



<http://ui.ac.ir/en>

Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches University of Isfahan
Vol. 36, Issue 2, No. 79, Summer 2020
pp. 125-148
Received: 16.02.2020 Accepted: 09.05.2020

An evaluation on sedimentary facies, hydrochemistry condition and degree of consolidation in travertine deposits of the Nodushan Spring, northwestern of Yazd

Seyed Mohammad Ali Moosavizadeh*

*Assistant Professor, Department of Geology, Yazd University, Yazd, Iran
moosavizadeh@yazd.ac.ir*

Vahab Amiri

*Assistant Professor, Department of Geology, Yazd University, Yazd, Iran
v.amiri@yazd.ac.ir*

Mehdi Torabi-Kaveh

*Assistant Professor, Department of Geology, Yazd University, Yazd, Iran
m.torabikaveh@yazd.ac.ir*

Abstract

This study tries to evaluate the geological properties of a travertine spring and its related deposits. The identification of sedimentary facies of springs could be applied as a method to distinguish the type of travertine springs. Therefore in this study, that method has been used for the determination of the type of the spring. Results obtained from facies analysis reveal 13 sedimentary facies that could be categorized into two groups including organic facies which contain five facies and abiotic facies containing eight facies. These facies show the character of hydrothermal spring and set the spring in the thermogenic group. The chemical composition analysis of the spring water represents the facies of NaCl, Na-Ca-SO₄-Cl can be considered to be precise chemical facies. The presence of calcium and sulfate as the second most frequent ions, after sodium and chloride, may initially indicates the existence of gypsum or anhydrite deposits in this area. On the other hand, given the absence of sulfate-bearing sediments in this region, it can be concluded that the interaction of water and magmatic systems was the most important source of sulfate in the spring water. Based on the rock mechanical properties of the travertine, it was revealed that with increasing age of the sediments their consolidation degree increases. The hardness of sediments shows an increasing trend by increasing distance from the spring vent.

Keywords: Travertine, Sedimentary facies, Thermogene, Hydrochemistry, Yazd.

Introduction

Travertine is one of the most well-known continental carbonate rocks, which has been highly regarded for its commercial-decorative quality. Travertine is made up of a variety of sediments that are formed through two main processes: first, carbonate sediments originating from running water that is lithified during sedimentation (abiotic crystals and facies caused by microbial activity). Second, sediments that were deposited like marine carbonates in an aquatic setting such as lakes, swamps, streams, and temporary ponds. To eliminate the complexities of travertines, a classification on hot spring sediments has been proposed to identify the relationships between sedimentary processes and fabrics of sediments. Numerous studies have considered the influence of water chemistry, as well as the dynamics of flow at the source of the springs, on the sedimentation mechanism. Underground water chemistry is one of the essential parameters for evaluating the environmental characteristics of each region. This paper aims to investigate the sedimentary facies of travertine deposits of the Nodushan Spring in the northwest of Yazd in central Iran. Moreover, the relationships between these facies and the mechanism of their formation

based on the facies, hydrochemistry condition, and mechanical properties are examined.

Material & Methods

According to the Aqda geological map (1:100,000), the location of the study area was determined and geological features were considered. A total of 42 samples were collected and the necessary field photos from macroscopic features of the region were captured. After that, thin sections of the samples were studied by a polarizing microscope. In this study, three samples of water collected from the travertine ponds of this spring have been analyzed for hydrochemical properties. Various physicochemical parameters have been analyzed, including calcium (Ca), sodium (Na), potassium (K), magnesium (Mg), ammonium (NH₄), bicarbonate (HCO₃), sulfate (SO₄), chloride (Cl), fluoride (F), nitrate (NO₃), pH, temperature, turbidity, as well as total alkalinity, hardness and dissolved solids (TDS). The degree of consolidation of the samples was also measured by Schmidt hammer to investigate its relationship with travertine fabrics.

*Corresponding author

Discussion of Results & Conclusions

The deposition of carbonate sediments in the form of travertine in hot springs reflects the characteristics of a tectonic-geothermal system. Of course, sedimentation is not only affected by water temperature, but also by the saturation of calcium, flow rate, water flow mechanics, as well as the presence of sulfur compounds, which affect the environmental conditions of the environment. Facies analysis indicates that 13 sedimentary facies could be categorized in two groups: organic facies which contain five facies (clotted micrite, stromatolite bindstone, microbial rafts, oncoid facies, and dendritic shrubs) and abiotic facies comprise eight facies (crystalline crusts, fan-ray crystals, feather-like crystals, coated bubbles, spheroid facies, and needle-shaped shrubs). These facies show the character of hydrothermal spring and put the spring in the thermogenic group. It generally seems that crystalline facies have been largely influenced by abiotic sedimentation, while laminar facies were formed under the influence of microbial activity related to hot springs. Rapid sedimentation rates lead to the dominance of abiotic processes, while slow rates create more microbial activities that are effective in sedimentation processes.

The chemical composition analysis of the spring water

represents the facies of NaCl, Na-Ca-SO₄-Cl can be considered to be precise chemical facies. The presence of calcium and sulfate as the second most frequent ions - after sodium and chloride - it may initially indicate the presence of gypsum or anhydrite sediments in this area. On the other hand, given the absence of sulfate-bearing sediments in this region, it can be concluded that the interaction of water and magmatic systems is the most important source of sulfate in spring water. Also, changes in Na/(Na + Ca) and Cl/(Cl + HCO₃) relative to the amount of TDS in the analyzed water sample show that the predominant process controlling the water quality of this spring is evaporative processes, which occurs as a result of direct connection of water with atmosphere after leaking from the spring.

Based on the mechanical properties of the travertine, it was revealed that with increasing age of the sediments their consolidation degree increased. The hardness of sediments shows an increasing trend by increasing distance from the spring vent. Moreover, it was found that major discontinuities observed in the wall of the valley not effective role in drainage of surface waters, so that formation of the sediments was directly related to the spring water.

ارزیابی رخساره‌های رسوبی، وضعیت هیدروشیمیایی و درجهٔ تحکیم‌یافتگی نهشته‌های تراورتن در چشمهٔ ندوشن، شمال غرب یزد

سید محمد علی موسوی زاده*، استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه یزد، ایران

moosavizadeh@yazd.ac.ir

وهاب امیری، استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه یزد، ایران

v.amiri@yazd.ac.ir

مهدی ترابی کاوه، استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه یزد، ایران

m.torabikaveh@yazd.ac.ir

چکیده

در مطالعه حاضر به ارزیابی ویژگی‌های زمین‌شناسی چشمه تراورتن‌ساز ندوشن و نهشته‌های مربوط به آن پرداخته شد. تفکیک نوع چشمه‌های تراورتن‌ساز از طریق بررسی رخساره‌های آنها امکان‌پذیر است؛ از این رو در پژوهش حاضر، ویژگی یادشده برای تعیین نوع چشمه استفاده شد. بررسی‌ها، وجود ۱۳ رخساره رسوبی شامل ۵ رخساره زیستی و ۸ رخساره غیرزیستی را در تراورتن‌های مطالعه‌شده نشان دادند. رخساره‌های یادشده ویژگی چشمه‌های گرمابی را نشان و نوع چشمه را در رده چشمه‌های ترموزن قرار می‌دهند. تجزیه و تحلیل ترکیب شیمیایی آب چشمه نشان داد تیپ شیمیایی، NaCl است و به عبارت دقیق‌تر، آب این چشمه دارای رخساره شیمیایی Na-Ca-SO₄-Cl است. وجود کلسیم و سولفات به‌عنوان یون‌های ثانویه (پس از سدیم و کلراید) در نگاه اول بر احتمال وجود رسوبات ژپسی یا انیدریتی دلالت دارد، اما با توجه به وجودنداشتن رسوبات حاوی سولفات در منطقه، می‌توان گفت برهم‌کنش آب با سیستم‌های ماگمایی مهم‌ترین منبع تأمین‌کننده یون سولفات است. بررسی ویژگی‌های مهندسی تراورتن‌ها نشان داد با افزایش سن رسوبات تراورتنی، درجهٔ تحکیم‌یافتگی آنها زیاد و سختی آنها بیشتر می‌شود. سختی رسوبات با افزایش فاصله از خروجی چشمه، روند افزایشی را نشان می‌دهد. واژه‌های کلیدی: تراورتن، رخساره رسوبی، ترموزن، هیدروشیمی، یزد

* نویسنده مسئول: ۰۹۱۷۱۲۱۳۴۷۰

مقدمه

با وجود این، ویژگی‌های سنگ‌شناسی هنوز به گونه‌ای تفکیک نشده‌اند که بتوان طبقه‌بندی جامعی را برای این سنگ‌ها ارائه و ارتباط ژنتیکی این ویژگی‌ها را با محیط رسوبی مشخص کرد (Folk et al. 1985; Guo and Riding 1998; Jones and Renault 2010). مطالعه‌هایی نیز در زمینه ابهام‌های مربوط به تأثیر واسطه‌های زیستی بر رسوب‌گذاری کربنات کلسیم انجام شده‌اند (Pentecost 1994, 2003; Folk 1994). در مجموع، این مطالعه‌ها نشان می‌دهند تراورتن‌های یادشده به سیستم گرمابی مربوط می‌شوند که در سه سیستم رسوبی ته‌نشین شده‌اند و هشت نوع رسوب کربناته را شامل می‌شوند (جدول ۱).

تراورتن (Travertine) یکی از شناخته‌شده‌ترین سنگ‌های کربناته قاره‌ای است که به علت داشتن کیفیت تجاری-تزیینی همواره درخور توجه بوده است؛ هرچند هنوز از جنبه‌های سن‌شناسی و پترولوژی به خوبی بررسی نشده است (Gandin and Capezzuoli 2014). نخستین مطالعه‌های انجام‌شده در زمینه تراورتن‌ها عمدتاً جنبه تجاری داشتند و بر ویژگی‌های ژئوشیمیایی و کانی‌شناسی متمرکز بودند (Gonfiantini et al. 1968; Cipriani et al. 1972, 1977; Chafetz and Folk 1984) پس از آن، ویژگی‌های بافتی تراورتن‌ها توصیف شدند؛

جدول ۱- طبقه‌بندی بافتی کربنات‌های گرمابی: سنگ‌آهک‌های تراورتنی (Gandin and Capezzuoli 2014)

پوسته‌های با واسطه میکروبی/میکروبیالیته‌ها	پوسته‌های بلورین غیرزیستی
بایندستون	بلورهای پرماند
فابریک ترومولیتی	بلورهای بادبزنی/شعاعی
استروماتولیت	سنگ‌های اسفنجی
بوته‌های دندریتی	
طبقه‌های میکروبی	

آب گرم را به منظور برطرف کردن پیچیدگی‌های مربوط به تراورتن‌ها ارائه کردند تا از طریق آن، روابط بین فرایندهای رسوبی و فابریک‌ها و عوارض حاصل در تراورتن‌ها شناخته شوند.

مطالعه‌های متعددی به بررسی تأثیر شیمی آب و دینامیک جریان در محل خروجی چشمه‌ها روی سازوکار رسوب‌گذاری پرداخته‌اند؛ شیمی آب زیرزمینی یکی از شاخص‌های ضروری برای ارزیابی ویژگی‌های محیطی هر منطقه است (Park et al. 2005; Gallardo and Tase 2007, Nakhaei 2015; Amiri et al. 2016, 2017). حرکت آب زیرزمینی در مسیر خود سبب افزایش غلظت گونه‌های شیمیایی در آن می‌شود (Domenico and Schwartz 1990)؛ بنابراین، شیمی آب زیرزمینی حاوی اطلاعات مهمی درباره زمین‌شناسی آبخوان است. شیمی آب زیرزمینی به عوامل

تراورتن از رسوبات متنوعی تشکیل می‌شود که از طریق دو فرایند اصلی به وجود می‌آیند: اول، رسوبات کربناته منشأگرفته از آب‌های جاری که طی رسوب‌گذاری به شکل قشرهای سخت دچار سنگ‌شدگی می‌شوند (بلورهای غیرزیستی و رخساره‌های ناشی از فعالیت‌های میکروبی) و این فرایند هم در شرایط اپیژن (سیستم‌های گرمابی زیرجوی) و هم در شرایط هیپوژن (کانال‌های زمین‌گرمایی عمیق) رخ می‌دهد؛ دوم، رسوباتی که همانند کربنات‌های دریایی در محیط‌های زیرآبی مانند دریاچه‌ها، باتلاق‌ها، نهرها و حوضچه‌های موقتی ته‌نشین می‌شوند و از طریق تعلیق یا حمل‌ونقل به شکل دانه‌های سست و مجزا و سپس رسوب‌گذاری و عمدتاً پس از دفن‌شدن به سنگ تبدیل می‌شوند (Gandin and Capezzuoli 2008). Gandin and Capezzuoli (۲۰۰۸ و ۲۰۱۴) طبقه‌بندی رسوبات چشمه‌های

و آواری سازند نایبند به سن تریاس، رخنمون‌های محدودی از نهشته‌های ژوراسیک و همچنین توالی‌های کربناته به سن کرتاسه زیرین معادل سازند تفت را در بر می‌گیرند (شکل ۱، ج). در بخش غرب منطقه نیز توف‌های داسیتی-ریوداسیتی به سن میوسن بیرون‌زدگی دارند. توالی تراورتن در موقعیت مطالعه‌شده به شکل ناپیوسته روی سنگ‌آهک‌های کرتاسه زیرین و سنگ‌آهک‌های دولومیتی به سن تریاس قرار گرفته است؛ ولی به سمت غرب و در جنوب شهر ندوشن، این تراورتن به شکل ناپیوسته روی ماسه‌سنگ‌های سازند نایبند تهنشین شده است. از نظر جغرافیایی، محل نمونه‌برداری در مختصات "۳۲°۰۱'۳۰" عرض شمالی و "۵۳°۴۰'۳۶" طول شرقی واقع شده است و حدود ۱۸۷۷ متر از سطح دریا ارتفاع دارد. نمونه‌برداری در دره‌ای به عمق تقریبی حدود ۲۰ متر انجام شد؛ این منطقه در ۶۸ کیلومتری شمال‌غرب یزد و در ۱۲ کیلومتری شرق شهر ندوشن قرار دارد و دسترسی به آن از طریق جاده یزد به ندوشن میسر است (شکل ۱، ج). از نظر آب‌وهوایی، این منطقه در فصل تابستان گرمای زیادی دارد؛ هرچند بررسی‌های میدانی و اطلاعات مردم بومی گویای دائمی بودن آب در این چشمه تراورتن‌ساز است.

