



طبقه‌بندی و گونه‌شناسی سفال‌های عصر آهن II به دست‌آمده از کاوش‌های باستان‌شناسی قره‌تپه سگزآباد قزوین به کمک توابع شعاع، تانژانت و انحنای (RTC) لبه خارجی سفال**

صالح مافی^۱، مصطفی ده‌پهلوان^۲، علی اعراب^{۳*}

۱. دانشجوی دکتری ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. دانشیار گروه باستان‌شناسی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. دانشجوی دکتری باستان‌شناسی، گروه باستان‌شناسی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۵

چکیده

یکی از اساسی‌ترین پژوهش‌ها در بررسی‌های میدانی و کاوش‌های علمی باستان‌شناسی، ارائه یک توصیف کمی و کیفی دقیق از ویژگی‌های هندسی قطعات سفالی است. این توصیفات در قالب مفاهیم طبقه‌بندی و گونه‌شناسی سفال‌های یک دوره تاریخی مطرح شده است و از آن‌ها به منظور بررسی ساختارهای فرهنگی و اجتماعی آن دوره استفاده می‌شود. امروزه، بیشتر مطالعات انجام‌شده در این زمینه به کمک روش‌های رقومی و مدل‌سازی‌های ریاضی صورت می‌گیرند. در این پژوهش نیز به بررسی امکان استفاده از روش‌ها و الگوریتم‌های ریاضی در طبقه‌بندی و گونه‌شناسی سفال‌های باستانی پرداخته می‌شود. آنچه در وهله اول حائز اهمیت است، معرفی مجموعه‌ای از ویژگی‌های هندسی برای منحنی لبه خارجی سفال است که در قالب توابع RTC به الگوریتم‌ها معرفی می‌شوند. این توابع ویژگی‌های یکتا و منحصر به فردی را برای هر منحنی لبه خارجی نشان می‌دهند که از آن‌ها در طبقه‌بندی و گونه‌شناسی سفال‌ها استفاده می‌شود. طبقه‌بندی نمونه‌ها به کمک شبکه عصبی مصنوعی و بر اساس توابع RTC انجام شده است که در آن نمونه‌ها با دقت حدود ۹۵ درصد و در سه طبقه کاسه، کوزه و خمره قرار می‌گیرند. شبکه عصبی طراحی شده یک شبکه سه‌لایه با یک لایه پنهان است که شامل دو نورون می‌شود. خروجی شبکه کدهای رقومی صفر، یک و دو هستند که به ترتیب به لبه‌های کاسه، کوزه و خمره اشاره می‌کنند. در ادامه، با تصحیح نمونه‌های خطا دار و از مجموع ۲۰۹ طرح سفال، ۱۲۸ نمونه در طبقه کاسه‌ها (۶۱٫۲ درصد نمونه‌ها)، ۴۲ نمونه در طبقه کوزه‌ها (۲۰٫۱ درصد نمونه‌ها) و ۳۹ نمونه در طبقه خمره‌ها (۱۸٫۷ درصد نمونه‌ها) قرار می‌گیرند. پس از انجام طبقه‌بندی، گونه‌شناسی نمونه‌های موجود در هر طبقه نیز به کمک الگوریتم خوشه‌بندی اتصال همسایگی صورت گرفته که در آن فرم لبه‌های موجود در طبقات کاسه‌ها، کوزه‌ها و خمره‌ها به ترتیب در ۸۳، ۲۲ و ۲۷ تپ از یکدیگر متمایز می‌شوند. دقت روش گونه‌شناسی سفال‌ها نیز بین ۹۵ درصد تا ۹۷ درصد ارزیابی می‌شود.

واژگان کلیدی: سفال، عصر آهن II، توابع RTC، طبقه‌بندی، شبکه عصبی مصنوعی، گونه‌شناسی

* نویسنده مسئول مکاتبات: تهران، خیابان انقلاب، دانشگاه تهران، دانشکده ادبیات و علوم انسانی

پست الکترونیکی: ali.aarab@ut.ac.ir

** این پژوهش برگرفته از طرح جایگزین خدمت سربازی آقای علی اعراب با عنوان «طبقه‌بندی و گونه‌شناسی سفال‌های عصر آهن II قره‌تپه سگزآباد قزوین» به راهنمایی دکتر مصطفی ده‌پهلوان، در مؤسسه باستان‌شناسی دانشگاه تهران و زیر نظر مرکز نخبگان و استعدادهای برتر نیروهای مسلح انجام شده است.

