شود (شکل ۴-۹ الف).  
ب) - اینتراکلاست بیوکلاست ایید گرینستون: بیوکلاست‌ها شامل جلبک‌های سبز، خرده صدف دوکفه‌ای‌ها و کرینوییدهاست. اییدها دارای ساختمان شعاعی و کوچک هستند. فشردگی در دانه‌ها دیده نمی‌شود. کمی ذرات تخریبی کوارتز در متن دیده می‌شود. در صحرا متشکل از تناوب لایه‌های آهکی خاکستری به همراه مارن خاکستری تا سبز زیتونی، است لایه آهکی بین ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر و لایه مارنی ۲۰ تا ۵۰ سانتی‌متر ضخامت دارد (شکل ۴-۹ ب).

ج) - بیوکلاست اوربیتولینا و کستون: در این رخساره بیوکلاست‌ها عمده اوربیتولین مخروطی می‌باشند. در برخی نمونه‌ها تعداد کمی ایید دیده می‌شود رخساره گل پشتیبان و حضور اوربیتولین مخروطی معرف محیط لاگون است. این ریزرخساره در بخش‌های آهکی-مارنی سازند تیرگان به فراوانی دیده می‌شود (شکل ۴-۹ ج).  
د) - بیوکلاست اوربیتولینا پلوید پکستون: در این رخساره علاوه بر اوربیتولین پلوید نیز اضافه می‌شود که تا ۶۰ درصد متن را در بر می‌گیرد. خمیره میکرایتی که در آن اوربیتولین‌ها، خرده‌های بریوزوئر، کرینویید، دوکفه‌ای و فرامینفر (میلیولیده) به همراه پلوید قرار دارند. در صحرا از لایه آهک مارنی کرم تیره ضخیم لایه در سطح هوازده خاکستری روشن تشکیل شده است (شکل ۴-۹ د).

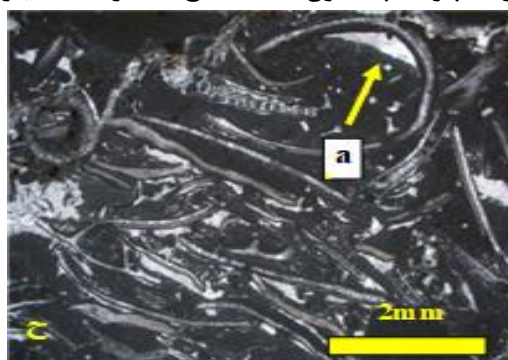
ح) - داسی‌کلاداسه آ بیوکلاست پکستون: در این رخساره جلبک سبز داسی‌کلاداسه آ بیشترین فراوانی را دارد که محیط لاگون را اثبات می‌کند (Bachmann, F. Hirsch 2006). برش طولی و عرضی جلبک به همراه بافت ژئوپتال دیده می‌شود. رخساره‌ها عمدتاً گل پشتیبان بوده و فشردگی دیده نمی‌شود و حضور کمی ایید نشان می‌دهد که از محیط سد به لاگون حمل شده‌اند. این رخساره در واحدهای آهک پایینی، بالایی و میانی دیده می‌شود. آهک ضخیم لایه بوده و به رنگ خاکستری تیره در سطح تازه به رنگ کرم روشن است (شکل ۴-۹ ح).



الف) - (نمونه B2) اینتراکلاست بیوکلست اوربیتولینا گرینستون  
ب) - (نمونه C17) اینتراکلاست بیوکلست الایدگرینستون



ج) - (نمونه C28) بیوکلست اوربیتولینا وکستون  
د) - (نمونه B6) بیوکلست اوربیتولینا پلویید پکستون



ه) - (نمونه C17) داسی کلاداسه آ بیوکلست پکستون

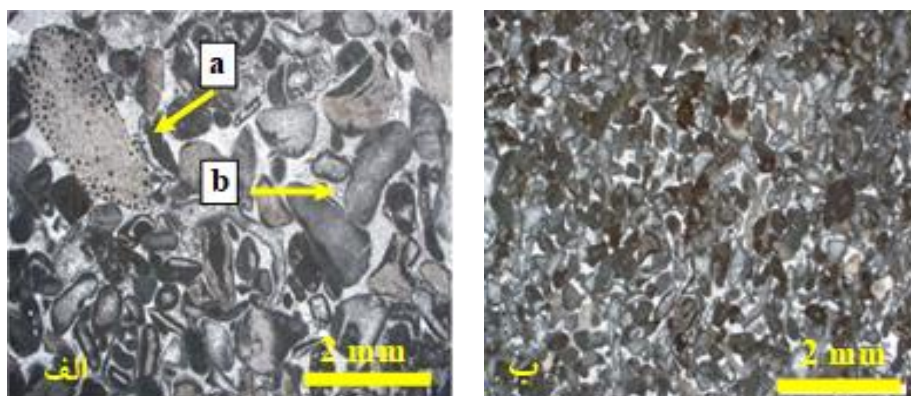
شکل ۴-۹- ریزرخساره های لاگون

کمر بند رخساره های سد (Shoal) = C

الف) - اینتراکلاست بیوکلست گرینستون: این رخساره حاوی سیمان اسپارایتی است. بیوکلست ها شامل خرده صدف شکم پایان، دوکفه ای ها، بریوزوئر و خارپوستان می باشد. اینتراکلاست لبه کاملاً گرد شده دارند. حضور میکروفسیل های استنوهالین نشان از تماس سد با دریای باز از طریق کانال دارد. لایه آهکی توده ای خاکستری با میان لایه مارنی نازک سبز روشن ویژگی این ریزرخساره در صحرا است (شکل ۴-۱۰ الف).

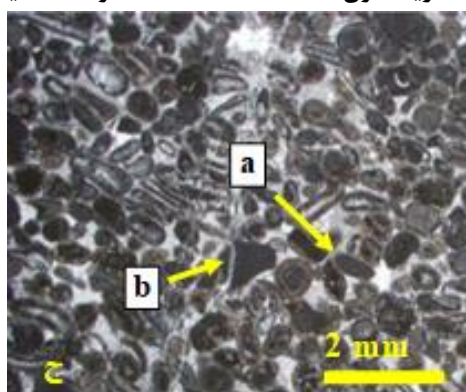
ب)- بیوکلاست گرینستون: در این رخساره مجموعه‌ای از بیوکلاست‌ها شامل خرده صدف، بریوزوئرها، خرده خارپوست در یک سیمان اسپارایتی است. ذرات کوارتز حضور ندارند. این رخساره در بخش‌های بالایی سازند تیرگان به فراوانی دیده می‌شود. لایه آهکی در صحرا به رنگ خاکستری تیره با سطح تازه خاکستری روشن است. (شکل ۴-۱۰ ب).

ج)- ایید اینتراکلاست گرینستون: این رخساره کاملاً پهنه سد را نشان می‌دهد. اییدها دارای جورشدگی و اندازه یکسان هستند. آهک‌ها ساختمان چینه‌بندی متقاطع دارند (شکل ۴-۵ ج). بریوزوئرها و کرینوییدها که گردشدگی خوبی دارند نشان از انرژی بالای محیط رسوبی و ارتباط شول با دریای باز دارد (Flügel 2004). در این رخساره فشردگی دیده نمی‌شود و دانه‌ها در تماس با هم هستند (شکل ۴-۱۰ ج)



الف)- (نمونه C5) اینتراکلاست بیوکلاست گرینستون

ب)- (نمونه C28) بیوکلاست گرینستون

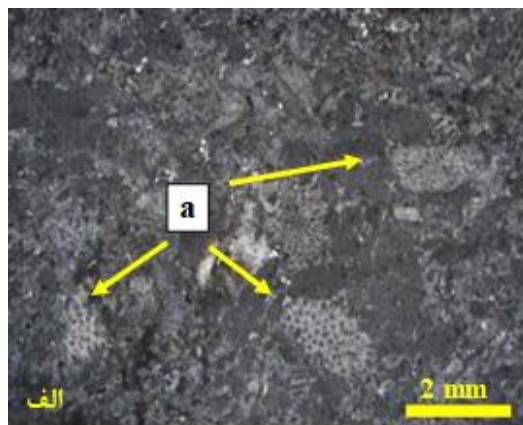


ج)- (نمونه C31) ایید اینتراکلاست گرینستون

شکل ۴-۱۰- ریزرخساره‌های سد

دریای باز (Open marine) D=

الف) - بیوکلاست بریوزوئتر پکستون: در این رخساره وجود بریوزوئتر فراوان حکایت از تشکیل این ریزرخساره در دریای باز دارد. در صحرا این رخساره در لایه آهکی نازک لایه کرم رنگ با میان لایه‌های نازک شیل دیده می‌شود (شکل ۴-۱۱).



شکل ۴-۱۱- ریزرخساره دریای باز

#### ۴-۲-۲ بررسی رخدادهای دیاژنز

فرایندهای دیاژنزی عمده در سازند تیرگان در منطقه مورد مطالعه شامل سیمانی شدن، انحلال، تراکم، شکستگی، استیلولیتی شدن می‌باشند. البته در این بررسی فشردگی، استیلولیتی شدن و انحلال مورد تاکید قرار گرفته‌اند و سعی شده روند هریک در ضخامت سازند و از پایین به بالا مورد بررسی قرارگیرد. انحلال و شکستگی در تراوایی نهایی سازند نقش ایفا کرده‌اند. گرچه بیشتر لیتولوژی سازند شوربجه از سنگ‌های آواری تشکیل شده است اما در بخش‌هایی از سازند تیرگان نیز حضور دانه‌های آواری قابل توجه است که مورد بررسی قرار گرفته است.

**سیمانی شدن:** در این مطالعه شش سیمان مورد شناسایی قرار گرفته است که شامل: سیمان رشته‌ای، سیمان موزائیک هم‌بعد، سیمان دروزی، سیمان پوئیکیلوتاپیک، سیمان بلوکی، سیمان رورشدی هستند. ( Tucker 2001, 1990). سیمانی شدن از مهم‌ترین، متنوع‌ترین و تاثیرگذارترین فرایندهای دیاژنز است. در سازند تیرگان، سیمان رشته‌ای هم ضخامت در ریزرخساره‌های مرتبط با زیر محیط سد کربناته مشاهده می‌شود. از

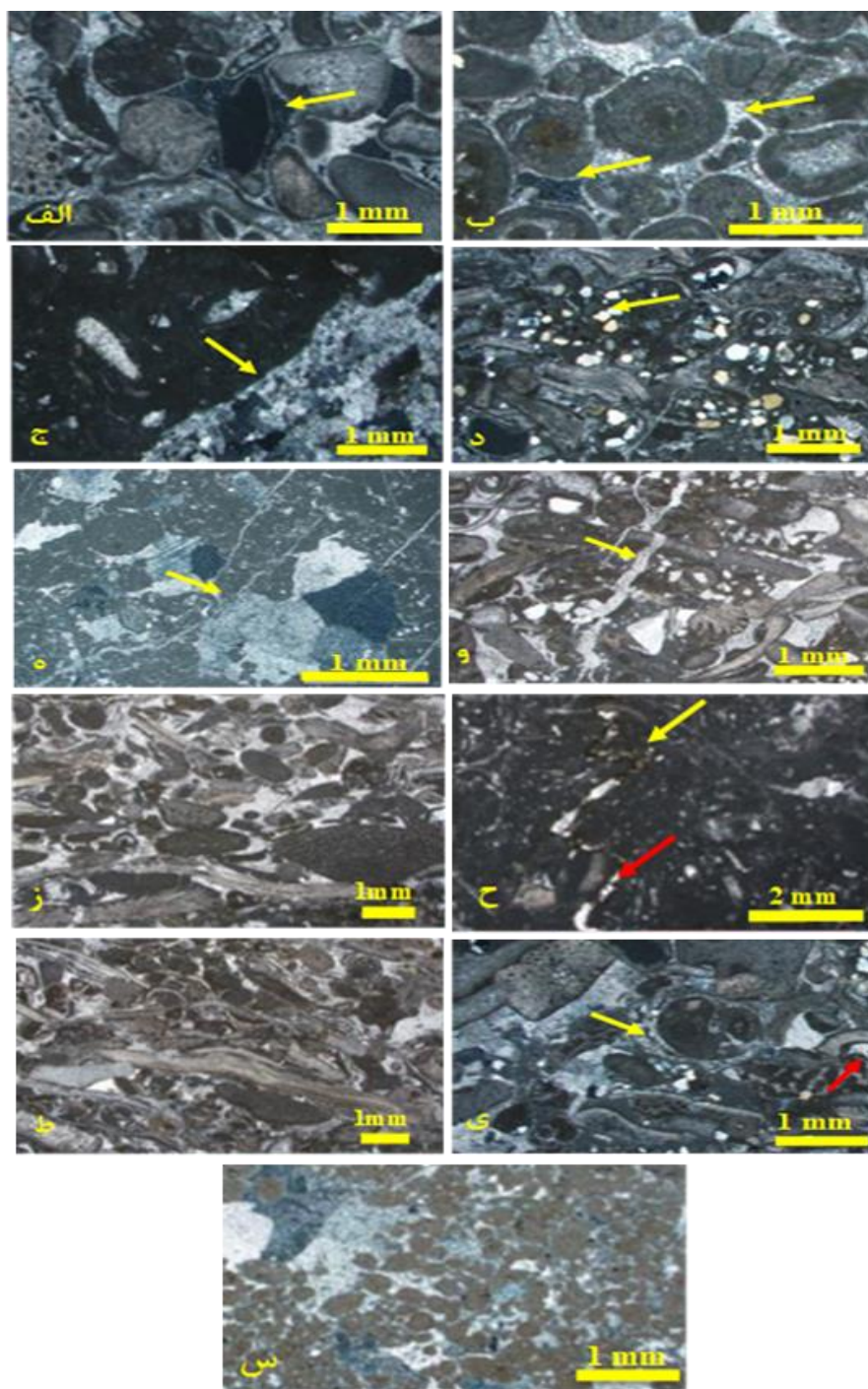
نظر اهمیت، این سیمان موجب حفظ فابریک اولیه سنگ و مقاومت آن در برابر فشارهای تراکمی بعدی و جلوگیری از کاهش تخلخل شده است؛ به طوری که در رخساره‌های گرینستونی که با این سیمان، سیمانی شده‌اند، کمترین کاهش تخلخل مشاهده می‌شود. سیمان‌های بلوکی و دروزی در توالی بررسی شده، تخلخل‌های بین دانه‌ای، حفره‌ای و شکستگی‌های موجود در ریزرخساره‌های محیط لاگون و سد کربناته را به طور کامل و ناقص پر کرده و سبب کاهش تخلخل این ریزرخساره‌ها شده‌اند (شکل ۴-۱۲).

**انحلال:** انحلال باعث ایجاد تخلخل‌های کانالی و انحلالی بین دانه‌ها می‌گردد. در امتداد استیلولیت‌ها و درزه‌های ایجاد شده این فرایند به صورت سیمان اسپارایتی صورت می‌گیرد. فرایند انحلال در سازند تیرگان وابسته به محیط‌های آب و هواشناسی است. انحلال در این سازند در هر دو رخساره گل و دانه پشتیبان دیده می‌شود. نتیجه انحلال در این سازند در آن بخش که به تراوایی مربوط می‌شود در میزان آبدهی چاه‌ها منعکس شده است.

**تراکم:** فشردگی فیزیکی باعث در هم فرورفتن، شکسته شدن آلوکم‌های شکننده مانده اییدها، صدف دوکفه‌ای‌ها و تغییر شکل آلوکم‌های نرم مانند پلویدها می‌شود. فشردگی به صورت همبری نقطه‌ای، طولی، محدب-مقعر و دندان‌دندانه دیده می‌شود. در ریزرخساره‌های مطالعه شده به صورت تراکم کم، تراکم متوسط، تراکم قوی و در انتها استیلولیتی شدن مورد بررسی قرار گرفته است. در تراکم کم دانه‌ها در تماس با یکدیگر نیستند و اکثر آنها حالت خود را حفظ کرده‌اند. در سازند تیرگان تراکم فیزیکی و شیمیایی تأثیر نسبتاً زیادی داشته است که می‌توان نتایج حاصل از این دو فرایند را در رخساره‌های مختلف مشاهده نمود. تراکم فیزیکی شیمیایی باعث ایجاد شرایط انحلال فشاری در رخساره‌های مورد مطالعه شده به طوری که موجب تشکیل استیلولیت‌ها و رگه‌های انحلالی در رخساره‌های پکستونی شده است. هم‌چنین کاهش ضخامت و از دست دادن تخلخل اولیه رخساره‌های مادستونی از نتایج آن می‌باشد. در رخساره‌های گرینستونی تراکم فیزیکی نسبتاً کم بوده است ولی در مواردی که فضای بین دانه‌ای فاقد سیمان بوده، تماس دانه به دانه ایجاد شده و نیز شکل دانه‌ها تغییر یافته است. در تراکم متوسط دانه‌ها در تماس با یکدیگر هستند و کمی هم ممکن است

در هم فرو رفته باشند اما حالت خود را حفظ کرده‌اند. در تراکم قوی دانه‌ها در هم فشرده شده حالت محدب-مقعر، شکسته شده دارند. این توصیف در طول ستون چینه‌شناسی نشان داده شده است. در توالی بررسی شده، تراکم فیزیکی سبب کاهش تخلخل و سخت شدن رسوبات اولیه شده است. از سویی شکستگی‌های ایجاد شده باعث ارتباط تخلخل‌های مختلف و افزایش تراوایی و گسترش کارست شده است. در مقایسه با دیگر فرایندهای دیاژنزی، تأثیر این فرایند بر تخلخل و تراوایی تا حد زیادی به محیط رسوب‌گذاری و فرایند دیاژنز سطحی وابسته است. تراکم شیمیایی با انحلال فشاری سبب تشکیل استیلولیت و رگچه‌های انحلالی در زمینه سنگ یا مرز بین دانه‌ها شده است. یکی از دلایل افزایش میزان تراوایی در بعضی رخساره‌های لاگونی، گسترش استیلولیت در آنهاست. آثار اکسیدهای آهن در لابلای استیلولیت‌ها، شواهدی برای توجیه نقش آنها در عبور سیالات دیاژنزی و تدفینی است. فرایند انحلال به تشکیل انواع تخلخل‌های ثانویه کانالی، حفرات مرتبط به هم و استیلولیتی در ریزرخساره‌های مختلف از توالی مطالعه شده منجر شده است؛ بنا بر این انحلال از فرایندهای افزاینده تخلخل و کارست در سازند تیرگان است (شکل ۴-۱۲). فشردگی شیمیایی نیاز به ژرفای بیشتری دارد بیشتر از چند صد متر. ایجاد استیلولیت و درزه‌های انحلالی مهم‌ترین پدیده‌های ناشی از فشردگی شیمیایی هستند (Jennings 1971). یکی از نشانه‌های دیاژنز دفنی استیلولیت است (Choquette, P. W. and N.P. James 1987, 1999). در ریزرخساره‌های سازند تیرگان گرچه استیلولیت فراوان دیده می‌شود اما در بخش‌های بالایی به شدت کمتر شده است (شکل ۴-۱۲).

**شکستگی:** شکستگی‌ها عمده‌ترین نوع تخلخل در بسیاری از سنگ‌های کارستی است و تأثیر زیادی در ایجاد تخلخل ثانویه و افزایش تراوایی دارند. برخی شکستگی‌ها در هر دو رخساره گل‌پشتیبان و دانه‌پشتیبان در مطالعات سازند تیرگان توسط سیمان پر شده‌اند و برخی از آنها باز هستند و به عنوان یک گذرگاه مناسب برای عبور سیال‌ها می‌باشند (شکل ۴-۱۲ ح).



الف) - (نمونه B3) سیمان رورشدی، ب) - (نمونه C9) سیمان حاشیه‌ای در اطراف الیید، ج) - (نمونه C33) سیمان هم‌بعد، د) - (نمونه D25) فشردگی بالا و ذرات ماسه کوارتزی، ه) - (نمونه C11) سیمان بلوکی، و) - (نمونه D25) سیمان پرکننده شکستگی، ز) - (نمونه B2) سیمان تشکیل دهنده اسپارایتی، ح) - (نمونه D9) استیلولیت. انحلال (فلش قرمز)، ط) - (نمونه C31). فشردگی بالا ذرات و شکسته شده، ی) - (نمونه D22) سیمان دروزی، س) - (نمونه D10) سیمان پویکیلو تاپیک

شکل ۴-۱۲- سیمان و فرایندهای دیاژنزی

**ذرات تخریبی و اهمیت آن:** وجود درصد کمی از تشکیل دهنده‌های غیر قابل حل، مانند کانیهای رسی و سیلیکاته به میزان قابل ملاحظه‌ای قابلیت کارستی شدن سنگ‌های کربناته را کاهش می‌دهد. اگر میزان رس و سیلت بیشتر از ۲۰ تا ۳۰ درصد باشد، از توسعه کارست جلوگیری می‌کند. کربناتهای با خلوص بیشتر از ۷۰ درصد مناسب‌ترین سنگ‌ها برای توسعه کارست است. بررسی تأثیر ویژگی‌های سنگ‌شناسی بر توسعه سیمای کارستی در واحدهای سنگی سازند تیرگان نشان می‌دهد که میزان ناخالصی ریزرخساره‌های ساحل زیاد بوده و کربناتها دارای خلوص نسبتاً بالایی از نظر میزان کربنات کلسیم نمی‌باشند. بنا بر این شرایط مناسب ترکیب سنگی برای انحلال و توسعه فرآیندهای کارستی در این ریزرخساره‌ها وجود ندارد.

با بررسی ریزرخساره‌ها به وضوح از میزان دانه‌های تخریبی سازند تیرگان از پایین به بالا کاسته می‌شود. وجود کوارتز بین ۱۰ تا ۳۰ درصد در بخش‌های پایینی سازند تخمین زده شده است. چینه‌بندی متقاطع در سازند شوريجه و بخش پایینی سازند تیرگان (سندی‌الایید گرینستون) و رخساره گرینستونی با حضور هسته کوارتز در الایدها و متن سنگ نشان از آن دارد که مواد تخریبی در زمان ته نشست کربناتها وارد حوضه شده‌اند. با بالا آمدن سطح آب دریا ورود مواد تخریبی کاهش پیدا کرده است. با کاهش ورود مواد تخریبی، در بخش بالایی سازند تیرگان با ته‌نشست ریزرخساره‌های سد و حاشیه سد میزان رسوب‌گذاری آهک بسیار بیشتر شده و سبب تشکیل آهک‌های ضخیم لایه شده است.