روش مطالعه

موقعیت منطقه مطالعه‌شده با بررسی نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ عقدا (Alai-Mahabadi and Foudazi 2007) مشخص و ویژگی‌های زمین‌شناسی بررسی شدند؛ در ادامه، نمونه‌برداری از تراورتن در دیواره دره مدنظر و از رسوبات قدیم به جدید انجام شد؛ همچنین طی بررسی چشمه فعال موجود، تراورتن‌های تهنشین‌شده در مسیر چشمه از بالادست به سمت پایین دست جریان (تراورتن‌های جوان) نمونه‌برداری (در مجموع، ۴۲ نمونه) و تصاویر لازم از ویژگی‌های صحرایی و ماکروسکوپی منطقه تهیه شدند. به منظور بررسی دقیق‌تر ویژگی‌های بافتی و رخساره‌ای، ابتدا اسلب‌هایی با ابعاد ۸ در ۸ سانتی‌متر از نمونه‌ها تهیه و بررسی و سپس به منظور مطالعه دقیق‌تر با

متعددی همچون زمین‌شناسی، میزان هوازدگی سنگ‌های مختلف، کیفیت آب تغذیه‌ای و ورودی از منابع مختلف بستگی دارد (Amiri et al. 2016, 2017)؛ این عوامل و تأثیر آنها بر آب زیرزمینی سبب کیفیت پیچیده آب زیرزمینی می‌شود (Guler and Thyne 2004; Pradhan 2009; Pradhan and Pirasteh 2012, Ketata et al. 2011). مطالعه‌های هیدروشیمیایی به منظور شناسایی واکنش‌های شیمیایی احتمالی آب زیرزمینی در طول مسیر جریان و همچنین تکامل کیفی آب زیرزمینی و تغذیه آبخوان انجام می‌شوند (Zhu et al. 2007; Jianhua et al. 2008).

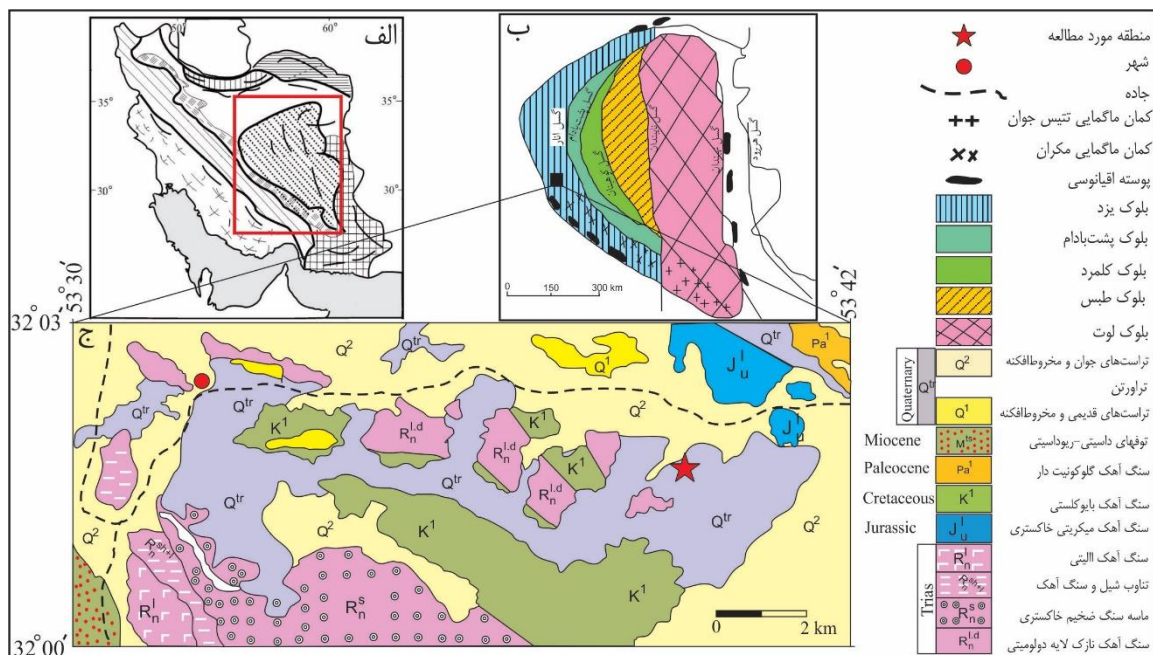
پژوهش حاضر سعی دارد رخساره‌های رسوبی تراورتن‌های منطقه ندوشن در شمال‌غرب یزد را مطالعه و از این طریق، ارتباط این رخساره‌ها و سازوکار تشکیل آنها را بررسی کند؛ علاوه بر این، تجزیه و تحلیل نمونه آب چشمه تراورتن‌ساز نیز انجام می‌شود تا بتوان دینامیک جریان در این منطقه را بهتر ارزیابی کرد؛ همچنین به منظور بررسی تأثیر بافت تراورتن در سخت‌شدگی رسوبات، درجه تحکیم‌یافتگی سنگ‌ها از مظهر چشمه به سمت پایین دست بررسی می‌شود.

زمین‌شناسی منطقه

منطقه مطالعه‌شده در بخش جنوب‌غربی نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ عقدا (Alai-Mahabadi and Foudazi 2007) و در زون ساختاری خردقاره ایران مرکزی قرار دارد (Vaziri-Moghadam et al. 2006) (شکل ۱، الف). این خردقاره با گسل‌های امتدادلغز راست‌گرد به بخش‌هایی شامل بلوک لوت، فرازمین شتری، فرونشست طبس، فرازمین کلمرد، بلوک پشت‌بادام و بلوک یزد تقسیم می‌شود (Aghanabati 2004). منطقه مطالعه‌شده در بلوک یزد قرار دارد (شکل ۱، ب) که با گسل درونه به طول حدود ۹۰۰ کیلومتر در شمال، گسل و افیولیت‌های نائین-دهشیر-بافت در غرب و جنوب و در نهایت، گسل انار در شرق محدود می‌شود (Aghanabati 2004). از نظر زمین‌شناسی، عمده رخنمون‌های سنگی موجود در این منطقه علاوه بر تراورتن‌های به سن کواترنر، توالی‌هایی از نهشته‌های کربناته

رسوبات سست و ناپیوسته موجود در حوضچه‌های تراورتنی نیز جمع‌آوری شدند و در دو مرحله (یک بار پیش از شستشو و مرحله دوم، پس از شستشو با آب و الک مش ۲۳۰) به‌منظور شناسایی دانه‌های رسوبی احتمالی با میکروسکوپ بیناکولار مطالعه شدند.

میکروسکوپ پلاریزان، مقاطع نازکی از آنها تهیه شدند. رخساره‌های موجود بر اساس مطالعه‌های پیشین روی تراورتن‌ها و با مراجعه به منابعی مانند Claes et al. (2015, 2017)، Gandin et al. (2002) و Gandin and Capezzuoli (2008, 2014) نام‌گذاری و توصیف شدند. تعداد ۱۱ نمونه



شکل ۱- موقعیت زمین‌شناسی منطقه مطالعه‌شده؛ الف. موقعیت بلوک ایران مرکزی در نقشه زمین‌شناسی ایران (با تغییراتی از Vaziri-Moghadam et al. 2006)، ب. موقعیت بلوک یزد و منطقه مطالعه‌شده در ایران مرکزی (Aghanabati 2004)، ج. موقعیت منطقه مطالعه‌شده روی نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ عقدا (Alai-Mahabadi and Foudazi 2007).

تبخیر و تغلیظ عناصر و اضافه‌کردن نیتریک‌اسید غلیظ به‌منظور جلوگیری از واکنش مؤلفه‌های شیمیایی آب با یکدیگر و ظرف نمونه‌برداری اشاره کرد. نمونه‌ها تا ارسال به آزمایشگاه واحد کیفی شرکت آب و فاضلاب استان یزد در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. شاخص‌های فیزیکوشیمیایی مختلفی شامل کلسیم (Ca)، سدیم (Na)، پتاسیم (K)، منیزیم (Mg)، آمونیوم (NH₄)، بیکربنات (HCO₃)، سولفات (SO₄)، کلراید (Cl)، فلوراید (F)، نترات (NO₃)، pH، دما، کدورت، قلیایی بودن کل، سختی کل، کل مواد جامد محلول (TDS) تجزیه و تحلیل شدند و درجه

در مطالعه حاضر، میانگین نتایج تجزیه و تحلیل کیفی سه نمونه آب تهیه‌شده از حوضچه‌های تراورتن‌ساز این چشمه برای تحلیل‌های هیدروشیمیایی استفاده شد. گفتنی است محل‌های نمونه‌برداری به مظهر چشمه و به یکدیگر نزدیک بودند و اختلاف درخور توجهی در شاخص‌های فیزیکوشیمیایی مشاهده نشد؛ به‌همین علت، میانگین مقادیر به‌دست‌آمده استفاده شد. نمونه‌برداری بر اساس استانداردهای شناخته‌شده بین‌المللی انجام شد که می‌توان به شستشوی ظرف‌های نمونه‌برداری با آب چشمه به‌منظور رفع هرگونه آلودگی بطری، پرکردن بطری‌ها برای جلوگیری از هرگونه

crusts) crystalline و نیز به شکل لامینه‌های میکروبی (microbialite) باشند. اگرچه ترکیب کانی‌شناسی تراورتن‌ها با رسوبات کربناته دریایی یکسان است، همه تراورتن‌ها را نمی‌توان بر اساس طبقه‌بندی‌های بافتی استاندارد ارائه شده برای سنگ‌های کربناته دریایی توصیف کرد؛ زیرا فرایندهای رسوبی تشکیل‌دهنده این نهشته‌های قاره‌ای با رسوبات کربناته دریایی تفاوت دارند (در این بین، تراورتن‌هایی که از طریق فعالیت‌های میکروبی تشکیل می‌شوند، استثنا هستند) (Gandin and Capezzuoli 2008). در ادامه، رخساره‌های شناسایی شده در تراورتن‌های مطالعه شده در دو گروه رخساره‌های زیستی (Microbialites) و رخساره‌های غیرزیستی (Abiotic) (جدول ۲) بررسی می‌شوند.

تحکیم‌یافتگی نمونه‌ها به منظور بررسی ارتباط آن با بافت تراورتن‌ها اندازه‌گیری شد.

رخساره‌های رسوبی

در چشمه‌های آب گرم فعال، کربنات کلسیم به شکل کلسیت و آراگونیت ته‌نشین می‌شود (Pentecost 2005; Jones and Renaut 2010)، اما این کانی‌شناسی تحت تأثیر فرایندهای رسوبی و فابریک رسوبات نیست و نمی‌توان آن را ملاکی برای بررسی فرایندهای رسوبی در نظر گرفت و استفاده کرد (Gandin and Capezzuoli 2008). عمده تولیدات کربناته در سیستم چشمه‌های آب گرم به شکل قشر (Crust) ته‌نشین می‌شوند که می‌توانند به شکل قشرهای بلورین غیرآلی (Abiotic)

جدول ۲- رخساره‌های کربناته زیستی و غیرزیستی شناسایی شده در چشمه تراورتن ساز ندوشن

قشرهای بلورین غیرزیستی	قشرهای زیستی (میکروبیالیت‌ها)
قشر بلورین	میکرایت لخته‌ای (ترومبولیت)
بلورهای پرماند	بایندستون (استروماتولیت)
بلورهای شعاعی - بادبزنی	رخساره آنکوئید
بلورهای سوزنی	دندریت‌های بوته‌ای
رخساره کروی	طبقه‌های میکروبی/کلسیتی
حباب‌های پوشیده و سنگ‌های اسفنجی	

2003). رخساره‌هایی که تحت تأثیر فرایندهای زیستی در تراورتن‌های ندوشن تشکیل شده‌اند، عبارتند از:

رخساره میکرایت لخته‌ای (Clotted micrite/ Pustular shrub)

این رخساره به طور لخته‌هایی از گل آهک به شکل پلوئید و تجمع‌های میکرایتی کروی (spheroid) دیده می‌شود (شکل ۲، الف)؛ ولی باتوجه به اینکه حاشیه آنها نامنظم است و حالت کلوخه‌کلوخه را نشان می‌دهند، نمی‌توان آنها را بافت کروی در نظر گرفت. در نمونه‌هایی، این رخساره تنها از گل آهکی میکرایتی تشکیل نشده است و بلورهای اسپارایتی کربناته کلسیم نیز در اطراف آنها دیده می‌شود. مرزهای اطراف کلوخه‌های میکرایتی نامنظمند و اندازه آنها از ۰/۱ تا ۰/۵

رخساره‌های زیستی یا میکروبیالیت (Microbialite)

در چشمه‌های آب گرم فعال که محتوای سولفید محلول آب‌های گرم زیاد و برای موجودات یوکاریوت سمی است، باکتری‌های گرمادوست (thermophyle) و باکتری‌های احیاکننده سولفید تنها موجودات زنده‌ای‌اند که در تشکیل رسوبات کربناته نقش دارند (Fouke et al. 2003; Pentecost 2003)؛ البته این تأثیرگذاری بیشتر از آنکه از طریق فتوسنتز باشد، از طریق فرایندهای غیرمستقیم مانند ایجاد بستر مناسب یا به‌دام‌انداختن رسوبات انجام می‌شود (Fouke et al. 2000; Dupraz et al. 2009). شرایط فیزیکوشیمیایی آب و میزان تبخیر، عوامل تعیین‌کننده‌ای در تکامل کلنی‌های باکتریایی و میزان رسوب کربنات کلسیم به شمار می‌آیند (Fouke et al.