۱. مقدمه

تجزیه و تحلیل یافته‌های سفالی با توجه به فراوانی آن در محوطه‌های باستانی، یکی از موارد ضروری در شناخت هرچه بهتر جوامع و مردمان گذشته در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس، طبقه‌بندی (Classification) سفال‌ها را می‌توان یکی از نخستین ضرورت‌ها برای بررسی تاریخ گذشته به‌شمار آورد. به بیان دیگر، سفال اطلاعات ارزشمندی در خصوص فرهنگ، اقتصاد و ارتباطات جوامع ارائه می‌دهد [1]، [2]؛ افزون بر این، طبقه‌بندی سفال‌ها نقش مهمی در گاه‌نگاری یک منطقه ایفا می‌کند [11]. «گوردون چایلد» [11] معتقد است:

«باستان‌شناسی مانند گیاه‌شناسی یا زمین‌شناسی به‌عنوان یک علم با طبقه‌بندی آغاز می‌شود. یک باستان‌شناس فقط پس از طبقه‌بندی یافته‌هایش می‌تواند شروع به تفسیر آن‌ها نماید یا تاریخ آن‌ها را استخراج کند.»

بر اساس این اصل، طبقه‌بندی در باستان‌شناسی، همواره مسیر پیشرفت را طی نموده است. در پژوهش حاضر نیز به امکان‌سنجی استفاده از روش‌های نوین در طبقه‌بندی و گونه‌شناسی سفال‌های عصر آهن II به‌دست‌آمده از محوطه قره‌تپه سگزآباد پرداخته می‌شود. در این تحقیق، طبقه‌بندی سفال‌ها با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی (ANN: Artificial Neural Network) و بر اساس توابع RTC انجام شده است که مطابق آن انواع سفال‌ها در سه گروه کلی کاسه، کوزه و خمره طبقه‌بندی می‌شوند. اصطلاح RTC مخفف سه واژه شعاع (Radius)، تانژانت (Tangent) و انحنا (Curvature) است که برای هر نقطه واقع بر منحنی لبه خارجی سفال به‌صورت جداگانه محاسبه می‌شوند. استفاده از توابع RTC یکی از روش‌های پذیرفته‌شده در گونه‌شناسی سفال‌های باستانی نیز به‌شمار می‌رود [7] که از آن‌ها برای تفکیک فرم لبه‌های موجود در هر طبقه استفاده می‌شود. در ادامه، و در بخش دوم به معرفی روش RTC به‌عنوان یک روش جدید در گونه‌شناسی سفال‌ها پرداخته و مروری بر تحقیقات علمی که تاکنون از این روش در مطالعات خود استفاده کرده‌اند، صورت می‌گیرد. بخش سوم این نوشته نیز به پیاده‌سازی و تشریح روش‌های مورد استفاده در طبقه‌بندی و گونه‌شناسی

سفال‌های عصر آهن II اختصاص یافته است. در نهایت، در بخش‌های ۴، ۵ و ۶ نیز به بررسی و تفسیر نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق پرداخته می‌شود.

۲. معرفی روش RTC و پیشینه تحقیق

همانگونه که پیش‌تر اشاره شد، استفاده از توابع RTC یکی از روش‌های رایج در گونه‌شناسی سفال‌ها است که در این بخش شرح مختصری در رابطه با این روش ارائه شده و مروری نیز بر تحقیقات گذشته که از این روش در گونه‌شناسی استفاده شده است، انجام می‌شود. در پژوهش حاضر سفال‌های عصر آهن II قره‌تپه سگزآباد به‌عنوان نمونه‌های مطالعاتی انتخاب شده‌اند. قره‌تپه سگزآباد در دشت قزوین واقع شده است. شواهدی از یک گورستان در شرق قره‌تپه مربوط به عصر آهن II و III در پروژه تعیین عرصه و حریم این محوطه در اردیبهشت سال ۱۳۹۵ و سپس در کاوش آموزشی تیرماه ۱۳۹۵ و عملیات آرکتئوفیزیک در زیرلایه‌های رسوبی و زمین‌های کشاورزی به‌دست آمد [12]. در ادامه، به مطالعه سفال‌های این گورستان پرداخته خواهد شد. در اینجا، سفال طراحی شده به‌صورت یک منحنی مسطح با سه تابع ریاضی مشخص می‌گردد. نخست تابع شعاع بوده که منظور از آن فاصله عمودی هر نقطه از لبه خارجی سفال تا محور مرکزی (محور دوران) آن است. این محور، در طراحی فنی سفال کاملاً مشخص شده که با عنوان خط قرینه سفال نیز شناخته می‌شود. اما، عامل دوم تانژانت بوده که منظور از آن تانژانت زاویه بین خط مماس بر هر نقطه از لبه خارجی سفال و راستای خط قرینه آن است. سومین عامل نیز انحناست که بیانگر میزان تغییر زاویه خط مماس به‌ازای یک جابه‌جایی کوچک روی منحنی لبه خارجی است. در نظر گرفتن هر سه عامل در کنار یکدیگر برای گونه‌شناسی سفال‌های یک طبقه باعث خواهد شد تا برای هر سفال مشخصات یکتایی در قالب این سه تابع وجود داشته باشد که در ادامه، توضیحاتی در این رابطه ارائه می‌شود. در بین سه عامل معرفی‌شده در روش RTC، استفاده از تابع انحنا در گونه‌شناسی سفال‌ها بیش از سایر عوامل مورد استفاده بوده و نتایج حاصل از گونه‌شناسی سفال‌ها به‌وسیله انحنا را

