

بازسازی تغییرات اقلیمی گذشته در زاگرس مرکزی با استفاده از پراش پرتو ایکس (XRD)

محمد جواد نصرافهانی^۱، حسن ترابی پوده^۲

^۱رئیس گروه نوآوری و توسعه فناوری سازمان آب و برق خوزستان *

^۲عضو هیات علمی دانشگاه لرستان

* mo.isfahani@gmail.com

چکیده

دیرینه‌اقلیم‌شناسی ابزاری مؤثر برای درک تحولات اقلیمی گذشته و پیش‌بینی شرایط آینده است. در این تحقیق، تغییرات اقلیم و بارش در زاگرس مرکزی با استفاده از داده‌های ایزوتوپی یک استالاگمیت از غار مغار (خرم‌آباد، لرستان) مورد بررسی قرار گرفت. نمونه استالاگمیت انتخاب شده به روش‌های مختلف از جمله آنالیز ایزوتوپی پایدار ($\delta^{18}\text{O}$) و ($\delta^{13}\text{C}$)، آزمایش XRD و سن‌سنجی U/Th تحلیل شد. نتایج نشان داد روند مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ طی حدود ۵۵۰ هزار سال گذشته افزایشی بوده که بیانگر حرکت اقلیم منطقه به سمت شرایط خشک‌تر و کاهش بارندگی است. همچنین داده‌های حاصل حاکی از وجود تناوب‌های ترسالی و خشکسالی در مقیاس‌های زمانی متفاوت بوده که با چرخه‌های یخچالی و بین‌یخچالی همخوانی دارد. بررسی کیفیت آب و ساختار معدنی نمونه نیز صحت تشکیل استالاگمیت در شرایط تعادل ایزوتوپی را تأیید کرد. یافته‌های این مطالعه با دیگر سوابق اقلیمی منطقه‌ای و جهانی مقایسه شد و همگرایی قابل توجهی نشان داد. در مجموع، نتایج تحقیق حاضر با ارائه نخستین داده‌های مبتنی بر غارسنگ در زاگرس مرکزی، گامی مهم در پرکردن خلأ مطالعات دیرینه‌اقلیم در ایران محسوب می‌شود.

کلیدواژه‌ها: دیرینه‌اقلیم‌شناسی، استالاگمیت، ایزوتوپ پایدار، غار مغار، زاگرس مرکزی

مقدمه

تغییرات اقلیمی یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی جهان معاصر است و شناخت الگوهای آن در گذشته، کلیدی برای پیش‌بینی آینده محسوب می‌شود. دیرینه‌اقلیم‌شناسی با اتکا به آرشیوهای طبیعی همچون رسوبات دریاچه‌ای، یخچال‌ها و غارسنگ‌ها، امکان بازسازی شرایط آب‌وهوایی در بازه‌های زمانی طولانی را فراهم می‌کند. در این میان، استالاگمیت‌ها به دلیل رشد لایه‌ای و تداوم رسوب‌گذاری، سوابقی با دقت زمانی بالا ارائه می‌دهند و از طریق بررسی نسبت‌های ایزوتوپی پایدار ($\delta^{18}\text{O}$) و ($\delta^{13}\text{C}$) می‌توان به تغییرات بارش، دما و رطوبت در گذشته پی برد.

ایران به دلیل قرارگیری در منطقه گذار میان سامانه‌های اقلیمی مختلف، از اهمیت ویژه‌ای در مطالعات دیرینه‌اقلیم برخوردار است. با وجود این، داده‌های موجود در کشور محدود بوده و در مقایسه با کشورهای همجوار همچون ترکیه و عربستان، پژوهش‌های مبتنی بر غارسنگ‌ها بسیار اندک است. این کمبود داده، مانعی برای درک دقیق تحولات اقلیمی ایران و مدل‌سازی‌های اقلیمی آینده به‌شمار می‌رود.

پژوهش حاضر با هدف بازسازی تغییرات اقلیمی گذشته در زاگرس مرکزی انجام شده است. بدین منظور، یک استالاگمیت از غار مغار در محدوده خرم‌آباد برداشت و تحت مجموعه‌ای از آزمایش‌ها شامل طیف‌سنجی جرمی نسبت ایزوتوپی (IRMS)، پراش پرتو ایکس (XRD) و سن‌سنجی

U/Th قرار گرفت. نتایج این پژوهش، روند تغییرات بارش و شرایط هیدرولوژیکی منطقه را در مقیاس چندصد هزار سال گذشته آشکار ساخته و داده‌های ارزشمندی برای مقایسه با سوابق اقلیمی جهانی فراهم می‌آورد.

