

Evaluation of Stone Weathering in Urban Environments Using Tombstones: the case study of Yazd city

Gholamreza Tajbakhsh¹ , Mohammad Sharifi Pichon², Fatemeh Majlisi³

1. (Corresponding Author) Department of Geology, Yazd University, Yazd, Iran

Email: tajbakhsh@yazd.ac.ir

2. Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran

Email: mscharifi@yazd.ac.ir

3. Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran

Email: majlesifatemeh@yahoo.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article History:

Received:

3 June 2024

Received in revised form:

26 August 2024

Accepted:

29 September 2024

Available online:

7 November 2024

Keywords:

Petrography,
Schmidt's Hammer,
Tombstone,
Weathering,
Yazd City.

ABSTRACT

Urban weathering refers to the processes of loosening, decay, and eventual deterioration of materials used in various urban constructions. This study focuses on assessing the degree of weathering in gravestones from the Joy-e-Horhor and Khold-e-Barin cemeteries in Yazd. A combination of petrographic analyses and longitudinal monitoring of Schmidt hammer rebound values for hundreds of gravestones was employed to achieve this. The findings indicate that in addition to the petrographic characteristics of the stones, such as mineralogical composition, mineral diversity, and rock texture and fabric, local climatic conditions significantly influence the weathering and degradation of these materials. Key processes contributing to the loss of stone durability include temperature fluctuations leading to thermal expansion and contraction, the albedo effect of the stone, wet-dry cycling, and the crystallization and dissolution of secondary minerals like calcite and gypsum. Gravestones made of travertine and marble, characterized by a predominance of calcite minerals and light-colored surfaces, exhibit higher resistance to weathering compared to other lithologies, provided they are not exposed to excessive moisture or frequent washing. In contrast, low-grade metamorphic rocks such as slate and phyllite are the least suitable for gravestones due to their high density of fractures and cleavage planes. Similarly, dark-colored igneous rocks are prone to rapid durability loss, as the differential thermal expansion and contraction of their constituent minerals in response to temperature changes accelerate their weathering processes.

Cite this article: Tajbakhsh, G., Sharifi Pichon, M., & Majlisi, F. (2024). Evaluation of Stone Weathering in Urban Environments Using Tombstones: the case study of Yazd city. *Physical Geography Research Quarterly*, 56 (3), 77-94.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2024.384132.1007847>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Beyond their economic and social significance, stone buildings hold substantial cultural and national heritage value. However, preserving these structures has been an ongoing challenge. In addition to human factors, weathering processes, including physical, chemical, and biochemical effects, are key contributors to the deterioration of these invaluable cultural assets. Weathering in urban environments occurs with increased intensity and speed due to extreme fluctuations in weather conditions, making it a significant environmental hazard with considerable risk. Moreover, urban settings can be viewed as museums of diverse types of stone, providing an opportunity to study the processes of change and evolution affecting each type. Cemeteries serve as valuable urban sites for studying stone changes, given the variety of stones used for commemorating, protecting, and decorating burial sites. Conveniently, many stones have their installation dates inscribed, which aids in examining urban stone weathering. This enables researchers to assess the degree and extent of weathering among different stone types exposed to the same microclimatic conditions over defined, shorter periods within cities. Urban gravestones have historical, religious, cultural, and emotional significance, yet this importance is often overlooked due to their gradual deterioration. An essential approach to protecting tombstones from weathering involves understanding how various stone types endure under different climatic conditions. This study addresses this objective by examining the weathering rates of stone materials over the last century in two cemeteries in Yazd, a city known for its warm, dry summers and cold, dry winters.

Methodology

Following field studies of various urban structures, gravestones from tombs were chosen and assessed as part of a broader field community. In Yazd, there are two main cemeteries, the older Joy-e-Horhor and the newer Khold-e-Barin, featuring a variety of tombstone styles. A Schmidt hammer was used to achieve a precise, quantitative

evaluation of gravestone weathering. After the initial identification, the gravestones were examined with the Schmidt hammer for six working days. When the hammer is pressed against the rock surface, it delivers impact energy through a plunger, after which a rebound number indicating the surface hardness is displayed directly on the hammer. To assess the weathering and deterioration of the gravestone, the L-type Schmidt hammer (measured in N/mm^2), as per ASTM D5873, was utilized. This hammer type is particularly sensitive in the lower measurement range, providing more accurate results when testing weak, porous, or weathered stone surfaces. Following this, thin sections were prepared for a petrographic analysis of the samples using a polarized microscope. Since tombstones are typically installed shortly after an individual's death, the engraved date on each tombstone served as the time reference for this study.

Results and discussion

In the cemeteries of Yazd, many stones have shown significant weathering within just a few decades, though the rate of weathering varies across different stone types. Field and laboratory analyses identified the primary stones used in these cemeteries, including travertine, sedimentary limestone (such as Lashotor limestone from Isfahan and Taft limestone), white marble (including the variety known as Javid), metamorphic rocks like slate-phyllite and schist, and mafic igneous rocks, commonly marketed as granite. Correlation graphs of Schmidt hammer rebound values over time showed that newer stone types generally had the highest rebound values. Over time, different stone types displayed weak to strong negative correlations, indicating decreased stone strength. The irregular rebound values may be due to non-uniform and inconsistent conditions during the foundation and installation of the gravestones. Travertine and limestone types showed the greatest resilience to weathering in Yazd, with a strong correlation between their Schmidt hammer rebound values and time. Despite being rich in calcite, two distinct erosion patterns emerged among the limestone types. Taft limestone exhibited more severe

erosion over time than Lashotor limestone. The observed differences in weathering can be mainly attributed to varying sedimentation conditions and clay mineral content within the stones. With its higher clay mineral content, Taft limestone is more prone to weathering. Metamorphic rocks used in Yazd cemeteries fall into two categories as those with weak and moderate metamorphism. Factors like lithology, metamorphic features (such as cleavage and mineral composition), and pressure and temperature conditions have impacted their Schmidt hammer rebound values in low-grade metamorphic rocks. Rocks that have undergone low-temperature metamorphism, containing minerals like clay and chlorite, are notably more brittle and sensitive to climate effects. As a result, slate-phyllite metamorphic rocks showed lower Schmidt hammer rebound values, while cordierite-schist displayed higher values and a strong correlation with time. Some metamorphic rocks' fragility and significant weathering are due to their distinct foliation and structural discontinuities. The main mafic igneous stones used were primarily olivine gabbro and gabbro-diorite. These igneous rocks exhibited a negative correlation between Schmidt hammer rebound values and time, likely due to rapid spalling from lithostatic pressure release, as well as their coarse-grained, polymineralic texture. This texture makes them vulnerable to thermoclastic and cryoclastic weathering processes in Yazd's warm-dry and cold-dry climate, resulting in severe weathering within a short time. The dark color of these igneous rocks has also increased temperature fluctuations between day and night and across seasons, further intensifying these weathering processes.

Conclusion

Studies and analyses indicate that gravestone weathering rates in urban areas differ from those in natural environments. This difference is due to moisture sources in urban settings, such as cemetery moisture, gravestone washing, and watering of plants, which contribute to both physical weathering and stone dissolution. Additionally, while stone selection in the past depended heavily on proximity to the

site, improved transportation now allows stones to be sourced from nearby and distant locations. Therefore, it is crucial to consider lithological properties and the stones' responses to varying climates to ensure long-term stability and durability beyond visual qualities like cost, color, and aesthetics. Factors including texture, mineral content type and diversity, color, porosity, surface weaknesses, and quarry extraction depth all play a significant role in a gravestone's resistance to weathering. The final results of this study indicate that the primary natural factors influencing the weathering of tombstones in Yazd include temperature-driven expansion and contraction, repeated wet-dry cycles, secondary mineral crystallization and dissolution, and albedo characteristics.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

ارزیابی هوازدگی سنگ‌ها در محیط‌های شهری با استفاده از سنگ‌قبر مطالعه موردی: شهر یزد

غلامرضا تاج‌بخش^۱ ✉، محمد شریفی پیچون^۲، فاطمه مجلسی^۴^۱ - نویسنده مسئول، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران. رایانامه: tajbakhsh@yazd.ac.ir^۲ - گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران. رایانامه: mscharifi@yazd.ac.ir^۳ - گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران. رایانامه: majlesifateme@yahoo.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۳/۱۴

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۰۶/۰۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۷/۰۸

تاریخ چاپ:

۱۴۰۳/۰۸/۰۷

واژگان کلیدی:

پتروگرافی،

چکش اشمیت،

سنگ‌قبر،

شهر یزد،

هوازدگی.

هوازدگی شهری شامل سست شدن، پوسیدگی و در نهایت تخریب مواد و مصالح به کار گرفته شده در انواع ساخت‌وسازهای شهری است. این نوشتار سعی در بررسی مقادیر هوازدگی انواع مختلف سنگ‌های قبر قبرستان‌های جوی هرهر و خلدبرین در شهر یزد را دارد. برای این هدف، ضمن مطالعه میکروسکوپی سنگ‌ها، تغییرات مقادیر واجهشی چکش اشمیت صدها سنگ‌قبر با گذشت زمان تحلیل شد. نتایج حاصله نشان داد که علاوه بر ویژگی‌های پتروگرافی سنگ از قبیل ترکیب و تنوع کانی‌شناسی، ساخت و بافت سنگ، شرایط آب‌وهوای محلی نیز در هوازدگی و تخریب سنگ‌ها نقش داشته است. فرایندهایی از قبیل نوسانات دمایی و انقباض و انبساط‌های ناشی از آن، ویژگی آلبدو سنگ، چرخه‌های تر و خشک به همراه تبلور و انحلال کانی‌های ثانویه کلسیت و ژپس در کاهش مقاومت سنگ‌قبرها اهمیت دارند. سنگ‌قبرهای از جنس تراورتن و مرمر با توجه به چیرگی کانی کلسیت و رنگ روشن به شرط دوری از منابع رطوبتی و شستشوی زیاد، مقاومت بیشتری نسبت به سنگ‌های دیگر نشان می‌دهند و در مقابل سنگ‌های دگرگونه درجه پایین اسلیت- فیلیت نامناسب‌ترین نوع سنگ‌قبر به دلیل وفور شکستگی‌ها و کلیواژها هستند. سنگ‌های آذرین عمدتاً تیره‌رنگ، به دلیل داشتن چند نوع کانی در زمینه و واکنش‌های انقباض - انبساطی متفاوت هر کانی نسبت به تغییر دما، در مدت‌زمان کمی دچار کاهش مقاومت می‌شوند.