می‌توان حداقل از حدود سال ۱۹۹۰ میلادی جست‌وجو کرد [5]. از روش RTC در گونه‌شناسی سفال‌های عصر آهن لوانت استفاده شده است که نتایج آن با ۹۴/۸ درصد قابل قبول بودند و می‌توان آن را یک پروژه موفق در گونه‌شناسی و تفکیک سفال‌های عصر آهن لوانت معرفی نمود [6]. اما، روش RTC همواره با این میزان از موفقیت در گونه‌شناسی سفال‌های باستانی همراه نبوده است. برای مثال، می‌توان به گونه‌شناسی سفال‌های مربوط به دوران تاریخی در جنوب فرانسه اشاره داشت که نتایج حاصل از روش RTC در گونه‌شناسی سفال‌های آن منطقه، با حدود ۲۰ درصد خطا مواجه شده است [3]. با توجه به ارتباطات تجاری بین منطقه لوانت با محدوده مورد بررسی [13] در پژوهش حاضر و همچنین نزدیکی دوره‌های مورد بررسی (عصر آهن در ایران و لوانت)، از روش RTC که پیش از آن در عصر آهن لوانت موفق بوده، استفاده گردید. در این پژوهش از توابع RTC افزون بر گونه‌شناسی در طبقه‌بندی سفال‌ها نیز استفاده می‌شود که در ادامه به بررسی آن می‌پردازیم. البته باید یادآور شد که به‌جز روش RTC از روش‌های ریاضی و کامپیوتری دیگری نیز به‌منظور طبقه‌بندی و گونه‌شناسی سفال‌های باستانی استفاده شده است. در بین این روش‌ها، سه روش به‌صورت عمومی پذیرفته شده‌اند که عبارت‌اند از: روش ICP یا نزدیک‌ترین نقطه تکراری، روش DCT یا تبدیل کسینوسی گسسته و روش EFA یا آنالیز فوریه بیضوی. روش ICP بیشتر در مطالعات گرافیکی و مدل‌های سه‌بعدی مورد استفاده است [14] که بعدها در طبقه‌بندی و گونه‌شناسی سفال‌های باستانی نیز مورد استفاده قرار گرفت [7]. اساس روش DCT بدین صورت است که در ابتدا مختصات دکارتی اصلی طرح سفال به یک مجموعه هم‌ساز بدل شده، سپس از این مجموعه به‌منظور تقریب بازسازی کلی طرح سفال استفاده می‌شود. از این روش در گونه‌شناسی سفال‌های عصر آهن II در محدوده مرکز فرانسه استفاده شده است [۱۵]. در روش EFA نیز خطوط طرح سفال به یک سری نامتناهی از توابع مثلثاتی تبدیل می‌شود. از این روش همراه با روش DCT به‌منظور گونه‌شناسی تبرهای مفرغی عصر مفرغ اروپا استفاده شده است [16].

۳. یافته‌ها، داده‌ها و روش تحقیق

در این بخش، ابتدا توضیحاتی در ارتباط با یافته‌های پژوهش و مراحل آماده‌سازی داده‌های مربوط به آن‌ها ارائه شده و سپس به بررسی و تشریح روش‌های طبقه‌بندی و گونه‌شناسی سفال‌ها پرداخته می‌شود.