در توسعه کارست یکی از شرایط مهم این است که سنگ‌های آهکی از ضخامت کافی برخوردار باشند. در منطقه مورد نظر، لایه‌های بخش بالایی سازند تیرگان که در محیط پر انرژی سد نهشته شده‌اند، حالت توده‌ای داشته و وجود درزه‌ها شرایط مناسب را جهت نفوذ آب در لایه‌های سنگ‌ها فراهم می‌کنند و آبهای ناشی از بارش می‌توانند از این درزه‌ها و شکافها استفاده نموده و عمل انحلال را بهتر و سریعتر انجام دهند. ضخامت زیاد سنگ آهک‌های بخش بالایی توالی که حالت ضخیم‌لایه داشته عاملی مثبت در جهت توسعه اشکال کارستی می‌باشد.

#### ۴-۲-۳ ارزیابی محیط رسوبی سازند تیرگان

بر اساس اطلاعات به دست آمده از بررسی ریزرخساره‌ها، سازند تیرگان در یک رمپ هموکلینال و چهار کمر بند رخصاره‌ای نهشته شده است. در ابتدای سازند تیرگان لایه آهکی پایینی در پلاتفرم کربناته کم عمق نهشته شده است. این واحد آهکی با یک واحد سنگی مارنی و عمیق تر شدن حوضه مواجه بوده و ورود رس بسیار بیشتر شده است و در واقع پلاتفرم به بخش عمیق تر تبدیل شده و پیامد این واقعه عدم رسوبگذاری آهک است. البته وجود میان لایه‌های آهکی نشان از بالا و پایین رفتن سطح آب دریا و تبدیل شدن موقتی دریا به پلاتفرم آهکی است. این توالی تا انتهای تشکیل سازند تیرگان هم‌چنان در طول کرتاسه زیرین ادامه داشته است و عمیق تر شدن دریا دو بار اتفاق افتاده است.

هم‌زمان با رخداد پیش گفته چند اتفاق دیگر که تاثیر مستقیم در پتانسیل توسعه واحدهای سنگی آهکی به عنوان کارست موثر بوده‌اند نیز رخ داده است. حضور مواد تخریبی به ویژه وجود کواتز یک ناخالصی مهم در بخش زیرین سازند تیرگان و واحد سنگی پایینی می‌باشد. میزان حضور کواتز بین ۲۰ تا ۳۰ درصد در ریزرخساره‌ها به چشم می‌خورد. طبیعتاً در حضور مواد تخریبی درجه انحلال آهک پایین خواهد بود. از طرفی بر روی این واحد آهکی یک لایه مارنی قرار گرفته است که نفوذ ناپذیر است و در عملکرد سایر وقایع دیاژنز جوی و ایجاد تخلخل مانعی جدی بوده است. محیط رسوبی ساحلی و حضور لایه‌های نازک شیلی و رسی که در ریزرخساره‌ها به صورت ترک گلی مشاهده می‌شود نیز عامل دیگری در کاهش گردش آب و انحلال بعدی است. وجود کواتز در این بخش باعث بوجود آمدن ساخت چینه‌بندی متقاطع شده است. تنوع فسیلی در آن کم بوده و شرایط برای تنوع یافتن موجودات نامناسب بوده است.

در مراحل بعدی و به سمت بالای سازند از ورود مواد تخریبی به ویژه کواتز به پلاتفرم آهکی بسیار کاسته شده که در ریزرخساره‌های آهکی کواتز دیده نمی‌شود. این میزان در بخش میانی به ۱۰ تا ۱۵ درصد و در بخش‌های انتهایی به کمتر از ۵ درصد می‌رسد.

وجود استیلولیت در ریزرخساره‌ها و مشاهده صحرایی نشان از عمق تدفینی بالا دارد و به موازات آن هم‌چنین میزان فشردگی و درهم‌فرورفتگی آلوکم‌ها نیز عامل دیگری در کاهش تخلخل در بخش‌های پایینی سازند

است. تنوع موجودات سنگ ساز هم از بخش‌های پایینی به بالا افزایش می‌یابد. از این رو سرعت و آهنگ تولید کربنات به سمت بالا بسیار افزایش یافته است. این شرایط با حضور فراوان اوربیتولین و خرده‌های جلبک و سایر موجودات سنگ‌ساز در رخساره‌ها تقویت شده است. هرچه سرعت رسوبگذاری بیشتر شده ضخیم‌تر شدن آهک‌ها را در پی داشته است. رشد مناسب ترسیب کربنات و سرعت تشکیل آن از سویی باعث کاهش شرایط فشردگی نیز شده است. تقویت شرایط گفته شده به همراه یکدیگر از سمت زیرین سازند به سمت بالا باعث شکل‌گیری آهک ضخیم لایه با فشردگی کمتر و خالص‌تر شده است.

البته به نقش لایه‌های مارنی نفوذ ناپذیر هم بایستی توجه نمود، درست است که پتانسیل توسعه کارست در خلوص آهک‌ها نهفته است اما لایه‌های مارنی اصولاً امکان گردش آب به عنوان سیال اصلی ایجاد انحلال را بسیار کاهش داده‌اند که این ممانعت هنوز ادامه دارد.

بررسی تغییرات جانبی محیط رسوبی در کل منطقه مورد مطالعه که اثرات آن در چینه‌شناسی منعکس شده است نشان می‌دهد در داخل منطقه مورد مطالعه نیز تغییراتی به صورت جانبی در سازند تیرگان اتفاق افتاده است. از برش باباموسی به سمت شرق و در منطقه پتروشیمی به نظر می‌رسد تغییرات زیادی اتفاق نیفتاده است. اما به سمت شمال شرق و در اطراف روستای نجف‌آباد بخش بالایی سازند تیرگان در کوه بابلند و در یک تاقدیس بزرگ نمایان است. بخش میانی و زیرین به وسیله گسل قطع شده است. در این منطقه آهک بخش بالایی دارای ضخامت بالایی است. لایه‌های آهکی فسیل فراوان دارند که شامل اوربیتولین و دوکفه‌ای‌ها می‌شوند و به راحتی با چشم قابل مشاهده‌اند. این موضوع نشان دهنده تنوع در رشد موجودات سنگ‌ساز است. چاه‌های پر آب نجف‌آباد در جنوب این لایه‌ها حفاری شده‌اند. در سمت مرکز منطقه و در یال ناودیزی که دشت گرمخان بر روی آن بنا شده نیز بازدیدهای صحرایی نشان می‌دهد شرایط برش باباموسی تا حدی حفظ شده است. شکل ۴-۱۳ محیط رسوبی ریزرخساره‌ها و برخی فرایندهای دیاژنز در سازند تیرگان را نشان می‌دهد.

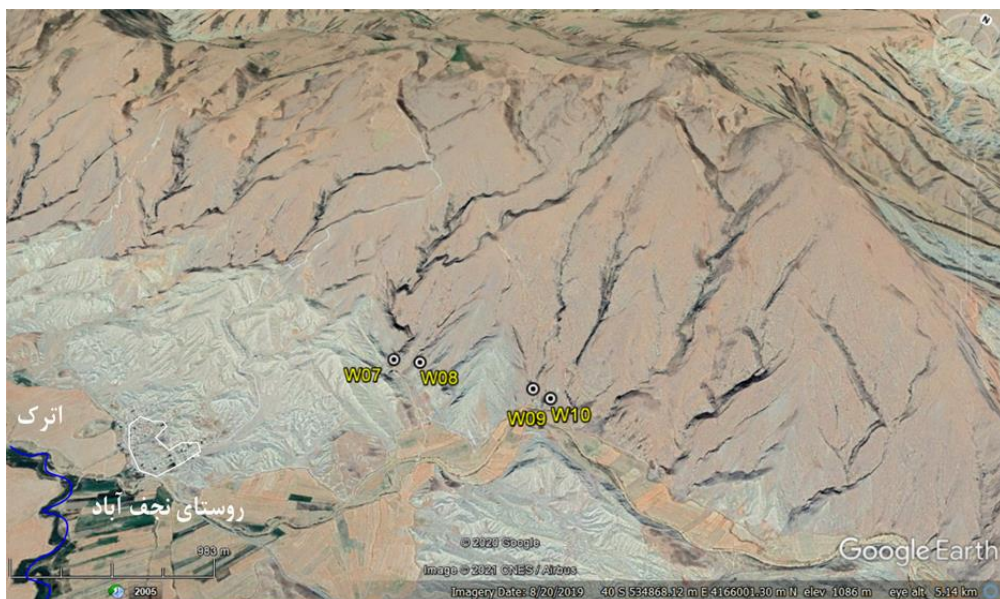


#### ۴-۳- بررسی عوارض کارستی و خصوصیات سیستم ورودی در سازند تیرگان

در منطقه مورد مطالعه و در سازند تیرگان عوارض مورفولوژیکی با مقیاس‌های مختلف وجود دارند که طی بازدیدهای صحرایی مورد بررسی قرار گرفت. پراکندگی این عوارض در هر منطقه محدود است دلیل آن هم به شرایط لیتولوژی تیرگان، شرایط ساختاری و عملکرد آنها و نقش سازندهای سنگانه و به ویژه سازند سرچشمه به عنوان پوشش سازند تیرگان و مانع در نفوذ و گردش آب برمی‌گردد. به طور عمومی در مناطقی که سازند سرچشمه به دلیل فرسایش و مخصوصا در یال‌های تاقدیس‌ها از بین رفته است عوارض مورفولوژیکی کارست به خوبی دیده می‌شوند. همچنین در مناطقی که سازند تیرگان به سبب چین‌خوردگی یا گسلش دارای رخنمون است این عوارض قابل مطالعه است. علاوه بر بررسی این عوارض به عنوان نمایه‌ای از توسعه کارست، تاثیر نسبی آنها بر سیستم ورودی و تغذیه سازند تیرگان هم مورد بررسی قرار گرفته است. این مناطق شامل شمال شرق منطقه، شرق تاقدیس کوه باباموسی و جنوب شرق منطقه مورد مطالعه می‌شوند. سیمای مهم مورفولوژیکی کارست در منطقه مورد مطالعه شامل: کارنها، گرایک‌ها، غارها، فروچاله، دره‌های خشک، حفرات بزرگ انحلالی و لایه‌بندی ضخیم هستند.

#### ۴-۳-۱ عوارض کارستی سازند تیرگان

در سمت شمال شرق منطقه و در تاقدیس بابابلند که یک تاقدیس بزرگ با روند شرق غربی است و دامنه شرقی آن با یک گسل راندگی به نام گسل شیخ قطع شده و سازند سرچشمه را بر روی سازند تیرگان رانده است. در دامنه جنوبی این تاقدیس دره‌های خشک بزرگی دیده می‌شوند که تقریبا به موازات هم قرار دارند. این دره‌ها دامنه‌هایی با شیب تند دارند و عبور از آنها بسیار مشکل است. عمق دره‌ها گاهی تا ۷۰ متر نیز می‌رسد. البته عمیق‌ترین دره از این نوع دره قزلقان است که بیش از ۲۰۰ متر عمق دارد و در اثر گسل عمیق‌تر شده است (شکل ۴-۱۴).



شکل ۴-۱۴- موفولوژی دره‌های خشک. در تاقدیس بابابلند

چاه‌های پر آب منطقه نجف‌آباد در جنوب این دره‌ها حفر شده‌اند. دره قزلقان وظیفه تخلیه تمام آبهای سطحی خروجی بالادست خود را به عهده دارد. در شکل ۴-۱۵ یکی از چاه‌های نجف‌آباد در انتهای دره‌های عمیق دیده می‌شود.



شکل ۴-۱۵- مورفولوژی دره خشک نمای نزدیک. در تاقدیس بابابلند

در جنوب غربی منطقه و یال شرقی تاقدیس نزدیک روستای عبدالآباد (شرق کوه باباموسی) این دره‌های خشک فراوان هستند. از دیگر عوارض نسبتاً بزرگ مورفولوژیکی و معروف کارست فروچاله‌ها هستند. ساده‌ترین گودی‌های مسدود در مناطق کارستی فروچاله‌ها هستند (Jennings 1971) که در جنوب و جنوب شرق منطقه از فاصله نسبتاً دور قابل رویت‌اند. این فروچاله‌ها در این منطقه محدود به بخش بالایی سازند تیرگان هستند. در این منطقه و در کنار فروچاله‌های نسبتاً بزرگ دره‌های خشک نیز به چشم می‌خورند و به نظر می‌رسد این دره‌ها نتیجه فروریزش و توسعه این فروچاله‌ها باشند. پوشش خاک بر روی این واحدهای سنگی بسیار ناچیز است و نفوذ نزولات جوی به شکل مناسبی از طریق این فروچاله‌ها صورت می‌گیرد. بر اساس نظر فورد و ویلیامز (Ford, & Williams P W. 1989) این فروچاله‌ها از نوع انحلالی هستند.

شایان ذکر است که رودخانه اترک در نزدیکی این فروچاله‌ها دارای دبی پایه می‌شود و در واقع در طول محور اصلی اترک و در خروجی دشت شیروان اولین نقطه ظهور آب در این منطقه است. به نظر می‌سد زهکشی و تراوش در بستر رودخانه اترک با این فروچاله‌ها ارتباط دارد. شیب تاقدیس محلی و لایه‌بندی آهک نیز به سمت رودخانه است. این مسئله نیاز به مطالعه بیشتر دارد. انواع فروچاله‌ها و دره‌های خشک در این منطقه در تصویر دیده می‌شود (شکل ۴-۱۶).



شکل ۴-۱۶- فروچاله‌ها به همراه دره‌های خشک

با بررسی و بازدید در امتداد دره‌های خشک که سازند تیرگان را قطع کرده‌اند، می‌توان برخی از دیگر عوارض مورفولوژیکی مانند غارها و حفرات انحلالی را هم به وفور مشاهده کرد. طبیعتاً در مناطقی که لایه‌های آهکی ضخیم هستند این عوارض بیشتر دیده می‌شوند. این مناطق شامل دره قزلقان، دره‌های منتهی به چاه‌های نجف‌آباد هستند. این سیمای مورفولوژی تا حد زیادی در کنترل لایه‌بندی و چینه‌شناسی است. این عوارض در بخش‌های بالایی سازند تیرگان دیده می‌شود (شکل ۴-۱۷).



شکل ۴-۱۷- حفرات انحلالی در لایه‌های ضخیم آهکی

سیمای مورفولوژیکی لایه‌بندی از ضخیم لایه تا نازک لایه عمومی‌ترین سیمای مورفولوژیکی کارست در سازند تیرگان است. در نگاه اول سازند آهکی تیرگان در این منطقه به صورت لایه لایه دیده می‌شود جدا از توالی رسوبی و تناوب آهک و مارن لایه‌هایی که خود نسبتاً از آهک تشکیل شده‌اند نیز لایه‌لایه هستند. با این تفاوت که ضخامت این لایه‌ها به صورت چشم‌گیری در این منطقه و به سمت بالای سازند ضخیم‌تر می‌شوند در بخشی از برش اندازه‌گیری شده ضخامت به بیش از ۲۳ متر می‌رسد که با لایه نازک مارنی یا شیلی از بقیه لایه‌ها جدا می‌شود (شکل ۴-۱۸).



شکل ۴-۱۸- مورفولوژی لایه‌بندی سازند تیرگان در منطقه مورد مطالعه

در مناطقی که سطح بالایی سازند تیرگان برونزد دارد از جمله در کوه بابابند گرایک و کارن مشهود است. گرایک‌ها که در اثر عملکرد گسل‌ها و در امتداد درز و شکستگی‌ها ایجاد شده‌اند گاهی تا چند ده متر طول و چند متر عمق ادامه دارند به طوریکه تا سطح لایه‌بندی بعدی نفوذ کرده‌اند. در برش‌های عرضی از سازند تیرگان که یال‌های برش خورده یا گسل خورده از این سازند هستند می‌توان اثرات این گرایک‌ها را دنبال کرد (شکل ۴-۱۹).



شکل ۴-۱۹- گرایک و کارن در سازند تیرگان

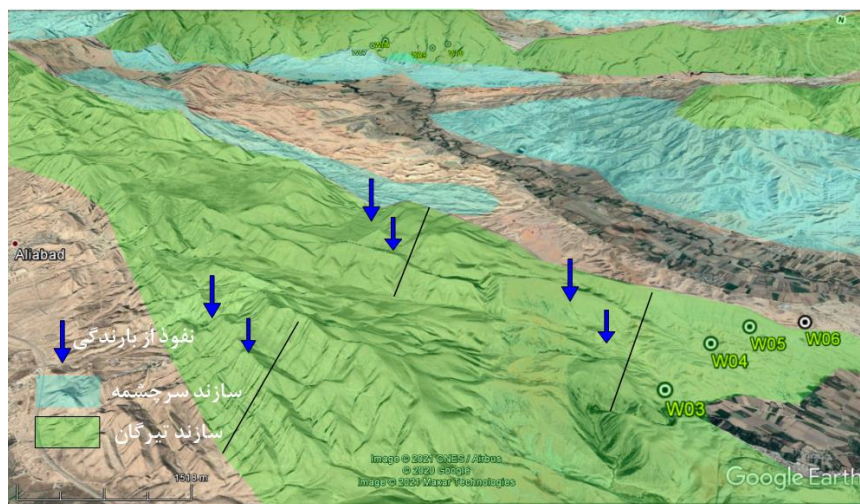
کارنها اشکال انحلالی هستند که از ۲ تا ۴ متر طول و ۰/۱ تا ۱ متر طول دارند (Milanović 2004). این اشکال در سطوح لایه‌بندی به فراوانی و در همه واحدهای آهکی سازند تیرگان دیده می‌شوند. در یال تاقدیس بابابلند و در ارتفاعات منتهی به روستای نجف‌آباد و در یال شرقی تاقدیس شمال روستای قارلق این مورفولوژی بیشتر به چشم می‌خورد. گرچه واحد سنگی آهک بالایی دارای مورفولوژی کارست نسبتاً پیشرفته است، اما سایر واحدهای سنگی آهکی سازند تیرگان با اینکه ویژگی‌های واحد آهک بالایی را ندارند مانند ضخامت بالا، خلوص بالاتر، فشردگی کمتر و... اما چون تنها واحد آهک بالایی به سبب موقعیت چینه‌شناسی در برابر انحلال قرار گرفته در آن سیمای کارست بیشتر توسعه یافته است. سایر واحدهای آهکی سازند تیرگان اساساً به سبب موقعیت چینه‌شناسی در بین لایه‌های مارنی غیر قابل نفوذ قرار گرفته و در برابر انحلال طولانی قرار نداشته‌اند.

#### ۴-۳-۲ ارزیابی نوع نفوذ در سازند تیرگان

تغذیه سازند تیرگان از نظر مقدار و توزیع مکانی بستگی به توپوگرافی، پوشش گیاهی و پوشش خاک و پراکندگی و نوع عوارض کارستی دارد. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته در منطقه مورد مطالعه و توجه به وضعیت تکتونیکی و ساختاری آن به‌ویژه چین خوردگی، گسلش و سیستم درزه‌ها می‌توان سه نوع مکانیزم

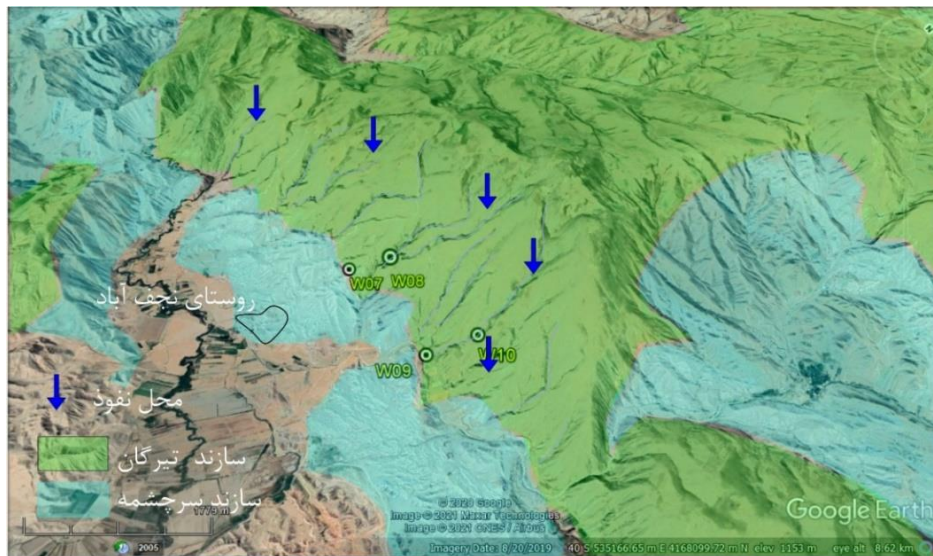
نفوذ را در سازند تیرگان برشمرد. ۱- نفوذ از طریق درز و شکاف‌های برش عرضی سازند تیرگان. نفوذ از راه عوارض کارستی شامل: ۲- نفوذ از طریق دره‌های خشک و سیستم درزه و شکاف و گسل‌های مرتبط با آنها ۳- نفوذ از طریق فروچاله‌ها. البته هر سه این نوع نفوذ از نوع درجازا و اتوژنیک هستند.

بر اساس سه زون‌بندی مطالعه چاه‌ها که شامل: چاه‌های منطقه پتروشیمی، چاه‌های منطقه قارلق و چاه‌های منطقه نجف‌آباد می‌شوند، در چاه‌های پتروشیمی و قارلق نفوذ از طریق برش عرضی سازند صورت می‌گیرد. به طوریکه برش لایه‌بندی سازند در این مناطق رخنمون شده است و سازند تیرگان به صورت مستقیم در معرض نفوذ آب باران و برف قرار می‌گیرد. شکل ۴-۱۵ تصویر ماهواره‌ای از محل این چاه‌ها را نشان می‌دهد. ناگفته نماند که در مناطقی که بر روی سازند تیرگان سازند سرچشمه قرار دارد اصولاً نفوذ بسیار ناچیز خواهد بود.



شکل ۴-۲۰- نفوذ مستقیم در برش عرضی سازند تیرگان

در چاه‌های منطقه نجف‌آباد نفوذ بیشتر از طریق دره‌های خشک که بر سطح لایه‌بندی و به‌ویژه واحد آهکی بالایی قرار گرفته‌اند صورت می‌گیرد. در این منطقه که در کوه بابابلند واقع شده و خود تاق‌دیسی‌ست مرتفع، نفوذ از طریق گرایک‌های عمیق هم صورت می‌گیرد البته این گرایک‌ها در ستیغ تاق‌دیس از خاک پوشیده شده اما در یال‌ها که شیب مناسب بوده و پوشش خاک شسته شده نفوذ بهتر صورت می‌گیرد. بنا بر این می‌توان نفوذ از طریق دره‌های خشک که بدون پوشش خاک هستند را بسیار پر اهمیت دانست (شکل ۴-۲۱).