استناد: تاج‌بخش، غلامرضا؛ شریفی پیچون، محمد و مجلسی، فاطمه. (۱۴۰۳). ارزیابی هوازدگی سنگ‌ها در محیط‌های شهری با استفاده از سنگ‌قبر مطالعه موردی: شهر یزد. مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۶ (۳)، ۷۷-۹۴.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2024.375069.1007824>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

© نویسندگان



مقدمه

استفاده از سنگ‌ها در ساخت‌های بشری به دلیل جذابیت، مقاوم بودن و در دسترس بودن، پیشینه‌ای چند هزارساله دارد (Lourenço et al, 2006). بناهای سنگی یکی از ماناترین آثار و شواهد تاریخ بشری هستند که حفظ آن‌ها به‌عنوان میراث‌های جهانی و ملی اهمیت زیادی دارد (Hatir, 2020). هوازدگی مؤثر بر بناها به‌مانند آنچه در محیط‌های مختلف طبیعی روی می‌دهد، از نوع فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی است که با گذشت زمان سبب تضعیف و تخریب بافت فیزیکی یا ترکیب شیمیایی به اشکال مختلف از قبیل ترک‌خوردگی، پوسته‌پوسته شدن، سایش سطحی، انحلال و مواردی از این دست می‌شود (Hall et al., 2012; Moses et al, 2014; Saheb et al, 2016). این فرایند به دلیل تأثیرات محیطی و اقلیمی و به عبارتی تحمیل شرایط فیزیکو-شیمیایی جدید بر سنگ‌های برون‌زده رخ می‌دهد (Zorlu, 2008; Heidari et al, 2017a). اندازه‌گیری و ارزیابی تغییرات تدریجی (و یا سریع) خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها می‌تواند در کمی‌سازی هوازدگی مورداستفاده قرار بگیرد. مسلماً فرایند هوازدگی در محیط‌های شهری به دلیل تغییر و نوسان شدید ویژگی‌های آب‌وهوایی، با شدت و سرعت بیشتری رخ داده و می‌توان آن را یکی از مخاطرات جدی محیطی با خطرپذیری بالا به شمار آورد که با وقوع خطرات محیطی همچون زلزله، خسارات غیرقابل جبرانی را در بردارد.

اثرات تخریبی فرآیندهای هوازدگی به‌طور گسترده‌ای در محیط‌های شهری و به‌ویژه ساختمان‌های فرهنگی موردمطالعه قرار گرفته است (Lan et al, 2005, Saheb et al, 2016). محیط‌های شهری را می‌توان موزه‌ای از انواع سنگ‌ها دانست که نحوه تغییر و تحول هر نوع از آن‌ها را می‌توان بررسی نمود (Smith et al, 2005) هرچند معمولاً تخمین میزان هوازدگی سنگ یا شناسایی آغاز و مدت هوازدگی دشوار است (Heidari et al, 2017b). آرامستان‌ها یکی از اماکن شهری هستند که از انواع مختلفی از سنگ‌ها جهت بزرگداشت، محافظت و تزیین محل دفن افراد استفاده می‌شود و خوشبختانه در بیشتر موارد زمان به‌کارگیری سنگ نیز بر روی آن درج می‌شود. این مورد می‌تواند بررسی و مطالعه هوازدگی سنگ‌های شهری را تسهیل نماید (Livingston and Baer, 1990, Inkpen, 1998). سنگ‌های استفاده‌شده در آرامستان‌ها، به‌ویژه اگر قدمتی بیش از ۱۰۰ سال برخوردار باشند، اطلاعات ارزشمندی در اختیار می‌گذارند.

تنوع و تفاوت هوازدگی سنگ‌های قبر عمدتاً حاصل ویژگی‌های سنگ‌شناسی سنگ‌ها و عوامل محیطی و اقلیمی آرامستان‌ها است که در دو-سه دهه اخیر مطالعات نسبتاً زیادی در این باره منتشر شده است (Dragovich, 1997; Inkpen et al, 2004; Hoke & Turcotte, 2004; Wells et al, 2005; Cann, 2012; Özvan et al, 2015; Mooers et al, 2020). هدف اصلی این مطالعه که بخشی از یک پژوهش بوده، بررسی و ارزیابی عوامل مؤثر بر هوازدگی سنگ‌های مورداستفاده در ساخت‌وسازهای شهری یزد و تا حد امکان کمی‌سازی میزان مقاومت یا ناپایداری آن‌ها در برابر شرایط آب‌وهوایی گرم و خشک ایران مرکزی است که تاکنون موردتوجه و بررسی قرار نگرفته است. برای این منظور سنگ‌های به کار گرفته‌شده در قبرستان‌های اصلی یزد، شامل خلدبرین و جوی هرهر (با قدمت بیش از ۱۰۰ سال) مورداستفاده قرار گرفته است. ضمن بررسی‌ها سعی بر آن بود که از سنگ مزارهایی که به دلیل هوازدگی سریع، با انواع جدید جایگزین و بازسازی‌شده‌اند، چشم‌پوشی شود.

روش پژوهش

در این پژوهش ضمن ثابت در نظر گرفتن شرایط آب‌وهوایی و محیطی، و سعی شده نقش ویژگی‌های پتروگرافی در میزان هوازدگی و تخریب سنگ‌های مزار بررسی شود. بدین منظور، پس از مطالعات میدانی ساخت‌های مختلف شهری، سنگ‌های مزار آرامگاه‌ها به‌عنوان بخشی از یک جامعه میدانی بزرگ‌تر انتخاب و مورد ارزیابی قرار گرفتند. در شهر یزد دو آرامگاه

اصلی قدیمی و جدید به نام‌های جوی هرهر و خلدبرین وجود دارد که سنگ‌قبرهای متنوعی در آن‌ها استفاده شده است. معمولاً زمان فوت و سال نصب سنگ‌های مزار مشخص است زیرا بازماندگان متوفی در کمتر از چهل روز از زمان فوت، سنگ مزار را نصب می‌کنند. در بسیاری موارد، به دلیل هوازدگی و فرسایش سنگ‌قبرها، بازماندگان متوفیان، سنگ روی آن را بازسازی و تعویض کرده‌اند که این موارد از جامعه میدانی این پژوهش خارج و سعی شد فقط سنگ‌های تعویض نشده بررسی شوند. برای دستیابی به ارزیابی دقیق و کمی میزان هوازدگی سنگ‌قبرها از چکش اشمیت استفاده گردید. پس از شناسایی اولیه، در شش روز کاری سنگ‌های مزار مورد آنالیز چکش اشمیت قرار گرفتند و پس از آن با تهیه برش نازک از نمونه‌ها، به بررسی و مطالعه سنگ‌شناسی نمونه‌ها با میکروسکوپ پلایزان اقدام گردید. به دلیل محدودیت‌های بیشمار موجود در نمونه‌برداری از سنگ‌قبرها، برای تهیه مقاطع میکروسکوپی سنگ‌ها بیشتر از نخاله سنگ‌های مزار قدیمی‌تر و تعویض شده گوشه و کنار قبرستان‌ها و یا قطعات زائد سنگ‌بری‌ها استفاده شد. پس از تعیین نوع سنگ مزار، سنگ‌های مختلف بر حسب زمان نصب و میزان اعداد واجهشی چکش اشمیت بررسی و همبستگی بین میزان هوازدگی و نوع سنگ به طور جداگانه محاسبه گردید.

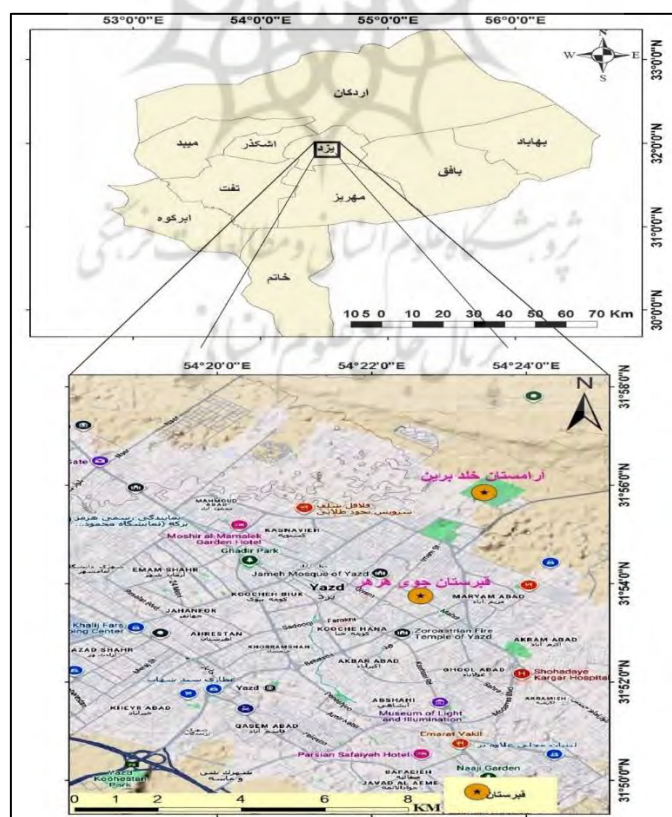
چکش اشمیت، که ابتدا برای ارزیابی مقاومت بتن ساخته شد، به علت هزینه کم، کارکرد راحت، قابلیت استفاده در مطالعات میدانی و آزمایشگاهی و غیر مخرب بودن، توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) به صورت استاندارد درآمده است (فهمی‌فر و سروش ۱۳۸۰). چکش اشمیت استفاده شده در این پژوهش، مدل $L(N/mm^2)$ استاندارد شده بر مبنای ASTM D5873 و محدوده اندازه‌گیری ۶۰-۲۰ MPa قدرت فشاری است. چکش نوع L حساسیت بیشتری در محدوده مقاومت‌های پایین‌تر دارد و هنگام آزمایش سنگ‌های ضعیف، متخلخل و هوازده نتایج بهتری می‌دهد (Aydin, 2014). اساس کار این چکش، بازتاب یک جرم ارتجاعی وابسته به سختی سطح در مقابل جرمی ست که به آن برخورد می‌کند. در چکش اشمیت جرم متصل شده به فنر وجود دارد که با کشیدن فنر تا یک نقطه مشخص، یک مقدار انرژی ثابتی به آن داده می‌شود. این کار با فشردن چکش به سطح صاف سنگ به طور عمود انجام می‌شود. پس از آزاد کردن، جرم تحت اثر بازتاب میله چکش قرار می‌گیرد و مسافتی که توسط آن جرم طی می‌شود بر حسب درصدی از انبساط اولیه فنر بیان می‌شود. عدد بازتاب یک اندازه مطلق است، چون به انرژی ذخیره شده در فنر و به اندازه جرم وابسته می‌باشد.

بر این اساس، در ابتدا چکش اشمیت کالیبره شد سپس برای تعیین مقاومت سنگ یا مقادیر هوازدگی آن، به شکل عمودی و با زاویه ۹۰ درجه بر سطح سنگ قرار می‌گرفت و شاسی آن فشار داده و عدد برگشتی چکش ثبت می‌گردید. هنگامی که پیستون بر روی سطح بتن فشار داده می‌شود، یک جرم کنترل شده با فنر به سطح برخورد می‌کند و فاصله برگشتی اندازه‌گیری می‌شود که نشان‌دهنده سختی یا مقاومت سطح است. مقدار اندازه‌گیری شده به عنوان Rebound Number یا شاخص بازگشت شناخته می‌شود. مقادیر برگشتی بالاتر مربوط به مواد قوی‌تر و بادوام‌تر است، درحالی‌که مقادیر پایین‌تر نشان‌دهنده مواد ضعیف‌تر و بادوام کمتر است. برای هر سنگ مورد آنالیز، دست کم ۳ و حداکثر ۶ بار چکش زده می‌شد. این عمل برای هر نوع سنگ، که شامل سنگ‌قبرهای متعدد هم‌جنس بود، ده‌ها بار انجام و داده‌هایی که انحراف معیار بالایی (بیش از ۶ واحد اختلاف با میانگین) داشتند حذف و میانگین داده‌های باقی‌مانده به عنوان مقادیر مقاومت سنگ‌قبر لحاظ گردید. البته باید در نظر داشت این کار آماری با مشکلاتی همچون استاندارد نبودن سنگ‌های مزار به ویژه ضخامت‌های نابرابر آن‌ها و نیز عدم زیرسازی یکسان آن‌ها روبه‌رو بوده است که به همراه اکراه افراد از مورد آزمایش قرار گرفتن سنگ مزار عزیزانشان، نتیجه‌گیری را با مشکل مواجه می‌کرد. این مشکل در آرامستان تاریخی جوی هرهر که

موردتوجه مسئولین سیاسی استان قرار گرفته، به دلیل محافظت از مقابر تاریخی-مذهبی و قرار گرفتن در معرض بهسازی و بازسازی شهرداری، بیشتر نمود داشته و نمونه‌گیری از سنگ‌های شکسته را هم با مشکل مواجه می‌نمود.