۳-۱. نمونه سفال‌های مورد بررسی

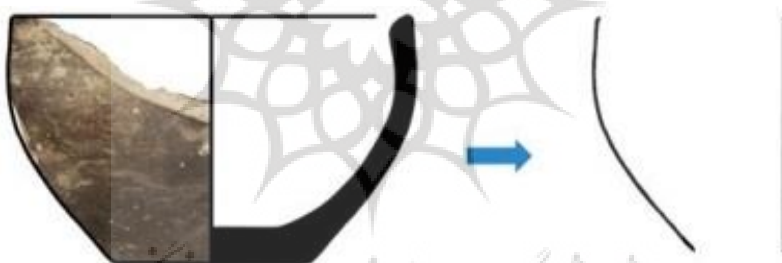
سفال‌های بررسی شده در این پژوهش از بین لبه‌های سفالی مربوط به عصر آهن II حاصل از کاوش‌های سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵ قره‌تپه سگزآباد استخراج شده‌اند [17]، [18]، [19]. به‌منظور شناسایی سفال‌های عصر آهن II، مقایسه‌ای بین فرم سفال‌های قره‌تپه با مناطق هم‌جوار صورت گرفت که در نهایت به شناسایی سفال‌های این دوره منجر گردید [20]، [21]، [22]، [23]. بر این اساس، تعداد ۲۰۹ طرح سفال برای طبقه‌بندی اولیه در شبکه عصبی و سپس گونه‌شناسی لبه‌ها به کمک توابع RTC انتخاب شدند. با توجه به آنکه روش‌های رقومی (Digital) در طبقه‌بندی و گونه‌شناسی سفال‌های ایران تاکنون کمتر مورد استفاده بوده‌اند، سعی شد تا از ابتدا آماده‌سازی نمونه‌ها به گونه‌ای انجام شود که بتوان از آن در پروژه‌ها و تحقیقات باستان‌شناسی آینده نیز به‌راحتی استفاده کرد. بنابراین، از روشی ساده برای این منظور استفاده شده است، بدین صورت که لبه خارجی سفال طراحی شده، خط تقارن نمونه سفالی و قطر دهانه ظرف به‌عنوان داده‌های ورودی به نرم‌افزار MATLAB (MATrix LABoratory) معرفی می‌شوند. از آنجاکه طراحی فنی سفال در تمامی کاوش‌ها و بررسی‌های باستان‌شناسی ایران، امری ضروری بوده، می‌توان این روش طبقه‌بندی و گونه‌شناسی را راهی ساده و کاربردی برای آغاز طبقه‌بندی‌ها و گونه‌شناسی‌های رقومی سفال‌های باستانی ایران تلقی کرد. استخراج لبه خارجی و محور دوران هر نمونه نیز به کمک نرم‌افزار Photoshop7 انجام شده است و تصاویر به‌دست‌آمده برای استفاده در محیط نرم‌افزار MATLAB در فرمت tiff ذخیره‌سازی می‌شوند. شکل (۱) تصویر یک نمونه سفالی و لبه خارجی و محور دوران جداشده از آن را نشان می‌دهد.

نمایش داده شد. تصاویر نمونه‌ها، تصاویر ۳ یا ۴ باندهای بوده که برخی از آن‌ها دارای باندهای با پس‌زمینه سفید (Background) و برخی دیگر نیز دارای پس‌زمینه‌های سیاه هستند. در اینجا، ابتدا به کمک باند اول هر تصویر باندهای با پس‌زمینه سیاه و سفید از یکدیگر تفکیک شده و لبه‌های موجود در تصاویر (لبه خارجی نمونه و محور دوران) با توجه به رنگ پس‌زمینه‌ها استخراج می‌شوند. در باند اول هر تصویر، چنانچه تعداد پیکسل‌های با درجات خاکستری (Gray Values) صفر بیشتر از نصف کل پیکسل‌های آن باند باشد، در آن صورت تصویر دارای پس‌زمینه سیاه و در غیر این صورت دارای پس‌زمینه سفید است. افزون بر این، از میانگین درجات خاکستری باند اول هر تصویر نیز می‌توان برای تشخیص رنگ پس‌زمینه آن استفاده کرد، به این صورت که اگر عدد میانگین به صفر نزدیک‌تر باشد، تصویر دارای پس‌زمینه سیاه و اگر به ۲۵۵ نزدیک‌تر باشد، دارای پس‌زمینه سفید است. شکل زیر دو نمونه از تصاویر با پس‌زمینه‌های متفاوت را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که به دلیل حساسیت محاسبات به نویزهای تصویری، لبه خارجی و محور دوران استخراج شده باید فاقد هرگونه نویز و اطلاعات اضافی باشند که برای این کار می‌توان از ابزارهای مختلف نرم‌افزار Photoshop برای بهبود کیفیت تصویر خروجی استفاده نمود. افزون بر این، لبه‌های ترسیم شده در هر طرح سفال نیز باید از کیفیت و وضوح مطلوبی برخوردار باشند تا بتوان توابع RTC را با دقت مطلوبی محاسبه کرد.

۳-۲. محاسبه توابع RTC

همانگونه که پیش‌تر بیان شد، در این پژوهش، طبقه‌بندی و گونه‌شناسی سفال‌ها بر اساس توابع RTC انجام می‌شوند. بنابراین، کیفیت نتایج به‌دست‌آمده کاملاً به دقت محاسبه مقادیر توابع بستگی دارد. داده‌های مورد استفاده در این بخش شامل لبه‌های خارجی نمونه‌های سفالی، محور دوران نمونه‌ها و قطر دهانه ظروف هستند که تصویر یک نمونه به همراه لبه‌های استخراج‌شده از آن در شکل (۱)



شکل ۱: سمت چپ: یک طرح سفال به‌دست‌آمده از کاوش‌های باستان‌شناسی؛ سمت راست: استخراج لبه خارجی و محور دوران نمونه با Photoshop 7 استفاده از نرم‌افزار

Fig 1: Left: A pottery obtained from archaeological excavations; Right: extraction of outer profile and the rotational axis of the sample using Photoshop 7 software.