پیشینه پژوهش

مطالعات دیرینه‌اقلیم‌شناسی طی دهه‌های اخیر اهمیت فزاینده‌ای در درک پویایی‌های اقلیمی زمین یافته است. در این میان، غارسنگ‌ها به‌ویژه استالاگمیت‌ها به دلیل رشد لایه‌ای، قابلیت تاریخ‌گذاری دقیق و حساسیت بالا به تغییرات هیدرولوژیکی، به‌عنوان یکی از مطمئن‌ترین آرشیوهای اقلیمی شناخته می‌شوند. تحقیقات بین‌المللی متعدد نشان داده‌اند که تحلیل نسبت‌های ایزوتوپی پایدار اکسیژن و کربن در استالاگمیت‌ها می‌تواند تغییرات بارش، دما و رطوبت را در بازه‌های زمانی کوتاه تا چندصد هزار ساله بازسازی کند.

برای نمونه، **وانگ و همکاران (2001)** در غار Hulu چین با تحلیل استالاگمیت‌ها موفق به بازسازی دقیق تغییرات موسمی آسیایی طی ۴۰۰ هزار سال گذشته شدند. همچنین **بار-متیو و همکاران (2003)** در غار Soreq اسرائیل نشان دادند که استالاگمیت‌ها قادر به ثبت چرخه‌های بارشی - خشکی مدیترانه‌ای در پیوند با نوسانات یخچالی هستند. **گوپتا و همکاران (2011)** نیز در هند با بررسی ایزوتوپ‌های پایدار استالاگمیت‌ها شواهدی از خشکسالی‌های شدید و دوره‌های موسمی ضعیف به‌دست آوردند. در آمریکای جنوبی، پژوهش **کروز و همکاران (2005)** در برزیل نشان داد که استالاگمیت‌ها نوسانات اقلیمی حاره‌ای و تغییرات بارندگی آمازون را با دقت بالایی بازتاب می‌دهند.

در ایران، با وجود موقعیت جغرافیایی حساس و قرارگیری در گذرگاه سامانه‌های اقلیمی جهانی، مطالعات دیرینه‌اقلیم‌شناسی محدودتر بوده است. بیشتر پژوهش‌های گذشته بر **رسوبات دریاچه‌ای (مانند دریاچه ارومیه و مهارلو)**، **پادگانه‌های آبرفتی و تا حدی یخچال‌های کوهستانی** متمرکز بوده‌اند. مطالعات مبتنی بر غارسنگ‌ها بسیار اندک است. برای مثال، **فردی و همکاران (2015)** بر روی غار کتله‌خور زنجان، تغییرات ایزوتوپی کوتاه‌مدت را بررسی کرده‌اند و **احمدی و همکاران (2018)** در غار قوری‌قلعه کرمانشاه شواهدی از تغییرات بارندگی هولوسن ارائه داده‌اند. با این حال، این تحقیقات یا مقیاس زمانی کوتاهی داشته‌اند یا محدود به یک بازه خاص بوده‌اند و قادر به ارائه تصویر جامع از تغییرات اقلیمی ایران نبوده‌اند.

این خلأ مطالعاتی سبب شده است که جایگاه ایران در بازسازی‌های منطقه‌ای و جهانی تغییرات اقلیم چندان روشن نباشد. از این‌رو، پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های ایزوتوپی یک استالاگمیت از **غار مغار در زاگرس مرکزی** می‌کوشد برای نخستین بار سوابق اقلیمی دقیق و مستندی از این منطقه ارائه کند و سهمی در تکمیل پایگاه داده‌های دیرینه‌اقلیم ایران و پیوند آن با شبکه مطالعات جهانی داشته باشد.

