



Research Article

Effective factors in formation of tafoni in the Neogene sandstones of Eshtehard and Mardabad areas (Alborz province)

Masoomeh Zaheri¹, Behrouz Rafiei^{1*} , Reza Alipoor¹

1-Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, University of Bu-Ali Sina, Hamedan, Iran

Received: 27 Mar 2020 Accepted: 05 Aug 2020

Extended Abstract

Introduction

Tafoni weathering refers to large cave-like holes ranging from a few decimeters to several meters wide. They develop often in the medium and coarse-grained silicate rocks such as sandstones, conglomerates and granites in various areas, under arid and semi-arid climate condition

Materials and Methods

To identify the tafoni forms, we measured the morphological features (such as the dimensions and extent) of the tafoni in the sandstone layers in the north of Eshtehard and Mardabad sections. A total of ten medium to coarse-grained sandstone samples were selected from the lens-like channel deposits. Framework mineral composition (modal analysis) was quantified using the point-counting method (300-500 point) of Gazzi and Dickinson, as described by Ingersoll et al. (1984).

Results and Discussion

Field survey

To calculate the dimensions of the tafoni in the sandstone layers, the width (W), height (H) and depth (D) of the ninety eight tafoni were measured in different parts of two sections. The higher average values of W than the mean values of H and D and also the higher W/D values than H/D indicate that the tafoni forms in the sandstone layers are more elliptical and semicircular ($W > H > D$).

Petrography

Based on the petrographical and modal analysis, the mean grain size in the sandstone samples are about 0.5 mm with weak to moderate sorting and rounded to subrounded grains. Sandstone samples from the Eshtehard section include high amount of the igneous, sedimentary and metamorphic rock fragments (average 53.8%), and the feldspar (orthoclase and plagioclase) (average 35.4%), and low amount of mono- and poly-crystallin quartz grains (average 10.8%) with point, straight to concavo-convex grain contacts. In turn, the Mardabad sandstone samples show higher proportion of the igneous and sedimentary rock fragments (average 83%) and lower proportion of the feldspar (average 12%) and quartz (average 2.5%). The average amount of calcium carbonate in the Eshtehard and Mardabad sandstone samples are 6.4% and 10.4%, respectively. Dissolution of unstable grains such as feldspars (plagioclase and orthoclase) and carbonates (microcrystalline and fossil particles) and rock fragments due to the infiltration of acidic waters, promotes the development of porosity in the rock and reduces its resistance during chemical and physical weathering (Hamblin and Christiansen, 2008).

Citation: Zaheri, M. et al, 2020. Effective factors in formation of tafoni in the Neogene sandstones of Eshtehard and Mardabad areas (Alborz province), *Res. Earth. Sci.*: 11(3), (1-20) DOI: 10.52547/esrj.11.3.1

* Corresponding author E-mail address: b_rafiei@basu.ac.ir





The Eshtehard sandstones include higher feldspar amount ($Q_{11} F_{35} RF_{54}$) than that of the Mardabad sandstones ($Q_5 F_{12} RF_{83}$). According to microscopic studies, the Eshtehard sandstones have higher proportion of feldspar and in turn, higher chemical alteration. The development alteration in the feldspar grains can cause the weakness or loose texture and finally physical destruction of rock zones.

Dissolution of calcite and dolomite cement

Low proportion of calcite and dolomite cement due to dissolution have caused an increased amount of porosity of grains in the process of tafoni formation in the Eshtehard sandstones. The relatively high amounts of calcite cement and calcium carbonate rock fragments, low intergranular porosity and also point, straight to concavo-convex grain contacts created a relatively strong texture in the sandstones of the north of Mardabad section.

Conclusion

The presence of feldspar grains (in high amounts) and low amounts of calcite and dolomite cement, and consequently the increase of intergranular porosity (due to the alteration of feldspars and dissolution of calcite and dolomite cement) are important factors in the formation of tafoni in sandstone layers of the Eshtehard compared to the Mardabad sections. In general, the high thickness and extent of sandstone layers, chemical alteration of feldspars, and patch carbonate cement due to dissolution, control the formation and development of tafoni in the Eshtehard section.

Keywords: Eshtehard, Tafoni, Neogene sandstone, Mardabad.



عوامل موثر در پیدایش تافونی در ماسه‌سنگ‌های نئوژن منطقه اشتهارد و مردآباد (استان البرز)

معصومه ظاهری^۱، بهروز رفیعی*^۱، رضا علیپور^۱

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱/۱۸

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۹/۵/۱۵

چکیده

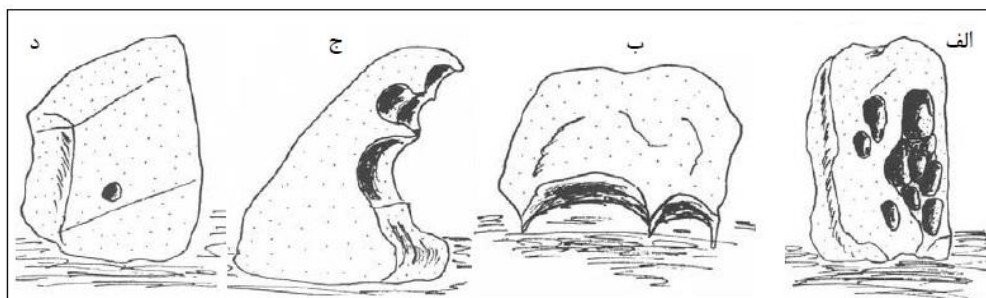
اشکال تافونی در ماسه‌سنگ‌های نئوژن اشتهارد (جنوب باختری کرج)، واقع در بخش شمال باختری پهنه ساختاری ایران مرکزی، منظره قابل توجهی را در این گروه از سنگ‌ها به وجود آورده‌اند. مطالعه این اشکال فرسایشی در دو برش شمال اشتهارد و مردآباد به ترتیب با ضخامت تقریبی ۸۲۰ تا ۱۰۸۰ متر بر روی نهشته‌های ماسه‌سنگی صورت گرفت. طی بررسی‌های میدانی مشخص شد که در برش شمال اشتهارد ضخامت لایه‌های ماسه‌سنگی، ابعاد و گستردگی تافونی‌ها (به ویژه در دامنه جنوب‌خاوری لایه‌های ماسه-سنگی) و درزه‌های پرشده با ژپیس، بیشتر می‌باشد. بررسی‌های سنگ‌نگاری نشان داد که ماسه‌سنگ‌های برش شمال اشتهارد از نوع فلدسپاتیک ولکارنایت ($Q_{11} F_{35} R_{F54}$) و برش مردآباد از نوع ولکارنایت ($Q_5 F_{12}$) می‌باشند. در ماسه‌سنگ‌های برش اشتهارد مقادیر فلدسپات و میزان دگرسانی بیشتر و مقادیر سیمان کلسیتی و دولومیتی کمتر از برش مردآباد است که می‌تواند ناشی از انحلال سیمان کربناتی باشد. آنالیز XRD بر روی مواد هوازده در داخل تافونی‌ها، حضور کانی‌های رسی ایلیت و کائولینیت را برای نمونه برش اشتهارد و کانی رسی ایلیت را برای نمونه برش مردآباد نشان می‌دهد. همچنین داده‌های بادنجه‌ی، جهت باد غالب در منطقه مورد مطالعه را باختری و شمال باختری نشان می‌دهد. در مجموع ضخامت زیاد لایه‌های ماسه‌سنگی، وجود درزه‌های پرشده با ژپیس، فراوانی کانی‌های نامقاوم از قبیل فلدسپات‌های (ارتوز و پلاژیوکلاز) دگرسان شده، انحلال سیمان کربناته طی هوازده‌گی، تخلخل بین دانه‌ای بالا و نیز وزش بادهای غالب (به‌ویژه در جهت باختر)، باعث گسترش و پراکندگی بیشتر تافونی‌ها در برش شمال اشتهارد نسبت به برش شمال مردآباد گردیده است.

واژه‌های کلیدی: اشتهارد، تافونی، ماسه سنگ‌های نئوژن، مردآباد.

مقدمه

هوازدگی‌های غار مانند به عنوان هوازدگی نابرابر یا انتخابی سطح سنگ توصیف می‌شود که در آن بخشی از سطح سنگ با از دست دادن اجزای خود به صورت حفره در می‌آید و بخش‌های با مقاومت نسبی بیشتر، پایدار باقی می‌ماند (Grab and Knight, 2015). واژه تافونی برای اولین بار توسط ایتالیایی‌ها، با عنوان حفرات بزرگ غار مانند در سنگ‌های هوازده، معرفی شد (Viles, 2001). این‌ها حفرات در اندازه‌های متفاوت هستند که در اثر هوازدگی شیمیایی و فیزیکی در رخنمون سنگ‌های آواری و سیلیکاته با دانه‌بندی متوسط و درشت از قبیل ماسه‌سنگ‌ها، کنگلومراها و گرانیت‌ها در نواحی مختلف، تحت شرایط آب و هوایی خشک و نیمه خشک ایجاد می‌شوند. تافونی در ماسه‌سنگ‌ها نسبت به دیگر سنگ‌ها با سرعت بیشتری توسعه می‌یابند (Grab et al, 2011). عقیده بر این است که این‌ها احتمالاً طی تکامل حفرات لانه زنبوری (حفره‌های هوازدگی

ریز) ایجاد شده باشند. تافونی‌ها دارای ورودی کمانی شکل با دیواره‌های داخلی محدب و کف تقریباً صاف، همراه با واریزه‌ها و موادی حاصل از هوازدگی در درون خود هستند. پهنا و ارتفاع دهانه و ژرفای هر یک از این حفرات از چند سانتی‌متر تا چندین متر تغییر می‌کند (Urban and Górnik, 2017). در کل ترکیب سنگ و شرایط آب و هوایی دو عامل اصلی در تشکیل انواع هوازدگی در یک منطقه می‌باشند (Viles, 2001). از طرفی ترکیب و بافت سنگ‌ها، میزان تغییرات درجه حرارت فصلی و شبانه‌روز، شدت و نوع بادهای غالب منطقه می‌تواند از عوامل مهم تشکیل و گسترش تافونی‌ها باشند (El Sharkaw, 2009). به طور کلی انواع اشکال تافونی که تاکنون مطالعه شده‌اند عبارتند از: الف) تافونی‌های دامنه-ای^۱، ب) تافونی‌های قاعده‌ای^۲، ج) تافونی‌های شاخی^۳ و د) تافونی‌های دروغین یا منفرد^۴ (Tshang, 1966) (شکل ۱).



