

آنالیز ایزوتوپ‌های پایدار استرانسیوم و عناصر کمیاب Sr و Ba اسکلت‌های گورستان عصر آهن مسجد کبود تبریز

هادی زندکریمی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد باستان‌سنجی دانشگاه هنر اسلامی تبریز

مسعود باقرزاده کثیری*

استادیار گروه باستان‌سنجی دانشگاه هنر اسلامی تبریز

بهرام آجورلو

استادیار گروه باستان‌سنجی دانشگاه هنر اسلامی تبریز

بهروز عمرانی

استادیار پژوهشکده سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری

(از ص ۸۵ تا ۱۰۲)

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۰۵/۳۰؛ تاریخ پذیرش قطعی: ۹۴/۱۲/۰۸

چکیده

در این پژوهش نمونه‌های دندان و استخوان ده اسکلت از اسکلت‌های محوطه باستانی مسجد کبود تبریز به منظور تعیین بومی یا غیربومی بودن آنها با دو روش آنالیز ایزوتوپ‌های پایدار استرانسیوم $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ و آنالیز عناصر کمیاب Sr/Ca و Ba/Ca بررسی و مطالعه شدند. نتایج آنالیز ایزوتوپ‌های پایدار نشان می‌دهد که غیر از اسکلت شماره ۸۱/۸ مابقی نمونه‌ها بومی هستند. مقایسه لگاریتم Sr/Ca نمونه‌های استخوان با این نسبت در نمونه‌های دندان نشان داد که مقدار پی (P-Value) 0.509 و بزرگ‌تر از سطح معناداری 0.05 است ($P > 0.05$)؛ در نتیجه می‌توان گفت که اختلاف معناداری بین نسبت Sr/Ca نمونه‌های دندان و استخوان وجود ندارد. مقایسه لگاریتم Ba/Ca نمونه‌های استخوان و دندان از طریق آزمون تی نیز عدد پی 0.821 را نشان داد که این مقدار نیز بزرگ‌تر از سطح معناداری است ($P > 0.05$)؛ در نتیجه، در این مورد نیز، تفاوت معناداری بین نسبت Ba/Ca نمونه‌های دندان و استخوان وجود ندارد؛ بنابراین، نتایج آنالیز عناصر کمیاب حاکی از بومی بودن نمونه‌هاست.

واژه‌های کلیدی: ایزوتوپ‌های پایدار، ایزوتوپ استرانسیوم، عناصر کمیاب، محوطه مسجد کبود تبریز، اسکلت انسان

*رایانامه نویسنده مسئول: m.kasiri@tabriziau.ac.ir

۱. مقدمه

۱-۱. آنالیز ایزوتوپ‌های پایدار

یکی از شاخه‌های مطالعاتی که از حدود سه دهه پیش در مباحث باستان‌شناسی نوین ظهور کرده است، مطالعه ایزوتوپ‌های پایدار موجود در بقایای استخوان و دندان است. ایزوتوپ‌های متعددی در پژوهش‌های باستان‌شناسی به کار گرفته شده‌اند که مهم‌ترین آنها کربن، نیتروژن، اکسیژن و استرانسیوم است. با مطالعه آنالیز ایزوتوپ‌های پایدار می‌توان به سؤالات بسیاری درباره آب‌وهوای زمان باستان، تغذیه و اقتصاد زیستی و نیز جابه‌جایی‌ها و مهاجرت‌های گروه‌های انسانی گذشته پاسخ داد (Brown and Brown, 2011: 83).

ایزوتوپ ^{87}Sr ، ایزوتوپی رادیوژنیک^۱ است که طی زمان در اثر واپاشی روبیدیوم (^{87}Rb) به وجود می‌آید و حدوداً ۷٪ از کل استرانسیوم موجود را تشکیل می‌دهد. دیگر ایزوتوپ‌های طبیعی استرانسیوم غیر رادیوژنیک و شامل ^{84}Sr (۰/۵۶٪)، ^{86}Sr (۹/۸۷٪) و ^{88}Sr (۸۲/۵٪) هستند. نسبت ایزوتوپ‌های استرانسیوم در پوسته زمین با توجه به سن و نوع سنگ‌ها متغیر است (Faure, 1986: 121). تغییرات ترکیبات ایزوتوپی استرانسیوم در مواد طبیعی به صورت قراردادی به عنوان نسبت ایزوتوپی استرانسیوم ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) شناخته شده است که با توجه به فراوانی نسبی روبیدیوم و استرانسیوم و سن سنگ‌ها، در مناطق مختلف متغیر است. نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ به طور کلی بین ۰/۷۰۰ تا ۰/۷۵۰ تغییر است.

استرانسیوم عنصری است که از سنگ‌های بستر به داخل خاک، آب‌های سطحی و سپس از آنجا به چرخه غذایی جانداران وارد می‌شود؛ از این رو، غلظت استرانسیوم و نسبت ایزوتوپی آن در خاک، آب‌های زیرزمینی، گیاهان و جانوران تا حد زیادی به جنس سنگ‌های منطقه مورد نظر بستگی دارد. اگرچه مقدار استرانسیوم در بافت‌های گیاهی و جانوری تحت تأثیر عوامل زیادی قرار دارد، به دلیل اینکه تفاوت جرمی ایزوتوپ‌های استرانسیوم بسیار اندک است، ترکیبات ایزوتوپی آن در اثر فرآیندهای بیولوژیک تغییر نمی‌کنند (Sillen and Kavangh, 1982: 69). به طور کلی ۹۹ درصد از استرانسیوم مصرفی در بافت‌های اسکلتی و دندانی قرار می‌گیرند (Schroeder et al., 1972: 548).

از دهه ۱۹۸۰ آنالیز ایزوتوپ‌های استرانسیوم در مطالعات باستان‌شناسی به عنوان شاخص مهاجرت (Ericson, 1985: 506) و همچنین برای ارزیابی ترکیبات رژیم غذایی جمعیت‌های ماقبل تاریخ استفاده شده‌اند (Sealy et al., 1991: 404).

مطالعات جابه‌جایی‌های گروه‌های انسانی بر مطالعه مینای دندان استوار است؛ زیرا این امکان را می‌دهد که نسبت‌های ایزوتوپی محل تولد را اندازه گرفت. نسبت ایزوتوپی محلی را می‌توان از طریق آنالیز نمونه استخوان همان اسکلت‌هایی که دندان‌های آنها آنالیز می‌شود، از طریق آنالیز استخوان‌های انسان و انسان‌های موجود کشف شده در محوطه یا از طریق آنالیز نمونه‌های حیوانی جدید در مجاورت محوطه به دست آورد (Price and Burton, 2010: 237). به علت عدم تعادلی که در برخی از پژوهش‌ها میان استرانسیوم محیط و استرانسیوم محاسبه شده از مینای دندان اسکلت‌های ماقبل تاریخ دیده شد، می‌توان تمایزی بین نسبت استرانسیوم زمین‌شناسی (Geologically available strontium) و نسبت استرانسیوم زیستی (Biologically available strontium) قائل شد (Bentley, 2006: 154; Price et al., 2002: 126). استرانسیوم زمین‌شناسی شامل تمام منابع اتمسفری (بارش، زمین و دریا) و نمایانگر ورودی محتمل استرانسیوم در محیط زیست‌شناختی

است (Bentley, 2006: 171). از سوی دیگر، استرانسیوم زیستی میانگین ورودی تمام منابع محیطی استرانسیوم به بدن است که می‌تواند متعاقباً در بافت‌های اسکلتی و دندانی مشاهده شود (Price et al., 2002: 120). با وجود این، مینای دندان هر اسکلت باستانی منبع استرانسیوم زیستی است که به قوت میانگین منابع استرانسیوم محیط را انعکاس می‌دهد (Bentley and Knipper, 2005: 638; Bentley et al., 2004: 368). اندازه‌گیری نسبت ایزوتوپ استرانسیوم در دندان و استخوان انسان می‌تواند نشان‌دهنده منطقه‌ای باشد که افراد در آن رشد کرده یا مرده‌اند؛ زیرا همان‌طور که ذکر شد استرانسیومی که از طریق منابع غذایی مصرف می‌شود، طی فرآیند تشکیل استخوان و تغییرات بیولوژیک آن، به داخل اسکلت منتقل می‌شود. بخش ارگانیک (آلی) استخوان پیوسته دست‌خوش تغییر می‌شود؛ بنابراین، اندازه‌گیری استرانسیوم استخوان، نسبت آن را در سال‌های پایانی زندگی فرد نشان می‌دهد (Price et al., 1994: 421). از طرف دیگر، مینای دندان در کودکی شکل می‌گیرد و دچار تغییرات اندکی می‌شود (Hillson, 2005: 72)؛ بنابراین، تفاوت بین نسبت ایزوتویی استرانسیوم استخوان و مینای دندان تغییر محل اقامت آن فرد را در مدت حیات نشان می‌دهد (Price et al., 2002: 123).