شکل ۴-۲۱- تغذیه از طریق دره‌های خشک در شمال شرق منطقه

نوع دیگر نفوذ از طریق فروچاله‌هاست که در جنوب شرق منطقه گسترش بیشتری دارند. این فروچاله‌ها در سطح لایه ضخیم آهک بالایی به روشنی قابل مشاهده هستند. برخی از آنها کشیده و برخی دایره‌ای هستند. به احتمال زیاد در این منطقه دره‌های خشک منطبق بر این فروچاله‌ها شکل گرفته باشند (شکل ۴-۲۲).



شکل ۴-۲۲- نفوذ از طریق فروچاله‌ها و دره‌های خشک

در بین انواع نفوذ و نظر به ویژگی‌های سنگ‌شناسی واحدهای آهکی سازند تیرگان، شرایط ساختاری و به‌ویژه چین خوردگی و تاثیر سازند سرچشمه، با اهمیت‌ترین و موثرترین آنها نفوذ از طریق دره‌های خشک و فروچاله‌ها می‌باشد. در مناطق شمال شرق و جنوب شرق منطقه مورد مطالعه پوشش خاک بر روی سازند تیرگان از بین رفته است. بنا بر این در این مناطق بارش‌ها با کمترین تلفات ناشی از تبخیر و یا نفوذ در خاک و تبخیرهای بعدی، از طریق عوارض کارستی به سازند تیرگان نفوذ می‌نماید. دو دلیل عمده ایجاد این وضعیت مناسب یال‌های تاقدیس‌ها و دیگری فرسایش سازند سرچشمه می‌باشد. در بخش شمال شرق و در یال جنوبی تاقدیس بابابلند که به سمت جنوب شیب دارد و ارتفاع بسیار زیاد این تاقدیس باعث می‌شود بارندگی در ارتفاعات این تاقدیس از طریق دره‌های خشک و گرایک‌های بدون پوشش خاک وارد سازند تیرگان شود. در مناطق جنوب شرق و از طریق یال تاقدیس‌های موجود که از سازند سرچشمه عاری هستند نفوذ از طریق فروچاله‌ها و دره‌های خشک صورت می‌گیرد. منطقه مورد مطالعه را می‌توان به سه بخش از لحاظ نفوذ تفکیک نمود منطقه پتروشیمی با نفوذ کم، منطقه قارلق با نفوذ متوسط و منطقه نجف‌آباد با نفوذ بالا. پیامد این نفوذ را می‌توان در آبدهی چاه‌ها در کنار سایر عوامل موثر مشاهده کرد. چاه‌های منطقه نجف‌آباد بیشترین آبدهی و بعد از آن منطقه قارلق و در آخر منطقه پتروشیمی قرار دارند (جدول ۴-۱).

جدول ۴-۱- انواع نفوذ و ارتباط آنها با محل حفر چاه‌ها

| شماره چاه‌ها                | نام منطقه           | محل نفوذ | پوشش خاک                      | نوع نفوذ                                  |
|-----------------------------|---------------------|----------|-------------------------------|-------------------------------------------|
| W01, W02                    | شمال پتروشیمی       | عرض لایه | متوسط (۲۰-۳۰ سانتی‌متر)       | درز و شکستگی                              |
| W03, W04<br>W04, W05<br>W06 | چاه‌های منطقه قارلق | عرض لایه | کم (۱۰-۲۰ سانتی‌متر)<br>ناچیز | درز و شکستگی                              |
| W07, W08<br>W09, W10        | چاه‌های نجف‌آباد    | سطح لایه | ناچیز - سنگ برهنه             | دره‌های خشک                               |
| ————                        | جنوب شرق منطقه      | سطح لایه | ناچیز - سنگ برهنه             | دره‌های خشک، حفرات<br>انحلالی، فروچاله‌ها |

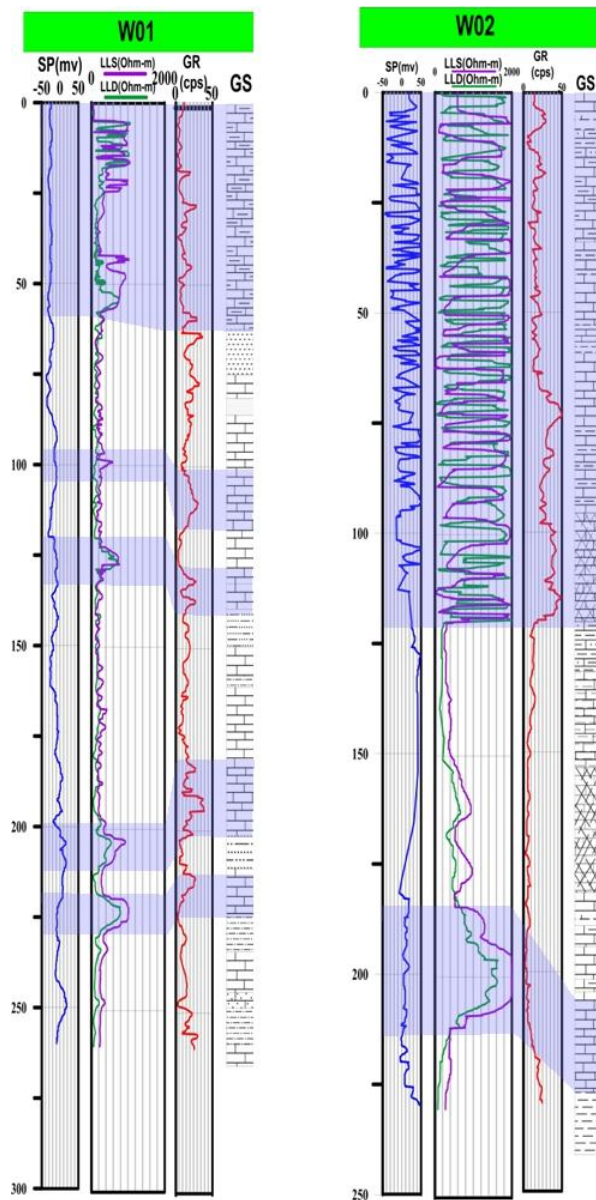
#### ۴-۴ بررسی لاگ‌های ژئوفیزیکی چاه‌های حفاری شده در سازند تیرگان

همانند پمپاژ، چاه‌های منطقه در سه زون شامل چاه‌های پتروشیمی، چاه‌های منطقه قارلق و چاه‌های منطقه نجف‌آباد تقسیم‌بندی شده‌اند. بررسی لاگ‌ها با توجه به سایر ویژگی‌های لیتولوژی و تعمیم آنها صورت گرفته است. از بررسی لاگ‌ها برای تعیین لیتولوژی، برآورد رس به عنوان ناخالصی، مناطق خرد شده و دارای درز و شکاف، زون‌بندی و تطابق محلی و در انتها برآورد تراوایی استفاده شده است.

##### الف- چاه‌های پتروشیمی (A)

چاه شماره W01 و W02 در منطقه شمال سایت پتروشیمی حفر شده‌اند. عمق هریک به ترتیب ۲۵۰ و ۲۰۱ متر است. در این منطقه ناودیس بزرگی که در محور آن رودخانه اترک جریان دارد وجود دارد که سازند سرچشمه و سازند تیرگان به خوبی گسترش دارد. در یال شرقی آن که دارای شیب بسیار تندی است، سازند تیرگان برونزد بسیار خوبی دارد. البته کمی تغییر رخساره نسبت به برش باباموسی اتفاق افتاده است و لایه‌بندی نازک‌تر است.

افزایش لاگ گامای طبیعی و مقاومت به صورت عکس با یکدیگر در کل چاه W01 تا عمق ۱۲۵ متری قابل مشاهده است. مشابه این در چاه W02 تا عمق ۶۰ متری دیده می‌شود. در چاه W01 از عمق ۱۵۰ متری تا ۱۷۵ متری مقاومت افزایش می‌یابد در حالیکه نمودار گاما تقریباً ثابت است. مقاومت در عمق ۲۰۰ متر به حداکثر می‌رسد و گاما ثابت است. بعد از این عمق، مقاومت به شدت کاهش می‌یابد و نمودار گاما افزایش نشان می‌دهد (شکل ۴-۲۳).

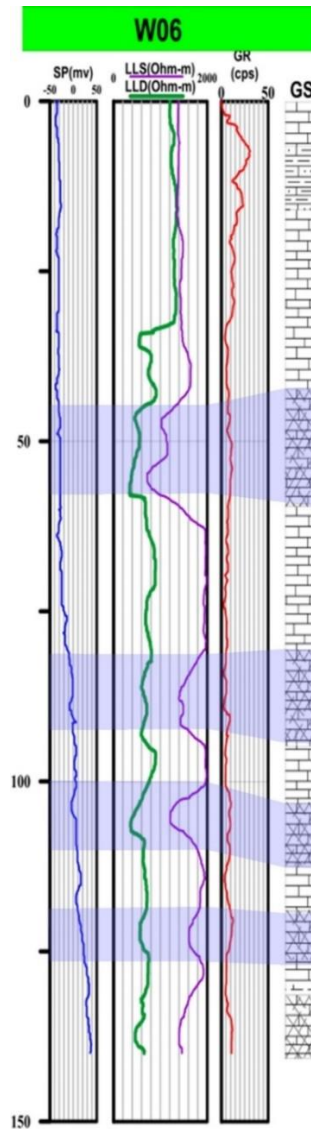


شکل ۴-۲۳- لاگ‌ها چاه‌های پتروشیمی

#### ب- چاه‌های منطقه قارلق (B)

گرچه در این زون چهار حلقه چاه حفاری شده‌اند اما فقط یک حلقه دارای لاگ‌های ژئوفیزیک است. این چاه تا عمق حدود ۲۰ متری افزایش گاما دیده می‌شود و تا عمق حدود ۱۵۰ متری خط شیل تغییر محسوسی ندارد. تغییرات اصلی در لاگ مقاومت مشاهده می‌شود در حدود ۵۰ متری کاهش مقاومت همراه با ثبات خط شیل مشاهده می‌شود. مجدداً در عمق حدود ۷۵ متری افزایش مقاومت وجود دارد. در حدود عمق ۱۰۵ متری

مجدداً کاهش مقاومت و بعد از آن افزایش مقاومت تا انتهای چاه ادامه دارد. ذکر این نکته لازم است که انحرافهای لاگ مقاومت تا حد زیادی در لاگ زمین‌شناسی تایید می‌شود (شکل ۴-۲۴).

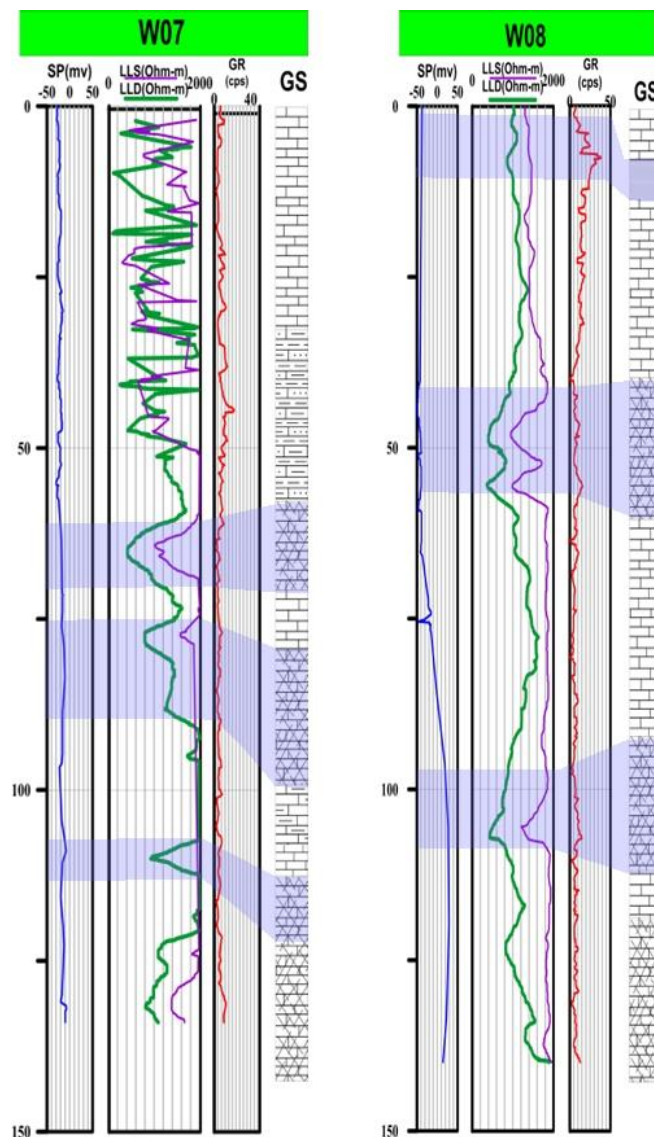


شکل ۴-۲۴- لاگ ژئوفیزیک در منطقه قارلق

### ج- چاه‌های نجف‌آباد یک (C):

در منطقه نجف‌آباد هر چهار حلقه چاه دارای لاگ ژئوفیزیک هستند. در چاه W07 تا عمق ۵۰ متر در لاگ مقاومت اعوجاج مشاهده می‌شود که متناسب با آن در لاگ شیل انحرافات مشاهده نمی‌شود. گرچه چاه بر روی سازند سرچشمه حفاری شده است اما ضخامت آن کم است. در این چاه بیشترین مقدار مقاومت دیده می‌شود و در اعماقی که مقاومت کاهش دارد (حدود ۶۰ متری و ۷۰ و ۱۰۰ متری) و با ثابت ماندن لاگ گاما

مقاومت کاهش می‌یابد. در چاه W08 شرایط مانند چاه W07 است با کمی تفاوت در میزان مقاومت که کمتر می‌شود و در عوض میزان گاما کمی افزایش دارد (شکل ۴-۲۵).

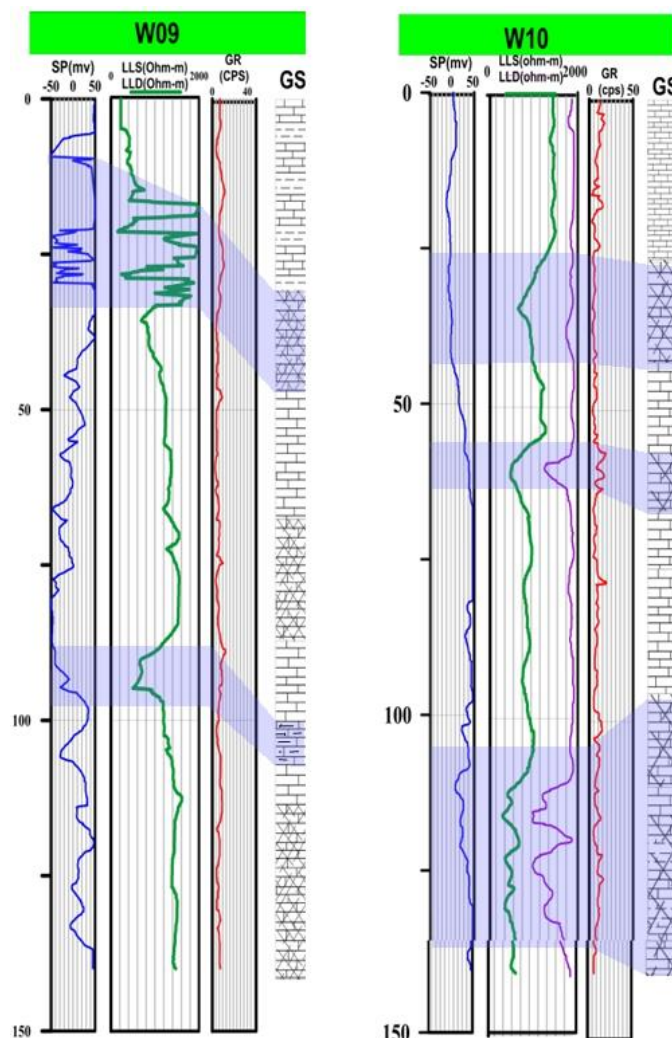


شکل ۴-۲۵- لاگ ژئوفیزیک چاه‌های W08, W09

#### ج- چاه‌های نجف‌آباد دو (D):

دو حلقه چاه W09 و W10 در فاصله حدود ۲/۵ کیلومتری دو چاه W07 و W08 حفر شده‌اند. چینه‌شناسی تیرگان در دو منطقه به ظاهر بسیار شبیه هستند. در این دو چاه نسبت به دو چاه منطقه یک در میزان مقاومت کاهش مشاهده می‌شود. هم‌چنین لاگ گاما انحراف‌های بیشتری به سمت شیل دارد. در اعماق ۱۵

تا ۲۵ متری مقاومت بیشتر کاهش نشان می‌دهد. در عمق حدود ۸۰ متری کاهش مقاومت دیده می‌شود. در چاه W10 میزان مقاومت نسبت به چاه قبلی نیز کمتر است (شکل ۴-۲۶).



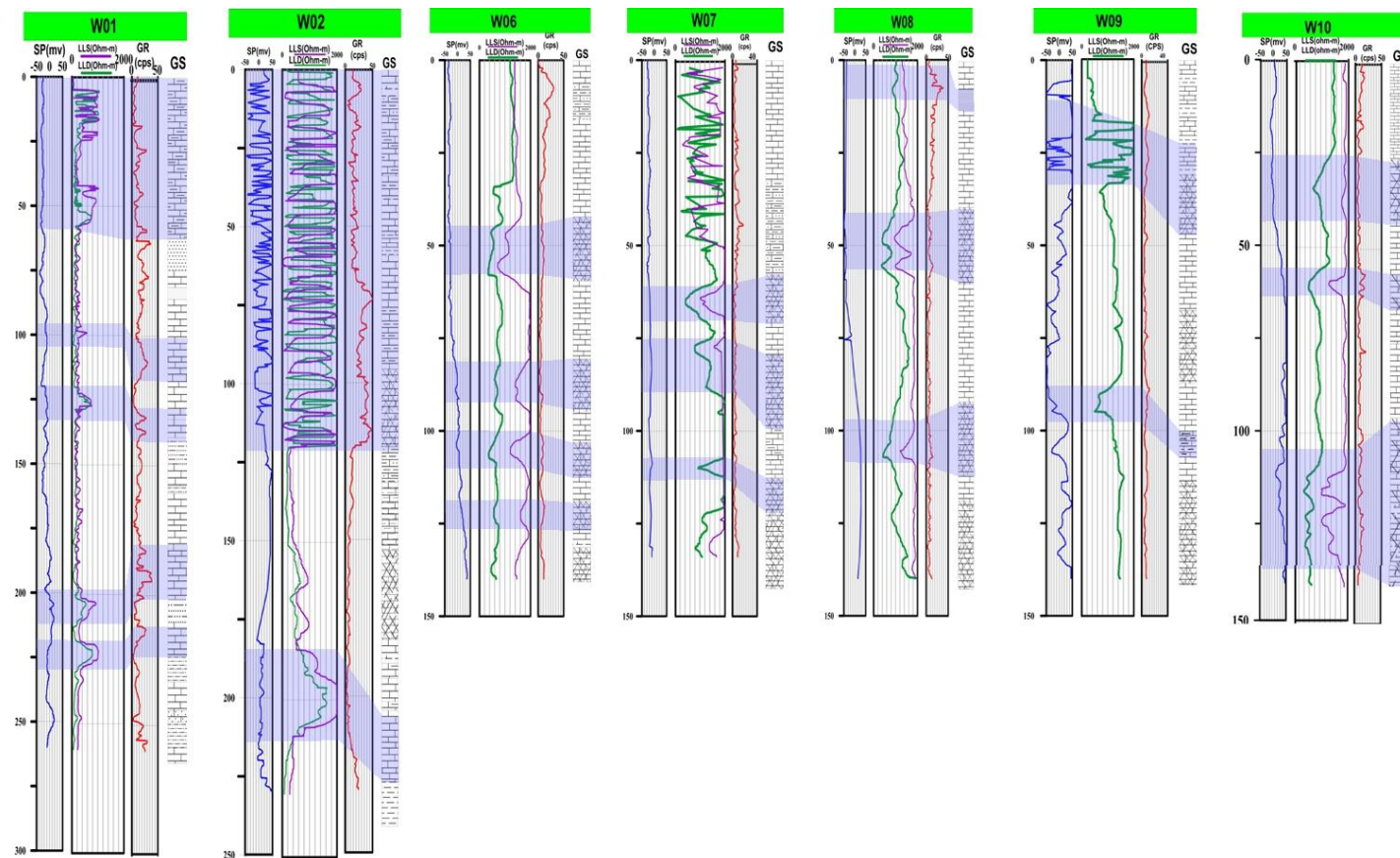
شکل ۴-۲۶- لاگ ژئوفیزیک چاه‌های W09, W10

بررسی‌های حاصل از لاگ‌های ژئوفیزیک از چاه‌های منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد تفاوت‌هایی محسوس در میزان مقاومت و لاگ گاما وجود دارد. در منطقه پتروشیمی چاه‌ها بیانگر بخش کمی از ضخامت لایه آهکی هستند. در این منطقه هر دو چاه مقاومت پایین دارند و لاگ گاما وجود رس یا شیل را نشان می‌دهد. این دو حلقه چاه چون در جهت شیب لایه‌بندی حفر شده‌اند در مقایسه با سایر چاه‌ها از اهمیت کمتری برخوردارند و فقط می‌توان آنها را با یکدیگر مقایسه کرد. در منطقه قارلق تنها یک چاه که دارای لاگ است و در آن لاگ

مقاومت اندازه بیشتری را نشان می‌دهد. هم چنین لاگ گاما نشان می‌دهد از میزان رس کاسته شده است. بنا بر این می‌توان نتیجه گرفت چاه در لیتولوژی آهک به نسبت متراکم‌تری حفر شده است. مناطق خرد شده آهک نیز به خوبی نشان داده شده است.

در چاه‌های منطقه نجف‌آباد و در زون یک مقاومت بسیار بالا به همراه لاگ گاما ضعیف مشاهده شده است. کاهش نسبی مقاومت به همراه افزایش کمی لاگ گاما به سمت شیل نشان از حضور آهک ناخالص‌تر نسبت به زون یک دارد.