شکل ۱: تقسیم‌بندی تافونی‌ها براساس شکل ظاهری، الف) تافونی‌های دامنه‌ای، ب) تافونی‌های قاعده‌ای، ج) تافونی-های شاخی و د) تافونی‌های دروغین (شانگ، ۱۹۶۶).

محمدی و کتابی، ۱۳۹۲؛ امینی بیرامی و اصغری کلجاهی، ۱۳۹۴). قابل ذکر است که بررسی‌های مشابهی در منطقه اشتهارد تاکنون صورت نگرفته است. از مطالعات صورت گرفته بر روی نهشته‌های نئوژن منطقه مورد مطالعه، می‌توان به بررسی جاذبه‌های زمین‌گردشگری رسوبی در منطقه

مطالعات متعددی در نقاط مختلف دنیا و ایران در خصوص تافونی و اشکال هوازدگی انجام شده است، با این حال توسعه و تکامل آن‌ها همچنان مورد توجه پژوهشگران زیادی می‌باشد (Grab et al, 2011; Ahmadi et al, 2015; Urban and Górnik, 2017) (خانه‌باد و همکاران، ۱۳۸۷؛

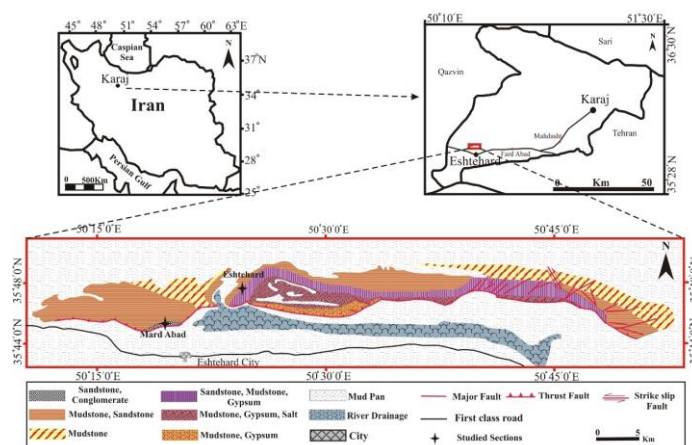
این محدوده افزون بر نهشته‌های کواترنری، تنها، نهشته‌های سرخ نئوژن رخنمون دارد (شکل ۲) که توسط گسل راندگی شمال اشتهارد، به شکل ناپیوسته بر روی واحدهای آتشفشانی ائوسن قرار می‌گیرد (مهدی‌زاده، ۱۳۷۴؛ یوسفی، ۱۳۷۹). از طرفی سنگ‌های آتشفشانی ائوسن با ترکیب بازالت تا آندزیت، ارتفاعات جنوبی گستره مورد مطالعه را پدید آورده است و سازندهای قدیمی‌تر از ائوسن در منطقه دیده نمی‌شود. با توجه به نبود سازند قم در منطقه مورد مطالعه، نهشته‌های گل-سنگی سرخ - خاکستری رنگ و ماسه سنگی موجود در منطقه با عنوان نهشته‌های سرخ نئوژن معرفی می‌شوند (آقانباتی، ۱۳۸۳). ضخامت تقریبی این نهشته‌ها در دو برش شمال شهرستان اشتهارد و شمال روستای مردآباد به ترتیب ۸۲۰ و ۱۰۸۰ متر می‌باشد که از نظر سنگ‌شناسی به طور غالب از گل‌سنگ‌های توده‌ای سرخ و خاکستری رنگ (گاهی همراه با ژپس)، ماسه-سنگ‌های ریز تا درشت دانه (از نظر بافتی نسبتاً سست) و مقدار خیلی ناچیز کنگلومرا تشکیل شده است (شکل ۳).

شمال اشتهارد، توسط ظاهری و همکاران (۱۳۹۷) اشاره نمود. بنابراین در پژوهش حاضر سعی شده تا به عوامل موثر بر تشکیل و گسترش اشکال هوازدگی (تافونی) در ماسه‌سنگ‌های نئوژن در دو برش شمال اشتهارد و مردآباد در استان البرز، با شرایط آب و هوایی نیمه‌خشک پرداخته شود. در نهایت ذکر این نکته ضروری است که مطالعه و درک عوامل ایجادکننده حفره‌های حاصل از هوازدگی از قبیل تافونی‌ها در ماسه‌سنگ‌ها و دیگر سنگ‌های روی زمین، فرصت مناسبی جهت درک فرآیندهای رسوبی و هوازدگی‌هایی شبیه به تافونی، در دیگر سیارات از قبیل مریخ خواهد بود.

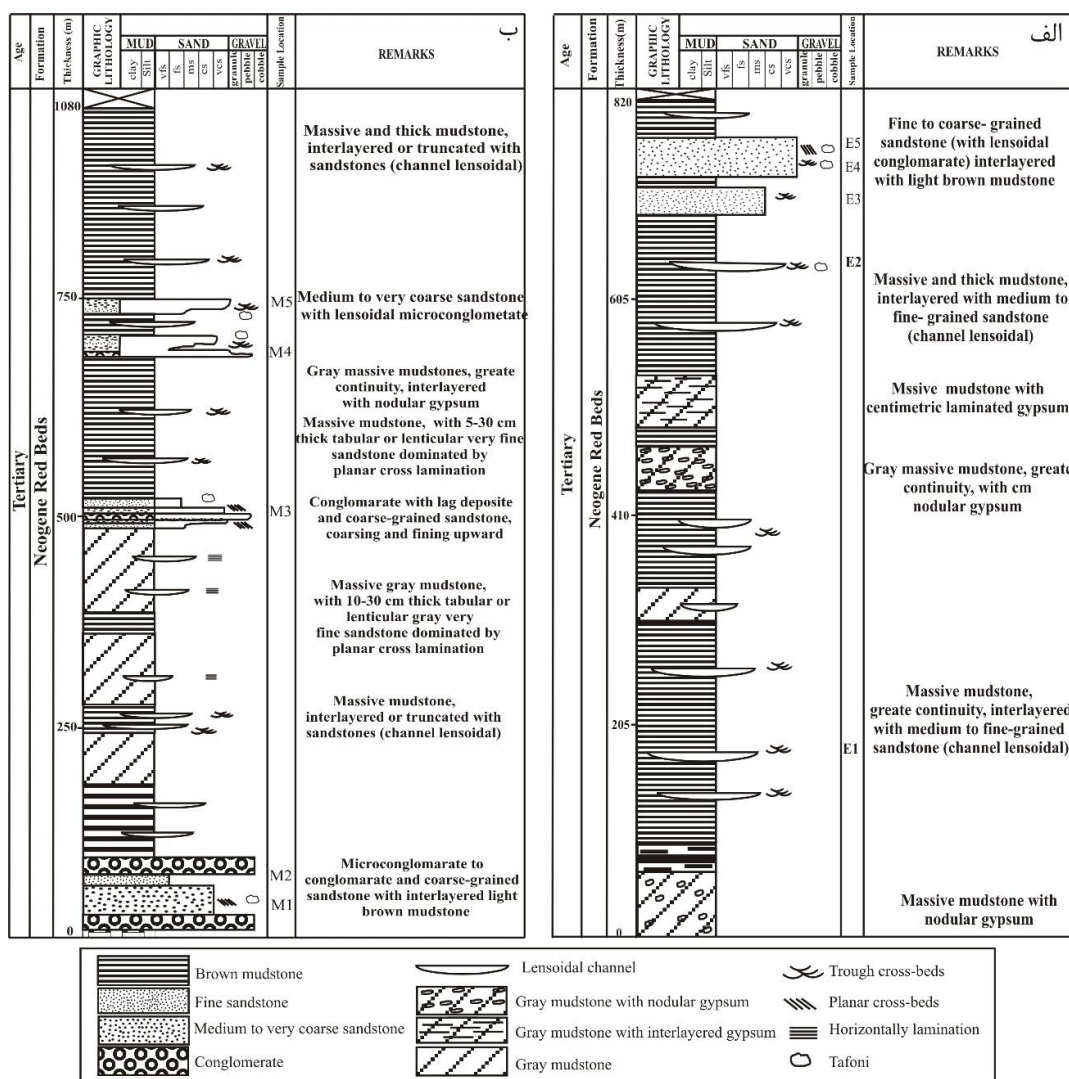
منطقه مورد مطالعه

زمین‌شناسی عمومی منطقه

گستره مورد مطالعه با وسعت حدود ۱۲۰ کیلومتر مربع در ۶۳ کیلومتری جنوب‌باختری کرج، در بخش‌های شمال و خاور شهرستان اشتهارد واقع شده است (شکل ۲). از نظر زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در حاشیه شمال‌باختری پهنه ایران مرکزی و جنوب پهنه البرز مرکزی قرار دارد. در



شکل ۲: موقعیت جغرافیایی و نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (ترسیم مجدد، اقتباس از مهدی‌زاده (۱۳۷۴) و یوسفی (۱۳۷۹)). (امتداد لایه‌ها در برش اشتهارد شمال خاوری - جنوب‌باختری و در برش مردآباد خاوری - باختری می‌باشد).



شکل ۳: ستون چینه‌شناسی، الف) برش شمال اشتهارد و ب) برش شمال مردآباد در منطقه مورد مطالعه (موقعیت هر دو برش در شکل ۲ نشان داده شده است)، همراه با گسترش اشکال تافونی.

زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کرج (مهدی‌زاده، ۱۳۷۴) و اشتهارد (یوسفی، ۱۳۷۹) صورت گرفت و مختصات عوارض با GPS تعیین شد. همچنین ویژگی‌های ریخت‌شناسی از قبیل ابعاد و گستردگی تافونی‌ها در ماسه‌سنگ‌های دو برش شمال اشتهارد و مردآباد، بررسی و عکس‌برداری شد. عملیات درزه‌برداری (۴۹ برداشت) در بخش-های زیادی از لایه‌های ماسه‌سنگی صورت گرفت. همچنین به منظور بررسی ویژگی‌های کانی-شناسی و بافتی ماسه‌سنگ‌های متوسط و درشت-

مواد و روش‌ها

در این تحقیق به منظور شناخت بهتر اشکال هوازگی و عوامل پدیدآورنده این ساخت‌ها، پیمایش‌های میدانی و مطالعات آزمایشگاهی (مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی، تعیین درصد کربنات کلسیم نمونه‌های ماسه‌سنگی و آنالیز XRD نمونه‌های هوازده و بررسی داده‌های بادسنجی) صورت گرفت. بنابراین به منظور شناسایی و معرفی تافونی‌ها، پیمایش‌های میدانی متعددی براساس عکس‌های هوایی و نقشه‌های

برش شمال اشتهارد و مردآباد شناسایی شدند (شکل ۴). فراوانی تافونی‌ها در هر دو برش به ترتیب شامل انواع دامنه‌ای، قاعده‌ای، شاخی و دروغین می‌باشد. همچنین برای دستیابی به ابعاد تافونی‌ها مقادیر پهنا (W)، ارتفاع (H) و عمق (D) ۹۸ تافونی، در بخش‌های مختلف لایه‌های ماسه-سنگی اندازه‌گیری و میانگین تعدادی از آن‌ها محاسبه گردید (جدول ۱). میانگین پهنا در تافونی‌های هر دو برش، بیشتر از مقادیر عمق و ارتفاع آن‌ها می‌باشد. از طرفی نسبت ارتفاع به عمق (H/D) و پهنا به عمق (W/D) تافونی‌ها برای هر دو برش محاسبه و میانگین آن‌ها به دست آمد (جدول ۱). میانگین مقادیر H/D و W/D می‌تواند در جهت تعیین کروی یا بیضوی بودن دهانه تافونی‌ها به کار رود (Mcbrid and Picard, 2000). براساس اطلاعات به دست آمده، بالا بودن میانگین مقادیر W نسبت به میانگین مقادیر H و D و نیز بالا بودن مقادیر W/D نسبت به H/D نشان می‌دهد که تافونی‌های موجود در لایه‌های ماسه‌سنگی هر دو برش بیشتر بیضوی و نیم‌دایره‌ای (W>H>D) بوده که تائیدی بر حضور تافونی‌های با اشکال دامنه‌ای، قاعده‌ای و شاخی بیضوی شکل هستند (شکل ۴). همچنین بررسی واحدهای ماسه‌سنگی در هر دو برش نشان می‌دهد که حداکثر ضخامت لایه‌های ماسه‌سنگی در برش اشتهارد حدود ۵۰ متر (در بخش‌های بالای توالی) و حداقل حدود ۵ متر (در بخش‌های میانی و پایین توالی) بوده در صورتی که حداکثر ضخامت این لایه‌ها در برش مردآباد حدود ۲۰ متر (در بخش‌های بالای توالی) و حداقل حدود ۳ متر (در بخش‌های پایین توالی) می‌باشد (شکل ۳). از این‌رو تافونی‌ها در برش شمال اشتهارد نسبت به برش مردآباد، دارای ابعاد بزرگ و گسترش زیادی

دانه در دو برش، تعداد ۱۰ مقطع نازک (تعداد ۵ مقطع نازک از هر برش) از نهشته‌های کانالی لنزی و صفحه‌ای تهیه و توسط میکروسکوپ پلاریزان مطالعه شد. آنالیز مدال ماسه‌سنگ‌ها با تعیین درصد اجزای تشکیل‌دهنده، تخلخل و سیمان به روش گزی-دیکینسون با شمارش حدود ۳۰۰ تا ۵۰۰ دانه در هر مقطع صورت گرفت (Ingersoll et al, 1984) و سپس نمونه‌های ماسه‌سنگی به روش فولک (Folk, 1974) نام‌گذاری شدند. همچنین برای تعیین درصد کربنات کلسیم نمونه‌های ماسه‌سنگی از روش تیتراسیون استفاده شد (Carver, 1971). برای شناسایی نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده مواد حاصل از هوازدگی ماسه-سنگ‌ها در درون حفرات تافونی، تجزیه پراش اشعه ایکس^۵ بر روی دو نمونه پودر^۶ صورت گرفت. بدین منظور حدود ۱-۲ گرم از نمونه برداشت شده، در هاون آگاتی پودر شدند (Moore and Reynolds, 1997) و سپس نمونه‌ها در آزمایشگاه گروه زمین‌شناسی دانشگاه بوعلی سینا با دستگاه XRD مدل Italstructures و تحت شرایط (Cu α , 40 kV, 30 mA, 2-70° 2 θ) مورد آنالیز پراش اشعه ایکس قرار گرفتند. همچنین براساس داده‌های جهت و سرعت باد (۲۴۰ داده) در ایستگاه فرودگاه پیام کرج، گلباد شهر اشتهارد توسط نرم افزار WRPLOT^۷ v.8.0.2 ترسیم شد. برای تعیین سرعت و نوع بادهای در منطقه مورد مطالعه، از روش سازمان هواشناسی جهانی^۸ (WMO) استفاده گردید.

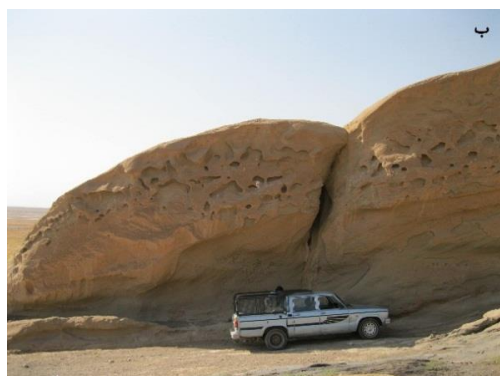
نتایج

مطالعات صحرائی

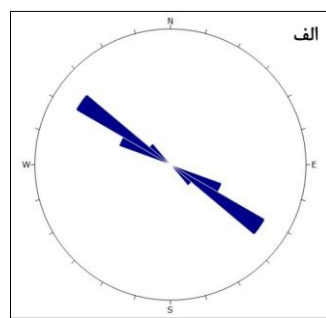
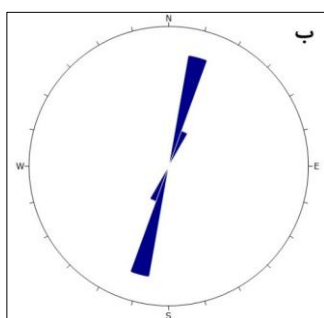
براساس شواهد میدانی، انواع مختلف تافونی‌ها از قبیل دامنه‌ای، قاعده‌ای، شاخی و دروغین در دو

لایه‌ها و با تراکم ۱۰-۵/۰ متری و بازشدگی ۲-۳ سانتی‌متری می‌باشند. روند درزه‌ها در برش اشتهارد شمال‌باختر جنوب‌خاور و در برش مردآباد شمال‌خاوری جنوب‌باختری می‌باشد (شکل ۵).

هستند (جدول ۱ و شکل ۴ ب، ج). همچنین با استفاده از نرم‌افزار Dips v.6.1 روند گسترش درزه‌های واقع در لایه‌های ماسه‌سنگی برش اشتهارد و مردآباد مشخص شد. بررسی درزه‌ها نشان داد که گسترش آن‌ها در لایه‌های ماسه-سنگی هر دو برش به صورت عمود بر امتداد این



شکل ۴: انواع تافونی‌ها در منطقه مورد مطالعه. الف) قاعده‌ای در برش مردآباد (دید به سمت شمال)، ب) دامنه‌ای در برش شمال اشتهارد (دید به سمت باختر)، ج) شاخی در برش شمال اشتهارد (دید به سمت باختر)، د) دروغین در برش مردآباد (دید به سمت شمال‌باختر).



شکل ۵: نمودار گل‌سرخ‌ی درزه‌ها، الف) برش اشتهارد با روند غالب N50W تا N60W و ب) برش مردآباد با روند غالب N10E تا N20E

جدول ۱: ابعاد تعدادی از تافونی‌های اندازه‌گیری شده در برش اشتهاارد (E) و برش مردآباد (M).

ابعاد (برحسب متر) شماره ایستگاه	W	H	D	W/D	H/D
E1	3.20	1.70	0.84	3.80	2.02
E2	1.50	0.75	0.75	2.00	1.00
E3	2.70	1.50	0.90	3.00	1.66
E4	2.20	0.95	1.00	2.20	0.95
E5	0.80	0.50	0.20	4.00	2.50
E6	1.75	0.74	0.90	1.94	0.82
E7	2.15	1.20	0.85	2.52	1.41
E8	1.97	0.90	0.88	2.23	1.02
E9	1.43	0.76	0.32	4.46	2.37
Mean	1.96	1.00	0.73	2.90	1.52
M1	0.96	0.65	0.50	1.92	1.30
M2	0.70	0.50	0.35	2.00	1.42
M3	1.20	0.80	0.93	1.29	0.86
M4	0.60	0.44	0.30	2.00	1.46
M5	0.85	0.60	0.52	1.63	1.15
M6	0.51	0.49	0.34	1.50	1.44
M7	0.89	0.53	0.48	1.79	1.39
Mean	0.81	0.57	0.48	1.73	1.28