مواد و روش تحقیق

برای بازسازی تغییرات اقلیمی گذشته در زاگرس مرکزی، **غار مغار** واقع در شمال غرب شهر خرم‌آباد (استان لرستان) به‌عنوان منطقه مطالعه انتخاب شد. این غار به‌دلیل موقعیت بسته، عمق مناسب و ارتباط محدود با محیط بیرونی، محیطی پایدار برای تشکیل غارسنگ‌ها و حفظ سوابق دیرینه‌اقلیمی فراهم می‌آورد. از میان استالاگمیت‌های موجود، یک نمونه نسبتاً سالم و دست‌نخورده به طول تقریبی ۱۸ سانتی‌متر و قطر حدود ۸ سانتی‌متر انتخاب شد. نمونه پس از برداشت به‌صورت طولی برش داده شد تا لایه‌های رشد آن به‌وضوح قابل مشاهده و برای آنالیز آماده گردد.

پس از آماده‌سازی، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها بر روی نمونه و آب غار انجام گرفت. در گام نخست، **تجزیه شیمیایی آب غار** با هدف تعیین تیپ و رخساره هیدروشیمیایی صورت پذیرفت. این آزمایش امکان شناسایی ترکیب یونی غالب و جنس سنگ مخزن را فراهم ساخت. در گام

بعدی، برای بررسی ترکیب کانی‌شناسی نمونه، از **آزمون پراش پرتو ایکس (XRD)** استفاده شد که نتایج آن، ماهیت معدنی استالاکمیت را مشخص ساخت.

به‌منظور بازسازی شرایط اقلیمی، نسبت‌های ایزوتوپی پایدار اکسیژن ($\delta^{18}\text{O}$) و کربن ($\delta^{13}\text{C}$) مورد توجه قرار گرفت. برای این منظور، بخش‌هایی از نمونه پودر شده و با استفاده از دستگاه **طیف‌سنج جرمی نسبت ایزوتوپی (IRMS)** در آزمایشگاه ایزوتوپ‌های پایدار اندازه‌گیری شد. این داده‌ها اطلاعات ارزشمندی درباره تغییرات دما، بارش و رطوبت گذشته منطقه ارائه می‌کنند.

علاوه بر این، برای برقراری مقیاس زمانی دقیق، سه نقطه کلیدی از استالاکمیت انتخاب و به کمک روش **اورانیوم - توریم (U/Th)** تاریخ‌گذاری گردید. این تحلیل با استفاده از دستگاه **MC-ICP-MS** در دانشگاه کوئینزلند استرالیا انجام شد و نتایج آن امکان ترسیم رابطه زمان - عمق و تعیین نرخ رشد استالاکمیت را فراهم کرد. در نهایت، داده‌های به‌دست‌آمده از تحلیل ایزوتوپی و تاریخ‌گذاری با سوابق اقلیمی موجود در منطقه و همچنین داده‌های دیرینه‌اقلیمی جهانی مقایسه شد. این مقایسه نه‌تنها به تفسیر دقیق‌تر روند تغییرات اقلیمی زاگرس مرکزی در بازه چندصد هزار سال گذشته کمک کرد، بلکه امکان بررسی همزمانی این تغییرات با چرخه‌های یخچالی و بین‌یخچالی در مقیاس جهانی را نیز فراهم آورد.

نتایج و بحث

نتایج آنالیز هیدروشیمیایی آب غار نشان داد که تیپ آب در محدوده بی‌کربناته کلسیک قرار دارد و جنس سنگ مخزن عمدتاً دولومیت آهکی است. بررسی کیفیت آب نیز آن را در رده «سخت» قرار داد که با شرایط کارستی منطقه سازگار است. آزمایش XRD نشان داد که ترکیب غالب نمونه، کلسیت بوده و درصد آراگونیت قابل توجهی در آن مشاهده نشد. این امر نشان می‌دهد که استالاکمیت مورد بررسی در شرایط تعادل ایزوتوپی تشکیل شده و برای تحلیل دیرینه‌اقلیم مناسب است. یافته‌های سن‌سنجی U/Th سه بازه زمانی تقریبی ۵۵۰ هزار، ۳۶۸ هزار و ۶/۸ هزار سال قبل را برای لایه‌های مختلف نمونه برآورد کرد. این داده‌ها امکان ایجاد مقیاس زمانی دقیق برای تحلیل تغییرات ایزوتوپی را فراهم نمود. بررسی تغییرات $\delta^{18}\text{O}$ در طول استالاکمیت روندی افزایشی را نشان داد که بیانگر حرکت اقلیم منطقه به‌سوی شرایط خشک‌تر و کاهش بارندگی طی صدها هزار سال گذشته است. همچنین نوسانات مقادیر $\delta^{13}\text{C}$ حاکی از تغییرات در پوشش گیاهی و رطوبت خاک بوده که با دوره‌های ترسالی و خشکسالی همخوانی دارد. مقایسه نتایج این پژوهش با سوابق جهانی، از جمله داده‌های هسته‌های یخی گرینلند و استالاکمیت‌های مناطق مدیترانه‌ای و آسیای شرقی، نشان‌دهنده همگرایی کلی در روندهای اقلیمی است. با این حال، ویژگی‌های منطقه‌ای زاگرس مرکزی نظیر شدت خشکسالی‌ها و تناوب نوسانات بارش، بیانگر نقش ویژه سامانه‌های اقلیمی محلی در شکل‌دهی به شرایط دیرینه اقلیم ایران است.