در مقایسه لاگ کل چاه‌ها کاهش نسبی رس به سمت بالای تیرگان و یکپارچه بودن آهک و وجود درز و شکاف‌های بدون رس و احتمالاً آبدارنایی می‌شود. نکته مهم دیگر اینکه ممکن است از نظر چینه‌شناسی چاه‌ها در یک افق و با فاصله کم حفر شده باشند اما در نگاه دقیق‌تر و با استفاده از لاگ‌ها روشن می‌شود که تغییر رخساره قابل توجهی ممکن است اتفاق افتاده باشد. شاهد این مثال در چاه‌ها زون یک و زون دو در منطقه نجف‌آباد دیده می‌شود. نتیجه مقایسه لاگ همه چاه‌ها در شکل ۴-۲۷ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۷- مقایسه لاگینگ چاه‌های منطقه مورد مطالعه

#### ۴-۴-۱ تعیین نوع واحدهای سنگی

چاه‌های حفر شده در سه زون مختلف شامل چاه‌های پتروشیمی (A)، چاه‌های منطقه قارلق (B) و چاه‌های نجف آباد یک و دو (C و D) بررسی شده‌اند. برای بررسی لیتولوژی از تفسیر هم‌زمان لاگ گاما، لاگ مقاومت و لاگ زمین شناسی استفاده شده است.

**چاه‌های پتروشیمی (A):** چاه‌های شماره W01 و W02 چون نسبت به شیب لایه‌بندی زاویه تندی می‌سازد و در واقع بسیار نزدیک به شیب لایه‌بندی حفر شده‌اند دارای تغییراتی هستند که نمی‌توان آنها را با سایر چاه‌های منطقه مقایسه کرد تنها امکان مقایسه با هم وجود دارد. در مقایسه با برش باباموسی این دو چاه در واحد سنگی آهکی بالایی (E) بخش میانی تا تحتانی و ابتدای واحد سنگی ؟ (D) حفر شده‌اند. این دو چاه به سبب لیتولوژی از آهک، آهک مارنی تشکیل شده‌اند. تغییرات مقاومت نشان می‌دهد در برخی نقاط آهک یک‌پارچه وجود دارد.

**چاه‌های منطقه قارلق (A):** چاه‌های این منطقه شامل چهار چاه هستند که چاه‌های شماره W03 و W04 در نزدیک یکدیگر و چاه شماره W05 در ارتفاع بالاتر و به لحاظ چینه‌شناسی در واحد آهکی بالایی (البته در بخش پایینی آن) حفر شده است. چاه W06 در بالاتر و در واحد آهکی بالایی حفر شده است. که تنها لاگ همین چاه به‌دست آمده است. مقاومت نسبی بالاتر و عدم افزایش نمودار گاما نشان می‌دهد تراکم آهک مناسب است و انحراف در منحنی گاما با منحنی مقاومت انطباق خوبی دارند و هر دو با لاگ زمین‌شناسی نیز هم‌خوانی دارد. این چاه شامل آهک‌های فشرده و متراکم است که با چینه‌شناسی لایه آهک بالایی مطابقت دارد و مناطق با مقاومت کمتر و شیل کمتر مناطق دارای آهک خرد شده و احتمالاً کارستی هستند.

**چاه‌های نجف‌آباد یک (C):** با استفاده از لاگ‌های دو حلقه چاه که در این منطقه واقع شده‌اند و به لحاظ چینه‌شناسی در واحد آهکی بالایی حفاری شده‌اند، وجود آهک ضخیم لایه در عمق تا ۱۴۰ متری تایید شده است. در این دو حلقه میزان مقاومت در نمودار بالاست و هم‌زمان در نمودار گاما افزایش دیده نمی‌شود. کاهش مقاومت و هم‌زمان افزایش میزان گاما منطبق بر زون‌های خرد شده است. زونهای شکستگی که حاوی آب

هستند. بنا بر این لیتولوژی آهک خالص تر و متراکم تر در این دو چاه دیده می شود که نشان از تناوبی از آهک خرد شده و آهک متراکم دارد.

**چاه های نجف آباد دو (D):** در این دو چاه (W09, W10) به طور نسبی میزان مقاومت نسبت به دو چاه زون یک کمتر است. با اینحال میزان گاما هم تغییرات بیشتری نسبت به چاه های زون یک دارد. گرچه این دو چاه به لحاظ چینه شناسی در واحد سنگی آهکی بالایی حفر شده اند اما به نظر می رسد نسبت به آنها فشردگی کمتر و رس بیشتری در ترکیب آهک دارند زونهای خرد شده بیشتری دارد اما به موازات آن لاگ گاما هم انحراف به سمت شیل دارد که کمی ترکیب مارنی در آهک را نشان می دهد.

#### ۴-۴-۲ زون بندی ستون چینه شناسی سازند تیرگان

چون چاه های حفر شده در هر سه زون در یک ساختار تاقدیسی ناودیسی حفر شده اند و هم چنین محل حفر چاه ها نسبت به ستون چینه شناسی باباموسی و خود سازند تیرگان مد نظر بوده است برشی از میزان نفوذ چاه ها و محل آنها نسبت به لایه های سازند تیرگان مشخص شده است. شیب لایه بندی اندازه گیری و سپس میزان نفوذ چاه در ضخامت ظاهری به دست آمده است نتیجه در شکل ۴-۲۸ نمایش داده شده است.

**چاه های پتروشیمی (A):** چاه های این منطقه تقریباً نزدیک به شیب لایه بندی حفر شده اند. این چاه ها گرچه دارای عمق تا دو برابر سایر چاه ها هستند اما تغییرات زیادی در لیتولوژی ندارند. بنا بر این با افزایش عمق هم تفاوت زیادی نخواهد کرد. در این زون بخش بالایی سازند تیرگان و بخش میانی به سمت شرق برونزد دارند.

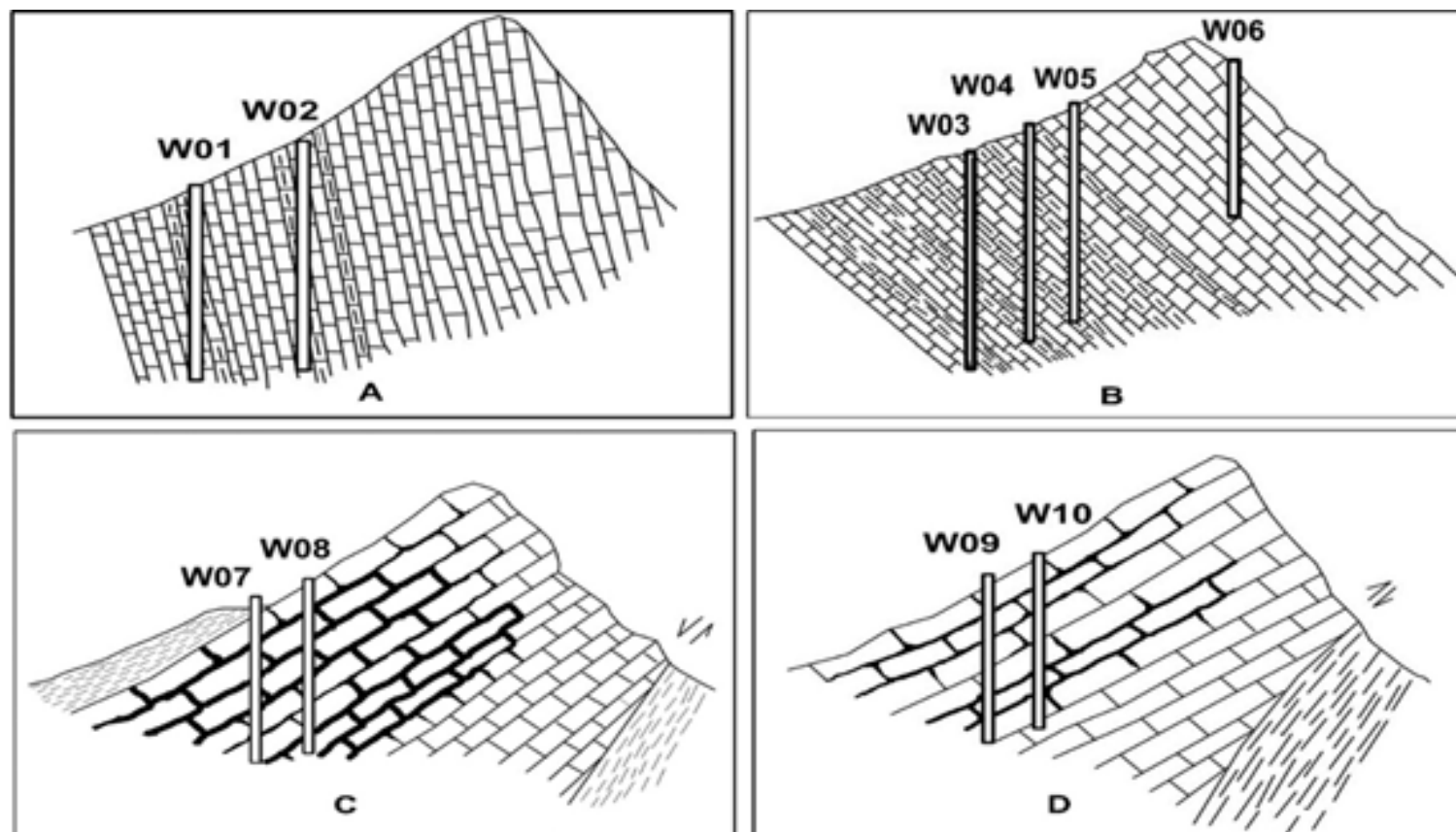
**چاه های منطقه قارلق (B):** از نظر چینه شناسی در تناوبی از لایه های آهکی و آهکی مارنی حفر شده اند. فقط چاه شماره W06 دارای لاگ است. سایر چاه ها به سبب موقعیت چینه شناسی و بر اساس لاگ زمین شناسی جانمایی شده اند. در این چاه ها و در مقایسه با کل سازند تیرگان تغییر رخساره اتفاق افتاده اما چندان زیاد نبوده است. بنا بر این می توان سایر اطلاعات را با برش باباموسی مقایسه کرد. در این منطقه تقریباً بخش میانی و بالایی تیرگان و مشابه با برش باباموسی رخنمون دارد. اما در تغییر رخساره لایه آهکی مارنی بالایی

تغییر اتفاق افتاده و تناوب و ضخامت میان لایه‌های آهکی به نسبت بیشتر شده است. می‌توان گفت در این محل گذر از لایه مارنی-آهکی بالایی به آهک بالایی به روشنی برش باباموسی نیست.

**چاه‌های منطقه نجف‌آباد یک (C):** شامل دو حلقه هستند که حدود ۱۴۰ متر عمق دارند. چینه‌شناسی این منطقه از آهک‌های ضخیم‌لایه بالایی تشکیل شده و در این بخش دره‌های خشک فراوان هستند. در انتهای هر دره بزرگ دو جفت چاه حفاری شده‌اند. شیب لایه آهکی از آهک برهنه تشکیل شده است. در امتدا دره‌ها انحلال بسیار پیشرفته اتفاق افتاده است. چاه‌های این منطقه دارای آبدهی بسیار بالایی هستند.

**چاه‌های منطقه نجف‌آباد دو (D):** در این منطقه و در انتهای یک دره عمیق هم دو حلقه چاه حفاری شده‌اند. این دو چاه مانند دو چاه قبلی در بخش آهکی بالایی حفر شده‌اند. اما میزان مقاومت در آنها به طور نسبی کاهش دارند. تغییر رخساره در آن نسبت به زون یک دیده می‌شود.

قاعده سازند تیرگان در این بخش گسلی است و سازند سرچشمه در کنار سازند تیرگان دیده می‌شود. در زیر بخش آهکی بالایی بخش مارنی-آهکی بالایی سازند تیرگان قرار دارد و این توالی برای توسعه کارست مساعد است. در بخش میانی ناودیس نیز سازند سرچشمه رخنمون دارد. وجود یک لایه آهکی در بین دو لایه نفوذناپذیر به کنترل جریان کمک زیادی کرده است. در شکل ۴-۲۸ این زون‌ها و چاه‌های حفر شده در آنها ترسیم شده است.



شکل ۴-۲۸- نحوه قرارگیری چاه‌ها در ارتباط با سازند تیرگان.

#### ۴-۳-۴ ارزیابی تراوایی مناطق مختلف

از بررسی لاگهای ژئوفیزیک می‌توان تا حدی تراوایی را برآورد نمود. لاگ‌های مقاومت ظاهری به صورت غیر مستقیم فشردگی و خلوص سنگ را نشان می‌دهند. لاگ گاما هم نشان دهنده میزان رس و ناخالصی است. در کنار هم اگر مقاومت کاهش یابد و گاما افزایش نداشته باشد کاهش مقاومت در اثر شکستگی یا شکستگی همراه آب خواهد بود. کاهش رس هم پتانسیل انحلال را افزایش می‌دهد که نتیجه در تراوایی منعکس خواهد شد.

**برآورد تراوایی چاه‌های پتروشیمی (A):** چاه‌های W01 و W02 در واحد سنگی آهک بالایی البته در بخش زیرین آن حفاری شده‌اند. لیتولوژی از آهک مارنی و آهک تشکیل شده است و در آنها آهک متراکم خرد شده کمتر به چشم می‌خورد. انحراف در خط شیل و کاهش مقاومت نشان از تراوایی کم ناشی از لیتولوژی دارد. البته نحوه قرارگیری محور چاه نسبت به لایه‌ها نقش بسیار زیادی در افزایش یا کاهش تراوایی دارد. در این منطقه چاه‌ها به طرز مناسبی ضخامت لایه را قطع نکرده است. بنا بر این تراوایی نسبی آن نیز کمتر خواهد بود. آبدی چاه‌های این زون به نسبت دیگر زون‌ها کمتر است. با توجه به همه فاکتورهای گفته شده این چاه‌ها کمترین تراوایی را خواهند داشت.

**برآورد تراوایی منطقه قارلق (B):** چاه منطقه قارلق به سبب خط مقاومت بیشتر و شیل کمتر نشان از آهک متراکم دارد، که در این زونهای خرد شده ناشی از شکستگی تراوایی نسبی بالاتری نسبت به چاه‌های پتروشیمی انتظار می‌رود. شیب لایه‌ها و نحوه قرارگیری چاه‌ها نسبت به لایه‌بندی طوری‌ست که ضخامت مناسبی را قطع کرده است. به غیر از چاه W06 بقیه چاه‌ها در بخش پایین‌تر سازند تیرگان حفر شده‌اند. می‌توان از ویژگی‌های چینه‌شناسی و مقایسه آن با چاه شماه W06 میزان نسبی تراوایی را برآورد کرد. بر این اساس تراوایی W06 در منطقه قارلق نسبت به سه چاه دیگر در همین منطقه بیشتر خواهد بود. به طریق مشابه از چاه‌های پتروشیمی نیز تراوایی بیشتری خواهد داشت. گرچه سه حلقه چاه منطقه قارلق هم نسبت به چاه‌های پتروشیمی تراوایی نسبی بالاتری خواهند داشت.

**برآورد تراوایی منطقه نجف‌آباد یک (C):** چاه‌های منطقه نجف‌آباد یک، تراکم بالای آهک، زونهای خرد شده ناشی از شکستگیهای فراوان را نشان می‌دهند و به موازات آن کاهش چشم‌گیر شیل در لاگ‌ها دیده می‌شود. این عوامل در کنار یکدیگر پتانسیل بالایی برای تراوایی خواهند بود. آبدهی چاه‌ها در این منطقه بسیار بالا و تا چند برابر سایر چاه‌هاست. بر این اساس این چاه‌ها دارای بیشترین تراوایی هستند.

**برآورد تراوایی منطقه نجف‌آباد دو (D):** چاه‌های منطقه نجف‌آباد دو تراکم بالای آهک، فراوانی زونهای خرد شده و کاهش چشم‌گیر شیل را نشان می‌دهند. اما میزان مقاومت نسبت به دو چاه قبلی کمتر شده و در مقایسه، این زون پتانسیل تراوایی کمتری نسبت به چاه‌های زون یک دارد. در مجموع چاه‌های زون یک نجف‌آباد بیشترین تراوایی، زون محل حفر چاه W06 در رتبه بعدی، چاه‌های زون نجف‌آباد دو مرتبه سوم و چاه‌های پتروشیمی رتبه چهارم را دارد.

#### ۴-۵ بررسی داده‌های آزمایش پمپاژ چاه‌های حفاری شده در سازند تیرگان

به منظور بررسی پمپاژ چاه‌ها و بر مبنای محل حفر چاه‌ها و توجه به این نکته که از نظر چینه‌شناسی نیز تغییر زیادی در ویژگی‌های سازند تیرگان در هر محل ایجاد نشده است تقسیم‌بندی انجام شده است. چاه‌ها نیز در چهار منطقه پتروشیمی (A)، منطقه قارلق (B)، چاه‌های منطقه نجف‌آباد یک (C) و چاه‌های منطقه نجف‌آباد دو (D) بررسی می‌شوند. در جدول ۴-۲ اطلاعات پمپاژ چاه‌ها آمده است.

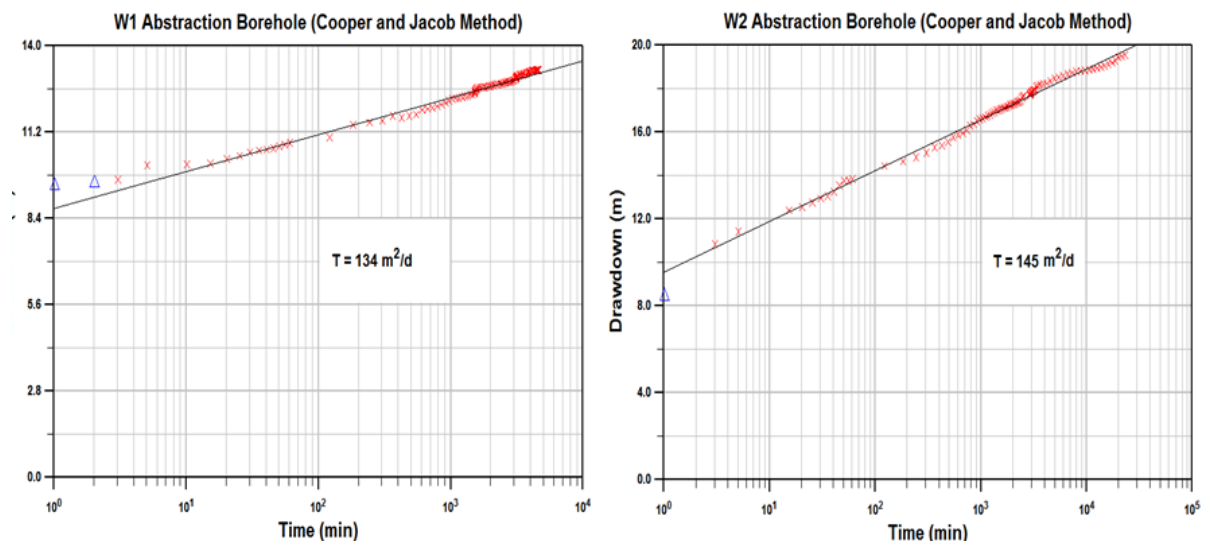
جدول ۴-۲- اطلاعات پمپاژ چاه‌ها

| چاه | دبی پمپاژ (لیتر / ثانیه) | برگشت | پله‌ها | زمان (دقیقه) |
|-----|--------------------------|-------|--------|--------------|
| W01 | ۱۵/۱                     | دارد  | ۲      | ۴۵۵۹         |
| W02 | ۲۱/۳                     | دارد  | ۲      | ۲۱۲۱۴        |
| W04 | ۲۱/۲                     | ندارد | ۴      | ۵۷۶۰         |
| W05 | ۲۹/۶                     | ندارد | ۴      | ۷۸۶۰         |
| W07 | ۳۶                       | دارد  | ۵      | ۲۸۴۱۲        |
| W08 | ۵۲/۲                     | ندارد | ۲      | ۴۶۰۰         |
| W09 | ۲۶/۶                     | دارد  | ۳      | ۲۰۳۱۳        |

مطالعات زیادی برای به کارگیری روش‌های کوپر-ژاکوب برای بررسی و آنالیز داده‌های پمپاژ در دنیا انجام شده و امکان استفاده از این روش برای سفره‌های ناهمگن را نیز فراهم آورده است. بر اساس روش کوپر-ژاکوب و پس از انجام تمام تصحیحات بر روی داده‌ها، با استفاده از روش کرمی (Karami 2002) پله‌ها تبدیل به یک پله شده و با کمک نرم‌افزار Aquifer Win 3.2 مقادیر ضریب قابلیت انتقال و با استفاده نرم افزار Excell ضرایب ناهمگنی، بعد جریان محاسبه شده و در نهایت با پلات هر یک از این ضرایب محل قرارگیری هر چاه مشخص می‌شود.

#### الف-چاه‌های پتروشیمی (A)

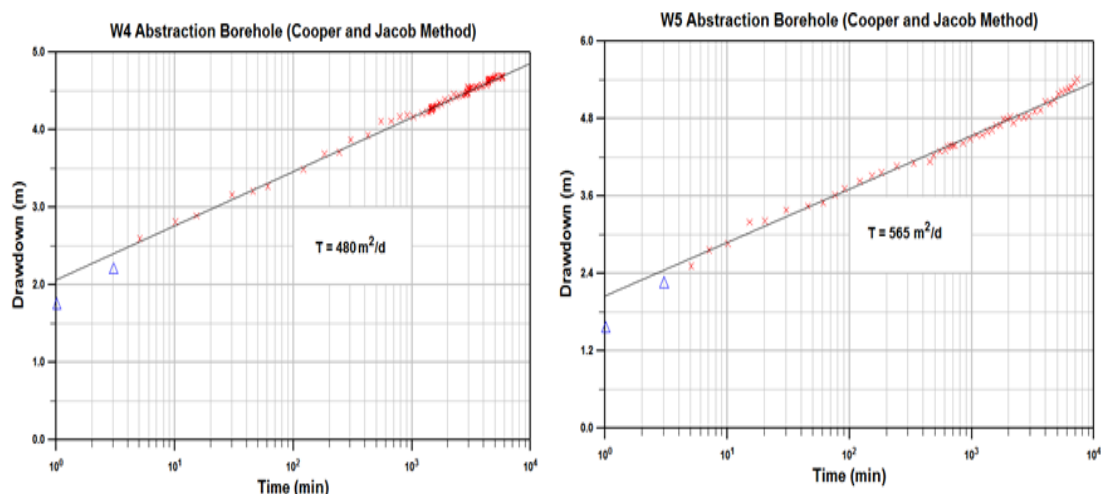
در این محل در آهک‌های تیرگان دو حلقه چاه W01 و W02 با عمق ۲۵۰ و ۲۰۱ متر حفاری شده‌اند. سطح آب در عمق ۱۲۰ متری بوده و عملیات آزمایش پمپاژ در هر دو حلقه چاه به طریق افت پله‌ای انجام شده است. ضریب قابلیت انتقال چاه W01 و W02 به ترتیب ۱۳۴ و ۱۴۵ متر مربع در روز به دست آمده است (شکل ۴-۲۰).