شناخته می‌شوند.

طبقه‌های میکروبی - کلسیتی (Microbial/Calcite rafts)

این رخساره که با نام طبقه‌های نازک (paper-thin rafts) نیز شناخته می‌شود (Guo and Riding 1998)، به شکل تنوعی از رشد‌های میکروبی دیده می‌شود. ایجاد قشرهای نازک کلسیت روی سطح آب، بستر اولیه برای رشد میکروبی را شکل می‌دهد (شکل ۲، ز) و در ادامه، رشد میکروبی روی آنها سبب سنگین شدن این قشرها می‌شود و به کف حوضه انتقال می‌یابند. این ساختار معمولاً به شکل طبقه‌های کوچک و عمدتاً همراه با حباب‌های پوشش‌دار در چهارچوب‌های جلبکی و به شکل پراکنده دیده می‌شود. تفاوت این ساختار با استروماتولیت‌های جلبکی در پیوسته نبودن لامینه‌های جلبکی و وجود انحنا در آنهاست (شکل ۲، ح) که این ویژگی سبب ایجاد ساختار حجره‌ای در لامینه‌های جلبکی می‌شود.

رخساره آنکوئیدی (Oncoid facies)

ویژگی اصلی این رخساره، وجود دانه‌های پوشش‌دار آنکوئید در زمینه‌ای از گل آهکی است؛ این دانه‌ها در اندازه‌های متفاوت ۳ تا ۲۰ میلی‌متر دیده می‌شوند. با در نظر گرفتن حضور دانه آنکوئید و زمینه گل آهکی و باتوجه به طبقه‌بندی دانهام می‌توان این رخساره را با عنوان پکستون آنکوئیددار نام‌گذاری کرد. از نظر شکل ظاهری، آنکوئیدهای مشاهده شده به شکل کروی تا بیضی‌های کاملاً کشیده دیده می‌شوند. نمونه‌هایی از این دانه که در حوضچه‌های فعال حال حاضر تشکیل می‌شوند، عمدتاً رنگ خاکستری تیره دارند و به شکل بیضی‌های پهن منظم تا نامنظم دیده می‌شوند (شکل ۲، ط)؛ این نوع آنکوئید عمدتاً در لبه‌های میکروتراس‌های کم‌عمق تشکیل می‌شود. نمونه‌های موجود در سنگ‌های قدیمی‌تر به رنگ سفید دیده می‌شوند و هندسه آنها عمدتاً منظم‌تر و به حالت کروی نزدیک‌تر است (شکل ۲، ی). بررسی‌های میکروسکوپی نشان می‌دهند پوشش‌های این دانه‌ها از حالت

میلی‌متر متغیر است. اغلب نسب طول به عرض (L/W) هرکدام از لخته‌های میکرایت تقریباً یکسان است و به همین علت، جهت‌گیری خاصی در رشد این تجمع‌ها دیده نمی‌شود. در مقیاس ماکروسکوپی، این تجمع‌ها در اندازه‌های حدود ۲ تا ۳ میلی‌متری وجود دارند و مجموعه آنها در اندازه‌های ۲ سانتی‌متر نیز دیده می‌شود (شکل ۲، ب). این تجمع‌ها در میکروتراس‌های حاوی آب با حالت تقریباً راکد یا با سرعت جریان بسیار کم دیده می‌شوند (شکل ۲، ج).

رخساره بایندستون - استروماتولیت (Microbial mats/Stromatolite bindstone)

این رخساره که فرش‌های باکتریایی (bacterial mats) نیز شناخته می‌شود (Folk et al. 1985)، به شکل لامینه‌های مسطح و گاهی موج‌دار دیده می‌شود که در نتیجه تناوب پوشش‌های جلبکی و کلسیت میکرایتی - اسپارایتی به این شکل دیده می‌شود (شکل ۲، د)؛ البته باتوجه به از بین رفتن قشرهای جلبکی در اغلب نمونه‌ها، تنها لامینه‌های ایجاد شده به واسطه آنها باقی مانده‌اند. تأثیر فعالیت‌های میکروبی تنها به شکل لامینه‌های موازی نیست و همان‌طور که در ادامه گفته می‌شود، شکل‌های مختلفی از این فعالیت در تراورتن‌های مطالعه شده دیده می‌شوند. در تراورتن‌های مطالعه شده، لامینه‌ها عمدتاً تحت تأثیر تناوب بلورهای دارای اندازه‌های مختلف (شکل ۲، ه) یا وجود قشر نازک میکروبی (شکل ۲، و) به وجود آمده‌اند. لامینه‌های مربوط به فعالیت‌های میکروبی تقریباً ضخامت یکسانی در تمام طول خود دارند و حتی در نمونه‌هایی که لامینه‌ها مسطح نیستند و حالت موجی و شعاعی به خود گرفته‌اند، این ویژگی دیده می‌شود. این رخساره را می‌توان بر اساس طبقه‌بندی‌های ارائه شده برای سنگ‌های کربناته دریایی نام‌گذاری کرد. تناوب قشرهای جلبکی و رسوبات به‌دام‌افتاده روی آنها، استروماتولیت نام دارد که در طبقه‌بندی Danhum (1962) با عنوان باندستون (Bounstone) نام‌گذاری شده‌اند و باتوجه به اینکه حالت مسطح و لامینه‌ای در آنها وجود دارد، بایندستون (Bindstone)

دندریت‌های منفرد عمده‌تاً ضخامتی حدود ۰/۳ تا ۰/۸ میلی‌متر و طول ۰/۵ تا ۴/۵ میلی‌متر دارند. در مقاطع نازک تهیه‌شده عمود بر جهت رشد بلورها، دندریت‌ها به شکل لخته‌ای و شبیه به بافت پلوئیدی دیده می‌شوند. در مقیاس ماکروسکوپی، ساختارهای دندریتی به شکل لامینه‌های نسبتاً مسطح، به رنگ کرم تا کاملاً سفید و با تراکم زیاد دیده می‌شوند (شکل ۳، الف) که هم به‌طور جانبی و هم به‌شکل عمودی گسترش یافته‌اند. فابریک دندریتی در سطوح هوازده سنگ نسبت به سطوح تازه شکسته‌شده بهتر دیده می‌شود و این فابریک به شکل‌گیری تخلخل‌های ماکروسکوپی در این رخساره منجر شده است (شکل ۳، الف).

رخساره‌های غیرزیستی (Abiotic facies)

به‌طور کلی، رخساره‌های بلورین غیرزیستی از تجمع بلورهای کلسیت و آراگونیت تشکیل شده‌اند و فراوان‌ترین شکل تجمع‌ها در منطقه مطالعه‌شده به بلورهای شعاعی - بادبزنی (Fan-ray crystals) و بلورهای پرماند (Feather-like crystals) و کمترین فراوانی به رخساره حباب‌های پوشش‌دار (coated bubbles) و سنگ‌های اسفنجی (foam rock) تعلق دارد.

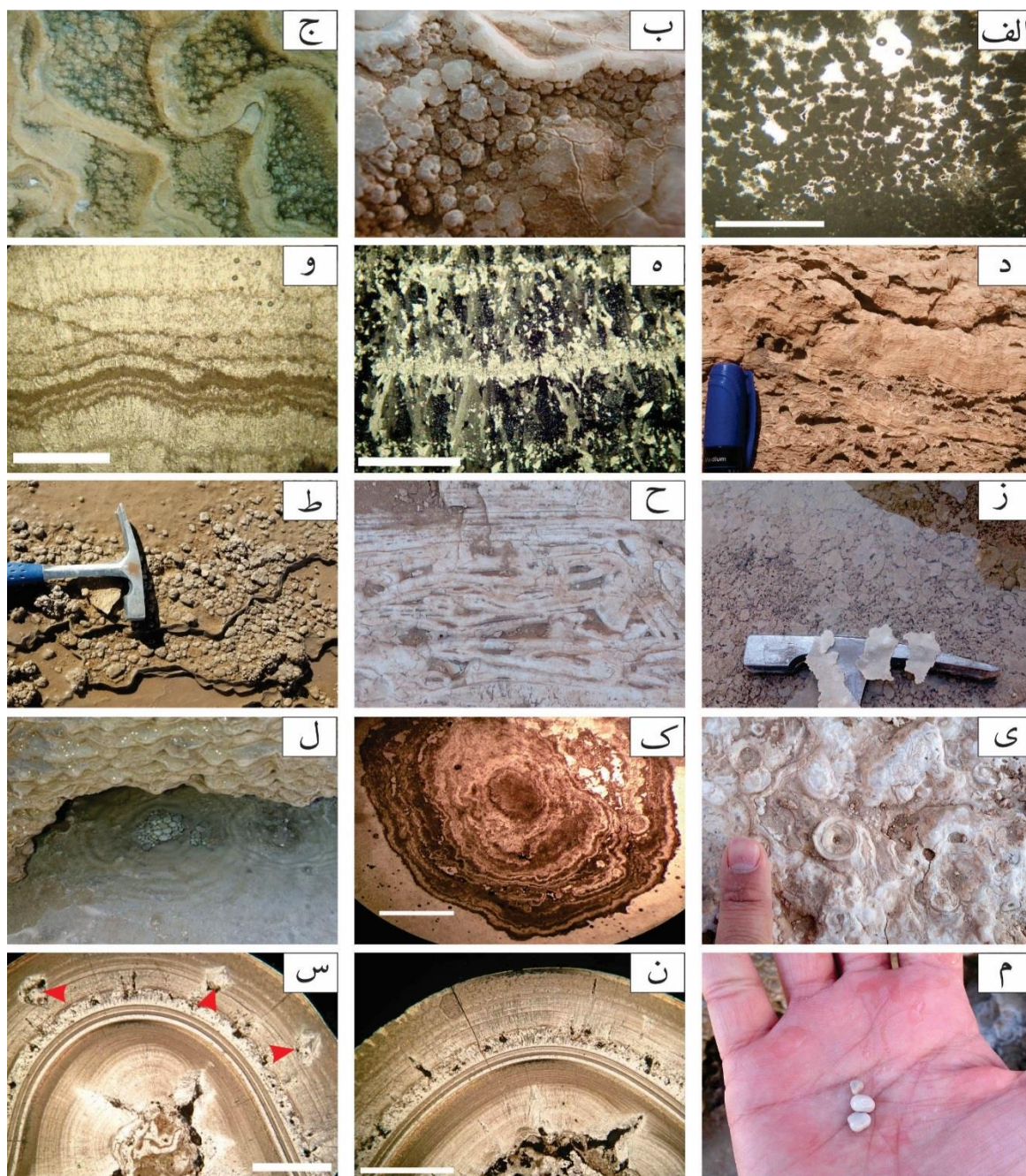
رخساره‌های قشر بلورین (Abiotic crystalline crusts)

این رخساره به‌شکل قشرهای نازک سفیدرنگ (شکل ۳، ه) متشکل از بلورهای کلسیت و آراگونیت به‌طور سوزنی ایجاد شده است و در مقطع نازک، بلورها به‌شکل تقریباً عمود نسبت به سطح قرار گرفته‌اند. لامینه بین این بلورها وجود ندارد؛ به این معنا که تناوب میکرایت و اسپارایت تشکیل نشده است و عملاً مرز جداکننده‌ای بین ردیف‌های بلوری اسپارایتی دیده نمی‌شود.

کم‌ویش منظم تا کاملاً نامنظم در نتیجه فعالیت‌های جلبکی به وجود آمده‌اند (شکل ۲، ک). نمونه‌های فرسایش‌یافته آن، لامینه‌های جلبکی و حتی هسته آنکوئید را به‌وضوح نشان می‌دهند. همان‌طور که گفته شد، نقش فعالیت‌های میکروبی به‌شکل به‌دام‌انداختن رسوبات و تشکیل دانه‌های مانند آنکوئید در این رسوبات کاملاً مشهود است. در برخی بخش‌ها، حوضچه‌های کوچک مقیاسی وجود دارند که ریزش عمودی آب در آنها با تشکیل آنکوئیدهای کاملاً سفیدرنگ همراه بوده است (شکل ۲، ل و م)؛ نکته جالب توجه درباره این آنکوئیدها، نظم ساختاری زیاد در لامینه‌های آنها در مقیاس میکروسکوپی است که ظاهر آنها را به ائید شبیه می‌کند (شکل ۲، ن) و نکته دیگر درباره آنها، وجود حفره‌های تقریباً دایره‌ای شکل در حاشیه این دانه‌هاست که احتمال فعالیت‌های میکروبی و حفاری در دیواره آنها را نشان می‌دهد (شکل ۲، س - پیکان‌های زردرنگ).