شکل ۲: سمت چپ: باند اول یک تصویر با پس‌زمینه سفید و لبه‌های سیاه‌رنگ. سمت راست: باند اول یک تصویر با پس‌زمینه سیاه و لبه‌های سفیدرنگ.

Fig 2: Left: The 1st band of an image with white background and black edges. Right: The 1st band of an image with a black background and white edges.

هر پیکسل لبه در باند تصویری انتخاب شده دارای یک سطر و ستون (i, j) مشخصی است که موقعیت آن نسبت به گوشه بالا و سمت چپ تصویر اندازه‌گیری می‌شود، درحالی که در سیستم مختصات ریاضی نقطه مبدأ در گوشه پایین و سمت چپ قرار دارد. به این ترتیب، مختصات پیکسل‌های لبه در فضای سیستم مختصات ریاضی به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$x_e = j \quad (1)$$

$$y_e = m - i \quad (2)$$

که در این روابط، j بیانگر شماره ستون، i نشان‌دهنده شماره سطر و m تعداد کل سطرها موجود در یک تصویر را نشان می‌دهد. شکل (۳) چند نمونه از لبه‌های تصویری استخراج شده از نمونه‌های مختلف را که به سیستم مختصات ریاضی انتقال یافته‌اند، نشان می‌دهد.

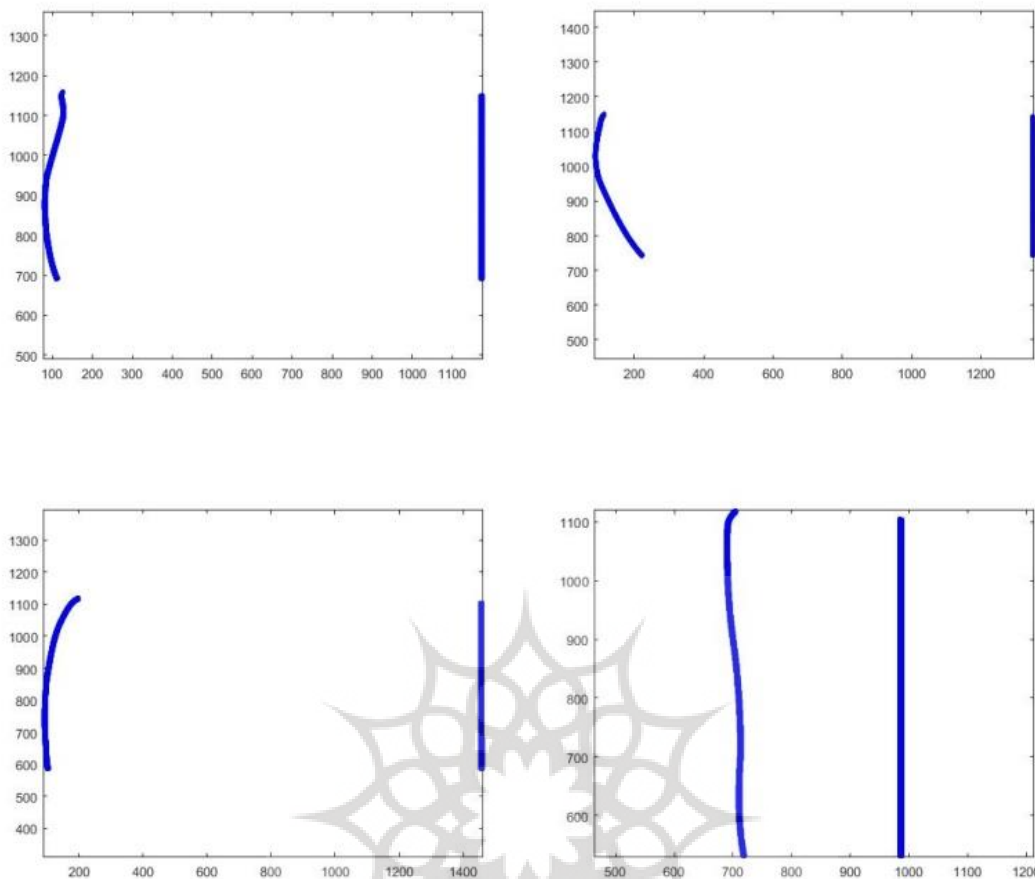
همانگونه که در پیشینه تحقیق ذکر شد، استفاده از مجموعه توابع RTC به‌عنوان یکی از روش‌های استاندارد در گونه‌شناسی نمونه‌ها پذیرفته شده است. در حقیقت، با استفاده از مجموعه توابع فوق، توصیف یکتا و منحصر به فردی از ویژگی‌های هندسی منحنی لبه خارجی سفال به دست می‌آید. طبق تعریف، تابع شعاع فاصله هر نقطه (پیکسل) از لبه خارجی سفال تا نقطه متناظر آن بر روی محور دوران را نشان می‌دهد. تابع تانژانت بیانگر شیب خط مماس بر هر نقطه واقع بر لبه خارجی نسبت به محور دوران است. تابع انحنا نیز معرف نرخ تغییر زاویه لبه خارجی نسبت به طول منحنی است [7].