شکل ۴-۲۹- ترسیم افت-زمان دو حلقه چاه (W01 و W02)

## ب- چاه‌های منطقه قارلق (B).

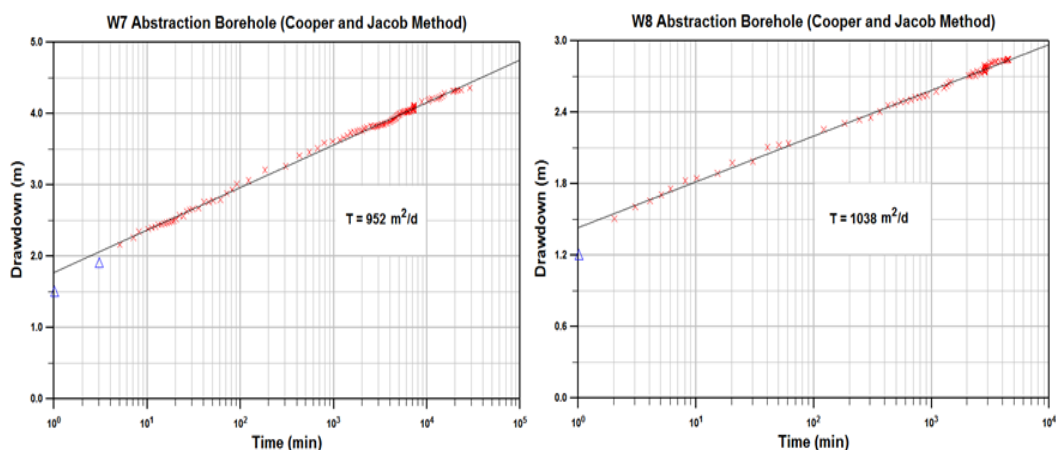
در این منطقه دو حلقه چاه، W04 و W05 دارای آزمایش پمپاژ پله‌ای هستند که ضرایب قابلیت انتقال آنها به ترتیب ۴۸۰ و ۵۶۵ متر مربع در روز به دست آمده است (شکل ۴-۳۰)



شکل ۴-۳۰- ترسیم افت- زمان دو حلقه چاه (W04 و W05)

## ج- چاه‌های منطقه نجف آباد یک (C)

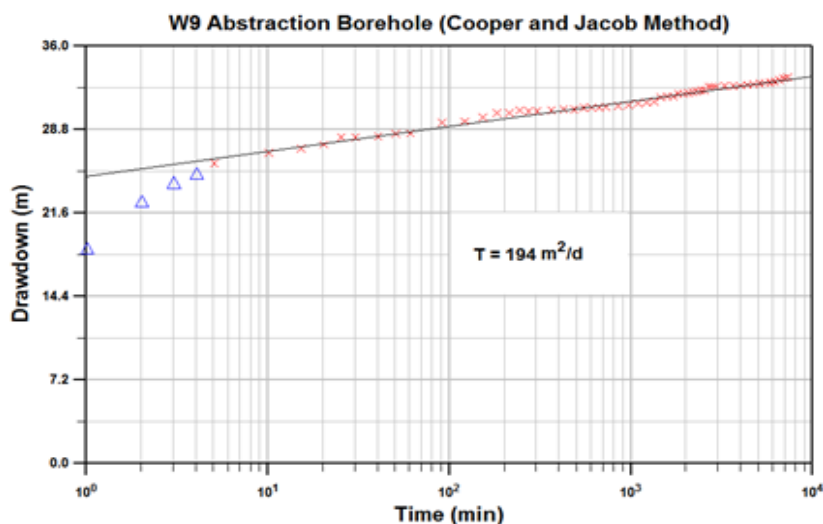
در منطقه نجف آباد دو جفت چاه حفاری شده و هر دو حلقه باهم بررسی می‌شوند. در منطقه یک دو حلقه چاه W07 و W08 به ترتیب به عمق ۱۴۰ و ۱۳۹ متر حفاری شده‌اند. ضریب قابلیت انتقال چاه‌های حفر شده به ترتیب برابر با ۹۵۲ و ۱۰۳۸ متر مربع در روز به دست آمده است (شکل ۴-۳۱).



شکل ۴-۳۱- ترسیم افت- زمان دو حلقه چاه (W07 و W08)

#### د- چاه‌های منطقه نجف آباد دو (D)

دو حلقه چاه شماره W09 و W10 نیز به ترتیب با عمق ۱۴۰ و ۱۳۴ متر مستقیماً روی آهک تیرگان حفاری شده‌اند. آبدهی این دو حلقه چاه کمتر از نصف دبی دو حلقه چاه منطقه یک است. آزمایش پمپاژ در یک حلقه W09 انجام شده است. ضریب قابلیت انتقال ۱۹۴ مترمربع در روز به دست آمده است (شکل ۴-۳۲).



شکل ۴-۳۲- ترسیم افت- زمان چاه (W09)

#### و- محاسبه ضرایب چاه‌ها

بر اساس محاسبات معمول بر روی داده‌های آزمایش پمپاژ سایر اطلاعات شامل افت چاه، افت آبخوان، افت ویژه و راندمان چاه نیز محاسبه شده و در جدول ۳-۴ آمده است. بر اساس اطلاعات جدول محاسبات ضرایب هیدرولیکی چاه و سایر ویژگی‌های هیدرولیکی چاه‌های منطقه ضرایب قابلیت انتقال دو حلقه چاه W01 و W02 و ضریب ناهمگنی و بعد جریان نزدیک به هم می‌باشند. با توجه به افت کلی هر دو چاه و نسبت افت آبخوان به افت چاه و افت ویژه در نهایت راندمان چاه W02 نسبت به W01 بهتر است.

جدول ۴-۳- ضریب قابلیت انتقال، ناهمگنی، بعد جریان، نوع جریان و ویژگی‌های هیدرولیکی چاه‌ها

| شمار<br>ه چاه | T<br>(m <sup>2</sup> /d) | HR   | FD   | Q<br>(l/s) | S <sub>w</sub> (m) | Well<br>loss<br>(m) | Aquifer<br>loss (m) | Specific<br>Drawdown<br>(m) | Well<br>Efficiency<br>% |
|---------------|--------------------------|------|------|------------|--------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------------|
| W01           | ۱۳۴                      | ۱۳/۱ | ۱/۶۵ | ۱۵/۱       | ۱۳/۱۹              | ۸/۷                 | ۴/۴۹                | ۰/۸۸                        | ۳۴/۰                    |
| W02           | ۱۴۵                      | ۱۲/۳ | ۱/۷۲ | ۲۱/۳       | ۱۹/۵۰              | ۹/۵                 | ۱۰/۰                | ۰/۹۲                        | ۵۱/۳                    |
| W04           | ۴۸۰                      | ۷/۸  | ۱/۷۵ | ۲۱/۲       | ۴/۶۸               | ۲/۱                 | ۲/۵۸                | ۰/۲۲                        | ۵۵/۱                    |
| W05           | ۵۶۵                      | ۸/۹  | ۱/۶۵ | ۲۹/۶       | ۵/۴۰               | ۲/۰۵                | ۳/۳۵                | ۰/۱۸                        | ۶۲/۰                    |
| W07           | ۹۵۲                      | ۸/۵  | ۱/۸۳ | ۳۶         | ۴/۳۵               | ۱/۸                 | ۲/۵۵                | ۰/۱۲                        | ۵۸/۶                    |
| W08           | ۱۰۳۸                     | ۸/۳  | ۱/۸۵ | ۵۲/۲       | ۲/۸۴               | ۱/۴                 | ۱/۴۴                | ۰/۱۱                        | ۵۰/۷                    |
| W09           | ۱۹۴                      | ۷/۴  | ۱/۷۲ | ۲۶/۶       | ۳۳/۲۵              | ۲۴/۵                | ۸/۷۵                | ۱/۲۵                        | ۲۶/۳                    |

لازم به ذکر است این دو حلقه چاه در یک واحد سنگی حفاری شده‌اند. چاه‌های W04 و W05 نیز در یک منطقه حفاری شده و به لحاظ چینه‌شناسی در واحد سنگی آهکی دوم قرار می‌گیرند و ضرایب قابلیت انتقال آنها نیز نزدیک به هم است. سایر ویژگی‌های هیدرولیکی چاه نیز در یک محدوده بوده و راندمان چاه‌ها بیشتر از ۵۰ درصد و نسبت به دو حلقه چاه قبلی وضعیت مناسب‌تری دارند. سه حلقه چاه W09, W07, W08 و چاه چهارم W10 نیز در یک منطقه و در یک واحد سنگی آهکی حفاری شده‌اند که موقعیت چینه‌شناسی نیز موید این مطلب است. اما W09 ویژگی‌های کاملاً متفاوتی با دو حلقه چاه دیگر دارند. ضریب قابلیت انتقال این چاه به مراتب پایین‌تر از دو حلقه چاه دیگر است.

#### ۴-۵-۱ برآورد تراوایی واحدهای سنگی

بر اساس اطلاعات به‌دست آمده از پمپاژ ضرایب قابلیت انتقال محاسبه شده است. از طرفی ستون آب در هر چاه نیز بر اساس داده‌های موجود محاسبه شده است. با توجه به اینکه شیب لایه‌بندی در هر یک از مناطق

حفر چاه متفاوت بوده ضخامت زون اشباع محاسبه شده و به عنوان ضخامت لایه آبدار در چاه در نظر گرفته شده است. با توجه به محل تقریبی حفر هر چاه میزان تراوایی به دست آمده به لایه مورد نظر نسبت داده شده است که در جدول ۴-۴ این اطلاعات نشان داده شده است.

جدول ۴-۴- مقادیر تراوایی چاه‌های حفر شده

|     | تراوایی<br>(متر/روز) | ضخامت<br>(متر) | عمق چاه<br>(متر) | قابلیت انتقال<br>(متر مربع/روز) | آبدهی پمپاژ<br>(لیتر/ثانیه) |
|-----|----------------------|----------------|------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| W01 | ۱/۲۲                 | ۱۱۰            | ۲۵۰              | ۱۳۴                             | ۱۵/۱                        |
| W02 | ۱/۷۷                 | ۸۲             | ۲۰۱              | ۱۴۵                             | ۲۱/۳                        |
| W04 | ۶/۷۶                 | ۷۱             | ۲۰۱              | ۴۸۰                             | ۲۱/۲                        |
| W05 | ۳/۸۷                 | ۱۴۶            | ۲۵۰              | ۵۶۵                             | ۲۹/۶                        |
| W07 | ۱۳/۲۲                | ۷۲             | ۱۴۰              | ۹۵۲                             | ۳۶                          |
| W08 | ۱۵/۰۴                | ۶۹             | ۱۳۹              | ۱۰۳۸                            | ۵۲/۲                        |
| W09 | ۴/۸۵                 | ۴۰             | ۱۴۰              | ۱۹۴                             | ۲۶/۶                        |

#### ۴-۵-۲ بررسی توان آبدهی چاه‌ها

همانگونه که گفته شده چاه‌های آبی که در سازند تیرگان مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند در واحدهای سنگی آهکی مختلف این سازند حفاری شده‌اند. آبدهی هرچاه به عواملی از جمله جانمایی چاه و ارتباط آن با شیب لایه‌بندی سازند، عمق حفاری، عبور از زون گسلی، سطح اساس فرسایش و سایر عوامل زمین‌شناسی و از طرفی رعایت اصول حفاری در سازند سخت بستگی دارد. در این پژوهش ابتدا محل حفر هر چاه در هر واحد سنگی مشخص گردید و سپس در بررسی چاه‌های آب منطقه در سه بخش میزان آبدهی فعلی بهره‌برداری، افت ناشی از پمپاژ کوتاه مدت، افت ناشی از برداشت‌های بلند مدت مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن در جدول شماره ۴-۵ آمده است.

افت زیاد (بلند مدت) : کاهش بیش از ۵۰ درصد آبدهی اولیه

افت متوسط (بلند مدت): کاهش بین ۳۰ تا ۵۰ درصد آبدهی اولیه

افت کم (بلند مدت): کاهش بین ۳۰ تا ۲۰ درصد آبدهی اولیه

افت بسیار کم (بلند مدت): کاهش آبدهی کمتر از ۲۰ درصد آبدهی اولیه

جدول ۴-۵- مشخصات آبدهی، محل حفر، تغییرات افت آبدهی لحظه‌ای و بلند مدت چاه‌ها

| شماره چاه | محل حفر چاه درستون<br>چینه‌شناسی<br>سازند تیرگان                               | افت آبدهی<br>بلندمدت<br>(۲۰ سال) | افت<br>(حین<br>پمپاژ)<br>m | درصد افت<br>آبدهی ۲۰<br>ساله (۹۴-<br>(۱۳۷۴) | آبدهی<br>بعد از ۲۰<br>سال<br>(۹۴-<br>(۱۳۷۴) | آبدهی<br>اولیه<br>بهره‌بردار<br>ی (l/sec) | ضریب<br>قابلیت<br>انتقال<br>T (m <sup>2</sup> /d) |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| W01       | بخش پایین لایه آهک بالایی E و<br>قسمتی از لایه D اما نزدیک به<br>شیب لایه بندی | بالا                             | ۱۳/۱۹                      | ۵۲٪                                         | ۱۲                                          | ۲۵                                        | ۱۳۴                                               |
| W02       | بخش پایین لایه آهک بالایی E و<br>قسمتی از لایه D اما نزدیک به<br>شیب لایه بندی | بالا                             | ۱۹/۵۰                      | ۵۲٪                                         | ۱۳                                          | ۲۵                                        | ۱۴۵                                               |
| W03       | بخش بالایی از لایه آهک میانی -<br>C و بخش پایینی از E                          | متوسط                            | -                          | ۳۳٪                                         | ۲۰                                          | ۳۰                                        | -                                                 |
| W04       | بخش بالایی از لایه آهک میانی -<br>C و بخش پایینی از E                          | کم                               | ۴/۶۸                       | ۱۶٪                                         | ۲۵                                          | ۳۰                                        | ۴۸۰                                               |
| W05       | لایه آهک بالایی E-                                                             | کم                               | ۵/۴۰                       | ۲۸٪                                         | ۲۵                                          | ۳۵                                        | ۵۶۵                                               |
| W06       | لایه آهک بالایی E-                                                             | بسیار کم                         | -                          | ۰.۰۵٪                                       | ۳۸                                          | ۴۰                                        | -                                                 |
| W07       | لایه آهک بالایی E-                                                             | بسیار کم                         | ۴/۳۵                       | ۰                                           | ۶۰                                          | ۶۰                                        | ۹۵۲                                               |
| W08       | لایه آهک بالایی E-                                                             | بسیار کم                         | ۲/۸۴                       | ۰                                           | ۶۰                                          | ۶۰                                        | ۱۰۳۸                                              |
| W09       | لایه آهک بالایی E- ناهمگنی                                                     | بسیار کم                         | ۳۳/۲۵                      | ۱۴٪                                         | ۲۳                                          | ۲۷                                        | ۱۹۴                                               |
| W10       | لایه آهک بالایی E- ناهمگنی                                                     | بسیار کم                         | -                          | ۱۵٪                                         | ۲۲                                          | ۲۶                                        | -                                                 |

با توجه به جدول و توجه به محل حفر چاه در ارتباط با واحد سنگی آهکی مشخص می‌شود که شرایط آبدهی

چاه‌هایی که با واحد آهک بالایی در ارتباط بوده‌اند بهتر است که شامل چاه‌های شماره W05، W06، W07،

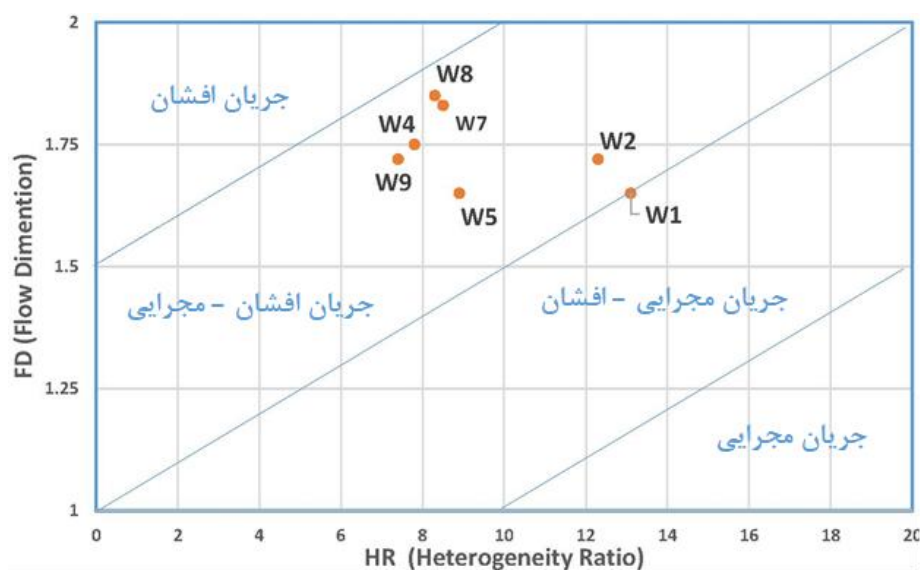
W08 می‌شوند. اما دو حلقه چاه W01 و W02 گرچه در بخشی از آهک بالایی حفر شده‌اند اما به سبب شیب نامناسب حفاری نسبت به شیب لایه، دارای آبدهی کم، افت بالا در کوتاه مدت و بلند مدت می‌باشند.

از سوی دیگر دو حلقه چاه W09 و W10 گرچه هم در جهت شیب درست آهک بالایی حفاری شده‌اند، اما هم آبدهی پایینی دارند و هم افت کوتاه مدت آنها بالا می‌باشد. اما نکته قابل توجه اینکه افت بلند مدت آنها کم می‌باشد. آبدهی پایین چاه نشان از ناهمگنی منطقه حفر چاه دارد. اما افت کم در دبی بهره‌برداری در بلند مدت نشان می‌دهد منبعی بزرگ در نزدیکی این چاه‌ها قرار دارد که طی مدت بیست سال آب آنها را تامین می‌کرده و افت زیادی نداشته‌اند. سایر چاه‌ها، W03, W04 به سبب حفاری در واحدهائی که توسعه کارست کمتری داشته‌اند حفاری شده که هم آبدهی کمتری داشته‌اند و افت بلند مدت آنها نیز بیشتر بوده است.

#### ۴-۵-۳ تعیین سیستم غالب جریان

همانگونه که در انواع سیستم‌های کارستی بیان شد، تعیین سیستم غالب جریان برای ترسیم سیمای درستی از آبخوان اهمیت بالایی دارد. گرچه سیستم‌های غالب جریان بایستی با سایر اطلاعات به‌دست آمده از ژئومورفولوژی کارست و یا سیستم‌های تغذیه تا حد زیادی هم‌خوانی داشته باشد.

بر اساس نتایج به‌دست آمده از آزمایش پمپاژ و فاکتورهای نسبت ناهمگنی و بعد جریان به طور کلی سیستم غالب جریان در منطقه مورد مطالعه از نوع افشان-مجریایی است. با اینحال برخی چاه‌ها رفتاری نزدیک به سیستم مجریایی-افشان یا نزدیک به سیستم افشان دارند. نتایج به‌دست آمده از ضریب ناهمگنی و بعد جریان در چاه‌های پمپاژ شده منطقه در شکل ۴-۳۳ نمایش داده شده است. ضریب ناهمگنی دو حلقه چاه W01 و W02 در محدوده ۱۲ تا ۱۴ به‌دست آمده است و با اینکه این دو حلقه چاه دارای آبدهی کمی هستند. بعد جریان نیز بین ۱/۵ تا ۱/۷۵ محاسبه شده است. دو حلقه چاه W04 و W05 در محدوده ۱/۵ تا ۱/۷۵ از بعد جریان و ناهمگنی W05 عدد ۹ و چاه W04 عدد ۷/۸ به‌دست آمده است. چاه W08 و W07 دارای اعداد بعد جریان و نسبت ناهمگنی نزدیک به هم و به ترتیب ۱/۸۸ و ۸/۳ می‌باشند (شکل ۴-۳۳).



شکل ۴-۳- ناهمگنی و بعد جریان چاه‌های پمپاژ شده در منطقه

همانگونه که گفته شد از مفاهیم ناهمگنی و بعد جریان برای نشان دادن کلی سیستم جریان استفاده می‌شود. اما به منظور بررسی کمی درجه توسعه مجاری کارست، از روش ارائه شده به وسیله کرمی (Karami 2002) استفاده شده و شاخص جدیدی با عنوان شاخص مجرای کارست (Karst Coduit Index) معرفی می‌شود:

$$KCI = 0.05 \times H_R - FD + 1 \quad \text{معادله ۴-۱}$$

که در آن،  $KCI$  درجه توسعه مجاری کارست،  $H_R$  درجه ناهمگنی کارست و  $FD$  بعد جریان است. با توجه به این معادله و محدوده  $H_R$  بین ۰ تا ۲۰ درصد و محدوده  $FD$  بین ۱ و ۲، مقادیر  $KCI$  بین ۱- و ۱+ قرار می‌گیرد. به این ترتیب که مقادیر منفی  $KCI$  بیانگر غلبه جریان افشان و مقادیر مثبت  $KCI$  بیانگر غلبه جریان مجرای است. در صورتی که مقدار  $KCI$  برابر با صفر باشد بیانگر این است که سهم جریان‌های افشان و مجرای با هم برابر است. مقدار شاخص  $KCI$  برای محدوده هفت حلقه چاه پمپاژ حفر شده در سازند تیرگان محاسبه شده است (جدول ۴-۶).

جدول ۴-۶- مقادیر درجه ناهمگنی و بعد جریان و شاخص  $KCI$  در سازند تیرگان

| شماره چاه پمپاژ | Flow Dimension | Heterogeneity Ratio | $KCI$ |
|-----------------|----------------|---------------------|-------|
| W01             | ۱/۶۵           | ۱۳/۱                | ۰/۰۰۵ |

|     |      |      |        |
|-----|------|------|--------|
| W02 | ۱/۷۲ | ۱۲/۳ | -۰/۱۰۵ |
| W04 | ۱/۷۵ | ۷/۸  | -۰/۳۶۰ |
| W05 | ۱/۶۵ | ۸/۹  | -۰/۲۰۵ |
| W07 | ۱/۸۳ | ۸/۵  | -۰/۴۰۵ |
| W08 | ۱/۸۵ | ۸/۳  | -۰/۴۳۵ |
| W09 | ۱/۷۲ | ۷/۴  | -۰/۳۵۰ |

همانطور که از جدول ۴-۶ ملاحظه می‌شود به غیر از چاه W01 که اندکی سهم جریان مجرای بیشتر از جریان افشان شده است، در محدوده بقیه چاه‌های پمپاژ سهم جریان افشان در مقایسه با جریان مجرای بیشتر بدست آمده است که بالاترین آن مربوط به چاه‌های W07 و W08 می‌باشد. سهم بالای جریان افشان (درجه بالاتر اتصال شبکه‌های هدایت کننده آب و درجه ناهمگنی کمتر) در این دو چاه موجب آبدهی قابل توجه و پایدار آنها شده است.