برای به دست آوردن مقیاسی برای تشخیص نمونه‌های بومی از غیر بومی، پرایس و همکارانش پس از سه دهه پژوهش در این حوزه، پیشنهاد کرده‌اند که برای داشتن بازه اطمینان (Confidence limit) دقیق برای تشخیص نمونه‌های بومی از غیر بومی، ضمن به دست آوردن میانگین زیستی منطقه با استفاده از نمونه‌های دندان یا استخوان حیوانات (باستانی یا معاصر یا هر دو) و یا استخوان انسان، می‌توان از بازه میانگین ± 2 استاندارد معیار استفاده کرد. بر این اساس، نمونه‌هایی که در این بازه اطمینان قرار گیرند، بومی و در غیر این صورت غیر بومی محسوب می‌شوند (Price et al. 2002: 132). پیشنهادهای مذکور در تمامی پژوهش‌های بعدی به طور همه‌جانبه مورد قبول واقع شده‌اند و به عنوان قرارداد پذیرفته شده‌اند (Harvig et al., 2014; Killgrove, 2013: 83; Shaw, 2009: 1083; Bentley et al., 2004: 371; Knudson et al., 2004: 11; Schweissing and Grupe, 2003: 1378).

۲-۱. آنالیز عناصر کمیاب

آنالیز عنصر استرانسیوم برای مطالعه ترکیبات رژیم غذایی انسان‌های پیش از تاریخ از دهه ۱۹۷۰ استفاده شده است (Schoeninger, 1979). پژوهش‌ها در زمینه رژیم غذایی با استفاده از عنصر استرانسیوم بر فرآیندی به نام «خالص‌سازی زیستی» (Bio-purification) اتکا می‌کنند که طی فرآیندهای زیستی در بدن، استرانسیوم مصرف شده را نسبت به استرانسیوم اولیه پالایش می‌کند. فرآیند پالایش زیستی بر اساس این پیش‌فرض است که استرانسیوم در مسیرهای سوخت‌وساز بدن جایگزین کلسیم می‌شود؛ در نتیجه، به طور معمول نسبت استرانسیوم با نسبت کلسیم (Sr/Ca) مقایسه می‌شود (Burton and Price, 1999: 234).

باریم همانند استرانسیوم و کلسیم عنصر قلیایی خاکی است که در هیدروکسی آپاتیت (Hydroxyapatite) مینای دندان وجود دارد. الیاس و همکارانش (1982) نشان دادند که باریم و استرانسیوم در حد عناصر کمیاب، در بافت اسکلتی وجود دارند و تغییرات در ترکیب رژیم غذایی را منعکس می‌کنند (Burton and Price, 2004: 235). پژوهشگران بسیاری تلاش کرده‌اند تا با استفاده از مطالعه فرآیند خالص‌سازی زیستی باریم و

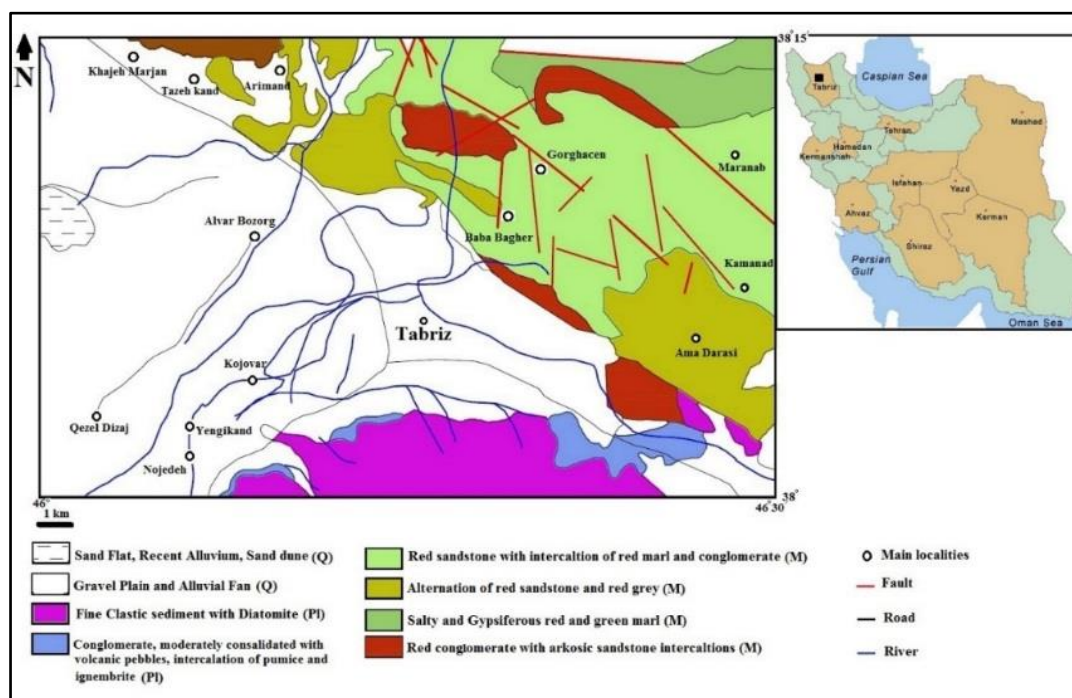
استرانسیوم به ترکیبات رژیم‌های غذایی باستانی دست یابد (Sillen et al., 1995: 283). با این حال، به دلایلی این تلاش‌ها نتایج مطلوبی در بر نداشته است. دو مشکل اصلی در این مطالعات بروز کرده است که خود آنها به نحوی کلید مطالعات منشأیابی و مهاجرت محسوب می‌شوند: ۱- وجود نسبتاً اندک تغییر در ترکیبات عنصری رژیم غذایی، حتی در مواردی که تغییرات زیادی در نسبت مصرف گوشت و گیاهان دیده می‌شود و ۲- تنوع جغرافیایی نسبتاً زیاد در میزان استرانسیوم و باریوم (Burton et al., 2003: 90)؛ به عبارت دیگر، رژیم غذایی انسان و در نتیجه استخوان و دندان انسان، در یک ناحیه معین، صرف‌نظر از میزان تغییرات در رژیم غذایی، مقادیر مشابهی Sr و Ba دارند، در حالی که غلظت این عناصر در مناطق مختلف جغرافیایی تحت تأثیر ویژگی‌های زمین‌شناسی آن منطقه هستند و تفاوت قابل توجهی را نشان می‌دهند. این تفاوت‌ها اگرچه برای مطالعات تغذیه سودمند نیست، می‌تواند برای مطالعه مهاجرت و منشأیابی به کار رود (Burton et al., 2003: 93).

۱-۳. محوطه باستانی مسجد کبود

محوطه‌ای که در این پژوهش مطالعه می‌شود، گورستان عصر آهن مسجد کبود تبریز است که در نتیجه کاوش‌های باستان‌شناختی آن، ۱۰۸ گور شناسایی شد که بر اساس گونه‌شناسی سفالینه‌ها و مصنوعات فلزی و شیوه تدفین و مقایسه آنها با مجموعه‌های مکشوف از کاوش‌های تپه حسنلو و دینخواه‌تپه، قدمت حدود ۱۲۰۰ تا ۸۰۰ سال ق.م و بازه زمانی عصر آهن I-II برای آنها تخمین زده شده است که البته با نتایج سال‌یابی کربن ۱۴ این محوطه‌ها نیز هم‌خوانی نسبی دارد (هژبری نوبری، ۱۳۸۱ و ۱۳۸۳).

یکی از مهم‌ترین پیش‌نیازهای مطالعه مهاجرت با روش آنالیز ایزوتوپ‌های استرانسیوم این است که منطقه مورد مطالعه دارای تنوع زمین‌شناسی کافی باشد؛ زیرا نسبت ایزوتوپ‌های استرانسیوم در مناطقی که از لحاظ زمین‌شناسی یکسان هستند، تفاوت قابل توجهی نشان نمی‌دهد (Price et al., 2002: 512; Ericson, 1985). به همین منظور لازم است پیش از انجام دادن آنالیزها، مطالعات زمین‌شناختی کافی درباره منطقه مورد مطالعه انجام شود.

همان‌طور که در نقشه^۲ (شکل ۱) دیده می‌شود، شهر تبریز در منطقه وسیعی از رسوبات کواترنری شامل رسوبات آبرفتی، رسوبات مخروط‌افکنه‌ای، رسوبات دانه‌ریز و کانی‌های رسی و رسوبات رودخانه‌ای قرار گرفته است (GSI. Rpt. 6262, 1991). این در حالی است که در اطراف منطقه رسوبات پلیوسن و میوسن شامل ماسه‌سنگ، کنگلومرا، رسوبات آواری، سنگ‌آهن و... دیده می‌شود که به خوبی از منطقه وسیع کواترنری قابل تفکیک است و در نقشه با رنگ‌های متفاوت نشان داده شده است. با توجه به این بررسی زمین‌شناسی، می‌توان گفت منطقه دشت تبریز از یک‌سو دارای ویژگی همسان بودن و همگنی خاصی است و از سوی دیگر، از مناطق هم‌جوار اطرافش به خوبی قابل تفکیک است و از آنجایی که تفاوت‌های زمین‌شناختی مستقیماً بر نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ تأثیر می‌گذارند (Faure, 1986: 194)، می‌توان محوطه‌های باستانی این مناطق را با روش آنالیز ایزوتوپی استرانسیوم مطالعه کرد.