همانگونه که در شکل (۳) ملاحظه شد، تصاویر به دست آمده از نمونه‌ها شامل لبه خارجی سفال و محور دوران نمونه هستند که برای محاسبه توابع RTC لازم است که لبه خارجی و محور دوران نمونه از یکدیگر تفکیک شوند. در ادامه، از میانگین مختصات x_e لبه‌های تصویر برای جدا کردن لبه خارجی و محور دوران نمونه استفاده می‌شود.

$$\bar{x} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L x_e^i \quad (3)$$

در ادامه، برای تشخیص لبه‌های تصویر لازم است که باند بهینه در هر تصویر انتخاب شود. در اینجا منظور از باند بهینه، باندی است که بیشترین اطلاعات از لبه‌های تصویر را شامل می‌شود. معیار مورد نظر برای انتخاب باند بهینه از مجموع درجات خاکستری باندهای تصویری حاصل می‌شود. به این صورت که ابتدا مجموع درجات خاکستری برای هر باند تصویر به صورت جداگانه محاسبه شده و سپس بسته به رنگ پس‌زمینه، باند مناسب به کمک مجموع درجات محاسبه شده تعیین می‌شود. باند بهینه در تصاویر با پس‌زمینه سیاه دارای بیشترین مجموع درجات خاکستری (به دلیل داشتن لبه‌های سفید رنگ با درجات خاکستری بالا) و در تصاویر با پس‌زمینه سفید دارای کمترین مجموع (به دلیل داشتن لبه‌های سیاه رنگ با درجات خاکستری پایین) است.

با انتخاب باند بهینه برای هر یک از نمونه‌ها، فیلتر میانه روی باند مورد نظر اعمال شده است تا اثرات نویز احتمالی در تصاویر کاهش یابند. در ادامه، مختصات پیکسل‌های واقع بر لبه‌های تصویر به کمک روش ساده زیر استخراج می‌شوند: در اینجا، از درجه خاکستری ۱۲۸ برای تشخیص پیکسل‌های لبه استفاده می‌شود. به این صورت که در تصاویر با پس‌زمینه سفید پیکسل‌های با درجات خاکستری کوچک‌تر از ۱۲۸ به‌عنوان پیکسل‌های لبه و در تصاویر با پس‌زمینه سیاه، پیکسل‌های با درجات خاکستری بزرگ‌تر از ۱۲۸ به‌عنوان پیکسل‌های لبه در نظر گرفته می‌شوند. لازم به ذکر است که در این تحقیق به دلیل ماهیت نازک و کوچک برخی از لبه‌های خارجی سفال‌ها، استفاده از الگوریتم‌های تشخیص لبه مانند Canny, Sobel و ... [24] در برخی از نمونه‌ها با مشکلات خاصی همراه هستند و لبه‌های استخراج شده، تغییرات شعاع و انحنا لبه خارجی نمونه را به خوبی نشان نمی‌دهند. از آنجاکه اهداف اصلی این بخش طبقه‌بندی و گونه‌شناسی نمونه‌ها بر اساس توابع RTC است، وجود چنین مشکلاتی در الگوریتم‌های تشخیص لبه می‌تواند خطاهای بزرگی را در محاسبات توابع RTC و در نتیجه طبقه‌بندی و گونه‌شناسی نمونه‌ها ایجاد کنند. برای رفع این مشکل، از روش یاد شده برای تشخیص پیکسل‌های لبه استفاده می‌شود.



شکل ۳: چند نمونه از لبه‌های تصویری انتقال یافته به فضای سیستم مختصات ریاضی.