#### ۴-۶ ارزیابی کمی هیدرواستراتیگرافی سازند تیرگان

به منظور ارزیابی کمی هیدرواستراتیگرافی سازند تیرگان از تلفیق داده‌های چینه‌شناسی تاثیرگذار بر خصوصیات هیدرولیکی آبخوان کارستی و هم‌چنین داده‌های آزمایش پمپاژ استفاده شده است. از مهم‌ترین داده‌های چینه‌شناسی می‌توان به لیتولوژی، شیب لایه‌بندی و ضخامت لایه‌ها اشاره کرد. لازم به ذکر است که کلیه چاه‌های پمپاژ مورد نظر در آهک‌های سازند تیرگان حفر شده‌اند و به همین دلیل لیتولوژی آبخوان کارستی در محدوده تمام چاه‌های پمپاژ آهکی است. بنا بر این، برای ارزیابی کمی هیدرواستراتیگرافی سازند تیرگان تنها از شیب لایه‌بندی و ضخامت لایه‌ها استفاده شده است.

#### ۴-۶-۱ معرفی شاخص چینه‌شناسی

برای ارزیابی کمی تاثیر داده‌های چینه‌شناسی از شاخص جدیدی استفاده شده است که شاخص چینه‌شناسی (Stratigraphic index) نامیده شده است. همانطور که در بالا اشاره شد، کلیه چاه‌های پمپاژ مورد بررسی در

این تحقیق در آهک‌های سازند تیرگان حفر شده‌اند و لیتولوژی آبخوان کارستی در محدوده تمام این چاه‌ها آهکی است. بنا بر این، برای معرفی شاخص چینه‌شناسی تنها از شیب لایه‌بندی و ضخامت لایه‌ها استفاده شده است. با توجه به توضیحات مذکور، شاخص چینه‌شناسی با استفاده از شیب لایه‌بندی و ضخامت لایه‌ها به صورت زیر تعریف شده است:

$$S_i = 1 - \frac{Dip}{90} + 0.1T \quad \text{معادله ۴-۲}$$

که در آن،  $S_i$  شاخص چینه‌شناسی،  $Dip$  شیب لایه‌بندی بر حسب درجه و  $T$  ضخامت لایه بر حسب متر است. با توجه به معادله معرفی شده، مقدار شاخص چینه‌شناسی برای محدوده هفت حلقه چاه پمپاژ حفر شده در سازند تیرگان محاسبه شده است (جدول ۴-۷).

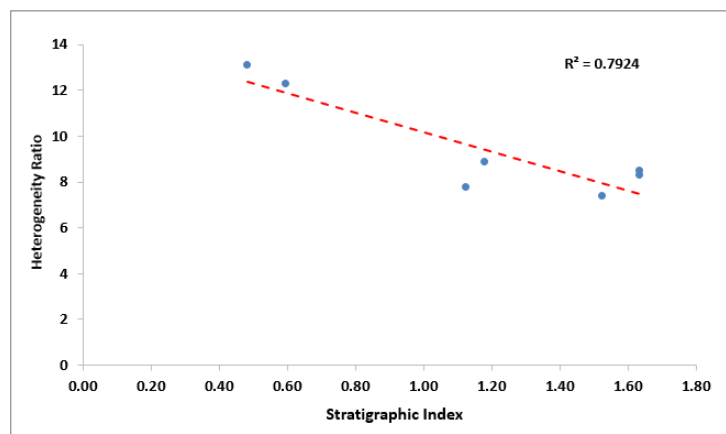
جدول ۴-۷ خصوصیات چینه‌ای و شاخص چینه‌شناسی در سازند تیرگان

| ردیف | شماره چاه پمپاژ | شیب لایه‌بندی (درجه) | ضخامت لایه (متر) | $S_i$ |
|------|-----------------|----------------------|------------------|-------|
| ۱    | W01             | ۶۰                   | ۱/۵              | ۰/۴۸  |
| ۲    | W02             | ۵۰                   | ۱/۵              | ۰/۵۹  |
| ۳    | W04             | ۲۵                   | ۴                | ۱/۱۲  |
| ۴    | W05             | ۲۰                   | ۴                | ۱/۱۸  |
| ۵    | W07             | ۱۵                   | ۸                | ۱/۶۳  |
| ۶    | W08             | ۱۵                   | ۸                | ۱/۶۳  |
| ۷    | W09             | ۲۵                   | ۸                | ۱/۵۲  |

#### ۴-۶-۲ ارزیابی رابطه خصوصیات هیدرولیکی با شاخص چینه‌شناسی

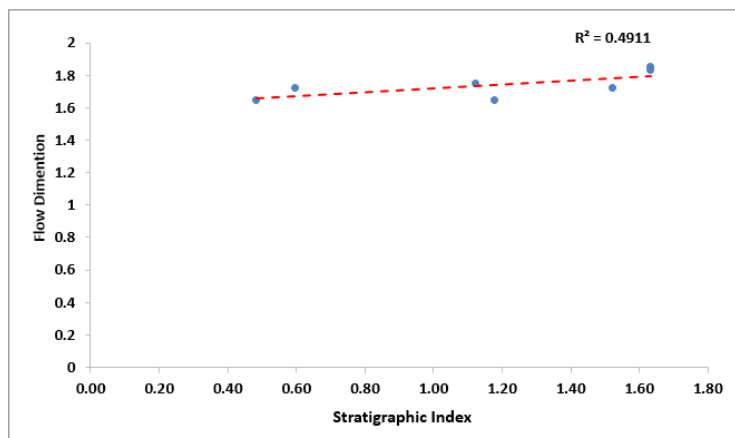
برای ارزیابی رابطه خصوصیات هیدرولیکی چاه‌های پمپاژ با شاخص چینه‌شناسی در سازند تیرگان، از اطلاعات هیدرولیکی به‌دست آمده از هفت حلقه چاه پمپاژ حفر شده در سازند تیرگان استفاده شده است. از مهم‌ترین

این خصوصیات هیدرولیکی شامل، درجه ناهمگنی، بعد جریان، شاخص مجرای کارست، آبدهی چاه، افت ویژه و قابلیت انتقال آبخوان استفاده شده است. شکل‌های ۴-۳۴ الی ۴-۴۲ رابطه خصوصیات هیدرولیکی چاه‌های پمپاژ با شاخص چینه‌شناسی در سازند تیرگان را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل‌ها ملاحظه می‌شود، رابطه خصوصیات هیدرولیکی چاه‌های پمپاژ با شاخص چینه‌شناسی در سازند تیرگان کم و بیش همبستگی بالایی را نشان می‌دهد. همچنین ملاحظه می‌شود که اطلاعات چاه شماره W09 به دلیل ناهمگنی آبخوان به عنوان یک داده پرت شناخته شده و در صورت حذف آن نتایج به‌دست آمده از رابطه خصوصیات هیدرولیکی چاه‌های پمپاژ با شاخص چینه‌شناسی در سازند تیرگان از همبستگی بسیار بالاتری برخوردار هستند. در شکل ۴-۳۴ مشاهده می‌شود که نسبت ناهمگنی با شاخص چینه‌شناسی نسبت عکس دارند. این مسئله بیانگر این است که هرچه ترکیب ضخامت لایه و شیب آن مناسب باشد (شاخص چینه‌شناسی بیشتر) درجه ناهمگنی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر آهک ضخیم لایه‌تر ناهمگنی کمتری نشان می‌دهد و اگر لایه‌بندی نازک‌تر باشد جریان به سمت مجرای شدن خواهد رفت.



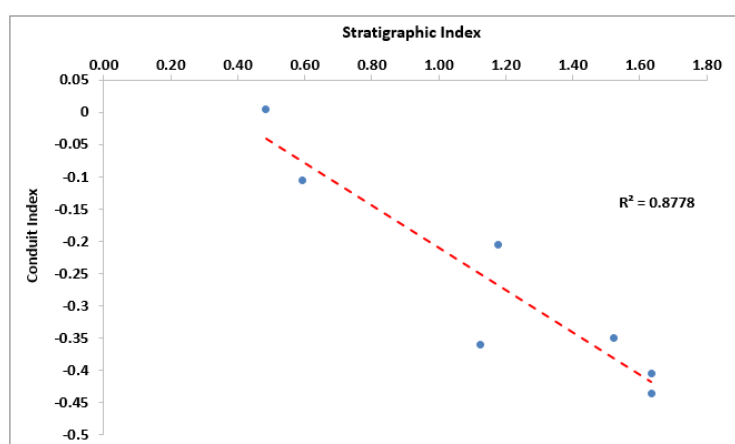
شکل ۴-۳۴- رابطه نسبت ناهمگنی و شاخص چینه‌شناسی

در شکل ۴-۳۵ رابطه بعد جریان با شاخص چینه‌شناسی خطی است با افزایش شاخص چینه‌شناسی بعد جریان افزایش یافته و محیط کارستی به سمت مجاری متصل بیشتری میل کرده است که بروز این ویژگی در لایه‌های آهکی نازک کمتر بوده و در آهک یکدست و ضخیم لایه‌تر منطقی‌تر خواهد بود زیرا لایه‌های جدا کننده و ناپیوستگی کمتری وجود دارد.



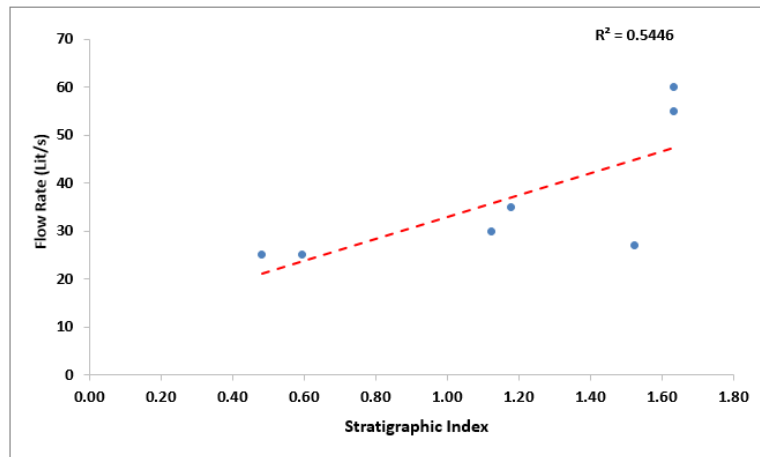
شکل ۴-۳۵- رابطه بعد جریان و شاخص چینه‌شناسی

در شکل ۴-۳۶ بین شاخص چینه‌شناسی و شاخص مجرای نیز نسبت عکس برقرار است. با کاهش نسبت مجرای کارست عملاً جریان به سمت محیط افشان میل می‌کند و چاه‌هایی که شاخص چینه‌شناسی بالاتری دارند در سیستم افشان واقع شده‌اند. زیرا ترکیب ضخامت و شیب مناسب باعث کاهش تشکیل مجاری و پیشرفت انحلال در آنها خواهد بود.



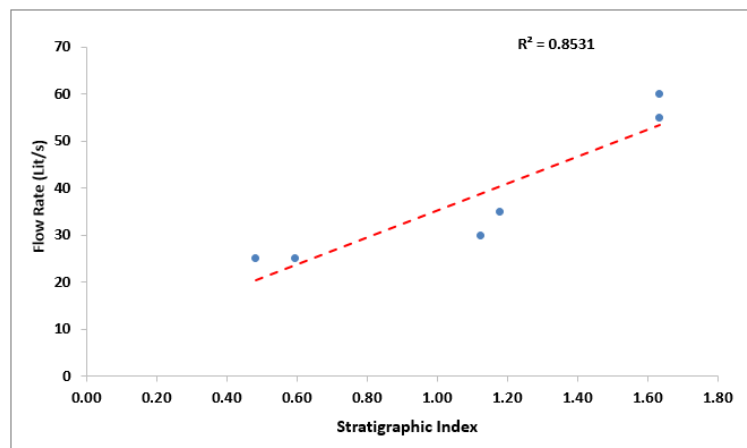
شکل ۴-۳۶- رابطه شاخص مجرای و شاخص چینه‌شناسی

شکل ۴-۳۷ رابطه شاخص چینه‌شناسی با دبی چاه‌ها و لحاظ چاه شماره W09 را نشان می‌دهد. به دلیل ناهمگنی محیط کارست این چاه رفتاری مشابه سایر چاه‌ها ندارد و بایستی نادیده گرفته شود. ضخامت اشباع چاه شماره W09 حدود ۳۶ متر می‌باشد که نسبت به چاه‌های مجاور خود یعنی W08 و W07 حدود ۱۴ متر و ۱۷ متر کمتر است. این مسئله باعث کاهش آبدهی شدید آن شده و داده‌های آن هم‌خوانی با چاه‌های مجاور ندارد و به نظر می‌رسد تا افق مشابه دو حلقه چاه حفاری نشده است.



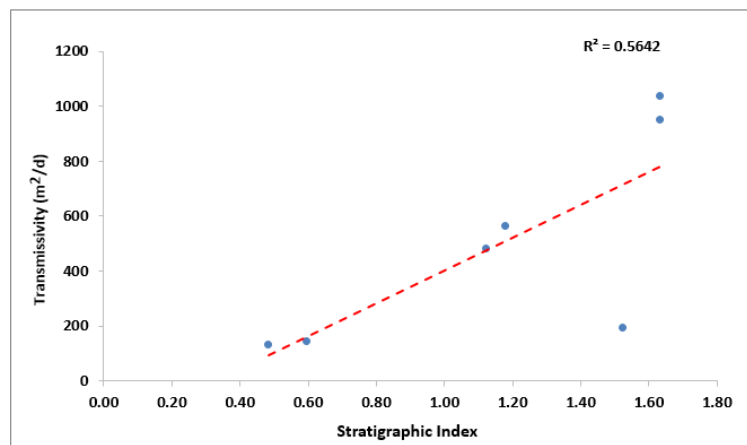
شکل ۴-۳۷- رابطه آبدهی و شاخص چین‌شناسی با چاه W09

با توجه به وضعیت چاه شماره W09 و نادیده گرفتن آن نتیجه در شکل ۴-۳۸ نشان داده شده است. با حذف داده چاه رابطه همبستگی خوبی بین دبی چاه‌ها با شاخص چین‌شناسی برقرار می‌شود که منطقی‌تر است.



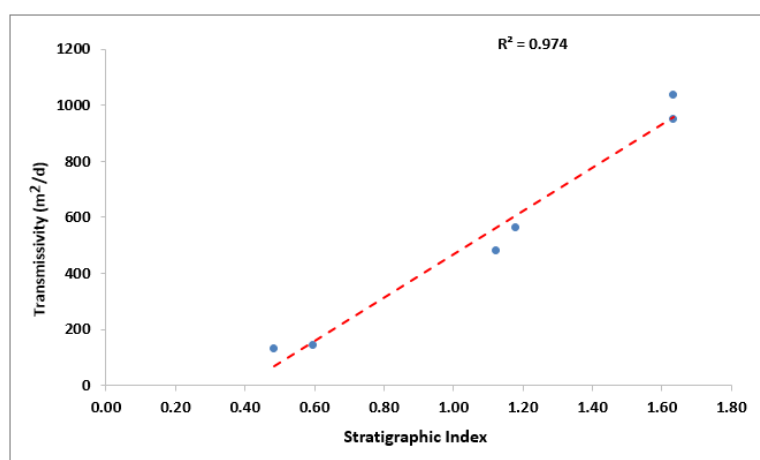
شکل ۴-۳۸- رابطه دبی و شاخص چین‌شناسی بدون چاه W09

در شکل ۴-۳۹ نیز رابطه ضریب قابلیت انتقال و شاخص چین‌شناسی نشان داده شده است که داده‌های چاه W09 نیز دخالت دارد و به دلیل پیش گفته ارتباط بین دو شاخص را کاهش می‌دهد.



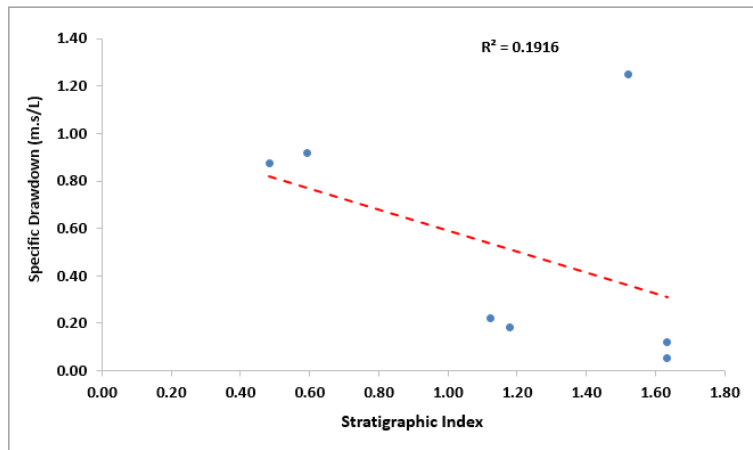
شکل ۴-۳۹- رابطه ضریب قابلیت انتقال با شاخص چینه‌شناسی با چاه W09

از آنجا که ضخامت اشباع تاثیر مستقیمی در قابلیت انتقال دارد و در این چاه نسبت به چاه‌های مجاور کمتر است در محاسبه نادیده گرفته شده است. اگر داده این چاه نادیده گرفته شود رابطه بین دو شاخص منطقی‌تر خواهد شد. نتیجه در شکل ۴-۴۰ نشان داده شده است.



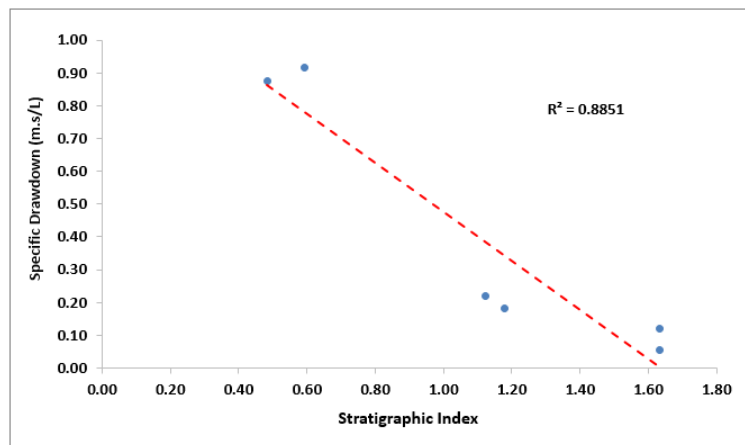
شکل ۴-۴۰- رابطه ضریب قابلیت انتقال و شاخص چینه‌شناسی بدون چاه W09

در شکل ۴-۴۱ نیز رابطه افت ویژه و شاخص چینه‌شناسی با یکدیگر نشان داده شده است. با در نظر گرفتن داده چاه W09 همبستگی مناسبی بین شاخص‌ها وجود ندارد. میزان افت در این چاه بالا بوده است. در این شکل نیز رابطه همبستگی مناسبی نشان نمی‌دهد.



شکل ۴-۴۱- رابطه افت ویژه و شاخص چینه‌شناسی با چاه W09

و با حذف داده چاه رابطه افت ویژه و شاخص چینه‌شناسی منطقی می‌شود که در شکل ۴-۴۲ دیده می‌شود.



شکل ۴-۴۲- رابطه افت ویژه و شاخص چینه‌شناسی بدون چاه W09

از جمع‌بندی همه اطلاعات پیش گفته امکان مقایسه اطلاعات هیدرولیکی با واحدهای سنگ چینه‌ای و واحدهای هیدرواستراتیگرافی فراهم شده است. در سازند تیرگان بافت‌های سنگی مختلف مقادیر متفاوتی از تراوایی را نشان می‌دهند. دو شاخص مجرای کارست و شاخص چینه‌شناسی ارتباطی منطقی و مناسبی با سایر ویژگی‌های هیدرولیکی چاه‌ها که شامل قابلیت انتقال، بعد جریان، نسبت ناهمگنی، دبی و افت ویژه برقرار نموده‌اند. تاثیر ضخامت و شیب لایه‌بندی به خوبی در سیستم جریان و در تراوایی و آبدهی چاه‌ها قابل

مشاهده است. چاهی که عمود بر لایه آبدار حفر شده باشد بالاترین آبدهی را دارد و هرچه محور چاه با لایه آبدار زاویه بسازد طبیعی است که آبدهی کاهش می‌یابد.

ضخامت زیاد لایه‌های آهکی باعث ایجاد جریان به صورت افشان شده که به موازات آن بعد جریان نیز افزایش نشان می‌دهد. چاه‌های W01, W02 در شمال پتروشیمی نزدیک به شیب لایه‌بندی حفر شده‌اند و در واقع از ضخامت ظاهری لایه آهکی عبور کرده‌اند بنا بر این با افزایش عمق چندان به آبدهی آنها اضافه نشده است. چاه‌های منطقه قارلق با شیب مناسب تری نسبت به لایه آبدار حفر شده‌اند که دارای ویژگی‌های هیدرولیکی مناسب‌تری هستند. در این منطقه چاه‌هایی که عمق بیشتری دارند دارای آبدهی بیشتر هستند که ناشی از ضخامت قطع شده توسط چاه است. در منطقه نجف‌آباد چاه‌ها تقریباً با یک عمق حفاری شده‌اند. در این محل آبدهی چاه به ضخامت لایه اشباع وابسته هستند.

سیستم غالب جریان در منطقه بر اساس شاخص مجرای کارست سیستم افشان می‌باشد. از سوی دیگر شاخص چینه‌شناسی ترکیبی از ضخامت و شیب لایه است، می‌توان گفت در لایه‌هایی که آهک ضخیم لایه است بعد جریان به سمت اتصالات بیشتر رفته و افزایش نشان می‌دهد. در بخش‌هایی که آهک نازک لایه بوده جریان از حالت افشان دور شده و به سمت مجرای پیش رفته است. جمع سیستم افشان و تاثیر ضخامت و شیب لایه‌بندی در میزان آبدهی چاه‌ها منعکس شده است. در مناطقی که سیستم غالب افشان است میزان آبدهی چاه‌ها نیز به مراتب بیشتر است.

## فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج حاصل از مطالعات چینه‌شناسی، محیط رسوبی، بررسی‌های ژئوفیزیک و پمپاژ منجر به شناسایی واحدهای سنگی با تراوایی متفاوت در سازند تیرگان شده و هیدرواستراتیگرافی این سازند در بخشی از کپه‌داغ غربی به‌دست آمده است. برای مطالعات بعدی بر روی این سازند و برنامه‌های پی‌جویی، اکتشاف و مدیریت منابع آب در این سازند نیز پیشنهادهایی ارائه شده است.

## ۵-۱ نتیجه‌گیری

سازند تیرگان در این بخش از کپه‌داغ غربی یکی از مهمترین سازندهای کارستی است. منابع آب مهمی در این سازند وجود دارد که از طریق حفر چاه در منطقه مطالعه شده مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. سازند تیرگان به صورت یک‌پارچه از آهک تشکیل نشده است، بلکه به صورت توالی از آهک با ویژگی‌های کارستی و آهک مارنی و مارن برونزد دارد.

محیط رسوبی نهشته شدن این سازند نقش اساسی در ایجاد پتانسیل توسعه کارست در لایه‌های آهکی داشته است. این سازند در یک پلاتفرم آهکی از نوع هموکلینال نهشته شده است. در بخش‌های پایینی سازند تیرگان حضور مواد تخریبی از جمله دانه‌های کوارتز نقش اصلی در انحلال‌ناپذیری سازند ایفا نموده است. در بخش‌های بالایی از درصد مواد تخریبی کاسته شده و هم‌چنین به سبب تنوع در مولفه‌های زیستی در زمان تشکیل تیرگان آهنگ رسوبگذاری بیشتر شده و پیامد آن تشکیل لایه‌های ضخیم آهکی بوده است. هم‌چنین رسوب لایه‌های نفوذناپذیر مارنی هم باعث کاهش گردش آب در لایه‌های آهکی شده و هم در کانالیزه کردن مسیر آب بسیار تاثیر گذار بوده به طوریکه به نظر می‌رسد جریان آب زیرزمینی در سازند تیرگان در امتداد سطوح لایه‌بندی صورت می‌گیرد و تنها از طریق درز و شکافها و شکستگی‌های عمود بر لایه‌بندی امکان حرکت عمودی آب فراهم می‌شود.

ویژگی‌های ساختاری منطقه به گونه‌ای عمل کرده‌اند که نفوذ آب به سازند تیرگان را کنترل می‌نمایند. ساختار تاکدیدی و ناودیدی، باعث شده است که سازند سرچشمه که از نظر هیدروژئولوژی نفوذناپذیر است و بر روی

سازند تیرگان قرار دارد کنار رفته و یا در شیب تند تاقدیس‌ها دچار فرسایش شده و امکان گردش آب در واحدهای کربناتی تیرگان را فراهم نموده است. به سبب لیتولوژی متاثر از محیط رسوبی در سازند تیرگان واحدهایی منطبق بر لیتولوژی در این سازند شکل گرفته است که دارای تراوایی‌های بسیار متفاوت از یکدیگر هستند. به همین سبب می‌توان این سازند را برمبنای هیدرواستراتیگرافی تقسیم‌بندی نمود. عوارض مورفولوژیکی کارست در منطقه شامل فروچاله‌ها، دره‌های خشک، غارها و حفرات انحلالی، کارن و گرایک هستند. تغذیه در سازند تیرگان از طریق فروچاله‌ها و هم از طریق دره‌های خشک و به صورت مستقیم صورت می‌گیرد. می‌توان گفت در آن بخش از سازند که عوارض مورفولوژیکی مانند فروچاله دیده می‌شود کارست توسعه بیشتری دارد.

#### ۵-۱-۱ هیدرواستراتیگرافی واحدهای سنگی سازند تیرگان

بر مبنای مطالعات محیط رسوبی انجام شده، سازند تیرگان در این بخش از منطقه کپه‌داغ غربی از توالی رسوبی و از پنج واحد سنگی تشکیل شده است. از این پنج واحد دو واحد سنگی، مارنی و مارنی-آهکی و سه واحد سنگی آهکی می‌باشند. واحدهای سنگی آهکی تراوا و واحدهای سنگی مارنی و مارنی-آهکی ناتراوا یا نیمه‌تراوا می‌باشند. میزان تراوایی در واحدهای آهکی از پایین به بالای سازند تا چندین برابر افزایش می‌یابد، به طوری که میزان تراوایی در واحد سنگی بالایی از ۱۵/۰۴ تا ۳/۸۷ متر در روز در بخش میانی کاهش می‌یابد و به دلیل وجود ناخالصی در لیتولوژی واحدهای سنگی پایین انتظار می‌رود اعداد تراوایی از این میزان نیز بسیار کمتر شود. این تفاوت در تراوایی در وهله اول ناشی از لیتولوژی است که خود نتیجه محیط رسوبی و وقایع دیاژنز بعدی بوده است.

سازند شوربچه در قاعده برش اندازه‌گیری شده از رسوبات قاره‌ای قرمز رنگ ماسه‌ای و شیلی-ماسه‌ای تشکیل شده بنا بر این در برابر انحلال بسیار مقاوم عمل کرده و اصولاً آبخوانی در آن شکل نخواهد گرفت و بررسی‌ها صحت ادعا را نشان می‌دهند. در این منطقه نیز این سازند نقش لایه کاملاً نفوذ ناپذیر را به عهده دارد. به نظر

می‌رسد سطح اساس فرسایش در این منطقه به این سازند منتهی شود و تنها جریان آب به بخش‌های پایین‌تر از طریق شکستگیها خواهد بود.

واحد سنگی آهکی پایینی (A) به سبب تاثیرپذیری از سازند شوریه حاوی ذرات تخریبی مانند کوارتز می‌باشد. این دانه‌های کوارتز هم در خمیره سنگ دیده می‌شوند و هم به صورت هسته آبیده‌های اولیه. در نتیجه وجود سیلیس که در برابر انحلال بسیار مقاوم است دور از انتظار نیست که این واحد آهکی دارای کمترین تراوایی در بین سه واحد آهکی باشد. وجود ساخت چینه‌بندی متقاطع نشان می‌دهد این واحد بخشی از ساحل دریا بوده و در تماس مستقیم با سازند قاره‌ای شوریه قرار داشته است. بنا بر این در رتبه‌بندی بین دو واحد آهکی دیگر این واحد ضعیف‌ترین آبخوان را تشکیل داده است.

واحد سنگی دوم از پایین (B) یک واحد بیشتر مارنی است که دارای برخی میان لایه‌های آهکی و آهکی مارنی است. این واحد سنگی با این لیتولوژی نقش واحد نفوذناپذیر را بازی می‌کند و از طرفی به دلیل ضخامت قابل توجه عبور جریان از آن به سمت لایه پایین‌تر یعنی واحد سنگی A در امتداد شکستگیهای بزرگ خواهد بود. ممکن است در اثر تغییر رخساره و افزایش میزان آهک این واحد به یک لایه نیمه‌نفوذپذیر تبدیل شود.

در واحد سنگی سوم از پایین (C) و بر اساس ریزرخساره‌ها از میزان ذرات تخریبی کاسته می‌شود. بدیهی است به موازات آن پتانسیل انحلال‌پذیری افزایش خواهد یافت. لیتولوژی نسبتاً ضخیم لایه آهکی هم نشانگر پتانسیل بالاتر در مقابل انحلال است. بنا بر این به صورت نسبی این واحد یک آبخوان متوسط خواهد بود و در صورت نفوذ آب از لایه مارنی بالایی تشکیل کارست مناسب وجود خواهد داشت. علاوه بر این جریان در این واحد می‌تواند کاملاً کانالی شده و گردش طولانی‌تر آب را به همراه داشته باشد.

واحد سنگی بعدی واحد D است که آنهم به لحاظ لیتولوژی مارنی و مارنی-آهکی است. این واحد سنگی هم به دلیل ضخامت و هم به دلیل موقعیت چینه‌شناسی برای واحد سنگی بالایی بسیار حایز اهمیت است. این لایه نیز به دلیل لیتولوژی و ریزرخساره‌ها لایه‌ای است نفوذ ناپذیر.

آخرین واحد سنگی آهکی (E) به گواه ریزرخساره‌ها و چینه‌شناسی دارای بهترین لیتولوژی برای کارستی شده است. ضخامت آهک و خلوص نسبی خوب آن که در لاگ‌های ژئوفیزیک نیز مشهود است باعث تشکیل آبخوانی

مناسب شده است. پرآب‌ترین چاه‌ها در این لایه حفر شده‌اند و عوارض مورفولوژی کارست نسبتاً پیش‌رفته در آن دیده می‌شوند. چنانچه سازند سرچشمه فرسایش یافته باشد این لایه در معرض نفوذ از بارندگی قرار می‌گیرد. این واحد سنگی در یال‌های تاقدیس‌ها بروز دارد. نتایج هیدرواستراتیگرافی انجام شده و تعمیم یافته بر مبنای ریزرخساره‌ها و لیتولوژی و نتایج پمپاژ در شکل ۵-۱ نشان داده شده است.

| Age                  | Formation | Depth(m) | Samples | Informal rock unit     | Lithology Log                                                                       | Field description                                                                         | Hydrostratigraphy              | Permeability                          |
|----------------------|-----------|----------|---------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| BARREMIAN<br>TIRGAN  | APTIAN    | 0        | B1      | E (Upper limestone)    |    | Very Thick limestone(10-23m), gray, fossiliferous, coarse - grained                       | <b>Very good Karst Aquifer</b> | <b>K= 12.22<br/>15.04<br/>(m/day)</b> |
|                      |           | 50       |         |                        |    | Thick limestone(10-15m), cream to yellow, medium to coarse - grained                      |                                |                                       |
|                      |           | 100      |         |                        |    | Very thick to thick limestone(5-12m), gray, solutionally fractured, orbitolina, Oolitic   |                                |                                       |
|                      |           | 150      |         |                        |    | Thick limestone(6-13m), light gray, Orbitolina, coarse - grained                          |                                |                                       |
|                      |           | 200      | C12     | D (Up Marly-limestone) |    | Thick to very thick limestone(8-13m) Light cream, thin shale                              | <b>Aquiclude</b>               | -----                                 |
|                      |           | 250      | C13     |                        |    | Thin shale layer                                                                          |                                |                                       |
|                      |           | 300      | C31     |                        |   | Interbed limestone(1.5-6m) orbitolina bearing                                             |                                |                                       |
|                      |           | 350      | C32     |                        |  | Thin to medium green marlstone shale layers/interbed limestone orbitolina bearing         |                                |                                       |
|                      |           | 400      | D9      | C (Middle-limestone)   |  | Thick light green marlstone (11-14m) calcareous interbed                                  | <b>Modrate Karst Aquifer</b>   | <b>K= 3.87<br/>6.76<br/>(m/day)</b>   |
|                      |           | 450      | D10     |                        |  | Thick to very thick limestone(7-15m) Light gray, orbitolina bearing                       |                                |                                       |
|                      |           | 500      | D17     |                        |  | Thick to very thick limestone(8-11m) Light gray/ light cream, interbedded marly-limestone |                                |                                       |
|                      |           | 550      | D19     |                        |  | Shale layer(8m)                                                                           |                                |                                       |
| NEOCOMIAN<br>SHURJEH |           | 0        | D38     | B(L- Marly limestone)  |  | Interbedded marly-limestone(2m)                                                           | <b>Aquiclude</b>               | -----                                 |
|                      |           | 50       | D39     |                        |  | Thick light green marlstone (18m)                                                         |                                |                                       |
|                      |           | 0        |         | A (Lower limestone)    |  | Thick interbedded marly-limestone(5m)                                                     | <b>Poor Karst Aquifer</b>      | <b>K&lt; 1.22<br/>(m/day)</b>         |
|                      |           | 50       |         |                        |  | Thick dark gray marlstone (25m)                                                           |                                |                                       |
|                      |           | 0        |         |                        |  | Very thick limestone(10-31m), dark gray, fossiliferous                                    | <b>Aquifuge</b>                | -----                                 |
|                      |           | 50       |         |                        |  | Thick to very thick limestone(10-12m) Light gray/ light cream to pink                     |                                |                                       |
|                      |           | 0        |         |                        |  | Thick to very thick limestone(7-15m) Light gray interbedded marly-limestone fossiliferous |                                |                                       |
|                      |           | 50       |         |                        |  | Sand, sandy shale, cross bedding sand                                                     |                                |                                       |

شکل ۵-۱- هیدرواستراتیگرافی سازند تیرگان

## ۵-۱-۲ نقش هیدرواستراتیگرافی در توسعه کارست

در بیشتر سازندهای آهکی لایه‌لایه مانند سازند تیرگان توسعه کارست به صورت مستقیم به گردش جریان آب در سطوح ناپیوستگی بستگی دارد. در این منطقه چون سازند تیرگان از تناوبی از لایه‌های نفوذپذیر و نفوذناپذیر تشکیل شده است، نقش هیدرواستراتیگرافی هدایت جریان آب در مسیرهای مشخصی است که به لایه‌های لیتولوژیکی محدود می‌شوند. بایستی گفت نقش واحدهای ناتراوا مارنی و مارنی-آهکی هم بسیار مهم است، چون گردش آب به وسیله این لایه‌ها محدود و محصور به لایه‌های تراوا در سازند تیرگان شده است. در زیر لایه مستعد کارستی بالایی تیرگان یک لایه مارنی وجود دارد و در بالای آن نیز سازند سرچشمه واقع شده است. آب نفوذ یافته از طریق درز و شکافها به سمت این لایه‌ها هدایت می‌شود و به سبب شیب لایه‌بندی حرکت در مسیر لایه آهکی صورت می‌گیرد و جریان ساندویچی شکل گرفته و تداوم آن باعث توسعه کارست به ویژه در بخش بالایی سازند تیرگان شده است.

#### ۵-۱-۳ نقش هیدرواستراتیگرافی در سیستم غالب جریان

بر اساس اطلاعات به‌دست آمده سیستم جریان در این منطقه بیشتر افشان و در برخی مناطق مجرای-افشان است. در بخش‌هایی که واحد سنگی آهکی سازند تیرگان دارای ضخامت قابل توجه است، مانند بخش‌های بالایی سازند تیرگان در شمال شرق و جنوب غرب منطقه مورد مطالعه، سیستم جریان افشان است، در این منطقه سازند سرچشمه از بین رفته و لایه برهنه آهکی در معرض گردش و نفوذ آب قرار گرفته است. پرآب‌ترین چاه‌ها در این منطقه قرار دارند. در این منطقه گرچه سازند بالایی از بین رفته است اما واحد مارنی بالایی به عنوان لایه نفوذ ناپذیر در زیر آن قرار دارد. این مسئله باعث انحلال هرچه بیشتر آب در این واحد سنگی آهکی شده به طوریکه اتصالات زیادی در آن شکل گرفته است و سیستم افشان غالب شده است. به طور مشابه در واحد سنگی آهکی میانی نیز این مسئله اما با شدت کمتر رخ داده است.

#### ۵-۱-۴ نقش هیدرواستراتیگرافی در آبدی پایدار چاه‌ها

کنترل جریان در لایه‌های آهکی و نقش هیدرواستراتیگرافی در این باره سبب ایجاد آبخوان آهکی مناسبی در منطقه شده است. چاه‌های آب حفر شده در مناطق نجف‌آباد که در بخش آهک بالایی حفر شده بعد از گذشت بیش از بیست سال آنچنان دچار افت نشده‌اند. اما پایداری آبدهی چاه‌ها در سایر مناطق به شدت کاهش یافته است. چاه شماره W07, W08 با آبدهی اولیه نزدیک به ۶۰ لیتر در ثانیه (دبی بهره‌برداری) از زمان اولین بهره‌برداری تا بیست سال بعد (۱۳۹۴-۱۳۷۴) دچار کمترین افت و در محدوده بسیار کم (کمتر از ۲۰ درصد) بوده‌اند. هم‌چنین چاه‌های W09 و W10 دارای آبدهی کمتری نسبت به دو چاه قبلی هستند اما پایداری آبدهی در آنها نیز در محدوده بسیار کم بوده است.

#### ۵-۱-۵ نقش هیدرواستراتیگرافی در تعیین محل چاه‌های کارستی

با بررسی صورت گرفته در منطقه مورد مطالعه مشخص گردید که چاه‌های متعددی در سازند تیرگان حفر شده‌اند که ناموفق بوده‌اند. علت ناموفقیت این چاه‌ها جانمایی نادرست آنها در ارتباط با هیدرواستراتیگرافی سازند تیرگان می‌باشد. سازند تیرگان همانگونه که گفته شد سازندی لایه لایه بوده و از تناوب آهک‌های ضخیم لایه با خلوص بالا تا آهک‌های نازک لایه و لایه‌های مارنی و مارنی-آهکی تشکیل شده است، بنا بر این در مکان یابی محل حفر ابتدا بایستی به این نکته توجه کرد که چاه‌ها در چه افقی از تیرگان حفر می‌شوند. چاه‌هایی که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند هرکدام آبدهی متفاوتی دارند، با اینکه در فاصله کمی از یکدیگر قرار دارند.

همانگونه هیدرواستراتیگرافی تیرگان نشان می‌دهد از پایین به بالا واحدهای سنگی آهکی شرایط بهتری برای حفر چاه دارند زیرا آبخوان‌های تشکیل شده در هر یک از این واحدهای سنگی شرایط مناسب‌تری از نظر هیدرواستراتیگرافی داشته‌اند. بنا بر این در این منطقه توجه به هیدرواستراتیگرافی برای تعیین محل چاه ضرورت اساسی دارد. در مناطق مشابه دیگر لازم است تطابق نسبی جانبی با سازند تیرگان انجام پذیرد حداقل انجام مطالعات رسوب‌شناسی و محیط رسوبی از طریق برداشت نمونه‌های سنگی بسیار حیاتی است.

## ۵-۱-۶ ارزیابی کمی هیدرواستراتیگرافی

از آنجا که چینه‌شناسی در آبدهی چاه‌های حفر شده در سازند نقش اساسی دارد و به منظور استفاده کاربردی از نتایج هیدرواستراتیگرافی لازم است ارتباط چینه‌شناسی و آبدهی به صورت کمی بیان شود. برای ارزیابی کمی نقش چینه‌شناسی در این مطالعه دو شاخص جدید پیشنهاد شده است. به منظور کمی کردن رابطه بعد جریان و ناهمگنی و در نهایت اظهار نظر درباره نوع جریان غالب، مفهوم و شاخص مجرای کارست (KCI) پیشنهاد شده است. این شاخص در کرانه +۱ و -۱ قرار دارد. هرچه عدد به سمت -۱ میل کند جریان غالب افشان خواهد بود و هرچه به سمت +۱ میل کند سیستم غالب جریان مجرای است عدد صفر تیز بیان می‌کند سهم جریان مجرای و افشان مساوی است.

شاخص پیشنهادی جدید دیگر شاخص چینه‌شناسی ( $S_i$ ) است. چون آبدهی هر چاه متأثر از ضخامت اشباع قطع شده و شیب لایه‌بندی است، این شاخص برای بیان ارتباط تاثیر ضخامت و شیب لایه‌بندی با سایر خصوصیات هیدرولیکی چاه و آبخوان ابداع شده است. این خصوصیات شامل درجه ناهمگنی، بعد جریان، شاخص مجرای کارست، آبدهی چاه، افت ویژه و قابلیت انتقال آبخوان هستند. تاثیر تمامی موارد بالا در آبدهی چاه‌ها منعکس شده به طوریکه چاه‌های آب حفر شده در واحدهای آهکی ضخیم‌تر و باشیب مناسب تا چندین برابر بیشتر از چاه‌های حفر شده در لایه‌های نازک و با شیب نامناسب است.

## ۵-۲ پیشنهادهایی جهت کار بیشتر

تامین آب از طریق حفر چاه‌های آهکی هزینه‌بر و زمان‌بر است. زیرا سازند تیرگان همانطور که گفته شد لایه‌لایه و ناهمگن است. به منظور شناخت هرچه بیشتر این سازند و کاهش زمان تامین آب و جلوگیری از حفر چاه‌های ناموفق پیشنهادهایی به شرح زیر ارائه می‌شود:

- توجه به هیدرواستراتیگرافی سازند تیرگان در جانمایی چاه‌های آینده در منطقه کپه‌داغ

- بررسی و شناخت اولیه سازند تیرگان در مناطق مختلف کپه‌داغ از دیدگاه هیدرواستراتیگرافی از طریق انجام مطالعات و پژوهش‌های کاربردی
- به‌کارگیری شاخص‌های جدید معرفی شده برای مطالعات سازند تیرگان در سایر مناطق
- بررسی ساختار تکتونیکی دقیق‌تر در مناطق مختلف کپه‌داغ به منظور بررسی اثرات ناپیوستگی در هیدرواستراتیگرافی سازند تیرگان
- انطباق برش‌های چینه‌شناسی از منظر هیدرواستراتیگرافی در هر بخش از کپه‌داغ
- مطالعه و بررسی مبادی تغذیه سازند تیرگان از دیدگاه هیدرواستراتیگرافی
- بررسی گسترده و دقیق‌تر مورفولوژی کارست در منطقه و تهیه نقشه از آنها در مقیاس مناسب
- ثبت دقیق داده‌ها و اطلاعات حفاری از همه تلاش‌ها برای حفاری چاه و بررسی علت عدم موفقیت چاه‌ها از دیدگاه هیدرواستراتیگرافی
- طراحی شبکه رفتارسنجی آب زیرزمینی کارست با لحاظ شرایط ناهمگنی و لایه‌لایه بودن سازند تیرگان در کپه‌داغ
- انجام مطالعات دقیق‌تر کمی و کیفی چشمه‌های خارج شده از سازند تیرگان در ارتباط با مبادی تغذیه و هیدرواستراتیگرافی

- ۱ افراسیابیان ا. (۱۳۷۷) اهمیت مطالعات و تحقیقات منابع کارست در ایران، مجموعه مقالات دومین همایش جهانی آب در سازندهای کارستی، کرمانشاه.
- ۲ افشارحرب، ع. (۱۳۷۳) زمین‌شناسی کپه‌داغ. طرح تدوین کتاب زمین‌شناسی ایران، شماره ۱۱، سازمان زمین‌شناسی ایران ۲۷۵ ص.
- ۳ آقانباتی، ع. (۱۳۸۳) زمین‌شناسی ایران، تهران: انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور
- ۴ آقاداتاشی ابهری؛ هاشمی. م.، آقانباتی، ع. (۱۳۸۰) بررسی و مطالعه بیوفاسیس و لیتوفاسیس سازند تیرگان در بخش خاوری کپه‌داغ. بیستمین گردهمایی علوم زمین. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ص ۳۷۶.
- ۵ پورسلطانی، ر. و همکاران (۱۳۹۸) تفسیر محیط رسوبی، دیاژنز و کیفیت مخزنی سازند تیرگان به عنوان سنگ مخزن احتمالی در خاور حوضه رسوبی کپه‌داغ، رسوب‌شناسی کاربردی، دانشگاه بوعلی همدان، دوره ۵ شماره ۱۰.
- ۶ رحیم‌پورناب، ح. (۱۳۸۹) سنگ‌شناسی کربناته (ارتباط دیاژنز و تکامل تخلخل)، انتشارات دانشگاه تهران، ۴۸۷ ص.
- ۷ ریوندی. ب.؛ و همکاران (۱۳۸۹) رخساره‌های رسوبی و چینه‌نگاری سکانسی سازند تیرگان در شرق حوضه کپه‌داغ (دره خور، شمال شرق مشهد)، رخساره‌های رسوبی، دانشگاه فردوسی مشهد، جلد ۳- صفحه ۲۳-۲۴.
- ۸ شاهمیر. م. (۱۳۹۵) لیتواستراتیگرافی و بیواستراتیگرافی سازند تیرگان در برشهای چینه‌شناسی بیگان و باغچق (کپه‌داغ غربی) دانشگاه شهید بهشتی، پایان نامه کارشناسی ارشد.
- ۹ غیاثوند. م.، و همکاران (۱۳۹۸) زیست‌چینه‌نگاری سازند تیرگان در حوضه کپه‌داغ: برش‌های چینه‌شناسی روستای تیرگان و امیرآباد. پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی سال سی و پنجم، شماره پیاپی ۴۷، شماره اول، ص ۳۶-۲۳.
- ۱۰ جوانبخت. م.، و همکاران (۱۳۹۷) ژئوشیمی، فرایندهای دیاژنزی سازند تیرگان در خاور حوضه رسوبی کپه‌داغ، شمال‌خاوری ایران، رسوب‌شناسی کاربردی، دوره ۶، شماره ۱۲.
- ۱۱ کریمی وردجانی. ح. (۱۳۸۹). هیدروژئولوژی کارست "مفاهیم و روشها" مهندسین مشاور آب پوی. ۴۱۴ ص.
- ۱۲ موسوی‌زاده؛ و همکاران (۱۳۸۷) رخساره‌های رسوبی و چینه‌نگاری سازند تیرگان در برش‌های جوزک و چمن‌بید در غرب حوضه رسوبی کپه‌داغ و انطباق با نواحی شرق حوضه، مجله پژوهشی دانشگاه اصفهان (علوم پایه) جلد ۳۲، شماره ۳ ص ۵۶-۳۳.