محدوده مورد مطالعه

شهر یزد از نظر موقعیت جغرافیایی در عرض جغرافیایی $48^{\circ} 31'$ تا $58^{\circ} 31'$ شمالی و در طول جغرافیایی $55^{\circ} 53'$ تا $54^{\circ} 29'$ شرقی و در مرکز ایران واقع شده است (شکل ۱). این بخش از ایران توسط رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس در شمال و غرب محصور گردیده و از سوی دیگر تحت سیطره توده پرفشار جنب حاره و دور از منابع رطوبتی قرار دارد. شهر یزد به دلیل قرارگیری در یک چاله کویری، علاوه بر دمای نسبتاً بالا، از نوسانات دمایی زیادی نیز برخوردار است. یزد دارای آب‌وهوای گرم و خشک با بارش متوسط سالانه حدود ۶۰ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه در حدود ۲۰ و اختلاف دمای شبانه‌روز بالای ۲۰ درجه سانتی‌گراد است (شریفی پیچون، ۲۰۲۰). اختلاف دمای فصلی یزد در برخی موارد به بالای ۳۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. در نتیجه این اختلافات و نوسانات شدید دمایی، دو فرایند هوازدگی ترموکلاستی و کریوکلاستی، نقش مهمی را در هوازدگی مواد و سنگ‌های این منطقه از ایران ایفا می‌کنند. اثرات تخریبی هوازدگی متلاشی شدن حرارتی توسط اختلاف زیاد دما شب و روز و فروپاشی آبی به علت یخ زدن آب در بافت مصالح شهری اتفاقی شایع است که در سنگفرش‌ها و پیاده‌روهای سطح شهر به‌وفور مشاهده می‌شود. علیرغم بارندگی کم، از نظر ژئومورفولوژیکی و زمین ساختی، شهر یزد داخل یک چاله ساختمانی قرار گرفته است که حداقل از ابتدای دوره کواترنری به‌عنوان سطح اساس منطقه عمل می‌کرده است. این مسئله سبب شده حجم آب سطحی و زیرزمینی که به هر طریقی به‌ویژه پدیده مویینیگی به سطح زمین می‌رسد، زیاد بوده و این امر هوازدگی شیمیایی مواد مختلف، به‌ویژه سنگ‌ها را تشدید نموده است.



شکل ۱. استان یزد و مختصات جغرافیایی شهر یزد

یافته‌ها

بررسی‌های میدانی نشان داد که سنگ‌های گوناگونی در قبرستان‌های یزد از قدیم به کار گرفته شده است که مهم‌ترین آن‌ها بر اساس مطالعات میکروسکوپی عبارت‌اند از: سنگ‌های تراورتن، سنگ‌های رسوبی آهکی شامل سنگ‌آهک لاشر اصفهان و سنگ‌آهک تفت، سنگ‌های مرمر سفید (به همراه سنگ مرمر موسوم به جاوید)، سنگ‌های دگرگونی شامل اسلیت - فیلیت و کردیریت شیبست و سنگ‌های آذرین مافیک گابرویی (مشهور به گرانیت در بازار). این سنگ‌ها دارای ویژگی‌های کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی زیر می‌باشند:

پتروگرافی سنگ‌ها

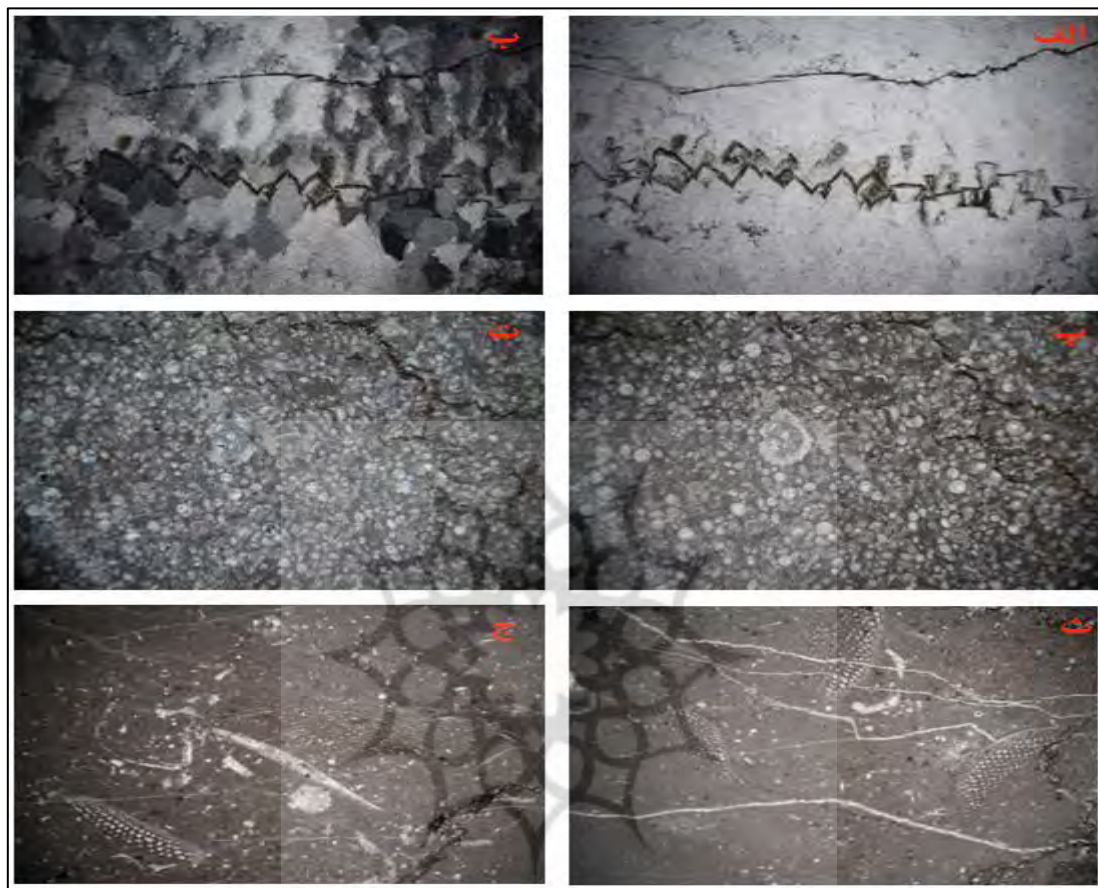
- سنگ تراورتن: این نوع سنگ با توجه به وفور معادن عظیم تراورتن با سن محدود به کواترنری در اطراف یزد به‌خصوص منطقه توران پشت، زیاد مورد استفاده قرار گرفته است. نمونه تاریخی و بارز این سنگ، سنگ مزار ناصرالدین‌شاه قاجار است که اکنون در کاخ گلستان محافظت می‌شود. سنگ تراورتن که در بازار به اشتباه با نام تجاری مرمر شناخته می‌شود عملاً یک سنگ رسوبی متبلور کربناته از نوع شیمیایی است که آثار تبلوری ناشی از افزایش دما و تشکیل در یک محیط دگرگونی را ندارد و معمولاً در کنار چشمه‌های آبگرم تشکیل می‌شود. در مطالعه میکروسکوپی، این سنگ دارای بلورهای با ابعاد متوسط کلسیت (و آراگونیت) بی‌شکل تا شکل دار، فاقد ماکل و دارای خاموشی ابری است. بعضی بخش‌های این سنگ دارای بلورها ریزتری هستند و به شدت حواشی در هم فرو رفته و خاموشی ابری نشان می‌دهند. رشد کانی‌های رسی روی سطح بلورها به صورت زیگزاگی در این سنگ‌ها قابل مشاهده است که به‌عنوانی یک نوع عدم انسجام سنگ به علت عدم رسوب‌گذاری پیوسته سنگ و رشد بلورها در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد (شکل ۲ الف و ب). فراوانی، رنگ روشن، زیبایی و برش راحت این تیپ سنگی موجب کاربرد زیاد سنگ‌های تراورتنی توسط مردم بوده است.

- سنگ‌های آهکی: سنگ‌های آهکی مورد استفاده برای سنگ مزار در شهر یزد عمدتاً از دو منطقه لاشر اصفهان و اطراف شهر تفت تأمین شده‌اند. این سنگ‌ها با سن کرتاسه به‌وفور در ایران مرکزی مشاهده می‌شوند. به دلیل رخنمون گسترده این سنگ‌ها، از گذشته‌های دور جهت کاربری‌های زیادی از قبیل کف‌پوش معابر عمومی، کف‌پوش ساختمان‌های مسکونی به همراه سنگ مزار مورد استفاده قرار می‌گرفته است.

سنگ‌آهک لاشر: به دلیل نزدیکی به معدن آن‌ها در استان اصفهان و قیمت پایین، به‌عنوان سنگ مزار در آرامستان‌های شهر یزد بسیار مشاهده می‌شود. از نظر سنگ‌شناسی، از نوع پکستون بایوکلاستی تا بایو میکرایت به رنگ خاکستری و دارای فسیل‌های خانواده Oligastogenid شامل *Pitonella Ovalis*، *Cacispharella sp.*، *Stomisphararica sp.*، خرده‌های گلوبترونکانا مرتبط با رسوبات آهکی کرتاسه بالایی و مرتبط با آشکوب‌های تورنین-کونیاسین اصفهان هستند. گاه سرشار از کلسی اسفر (حدود ۹۰ درصد) و در محیط دریایی با عمق بیش از ۱۰۰ متر رسوب کرده‌اند. این سنگ‌ها نسبت به سنگ‌آهک تفت، رس کمتری داشته و اصولاً مقاومت بیشتری در برابر هوازدگی دارند. چنانچه در تصاویر هم مشخص است این سنگ دارای فضاهای خالی کمتری (چه تخلخل و چه شکستگی) هستند که در برخی نقاط شکستگی‌ها با مواد رسی پر شده‌اند (شکل ۲ پ و ت).

سنگ‌آهک تفت: نوع دیگر سنگ‌آهک‌های استفاده شده به‌عنوان سنگ مزار در شهر یزد، سنگ‌آهک تفت است که در واقع یک وکستون بایوکلاستی-بایومیکرایت با حدود ۱۵ درصد زمینه گل آهکی است. فسیل‌های درشت موجود در این سنگ از گونه اربیتولین است که عمدتاً به‌صورت کشیده و دیسکی هستند. علاوه بر این تا ۳ درصد اسپیکول اسفنج به‌صورت پراکنده و حدود ۵ درصد قطعات خرد شده فسیل‌های دوکفه‌ای در این سنگ‌ها مشاهده می‌شود. عوارض دیاژنزی

و شکستگی‌های پرنده کلسیتی، استیلولیت‌ها، ترک‌های پر شده و زمینه‌ای دانه‌ریز و فشرده در این سنگ‌ها دیده می‌شود (شکل ۲ ث و ج). سن این سنگ‌ها کرتاسه زیرین بوده و در شرایط محیطی با عمق کمتر از ۳۰ متر رسوب کرده‌اند، بنابراین دارای مواد رسی زمینه‌ای بیشتری بوده و به همین علت زودتر از سنگ‌آهک قبل (لاشتر) تخریب می‌شوند. در این سنگ‌ها هوازدگی اثر مخرب‌تری داشته است.