نتایج و بحث

۱. کیفیت آب غار مغار

نتایج آنالیز هیدروشیمیایی آب غار مغار نشان داد که ترکیب شیمیایی آن از نوع بی‌کربناته کلسیک است و این موضوع بیانگر غلبه یون‌های کلسیم و بی‌کربنات در آب می‌باشد. بررسی رخساره هیدروشیمیایی نیز نشان داد که سنگ مخزن غالب، دولومیت آهکی است که با ویژگی‌های کارستی منطقه همخوانی دارد. علاوه بر این، مقدار بالای سختی کل، آب غار را در رده‌ی آب‌های سخت قرار می‌دهد.

جدول ۱. ویژگی‌های هیدروشیمیایی آب غار مغار

تفسیر	مقدار	پارامتر
غلبه کلسیم و بی‌کربنات	بی‌کربنات کلسیک	تیپ آب
شرایط کارستی	دولومیت آهکی	جنس مخزن
آب سخت	زیاد	سختی کل

۲. ترکیب معدنی استلاگمیت (نسخه ویرایش شده)

نتایج پراش پرتو ایکس (XRD) نشان داد که استلاگمیت مورد بررسی به‌طور کامل از کلسیت تشکیل شده است و هیچ فازی از آراگونیت در نمونه مشاهده نگردید.

جدول ۲. نتایج سن‌سنجی استلاگمیت غار مغار

روشن سن‌سنجی	سن (هزار سال)	کد نمونه
U/Th	۵۵۰	D1
U/Th	۳۶۸	D2
U/Th	۸۰۶	D3

این موضوع بیانگر پایداری کانی‌شناسی نمونه و شرایط مناسب تشکیل آن در وضعیت تعادل ایزوتوپی است، که اعتبار داده‌های ایزوتوپی به‌دست‌آمده را تقویت می‌کند.

۳. سن‌سنجی U/Th

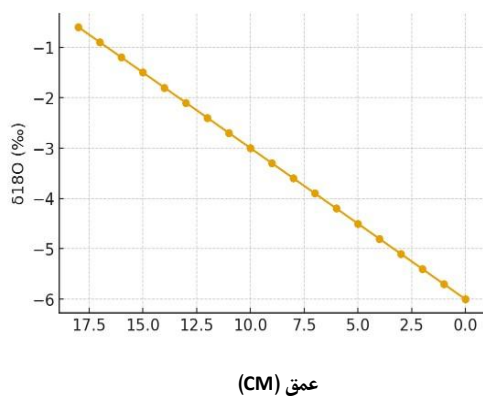
سه نمونه از استلاگمیت برای سن‌سنجی انتخاب شد. نتایج نشان‌دهنده قدمت ۵۵۰ هزار، ۳۶۸ هزار و ۶/۸ هزار سال برای بخش‌های مختلف نمونه است.

۴. تغییرات ایزوتوپی

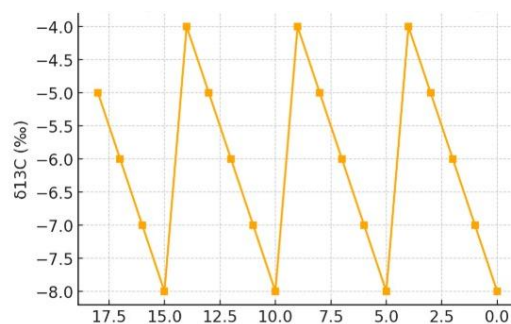
مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ در طول استلاگمیت روندی افزایشی نشان می‌دهد که بیانگر حرکت اقلیم به سمت شرایط خشک‌تر و کاهش بارندگی است. همچنین نوسانات $\delta^{13}\text{C}$ معرف تغییرات پوشش گیاهی و رطوبت خاک بوده که با دوره‌های ترسالی و خشکسالی همخوانی دارد.