مطالعات آزمایشگاهی

سنگ‌نگاری: با توجه به گسترش محدود ماسه-سنگ‌ها در هر دو برش و یکنواخت بودن ترکیب آن‌ها، تعداد ۱۰ مقطع نازک برای انجام مطالعات میکروسکوپی کفایت می‌کند. بنابراین نمونه‌های E₁ تا E₅ از برش شمال اشتهاارد و نمونه‌های M₁ تا M₅ از برش شمال مردآباد (شکل ۳) مورد بررسی قرار گرفتند. بررسی‌های بافتی در زیر میکروسکوپ نشان می‌دهد که میانگین اندازه ذرات در نمونه‌های ماسه‌سنگی هر دو برش حدود ۰/۵ میلی‌متر و از نظر بافتی دارای جورشدگی ضعیف تا متوسط بوده و دانه‌ها زاویه‌دار (دانه‌های کوارتز و فلدسپات) تا نیمه گردشده و گرد شده (خرده سنگ‌ها) هستند. از نظر نحوه تماس دانه‌ها، نمونه‌های برش اشتهاارد بیشتر دارای تماس شناور (تماس دانه به حفره و دانه به سیمان) بوده و در برش مردآباد تماس بیشتر از نوع دانه‌ای (محدب-مقعر و نقطه‌ای) می‌باشد (شکل ۶). براساس شواهد سنگ‌نگاری و تحلیل مدال، ماسه‌سنگ‌های برش اشتهاارد غنی از خرده‌سنگ (آذرین، رسوبی و

دگرگونی)، فلدسپات (ارتوزکلاز و پلاژیوکلاز) و فقیر از کوارتز (تک‌بلورین و چندبلورین) بوده، درحالی که نمونه‌های برش مردآباد غنی از خرده-سنگ (آذرین و رسوبی) و فقیر از فلدسپات و کوارتز می‌باشند (جدول ۲). در نمونه‌های برش اشتهاارد مقادیر کوارتز بین ۶ و ۱۷ درصد (میانگین ۱۰/۸ درصد)، فلدسپات بین ۲۷ و ۴۱ درصد (میانگین ۳۵/۴ درصد)، خرده‌سنگ بین ۴۶ و ۶۳ درصد (میانگین ۵۳/۸ درصد)، سیمان آهکی بین ۱ و ۶ درصد (میانگین ۳/۲۵ درصد)، سیمان دولومیتی ۲ و ۳ درصد (میانگین ۲/۳ درصد)، زمینه حدود ۳ درصد، تخلخل بین ۱۱ و ۱۷ درصد (میانگین ۱۴ درصد) (با ترکیب متوسط Q₁₁ F₃₅ RF₅₄) می‌باشد. در نمونه‌های برش مردآباد نیز میزان کوارتز بین ۲ و ۷ درصد (میانگین ۵/۲ درصد)، فلدسپات بین ۹ و ۱۴ درصد (میانگین ۱۲ درصد)، خرده‌سنگ بین ۸۰ و ۸۸ درصد (میانگین ۸۳ درصد)، سیمان آهکی بین ۴ و ۱۲ درصد (میانگین ۶/۸ درصد)، زمینه حدود ۲ درصد، تخلخل بین ۶ و ۱۳ درصد

مردآباد بین ۶ و ۱۳ درصد (میانگین ۱۰/۴ درصد) می‌باشد. نتایج مدال نمونه‌های ماسه‌سنگی به صورت درصد فراوانی هر یک از اجزای تشکیل دهنده، در جدول ۲ نمایش داده شده است.

(میانگین ۱۰ درصد) (با ترکیب متوسط $Q_5 F_{12}$ RF_{83}) در تغییر است. همچنین مقادیر کربنات کلسیم به دست آمده به روش تیتراسیون برای نمونه‌های برش اشتهارد، بین ۳ و ۱۰ درصد (میانگین ۶/۴ درصد) و برای نمونه‌های برش

جدول ۲: درصد فراوانی اجزای تشکیل دهنده نمونه‌های ماسه‌سنگی برش‌های اشتهارد (E) و مردآباد (M)

Sample	Qm	Qp	K	P	Ls		Lv	Lm	Op	Cem		Mat	Vo	% QFR			CaCO ₃ % (Titration)
					S	C				Cal	Dol			Q	F	RF	
E1	6	5	28	7	1	1	19	18	2	0	2	0	11	13	41	46	3
E2	5	3	13	10	3	3	44	3	3	1	2	0	10	10	27	63	5
E3	3	2	18	12	8	11	29	2	1	2	3	0	7	6	34	60	10
E4	7	6	19	6	5	6	19	7	0	6	0	3	16	17	35	48	8
E5	4	2	25	10	4	5	30	6	0	4	0	0	11	8	40	52	6
Mean	5.0	3.6	20.8	9.2	4.6	5.2	28.6	7.4	1.5	3.2	2.3	3	14	10.8	35.4	53.8	6.4
M1	3	2	5	3	3	4	65	0	0	7	0	2	6	6	9	85	9
M2	4	2	4	6	6	5	53	0	1	6	0	2	11	7	13	80	12
M3	1	2	5	6	9	3	54	1	1	5	0	0	13	4	14	82	11
M4	2	0	5	4	3	1	71	0	0	4	0	0	10	2	11	88	6
M5	4	1	6	4	1	5	55	0	2	12	0	0	10	8	12	80	13
Mean	2.8	1.7	5.0	4.6	4.4	3.6	59.6	1.0	1.4	6.8	0	2.0	10	5.4	11.8	83.0	10.2

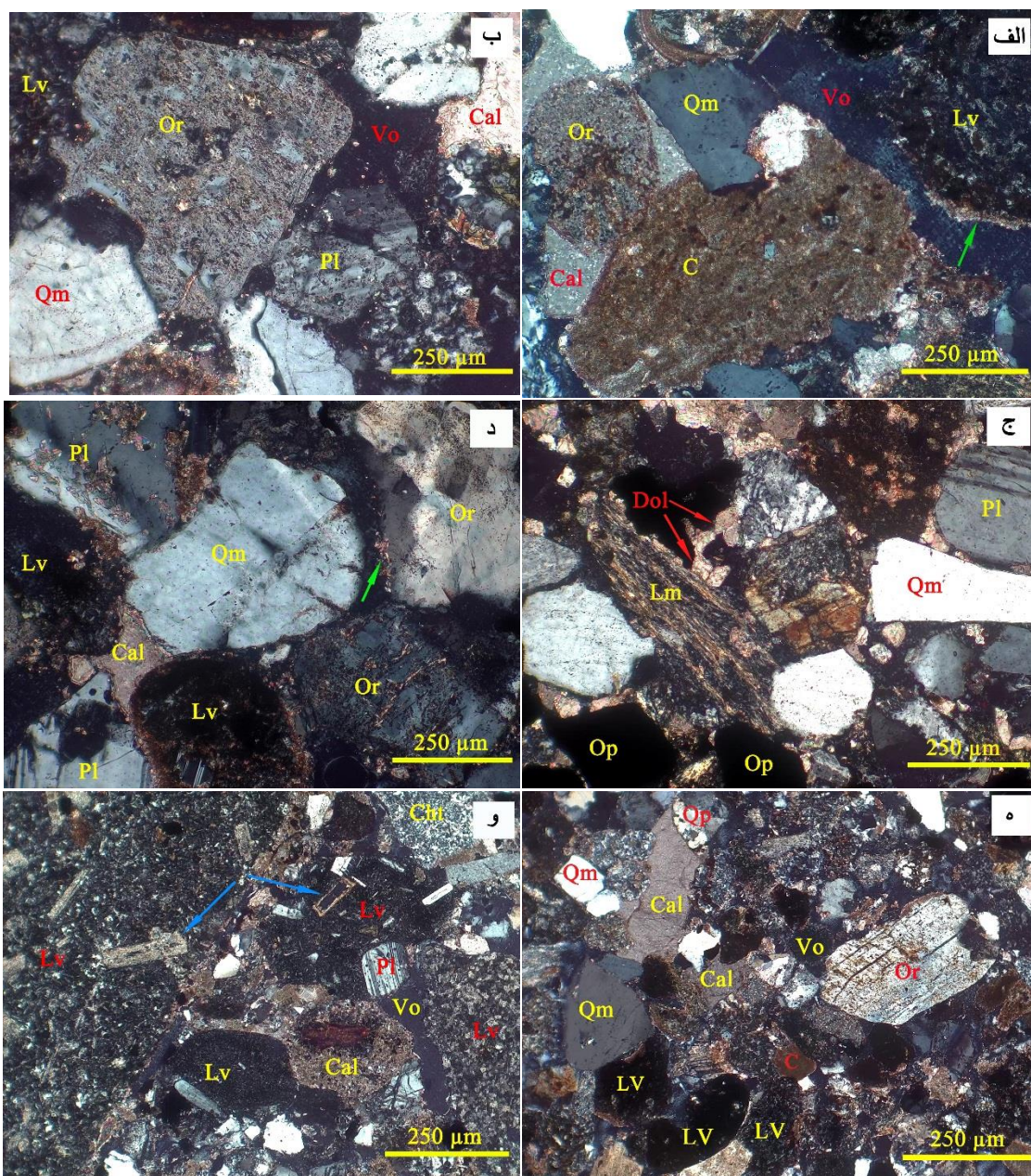
Qm: کوارتز تک‌بلوری، Qp: کوارتز چندبلوری، K: فلدسپات پتاسیم‌دار، P: پلاژیوکلاز، Ls: خرده رسوبی (آهکی (C)، ماسه‌سنگی (S))، Lv: خرده آذرین بیرونی، Lm: خرده دگرگونی، Op: کانی‌های تیره، Cem: سیمان (Cal: آهکی و Dol: دولومیتی)، Mat: ماتریکس یا زمینه، Vo: حفره یا تخلخل، Q: (Qm+Qp)، F: (K+P)، RF: (Ls+Lv+Lm)، CaCO₃: درصد کربنات کلسیم به دست آمده به روش تیتراسیون.