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی دشت تبریز و مناطق اطراف

در ایران مطالعات بسیار اندکی درباره بقایای اسکلت‌های تاریخی انجام شده است و این بخش از یافته‌های باستان‌شناسی که منبع اطلاعات بسیار با ارزشی درباره فرهنگ‌های گذشته است، به آن کم‌توجهی شده است. از طرف دیگر، آنالیز ایزوتوپ‌های پایدار که روش بسیار مفیدی برای استخراج اطلاعات درباره فرهنگ‌های پیشین است، با اینکه در چند پژوهش برای مطالعه اقتصاد زیستی و تغذیه باستان به کار رفته است، تاکنون برای مطالعه مهاجرت‌های باستانی استفاده نشده است.

اهداف این پژوهش به طور کلی شروع مطالعات جدید در زمینه زیست‌باستان‌شناسی و شناسایی و بررسی روش‌های نوین برای استخراج اطلاعات باستان‌شناسی است. در این رابطه ابتدا میانگین ایزوتوپی محوطه مورد مطالعه تعیین خواهد شد که علاوه بر این پژوهش، می‌تواند در بسیاری دیگر از پژوهش‌های زمین‌شناسی و باستان‌شناسی و سایر علوم بین‌رشته‌ای استفاده شود. در ادامه، نسبت ایزوتوپی نمونه‌های مورد مطالعه با میانگین ایزوتوپی منطقه مقایسه خواهد شد که به تعیین بومی یا بومی نبودن اسکلت‌های مورد مطالعه منجر خواهد شد.

۲. مواد و روش‌های مورد استفاده

۲-۱. نمونه‌برداری

انتخاب نمونه‌ها در این پژوهش بر اساس تعداد نمونه‌های سالم و در دسترس بود. با توجه به مقاومت دندان‌های آسیاب اول و این مسئله که مینای این دندان‌ها طی دوره جنینی و سال‌های اولیه کودکی شکل می‌گیرد، معمولاً برای انجام دادن آزمایش ایزوتوپی از دندان‌های آسیاب اول (First Molar) (یا مولار اول) استفاده می‌شود (Price and Burton, 2010: 119). در این پژوهش نیز اساس نمونه‌برداری اسکلت‌های بالغی

بودند که دندان آسیاب اول آنها سالم بود و بر همین اساس، ده نمونه انتخاب شد. علاوه بر نمونه‌های دندان، سه نمونه استخوان نیز برای محاسبه و تخمین نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ محوطه در نظر گرفته شد. نمونه‌های دندان از گورهای شماره ۸۲/۱، ۸۲/۱۱، ۸۱/۷، ۸۱/۸، ۸۱/۹، ۷۹/۱۲، ۷۹/۱۱، ۷۹/۷، ۷۹/۱۸ و ۷۹/۱۴ و نمونه‌های استخوان نیز از گورهای ۸۲/۱، ۸۱/۸ و ۷۹/۱۴ برداشته شدند. نمونه‌برداری با کمک استادان دندان‌پزشک دانشکده دندان‌پزشکی دانشگاه علوم پزشکی تبریز و با ابزارهای مخصوص این کار انجام شد. جدول ۱ مشخصات نمونه‌های دندان و استخوان مورد مطالعه در این پژوهش را نشان می‌دهد. سن نمونه‌ها مشخص نشده است؛ زیرا گزارش‌های منتشر شده فاقد این اطلاعات بود، اما می‌توان به سادگی با مشاهده اسکلت‌ها پی برد که غیر از اسکلت شماره ۷۹/۱۲ که به فردی نوجوان تعلق دارد، مابقی آنها متعلق به افراد بالغ است. تنها جنسیت برخی از اسکلت‌ها در گزارش‌های منتشر شده از حفاری آمده که این اطلاعات نیز در جدول ۱ آورده شده است. به طور کلی می‌توان گفت نمونه‌ها ترکیبی از دو جنس مؤنث و مذکر و نیز برگرفته از لایه‌های مختلف حفاری شده هستند. در تصاویر ۱ و ۲ نمونه‌های استخوان و دندان مورد مطالعه در این پژوهش نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های دندان و استخوان

ردیف	شماره گور	کارگاه	ترائشه	نمونه	جنسیت	وزن (g)		اندازه (cm)	
						دندان	استخوان	دندان	استخوان
۱	۸۲/۱	---	---	دندان و استخوان	---	۱۶/۰۹	۲۸/۱۳	۲ × ۱/۱۷	۵/۲ × ۱/۵ × ۰/۷
۲	۸۲/۱۱	---	---	دندان	---	۱۸/۵۳	---	۲/۲۵ × ۱/۱	---
۳	۸۱/۷	سه	B	دندان	مذکر	۱۸/۳۹	---	۱/۸ × ۱/۱	---
۴	۸۱/۸	سه	B	دندان و استخوان	مؤنث	۱۷/۴۳	۲۱/۷۳	۱/۸ × ۱/۱	۴/۳ × ۱/۲ × ۰/۸۵
۵	۸۱/۹	سه	B	دندان	مؤنث	۱۶/۸۸	---	۱/۹ × ۱/۱	---
۶	۷۹/۷	سه	C	دندان	---	۱۴/۲۰	---	۲ × ۱/۱	---
۷	۷۹/۱۱	سه	D	دندان	---	۱۸/۰۴	---	۲/۲ × ۱/۱۵	---
۸	۷۹/۱۲	سه	D	دندان	مذکر	۱۲/۱۵	---	۱/۸ × ۱/۱	---
۹	۷۹/۱۴	سه	E	دندان و استخوان	---	۱۹/۵	۱۲/۳۸	۲ × ۱/۲	۴/۸ × ۰/۵ × ۱/۱۵
۱۰	۷۹/۱۸	سه	E	دندان	مؤنث	۱۴/۳۷	---	۲/۱ × ۱/۲	---

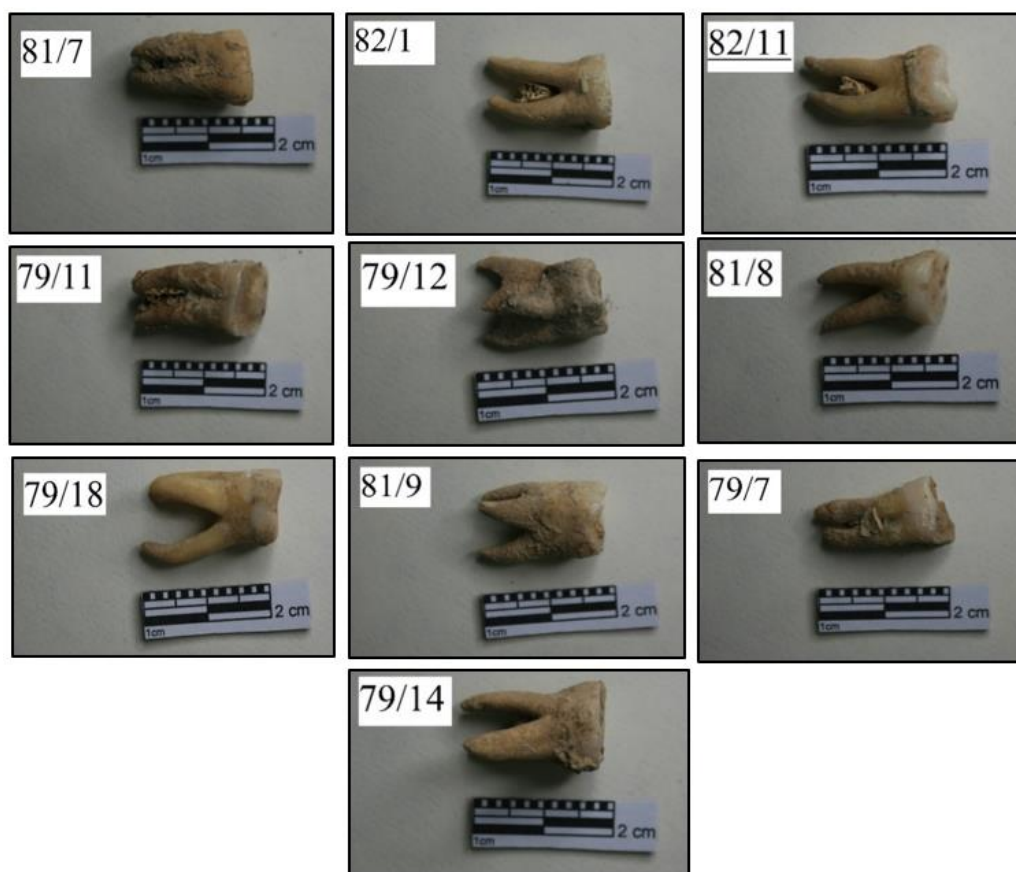


تصویر ۱. نمونه‌های استخوان از گورهای شماره ۸۲/۱، ۸۱/۸ و ۷۹/۱۴

۲-۲. آماده‌سازی نمونه‌ها

۲-۲-۱. تمیزکاری نمونه‌ها

تمیزکاری و برداشتن رسوبات اولیه نمونه‌ها در آزمایشگاه «کتابخانه و موزه ملی ملک» انجام شد و کلیه مواد شیمیایی استفاده شده در این مرحله ساخت کمپانی مرک (Merck) آلمان بودند. پس از عکاسی و اندازه‌گیری وزن و ابعاد نمونه‌ها، لازم بود که نمونه‌ها برای نمونه‌برداری مینای دندان تمیز شوند؛ زیرا رسوبات زیادی بر روی دندان‌ها وجود داشت که وجود اندکی از آنها می‌توانست نتایج آزمایش‌ها را تحت‌تأثیر قرار دهد.