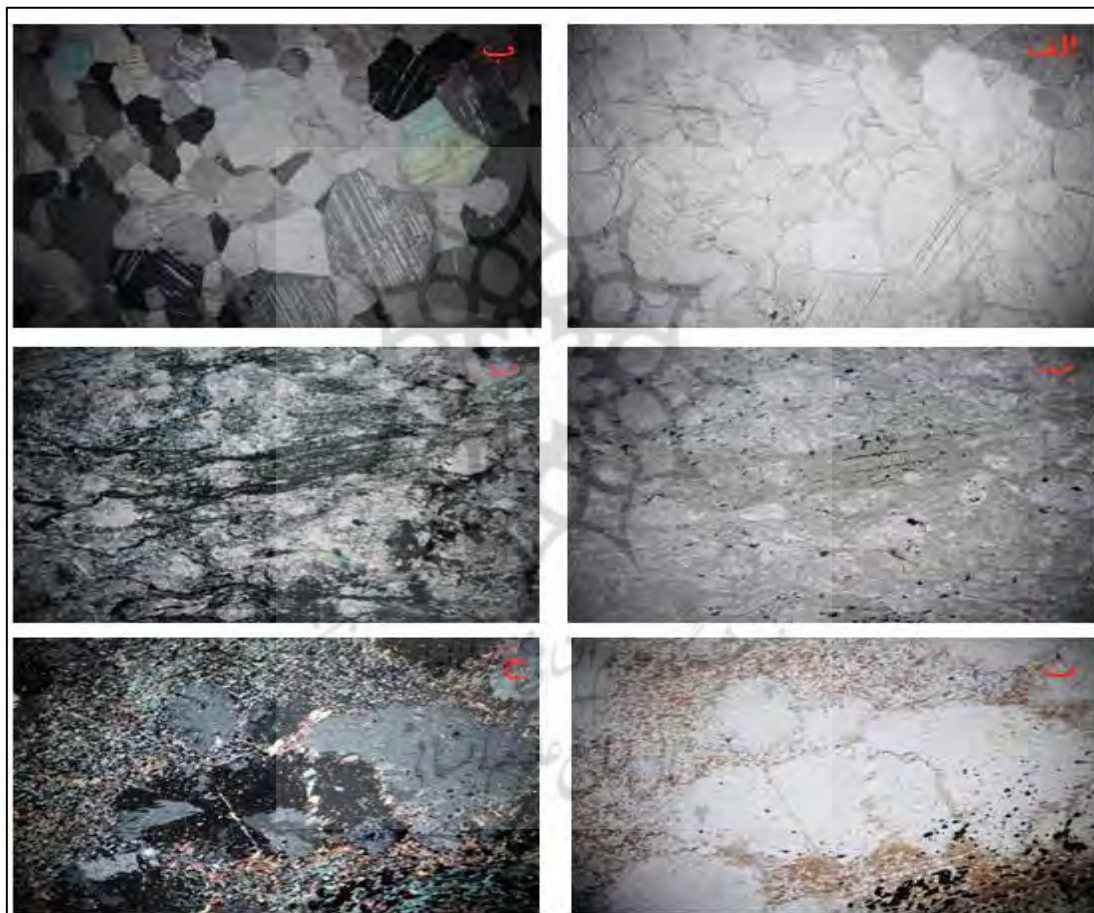


شکل ۲. الف) نمای میکروسکوپی سنگ تراورتن با بلورهای تقریباً هم‌اندازه کلسیت و رشد کانی‌های رسی روی مرز بلورها به صورت زیگزاگی (PPL). ب) همان در XPL. پ) نمای میکروسکوپی سنگ‌آهک لاشتر و قطعات فسیلی تشکیل دهنده آن (PPL) (ت) همان در XPL (ث) نمای میکروسکوپی سنگ‌آهک تفت با زمینه رسی فراوان و قطعات فسیلی تشکیل دهنده آن (PPL) (ج) همان در XPL. میدان دید تمام تصاویر ۴,۳۷ mm است.

- سنگ مرمر سفید: از سنگ‌های دگرگونه به کار گرفته شده در شهر یزد، سنگ مرمری نسبتاً خالص و موسوم به جاوید است که دارای رنگ روشن و ظاهری زیباست. این دسته سنگ‌های مزار که در بازار به آن سنگ چینی نیز می‌گویند از نوع دگرگونی حرارتی و از جنس مرمر خالص هستند. کانی اصلی این نوع سنگ بلورهای درشت کلسیت نسبتاً شکل دار تا نیمه شکل دار با رخ لوزوجهی و ماکل لوزوجهی، حواشی کاملاً درهم‌فرورفته‌اند (شکل ۳ الف و ب). حفظ ظاهر اولیه این سنگ‌ها در سال‌های اول نصب، عامل اصلی استفاده این نوع سنگ مزارها در شهر یزد بوده است.

- سنگ‌های دگرگونی: به جز مرمرها، سنگ‌های دگرگونه به کار گرفته شده در سنگ مزارهای شهر یزد در دو دسته دگرگونی ضعیف و دگرگونی متوسط قرار می‌گیرند. دسته اول یا نوع درجه پایین، یک سنگ دگرگونه دانه‌ریز در حد اسلیت تا فیلیت است که به سنگ‌لوح موسوم بوده و دارای کلیواژ حاصل از جهت یافتگی شکستگی‌ها و کانی‌های ورقه‌ای نه‌چندان درشت از نوع کلریت و کمی بیوتیت است. این سنگ‌ها به علت قرارگیری در یک محیط دگرگونی با دمای پایین، استحکام چندانی

ندارند و بر اثر فشار زیاد دچار شکستگی، جهت یافتگی و خمیدگی کانی‌های ورقه‌ای و در پی آن فضاهای خالی و عدم پیوستگی شدیدی شده‌اند. کانی‌های رسی، کلریت، کلسیت، کانی فلزی خود شکل (احتمالاً پیریت) به همراه مقادیر بسیار کمی کانی اپیدوت در این سنگ‌ها مشاهده می‌شود. از نظر سنگ‌شناسی، این سنگ‌ها نوع اسلیت تا فیلیت و مرتبط با رخساره دگرگونی شیست سبز هستند (شکل ۳ پ و ت). نوع دوم سنگ‌های دگرگونه به کار گرفته شده در آرامستان‌ها، سنگی جهت یافته و دانه‌درشت تا متوسط دارای شیستوزیته و بافت پورفایروبلستی و در واقع یک کردیریت شیست هستند. حضور کانی کردیریت نشان از یک مرحله تحمل دمای بالا و حالت جهت یافته آن نیز مرحله‌ای از تحمل فشار را نشان می‌دهد. کانی‌های کردیریت با ماکل پروانه‌ای، بیوتیت و کوارتز کانی‌های اصلی این سنگ‌ها بوده و گاه ساختار چشمی نشان می‌دهند (شکل ۳ ث و ج). این دسته سنگ‌ها دارای جهت یافتگی خوب و پیشرفته شیستوزیته هستند که حین هوازگی به عنوان نقطه ضعف و عدم پیوستگی توده سنگ عمل می‌کند.



شکل ۳. الف) نمای میکروسکوپی سنگ مرمر با بلورهای درشت کلسیت با ماکل‌های تکراری و لوزوجهی ((PPL. ب) همان بلورهای درشت کلسیت در XPL. پ) نمایی از تصویر میکروسکوپی سنگ‌لوح با شکستگی‌های جهت یافته به همراه کانی‌های خمیده ورقه‌ای ((PPL. ت) همان سنگ‌لوح در XPL. ث) نمایی از تصویر میکروسکوپی سنگ دگرگونی شیست. کانی کردیریت با ماکل پروانه‌ای در حال تجزیه به بیوتیت است (PPL). ج) همان کانی کردیریت در XPL. میدان دید تمام تصاویر 4.37 mm است.

- سنگ‌های آذرین مافیک گابرویی: این نوع سنگ که از نظر تجاری به گرانیت مشهورند، از نظر علمی سنگ‌های آذرین مافیک تا حد واسط تمام متبلوری به رنگ تیره و دارای بافت‌های درشت‌دانه تا متوسط افیتیک و اینترگرانولار از نوع الیون گابرو تا گابرو-دیوریت هستند. کانی‌های اصلی این سنگ‌ها، پلاژیوکلاز خود شکل با ماکل پلی سنتتیک و پیروکسن و کانی‌های فرعی

از قبیل بیوتیت، آمفیبول، الیوین و ... هستند. در برخی نمونه‌ها شکستگی‌هایی مشاهده می‌شود که باعث نفوذ سیالات و تشکیل کانی‌های ثانویه کلریت و اپیدوت و غیره در این شکستگی‌ها شده است. به دلیل تبلور این گونه سنگ‌ها از ماگمای مذاب و تبلور کامل، این سنگ‌ها قاعداً باید مقاومت فیزیکی بیشتری نسبت به سنگ‌های دیگر داشته باشند. اما باید توجه داشت به علت عدم تعادل کانی‌های الیوین و پیروکسن در سطح زمین، این کانی‌ها سریع به کانی‌های آبدار ثانویه تجزیه شده‌اند (شکل ۴).



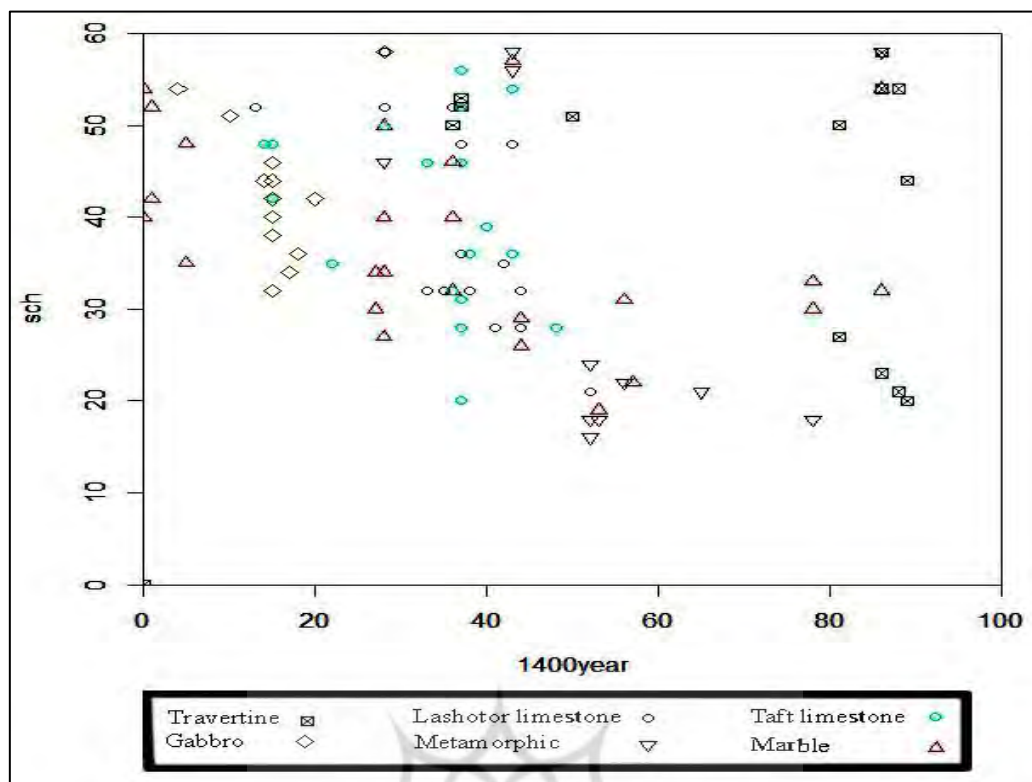
شکل ۴. نمایی از تصاویر میکروسکوپی گابرو: الف) بافت اینترگرانولار و تبدیل کانی‌های مافیک به کانی‌های تجزیه‌ای. بلورهای تقریباً سالم پلاژیوکلاز به‌خوبی مشاهده می‌شوند (PPL). ب) همان بافت اینترگرانولار در XPL. پ) نمایی از الیوین گابرو با بافت افیتیک (PPL). ت) بلور الیوین ادخال در پیروکسن (XPL). میدان دید تمام تصاویر ۴,۳۷ mm.