ریزبلور) در برخی موارد می‌توان آثار دگرسانی را در بلورهای پلاژیوکلاز مشاهده نمود (شکل ۶ و). همچنین سیمان در نمونه‌های برش اشتهارد از نوع کلسیتی و دولومیتی (شکل ۶ ج) بوده و در برش مردآباد از نوع کلسیتی می‌باشد (شکل ۶ د و ه). تخلخل موجود بیشتر ثانویه بوده که توسط انحلال سیمان کلسیتی - دولومیتی (وجود بقایایی از سیمان انحلال یافته در فضاهای خالی) و تجزیه دانه‌های ناپایدار ایجاد شده‌اند (شکل ۶ الف، د و و). ترسیم نمودار سه‌تایی QFRF براساس درصد فراوانی اجزای تشکیل دهنده (Folk, 1974) (جدول ۲)، ماسه‌سنگ‌های برش شمال اشتهارد در محدوده فلدسپاتیک لیتارنایت و با توجه به فراوانی خرده‌سنگ‌های آتشفشانی با عنوان

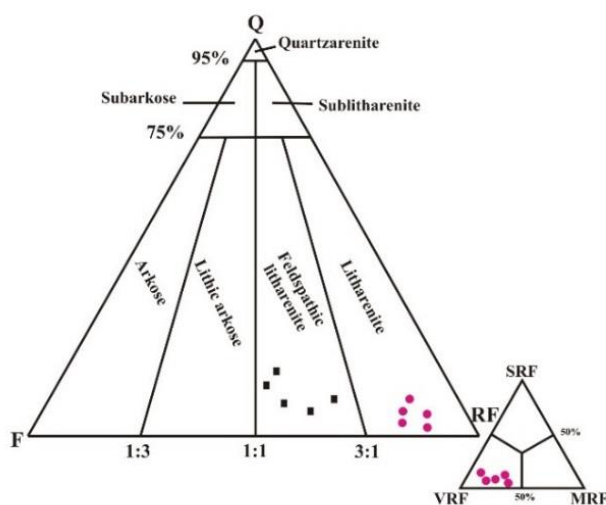
براساس بررسی‌های انجام شده مشخص گردید که مقدار فلدسپات در برش اشتهارد بیشتر از برش مردآباد می‌باشد و نیز در نمونه‌های برش اشتهارد مقدار فلدسپات‌های پتاسیم‌دار (ارتوکلاز) بیشتر از پلاژیوکلاز بوده و می‌توان آثار دگرسانی را در هر دوی آن‌ها به وضوح دید (شکل ۶ د، ه، و). در نمونه‌های هر دو برش دگرسانی در ارتوکلاز بیشتر از پلاژیوکلاز مشاهده می‌شود. همچنین خرده‌سنگ‌ها در هر دو برش بیشتر آتشفشانی (با بافت پورفیری و میکرولیتی) و رسوبی (خرده فسیلی، میکرایتی، ماسه‌سنگی و چرت) و به مقدار کمتر خرده دگرگونی (اسلیتی) می‌باشند (شکل ۶). در خرده‌سنگ‌های آتشفشانی با بافت پورفیری (حضور بلورهای درشت پلاژیوکلاز در زمینه

سنگهای آذرین، در محدوده‌ی ولکارنایت (Q₅)
 قرار گرفتند (شکل ۷). (F₁₂ RF₈₃)

فلدسپاتیک ولکارنایت (Q₁₁ F₃₅ RF₅₄) نام‌گذاری
 شدند و ماسه‌سنگ‌های برش مردآباد در محدوده-
 ی لیتارنایت و با توجه به فراوانی نسبی خرده-



شکل ۶: تصاویر میکروسکوپی از ماسه‌سنگ‌های برش اشتهارد (الف، ب، ج) و مردآباد (د، ه، و). (خرده آتشفشانی (Lv) و تجزیه‌شدگی درشت بلورهای پلاژیوکلاز (پیکان آبی)، خرده رسوبی (Ls): آهکی (C) و چرت (Cht)، خرده دگرگونی (Lm)، کوارتز تک‌بلور (Qm)، کوارتز چندبلور (Qp)، پلاژیوکلاز (Pl) و ارتوکلاز (Or) همراه با هوازدگی شیمیایی (سرسیتی شدن)، کانی‌های تیره (Op)، سیمان‌های آهکی (Cal) و دولومیتی (Dol) با پیکان قرمز، تخلخل (Vo) همراه با آثار سیمان انحلال یافته (پیکان سبز).

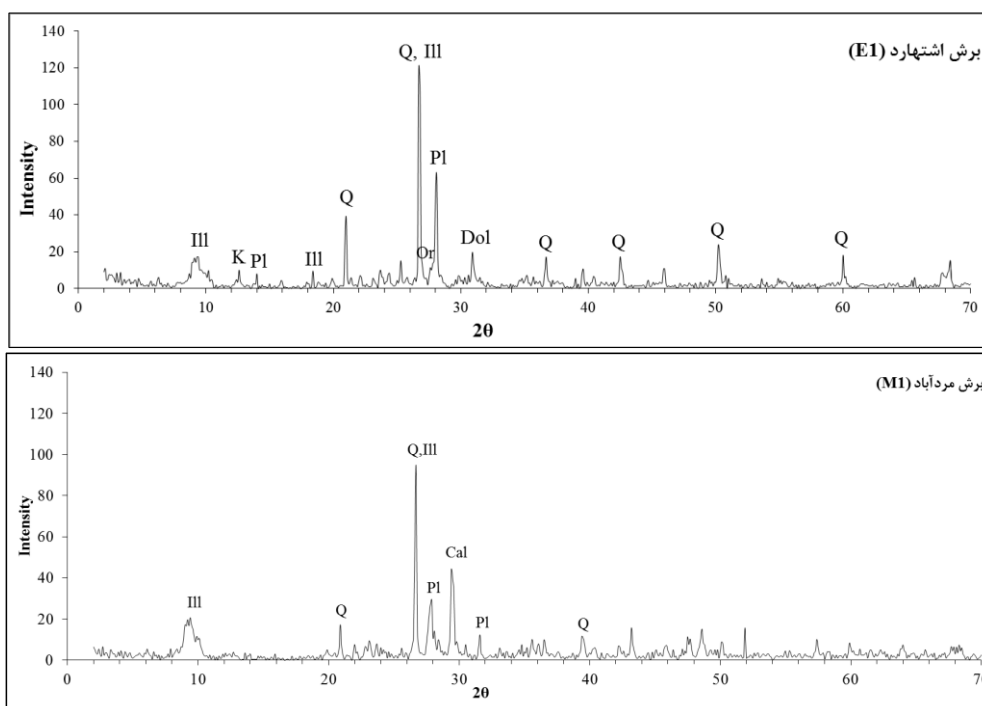


شکل ۷: ترکیب نمونه‌های ماسه‌سنگی در برش اشتهاارد (مربع مشکی) و برش مردآباد (دایره قرمز) براساس نمودار سه-تایی (QFR) (Folk, 1974).

نوع کانی‌های موجود در نمونه برش اشتهاارد شامل کوارتز، پلاژیوکلاز، ایلیت، دولومیت، کائولینیت و ارتوکلاز و برای نمونه برش مردآباد شامل کوارتز، کلسیت، پلاژیوکلاز و ایلیت می‌باشد (شکل ۸).

تجزیه پراش ایکس

تجزیه پراش اشعه ایکس بر روی دو نمونه از مواد حاصل از هوازدگی در محل تافونی‌ها در برش اشتهاارد (E₁) و مردآباد (M₁) نشان می‌دهد که



شکل ۸: نتایج پراش اشعه ایکس برای نمونه‌های خاک حاصل از هوازدگی، ب. (Ill): ایلیت، K: کائولینیت، Or: ارتوکلاز، Pl: پلاژیوکلاز، Q: کوارتز، Cal: کلسیت، Dol: دولومیت.

بادسنجی^۹

براساس داده‌های بادسنجی در ایستگاه فرودگاه پیام کرج در بازه زمانی ۱۰ سال (۱۳۸۷-۱۳۹۶) و نیز گلباد شهر اشتهارد در شکل ۹، مشخص است که بادهای غالب بیشتر در جهت باختری بوده،

ولی بادهای در جهت شمال باختر نیز در منطقه مورد مطالعه وجود دارند. همچنین سرعت باد در منطقه بیشتر از ۴ گره بوده که تحت عنوان بادهای متوسط تا نسبتاً شدید یاد می‌شود (www.wmo.int).



شکل ۹: گلباد شهر اشتهارد رسم شده براساس داده‌های بادسنجی (جهت باد غالب به سمت باختر و شمال باختر) (www.irimo.ir).

بحث عوامل کنترل کننده در ایجاد تافونی‌های مورد مطالعه

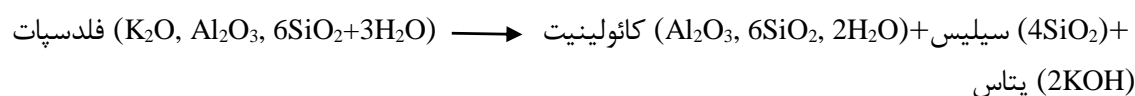
گروهی از پژوهشگران معتقدند که فرایند تشکیل تافونی‌ها یک فرایند شیمیایی بوده ولی گروه دیگر آن را محصول فرایند فیزیکی می‌دانند (Cílek, V., 1998; McBride and Picard, 2000; Turkington, 2004; Dill et al, 2010) دیدگاه دیگر این است که شکل‌گیری تافونی‌ها در ارتباط

با تغییرات رطوبت در سنگ می‌باشد (Fruhmann et al, 2014). در حالت کلی هوازدگی شیمیایی (دگرسانی) اجزای سنگ و هوازدگی فیزیکی نمک (آب‌گیری و آب‌زدایی نمک) و شرایط آب و هوایی (نوسات دمایی روزانه و فصلی و بادهای غالب) می‌توانند از عوامل کنترل کننده تشکیل تافونی‌های یک منطقه باشند (McBride and Picard, 2004). بنابراین از عوامل کنترل کننده تافونی‌ها در

مورد استفاده قرار گیرد. انحلال دانه‌های ناپایدار از قبیل فلدسپات‌ها (پلاژیوکلاز و ارتوزکلاز) و کربنات‌ها (خرده‌های میکرایتی و فسیل) در اثر نفوذ آب‌های اسیدی، باعث توسعه تخلخل در سنگ و کاهش مقاومت آن در برابر هوازگی می‌شود. فرآیند هوازگی شیمیایی بر روی فلدسپات‌ها از قبیل ارتوکلاز در نهایت باعث تشکیل کائولینیت می‌گردد (Hamblin and Christiansen, 2008).