تصویر ۲. نمونه‌های دندان گورهای شماره ۸۲/۱، ۸۲/۱۱، ۸۱/۷، ۸۱/۸، ۸۱/۹، ۷۹/۱۲، ۷۹/۱۱، ۷۹/۷، ۷۹/۱۸ و ۷۹/۱۴

تمیز کردن نمونه‌ها به روش فیزیکی با استفاده از تیغ بیستوری و فرز انگشتی سیلور (Silver GT 10103) ساخت کشور چین انجام شد. پس از آن هر کدام از نمونه‌ها به مدت ده دقیقه در حمام اولتراسونیک (Ultrasonic Fuses) ساخت کشور انگلستان قرار داده شدند. فرکانس امواج این حمام حدود ۵۰-۶۰ Hz بود که امکان جدا کردن ذرات و آلودگی‌های سطحی را ممکن می‌ساخت. بعد از خشک شدن نمونه‌ها و خیساندن دوباره و تمیزکاری با قلم‌مو، نمونه‌ها مجدداً خشک شدند و در ادامه، در اتانول و نهایتاً در استون (برای زدایش پارالوئیدهای احتمالی) غوطه‌ور شدند و سپس خشک شدند. شایان ذکر است که تیم مرمت‌گر حاضر در کاوش اکثر اسکلت‌های به دست آمده را از محوطه مسجد کبود با چسب پارالوئید B-72 استحکام‌بخشی

کردند (هژبری نوبری، ۱۳۸۱)؛ البته وجود یا عدم وجود پارالوئید در نتایج آنالیز استرانسیوم تأثیری ندارد، اما برای سهولت در زدایش کامل رسوبات، لازم بود که این چسب‌ها از نمونه‌ها زدوده شوند که به همین منظور تمامی نمونه‌ها در استون غوطه‌ور شدند.

۲-۲-۲. استخراج مینا و نمونه‌برداری از استخوان‌ها

مراحل این بخش در آزمایشگاه مؤسسه پژوهشی آنالیزی کیمیاژی انجام شد. تمامی اسیدهای مورد استفاده فوق خالص (Merck Suprapur) و مخصوص آنالیزهای ایزوتوپی بودند. نمونه‌های مینا و استخوان با استفاده از دریل دندان‌پزشکی Crown (ساخت کشور چین) و با یک قلم (سرمته) به قطر ۰/۵ برداشته شدند. از هر دندان به میزان حدود ۵۰ تا ۶۰ میلی‌گرم نمونه برداشته شد که نمونه‌ها با ترازوی دیجیتالی (چهار رقم اعشار، METTLER TOLEDO، ساخت کشور سوئیس) وزن شدند که نیمی از نمونه‌ها برای آنالیز ایزوتوپی و نیم دیگر آن برای آنالیز عناصر کمیاب استفاده شدند. برای اجتناب از آلودگی احتمالی نمونه‌ها، قلم نمونه‌برداری پس از هر مرحله، با اتانول خالص و حمام اولتراسونیک تمیز شد.

نمونه‌ها در داخل ۵ میلی‌لیتر آب مقطر فوق خالص (Milli-Q) غوطه‌ور و به مدت دو دقیقه در حمام اولتراسونیک قرار داده شدند. آب و آلودگی‌هایی که طی آماده‌سازی، از مینا و استخوان جدا شده بود، دور ریخته شد. فرآیند پاک‌سازی اولتراسونیک سه مرتبه با آب مقطر فوق خالص (Milli-Q) تازه تکرار شد تا هرگونه آلودگی از نمونه‌ها جدا شود. هر کدام از نمونه‌ها در ویال ساویلکس (Savillex) ۱۵ میلی‌لیتری حاوی ۳ ml HNO₃ سه نرمال ریخته شد تا استرانسیوم ثانویه (Secondary Sr) ناشی از لایه‌های بیرونی شسته و زدوده شود. بلافاصله، به آن آب Milli-Q اضافه شد تا اسید خنثی شود که محلول حاصل با پیپت برداشته شد. مجدداً، نمونه‌ها سه بار در آب Milli-Q شسته و خشک شدند. پس از خشک شدن، مجدداً در HNO₃ سه نرمال حل شدند.

۲-۲-۳. جداسازی استرانسیوم

برای اندازه‌گیری دقیق نسبت ایزوتوپ‌های استرانسیوم لازم است استرانسیوم خالص‌سازی یا جداسازی شود و دلیل آن، این است که بین ⁸⁷Sr و ⁸⁷Rb تداخل ایزوباری وجود دارد (Price et al., 1992). برای غلبه بر این مسئله از ستون کروماتوگرافی یونی (Chromatographic Ion Exchange Column) و رزین استرانسیوم (Sr-SPEC resin) استفاده می‌شود. رزین استرانسیوم جاذبه بسیار زیادی نسبت به استرانسیوم دارد که در نتیجه، امکان جداسازی این عنصر از عناصر مشابه شامل روبیدیوم، کلسیم، باریوم و دیگر عناصر را فراهم می‌آورد (Poirier et al, 2003).

مقدار نمونه روی ستون کروماتوگرافی تبادل یونی برای جداسازی استرانسیوم به وزن نمونه‌های هضم شده بستگی دارد. کلسیم خواص شیمیایی مشابهی با استرانسیوم دارد و مقادیر آن در مینا بسیار بیشتر است. تقریباً ۹۷٪ ماتریکس مینا غیر آلی است و ۴۰٪ درصد این ماتریکس کلسیم و به صورت بلورهای فسفات کلسیم (هیدروکسی آپاتیت) است؛ بنابراین، ۴۰٪ درصد مینا کلسیم در نظر گرفته می‌شود (Hillson, 2005: 314).

برای استخراج استرانسیوم، نمونه مینا و استخوان به ستون میکروکروماتوگرافی تبادل یونی انتقال داده شد. برای ساختن این ستون از سرنگی استفاده شد که یک فیلتر پلی اتیلن اتر در قسمت پایین آن قرار داده شد. رزین استرانسیوم مورد استفاده در این پژوهش رزین SR-B100-S ساخت کمپانی سیگما-آلدریچ (SIGMA-ALDRICH) و محصول کشور آمریکا بود.

بر روی فیلتر پلی اتیلن اتر یک لایه نازک رزین استرانسیوم ایجاد شد. با توجه به اینکه رزین استرانسیوم در غلظت معین اسیدی، قرابت بسیار زیادی نسبت به استرانسیوم دارد، یون‌های استرانسیوم را نگاه می‌دارد و هنگامی که غلظت اسید کاهش یابد، استرانسیوم از رزین جدا می‌شود (Shaw, 2009: 1081).

لایه نازکی از رزین بر روی ستون (سرنگ) حاوی آب مقطر فوق خالص کشیده شد و قبل از آنکه نمونه به داخل ستون ریخته شود، ستون با HNO_3 سه نرمال آماده شد. آماده کردن ستون با اسید نیتریک به این دلیل است که اطمینان حاصل شود رزین و فیلتر باعث دفع زودرس استرانسیوم نشوند و رزین، استرانسیوم را نگاه دارد. سپس نمونه حل شده به داخل ستون ریخته و اجازه داده شد تا از فیلتر رد و به داخل لوله زیر آن ریخته شود.

عناصر ماتریکس در مینا (عمدتاً کلسیم و فسفات) و استخوان با اضافه کردن دو میلی‌لیتر دیگر HNO_3 سه نرمال از ستون شسته شدند. سپس با اضافه کردن ۴ ml HNO_3 ۰/۰۵ نرمال به داخل ستون، استرانسیوم از فیلتر و رزین جدا و مایع به دست آمده به درون بشر تمیز دیگری چکیده شد. هنگامی که نمونه استرانسیوم آماده شد، ستون با دو میلی‌لیتر HNO_3 سه نرمال مجدداً آماده شد. رزینی که یک‌بار برای آماده‌سازی نمونه استفاده شده بود، دور ریخته شد. محلول حاوی استرانسیوم بر روی هات پلیت گذاشته و دوباره تبخیر شد و مجدداً در ۱ ml HNO_3 سه نرمال حل و برای بار دوم از ستون تمیز عبور داده شد. عناصر ماتریکسی مجدداً با ۱ ml HNO_3 سه نرمال شسته شدند و استرانسیوم نیز با ۴ ml HNO_3 ۰/۰۵ نرمال جداسازی شد.