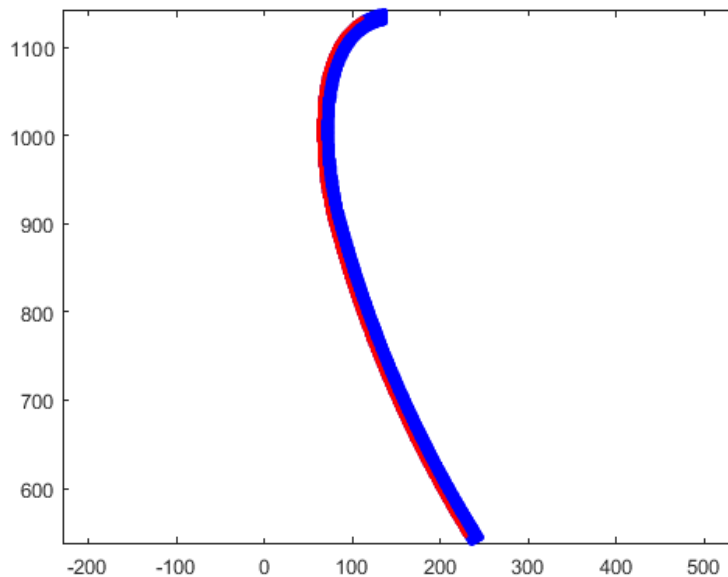
Fig 3: Examples of image edges transferred to the mathematical coordinate system.

حذف مختصات‌های خطادار یا نویزهای تصویری، از پیکسل‌هایی که مختصات x_e آن‌ها در خارج از بازه $|x_e - \bar{x}_e| > \sigma_{x_e}$ قرار می‌گیرند، صرف‌نظر کرده و مختصات نقطه مرجع از میانگین مولفه‌های x_e و y_e پیکسل‌های انتخاب شده به دست می‌آید. مطابق با شکل (۳)، لبه خارجی سفال یک منحنی دارای ضخامت است که برای محاسبه توابع شعاع، تانژانت و انحنای لازم است که ضخامت منحنی لبه به یک پیکسل کاهش یابد. در این حالت از مختصات اولین پیکسل سمت چپ لبه خارجی برای نازک‌سازی منحنی استفاده می‌شود. شکل زیر نمونه‌ای از منحنی نازک شده را همراه لبه خارجی آن در سیستم مختصات ریاضی نشان می‌دهد.

که در این رابطه، L تعداد پیکسل‌های لبه‌های تصویری را نشان می‌دهد. به این ترتیب، پیکسل‌هایی که مختصات x آن‌ها کوچک‌تر از \bar{x} باشد به عنوان پیکسل لبه خارجی و پیکسل‌هایی که مؤلفه x آن‌ها بزرگ‌تر از \bar{x} باشد، به عنوان پیکسل محور دوران نمونه در نظر گرفته می‌شوند.

برای محاسبه تابع شعاع، ابتدا یک نقطه ثابت (نقطه مرجع) روی محور دوران در نظر گرفته شده، سپس اختلاف فاصله افقی پیکسل‌های لبه خارجی تا نقطه مرجع به عنوان شعاع محاسبه می‌شود. مختصات نقطه مرجع به صورت زیر به دست می‌آید:

ابتدا میانگین (\bar{x}_e) و انحراف معیار (σ_{x_e}) مختصات‌های x_e پیکسل‌های محور دوران محاسبه می‌شوند. برای



شکل ۴: نمایش لبه خارجی یک نمونه سفال (لبه آبی‌رنگ) به همراه منحنی لبه نازک‌شده آن (منحنی قرمز رنگ) در سیستم مختصات ریاضی.

Fig 4: The outer profile of pottery (blue edge) and its extenuated edge (red curve) in the mathematical coordinate system.

نازک‌شده بستگی دارد و معمولاً تعداد نقاط به صورت مضرب پنجاه انتخاب می‌شوند [7]. در نهایت، مقادیر شعاع، تانژانت و انحنا در نقاط درونیابی از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$R_i = |y_r - y_{s_i}| \lambda, \quad i = 1, 2, \dots, 100 \quad (1-4)$$

$$\lambda = \frac{D}{2n_p} = \frac{D}{2|y_r - y_{s_1}|} \quad (2-4)$$

که در این رابطه، R_i مقدار شعاع نقاط درونیابی برحسب سانتی‌متر، y_r مختصات y نقطه مرجع، y_{s_i} مؤلفه y نقطه درونیابی i -ام، D قطر دهانه ظرف برحسب سانتی‌متر و n_p تعداد پیکسل‌های موجود در ابعاد شعاع دهانه ظرف است. پارامتر y_{s_1} در معادله (۲-۴) نیز به مؤلفه y اولین نقطه درونیابی (پیکسل دهانه ظرف) اشاره می‌کند. تانژانت زاویه برای هر نقطه درونیابی که در حد فاصل دو نقطه متوالی از لبه خارجی قرار می‌گیرد، عبارت است از:

$$\tan(\alpha_i) = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}, \quad i = 1, 2, \dots, 100 \quad (5)$$