کائولینیت ---

سنگ خارج شده و در سطح سنگ حفره تشکیل شود (Hamblin and Christiansen, 2008).



نمونه‌های مورد نظر می‌باشد. چنانچه در شکل ۸ مشخص است مقادیر ایلیت و کائولینیت در نمونه برش اشتهارد می‌تواند به دلیل بالا بودن مقادیر فلدسپات (۴۱ درصد) در نمونه E_1 نسبت به این مقدار (۹ درصد) در نمونه برش مردآباد (M_1) باشد (جدول ۲). قابل ذکر است که به دلیل کم بودن مقادیر خرده‌های آهکی (خرده‌های فسیل و میکرایت)، انحلال آن نمی‌تواند تأثیر چندانی در فرآیند دگرسانی و تخریب ماسه‌سنگ‌ها در نمونه‌های هر دو برش داشته باشند. از این‌رو با دگرسانی دانه‌های فلدسپات، بافت سنگ سست شده و کل سنگ مستعد تخریب فیزیکی می‌گردد، که یکی از عوامل مهم در تشکیل تافونی‌های منطقه مورد مطالعه می‌باشد. بنابراین به نظر می‌رسد که تجزیه دانه‌های فلدسپات، به عنوان یک عامل اصلی موجب گردیده تا در ماسه‌سنگ‌های

منطقه مورد مطالعه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

انحلال دانه‌های ناپایدار سنگ‌شناسی ماسه‌سنگ‌ها توسط عواملی از قبیل ترکیب کانی‌شناسی، بافت، نوع و مقدار سیمان، و تخلخل کنترل می‌گردد (Ahmadi, 2015). تعیین هر یک از این عوامل نه تنها منجر به شناسایی نوع سنگ می‌شود بلکه می‌تواند به عنوان ابزاری برای ارزیابی مقاومت سنگ در برابر عوامل هوازگی شیمیایی و فیزیکی

فلدسپات ← سربسیست --- هیدرومیکا

بنابراین هوازگی شیمیایی فلدسپات پتاسیم‌دار (ارتوزکلاز) طی فرآیند کائولینیتی شدن باعث می‌شود تا پتاس، سیلیس و کانی‌های رسی از متن

چنانچه در جدول ۲ نمایش داده شده است ماسه-سنگ‌های برش اشتهارد ($Q_{11} F_{35} RF_{54}$) دارای مقادیر بالاتری فلدسپات نسبت به ماسه‌سنگ‌های برش مردآباد ($Q_5 F_{12} RF_{83}$) هستند. دگرسانی شیمیایی کانی‌های فلدسپاتی در نمونه‌های میکروسکوپی هر دو برش به وضوح مشاهده گردید ولی در نمونه‌های برش اشتهارد علاوه بر بالا بودن مقادیر فلدسپات (ارتوکلاز و پلاژیوکلاز)، میزان دگرسانی شیمیایی نیز بیشتر می‌باشد. در حالی که در نمونه‌های برش مردآباد به دلیل پایین بودن مقادیر فلدسپات و نیز کم بودن میزان تجزیه، شدت دگرسانی شیمیایی نیز کمتر است (جدول ۲ و شکل ۶). تجزیه پراش اشعه ایکس نیز حضور کانی‌های رسی ایلیت و کائولینیت در نمونه E_1 و کانی ایلیت را در نمونه A_1 نشان می‌دهد (شکل ۸) که حاصل تجزیه کانی‌های فلدسپات در

های برش مردآباد بوده و در نتیجه تخلخل بین دانه‌ای بالا می‌باشد. نمونه‌های پراش اشعه ایکس نیز حضور سیمان دولومیتی در نمونه برش اشتهاارد (E_1) و سیمان کلسیتی در نمونه برش مردآباد (A_1) نیز تأیید می‌گردد (شکل ۸ الف و ب).

از این‌رو تماس شناور (تماس دانه به حفره و دانه به سیمان) در نمونه‌های برش اشتهاارد تحت‌تأثیر انحلال سیمان و گسترش تخلخل، ایجاد می‌گردد. بنابراین می‌توان گفت که در نمونه‌های برش اشتهاارد، مقادیر پایین سیمان آهکی و دولومیتی به دلیل انحلال (شکل ۶ الف و ج)، باعث گردیده تا میزان تخلخل بین دانه‌ای بالا رفته (شکل ۶ ب و ج)، بافت سنگ سست شده و فرایند تشکیل تافونی تسریع گردد. از طرفی حضور سیمان کلسیتی و مقادیر کربنات کلسیم نسبتاً بالا، پایین بودن تخلخل بین دانه‌ای و نیز به هم فشردگی در محل تماس دانه‌ها (از قبیل تماس محدب-مقعر) (شکل ۶ ه و و) در نمونه‌های برش شمال مردآباد، بافت نسبتاً محکمی را در لایه‌های ماسه‌سنگی ایجاد کرده که این عوامل در کنار هم باعث شده تا گسترش تافونی در این برش محدود باشد.

شکستگی‌ها یا درزه‌ها

درزه‌ها یا شکستگی‌ها سطوح ضعف سنگ‌ها بوده که در امتداد این سطوح سنگ می‌تواند دچار هوازگی گردد. به عبارتی سطح درزه‌ها می‌توانند عاملی برای تشکیل تافونی‌ها باشند و یا سرعت تشکیل آن‌ها را افزایش دهند. فراوانی سطوح ضعف یا درزه‌ها موجب سهولت ورود آب‌های سطحی به داخل سنگ‌ها شده و باعث افزایش سرعت فرایند دگرسانی می‌گردند (Gül and Uslular, 2016). میزان گسترش درزه‌ها در لایه-

برش اشتهاارد نسبت به برش مردآباد، تافونی‌های گسترده‌تر و بزرگ‌تر تشکیل کردند.

انحلال سیمان آهکی و دولومیتی

در مواقع بارندگی به خصوص در فصل زمستان و بهار، آب باران اسیدی به درون حفرات ماسه‌سنگ نفوذ کرده و مقداری از سیمان کلسیتی یا دولومیتی را در خود حل می‌کند. در فصل تابستان آب به وسیله تبخیر به سطح سنگ رسیده و به این ترتیب کلسیت انحلال یافته، در سطح خارجی سنگ ته‌نشین می‌شود. بعد از مدتی سطح بیرونی سنگ با تشکیل یک پوسته سخت^{۱۰} در برابر فرسایش مقاومت می‌کند. بنابراین قسمت بیرونی سخت و قسمت درونی سست بوده و با وزش باد و باران مستعد فرسایش و ایجاد حفره شده و انواع اشکال تافونی را ایجاد می‌کنند (Conca and Rossman, 1982) (شکل ۱۰). با تشکیل پوسته سخت، بخش‌های داخلی سست به علت حضور سیمان غیریکنواخت (به دلیل انحلال سیمان کربناته)، تخلخل در ماسه‌سنگ‌ها را توسعه داده و باعث ناپایداری و خردشدن آن‌ها می‌گردد. از این رو با کاهش مقاومت سنگ، تافونی‌ها گسترش می‌یابند (Turkington, 1998; Khanehbad et al., 2005; Grab, 2011).

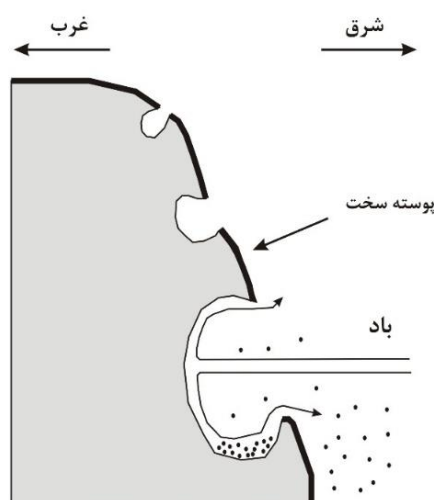
غالب تافونی‌های تشکیل شده در منطقه مورد مطالعه از قبیل تافونی نوع دامنه‌ای، قاعده‌ای و شاخی (شکل ۴ ج) دارای پوسته سخت و مقاوم در بخش بیرونی خود به صورت پایدار باقی ماندند (تشکیل پوسته سخت) در صورتی که بخش‌های داخلی در معرض هوازگی تخریب شده‌اند. جدول ۲ نشان می‌دهد که به دلیل انحلال، مقادیر سیمان (کلسیتی و دولومیتی) و درصد کربنات کلسیم در نمونه‌های برش اشتهاارد کمتر از نمونه-

یافته و در شکستگی‌های (سطوح ضعف) سنگ مستعد تشکیل تافونی، ته‌نشست می‌یابد. در صورتی که سنگ در بخش‌هایی دارای درز یا شکستگی باشد، تبلور نمک و افزایش حجم در اثر آبیگری منجر به گسترش شکاف سنگ و در نهایت موجب فروپاشی سنگ می‌گردد (Cooke and Smalley 1968; Young, 1987). در منطقه مورد مطالعه نیز حضور درزه‌های گسلی فراوان در ماسه‌سنگ‌های برش شمال اشتهارد، باعث تمرکز نمک (ژپیس) در آن‌ها شده است. پرشدگی درزه‌ها با کانی تبخیری از قبیل ژپیس بیشتر در لایه‌های ماسه‌سنگی برش شمال اشتهارد مشاهده شد که باعث بازشدگی ۲-۳ سانتی‌متری درزه‌ها شده است. قابل ذکر است که نمک تبلور یافته در این درزه‌ها، از لایه‌های گل‌سنگ خاکستری حاوی ژپیس فراوان (واقع در لایه‌های قدیمی‌تر برش شمال اشتهارد) (شکل ۳) منشأ گرفته است و در درز و شکاف این ماسه‌سنگ‌ها متبلور شده‌اند (شکل ۱۱).