با توجه به اینکه غلظت کلسیم در مینای دندان و نیز استخوان، بسیار بیشتر از استرانسیوم است، اجرای بار دوم عملیات باعث زدودن یون‌های کلسیم می‌شود و محلول حاوی استرانسیوم خالص تولید می‌کند.

۲-۳. آنالیز ایزوتوپی

آنالیز ایزوتوپی نمونه‌های دندان و استخوان با استفاده از دستگاه طیف سنج ICP-MS (Perkin Elmer) مدل ELAN DRC-e (آمریکا) در مؤسسه پژوهشی آنالیزی کیمیای انجام شد. دستگاه ICP-MS پیش از تزریق نمونه‌ها به آن، کالیبره شد و ده بار نمونه استاندارد استرانسیوم (Strontium Carbonate Isotopic Standard) (SRM 987) اندازه‌گیری شد که در تمامی موارد نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ اندازه‌گیری شده ۰/۷۱۰۲ بود. مقادیر مفروض این استاندارد ۰/۷۱۰۲۵۰ است که آن را مؤسسه ملی استاندارد و تکنولوژی آمریکا (National Institute of Standard and Technology) (NIST) تعیین کرده است و در صورتی که اندازه‌گیری نمونه استاندارد در یک دستگاه با مقدار مذکور تفاوت داشته باشد، میزان تفاوت باید از نسبت ایزوتوپی سایر نمونه‌ها کم شود (Price and Burton, 2010: 138). قابل ذکر است که دستگاه ICP-MS موجود در مؤسسه کیمیای تنها قابلیت داشت نمونه‌ها را تا چهار رقم اعشار اندازه‌گیری کند و همان‌طور که نتایج ارائه شده در بخش

بعدی نشان می‌دهند، چهار رقم اول مقادیر، مشابه‌اند و نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ نمونه استاندارد با استاندارد بین‌المللی مطابقت دارد؛ در نتیجه به تصحیح مقادیر اندازه‌گیری شده نمونه‌ها نیازی نیست.

۴-۲. آنالیز عناصر کمیاب

مراحل آماده‌سازی اولیه و هضم کردن نمونه‌های دندان و استخوان برای آنالیز عناصر کمیاب مشابه این مراحل برای آنالیز ایزوتوپی بود، با این تفاوت که پس از حل کردن و رقیق‌سازی، دیگر به ستون کروماتوگرافی و جدا کردن استرانسیوم نیازی نبود. آنالیز عناصر کمیاب استرانسیوم و باریوم و نسبت Sr/Ca و Ba/Ca نیز با دستگاه فوق انجام گرفت و نتایج به دست آمده با استفاده از نرم‌افزار SPSS (Version 22) با همدیگر مقایسه و از نظر آماری تحلیل شدند.

۳. نتایج و تحلیل داده‌ها

۳-۱. آنالیز ایزوتوپ‌های استرانسیوم

با توجه به اینکه محوطه مسجد کبود امروزه در مرکز شهر تبریز قرار دارد، امکان وجود آلودگی‌های معاصر در این محوطه وجود دارد و از این رو نمی‌توان از نمونه‌های خاک و نمونه‌های گیاهی یا حتی جانداران استفاده کرد (Price et al, 2002: 119)؛ در نتیجه بهترین گزینه که می‌توانست نشان‌دهنده میانگین ایزوتوپی محوطه باشد، اندازه‌گیری نمونه‌های استخوان بود. نمونه‌های استخوان محوطه‌های باستان‌شناسی به عنوان شاهد و میانگین در پژوهش‌های متعددی به کار رفته است و نتایج قابل قبول آن مکرراً تأیید شده است (Price and Burton; 2010: 211; Price et al., 2002: 122; Kusaka et al., 2009: 2283; Knusdson et al., 2004: 16; Schweisseing, 2003: 1381) که در واقع میانگین زیستی ایزوتوپی محوطه را به دست می‌دهد.

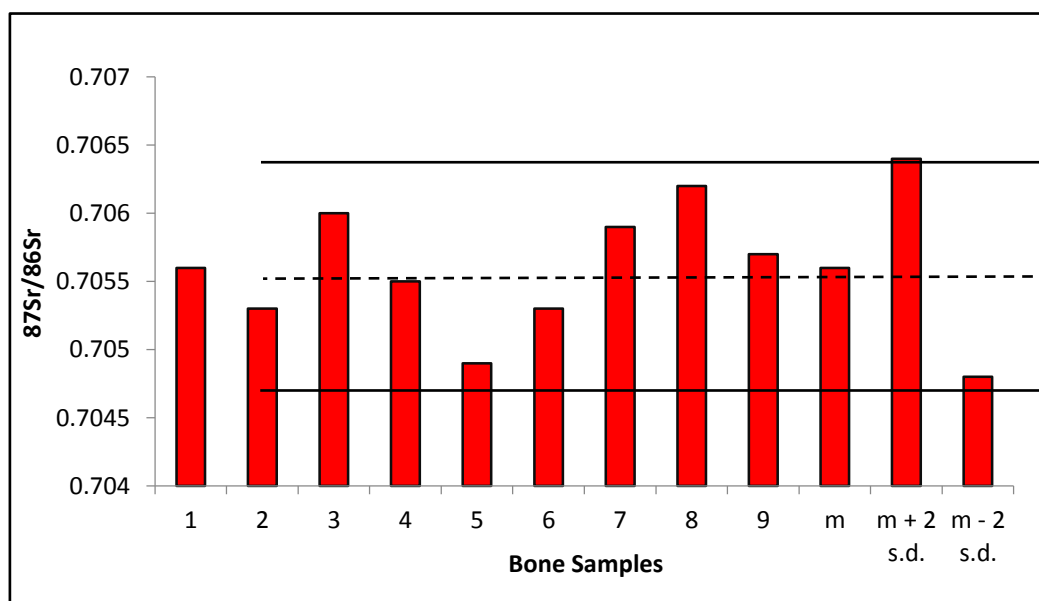
برای به دست آوردن میانگین و انحراف معیار قابل قبول، از هر نمونه استخوان سه نمونه از قسمت‌های مختلف آن برداشته و جداگانه آنالیز شد که نسبت‌های ایزوتوپی $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ نمونه‌های استخوان در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ نمونه‌های استخوان

۸۲/۱			۸۱/۸			۷۹/۱۴			شماره گور
۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	نمونه استخوان
۰/۷۰۵۷	۰/۷۰۶۲	۰/۷۰۵۹	۰/۷۰۵۳	۰/۷۰۴۹	۰/۷۰۵۵	۰/۷۰۶	۰/۷۰۵۳	۰/۷۰۵۶	نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناختی منطقه دشت تبریز (شکل ۱)، محوطه مسجد کبود در منطقه وسیعی از رسوبات جوان کواترنری واقع شده است و نیز با در نظر گرفتن این مسئله که نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ در اکثر مناطق کواترنری جهان حدود ۰/۷۰۶ و یا کمتر از آن است (Price and Burton, 2010: 81; Price et al., 2002: 123; Ericson, 1985: 511) برای بررسی صحت نتایج علاوه بر کالیبره کردن دستگاه و نیز اندازه‌گیری نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ نمونه استاندارد، دو آنالیز جداگانه نیز بر روی دو نمونه از استخوان‌ها، پیش از مرحله جداسازی استرانسیوم انجام شد که مقادیر به دست آمده ۰/۳۳۶ و ۰/۴۶۷ بودند. با توجه به اینکه نسبت استرانسیوم در تمام مناطق کره زمین رقمی بین حدوداً ۰/۷۰۰

و ۰/۷۵۰ (Faure, 1986: 112) است، کاملاً واضح است که این مقادیر اشتباه هستند که دلیل آن نیز به طور واضح تداخل ایزوباری استرانسیوم با روبیدیوم و نیز ناخالصی ناشی از وجود دیگر عناصر بود. میانگین نمونه‌های استخوان ۰/۷۰۵۶ و انحراف معیار^۳ (SD) ۰/۰۰۰۴ است (۰/۷۰۵۶±۰/۰۰۰۴). برای تشخیص نمونه‌های بومی از مهاجر، طبق قرارداد محدوده‌ای تعریف شده است که بر اساس آن میانگین نسبت زیستی استرانسیوم ± 2 انحراف معیار^۴ را شامل می‌شود (Price et al., 2002: 129). بر این اساس، نسبت ۰/۷۰۴۸ تا ۰/۷۰۶۴ محدوده اسکلت‌های بومی را شامل می‌شود؛ به این معنا که نمونه‌های دندانی که در این محدوده قرار گیرند، بومی و در صورتی که خارج از محدوده باشند، غیر بومی محسوب می‌شوند. این نتایج در نمودار ۱ نشان داده شده است. محدوده مذکور اگرچه از لحاظ عددی کوچک به نظر می‌رسد، از نظر زمین‌شناسی و نیز فنی و دستگاهی برای نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ بازه وسیعی را شامل می‌شود (Price et al., 1994: 416)، اما با توجه به اینکه محوطه مسجد کبود در منطقه وسیعی از رسوبات کواترنری قرار گرفته است که از یک طرف از لحاظ بافت زمین‌شناسی یکدست و مشابه است و از طرف دیگر تفاوت زمین‌شناسی آن با مناطق اطراف بسیار واضح و قابل توجه است، می‌توان چنین استنباط کرد که تفاوت نسبت ایزوتوپی منطقه دشت تبریز با مناطق اطراف شایان توجه و قابل اندازه‌گیری است.