همبستگی بین مقدار هوازدگی سنگ مزار و زمان

مقادیر واجهشی چکش اشمیت انواع مختلف سنگ‌های شامل تراورتن، سنگ آهک لاشتر اصفهان، سنگ آهک تفت، مرمر سفید و جاوید، سنگ‌های دگرگونه و سنگ گابرو در برابر زمان در نمودار شکل ۵ نمایش داده شده است.

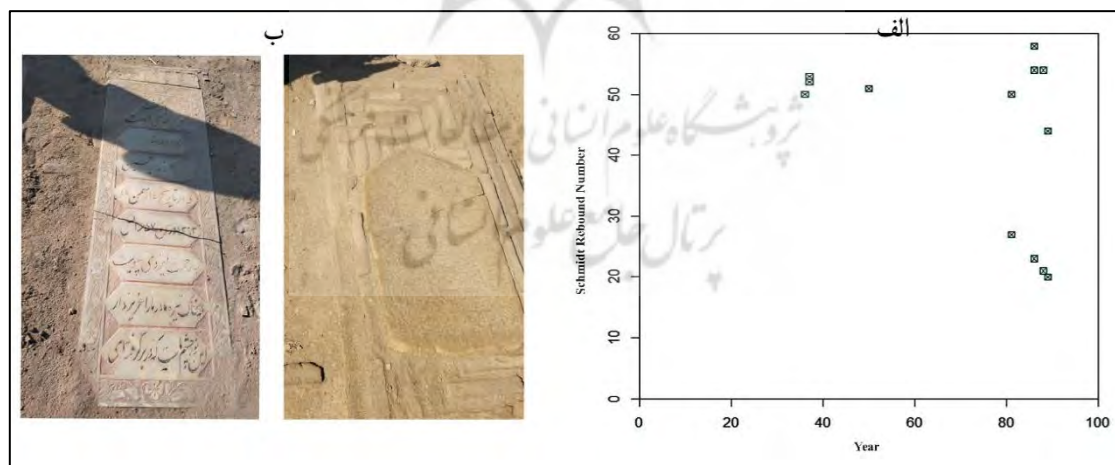
بر پایه این داده‌ها، سنگ‌های تازه به کار گرفته شده اغلب بیشترین مقدار عددی را در واجهش‌های چکش نشان دادند. همچنین انواع سنگ‌ها کم‌وبیش یک همبستگی منفی ضعیف تا قوی با گذشت زمان داشته و به‌نوعی از استحکام سنگ‌ها کم شده است. بی‌نظمی‌های مشاهده شده در اعداد واجهشی چکش اشمیت سنگ‌ها می‌تواند به دلیل عدم شرایط یکسان و استاندارد ساب، نصب و نگهداری بعدی باشد. اما آنچه قطعی و منطقی است، انواع سنگ‌ها در سال‌های اول به‌کارگیری مقاومت بیشتری داشته‌اند. سنگ‌های تراورتن، دگرگونه و مرمر سفید با اینکه در سال‌های اولیه بیشترین مقاومت را نشان می‌دهند، کمترین میزان مقاومت را در چند دهه بعد نشان می‌دهند.

علاوه بر این در بررسی‌های جزئی‌تر هرگونه سنگ، موارد زیر مورد توجه است:



شکل ۵. نمودار تغییرات مقادیر واجهشی چکش اشمیت تمام سنگ‌های مزار در برابر زمان

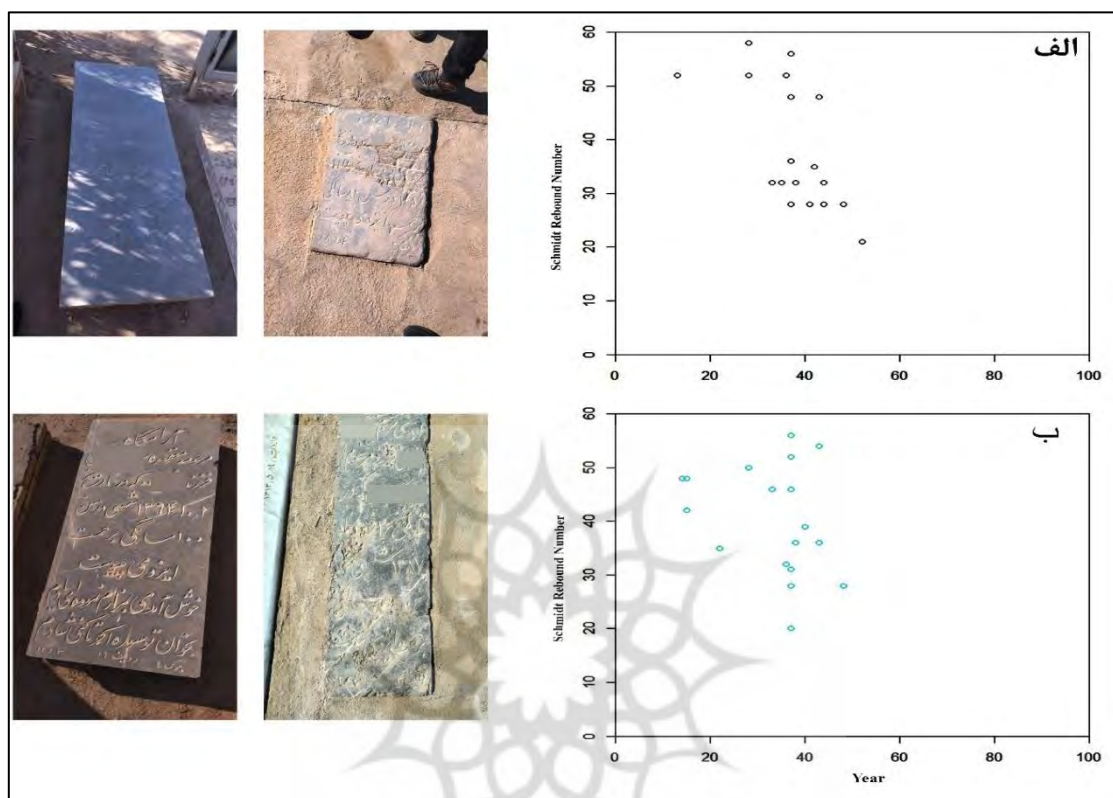
- برخی نمونه سنگ‌های تراورتن بیشترین حفظ استحکام و مقاومت را در گذر زمان داشته‌اند اما نتایج آنالیزها نشان داد که سنگ‌های تراورتن حداقل در ۴۰ سال اول به نظر مقاومت بیشتری نشان داده و برخی نمونه‌ها دچار کاهش شدید مقاومت پس از حدود چهل پنجاه سال شده‌اند. هرچند نمونه‌هایی مشاهده شد که با گذشت بیش از ۸۰ سال هنوز سالم هستند (شکل ۶).



شکل ۶. الف) نمودار تغییرات مقادیر واجهشی چکش اشمیت سنگ‌های مزار تراورتنی در برابر زمان. ب) تصویر دو نمونه سنگ مزار تراورتن در مراحل مختلف زمانی

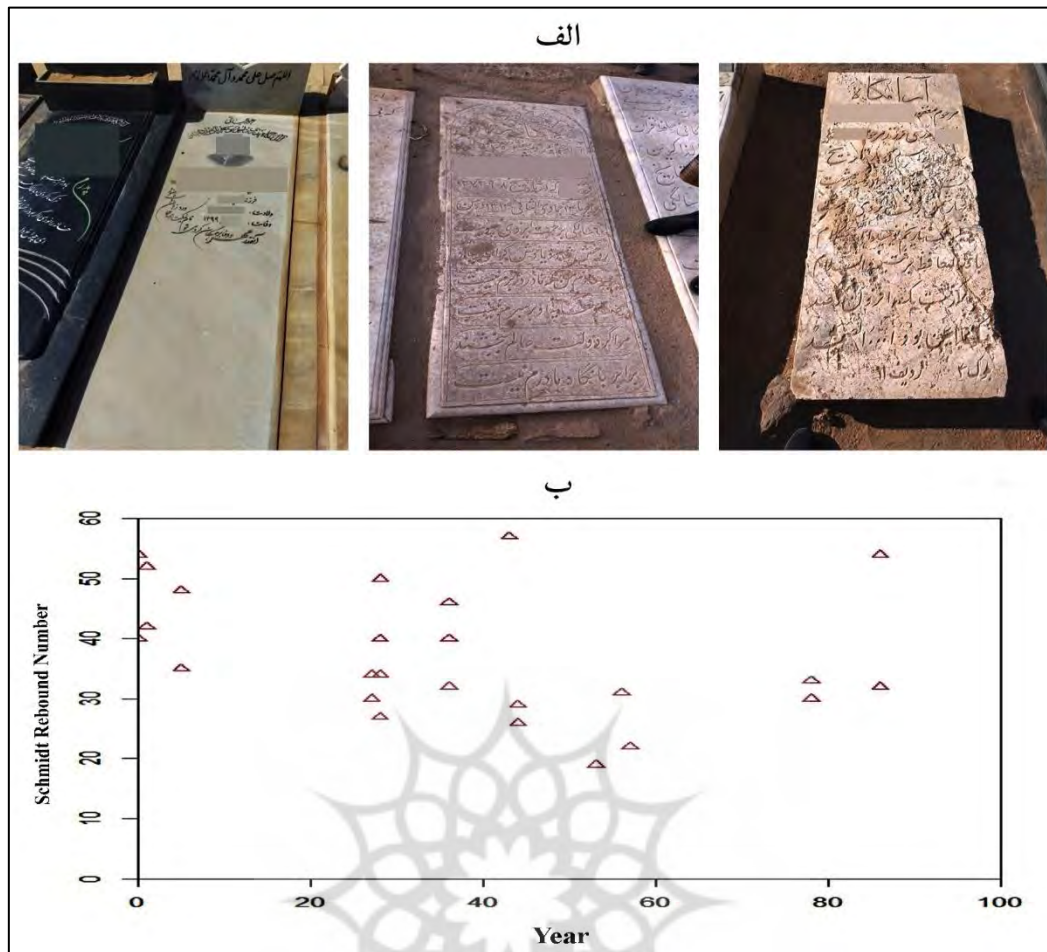
- بعد از تراورتن، سنگ‌های آهکی جایگاه دوم بیشینه استحکام را در سال‌های اول کاربرد نشان می‌دهند. البته سنگ‌آهک لاشر به نظر نسبت به تفت مقاوم‌تر بوده و تفاوت مشهودی بین سنگ‌های آهکی با منشأ لاشر و تفت در مقادیر هوازدگی وجود دارد (شکل ۷)، سنگ‌آهک تفت در مقایسه با سنگ‌آهک اصفهان (لاشر) دارای مقادیر چکش اشمیت پراکنده‌تر، همبستگی کمتر

و تخریب بیشتری بوده است که دلیل اصلی این مسئله وفور کانی‌های رسی در سنگ‌آهک تفت است. میزان متغیر رس در هر دو سنگ، سبب مشاهده دو روند تقریباً مجزا در هر دو سنگ به‌خصوص لاشتر شده است. در سال‌های اخیر به دلیل مورد پسند بازماندگان نبودن، از این سنگ‌ها کمتر استفاده شده و یا سریع تعویض شده‌اند به گونه‌ای که عملاً سنگ‌های با بیش از ۵۰ سال، کمتر مشاهده می‌شوند.