رخساره بوته‌ای دندریتی (Dendritic shrub)

ویژگی اصلی این رخساره، رشد بلورهای کلسیت به‌شکل دندریتی و شاخه‌درختی به‌سمت بالاست. این فابریک در مقیاس ماکروسکوپی (شکل ۳، الف) و در مقاطع نازک میکروسکوپی (شکل ۳، ب) در تراورتن‌های مطالعه‌شده دیده می‌شود. بافت دندریتی در برخی نمونه‌ها به‌شکل متناوب با لامینه‌های موازی کربنات‌کلسیم میکرایتی قرار گرفته است؛ اما در اغلب نمونه‌ها، بدون لامینه‌های میکرایتی و به‌شکل بافت یکپارچه دیده می‌شود. دندریت‌های کربنات‌کلسیم در تراورتن‌های مطالعه‌شده به‌شکل مسطح (شکل ۳، ب) که در آن، دندریت‌ها به‌شکل عمودی نسبت به سطح بستر رشد کرده‌اند و به‌شکل شعاعی که در آن، دندریت‌ها با زاویه نسبت به بستر قرار گرفته‌اند (شکل ۳، ج)، دیده می‌شوند. در نمونه‌های نادری، این دندریت‌ها با توجه به فاصله بلورها در حالت شعاعی به‌شکل پنجه‌ای دیده می‌شوند (شکل ۳، د).



شکل ۲- رخساره‌های رسوبی شناسایی شده در چشمه تراورتنی ندوشن؛ الف. میکرایت لخته‌ای در مقطع نازک میکروسکوپی، ب و ج. میکرایت لخته‌ای در مقیاس صحرایی و در لبه میکروتراس‌های تراورتنی، د. لامینه‌های استروماتولیت در تراورتن، ه. ساخت لامینه‌ای در اثر تغییر اندازه بلورها در مقیاس میکروسکوپی، و. ساخت لامینه‌ای ناشی از فعالیت‌های میکروبی و تشکیل استروماتولیت در مقیاس میکروسکوپی، ز. تشکیل طبقه‌های کلسیتی/میکروبی در حوضچه‌های تراورتنی فعال، ح. طبقه‌های کلسیتی/میکروبی در تراورتن‌های قدیمی، ط. پیژوئیدهای زیستی (آنکوئیدها) در حال تشکیل در لبه میکروتراس‌های فعال، ی. رخساره آنکوئیدی در تراورتن‌های قدیمی (دوایر و هسته آنکوئیدها دیده می‌شوند)، ک. مقطع نازک از آنکوئیدهای در حال تشکیل عهد حاضر با هسته پلوئیدی، ل و م. محل تشکیل پیژوئیدهای غیرزیستی در محل ریزش جریان آب و انواع مورفولوژی در آنها، ن. مقطع نازک از پیژوئیدهای غیرزیستی که دوایر میکرایتی و ظریف منظم در آنها دیده می‌شود، س. حفره‌های پر شده با کلسیت در دیواره پیژوئیدهای غیرزیستی که امکان حفاری در دیواره آنها را نشان می‌دهد (خط مقیاس در تمام تصاویر ۱ میلی‌متر)

بعدی پر می‌شود. در حوضچه‌های فعال منطقه مطالعه‌شده و در بخش‌هایی که آب حالت تقریباً راکد دارد، حباب‌های فراوانی در آب دیده می‌شوند که بعضی روی سطوح جلبکی چسبیده‌اند (شکل ۳، ک). در این تصویر، منافذی دیده می‌شوند که مجرای خروج گاز هستند و به تشکیل حباب منجر می‌شوند (شکل ۳، ک- پیکان‌های قرمز رنگ). در منطقه مطالعه‌شده، حباب‌های پوشیده‌شده به‌طور پراکنده در تراورتن‌های عهد حاضر در حال تشکیل دیده می‌شوند؛ البته تجمع‌هایی از این حباب‌ها در تراورتن‌های قدیمی نیز دیده می‌شوند (شکل ۳، ل). در حالتی که سطح مقطع مجاری خروجی گاز روی سطح سنگ دیده شود، اصلاح سنگ اسفنجی (Foam Rock) یا سنگ لانه‌زنبوری (Honeycomb Rock) برای آنها به کار می‌رود (Jones and Renaut 2010).

رخساره کروی (Spheroid facies)

این رخساره از اجسام کروی با جنس کربنات کلسیم و بلورهای شعاعی که به‌طور معمول در اطراف هسته‌ای از جنس گل آهکی میکرایتی رشد کرده‌اند (شکل ۳، م و ن)، تشکیل شده است. اندازه این اجسام کروی که در مقاطع نازک میکروسکوپی به شکل دایره‌ای دیده می‌شوند، حدود ۳ تا ۴ میلی‌متر است. در برخی نمونه‌ها علاوه بر فابریک شعاعی، دواپر متحدالمرکزی از جنس میکرایت نیز در این اجسام دیده می‌شوند؛ این دواپر عمدتاً حاشیه‌های نامنظمی دارند. در نمونه‌های بسیار نادر، قرارگیری دندریت‌های بوته‌ای به شکل شعاعی، فابریکی شبیه به این اجسام کروی را به وجود آورده است. اجسام کروی با بلورهای شعاعی و فیبری، ویژگی‌های بوته‌ای ناشی از فعالیت‌های میکروبی را نشان نمی‌دهند و به‌همین علت، در دسته رخساره‌های غیرزیستی طبقه‌بندی می‌شوند.

رخساره بوته‌ای سوزنی (Needle-shape shrub)

در تراورتن‌های مطالعه‌شده، این رخساره عمدتاً از بلورهای درشت و منفرد کلسیت تشکیل شده است که اغلب کاملاً در یکدیگر فشرده شده‌اند و به شکل عمود نسبت به سطح بستر خود قرار گرفته‌اند (شکل ۳، س)؛ البته در نمونه‌هایی، لایه‌های میکرایتی نیز بین ردیف‌های بلوری وجود دارند و

بلورهای بادبزنی - شعاعی (Fan-ray crystals)

این بلورها به شکل تجمع‌های بادبزنی متراکم دیده می‌شوند که با یکدیگر پیوستگی نوری نشان می‌دهند و آنچه ظاهر بادبزنی و شعاعی به این رخساره داده است، وجود بلورهای کشیده کلسیت است که با زاویه غیر از ۹۰ درجه نسبت به سطح بستر در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند (شکل‌های ۳، و و ز). مرزبندی به‌ندرت بین این بادبزنها دیده می‌شود و چنانچه مرزبندی وجود داشته باشد، بسیار کم‌ضخامت و ظریف است. در برخی نمونه‌ها، حالت شاخه‌ای در بلورهای کلسیت به سمت نوک بادبزنها دیده می‌شود.

بلورهای پرمانند (Feather-like crystals)

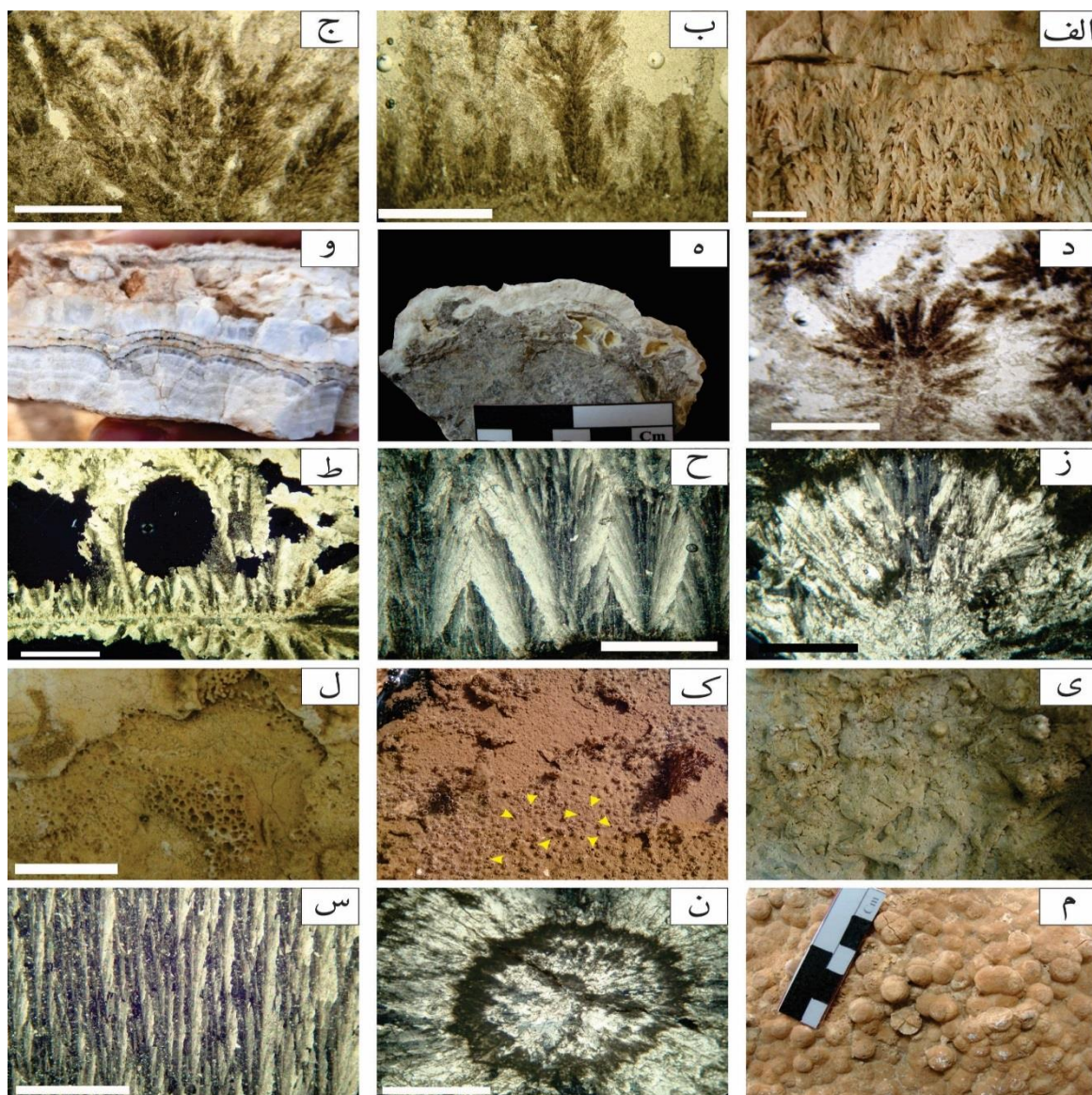
این بلورها با نام بلورهای دندریتی دروغین (pseudodendrites) (Rainey and Jones 2009) نیز شناخته می‌شوند که از انشعابات بدون لایه‌بندی بلورهای مسطح ساخته شده‌اند. این رخساره‌ها مورفولوژی‌های مختلفی را نشان می‌دهند که می‌توان آنها را به دو گروه اصلی تقسیم‌بندی کرد: گروه اول از تجمع بلورهای رومبوندری به وجود آمده‌اند و گروه دوم واحدهای دندریتی منشعب‌شده‌اند که در نتیجه رشد بلورها در حاشیه حوضچه‌های بسیار کوچک (microterraces) تشکیل شده‌اند؛ این بلورها هم به شکل عمود بر بستر و هم به شکل موازی با آن ته‌نشین شده‌اند (شکل‌های ۳، ح و ط) و حالت چهارچوب‌ساز را به وجود آورده‌اند که سبب ایجاد تخلخل‌های درخور توجهی در این رسوبات شده است.

حباب‌های پوشیده و سنگ‌های اسفنجی (Coated bubbles & foam rocks)

این عوارض به شکل اجسام کروی توخالی دیده می‌شوند که با لایه نازکی از بلورهای بسیار ریز پوشیده شده‌اند (شکل ۳، ی)؛ در ادامه، پوشش‌های جلبکی روی این لایه‌های نازک رشد و بر ضخامت آنها افزوده‌اند. این اجسام دانه نیستند، ولی از آنجاکه به شکل منفرد در زمینه گل آهکی یا در اجتماع‌های جلبکی و حتی با طبقه‌های میکروبی (microbial rafts) دیده می‌شوند، می‌توانند ظاهری شبیه دانه (برای نمونه، آنکوئید) داشته باشند؛ فضای خالی موجود در این اجسام با رسوبات

خاموشی موجی خود در نمونه‌های میکروسکوپی و در نور متقاطع کاملاً مشخص می‌شود.

سبب می‌شوند حالت لایه‌بندی در آنها دیده شود. طول این بلورها از ۳ تا ۷ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است، ولی پهنای آنها حالت کاملاً باریک را نشان می‌دهد. این ریزرخساره با



شکل ۳- رخساره‌های رسوبی شناسایی شده در چشمه تراورتنی ندوشن؛ الف. رخساره بوتله دندریتی در مقیاس صحرایی که در آن، تخلخل‌های ماکروسکوپی نیز دیده می‌شوند، ب و ج. رخساره بوتله دندریتی در مقیاس میکروسکوپی، د. رخساره بوتله دندریتی به شکل شعاعی و پنجه‌ای، ه. تشکیل قشر بلورین کلسیتی روی بسترهای قدیمی‌تر، و ز) رخساره بلورهای شعاعی/بادبزی در مقیاس صحرایی در مقطع نازک میکروسکوپی، ح و ط. رخساره بلورهای پرماند در مقطع نازک میکروسکوپی و رشد عمودی و افقی آنها که سبب ایجاد چهارچوب بلورین در سنگ و ایجاد تخلخل در فضای بین آنها شده است، ی. رخساره حباب‌های پوشیده در تراورتن‌های درحال تشکیل، ک. حباب‌های ناشی از خروج گاز در حوضچه‌های فعال عهد حاضر (مجرای خروج گاز با پیکان‌های زرد رنگ مشخص شده است)، ل. سطح مقطع مجاری خروج حباب که به تشکیل سنگ اسفنجی منجر شده است، م. رخساره کروی و سطح مقطع شکسته شده آن که بلورهای شعاعی در آن دیده می‌شوند، ن. مقطع نازک از رخساره کروی که در آن، رشد بلورها به شکل شعاعی کاملاً مشخص است، س. رخساره بلورهای سوزنی که در آن، بلورها عمود بر سطح بستر رشد کرده‌اند (خط مقیاس در تمام تصاویر ۱ میلی‌متر)

رخساره توفای (Tufa)

در منطقه مطالعه شده، توفای به شکل رسوبات سست و نرم در کنار تراورتن‌های سخت و سنگی شده دیده می‌شود که از ته نشینی کربنات کلسیم روی ساقه و ریشه گیاهان موجود در منطقه به وجود آمده است (شکل ۴، الف). در توالی تراورتن منطقه، مورفولوژی توفاهای دیرینه برجسته نیز به شکل توده‌ای و سخت شده حفظ شده است (شکل ۴، ب) که می‌توان لایه بندی مربوط به بستر را در اطراف آن مشاهده کرد؛ در این توده‌ها می‌توان رخساره‌های نی مانند را به شکل استوانه‌های توخالی مشاهده کرد (شکل ۴، ج) که درحقیقت، قالب ساقه گیاهان هستند که در اندازه کوچک با قطری حدود ۱ سانتی‌متر و اندازه بزرگ با قطری حدود ۷ سانتی‌متر حفظ شده‌اند. باتوجه به فرایند تشکیل این رخساره، تخلخل موجود در آن بسیار زیاد و سبک وزن است.