- 13 Bachmann, F Hirsch (2006) Cretaceous Research, – Elsevier, Aban 14, 1394 AP – Science – 68 pages.
- 14 Batsche *et al.* (1970). Kombinierte Karst wasser unter suchungen im Gebiet der Donauversickerung (Baden–Württemberg) in den Jahren 1967–1969. Steir. Beitr. z. Hydrogeol., 22, 1–165
- 15 Bogli, A (1980) karst hydrology and physical speology: Berlin and New York, Springer – Verlag.
- 16 Bonacci, A. (1980) karst hydrology Springer verlage, Berlin W. Germany.
- 17 Brigaud, B. Durllet, C. Deconinck, J. F. Vincent, B. Thierry, J. and A. Trouiller (2009) The origin and timing of multiphase cementation in carbonate: Impact of regional scale geodynamic events on the Middle Jurassic Limestones diagenesis (Paris Basin, France). Sedimentary geology, 222/3–4: 161–180.
- 18 Castany G. (1984) Hydrogeological features of carbonate rocks .In: laMoreaux PE Wilson BM, Memon BA. (eds) Guide to the hydrology of carbonate rocks. IHP studies and reports in hydrology, vol. 41. UNESCO, Paris. pp. 47–67
- 19 Choquette, P. W. and N.P. James. (1987) Diagenesis in Limestones–The Deep Burial Environment. Geoscience Canada, 14: 3–35. Reservoir facies in the Campos Basin Cretaceous turbidities, offshore eastern Brazil. Marine and Petrol. Geol. 12 (7): 741–758.
- 20 Clark, A. K, Charles D. Blome, and Morris. R. (2014) Geology and Hydrostratigraphy of Guadalupe River State Park and Honey Creek State Natural Area, Kendall and Comal Counties, Texas, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.

- 21 Cooper, H.H. and C.E. Jacob. (1946) A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, *Am. Geophysics. Union Trans.*, vol. 27, pp. 526–534
- 22 Coquette, P.W. and Perry, L.C. (1970) Geological nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonate. *American Association of petroleum Geologists Bulletin*, 54, 50–207.
- 23 Cvijic, J. (1957) Underground hydrology and morphological evolution of karst, Special edition of Serbian Geographical Society Volume. 35, Beograd, Yugoslavia
- 24 Darton, N.H. (1906), *Geology and underground water resources of the Arkansas valley in eastern Colorado: U.S. Geological Survey Professional, Paper 52*, 90 p
- 25 Davis SN, DeWiest RJM. (1966) *Hydrogeology*. John Wiley and
- 26 Dillon P, Pavelic P, Wright M, Peter P, Nefiodovas A. (2001) Small-scale heterogeneity and anisotropy of a confined carbonate aquifer from triaxial tests on core samples. In: Wohnlich SA (ed) *New approaches characterizing groundwater flow*. Swets and Zeitlinger, Lisse, pp 815–819
- 27 Domenico, P.A. and F.W. Schwartz. (1990). *Physical and Chemical Hydrogeology*, John Wiley & Sons, New York, 824 p
- 28 Doveton, J.H. (1986), *Log analysis in subsurface geology: New York*, John Wiley and Sons, 2nd edition, 273 p
- 29 Dreybrodt, W., Gabrovsek, F. & Romanov, D. (2005). *Processes of speleogenesis: a modeling approach*. Ljubljana: Založba ZRC, 376 p
- 30 Dunham, R.J. (1962) Classification of carbonate rocks. *Memoirs. American Association of petroleum geologist*, 1, 21– 108.
- 31 Ede, D.P. (1972) Comments on seasonal fluctuation in the chemistry of limestone springs. By Shuster.E.T White W.B.J., *Hydro* 16:53–47
- 32 Eisenlohr, L., Meteva, K., Gabrovšek, F., Dreybrodt, W. (1999) The inhibiting action of intrinsic impurities in natural calcium carbonate minerals to their dissolution kinetics in aqueous.
- 33 Farid, A. *et al.* (2011) Hydrostratigraphy and hydrogeology of the western part of Maira area, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan: a case study by using electrical resistivity. *Environ Monit Assess DOI* 10.1007/s10661–012–2720–z
- 34 Fetter, C.W. (2001) *Applied Hydrogeology* (4th ed.), Prentice–Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 598p
- 35 Flügel E. (2004) *Microfacies analysis of limestone: Analysis, interpretation and application*, Springer, Berlin, 976 p.
- 36 Flügel, E. (2010) *Microfacies of carbonate rocks, analysis interpretation and application*, Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, Berlin, 976 p.
- 37 Ford, D. C. & Williams, P. W (2007) *Karst hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons Ltd., 562 P.
- 38 Ford, D.C., & Williams P W. (1989). *Karst Geomorphology and Hydrology*. London: Chapman & Hall 601 p.
- 39 Freeze. R.A., and Cherry, J.A. (1979) *Groundwater: Englewood Cliffs, NJ*, Prentice–Hall, 604 p
- 40 Füchtbauer H. Ed. (1988) *Sedimente und Sedimentgesteine*. Stuttgart: Schweizerbart, 1141 p
- 41 Gabrovsek, F., and W. Dreybrodt. (2000) A model of early evolution of karst conduits affected by subterranean CO<sub>2</sub> sources, *Environ. Geol.*, in press
- 42 Giudici, M. *et al.* (2012) Modelling hydrostratigraphy and groundwater flow of a fractured and karst aquifer in a Mediterranean basin (Salento peninsula, southeastern Italy) *Environmental Earth Sciences* volume 67, pages1891–1907
- 43 Goldscheider & Drew. (2007) *Methods in Kart Hydrogeology*, British Geological Survey Wallingford, UK.
- 44 Goldscheider N. (2005) Fold structure and underground drainage pattern in the alpine karst system Hochifen– Gottesacker. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 98, 1–1Hughes, T. H.; Memon, B. A.; Lamoreaux, P. E. (1994). Landfills in Karst Terrains. *Bull. Assoc.Eng. Geo*, XXXI, 203–8.
- 45 Jones MA, Pringle AB, Fulton IM, O'Neill S. (1999) Discrete fracture network modeling applied to groundwater resource exploration in southwest Ireland. *Fractures, Fluid Flow and Mineralization*, Geological Society of London, Spl. Publ.No. 155, pp. 83–103.

- 46 Jorgensen DG. (1991) Estimating geohydrologic properties from borehole geophysical logs. Groundwater Monitoring and review, Summer 1991, pp. 123–29
- 47 Gringarten AC. (1982) Flow–test evaluation of fractured reservoirs, Groundwater Hydrology (2nd ed) by D. K. Todd. Wiley, New York, 1980. 552 pp
- 48 Herold, T., Jordan, P. and Zwahlen, F. (2000) The influence of tectonic structures on karst flow patterns in karstified limestones and aquitards in the Jura Mountains, Switzerland. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 93(3), 349–62.
- 49 Hiscock, K. M., Dennis, P. F., Saynor, P. R. and Thomas, M. O. (1996). Hydrochemical and stable isotope evidence for the extent and nature of the effective Chalk aquifer of north Norfolk, U.K., *J. Hydrology* 180, 79–107.
- 50 Hughes, T. H.; Memon, B. A.; Lamoreaux, P. E. (1994). Landfills in Karst Terrains. *Bull. Assoc. Eng. Geo.*, XXXI, 203–8.
- 51 Huntoon P. W. (1977) Cambrian stratigraphic nomenclature and ground–water prospecting failures in the Hualapai Plateau, Arizona. *Ground Water* 15:426–33
- 52 Jacobson, R.L. & Langmuir, D. (1974) Controls on the quality variations of some carbonate spring waters. *Journal of hydrology* 23: 24–265.
- 53 Jacques Delleur (editor). (1999) *The Handbook of Groundwater Engineering*, Co–published by CRC Press LLC & Springer. Verlag GmbH & Co. KG.
- 54 James, N.P. & Choquette, P.W. (1999) Diagenesis in limestones – the meteoric diagenetic environment. *Geoscience, Canada*, 11: 161–194.
- 55 Javanbakht, M., *et al.* (2018) Carbonate diagenesis in the Barremian–Aptian Tirgan Formation (Kopet–Dagh Basin, NE Iran): Petrographic, geochemical and reservoir quality constraints. *Journal of African Earth Sciences* (2018), doi: 17.1016/j.jafrearsci.2018.04.016
- 56 Javanbakht, M., Ghazi, S., Moussavi–Harami, R., Mahboubi, A. (2013). Depositional history and sequence stratigraphy of Tirgan formation (Barremian–Aptian) in central Kopet Dag, NE Iran. *Journal of Geological Society of India* 82, 701–711.
- 57 Jennings, J.N. (1971) *Karst*. Boston M.I.T. press, 252. U.S.A.
- 58 Juckem, P.F, Randall J., Hunt, Anderson. M.P. (2006) Scale effects of hydrostratigraphy and recharge zonation on base flow– Groundwater, Vol. 44, No. 3—GROUND WATER—May–June 2006 (pages 362–370)
- 59 Hiscock, K.M. Lloyd, J.W. (1992) Palaeohydrogeological reconstructions of the North Lincolnshire Chalk, UK, for the last 140 000 years *Journal of Hydrology* Volume 133, Issues 3–4, May 1992, Pages 313–342
- 60 Karami, Gh. (2002). *Assessing The Heterogeneity And Flow System Types In Karstic Aquifers using Pumping Test Data*. Ph.D., Thesis, University Of Newcastle, Newcastle Upon Tyne, 180 P.
- 61 Karami, Gh. and Younger .P.L. (2002) Analyzing step–drawdown tests in heterogeneous aquifers. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 35, 295–303, 1 August 2002, <https://doi.org/10.1144/1470-9236/2002-9>
- 62 Kruseman, G.P. and N.A. de Ridder. (1994). *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data* (2nd ed.), Publication 47, Intern. Inst. for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands, 370p.
- 63 Legrand H. E. & V. T. Springfield. (1971) Water levels in carbonate rock terranes. *Ground Water* 9, no. 3:4–10.
- 64 Legrand H. E. & V. T., Springfield. (1966) Development of Permeability and Storage in the Tertiary Limestones of the Southeastern States. *Intern. Assoc. Sci. Hydro.*, Vol. 9, No. 4, pp. 61–73
- 65 Meinzer, O. E. (1923). *Outline of ground–water hydrology with definitions*. Geological Survey Water Supply Paper 494
- 66 Mace RE, Hovorka SE. (2000) Estimating porosity and permeability in a karstic aquifer using core plugs, well tests, and outcrop measurements. In: Sasowsky ID, Wicks CM (eds) *Groundwater flow and contaminant transport in carbonate aquifers*. Balkema, Rotterdam, pp 93–112
- 67 Maxey, G.B. (1964) Hydrostratigraphic units *Journal of Hydrology* Volume 2, Issue 2, 1964, Pages 124–129

- 68 Michalski, A., Britton, R. (1997) The role of bedding fractures in the hydrogeology of sedimentary bedrock—evidence from the Newark Basin, New Jersey Groundwater. Wiley Online Library.
- 69 Milanović P.T. (2004) Water resources engineering in karst, CRC Press, Florida, USA. 312p.
- 70 Milanovic, P.T. (1981) Karst hydrogeology. U.S. Colorado. Water Resources publication, 434P.
- 71 Moench, A.F. (1984). Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin, Water Resources Research, vol. 20, no. 7, pp. 831–846
- 72 Murdoch, L.C. (1994). Transient analyses of an interceptor trench, Water Resources Research, vol. 30, no. 11, pp. 3023–3031.
- 73 Newson M.D. (1972) Commonest of seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs. By Shuster.E.T White W.B.J., Hydro 16:49–51
- 74 Paillet, F. L. (2001). Borehole geophysical applications in karst hydrogeology. US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 01–4011, 116–123.
- 75 Palmer, A. N. (1986), Prediction of contaminant paths in karst aquifers, in Proceedings of the Environmental Problems in Karst Terranes and Their Solutions Conference, Dublin, Ohio: National Water Well Association, pp. 32–53
- 76 Quinlan, J.A *et al.* (2010) Hydrostratigraphic and permeability profiling for groundwater remediation. 2nd International Symposium on Penetration Testing Cone, Huntington Beach, CA, USA, May 2010
- 77 Raeisi, E. (2008) Groundwater storage calculation in karst aquifer with alluvium or no-flow boundaries. Journal of Cave and Karst studies, v.70 no. 1, p. 62– 70.
- 78 Raeisi, E., And Moore, F. (1993). Hydrochemistry Of Karst Spring From Two Carbonate Units In Zagros Sides Of Iran. Journal Of Sciences, Islamic Republic Of Iran, Vol.4, No. 4, P. 302–307.
- 79 Read F. (1985). Carbonate platform facies models. American Association of Petroleum Geologist Bulletin, 69(1): 1–21.
- 80 Warren. B. Roger H. Morin. (1987) Hydrostratigraphy and distribution of secondary permeability in the Brule Formation, Cheyenne County, Nebraska. GSA Bulletin (1987) 99 (4): 445–462. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1987\)99<445:HADOSP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1987)99<445:HADOSP>2.0.CO;2)
- 81 Rauch, H.W., & White, B.W. (1970) Lithologic controls on the development of solution porosity in Carbonate aquifers. Water Resources Research, 6: 1175–1192.
- 82 Samani N., Pasandi, M. Barry. D. A. (2006) Characterizing a heterogeneous aquifer by derivative analysis of pumping and recovery test data. Journal of Geological Society of Iran. JGSOI 1: 29–41
- 83 Schwartz FW. Zhang H. (2002) Fundamentals of Ground Water. John Wiley and Sons, Inc., New York, pp. 583
- 84 Seaber, P.R. (1988), Hydrostratigraphic units; in, Back, W., Rosenschein, J.R., Hydrogeology: The Geology of North America, Geological Society of America, Volume O–2, pp. 9–14
- 85 Shuster, E.T., and White, W.B. (1971), Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs. A possible means for characterizing aquifer: journal of hydrology, v.14, P. 93 –128.
- 86 Singhal, B.B.S. and Gupta, R.P. (2010) Applied hydrogeology of fractured rocks. 2nd Edition, Springer, Berlin
- 87 Streltsova TD. (1976b) Advances and uncertainties in the study of groundwater flow in fissured rocks, in Advances in Groundwater Hydrology (Salem ZA ed.), Am. Water Resources Assoc., pp. 18–56.
- 88 Streltsova, T.D. (1988). Well Testing in Heterogeneous Formations, John Wiley & Sons, New York, 413p
- 89 Theis, C.V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, Am. Geophysics. Union Trans., vol. 16, pp. 519–524
- 90 Todd, D.K. (1980). Groundwater Hydrology, 3rd end. Wiley, New York
- 91 Tucker, M. E. (2001) Sedimentary Petrology, Third edition, Blackwell's, Oxford, 260 p.
- 92 Tucker, M. E. and R. G. Bathurst. (1990) Carbonate Diagenesis. Int. Ass. Sediment. Reprint series, 1: 312 p.
- 93 Tucker, M. E. and V. P. Wright. (1990) Carbonate Sedimentology. Blackwell Science, Inc. 482p.

- 94 Ternan, J.L. (1999) Comments on the use of calcium hardness variability index in the study of carbonate Aquifer: with reference to central pennines; England. *J.Hydrol.* 16: 317–334.
- 95 Twenter, F. R. (1962). Geology and promising area for ground–water development in the Hualapai Indian Reservation. U.S Geological Survey Water–Supply Paper, 1576–A.
- 96 UNESCO. (1977) Water in Crystalline Rocks, SC–77/ WS/71, UNESCO, Paris, p. 344.
- 97 UNESCO. (1984b). Guide to the Hydrology of Carbonate Rocks, Studies and reports in Hydrology 41 p.345.
- 98 USEPA. (1993). Suggested operating procedures for aquifer pumping tests (EPA/540/S–93/503), Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, Oklahoma, 23p.
- 99 Vilhelmsen. T. *et al.* (2018) A Regional Scale Hydrostratigraphy Generated from Geophysical Data of Varying Age, Type, and Quality. *Water Resources Management* (2019) 33:539–553  
<https://doi.org/10.1007/s11269-018-2115-1>
- 100 Walton, W.C. (1962). Selected analytical methods for well and aquifer evaluation, Illinois State Water Survey Bulletin 49, Urbana, Illinois, 81p.
- 101 Walton, W.C. (1970). Groundwater Resource Evaluation, McGraw–Hill, New York, 664p.
- 102 White, W. B. (1988) Geomorphology and hydrology of karst terrains. New York: Oxford University Press, 464 p.
- 103 White, W.B.( 2013) Karst Hydrology Concepts from the Mammoth Cave Area
- 104 White, W.B. (1969) Conceptual model for carbonate aquifer, *Ground Water* Vol.70,No. 3:15–21
- 105 White, W.B. (2002) Karst hydrology: recent developments and open questions *Engineering Geology* 65 (2002) 85– 105.
- 106 White, W.B. (1999) Conceptual models for karstic aquifers. In: Palmer AN, Palmer MV, Sasowski ID (eds) *Karst modeling* Karst Waters Institute, Charles Town, WV, pp.11–16
- 107 Wilson, J.L. (1975) Carbonate facies in geologic history: New York, Springer–Verlag, 471 p.
- 108 Worthington, Stephan. R.H. (1999), A comprehensive strategy for understanding flow in carbonate aquifer In: Palmer AN, Palmer MV, Seaoswkey ID (eds) *Karst modelling. Symposium proceedings.*
- 109 Zuber A, Motyka J. (1996) Matrix porosity as the most important parameter of fissured rocks for solute transport at large scales. *Hydro* 158:19–46.

## Abstract

Tirgan carbonate formation in the structural zone of Kopet-dagh contains significant groundwater resources. In this region, Tirgan Formation is not a homogeneous formation but consists of five rock units with different permeability. This study was performed to investigate hydrostratigraphy and separation of permeable layers in Tirgan Formation. A stratigraphic section was selected in the northeast of Bojnourd, 90 thin sections of rock were used to analyze the sedimentary environment. Geophysical well logs, 270 joints information at three stations, and step-by-step pumping tests were used. Tirgan Formation consists of limestone, marl and marly- limestone rock units. The results obtained from this study show that the purity of upper limestone rock units has increased. The hydrogeological characteristics of Tirgan Formation are different in each horizon due to the role of stratigraphic parameters of the formation. According to the analyzed pumping data, the maximum and minimum values of transmissivity (T) are estimated at 1040 and 130  $\text{m}^2/\text{d}$  respectively. Also, the maximum and minimum hydraulic conductivity values are calculated to be about 15 and 1.2  $\text{m}/\text{d}$ , respectively. The main reason for the large difference in hydrogeological parameters in this region is related to the effect of stratigraphic parameters. Using the drawing method presented by Karami (Karami 2002), the "Karst conduit index", which is a quantitative expression of the dominant flow system, is introduced in this research. This index is located between the boundaries of +1 and -1, which values between zero and +1 express the predominance of conduit flow system and values between zero and -1 express the predominance of diffuse flow system. In this area the results obtained from the evaluation of karst conduit index of pumping wells indicate that diffuse flow system is predominant. In this study, for the first time, a new index for quantitative evaluation of stratigraphic parameters affecting the hydraulic properties of karst is introduced, which is called "stratigraphic index" (SI). This index quantitatively calculates the effect of important stratigraphic properties such as thickness, layering and slope of the layer on the hydraulic properties of the karst. Evaluations indicate that the degree of heterogeneity, flow dimension, karst conduit index, well discharge, specific drawdown and transmissivity show significant relationships with stratigraphic index. Finally, it can be mentioned that the initial evaluation of stratigraphic parameters and the application of criteria such as stratigraphic index can help to more accurately locate well drilling in karst aquifers .

**Keywords:** Hydrostratigraphy, Tirgan Formation, Stratigraphic Index, Kopt-dagh



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Earth Sciences**

**Ph.D Thesis in Hydrogeology**

**Hydrostratigraphy of Tirgan Formation in part of Kopet-dagh  
(Northeast of Bojnourd)**

**By:**

**Firooz Shakiba**

**Supervisor:**

**Dr.Golam Hossien Karami**

**Advisor:**

**Prof. Azizolah Taheri.**

**2021 February**