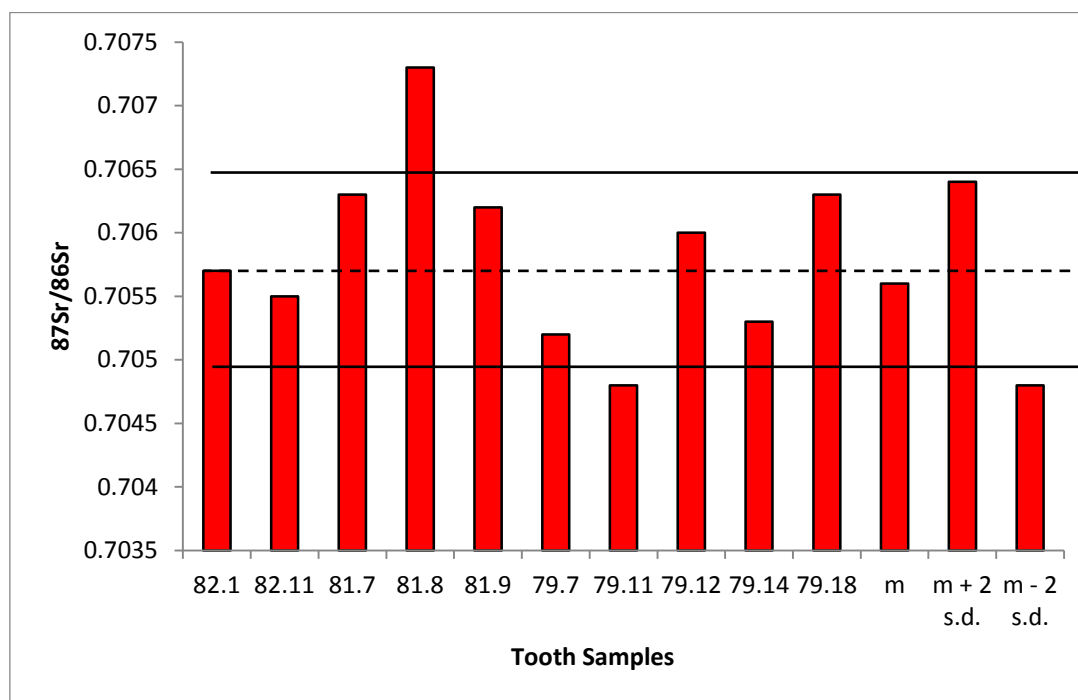


نمودار ۱. نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ نمونه‌های استخوان به همراه میانگین (خط منقطع) و ± 2 انحراف معیار (خطوط توپر)

در جدول ۳ مقادیر $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ به دست آمده از نمونه‌های دندان نشان داده شده است که نمودار ۲ این مقادیر را به صورت ستونی به نمایش گذاشته است.

جدول ۳. مقادیر $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ نمونه‌های دندان

نمونه (دندان)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
شماره گور	۸۲/۱	۸۲/۱۱	۸۱/۷	۸۱/۸	۸۱/۹	۷۹/۷	۷۹/۱۱	۷۹/۱۲	۷۹/۱۴	۷۹/۱۸
نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	۰/۷۰۵۷	۰/۷۰۵۵	۰/۷۰۶۳	۰/۷۰۷۳	۰/۷۰۶۲	۰/۷۰۵۲	۰/۷۰۴۸	۰/۷۰۰۶	۰/۷۰۵۳	۰/۷۰۶۳



نمودار ۲. نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ نمونه‌های دندان و مقایسه آنها با میانگین (خط منقطع) و ± 2 انحراف معیار (خطوط توپر)

چنانچه در نمودار ۲ دیده می‌شود، نمونه اسکلت ۷۹/۱۱ با نسبت ۰/۷۰۴۸ در مرز ۲- انحراف معیار قرار دارد که قابل اغماض است، اما نمونه ۸۱/۸ که عدد ۰/۷۰۷۳ را نشان می‌دهد، با تفاوت نسبتاً زیادی خارج از محدوده قرار دارد. غیر از این دو نمونه، مابقی نمونه‌ها در داخل محدوده مذکور قرار دارند؛ بنابراین، غیر از نمونه ۸۱/۸ می‌توان ادعا کرد که مابقی نمونه‌ها بومی محسوب می‌شوند. نسبت $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ نمونه ۸۱/۸ سه‌بار اندازه‌گیری شد که در هر سه‌بار همین نتیجه حاصل شد. با توجه به مؤنث بودن این اسکلت شاید بتوان این مسئله را نشانه‌ای از الگوی برون‌همسری (Exogamy) دانست؛ همان‌طور که مطالعات باستان‌شناسی زیادی به وجود اسکلت‌های مؤنث غیر بومی اشاره دارند که غالباً به دلیل وجود الگوی برون‌همسری بوده است (Killgrove, 2013: 93, 2010: 66).

۲-۳. آنالیز عناصر کم‌مقدار

برای حصول اطمینان از نتایج آنالیز ایزوتوپی، آنالیز عناصر کمیاب نیز انجام گرفت. همان‌طور که در مقدمه نیز بدان اشاره شده است، مطالعات عناصر کمیاب استرانسیوم و باریوم که در ابتدا به منظور مطالعه تغذیه باستان آغاز شد، در ادامه با مشکلاتی مواجه شد که همانا نبود معیاری برای تشخیص و تفکیک میزان مصرف غذاهای گیاهی و گوشتی یا غذاهای دریایی بود، اما پیشرفت این پژوهش‌ها در ادامه به این منجر شد که غلظت این عناصر در مناطق مختلف جغرافیایی کاملاً با همدیگر متفاوت است که در نتیجه می‌تواند برای مطالعه منشأیابی استفاده شود (Burton et al., 2003: 94).

با اینکه استخوان و دندان، تحت‌تأثیر فرآیند زیست‌پالایی مشابهی قرار می‌گیرند، الزاماً نتایج مشابهی را نشان نمی‌دهند. با توجه به این واقعیت که مینای دندان پس از شکل گرفتن در سنین کودکی، اصطلاحاً

کپسول یا بسته می‌شود، قابلیت تبادل یونی و عنصری با محیط اطراف خود را از دست می‌دهد و ساختار آن ثابت می‌ماند و غلظت عناصر موجود در آن با تغییر مکان فرد تغییر نمی‌کند، در حالی که ساختار شیمیایی استخوان پیوسته با تغییر مکان موجود زنده تغییر می‌کند و با محیط به تعادل می‌رسد و از این رو، شرایط آخرین محل اقامت نمونه را منعکس می‌کند (Burton et al., 2003: 94; Price et al., 2002: 130)؛ بنابراین، تفاوت قابل توجه یا معنادار (Significant difference) در غلظت عناصر استرانسیوم و باریوم در نمونه‌های دندان و استخوان اسکلت‌های موجود در یک محوطه می‌تواند نشان‌دهنده بومی یا غیر بومی بودن اسکلت‌های مورد نظر باشد. به منظور دستیابی به معیار مشخص‌تری برای تفکیک شباهت‌ها و مطالعه تفاوت‌های بین دو گروه نمونه، لازم است از آزمون تی (Test-t) استفاده شود و مقادیر پی (P-Value) برای هر سری از نمونه‌ها به دست آید و در صورتی که مقدار پی به دست آمده کمتر از ۰/۰۵ باشد، می‌توان تفاوت را معنادار فرض کرد، در غیر این صورت تفاوت معناداری بین دو گروه نمونه‌های استخوان و دندان وجود ندارد (Drennan, 2009: 131; Burton et al., 2003: 90). در جدول ۴ نسبت Sr/Ca و Ba/Ca و لگاریتم این مقادیر برای نمونه‌های استخوان و در جدول ۵ این مقادیر برای دندان ارائه شده است.