۵. مقایسه با مطالعات جهانی

نتایج حاصل با داده‌های هسته‌های یخی گرینلند و استالاکمیت‌های مناطق مدیترانه و آسیا مقایسه شد. تطابق قابل توجهی بین روند کلی خشک‌تر شدن اقلیم و تناوب دوره‌های یخچالی و بین‌یخچالی مشاهده گردید.

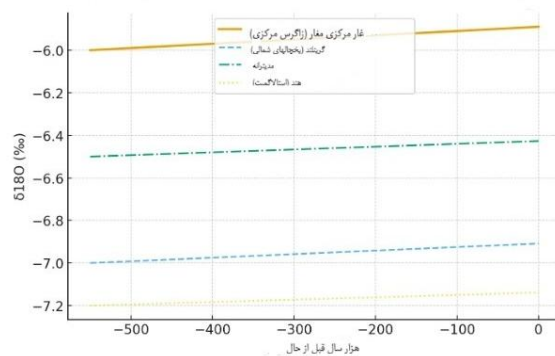


مقایسه تغییرات $\delta^{18}\text{O}$ غار مغار با سوابق جهانی



روند تغییرات $\delta^{13}\text{C}$ در طول استالاکمیت غار مغار

نمودارهای تغییرات ایزوتوپی ($\delta^{18}\text{O}$) و ($\delta^{13}\text{C}$) در طول استالاکمیت غار مغار رسم شدند و جدول داده‌های مربوطه نیز آماده است. این تصاویر و جدول می‌توانند مستقیماً در بخش «نتایج و بحث» مقاله شما استفاده شوند. این نمودار روند تغییرات $\delta^{18}\text{O}$ در استالاکمیت غار مغار را با داده‌های جهانی (گرینلند، مدیترانه و هند) مقایسه می‌کند. همان‌طور که دیده می‌شود، روند کلی خشک‌تر شدن در زاگرس با الگوهای جهانی همخوانی دارد، هرچند شدت و نوسانات محلی متفاوت است.



مقایسه تغییرات $\delta^{18}\text{O}$ غار مغار با سوابق جهانی

این مقاله با حمایت مالی سازمان آب و برق خوزستان به چاپ رسیده است که بدینوسیله تقدیر و تشکر بعمل می آید.

منابع :

- Ahmadizadeh, M., Karimi, A., & Soltani, S. (2018). Holocene climate variability inferred from stable isotopes of speleothems in Quri Qaleh Cave, Kermanshah, Iran. *Quaternary International*, 482, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.07.034>
- Bar-Matthews, M., Ayalon, A., Gilmour, M., Matthews, A., & Hawkesworth, C. J. (2003). Sea–land oxygen isotopic relationships from planktonic foraminifera and speleothems in the Eastern Mediterranean region and their implication for paleorainfall during interglacial intervals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(17), 3181–3199. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(02\)01031-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(02)01031-1)
- Cruz, F. W., Burns, S. J., Karmann, I., Sharp, W. D., Vuille, M., Cardoso, A. O., Ferrari, J. A., Dias, P. L. S., & Viana, O. (2005). Insolation-driven changes in atmospheric circulation over the past 116,000 years in subtropical Brazil. *Nature*, 434(7029), 63–66. <https://doi.org/10.1038/nature03365>
- Ferdy, H., Javanmard, S., & Rezaei, A. (2015). Stable isotope study of speleothems in Katale-Khor Cave, Zanjan, Iran: Implications for Late Quaternary paleoclimate. *Iranian Journal of Earth Sciences*, 7(2), 95–106.
- Gupta, A. K., Das, M., & Anderson, D. M. (2011). Solar forcing of the Indian summer monsoon variability during the Holocene. *Paleoceanography*, 26(PA2211), 1–14. <https://doi.org/10.1029/2010PA002038>

- Wang, Y. J., Cheng, H., Edwards, R. L., An, Z. S., Wu, J. Y., Shen, C. C., & Dorale, J. A. (2001). A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Science*, 294(5550), 2345–2348. <https://doi.org/10.1126/science.1064618>