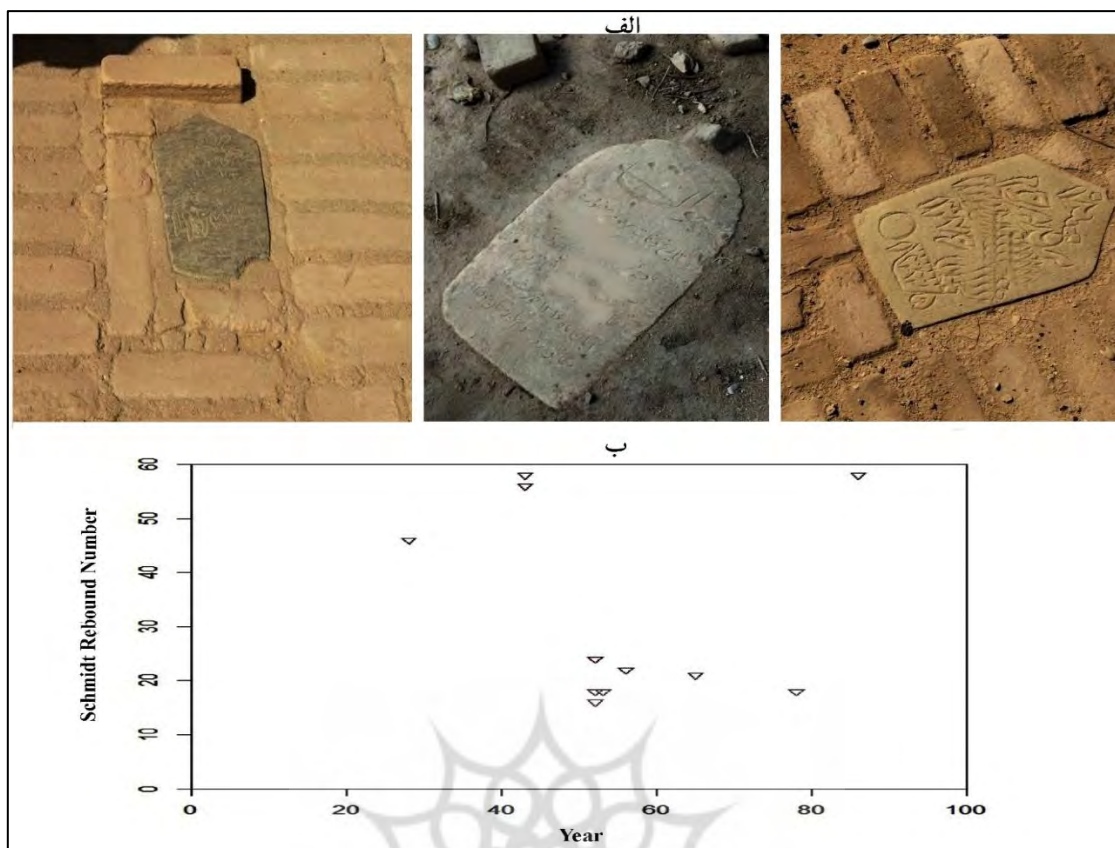
شکل ۷. نمودار تغییرات مقادیر واجهشی چکش اشمیت سنگ‌های مزار آهکی در برابر زمان الف) سنگ‌آهک لاشتر ب) سنگ‌آهک تفت

– استفاده از سنگ مرمرهای سفید و جاوید به‌عنوان سنگ مزار، بیشترین بازه زمانی را دارند. کاهش مقاومت این نوع بیشترین همبستگی با زمان نشان می‌دهد و با اینکه مقاومتشان کمتر از سنگ‌آهک‌هاست اما کاهش مقاومت کمتری با گذشت زمان بیشتری نشان می‌دهند (شکل ۸). با این حال تخریب انحلالی این سنگ‌ها در برخی نمونه‌ها شدید بوده است که احتمالاً به دلیل شستشوی زیاد توسط بازماندگان و در معرض رطوبت زیاد قرار گرفتن این نمونه‌ها است.



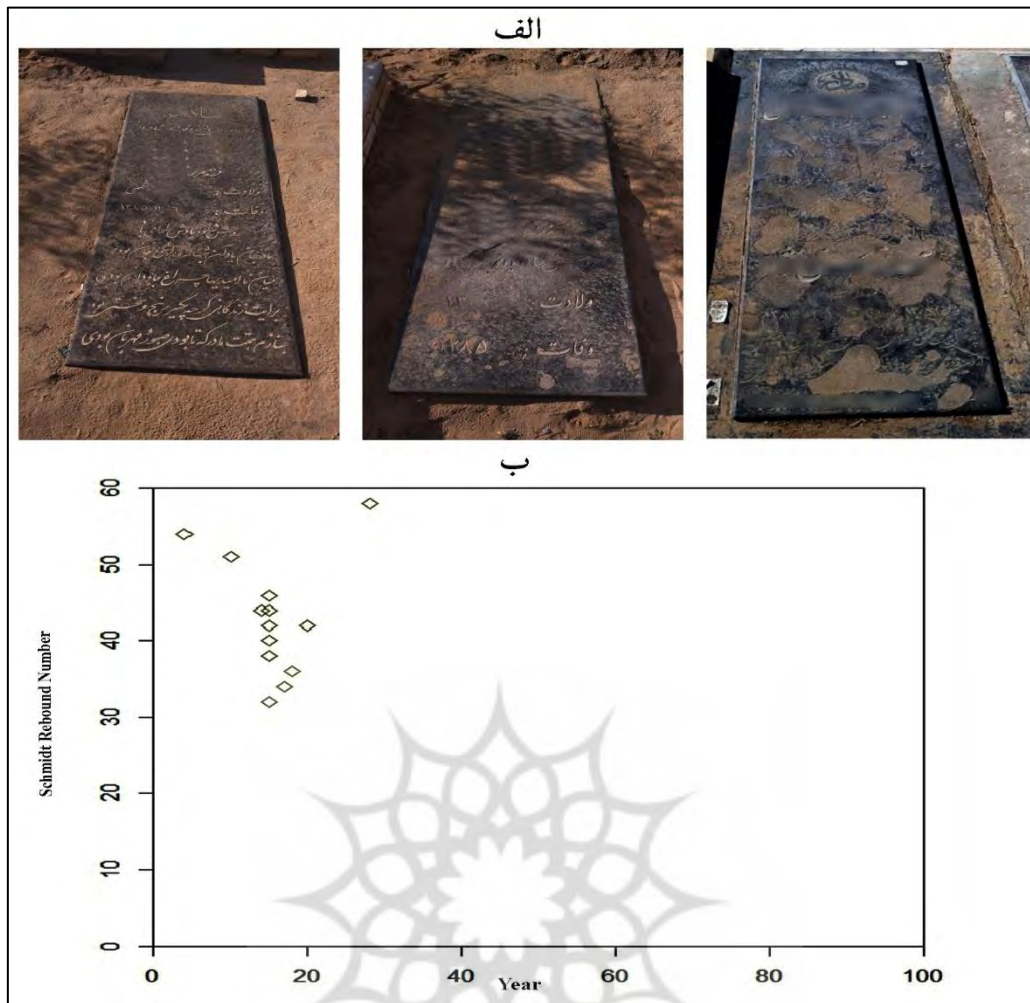
شکل ۸. الف) تصویر سه نمونه سنگ مزار مرمر سفید در مراحل مختلف زمانی. ب) نمودار تغییرات مقادیر واجهشی چکش اشمیت سنگ‌های مزار مرمر سفید در برابر زمان

– سنگ‌های دگرگونه به‌غیر از مرمرها امروزه کمتر در آرامستان‌های شهر یزد مورد استفاده قرار می‌گیرند. چنانچه در نمودار نمایان است این دسته سنگ‌ها دارای دو رفتار جداگانه هستند. انواع اسلیت-فیلیت به‌طور کلی مقادیر پایین چکش اشمیت را نشان می‌دهند و در مقابل کردیریت شیب‌ها بیشترین اعداد چکش اشمیت را نشان می‌دهند. نوع اول به دلیل ذات متورق و ناپیوستگی‌های زیادی که در متن سنگ به‌عنوان برگوارگی دارند، از مقاومت و استحکام کمی در برابر هوازدگی برخوردار هستند. بر اساس آنالیز داده‌های حاصل از واجهش چکش اشمیت، این گونه از سنگ‌ها، پس از گذشت ۵۰ سال دارای کمینه مقاومت هستند که در کاربرد کمتر امروزی آن‌ها بی‌تأثیر نبوده است (شکل ۹). انواع دارای کردیریت هم به دلیل زیبایی بیشتر و حفظ مقاومت با گذشت زمان یکی از سنگ‌های مناسب قلمداد می‌شود.



شکل ۹. الف) تصویر سه نمونه سنگ مزار دگرگونه در مراحل مختلف زمانی. ب) نمودار تغییرات مقادیر واجهشی چکش اشمیت سنگ‌های مزار دگرگونی در برابر زمان. امروزه این سنگ‌ها کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند

- سنگ‌های آذین از جمله گابروها در دو دهه اخیر به دلیل زیبایی و جذابیت بالایی که دارند به‌عنوان سنگ مزار در شهر یزد مورد استفاده قرار گرفته‌اند و قاعدتاً از نظر سنگ‌شناسی به دلیل انجماد از ماده مذاب دارای استحکام اولیه زیادی هستند (شکل ۱۰). مقادیر واجهشی چکش اشمیت در سنگ‌های تازه نصب‌شده گابروها بالا است (البته نه بیشترین) اما آنالیز داده‌ها نشان می‌دهد که با گذشت اندک زمانی، این سنگ‌ها مقادیر پایین چکش اشمیت را نشان می‌دهند. باید توجه داشت با توجه به کاربرد جدید این نوع سنگ مزارها در یزد (کمتر از ۲۰ سال) و عدم کفایت داده‌ها، باید زمانی بیشتری بگذرد تا بررسی دقیق‌تری انجام شود. یکی از ایرادات دیگر این سنگ‌ها، پوسته‌پوسته شدن سریع سطح برخی از این سنگ‌ها به دلیل کاهش فشار لیتواستاتیک پس از استخراج از معدن است.