جدول ۴. نسبت Sr/Ca و Ba/Ca و لگاریتم این مقادیر برای نمونه‌های استخوان

Log Ba/Ca	نسبت Ba/Ca (10^4)	Log Sr/Ca	نسبت Sr/Ca (10^4)	نمونه استخوان	شماره گور
-۴/۰۷	۰/۸۴۵	-۳/۲۸	۵/۱۳۲	۱	۷۹-۱۴
-۴/۱۲	۰/۷۵۱	-۳/۴۴	۳/۵۶۷	۲	
-۴/۱۸	۰/۶۶۰	-۳/۵۲	۲/۹۶۲	۳	
-۴/۰۹	۰/۸۱۶	-۳/۵	۳/۱۵۳	۴	۸۱-۸
-۴/۱۱	۰/۷۶۳	-۳/۳۱	۴/۸۰۹	۵	
-۴/۱۶	۰/۶۸۲	-۳/۴۳	۳/۶۹۳	۶	
-۴/۰۴	۰/۹۱۰	-۳/۲۴	۵/۶۴۷	۷	۸۲-۱
-۴/۲۲	۰/۵۹۷	-۳/۲۷	۵/۲۹۳	۸	
-۴/۲	۰/۶۲۵	-۳/۵۶	۲/۷۰۲	۹	

جدول ۵. نسبت Sr/Ca و Ba/Ca و لگاریتم این مقادیر برای نمونه‌های دندان

Log Ba/Ca	نسبت Ba/Ca (10^4)	Log Sr/Ca	نسبت Sr/Ca (10^4)	نمونه دندان	شماره گور
-۴/۰۷	۰/۸۴۸	-۳/۳۲	۴/۶۹۲	۱	۸۲/۱
-۴/۱۳	۰/۷۳۳	-۳/۲۵	۵/۵۰۶	۲	۸۲/۱۱
-۴/۲۴	۰/۵۶۷	-۳/۲	۶/۲۷۳	۳	۸۱/۷
-۴/۱۹	۰/۶۴۲	-۳/۳۱	۴/۸۰۴	۴	۸۱/۸
-۴/۰۴	۰/۹۰۷	-۳/۴۲	۳/۷۶	۵	۸۱/۹
-۴/۰۸	۰/۸۱۶	-۳/۵	۳/۱۳۷	۶	۷۹/۷
-۴/۱۸	۰/۶۵۷	-۳/۵۴	۲/۸۵۴	۷	۷۹/۱۱
-۴/۲۲	۰/۵۹۶	-۳/۲۲	۵/۹۰۴	۸	۷۹/۱۲
-۴/۱۱	۰/۷۶۴	-۳/۵۷	۲/۶۴۹	۹	۷۹/۱۴
-۴/۱۳	۰/۷۳۶	-۳/۲	۶/۱۹	۱۰	۷۹/۱۸

جدول ۶ نیز نشان‌دهنده میانگین و ± 1 انحراف معیار (± 1 SD) لگاریتم نسبت‌های اندازه‌گیری شده است. برای حذف تغییرات بزرگ و کاهش پراکندگی و در عین حال حفظ اهمیت تفسیری داده‌ها، مقادیر مورد نظر به صورت تابع لگاریتمی درمی‌آیند (Shaw, 2009: 1089; Burton et al., 2003: 91; Burton and Price, 1990: 556).

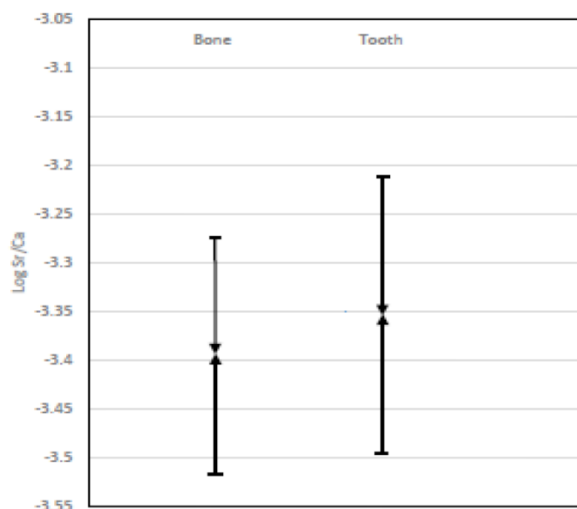
جدول ۶. میانگین و انحراف معیار نمونه‌های دندان و استخوان

نمونه	تعداد	Log Sr/Ca (\pm SD)	Log Ba/Ca (\pm SD)
استخوان	۹	$-۳/۳۹۴ \pm ۰/۱۲۱$	$-۴/۱۳۲ \pm ۰/۰۶۱$
دندان	۱۰	$-۳/۳۵۳ \pm ۰/۱۴۳$	$-۴/۱۳۹ \pm ۰/۰۶۶$

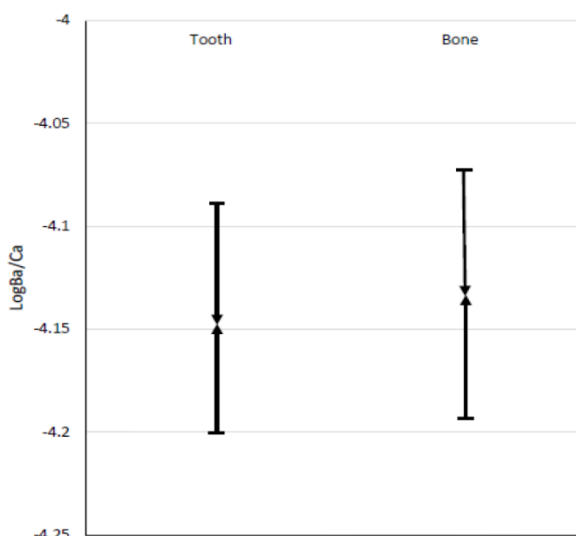
در این پژوهش برای به دست آوردن مقدار پی از نرم‌افزار SPSS (Version 22) استفاده شد. برای این منظور پیش از آزمون تی لازم است که ابتدا نرمال بودن پراکندگی یا توزیع داده‌ها بررسی شود. برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها از آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov) استفاده شد. نتایج این آزمون برای مقایسه مقادیر Log Sr/Ca در نمونه‌های استخوان و دندان مقدار $۰/۵۵۷$ را نشان داد که از سطح معناداری که $۰/۰۵$ است، بیشتر بود که در نتیجه می‌توان گفت توزیع داده‌ها نرمال است و برای مقادیر Log Ba/Ca عدد $۰/۹۱۲$ حاصل شد که از سطح معناداری $۰/۰۵$ بیشتر بود و در نتیجه، توزیع داده‌ها در این مورد نیز نرمال است. با داشتن این نتایج می‌توان با استفاده از آزمون تی میانگین داده‌ها را مقایسه کرد.

برای مقایسه مقادیر Log Sr/Ca نمونه‌های استخوان و دندان از آزمون تی مستقل استفاده شد. مقدار پی $۰/۵۰۹$ است که از سطح معناداری $۰/۰۵$ بیشتر است ($P > ۰/۰۵$)؛ به این معنا که اختلاف معناداری بین میانگین مقادیر Log Sr/Ca دیده نمی‌شود. این مسئله در نمودار ۳ به صورتی دیگر نشان داده شده است.

برای مقایسه مقادیر Log Ba/Ca در نمونه‌های استخوان و دندان آزمون مشابهی انجام شد. نتایج این آزمون مقدار پی $۰/۸۲۱$ را نشان داد که از سطح معناداری $۰/۰۵$ بسیار بیشتر است ($P > ۰/۰۵$) و با اطمینان می‌توان گفت که تفاوت معناداری بین مقادیر Log Ba/Ca در نمونه‌های استخوان و دندان وجود ندارد. این نتیجه در نمودار ۴ ارائه شده است.



نمودار ۳. مقایسه میانگین و \pm انحراف معیار مقادیر Log Sr/Ca نمونه‌های استخوان و دندان



نمودار ۴. مقایسه میانگین و \pm انحراف معیار مقادیر Log Ba/Ca نمونه‌های استخوان و دندان

با توجه به نتایج آنالیز عناصر کمیاب استرانسیوم و باریم و نسبت این عناصر به کلسیم، می‌توان گفت مقادیر Sr/Ca و Ba/Ca در نمونه‌های دندان تفاوت معناداری با نمونه‌های استخوان ندارند. با توجه به این واقعیت که نمونه‌های استخوان نسبت‌های عنصری سال‌های پایانی سن اسکلت را نشان می‌دهند و از طرف دیگر، نمونه‌های دندان نشان‌دهنده نسبت‌های عنصری سال‌های نخستین سن اسکلت‌ها هستند، نبود تفاوت معنادار بین این نسبت‌ها حاکی از بومی بودن اسکلت‌های محوطه باستانی مسجد کبود است.

۴. نتیجه

در این پژوهش نمونه‌های دندان و استخوان ده اسکلت از اسکلت‌های مسجد کبود برای بررسی بومی یا غیر بومی بودن این اسکلت‌ها با دو روش آنالیز ایزوتوپ‌های پایدار استرانسیوم $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ و آنالیز عناصر کمیاب Sr/Ca و Ba/Ca مطالعه شد. برای به دست آوردن میانگین زیستی $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ محوطه از نمونه‌های استخوان اسکلت‌های مورد مطالعه استفاده شد که مقادیر $(\pm 2 \text{ SD}) \pm 0.0008$ را نشان دادند. نتایج آنالیز ایزوتوپی دندان‌ها و مقایسه آنها با میانگین به دست آمده نشان داد که غیر از اسکلت شماره ۸۱/۸ مابقی نمونه‌ها در محدوده بومی قرار دارند. با توجه به مؤنث بودن اسکلت مورد نظر، این مسئله را می‌توان نشانی از برون‌همسری دانست که البته بررسی این مسئله به نمونه‌ها و مطالعات بیشتری نیاز دارد.