رخساره کنگلومرای بین سازندی

در بررسی‌های صحرائی، قطعه‌های خرد شده از سنگ‌های قدیمی همراه با خرده‌هایی از تراورتن‌های منطقه، کنگلومراهایی را تشکیل داده‌اند که به شکل لزه‌های کوچک مقیاس با ضخامت حدود ۱ تا ۱/۵ متر و طول حدود ۵ تا ۱۰ متر و به رنگ تیره بین نهشته‌های تراورتنی دیده می‌شوند (شکل ۴، د و ه). از نظر سنگ‌شناسی، این کنگلومراها را می‌توان به علت وجود قطعه‌های دارای منشأ رسوبی (قطعه‌هایی از خود تراورتن‌ها) و آذرین، کنگلومرای پلی میکتیک در نظر گرفت. در این رسوبات، ماتریکس آواری چندانی وجود ندارد و درحقیقت، عمده فضای بین دانه‌ها با گل آهکی میکرایتی به وجود آمده در محل پر شده است. باتوجه به فراوانی کمتر از ۷۵ درصد دانه‌ها و به علت نبود فابریک دانه‌پشتیان در این کنگلومراها، می‌توان آنها را پاراکنگلومرا در نظر گرفت. از نظر رخساره‌ای نیز این کنگلومرا، رخساره Gmm را نشان می‌دهد. در برخی بخش‌ها که سیمانی شدن رخ داده است، این سیمان از جنس

کربنات کلسیم است.

شرایط تشکیل

عوامل مختلفی شامل شرایط حاکم بر محیط رسوب گذاری تا فرایندهای دیاژنتیکی روی مورفولوژی و فابریک رخساره تشکیل دهنده تراورتن تأثیر می‌گذارند. عوامل اولیه عمدتاً برآیندی از میزان ته نشینی کربنات کلسیم و تأثیرات زیستی مانند فعالیت‌های میکروبی در برابر تأثیرات غیرزیستی مانند تبخیر و خروج گاز هستند (Bisse et al. 2018)؛ در این بین، Chafetz and Guidry (1999) طبقه بندی مورفولوژی‌های ناشی از فعالیت‌های زیستی (bacterial shrubs) که در آن، باکتری‌ها نقش اصلی را در کنترل مورفولوژی دارند و رخساره‌های غیرزیستی (crystal shrubs) که در آن، مورفولوژی عمدتاً با تأثیرات بلورشناسی کنترل می‌شود، تعریف کردند. حفظ شدن تجمع‌های میکروبی (برای نمونه، استروماتولیت) از طریق پوشیده شدن آنها با لایه نازکی از آب گرم و درحال تبخیر و متعاقب آن، ته نشینی بلورهای بسیار ریز کربنات کلسیم روی آنها انجام می‌شود. جایی که این بلورها با لایه‌های نازک میکروبی به دام می‌افتند، دفن شدن قشرهای باکتریایی با کربنات کلسیم به سخت شدن سریع آنها و تشکیل لامینه‌های متناوبی از بلور و مواد زیستی منجر می‌شود (Guo and Riding 1994; Rainey and Jones 2009).

در فصل مشترک آب و هوا در آب‌های راکد غنی از کربنات کلسیم و درحال تبخیر، طبقه‌های کلسیتی- میکروبی به شکل قشرهای بلورین مسطحی شکل می‌گیرند که چنانچه آب در اثر جریان باد متلاطم شود، این صفحه‌ها ممکن است به قطعه‌های کوچک تر شکسته شوند؛ این صفحه‌های کوچک و بزرگ، بستری را برای رشد موجودات میکروبی فراهم می‌کنند. ضخامت پوشش‌های جلبکی روی این طبقه‌ها به مدت زمانی بستگی دارد که این طبقه‌ها روی سطح آب شناورند (Gandin and Capezzuoli 2008). تشکیل پوشش‌های میکروبی سبب سنگین شدن و درنهایت، غرق شدن این

می‌شوند که آب درحال تبخیر است و سرعت جریان کاهش می‌یابد؛ درحالی‌که ته‌نشینی گل‌های آهکی در مرحله بعدی و زمانی انجام می‌شود که میزان جریان آب دوباره زیاد می‌شود (Bisse et al. 2018)؛ مجموع این ویژگی‌ها بیان‌کننده تأثیرات فعالیت‌های زیستی در ته‌نشینی چنین رخساره‌هایی است (Okumura et al. 2011).

صفحه‌ها و قرارگیری آنها بین رسوبات کف بستر می‌شود. رخساره‌های بوت‌های دندریتی به فراوانی از حوضچه‌های بسیار کم‌عمق گزارش شده‌اند (برای نمونه، Rainey and Jones 2009). وجود تناوب میکرایت با بلورهای کربنات کلسیم نشانه‌ای از کاهش میزان رسوب‌گذاری کربنات کلسیم در فصل‌های سرد سال است (Chafetz and Folk 1984). بررسی چشمه‌های فعال عهد حاضر نشان می‌دهد بوت‌های دندریتی در زمانی تشکیل

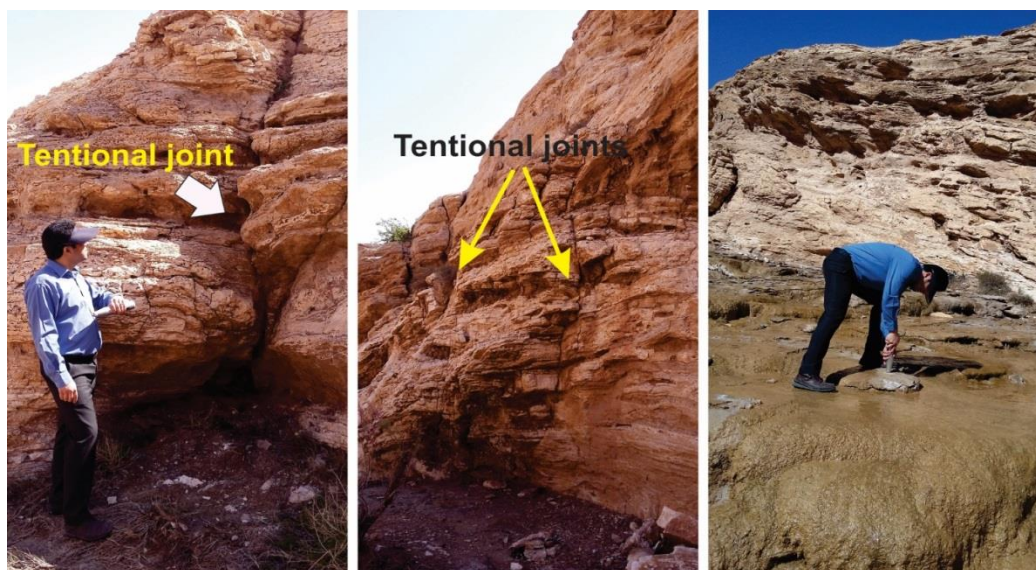


شکل ۴- تصاویر صحرایی چشمه تراورتنی ندوشن و رسوبات تراورتنی اطراف آن: الف. تشکیل تופا در تراس‌های فعال عهد حاضر و ب. رسوبات قدیمی‌تر. همان‌طور که دیده می‌شود لایه‌بندی در اطراف توده تופا به شکل محلی برای به‌دام‌افتادن رسوبات دیده می‌شود. ج. قالب‌های نی‌مانند از توده توفای مربوط به شکل ب که به ساقه گیاهان مربوط است، د و ه. عدسی‌های کنگلومرایی مربوط به رسوبات تبخیری با قطعه‌هایی از سنگ‌های قدیمی و همچنین قطعه‌های تراورتن‌های قدیمی‌تر که با رنگ سفید در زمینه تیره کاملاً مشخصند. و. تجمع‌های میکروبی با رنگ‌های مختلف سیاه، قهوه‌ای، نارنجی و خاکستری روی تراس‌های تراورتنی در مسیر حرکت آب. ز. خروج حباب‌های گاز در مظهر چشمه و تشکیل تجمع‌های جلبکی سبزرنگ در اطراف آن

نظر گرفته می‌شود؛ به طوری که در چشمه‌های آب گرم عهد حاضر، قشرهای بلورهای پرماند به طور مستقیم از صفحه‌های بسیار نازک آب که روی سطوح با شیب زیاد جریان دارند، ته‌نشین می‌شوند (Guo and Riding 1998, 1999; Gandin and Capezzuoli 2008)؛ این مورفولوژی‌های بلوری، ته‌نشینی در شرایط ترموژن را نشان می‌دهند (Altunel & Hancock 1993, 1996). حباب‌های پوشیده عمدتاً در محیط‌های با انرژی کم شکل می‌گیرند؛ این حباب‌ها ابتدا روی سطح آب، روی سطوح جلبکی یا حتی درون قطره‌های آب تشکیل (Schreiber et al. 1981) و سپس به سرعت با کلسیت ریزیلور پوشیده می‌شوند (Chafetz et al. 1991)؛ معمولاً این قشرهای کلسیتی با رو رشدی‌های میکروبی پوشیده می‌شوند (Chafetz and Folk 1991; Chafetz et al. 1984). در سیستم چشمه‌های آب گرم، حباب‌ها در نتیجه خروج گاز حاصل می‌شوند (Chafetz et al. 1991)؛ در ادامه، این اجسام کروی با جریان‌های سطحی حمل می‌شوند یا در محل‌هایی به دام می‌افتند که جلبک‌ها به سرعت رشد می‌کنند (Gandin and Capezzuoli 2008). شکل ۵، مدلی مفهومی از محل تشکیل رخساره‌های بحث‌شده را نشان می‌دهد.

در مقابل شرایط مناسب برای تشکیل رخساره‌های زیستی، میزان ته‌نشینی سریع به غلبه فرایندهای غیرزیستی منجر می‌شود؛ درحالی‌که سرعت کمتر ته‌نشینی اجازه تأثیر بیشتری به فعالیت‌های میکروبی می‌دهد (Dupraz et al. 2009). مطلب یادشده به خوبی در شیوه شکل‌گیری پیژوئیدهای موجود در تراورتن‌های مطالعه‌شده منعکس شده است؛ جایی که فرصت برای فعالیت‌های میکروبی و تشکیل پیژوئیدهای زیستی در لبه حوضچه‌های تقریباً راکد فراهم شده است (شکل ۲، ط و ک) و در مقابل، جایی که در اثر چکیدن قطره‌های آب، جریان سریع‌تر و ته‌نشینی کربنات کلسیم نیز سریع‌تر بوده است، فرصتی برای فعالیت‌های میکروبی باقی نمانده است و پیژوئیدهایی با دواير متحدالمرکز و لامینه‌های میکراتیتی تشکیل شده‌اند.

ته‌نشینی بلورهای رشته‌ای کربنات کلسیم در ارتباط با آب‌های آشفته و فوق اشباعی است که در پی تبخیر و خروج سریع دی‌اکسیدکربن ایجاد می‌شوند (Bisse et al. 2018)؛ این مسئله از سرعت زیاد و همچنین ژریم جریانی بالای آب ناشی می‌شود. بلورهای ته‌نشینی در چنین شرایطی به سرعت اجسام موجود در مسیر خود را با بلورهای شعاعی سوزنی می‌پوشانند. شرایط مشابهی برای ته‌نشینی بلورهای پرماند در



شکل ۵- انجام درزه‌برداری در امتداد دره تراورتنی و اندازه‌گیری سختی اشمیت روی پله‌های تراورتنی

تجزیه و تحلیل نمونه آب

در جدول ۳، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آب چشمه مطالعه‌شده ارائه شده‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهند این نمونه نسبتاً قلیایی دارای هدایت الکتریکی بسیار زیادی (حدود ۲۶۳۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) است که با توجه به تیپ کلروره این نمونه آب، مقدار کل املاح محلول (TDS) را می‌توان با اعمال ضریب تقریبی ۰/۹۶ تخمین زد (Sen 2015)؛ بر همین اساس، مقدار TDS این نمونه آب حدود ۲۵۲۴۸ میلی‌گرم بر لیتر برآورد می‌شود. فراوان‌ترین آنیون‌های موجود در آب‌های خروجی از این محل به ترتیب کلراید و سولفات با غلظت‌هایی در حدود ۷۰۸۵ و ۳۵۷۳ میلی‌گرم در لیتر هستند. دو کاتیون سدیم و کلسیم به ترتیب با غلظتی نزدیک به ۶۷۳۲ و ۶۸۵ میلی‌گرم بر لیتر، کاتیون‌های غالب موجود در نمونه آب تحلیل‌شده به شمار می‌آیند.