شکل ۱۰. الف) سنگ مزارهای گابرویی در مراحل مختلف تخریب. پدیده پوسته شدگی شدید سطح سنگ در سنگ مزار سوم به خوبی مشهود است. ب) نمودار تغییرات مقادیر واجهشی چکش اشمیت سنگ‌های مزار گابرو در برابر زمان

بحث

هوازدگی سنگ‌ها به دو عامل مهم ویژگی‌های پتروگرافی سنگ و شرایط محیطی یک منطقه بستگی دارد (Waragai, 2016; Patil & Kasthurba, 2021; Marszałek et al, 2014; Turkington and Paradise, 2005). ویژگی‌های عمده مواد و کانی‌های تشکیل دهنده سنگ از قبیل ترکیب شیمیایی و ساخت و بافت میکروسکوپی سنگ‌ها در نحوه تبادل رطوبت و گرما با محیط مؤثرند (Saheb et al, 2016). اختلاف میزان انبساط و انقباض و واکنش مجزا یا توأم کانی‌ها به نظر عامل مهمی در تشدید هوازدگی می‌باشند و انواع مختلف سنگی، به دلیل ساختارهای کریستالی داخلی متنوعشان، اغلب واکنش‌های هوازدگی، از جمله ترک خوردگی یا شکستگی متفاوتی را دیکته می‌کنند (Loubser, 2013; Matsuoka, 2005; and Murton, 2008; Wells et al., 2005). رطوبت و دما متأثر از عوامل محلی و میکرو اقلیمی در مقیاس شهری باعث می‌شوند که حتی در شرایط آب‌وهوایی مشابه، سنگ‌های متفاوت درجات مختلفی از هوازدگی را نشان دهند (Heidari et al, 2017 a). بر این پایه انتخاب سنگی که در دراز مدت برای یک استفاده در یک محیط اقلیمی مناسب نیست یا انتخاب سنگ از بخش‌هایی از یک معدن که ویژگی‌های مکانیکی ضعیفی از خود نشان می‌دهند، می‌تواند منجر به هوازدگی شدید و تخریب زیاد سنگ‌های به کار گرفته شده در ساخت‌های انسانی شود (Lourenço et al, 2006).

شهر یزد با آب‌وهوایی گرم و خشک، دارای نوسانات زیاد عناصر اقلیمی (دما و رطوبت) در طول شبانه‌روز و فصول مختلف است. انقباض و انبساط حاصل از این نوسانات، به‌ویژه در محدوده دمای صفر درجه سانتی‌گراد و تکرار آن باعث تنش‌های حرارتی شدید در سنگ‌ها می‌شود (Hall and Hall, 1991). عامل مهم دیگر در تخریب سنگ‌های شهر یزد، سیکل‌های رطوبت و خشکی پی‌درپی است. این فرایند با تبلور مجدد کانی‌های ثانویه مانند هالیت و ژپس در سنگ‌ها و ایراد نیروهای تبلور چندباره این کانی‌ها، ضمن کاهش پیوستگی سنگ، کانی‌ها و ذرات بیشتری را از سنگ‌ها جدا می‌کند (Huisman et al., 2017; Gentaz et al., 2011; Kuchitsu et al., 2000). این فرایندها سبب تغییر در ساختار داخلی سنگ، مانند افزایش تدریجی مقدار و اندازه منافذ و ریزشکاف‌ها شده و تخریب بیشتری در پی دارد (Kanyaya and ۲۰۰۵ Trenhaile). تفاوت در جذب دمایی، ظرفیت گرمایی ویژه و هدایت حرارتی سنگ‌های مختلف یک ناحیه و ویژگی‌های آلوده، نیز از عوامل مؤثر دیگر به‌خصوص در سنگ‌های تیره و متشکل از چند کانی هستند. سنگ‌های با آلودگی کم، سریع‌تر از سنگ‌های با آلودگی بالا گرم می‌شوند و انبساط حرارتی بیشتری پیدا می‌کنند بنابراین از شدت هوازدهی بیشتری برخوردار هستند (Hall et al, 2005). از نظر Jansen و همکاران (۱۹۹۳) بر اثر گرم شدن و سرد شدن مکرر، در سنگ‌ها ترک‌های ریزی ایجاد و گسترش می‌یابند که باعث افزایش تخلخل در سنگ می‌شوند. ترک‌های ناشی از تغییرات متناوب حرارت، به دلیل تفاوت ضریب انبساط حرارتی کانی‌ها است (Zomeni, 1997). وقتی سنگ متأثر از شوک‌های حرارتی مکرر قرار می‌گیرد عدم انطباق ضریب انبساط حرارتی در بین کانی‌ها، سبب تمرکز تنش در مرز کانی‌ها می‌شود (جباری و حسینی، ۱۳۹۷).

نوع و میزان هوازدهی هریک از انواع مختلف سنگ‌های مزار آرامستان‌های قدیم (جوی هرهر) و جدید یزد (خلدبرین) طی گذشت حدود ۱۰۰ سال تفاوت‌های چشمگیری را نشان می‌دهند. بر اساس نتایج حاصله، سنگ‌های تراورتن، مرمر و پس‌از آن سنگ‌های آهکی از سنگ‌های نسبتاً مقاوم و پرکاربرد (حداقل در سال‌های اولیه درگذشت متوفی) در شرایط آب‌وهوایی گرم و خشک یزد بوده‌اند. رنگ روشن و آلودگی زیاد این سنگ‌ها باعث بازتاب بیشتر امواج ساطع‌شده از خورشید و جذب کمتر حرارت بوده و به همین علت تأثیر نوسانات دمایی روزانه و فصلی یزد کمتر بر این سنگ‌ها اثر داشته است. همچنین این سنگ‌ها فارغ از شرایط شکل‌گیری‌شان، بیش از ۹۰ درصد کانی کلسیت دارند که این تک کانی بودن سنگ خود سبب کاهش اثر انبساط و انقباض حاصل از نوسانات دمایی و تعدیل اثر اختلاف افزایش طول کانی‌های مختلف در سنگ‌ها می‌شود. این نوع سنگ‌ها با گذشت چند دهه، بر اثر بارش باران و آبی که بازماندگان بر اساس اعتقادات برای شستشوی سنگ‌قبرها مصرف می‌نمایند دچار هوازدهی انحلالی و تخریب زیاد می‌شوند که اثر تخریبی عمده آن با گذشت چند ده سال نمایان می‌شود.

گابروها (گرانیت‌های بازار) با رنگ تیره و آلودگی کم، دمای بیشتری را جذب کرده و انبساط و انقباض مؤثرتری در طول تغییر دمای محیط متحمل می‌شوند. سنگ‌های آذرین مافیک گابرویی (گرانیت) با رنگ تیره‌ای که اغلب دارند، از جمله سنگ‌هایی هستند که به دلیل زیبایی سنگ‌ساب خورده و نمایش حکاکی زیبا روی آن به‌وفور در دو دهه اخیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اما این سنگ‌ها در شرایط نوسانات زیاد آب‌وهوایی (به‌ویژه نوسانات دمایی) یزد، با گذشت اندک زمانی به‌شدت سست شده و دچار هوازدهی بالایی می‌شوند. این‌گونه سنگ‌ها به دلیل بافت درشت و چند کانی بودن (پلی مینرال بودن) در برابر نوسان دمایی زیاد شبانه‌روزی و فصلی یزد، مقاومت پایینی از خود نشان داده و هوازدهی ترموکلاستی و کریوکلاستی را متحمل شده‌اند. انبساط و انقباض‌های پی‌درپی کانی‌های مختلف این سنگ‌ها و واکنش‌های متفاوت آن‌ها در دراز مدت سبب کاهش مقاومت و سستی مرز کانی‌ها می‌شود. پدیده دیگری که تقریباً در اکثر شهرها مشاهده می‌شود و در شهر یزد هم به‌وفور مشاهده می‌شود، پوسته شدگی سنگ‌های آذرین ساب خورده بر اثر پدیده رهاسازی حاصل از کاهش فشار

لیتواستاتیک است. از آنجاکه سنگ‌های آذرین در اعماق بیشتر پوسته زمین تشکیل شده‌اند، سنگ‌های استخراج‌شده از معادن رخنمون یافته در سطح زمین، به خاطر کاهش شدید فشار، دارای ریز درزه‌هایی به موازات سطح سنگ (به‌مانند فرسایش پوست‌پیزی) شده و سنگ در دراز مدت پوسته‌پوسته می‌شود (شکل ۱۰ الف). همچنین بر اثر ساب سطح سنگ آذرین با دستگاه‌های موجود عملکرد این ریز درزه‌ها تشدید می‌شود و با نفوذ آب در این ریز درزه‌های حاصل از باربرداری و انجماد احتمالی آب پوسته‌پوسته شدن سطحی سنگ بیشتر می‌شود (Zhu et. al., 2024).

انواع سنگ‌های دگرگونی درجه بالا کردیریت شیبست هرچند کمتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند، مقاومت خوبی در شرایط آب‌وهوایی یزد داشته و هوازدگی کمی پیدا کرده‌اند اما سنگ‌های لوح (اسلیت و فیلیت) این‌گونه نیستند. سنگ‌های لوح به دلیل تشکیل در درجات کم دگرگونی دارای کلیواژ شکستگی و شیبستوزیته فراوانی بوده و ناپیوستگی‌های قابل توجهی در پیکره سنگ‌ها دیده می‌شود. وجود این فضاها خالی، از استحکام کلی سنگ کاسته و اثرات تخریبی هوازدگی را تشدید می‌نمایند. نفوذ سیالات در این فضاها توأم با انواع اثرات تخریبی انحلال، فشار حاصل از انجماد آب و نیز تبلور کانی‌های ثانویه سبب شده که نامناسب‌ترین سنگ‌های مزار در شهر یزد از این نوع باشند.

جدول ۱. مقایسه انواع سنگ‌های مزار شهر یزد از نظر سنگ‌شناسی، علت اصلی هوازدگی و میانگین اعداد وا جهشی

ردیف	سنگ مزار	نام سنگ‌شناسی	شرایط تشکیل	کانی‌های غالب	علل اصلی هوازدگی	میانگین اعداد وا جهشی
۱	مرمر تراورتن	سنگ‌آهک تراورتن	چشمه‌های آبگرم سطحی	کلسیت	انحلال	۴۳
۲	سنگ‌آهک لاشتر	پکستون بایوکلاستی تا بایو میکرایت	رسوبی با عمق بیش از ۱۰۰ متر	کلسیت و خرددهای فسیل	انحلال	۳۹
۳	سنگ‌آهک تفت	وکستون بایوکلاستی- بایو میکرایت	رسوبی با عمق کمتر از ۳۰ متر	کلسیت، رس و خرددهای فسیل	انحلال	۴۰
۴	سنگ چینی	سنگ مرمر سفید	دگرگونی مجاورتی	کلسیت	انحلال	۳۸
۵	سنگ لوح	اسلیت- فیلیت	دگرگونی ناحیه‌ای ضعیف	کانی‌های ورقه‌ای ریز کلسیت و بیوتیت	خردشدگی مکانیکی	۳۲
۶	گرانیت	گابرو	آذرین	پیروکسن، پلاژیوکلاز و الیون	درزه‌های حاصل از باربرداری و ویژگی آلبدو	۴۳

نتیجه‌گیری

سنگ‌قبرهای مورد استفاده در آرامستان‌های شهر یزد عمدتاً سنگ‌های فراوان موجود در محیط طبیعی مجاور شهر و یا انواع جدیدتر فراهم‌شده از معادن مناطق دیگر ایران است. میزان مقاومت اولیه سنگ‌های مزار و چگونگی کاهش سالانه آن در برابر انواع هوازدگی‌ها، حاکی از دخالت عوامل بیشماری در هر نوع سنگ است. با توجه به زیبایی، سهولت برش و ساب، فراوانی، قیمت و عوامل دیگر، انواع سنگ‌های تک کانایی مناسب‌ترین سنگ‌ها حداقل در سال‌های ابتدایی است. هوازدگی‌های حاصل از انقباض و انبساط‌های مکرر دمای محیط به همراه رشد و انحلال کانی‌های ثانویه شکل گرفته در چرخه‌های رطوبت- خشکی و آلبدو سنگ‌ها سبب شده سنگ‌های دارای رنگ تیره، چندکانیایی به همراه سنگ‌قبرهای دارای تخلخل و برگوارگی زیاد، نامناسب‌ترین سنگ‌ها در اقلیم گرم و خشک یزد باشند. از نظر میزان مقاومت در برابر هوازدگی حداقل در چند دهه اول پس از نصب، انواع تراورتن، مرمر و سنگ‌آهک‌ها مناسب‌ترین سنگ‌قبرها محسوب می‌شوند ولی مشکل اصلی این سنگ‌ها انحلال شدید بر اثر شست و شوی مکرر یا مجاورت با منابع رطوبتی است که به شدت مقاومت سنگ مزار را در برابر هوازدگی کاهش داده و استفاده از این نوع سنگ‌ها را دچار ملاحظات می‌نماید. نامناسب‌ترین نمونه‌ها انواع سنگ‌های دگرگونه اسلیت و فیلیت است که

عملاً امروزه مورد استفاده قرار نمی‌گیرند.