آنالیز عناصر کمیاب استرانسیوم و باریم و نسبت Sr/Ca و Ba/Ca نیز بر روی نمونه‌های دندان و استخوان انجام شد. مقایسه لگاریتم Sr/Ca نمونه‌های استخوان با این نسبت در نمونه‌های دندان نشان داد که مقدار پی ۰/۵۰۹ و بزرگ‌تر از سطح معناداری است ($P > 0.05$)؛ در نتیجه می‌توان گفت که اختلاف معناداری بین نسبت Sr/Ca نمونه‌های دندان و استخوان وجود ندارد. مقایسه لگاریتم Ba/Ca نمونه‌های استخوان و دندان از طریق آزمون تی نیز عدد پی ۰/۸۲۱ را نشان داد که این مقدار نیز بزرگ‌تر از سطح معناداری است ($P > 0.05$)؛ در

نتیجه می‌توان گفت که در اینجا نیز تفاوت معناداری بین نسبت Ba/Ca نمونه‌های دندان و استخوان وجود ندارد؛ بنابراین، نتایج آنالیز عناصر کمیاب حاکی از بومی بودن نمونه‌هاست.

تشکر و قدردانی

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از مسئولان محترم دانشگاه هنر اسلامی تبریز به خاطر حمایت‌های همه‌جانبه در به سرانجام رسیدن این پژوهش و نیز از مسئولان محترم سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان آذربایجان شرقی برای در اختیار قرار دادن نمونه‌های مورد بررسی صمیمانه سپاسگزاری کنند.

پی‌نوشت

۱. ایزوتوپ رادیوژنیک، ایزوتوپی است که در اثر واپاشی یک رادیوایزوتوپ به وجود می‌آید.
۲. این نقشه بر اساس نقشه زمین‌شناسی تبریز، برگرفته از تارنمای سازمان زمین‌شناسی (www.gci.ir) تهیه شده است.

۳. Standard Deviation

۴. (± 2 SD)

منابع

هژبری نوبری، علیرضا، (۱۳۸۱)، گزارش مقدماتی سومین فصل کاوش در محوطه باستانی مسجد کبود تبریز، تهران، سازمان میراث فرهنگی کشور و مرکز تحقیقات باستان‌شناسی با همکاری دانشگاه تربیت مدرس.

_____، (۱۳۸۳)، جایگاه کاوش‌های مسجد کبود تبریز در عصر آهن ایران و مقایسه آن با سایر محوطه‌های هم‌عصر، مجموعه مقالات همایش بین‌المللی باستان‌شناسی ایران؛ حوزه شمال غرب، تهران، پژوهشکده باستان‌شناسی سازمان میراث فرهنگی و گردشگری.

Bentley, R.A., 2006. Strontium isotopes from the earth to the archaeological skeleton: a review, *Journal of Archaeological Method and Theory*, 13: 135-187.

Bentley, R.A., and Knipper, C., 2005. Geographical patterns in biologically available strontium, carbon and oxygen isotope signatures in prehistoric SW Germany, *Archaeometry*, 47:629-644.

Bentley R.A., Price, T.D., and Stephan, E., 2004. Determining the „local $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ range for archaeological skeletons: a case study from Neolithic Europe, *Journal of Archaeological Science*. 31, 365-375.

Brown, T. and Brown, K., 2011. *Bimolecular archaeology: an introduction*. John Wiley and Sons, Ltd.

Burton, J. H., and Price, T.D., 1990. The ratio of barium to strontium as a paleodietary indicator of consumption of marine resources, *Journal of Archaeological Science*. 17: 547-557.

Burton, J. H., Price, T. D., Cahue, L. and Wright, L. E. 2003. The use of barium and strontium abundances in human skeletal tissues to determine their geographic origin, *International Journal of Osteoarchaeology*, 13: 88-95.

Burton, J.H., and Price, T.D., 1999. Evaluation of bone strontium as a measure of seafood consumption, *International Journal of Osteoarchaeology* 9: 233-236.

Drennan, Robert D., 2009. *Statistics for archaeologists; a commonsense approach*. USA, Springer.

- Elias, R. W., Hirao, Y., and Patterson, C.C., 1982. The circumvention of the natural biopurification of calcium along nutrient pathways by atmospheric inputs of industrial lead. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46: 2561-2580.
- Ericson, Jonathon E., 1985. Strontium isotope characterization in the study of prehistoric human ecology, *Journal of Human Evolution*, 14: 503-514.
- Faure, G., 1986. *Principles of isotope geology*. New York: John Wiley and Sons, Ltd.
- Geological Survey of Iran. 1991. *The Report of Geological map of Tabriz-Poldasht*. Sheet No. 6262.
- Hillson, S., 2005. *Teeth*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Harvig, L., Douglas Price, T., and Lynnerup, L., 2014. Strontium isotope signals in cremated petrous portions as indicator for childhood origin, *Plos one Journal*, 9 (7).
- Killgrove, K., 2013. *Biohistory of the Roman Republic: the potential of isotope analysis of human skeleton remain*, Post-classical archaeologies.
- Killgrove, K., 2010. *Identifying immigrants to imperial Rome using strontium isotope analysis*. Roman diasporas, Edited by: Hella Eckardt. Portsmouth: Rhode Island.
- Knudson, K.J., Price, T.D., Buikstra, J.E. and Blom, D.E., 2004. The use of strontium isotope analysis to investigate Tiwanaku migration and mortuary ritual in Bolivia and Peru, *Archaeometry*, 46: 5-18.
- Kusaka, K., Ando, A., Nakano, N., Yumoto, T., Ishimaru, E., Yoneda, M., Hyodo, F., Katayama, K., 2009. A strontium isotope analysis on the relationship between ritual tooth ablation and migration among the Jomon people in Japan, *Journal of Archaeological Science*, 36, 2289-2297.
- Poirier, Y., et al., 2003. *Isotope geochemistry in the oil and gas exploration context: progress towards a high vertical resolution screening tool*; Total SA. Fluids and Organic Geochemistry, Pau, France; Poster presented at: Applied Isotope Geochemistry-5, Heron Island, Australia.
- Price, T.D., and Burton, J.H., 2010. *An introduction to archaeological chemistry*, New York: Springer.
- Price, T.D., Burton J. H., Cucina, A., Zabala, P., Frei, R., Tykot, R.H., and Tiesler, V., 2012. Isotopic studies of human skeletal remains from a sixteenth to seventeenth century AD Churchyard in Campeche, Mexico: diet, place of origin, and age, *Current Anthropology*, 53 (4): 396-433.
- Price, T. D., Burton, J. H., and Bentley, R.A., 2002. The characterization of biologically available strontium isotope ratios for the study of prehistoric migration, *Archaeometry*, 44 (1): 117-135.
- Price, T.D., Grupe, G., and Schroter, P., 1994. *Reconstruction of migration patterns in the Bell Beaker period by stable strontium isotope analysis*, *Applied Geochemistry*, 9: 413-417.
- Price, T.D., Blitz, J., Burton, J., and Ezzo, J.A., 1992. Diagenesis in prehistoric bone: Problems and solutions, *Journal of Archaeological Science*, 19: 513-529.
- Sealy, J.C., Merwe, N.J., Sillen, A., Kruger, F.J. and Krueger, H.W., 1991. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ as a dietary indicator in modern and archaeological bone, *Journal of Archaeological Science*, 18, 399-416.
- Sillen, A. and Kavanagh, M., 1982. Strontium and paleodietary research: a review, *Yearbook of Physical Anthropology*, 25: 67-90.
- Sillen, A., Hall, G. and Armstrong, R., 1995. Strontium calcium ratios (Sr/Ca) and strontium isotopic ratios ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) of *Australopithecus robustus* and *Homo sp*, from Swartkrans, *Journal of Human Evolution*, 28: 277-285.
- Shaw, B., Summerhayes, G.R., Buckley, H.R. and Baker, J.A., 2009. The use of strontium isotopes as an indicator of migration in human and pig Lapita populations in the Bismarck Archipelago, Papua New Guinea, *Journal of Archaeological Science*, 36: 1079-1091.

Schweissing, M.M., and Grupe, G., 2003. *Stable strontium isotopes in human teeth and bone: a key to migration events of the late Roman period in Bavaria*, *Journal of Archaeological Science*, 30: 1373–1383.

Schoeninger, M.J., 1979. Diet and status at Chalcatzingo: some empirical and technical aspects of strontium analysis, *American Journal of Physical Anthropology*, 51: 295-310.

Schroeder, H.A., Tipton, I.H., and Nason, A.P., 1972. Trace metals in man: strontium and barium, *Journal of Chronic Disease*. 19, 545-571.