با توجه به ترکیبات یادشده و آنیون‌ها و کاتیون‌های غالب موجود در آب، به نظر می‌رسد تیپ شیمیایی آب‌های خروجی از محل ته‌نشینی رسوبات تراورتنی در منطقه مطالعه‌شده، NaCl باشد؛ به تعبیری دیگر می‌توان رخساره شیمیایی این آب‌ها را Na-Ca-SO₄-Cl نامید. ترکیب یادشده را می‌توان دلیلی بر وجود چرخه کامل آب در منطقه‌ای حاوی رسوبات متشکل از رسوبات نمکی قدیمی، بقایای خشک‌شده شورابه‌های جدید یا ترکیبات حاوی کاتیون‌ها و آنیون‌های متشکله نمک دانست.

منبع و منشأ یون‌های محلول در هر نمونه را می‌توان با تغییر در نسبت $Na/(Na+Ca)$ و $Cl/(Cl+HCO_3)$ به شکل تابعی از TDS به‌طور جامع ارزیابی کرد (Gibbs 1970). محاسبه‌ها نشان می‌دهند مقدار $Na/(Na+Ca)$ و $Cl/(Cl+HCO_3)$ در نمونه مدنظر به ترتیب برابر با ۰/۹۰ و ۰/۹۸ است که با توجه به مقدار TDS نزدیک به ۲۳۶۷۰ میلی‌گرم بر لیتر، فرایند غالب در تعیین و تغییر کیفیت آب چشمه تراورتنی مطالعه‌شده، فرایندهای تبخیری‌اند که در نتیجه ارتباط مستقیم آب زیرزمینی با اتمسفر رخ می‌دهند؛ در این زمینه می‌توان به وجود رسوبات تبخیری حاوی عناصر سدیم، کلر و کلسیم اشاره کرد که پیش‌ازین، بحث شد؛

علاوه بر این، بررسی انجام‌شده نشان می‌دهد با توجه به نسبت $Ca/(Ca+Cl)$ و مقدار EC در نمونه مطالعه‌شده که به ترتیب برابر با ۰/۱۵ و ۲۶۳۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر است، ترکیب شیمیایی نمونه مطالعه‌شده نزدیک به محدوده تالاسوتروپیک قرار می‌گیرد؛ مفهوم مطلب یادشده، نزدیکی ترکیب نمونه آبی به ترکیب آب دریاست که با شوری بسیار زیاد و نسبت بسیار کم $Ca/Ca+Cl$ مشخص می‌شود.

در مطالعه حاضر، رابطه غلظت (Na-Cl) در برابر $(Ca+Mg-SO_4-HCO_3)$ به منظور بررسی اهمیت فرایند تبادل یونی در شیمی آب زیرزمینی (آب چشمه) (Boghici and Van 2007, Jalali 2001, Broekhoven 2001) استفاده شد؛ با این فرض که همه کلراید از هالیت مشتق می‌شود، مقدار (Na-Cl) نشان‌دهنده مقدار سدیم اضافی است که از منابعی غیر از انحلال هالیت‌ها وارد آب زیرزمینی می‌شود؛ همچنین مقدار $(Ca+Mg-SO_4-HCO_3)$ نشان‌دهنده کلسیم یا منیزیمی است که از منبعی غیر از انحلال ژینس و کربنات حاصل می‌شود. در غیاب واکنش‌های یادشده، نمونه آب تحلیل‌شده باید مقادیر نسبتاً برابری از (Na-Cl) در برابر $(Ca+Mg-SO_4-HCO_3)$ داشته باشد (McLean et al. 2000). بررسی انجام‌شده نشان می‌دهد مقدار سدیم بیشتر از کلرید است؛ به این معنا که سدیم مشتق‌شده از هالیت‌ها (محتمل‌ترین منبع دو یون کلراید و سدیم به‌طور هم‌زمان) بیشتر از کلراید متناظر است؛ به عبارتی، مقداری از سدیم موجود در منابع آبی منشأی غیر از انحلال هالیت دارد و همچنین، مجموع غلظت کلسیم و منیزیم اندکی بیشتر از مجموع غلظت سولفات و بیکربنات است و با این اختلاف بسیار جزئی، انحلال پیشرفته کربنات و تا حدودی هالیت و تأثیر این فرایندها بر کیفیت آب زیرزمینی را می‌توان استنباط کرد.

بررسی‌ها نشان می‌دهند تغییرات نسبت $Ca+Mg$ در برابر HCO_3+SO_4 را می‌توان برای تعیین نقش کلسیت، دولومیت و ژینس در کنترل کیفیت آب چشمه مدنظر استفاده کرد. ورود دولومیت به این دسته، منشأ احتمالی برای منیزیم موجود در آب است و این در حالیکه برخی گونه‌های دیگر کربنات‌ها همچون آراگونیت یا کلسیت‌های حاوی

سیال عبوری از محیط، دما و فشار می‌توانند بر میزان انحلال کلسیت و دولومیت تأثیرگذار باشند؛ بنابراین باتوجه به غلظت بیشتر منیزیم محلول در آب تحلیل شده در مقایسه با کلسیم، به نظر می‌رسد میزان انحلال دولومیت در محیط برهم‌کنش آب و رسوبات در محل تشکیل این چشمه بیشتر از کلسیت است؛ این شرایط بر دما و فشار بیشتر در مقایسه با شرایط معمولی (فشار اتمسفری و دمای فضای آزاد) دلالت دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهند مواد و عوامل زیستی موجود در محیط جریان آب سبب افزایش میزان انحلال دولومیت در اسیدیتته بیش از ۷ می‌شوند. باتوجه به تحلیل‌های انجام شده، نقش عوامل زیستی در این منطقه به شکل تقویت‌کننده میزان انحلال دولومیت نباید نادیده گرفته شود.

منیزیم زیاد (که در محیط‌های دریایی شور قدیمی تشکیل می‌شوند) نیز می‌تواند منبع بالقوه منیزیم در نظر گرفته شوند؛ این مطلب باتوجه به رسوبات تراورتنی تشکیل شده در منطقه و نقش آراگونیت در ساختار رسوبی منطقه می‌تواند مدنظر قرار گیرد.

نتایج تجزیه و تحلیل شیمیایی آب‌های این ناحیه نشان می‌دهند مقدار کلسیم موجود در آب کمتر از غلظت منیزیم محلول است؛ بنابراین، به نظر می‌رسد وجود رسوبات آراگونیتی یا کلسیت‌های دارای منیزیم زیاد در مسیر جریان موجب شده است آب‌های این منطقه علاوه بر کلسیم مشتق شده از کلسیت، مقادیر درخور توجهی منیزیم را از انحلال آراگونیت و کلسیت‌های دارای منیزیم زیاد در خود جای دهند. عواملی همچون سنگ‌شناسی، ترکیب شیمیایی

جدول ۳- تجزیه و تحلیل فیزیکوشیمیایی نمونه آب تهیه شده از چشمه تراورتنی

مقدار	بر حسب	روش اندازه‌گیری	شاخص	
8.04	-	SM-4500-H ⁺ -B	pH	
26300	S/cm μ	SM-2510-B	EC	
25	°C	Electrometric method	Temperature	
0.86	NTU	SM-2130-B	Turbidity	ویژگی‌های فیزیکی، سختی
23670	mg/L	Calculation method	TDS	
3984.45	mg CaCO ₃ /L	SM-2340-C	Total hardness	و قلیایی بودن
1711.95	"	SM-3500-Ca-B	Calcium hardness	
598.04	"	SM-2320B-4C	Total alkalinity	
180.19	"	SM-2320B-4C	Phenolphthalein alkalinity	
7085.49	mg/L	SM-4500-Cl-B	Cl ⁻	
1.81	"	SM-4500-NO ₃ -C	NO ₃ ⁻	
3.96	"	SM-4500-F-C	F ⁻	آنیون
360.38	"	SM-2320B-4C	CO ₃ ²⁻	
237.66	"	SM-2320B-4C	HCO ₃ ⁻	
3572.6	"	SM-4500-SO ₄ -C	SO ₄ ²⁻	
0.36	"	SM-4500-F	NH ₄ ⁺	
684.78	"	SM-3500-Ca-B	Ca ²⁺	
552.22	"	SM-3500-Mg-B	Mg ²⁺	کاتیون
6732	"	SM-3500-Na-B	Na ⁺	
211	"	SM-3500-K-B	K ⁺	

تراورتنی، هنگام مطالعه میدانی نسبت به برداشت درزه‌های رخنمون یافته در دیواره‌های دره اقدام شد (شکل ۵). نرم‌افزار Dips (۲۰۰۶) برای تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از برداشت

وضعیت ساختاری درزه‌های موجود در دره چشمه تراورتنی

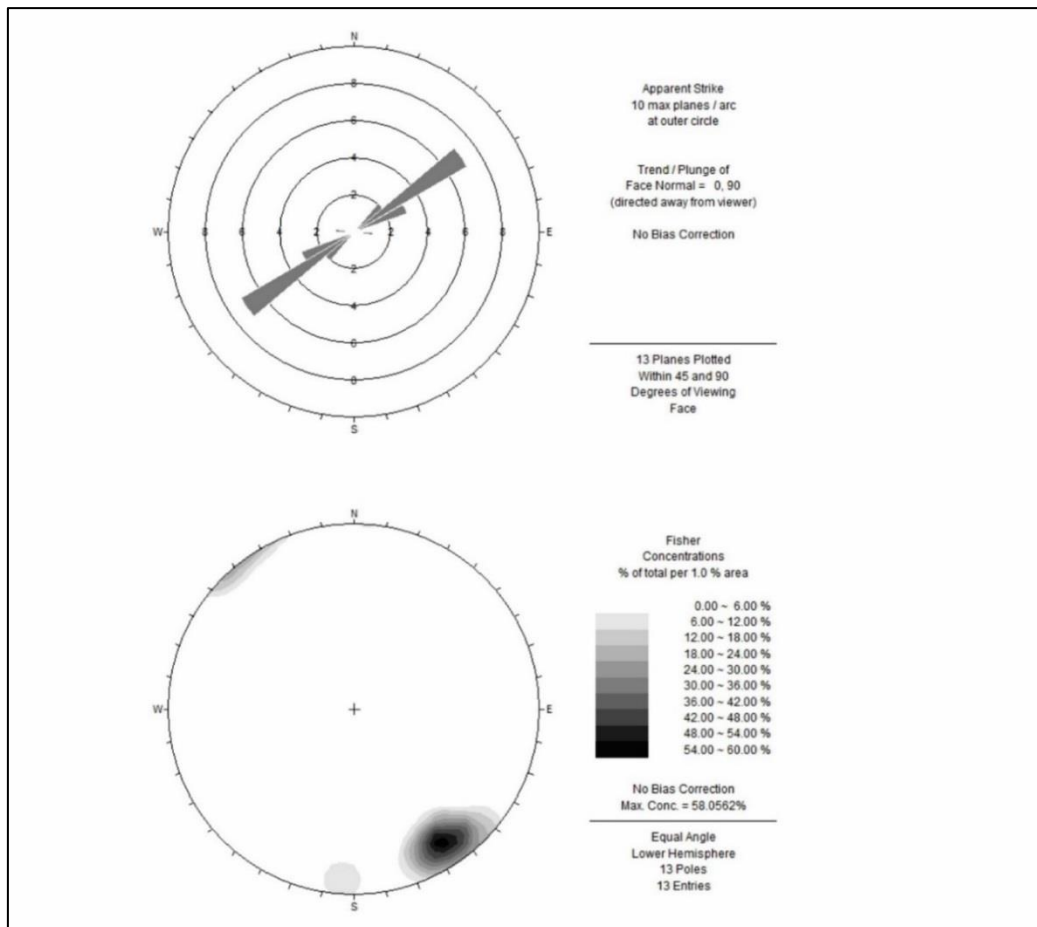
به منظور شناخت عوامل تکتونیکی مؤثر در تشکیل دره

به‌شکلی است که امتداد درزه‌های برداشت‌شده در دره عمود بر محور تاقدیس است؛ به این معنا که درزه‌های یادشده از نوع درزه‌های کششی‌اند که درارتباط با تاقدیس شکل گرفته‌اند. شیب زیاد دره‌ها نیز گواهی بر کششی بودن آنهاست. باتوجه به اینکه درزه‌های یادشده، سنگ‌های تراورتنی را نیز قطع کرده‌اند، می‌توان نتیجه گرفت تکتونیک منطقه و روند چین‌خوردگی همچنان فعال است.

وضعیت ساختاری درزه‌های موجود در دیواره‌های دره نشان می‌دهد منبع تأمین آب‌های ورودی به دره عمدتاً چشمه مطالعه‌شده است و نقش درزه‌ها در انتقال آب به درون دره چندان درخور توجه نیست.

صحرائی و تعیین جهت‌یابی دسته درزه‌ها استفاده و شبکه استریوگراف روی شبکه اشمیت بر مبنای جهت شیب و شیب درزه‌ها ترسیم شد (شکل ۶). مطابق شکل ۶، بیشترین تراکم قطب درزه‌ها در بخش جنوب‌شرقی مشاهده می‌شود؛ همچنین بر اساس نمودار گل‌سرخ‌ی ارائه‌شده در شکل ۶، تقریباً یک دسته درزه غالب در منطقه تشخیص داده می‌شود که امتداد آن، شمال‌شرق- جنوب‌غرب و زاویه شیب درزه‌های آن نزدیک به قائم است.