حامی مالی

بر اساس اظهار نویسندگان این مقاله حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمام مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشتند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در ارتباط با نویسندگی یا انتشار مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از استاد فرهیخته آقای دکتر کوروش رشیدی بابت همکاری در شناسایی فسیل‌ها و محیط رسوبی نمونه‌های رسوبی کمال تشکر را دارند.

منابع

جباری، احمد و حسینی، مهدی. (۱۳۹۷). بررسی آزمایشگاهی اثر تعداد سیکل‌های گرم شدن-سرد شدن سنگ بر روی چقرمگی شکست حالت. مهندسی عمران/امیرکبیر (امیرکبیر)، ۵۰(۴)، ۸۰۰-۷۹۳. DOI: 10.22060/ceej.2017.12659.5245.

سروش، حامد و فهیمی‌فر، احمد. (۱۳۸۰). آزمایش‌های مکانیک سنگ: مبانی نظری و استانداردها. تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

References

- Aydin, A. (2014). ISRM suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: revised version. *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*, 25-33. DOI: 10.1007/978-3-319-07713-0.
- Cann, J. H. (2012). Physical weathering of slate gravestones in a Mediterranean climate. *Australian Journal of Earth Sciences*, 59 (7), 1021-1032. DOI: 10.1080/08120099.2012.727868.
- Cooke, R. U., Inkpen, R. J., & Wiggs, G. F. S. (1995). Using gravestones to assess changing rates of weathering in the United Kingdom. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20(6), 531-546. DOI: 10.1002/esp.3290200605.
- Dragovich, D. (1997). *Weathering of marble tombstones in a near-coastal environment, Australia*. In Engineering geology and the environment (pp. 3129-3134).
- Gentaz, L., Lombardo, T., Loisel, C., Chabas, A., & Vallotto, M. (2011). Early stage of weathering of medieval - like potash - lime model glass: evaluation of key factors. *Environmental Science and Pollution Research*, 18, 291-300. DOI: 10.1007/s11356-010-0370-7.
- Hall K., Thorn, C. and Sumner, P., (2012). On the persistence of 'weathering'. *Geomorphology*, 149-150, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.024>.
- Hall, K., Lindgren, B. S., & Jackson, P. (2005). Rock albedo and monitoring of thermal conditions in respect of weathering: some expected and some unexpected results. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30(7), 801-811. <https://doi.org/10.1002/esp.1189>.
- Hatir, M. E. (2020). Determining the weathering classification of stone cultural heritage via the analytic hierarchy process and fuzzy inference system. *Journal of Cultural Heritage*, 44, 120-134. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.02.011>.
- Heidari, M., Chastre, C., Torabi-Kaveh, M., Ludovico-Marques, M., & Mohseni, H. (2017a). Application of fuzzy inference system for determining weathering degree of some monument stones in Iran. *Journal of Cultural Heritage*, 25, 41-55. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.12.014>.

- Heidari, M., Torabi-Kaveh, M., Chastre, C., Ludovico-Marques, M., Mohseni, H., & Akefi, H. (2017b). Determination of weathering degree of the Persepolis stone under laboratory and natural conditions using fuzzy inference system. *Construction and Building Materials*, 145, 28-41. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.230>.
- Hoke, G. D., & Turcotte, D. L. (2004). The weathering of stones due to dissolution. *Environmental Geology*, 46, 305-310. <https://doi.org/10.1007/s00254-004-1033-0>.
- Huisman, H., Ismail-Meyer, K., Sageidet, B. M., & Joosten, I. (2017). Micromorphological indicators for degradation processes in archaeological bone from temperate European wetland sites. *Journal of Archaeological Science*, 85, 13-29. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2017.06.01>.
- Inkpen, R., Mooers, H. D., & Carlson, M. J. (2017). Using rates of gravestone decay to reconstruct atmospheric sulphur dioxide levels. *Area*, 49 (2), 174-184. <https://doi.org/10.1111/area.12313>.
- Inkpen, R., Baily, B., & Payne, D. (2004). *Representing Surface Loss on Gravestones: Does the Mean, Mean Anything?*. In *Stone Deterioration in Polluted Urban Environments* (pp. 219-232). CRC Press.
- Jabbari, A., & Hosseini, M. (2018). The Experimental Investigation of the Effect of Heating-Cooling Cycle Number of Rock on mode 1 Fracture Toughness. *Amirkabir journal of civil engineering (Amirkabir)*, 50(4), 793-800. [In Persian]. DOI: 10.22060/ceej.2017.12659.5245.
- Jansen, D., Carlson, S., Young, R., & Hutchins, D. (1993) Ultrasonic imaging and acoustic emission monitoring of thermally induced microcracks in Lac du Bonnet granite. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B12) 22231-22243. <https://doi.org/10.1029/93JB01816>.
- Kanyaya, J. I., & Trenhaile, A. S. (2005). Tidal wetting and drying on shore platforms: an experimental assessment. *Geomorphology*, 70 (1-2), 129-146. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.04.005>.
- Kuchitsu, N., Ishizaki, T., & Nishiura, T. (2000). Salt weathering of the brick monuments in Ayutthaya, Thailand. *Engineering Geology*, 55 (1-2), 91-99. [https://doi.org/10.1016/S0165-1250\(00\)80026-7](https://doi.org/10.1016/S0165-1250(00)80026-7).
- Lan, T. T. N., Nishimura, R., Tsujino, Y., Satoh, Y., Thoa, N. T. P., Yokoi, M., & Maeda, Y. (2005). The effects of air pollution and climatic factors on atmospheric corrosion of marble under field exposure. *Corrosion Science*, 47 (4), 1023-1038. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.06.013>.
- Livingston, R. A., & Baer, N. S. (1990). Use of tombstones in investigation of deterioration of stone monuments. *Environmental Geology and Water Sciences*, 16(1), 83-90. DOI: 10.1007/BF01702227.
- Loubser, M. J. (2013). Weathering of basalt and sandstone by wetting and drying: a process isolation study. *Geografiska Annaler: Series A. Physical Geography*, 95(4), 295-304. <https://doi.org/10.1111/geoa.12023>.
- Lourenço, P. B., Luso, E., & Almeida, M. G. (2006). Defects and moisture problems in buildings from historical city centres: a case study in Portugal. *Building and Environment*, 41(2), 223-234. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.001>.
- Marszałek, M., Alexandrowicz, Z., & Rzepa, G. (2014). Composition of weathering crusts on sandstones from natural outcrops and architectonic elements in an urban environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 21, 14023-14036. DOI: 10.1007/s11356-014-3312-y.
- Matsuoka, N., & Murton, J. (2008). Frost weathering: recent advances and future directions. *Permafrost and Periglacial Processes*, 19 (2), 195-210. <https://doi.org/10.1002/ppp.620>.
- Mooers, H. D., Cota-Guertin, A. R., Regal, R. R., Sames, A. R., Dekan, A. J., & Henkels, L. M. (2016). A 120-year record of the spatial and temporal distribution of gravestone decay and acid deposition. *Atmospheric environment*, 127, 139-154. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.12.023>.
- Mooers, H. D., & Massman, W. J. (2017). Gravestone decay and the determination of deciduous bulk canopy resistance to acid deposition. *Science of the Total Environment*, 578, 551-556. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.228>.
- Moses, C., Robinson, D., & Barlow, J. (2014). Methods for measuring rock surface weathering and erosion: A critical review. *Earth-Science Reviews*, 135, 141-161. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.04.006>.
- Owczarek-Kościelniak, M., Krzewicka, B., Piątek, J., Kołodziejczyk, Ł. M., & Kapusta, P. (2020). Is there a link between the biological colonization of the gravestone and its

- deterioration?. *International biodeterioration & biodegradation*, 148, 104879. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104879>.
- Özvan, A., Dinçer, İ., Akin, M., Oyan, V., & Tapan, M. (2015). Experimental studies on ignimbrite and the effect of lichens and capillarity on the deterioration of Seljuk Gravestones. *Engineering geology*, 185, 81-95. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.12.001>.
- Patil, S. M., & Kasthurba, A. K. (2021). Weathering of stone monuments: Damage assessment of basalt and laterite. *Materials Today: Proceedings*, 43, 1647-1658. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.022>.
- Saheb, M., Chabas, A., Mertz, J. D., Colas, E., Rozenbaum, O., Sizun, J. P. & Verney-Carron, A. (2016). Weathering of limestone after several decades in an urban environment. *Corrosion Science*, 111, 742-752. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.06.015>.
- Smith, B. J., Turkington, A. V., & Curran, J. M. (2005). Urban stone decay: the great weathering experiment. *Special papers-geological society of America*, 390, 1. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2390-6.1>.
- Sorush H. & Fahimifar A. (2010). *Rock mechanic tests: theoretical aspects and standards*. Tehran: Amirkabir University of Technology Publishing Center. [In Persian].
- Thornbush, M. J., & Thornbush, S. E. (2013). The application of a limestone weathering index at churchyards in central Oxford, UK. *Applied geography*, 42, 157-164. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.03.001>.
- Turkington, A. V., & Paradise, T. R. (2005). Sandstone weathering: a century of research and innovation. *Geomorphology*, 67(1-2), 229-253. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.028>
- Waragai, T. (2016). The effect of rock strength on weathering rates of sandstone used for Angkor temples in Cambodia. *Engineering geology*, 207, 24-35. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.04.006>.
- Wells, T., Binning, P., & Willgoose, G. (2005). The role of moisture cycling in the weathering of a quartz chlorite schist in a tropical environment: findings of a laboratory simulation. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 30(4), 413-428. DOI:10.1002/esp.1149.
- Zhu, L., He, Z., Liu, R., Li, T., Du, R., & Sun, M. (2024). *Effect of Wet- Dry Cycles on the Loading–Unloading Damage of Granite*. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. <https://doi.org/10.1111/ffe.14480>.
- Zomeni, Z., (1997). *Thermally induced micro fracturing in quartzite*. Masters of Science dissertation, Mining and Geological Engineering, the University of Arizona, Tucson, 199 p. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(89\)90001-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(89)90001-6).
- Zorlu, K. (2008). Description of the weathering states of building stones by fractal geometry and fuzzy inference system in the Olba ancient city (Southern Turkey). *Engineering Geology*, 101(3-4), 124-133. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.04.005>.