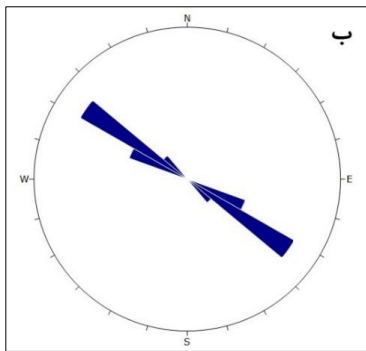
های ماسه‌سنگی واقع در برش اشتهارد بیشتر از برش مردآباد بوده و به‌صورت عمود بر لایه‌های ماسه‌سنگی، دارای روند کاملاً متفاوت از هم می‌باشند (شکل ۵). بازشدگی درزه‌ها در هر دو برش تقریباً مشابه هم بوده و در بیشتر بخش‌ها با مواد ثانویه‌ای از جمله خاک‌های حاصل از هوازدهی ماسه‌سنگ‌ها، گل‌سنگ‌ها (که به صورت بین لایه‌ای با ماسه‌سنگ‌ها وجود دارند) و نیز کانی‌های تبخیری از قبیل ژپیس (که موجب هوازدهی نمکی می‌گردد) پر شده‌اند. همچنین سطوح لایه‌بندی به عنوان یکی دیگر از سطوح ضعف در ماسه‌سنگ‌ها می‌باشد که می‌تواند به عنوان عاملی در تشکیل تافونی باشد. سطوح لایه‌بندی در ماسه‌سنگ‌های هر دو برش به‌وضوح دیده می‌شود ولی آن‌ها در لایه‌های ماسه‌سنگی ضخیم برش اشتهارد، فراوان می‌باشد (شکل ۱۱).

هوازدهی نمکی^{۱۱}

هوازدهی نمکی نوعی هوازدهی فیزیکی است که در آن نمک به وسیله باران یا باد، از مناطق اطراف یا لایه‌های رسوبی واقع در همان سازند انتقال



شکل ۱۰: شکل شماتیکی از سازوکار باد در گسترش تافونی در ماسه‌سنگ‌های برش اشتهارد همراه با پدیده پوسته سخت (اقتباس از محمدی و کتابی، ۱۳۹۲). جهت غالب باد به سمت باختر و تشکیل تافونی در دامنه رو به باد.



شکل ۱۱: الف) درزه گسلی و تبلور نمک در داخل درزه (پیکان قرمز)، سطح لایه‌بندی (خط مشکی) همراه با تافونی (پیکان سبز) در لایه ماسه‌سنگی واقع در برش اشتهاارد (دید به سمت باختر) (طول کمپاس ۱۷/۵ سانتی‌متر) و ب) نمودار گل‌سرخ‌های درزه‌های واقع در برش اشتهاارد با روند غالب N50W تا N60W.

در ایستگاه باران سنجی اشتهاارد و هواشناسی فرودگاه پیام در طی ۱۰ سال اخیر (۱۳۹۶-۱۳۸۷) مشخص شد که منطقه اشتهاارد دارای میانگین بیشینه درجه حرارت ۴۲/۴۸ درجه سانتی‌گراد در تیر ماه و میانگین کمینه درجه حرارت حدود ۱۱- درجه سانتی‌گراد در دی ماه می‌باشد (جدول ۳).

ویژگی‌های آب و هوایی

یکی از عوامل اصلی در تشکیل و گسترش تافونی-ها اختلاف دمای شبانه روزی و عدم پوشش گیاهی بر روی سطح منطقه و قرار داشتن سطح ماسه‌سنگ‌ها در معرض تابش خورشید می‌باشد (Mcbride and Picard, 2004). شهرستان اشتهاارد از نظر طبقه‌بندی آب و هوا جزء نواحی خشک با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های نسبتاً سرد می‌باشد. با استناد به آمارهای موجود

جدول ۳: میانگین دما و بارش سالانه برای اشتهاارد از سال ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۶ (www.irimo.ir)

ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مáj	ژوئن	ژوئیه	اگست	سپتامبر	اکتوبر	نوامبر	دسامبر
میانگین بیشینه دما (C°)	۱۴/۴۵	۱۸/۹۷	۲۵/۴۷	۳۰/۲۴	۳۵/۹۴	۴۰/۱۲	۴۲/۴۸	۴۰/۰۶	۳۷/۱۹	۳۲/۰۳	۲۱/۴۲	۱۷/۰۳
میانگین کمینه دما (C°)	-۱۱	-۸/۲	-۳/۱۶	۱/۱	۷/۷۲	۱۲/۶۶	۱۴/۱۷	۱۴/۸۴	۹/۱۲	۳	۴/۰۴	-۶/۸۳
میانگین بارش (mm)	۲۰/۶۴	۱۷/۶۷	۲۴/۳۷	۳۵/۵۳	۱۵/۵۴	۴/۵۹	۴/۱	۳/۱۵	۳/۰۱	۲/۱۲۵	۲۴/۵	۱۸/۷۲

تقسیم‌بندی اقلیمی، منطقه مورد مطالعه دارای آب و هوای نیمه خشک تا خشک می‌باشد (www.irimo.ir). بنابراین شرایط آب و هوایی ذکر شده در منطقه مورد مطالعه، شرایط مناسبی را برای ایجاد هوازدگی فیزیکی (به عنوان یک عامل کمک کننده) فراهم کرده است. به طوری که تشکیل و گسترش تافونی‌ها در مناطق نیمه خشک از قبیل منطقه اشتهاارد، در اثر هوازدگی

همچنین میانگین بیشینه بارش در طی این مدت زمان، برای این منطقه در حدود ۳۵/۵۳ میلی‌متر در فروردین ماه می‌باشد. براساس آمارهای به دست آمده درجه حرارت و بارندگی از ایستگاه‌های باران سنجی اشتهاارد و هواشناسی فرودگاه پیام کرج، مشخص شد که در منطقه مورد مطالعه میزان تبخیر بیشتر از نزولات جوی بوده و سطح منطقه پوشش گیاهی فقیری دارد. همچنین براساس

غالب (وزش بادهای نسبتاً شدید) آن منطقه اشاره کرد. به طوری که برخورد باد به سطح سنگ و کندن اجزای سست و ناپایدار (که توسط عواملی از قبیل تجزیه کانی‌های ناپایدار و انحلال سیمان آهکی ایجاد شده‌اند)، باعث فرسایش و ایجاد تافونی در سطح آن‌ها می‌نماید (Mcbride and Picard, 2004) (شکل ۱۰). با استفاده از طبقه‌بندی سازمان هواشناسی جهانی (WMO) (www.wmo.int) ارائه شده در جدول ۴ و با توجه به گلباد منطقه اشتهارد (رسم شده براساس داده‌های بادسنجی فرودگاه پیام کرج) (شکل ۹)، سرعت باد مساوی و بیشتر از ۴ گره بوده که از نظر شدت تحت عنوان بادهای متوسط تا نسبتاً شدید (گروه ۳ تا ۵) نام گذاری می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است بادهای غالب (با شدت متوسط تا شدید) در منطقه مورد مطالعه در جهت باختر و شمال‌باختر باعث می‌گردد تا تافونی‌ها در برش اشتهارد در دامنه جنوب‌خاوری لایه‌های ماسه‌سنگی (سطح رو به باد غالب باختری) و در برش مردآباد در دامنه جنوبی لایه‌های ماسه‌سنگی (سطح رو به باد غالب شمال باختری) تشکیل گردند. بنابراین می‌توان دریافت که گسترش زیاد این اشکال در برش اشتهارد علاوه بر عوامل ذکر شده در مبحث سنگ‌شناسی، می‌تواند به دلیل حضور باد غالب در جهت باختری در منطقه مورد مطالعه نیز باشد.

فیزیکی، از قبیل اختلاف درجه حرارت فصلی (در تابستان و زمستان) و مقادیر کم بارش و تبخیر زیاد تشدید شود. مقادیر کم بارش در منطقه مورد مطالعه باعث انحلال غیریکنواخت سیمان کربناته (هوازگی شیمیایی) و از سوی دیگر عمل تبخیر موجب ته‌نشست سیمان انحلال یافته در بخش‌های بیرونی ماسه‌سنگ‌ها (تشکیل پوسته سخت) می‌گردد (Conca and Rossman, 1982). همچنین اختلاف دمای فصلی (در فصول تابستان و زمستان) باعث تغییرات دمایی (تنش دمایی با تناوب گرما و سرما) کانی‌هایی چون کوارتز، فلدسپات و بسیاری از دیگر کانی‌های معمول سنگ‌ها شده و از این‌رو تحت‌تأثیر گرما و سرمای متوالی به‌طور غیریکنواخت انبساط و انقباض می‌یابند (رهنمای‌راد و همکاران، ۱۳۸۷). بنابراین فقر پوشش گیاهی بر روی سطح منطقه مورد مطالعه و قرار گرفتن سطح ماسه‌سنگ‌ها در معرض تابش مستقیم خورشید می‌تواند اختلاف دمای روزانه و حتی فصلی (حدود ۳۱ درجه) را ایجاد کند که باعث انبساط حجمی - دمایی کانی‌هایی چون فلدسپات (فراوان در ماسه‌سنگ‌های برش اشتهارد) شده و به تشکیل و گسترش تافونی‌ها کمک کند.

جهت و نوع بادهای غالب منطقه

از مهم‌ترین عوامل فیزیکی در هوازگی و فرسایش ماسه‌سنگ‌ها می‌توان به جهت و سرعت بادهای

جدول ۴: طبقه‌بندی سرعت باد، بر حسب گره^{۱۲} (www.wmo.int)

طبقه‌بندی باد	گروه ۱	گروه ۲	گروه ۳	گروه ۴	گروه ۵	گروه ۶	گروه ۷	گروه ۸
سرعت باد بر حسب گره* (Knot)	> ۱	۱-۳	۴-۶	۷-۱۰	۱۱-۱۶	۱۷-۲۱	۲۲-۲۷	> ۲۷

* هر گره ۱۸۵۰ متر بر ساعت یا ۰/۵ متر بر ثانیه است.