باتوجه به عکس‌های هوایی منطقه مشخص شد رژیم تکتونیکی فشاری در این ناحیه موجب شکل‌گیری تاقدیسی در مجاورت این دره شده است. امتداد تاقدیس یادشده



شکل ۶- نمودار گل‌سرخ‌ی و تصویر قطب صفحه‌های درزه‌های برداشت‌شده

برآورد سختی سنگ‌های تراورتنی و ارتباط آن با درجه تحکیم‌یافتگی آنها

اندازه‌گیری سختی سنگ به ژئومورفولوژیست‌ها اجازه می‌دهد به روش کمی بفهمند یک نوع سنگ دارای چه درجه‌ای از تحکیم و چه میزان هوازدگی است؛ از این رو، پژوهشگران بسیاری از جمله رسوب‌شناسان، زمین‌شناسان مهندس و همچنین دانشمندان شاغل در حوزه مربوط به ساختمان‌ها، بناها و اماکن دارای اهمیت میراث فرهنگی این مفهوم را مقیاسی برای سنجش عمر تشکیل سنگ، درجه هوازدگی و مقاومت سنگ استفاده می‌کنند؛ به‌طور مشهود باید بین درجه تحکیم و مدت زمان قرارگیری سنگ در معرض هوا رابطه وجود داشته باشد؛ این مبنا موجب شده است چکش اشمیت برای تخمین سن‌های نسبی پدیده‌های مختلف ژئومورفولوژیکی از جمله مورن یخچالی، یخچال‌های سنگی، جابه‌جایی توده‌ها، تالوس، خطوط ساحلی و سکوه‌های قاره‌ای، کارست و عوارض انسانی استفاده شود؛ از این رو، در پژوهش حاضر از سختی اشمیت برای تشخیص توالی سنی تراورتن‌های چشمه ندوشن استفاده شد. در شکل ۷، نمای کلی از محل دره شکل‌گیری چشمه تراورتنی ارائه شده است. در بررسی‌های صحرایی انجام‌شده، آزمایش چکش اشمیت با چکش تیپ L در ترازهای مختلف نسبت به محل ظهور چشمه انجام شد (شکل ۷). تعداد ۸ پله انتخاب و در هر پله، تعداد ۳۰ آزمایش در سطح گسترده انجام شد. مقادیر میانگین سختی اشمیت برای هر پله در شکل ۷ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، مقادیر سختی اشمیت در پله‌های نزدیک به مظهر چشمه بسیار ناچیز است و این مطلب، عدم تحکیم‌یافتگی رسوبات تراورتن در این نواحی را بیان می‌کند؛ با فاصله‌گرفتن از مظهر چشمه به سمت ترازهای پایین‌تر، مقادیر سختی اشمیت افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که در پله‌های تراز پایین، مقادیر سختی درخور توجهی اندازه‌گیری می‌شود و این مطلب نشان می‌دهد با افزایش سن رسوبات تراورتنی، درجه تحکیم‌یافتگی آنها زیاد و سختی آنها بیشتر می‌شود. گفتنی است در هر پله با نزدیک‌شدن به بخش‌های میانی و باتوجه‌به وجود جریان‌های

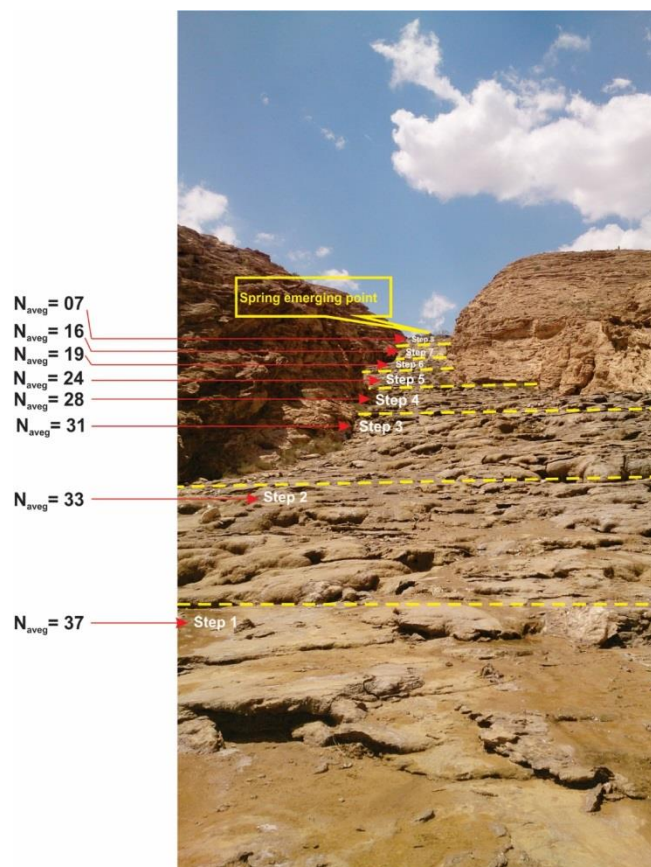
آب و رسوب‌گذاری، مقادیر سختی اشمیت ثبت‌شده کاهش می‌یابد؛ به این معنا که در هر تراز با فاصله‌گرفتن از خط جریان، درجه تحکیم‌یافتگی رسوبات افزایش می‌یابد.

بحث

ته‌نشینی رسوبات کربناته به‌شکل تراورتن در چشمه‌های آب گرم نشان‌دهنده ویژگی‌های سیستم تکتونیکی- زمین‌گرمایی است که آب گرم تا داغ به‌وجودآمده از چرخش گرمایی عمیق را روی سنگ بستر ولکانیکی یا کربناته روان کرده است (Gandin and Capezzuoli, 2014). چشمه‌های آب گرم، محیط‌های پیچیده‌ای‌اند که تحت تأثیر عملکرد متقابل فرایندهای فیزیکی و هیدرودینامیکی، شرایط رسوب‌گذاری متفاوتی با محیط‌های دریایی و حتی سایر محیط‌های قاره‌ای ایجاد می‌کنند (Clase et al. 2017, Bisse et al. 2018)؛ این شرایط متفاوت تنها تحت تأثیر دمای آب نیست، بلکه درجه اشباعی کلسیم، دبی، نظم و مکانیک جریان آب و همچنین حضور ترکیبات سولفور که روی شرایط زیستی محیط مؤثر است، آن را کنترل می‌کنند (Clase et al. 2015; Luo et al. 2019). برخلاف رسوبات دریایی و برخی رسوبات قاره‌ای، رسوبات گرمایی عمدتاً به‌طور قشری ته‌نشین می‌شوند. در مجموع، دو گروه اصلی رخساره‌ای در تراورتن‌های مطالعه‌شده شناخته شدند: اول، رخساره‌های غیرزیستی که عمدتاً به‌شکل قشرهای بلورین شکل گرفته‌اند و دوم، رخساره‌های زیستی که یا به‌طور مستقیم از موجودات زنده تشکیل شده‌اند مانند استروماتولیت‌ها و آنکوئیدها یا به‌طور غیرمستقیم و به‌واسطه فعالیت‌های میکروبی شکل گرفته‌اند که از این بین، می‌توان به فابریک‌های دندریتی اشاره کرد. رنگ‌های مختلف سیاه، قرمز و حتی خاکستری مایل به آبی در سطح تراس‌های کربناته نشانه‌ای از فعالیت باکتری‌های مختلف روی این بسترهاست (شکل ۴، و). میزان ته‌نشینی کربنات کلسیم در این رسوبات غالباً از طریق حرکت خطی یا آشفته آب تعیین می‌شود که این مسئله علاوه‌بر میزان تأمین آب از چشمه‌ها، به شیب توپوگرافی منطقه و سرعت جریان آب روی سطح زمین بستگی دارد؛ به‌طوری‌که میزان

مظهر چشمه، درجهٔ تحکیم‌یافتگی کاهش می‌یابد که یکی از علل آن می‌تواند فعالیت بیشتر زیستی در تراورتن‌های نزدیک به چشمه و تشکیل لامینه‌های جلبکی در تراورتن‌ها باشد؛ این مسئله یکی از عوامل مهم کاهش درجهٔ تحکیم‌یافتگی آنهاست. تحلیل نمونهٔ آب نیز نشان می‌دهد منابع سدیم، کلسیم و یون سولفور از منابعی غیر از رسوبات پیشین مانند هالیت و ژپس تأمین شده‌اند که این تفسیر با ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه مبنی بر وجودنداشتن سازندهای تبخیری حاوی ژپس و هالیت کاملاً مطابقت دارد و تأثیرگرفتن ترکیب آب از سیستم‌های ماگمایی را قوت می‌بخشد. در مجموع، رخساره‌های رسوبی شناسایی‌شده، ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه و تجزیه و تحلیل نمونهٔ آب، ژنز و منشأ چشمهٔ مطالعه‌شده را در ردهٔ چشمه‌های ترموزن قرار می‌دهند.

رسوب‌گذاری و نوع بلورهای تشکیل‌شده در حوضچه‌های دارای آب ساکن و مناطق دارای شیب زیاد و جریان سریع آب کاملاً متفاوت است؛ علاوه بر این، به نظر می‌رسد برآیند دو فرایند تبخیر (vaporization) و خروج گاز (degassing) نیز می‌تواند بر میزان رسوب‌گذاری و همچنین بر مورفولوژی و اندازهٔ بلورهای کربنات کلسیم تشکیل‌شده در قشرهای بلورین غیرزیستی تأثیرگذار باشد. عمدتاً فرایند تبخیر و افزایش درجهٔ اشباعی آب میزان ته‌نشینی کربنات کلسیم را در تراس‌های بسیار کم‌عمق و حوضچه‌های موقتی کنترل می‌کند و این امر به افزایش فعالیت‌های میکروبی در بستر این بخش‌ها منجر می‌شود؛ این شرایط می‌تواند باعث تشکیل تناوب‌هایی از قشرهای میکروبی و لامینه‌هایی از بلورهای کربنات کلسیم در این حوضه‌های کوچک مقیاس شود. بررسی درجهٔ تحکیم‌یافتگی تراس‌های فعال نشان می‌دهد با نزدیک شدن به



شکل ۷- تغییرات میانگین مقادیر سختی اشمیت برای تراورتن در پل‌کان‌های تراورتنی

نتیجه

این مطلب عدم تحکیم‌یافتگی رسوبات تراورتن در این نواحی را بیان می‌کند؛ با فاصله گرفتن از مظهر چشمه به سمت ترازهای پایین‌تر و افزایش سن رسوبات، مقادیر سختی اشمیت افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که رسوبات به سنگ‌های سخت تبدیل می‌شوند.

References

- Aghanabati A. 2004. The Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran. 586 p.
- Alai-Mahabadi S. and Foudazi M. 2007. Geological map of Aghda. 100,000. Geological survey and mineral exploration of Iran.
- Amiri V. Nakhaei M. and Lak R. 2017. Using radon-222 and radium-226 isotopes to deduce the functioning of a coastal aquifer adjacent to a hypersaline lake in NW Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*. 147:128-147.
- Amiri V. Nakhaei M. Lak R. and Kholghi M. 2016. Investigating the salinization and freshening processes of groundwater through major ion and trace element indicators: Urmia plain, NW of Iran. *Environ Monit Assess*. 188: 233-241.
- Arenas-Abad C. Vazquez-Urbez M. Pardo-Tirapu G. and Sancho-Marcen C. 2010. Fluvial and associated carbonate deposits. In: *Carbonates in Continental Settings* (Eds. A.M. Alonso-Zarza and L.H. Tanner) Development in Sedimentology 61: 133–175.
- Barazzuoli P. Costantini A. Fondi R. Gandin A. Ghezzi C. Lazzarotto A. Micheluccini M. Salleolini M. and Salvadori L. 1988. A geological and geological technical profile of Rapolano travertines. In: *Travertine from Siena* (Ed. V. Coli). 26–35.
- Bisse S.B. Ekomane E. Eyong J.T. Vincent O. Douville E. Maffo N. Ekoko E. and Dieudonne B. 2018. Sedimentological and geochemical study of the Bongongo and Ngol travertines located at the Cameroon Volcanic Line. *Journal of African Earth Sciences*. 143: 201-214.
- Boghici R. Van Broekhoven G.A. 2001. Hydrogeology of the Rustler Aquifer, Trans Pecos Texas; in *Aquifers of West Texas*. Texas Water Development Board Report. 356: 207-225.
- Chafetz H.S. and Folk, R.L. 1984. Travertines: depositional morphology and the bacterially constructed constituents. *Journal of Sedimentary Petrology*. 54: 289–316.
- Chafetz H.S. and Guidry S.A. 2003. Deposition and diagenesis of Mammoth Hot Springs travertine, Yellowstone National Park, Wyoming, U.S.A. *Can. Journal of Earth Sciences*. 40: 1515–1529.

بررسی تراورتن‌های ناحیه مطالعه‌شده، وجود پنج رخساره زیستی شامل میکرایت لخته‌ای، استروماتولیت، طبقه‌های میکروبی، رخساره آنکوئیدی و رخساره دندریتی و همچنین هشت رخساره غیرزیستی شامل قشر بلورین، بلورهای بادبزنی- شعاعی، بلورهای پرماند، حباب‌های پوشیده و سنگ‌های اسفنجی، رخساره کروی، رخساره بوته‌ای سوزنی، توف و کنگلومرا را در نهشته‌های کربناته نشان داد. به‌طورکلی، به نظر می‌رسد رخساره‌های بلوری عمدتاً تحت تأثیر رسوب‌گذاری غیرزیستی شکل گرفته‌اند؛ درحالی‌که رخساره‌های لامینه‌ای تحت تأثیر فعالیت‌های میکروبی مربوط به چشمه‌های آب گرم به وجود آمده‌اند. مقایسه رخساره‌های شناسایی‌شده در چشمه فعال موجود و توده‌های تراورتنی قدیمی بیرون‌زده در اطراف این چشمه با طبقه‌بندی‌های ارائه‌شده برای رخساره‌های تراورتنی مؤید تشکیل این تراورتن‌ها در شرایط مشابه و در سیستم چشمه آب گرم است. تجزیه و تحلیل آب چشمه یادشده نشان می‌دهد نمونه آب مدنظر دارای $\text{HCO}_3 + \text{SO}_4$ بیشتر از ۵ میلی‌اکی‌والان برلیتر است و علاوه بر کلسیت و دولومیت (یا آراگونیت و کلسیت‌های دارای منیزیم زیاد)، انحلال ژپس در مسیر جریان عبوری از تشکیلات سنگی این منطقه بسیار محتمل است؛ همچنین، تغییرات $\text{Na}/(\text{Na} + \text{Ca})$ و $\text{Cl}/(\text{Cl} + \text{HCO}_3)$ نسبت به مقدار TDS در نمونه آب تحلیل‌شده نشان می‌دهد فرایند غالب کنترل‌کننده کیفیت آب این چشمه، فرایندهای تبخیری‌اند که در نتیجه ارتباط مستقیم آب زیرزمینی با اتمسفر رخ می‌دهند. بر اساس نتایج، فراوان‌ترین آنیون‌های موجود در آب‌های خروجی از این محل به ترتیب کلراید و سولفات است که بر وجود تشکیلاتی با جنس‌های حاوی این‌گونه املاح و همچنین میزان انحلال زیاد آنها (که موجب تغلیظ آنها در نمونه آب می‌شود) دلالت می‌کند. بررسی درجه تحکیم نهشته‌های تراورتنی نشان می‌دهد مقادیر سختی اشمیت در سطوح نزدیک مظهر چشمه بسیار ناچیز است و

- Ford T.D. and Pedley H.M. 1996. A review of tufa and travertine deposits of the world. *Earth Science Review*. 41: 117–175.
- Fouke B.W. Bonheyo G.T. Sanzenbacher B. and FriasLopez J. 2003. Partitioning of bacterial communities between travertine depositional facies at mammoth hot springs, Yellowstone National Park, U.S.A. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 40: 1531–1548.
- Fouke B.W. Farmer J.D. Des Marais D.J. Pratt, L. Sturchio N.C. Burns P.C. and Discipulo M.K. 2000. Depositional facies and aqueous-solid geochemistry of travertine-depositing hot spring (Angel Terrace, Mammoth Hot Spring, Yellowstone National Park, U.S.A.). *Journal of Sedimentary Research*. 70: 565–585.
- Gallardo A. H. Tase N. 2007. Hydrogeology and geochemical characterization of groundwater in atypical small-scale agricultural area of Japan. *Journal of Asian Earth Sciences*. 29(1): 18-28.
- Gandin A. and Capezzuoli, E. 2008. Travertine versus calcareous tufa: distinctive petrologic features and related stable isotopes signature. II *Quaternario Ital. Journal of Quaternary Sciences*. 21: 125–136.
- Gandin A. Capezzuoli E. 2014. Travertine: distinctive depositional fabrics of carbonates from thermal spring systems. *Sedimentology*. 61 (1): 264e290.
- Gandin A. Capezzuoli E. and Sandrelli F. 2002. A Messinian hot-spring travertine system and its modern analogue at Rapolano in Southern Tuscany, Italy. 16th I.A.S. Congress, Johannesburg. 110.
- Gibbs R.J. 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. *Journal of Science*. 17: 1088-1090.
- Gonfiantini R. Panichi C. and Tongiorgi E. 1968. Isotopic disequilibrium in travertine deposition. *Earth Planetary Sciences Letter*. 5: 55–58.
- Guido D.M. and Campbell K.A. 2011. Jurassic hot spring deposits of the Deseado Massif (Patagonia, Argentina): characteristics and controls on regional distribution. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 203: 35–47.
- Guido D.M. Channing A. Campbell K.A. and Zamuner A. 2010. Jurassic geothermal landscapes and fossil ecosystems at San Agustín, Patagonia, Argentina. *Journal of Geological Society of London*. 167: 11–20.
- Guler C. and Thyne G.D. 2004. Hydrologic and geologic factors controlling surface and groundwater chemistry in Indian Wells-Owens Valley area, southeastern California, USA. *Journal of Hydrology*. 285: 177-198.
- Guo L. and Riding R. 1992. Aragonite laminae in hot water travertine crust, Rapolano Terme, Italy. *Sedimentology*. 39: 1067–1079.
- Chafetz H.S. Rush P.R. and Utech N.M. 1991. Microenvironmental controls on mineralogy and habit of CaCO₃ precipitates: an example from active travertine system. *Sedimentology*. 38: 107–126.
- Cipriani N. Ercoli A. Malesani P. and Vannucci S. 1972. I travertini di Rapolano Terme. *Mem. Soc. Geol. It.* 11: 31–46.
- Claes H. Degros M. Soete J. Claes S. Kele S. Mindszenty A. Török Á. El Desouky H. Vanhaecke F. and Swennen R. 2017. Geobody architecture, genesis and petrophysical characteristics of the Budakalász travertines, Buda Hills (Hungary). *Quaternary International*. 437: 107–128.
- Claes H. Soete J. Van Noten K. El Desouky H. Marques Erthal M. Vanhaecke F. Ozkul M. and Swennen R. 2015. Sedimentology, three-dimensional geobody reconstruction and carbon dioxide origin of Pleistocene travertine deposits in the Ballık area (south-west Turkey). *Sedimentology*. 62 (5): 1408-1445.
- Domenico P.A. and Schwartz F.W. 1990. Physical and chemical hydrogeology. John Wiley and Sons, New York. 824 p.
- Dunham R.J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: *Classification of Carbonate Rocks – A Symposium* (Ed. W.E. Ham), AAPG Mem. 1: 108–121.
- Dupraz C. Reid R.P. Braissant O. Decho A.W. Norman S.R. and Visscher P.T. 2009. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats. *Earth Sciences Review*. 96: 141–162.
- Facenna C. Soligo M. Billi A. De Filippis L. Funicello R. Rossetti C. and Tuccimei P. 2008. Late Pleistocene depositional cycles of the Lapis Tiburtinus travertine (Tivoli, central Italy): possible influence of climate and fault activity. *Global and Planetary Change*. 63: 299–308.
- Flügel E. 2010. *Microfacies of Carbonate Rocks*. Springer. Berlin. 976 p.
- Folk R.L. 1994. Interaction between bacteria, nannobacteria, and mineral precipitation in hot spring of Central Italy. *Geog. Phys. Quatern.* 48: 233–246.
- Folk R.L. and Chafetz H.S. 1983. Pisoliths (pisoids) in Quaternary travertines of Tivoli, Italy. In: *Coated Grains* (Ed. T.M. Peryt). Springer-Verlag. Berlin. 474–487
- Folk R.L. Chafetz H.S. and Tiezzi P.A. 1985. Bizarre forms of the depositional and diagenetic calcite in hot spring travertines, Central Italy. In: *Carbonate Cements* (Eds. N. Schneidermann and P.M. Harris), Soc. Econ. Paleont. Miner. Spec. Publ. 36: 349–369.

- Groundwater, past achievements and future challenges. A Balkema, Rotterdam. 567-573.
- Nakhaei M. Amiri V. Rezaei K. and Moosaei F. 2015. An investigation of the potential environmental contamination from the leachate of the Rasht waste disposal site in Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 74(1): 233-246.
- Okumura T. Takashima C. Shiraishi F. Akmaluddin and Kano A. 2012. Textural transition in an aragonite travertine formed under various flow conditions at Pancuran Pitu, Central Java and Indonesian Sedimentary Geology. 265: 195-209.
- Park S.C. Yun S.T. Chae G.T. Yoo I.S. Shin K.S. Heo C.H. and Lee S.K. 2005. Regional hydrochemical study on salinization of coastal aquifers, western coastal area of South Korea. *Journal of Hydrology*. 313(3-4): 182-194.
- Pedley H.M. 1990. Classification and environmental models of cool freshwater tufas. *Sedimentary Geology*. 68: 143-154.
- Pedley H.M. 2009. Tufas and travertines of the Mediterranean region: a testing ground for freshwater carbonate concepts and developments. *Sedimentology*. 56: 221-246.
- Pentecost A. 1994. Formation of laminate travertines at Bagno Vignoni, Italy. *Geomicrobiology Journal*. 12: 239-252.
- Pentecost A. 1995. The quaternary travertine deposits of Europe and Asia Minor *Quaternary Sciences Review*. 14: 1005-1028.
- Pentecost A. 2003. Cyanobacteria associated with hot spring travertines. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 40: 1447-1457.
- Pentecost A. 2005. *Travertine*. Springer, Berlin. 445 p.
- Pentecost A. and Tortora C. 1989. Bagni di Tivoli, Lazio: a modern travertine depositing site and its associated microorganism. *Boll. Soc. Geol. Ital.* 108: 315-324.
- Pentecost, A. and Viles, H.A. 1994. A review and reassessment of travertine classification. *Geography and Physics Quaternary*. 48: 305-314.
- Pokrovsky O.S. and Schott J. 2001. Kinetics and Mechanism of Dolomite Dissolution in Neutral to Alkaline Solutions Revisited. *American Journal of Science*. 301: 597-626.
- Pradhan B. 2009. Ground water potential zonation for basaltic watersheds using satellite remote sensing data and GIS techniques. *Central European Journal of Geosciences*. 1: 120-129.
- Pradhan B. and Pirasteh S. 2011. Hydro-chemical analysis of the groundwater of the Basaltic catchments: upper Bhatsai Region. *Maharashtra. Open Hydrology Journal*. 5: 51-57.
- Rainey D.K. and Jones B. 2009. Abiotic versus biotic controls on the development of the Fairmont Hot Guo L. and Riding R. 1994. Origin and diagenesis of quaternary travertine shrub fabrics, Rapolano Terme, central Italy. *Sedimentology*. 41: 499-520.
- Guo L. and Riding R. 1998. Hot-spring travertine facies and sequences Late Pleistocene, Rapolano Terme, Italy. *Sedimentology*. 45: 163-180.
- Hong D. Fan M. Yu L. and Cao J. 2018. An experimental study simulating the dissolution of gypsum rock. *Energy Exploration & Exploitation*. 36(4): 942-954.
- Jalali M. 2007. Hydrochemical identification of groundwater resources and their changes under the impacts of human activity in the Chah Basin in Western Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*. 130: 347-364.
- Janssen A. Swennen R. Poddoor N. and Keppens E. 1999. Biological and diagenetic influence in recent and fossil tufa from Belgium. *Sedimentary Geology*. 126: 74-95.
- Jianhua S. Xiaohu W. Yonghong S. Haiyang X. and Zongqiang C. 2008. Major ion chemistry of groundwater in the extreme arid region northwest China. *Environmental Geology*. 57(5): 1079-1087.
- Jones B. and Renaut R.W. 2010. Calcareous spring deposits in continental settings. In: *Continental Settings: Facies, Environments and Processes*. (Eds A.M. Alonso Zarza and L.H. Tanner), Elsevier, Amsterdam. 177-224.
- Ketata M. Gueddari M. and Bouhlila R. 2012. Use of geographical information system and water quality index to assess groundwater quality in El Khairat deep aquifer (Enfidha, Central East Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences*. 5: 1379-1390.
- Kitano. Y. 1963 Geochemistry of calcareous deposits found in hot springs. *Journal of Earth Sciences Nagoya University*. 11: 68-100.
- Koban C.G. and Schweigert G. 1993. Microbial origin of travertine fabrics—two examples from southern Germany (Pleistocene Stuttgart travertines and Miocene Ried schingen travertine). *Facies*. 29: 251-264.
- Kumar P.J.S. Elango L. and James E.J. 2014. Assessment of hydrochemistry and groundwater quality in the coastal area of South Chennai, India. *Arabian Journal of Geosciences*. 7(7): 2641-2653.
- Li Z. H. You C. Wan N. and Sun H. 2006. Thickness and stable isotope characteristics of modern seasonal climate-controlled sub-annual travertine lamina in a travertine-depositing stream at Baishutai, SW China: implications for palaeoclimate change. *Environmental Geology*. 51: 257-265.
- McLean W. Jankowski J. and Lavitt N. 2000. Groundwater quality and sustainability in an alluvial aquifer, Australia. In: *Sililo O et al (Eds.)*

- Springs carbonate deposit, British Columbia, Canadian Sedimentology. 56: 1832–1857.
- Riding R. 1991. Calcareous Algae and Stromatolites. Springer-Verlag, Berlin. 571 p.
- Schott J. and Pokrovsky S. 2001. Kinetics and Mechanism of Dolomite Dissolution in Neutral to Alkaline Solutions Revisited. American Journal of Sciences. 301: 597-626.
- Schreiber B.C. Smith D. and Schreiber E. 1981. Spring peas from New York State: nucleation and growth of fresh water hollow oolites and pisolites. Journal of Sedimentary Petrology. 50: 1341–1346.
- Sen Z. 2015. Practical and applied hydrogeology. Elsevier. 406 p.
- Sugihara C. Yanagawa K. Okumura T. Takashima C. Harijoko A. and Kano A. 2019. Transition of microbiological and sedimentological features associated with the geochemical gradient in a travertine mound in northern Sumatra, Indonesia. Sedimentary Geology. 343: 85–98.
- Zhu G.F. Li Z.Z. Su Y.H. Ma J.Z. and Zhang Y.Y. 2007. Hydrogeochemical and isotope evidence of groundwater evolution and recharge in Minqin Basin, Northwest China. Journal of Hydrology. 333: 239-251.