نتیجه‌گیری

دولومیتی و به تبع آن افزایش تخلخل بین‌دانه‌ای (به دلیل تجزیه فلدسپات‌ها و انحلال سیمان کلسیتی و دولومیتی) از عوامل مهم در تشکیل بیشتر تافونی‌ها در نمونه‌های ماسه‌سنگی برش اشتهاارد نسبت به برش مردآباد می‌باشند. در مجموع می‌توان گفت که ضخامت و گستردگی زیاد لایه‌های ماسه‌سنگی، تجزیه شیمیایی فلدسپات‌ها، غیر یکنواخت بودن سیمان کربناته در اثر انحلال و حضور بادهای غالب در جهت باختر و شمال‌باختر (نقش توام فرایندهای هوازدگی شیمیایی و فیزیکی) در منطقه مورد مطالعه می‌توانند از عوامل اصلی تشکیل و تکوین بیشتر تافونی‌ها در برش اشتهاارد نسبت به برش مردآباد باشند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تجزیه شیمیایی کانی‌های ناپایدار و درزه‌های گسلی پرشده با ژئوپس به عنوان عامل موثر در تشکیل اشکال تافونی و حضور بادهای غالب نیز عامل مهم دیگری در توسعه تافونی در لایه‌های ماسه‌سنگی منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

سپاس‌گزاری

این مقاله با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه بوعلی سینا، همدان انجام شده است که بدین وسیله از این معاونت سپاس‌گزاری می‌شود.

تافونی یا حفره‌های حاصل از هوازدگی در انواع سنگ‌ها ایجاد می‌شوند و این حفره‌ها (ابعاد چند سانتی‌متر تا چندین‌متر) در ماسه‌سنگ‌ها از گسترش قابل توجهی برخوردارند. بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی بر روی ماسه‌سنگ‌ها نشان داد که اشکال تافونی تنها توسط یک عامل ایجاد نمی‌گردد، بلکه تشکیل آن‌ها پدیده‌ای پیچیده بوده و در نتیجه عملکرد چندین عامل با یکدیگر می‌باشد. برخی عوامل شیمیایی باعث سست کردن بافت سنگ شده و برخی دیگر سبب تخریب فیزیکی و توسعه تافونی می‌گردد. طی بررسی‌های صحرایی مشخص شد که در برش اشتهاارد، ضخامت لایه‌های ماسه‌سنگی به ویژه در بخش‌های بالاتر توالی بیشتر بوده و گسترش انواع تافونی‌ها (دامنه‌ای و شاخی) با ابعاد بزرگ در آن نیز بیشتر می‌باشد. در حالی که ضخامت کم این لایه‌ها در برش مردآباد باعث گسترش محدود تافونی در این برش شده است. حضور درزه‌های گسلی، به صورت با امتداد عمود بر لایه‌های ماسه-سنگی و پر شده با ژئوپس (هوازدگی فیزیکی نمک) نیز عاملی دیگر در گسترش تافونی‌ها در برش اشتهاارد می‌باشند.

طی مطالعات میکروسکوپی مشخص شد که حضور دانه‌های مستعد تجزیه از قبیل فلدسپات (در مقادیر بالا) و مقادیر کم سیمان کلسیتی و

پانوش

- 1-Side tafoni
- 2-Basal tafoni
- 3-Horn tafoni
- 4-Pseudo tafoni
- 5-XRD
- 6-Bulk

- 7-Wind Rose Plot
- 8-World Meteorological Organization
- 9-Anemometry
- 10-Case Hardening
- 11-Salt weathering
- 12-Knot

منابع

- امینی‌بیرامی، ف. و اصغری‌کلجاهی، ا.، ۱۳۹۲. ارزیابی هوازدگی و فرسایش سنگ‌های آذرآواری مخروطی شکل روستای کندوان، نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلد ۹، شماره ۱، ص ۲۵۹۳-۲۶۱۴.
- آقانباتی، س.ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران، نشر سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۵۶ ص.
- خانه‌باد، م.، موسوی‌حرمی، ر. و محبوبی، ا.، ۱۳۸۷. عوامل کنترل‌کننده هوازدگی حفره‌ای (تافونی) در گرانیت‌های جنوب مشهد و سازند شمشک واقع در بخش شمالی بینالود، مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، شماره ۱۱، ص ۱۸۷-۲۰۸.
- رهنمای‌راد، ج.، صاحب‌زاده، ب. و میرحاجی‌زاده، ع. ا.، ۱۳۸۷. توصیف هوازدگی و سست‌شدگی در گرانیتوئید زاهدان از دیدگاه مهندسی سنگ، فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۴، شماره ۴، ص ۲۴۷-۲۵۷.
- ظاهری، م.، رفیعی، ب. و علیپور، ر.، ۱۳۹۷. جاذبه‌های زمین‌گردشگری در منطقه شمال pseudokarst formations. Das Sandsteinphanomen: Klima, Leben und Georelief. Libr. Czech Spel. Soc., v. 32, p. 134-153.
- Cooke, R. and Smalley, I.J., 1968. Salt weathering in desert, Nature, v. 220, p. 1226-1227.
- Dill, H.G., Weber, B. and Gerdes, A., 2010. Constraining the physical-chemical conditions of Pleistocene cavernous weathering in Late Paleozoic granites, Geomorphology, v. 121, p. 283-290.
- El Sharkawy, M., 2009. Geomorphology of Tafoni caves in Dahab area south to Sinai Peninsula, اشتهارد، استان البرز، چهارمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، ص ۱-۶.
- مختاری‌حسن‌آبادی، م.ج.، امید، م.، حاجی‌احمد، ع.، جعفری، ع. و شعبانی‌شادیانی، م.ر.، ۱۳۹۵. پتانسیل سنجی توان باد در یک دوره یکساله در دو ایستگاه هواشناسی استان البرز، دهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران، ص ۱-۱۸.
- محمدی، س.د. و کتابی، ل.، ۱۳۹۲. معرفی اشکال تافونی و عوامل موثر بر تشکیل آن‌ها در سنگ‌های میگماتیته منطقه سیمین (جنوب همدان)، دو فصلنامه ژئومورفولوژی کاربردی ایران، سال ۱، شماره ۲، ص ۱۹-۳۶.
- مهدی‌زاده، س.، ۱۳۷۴. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کرج، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- یوسفی، م.، ۱۳۷۹. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اشتهارد، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- Ahmadi, A., Moghimi, E., Zamanzadeh, S.M. and Motamed, R., 2015. The Effect of Sandstone Composition on Distribution of Tafoni Landforms in the Aghajari Sandstone, Northwest of Masjed Soleyman, Iran, Advances in Geology, p. 1-10.
- Conca, J.L. and Rossman, G.R., 1982. Core hardening of sandstone, Geology, v. 10, p. 520-523.
- Carver, R.E., 1971. Procedures in Sedimentary Petrology, New York, Wiley, 635 p.
- Cílek, V., 1998. The physical and chemical processes of sandstone

- Egyptian Journal of Environmental Change., v. 1, p. 72-80.
- Fruhmann, S., Schnepfleitner, H. and Sass, O., 2014. Microclimatic factors controlling tafoni weathering in Tafraoute, Morocco, Geophysical Research Abstracts, v. 16, EGU2014-9785.
- Folk, E., 1974. Petrography of Sedimentary Rocks, Hemphill Publishing Company, 182 p.
- Gül, M. and Uslular, G., 2016. Geomorphological features and weathering of the Southern Submassif of the Menderes Massif (SW Turkey), Arabian Journal of Geosciences, v. 9, p. 1-16.
- Grab, S. and Knight, J., 2015. Landscapes and Landforms of South Africa, World Geomorphological Landscapes Springer International Publishing Switzerland, p. 11-21.
- Grab, S.W., Goudie, A.S., Viles, H.A. and Webb, N., 2011. Sandstone geomorphology of the Golden Gate Highlands National Park, South Africa, in a global context, p. 1-14.
- Hamblin, W.K. and Christiansen, E.H., 2008. Earth's Dynamic Systems, Prentice Hall, Brigham Young University, tenth edition, 759 p.
- Ingersoll, R.V., Bullard, T.F., Ford, R.L., Grimm, J.P., Pickle, J.D. and Sares, S.W., 1984. The effect of grain size on detrital modes: A test of the Gazzi-Dickinson point - counting method. Journal of Sedimentary Petrology, v. 54, p. 103-116.
- Khanehbad, M., Mahboubi, A. and Moussavi-Harami, R., 2005. Origin of honeycomb weathering and tafoni in cavernously weathered sandstones, Neyzar Formation, NE Iran, Geomorphology, Soils and Weathering, p. 1-10.
- Mcbride, E.F. and Picard, M.D., 2004. Origin of honeycombs and related weathering forms in Oligocene macigno sandstone, Tuscan Coast near Livorno, Italy: Earth Surface Processes and Landforms, v. 29, p. 713-735.
- Mcbride, E.F. and Picard, M.D., 2000. Origin and development of tafoni in tunnel spring tuff, Crystal Peak, Utah, USA, Earth Surface Processes and Landforms, v. 25, p. 869-879.
- Moore, D.M. and Reynolds, R.C., 1997. X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals, second ed., Oxford University Press, 400 p.
- Smith, B.J., 1978. The origin and geomorphic implications of cliff foot recesses and tafoni on limestone hamadas in the Northwest Sahara: Zeitschrift fuer Geomorphologie, v. 22, p. 21-43.
- Turkington, A.V., 2004. Cavernous weathering, dynamical instability and self-organization, Earth surface processes and landforms, v. 29, p. 665-675.
- Turkington, A.V., 1998. Cavernous weathering in sandstone: lessons to be learned from natural exposure, Quarterly Journal of Engineering Geology, v. 31, p. 375-383.
- Tshang, H.L., 1966. Geomorphological observations on weathering forms in Hong Kong and some other humid regions of Southeast Asia, Chung Chi Journal, v. 5(2), p. 206-226.
- Urban, J. and Górnik, M., 2017. Some aspects of lithological and exogenic control of sandstone morphology, the Świętokrzyskie (Holy Cross) Mts. case study, Poland, Geomorphology, v. 295, p. 773-789.
- Viles, H.A., 2001. Scale issues in weathering studies, geomorphology, v. 41, p. 63-71.

-Young, A.R.M., 1987. Salt as an agent in the development of cavernous weathering, *Geology*, v. 15(10), p. 962-966.

-www.irimo.ir
-www.wmo.int