از بررسی شکل فوق، این نکته آشکار می‌گردد که مجموعه نقاط به دست آمده از لبه خارجی نازک‌شده معمولاً تشکیل یک تابع ریاضی نمی‌دهند. این مسئله را می‌توان با ترسیم خطوط موازی با محور y ها بررسی کرد به این صورت که برخی از خطوط موازی ترسیم شده منحنی لبه خارجی را در بیش از یک نقطه قطع می‌کنند [4]. برای رفع این مشکل، مجموعه نقاط واقع بر لبه خارجی نازک‌شده به همراه نقطه مرجع محور دوران به اندازه ۹۰ درجه حول مبدأ سیستم مختصات دوران داده شده و سپس مختصات‌های به دست آمده نسبت به محور y ها قرینه می‌شوند. با این کار، مجموعه نقاط واقع روی منحنی لبه خارجی تشکیل یک تابع می‌دهند که به منظور کاهش و یا تعدیل اثرات نویز می‌توان آن‌ها را به کمک الگوریتم‌های هموارسازی مانند Savitzky-Golay مرتبه ۲ [25] تا حدودی هموار کرد.

تابع هموارشده در صد نقطه که به فاصله مساوی (h) از یکدیگر قرار دارند، به صورت خطی درونیابی شده‌اند و مقادیر شعاع، تانژانت و انحنا در نقاط درونیابی محاسبه می‌شوند. لازم به ذکر است که تعداد نقاط درونیابی به تعداد پیکسل‌های واقع بر لبه خارجی

تصویری بوده که این امر در برخی از موارد باعث ایجاد خطاهای بزرگی در نمونه‌برداری از لبه‌های خارجی می‌شود. طبیعتاً اثرات این خطاها در توابع RTC نیز ظاهر می‌شوند. برای رفع این مشکل از روش آماری زیر برای حذف پیکسل‌های خطادار استفاده می‌شود:

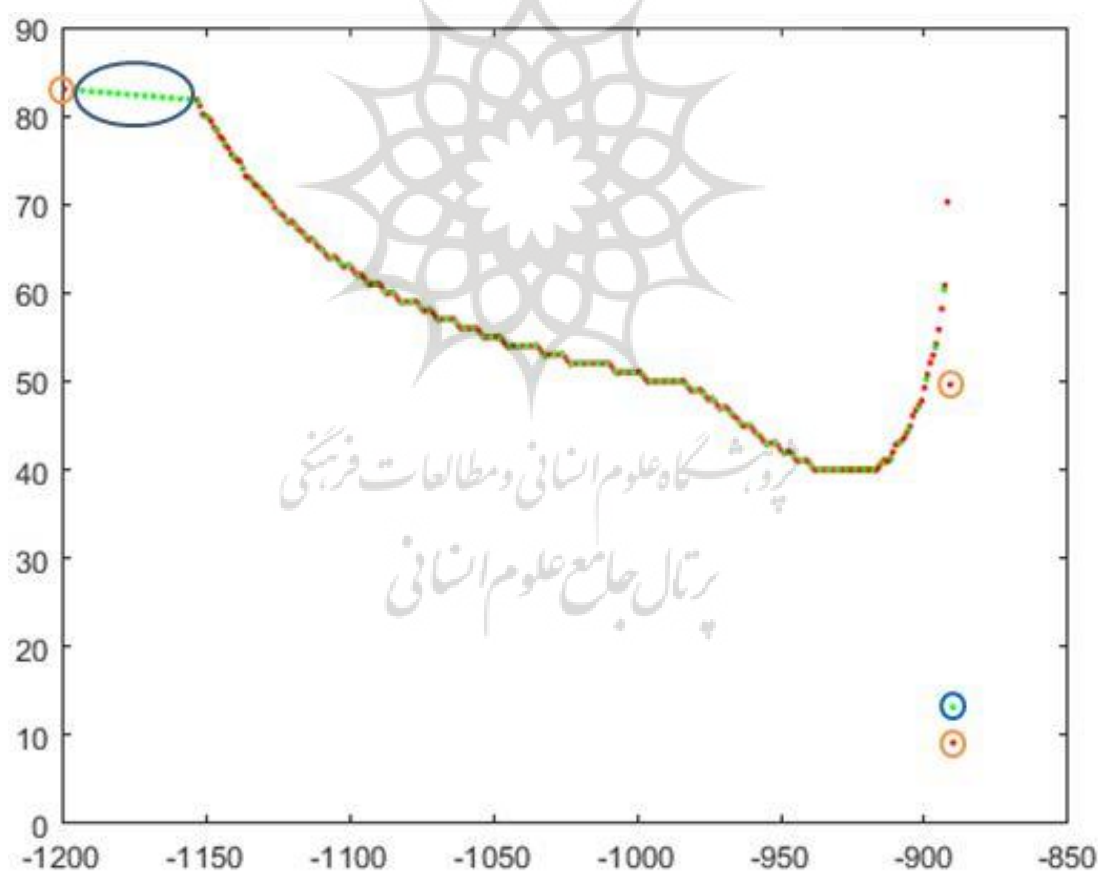
ابتدا میانگین (\bar{x}_e) و انحراف معیار (σ_{x_e}) مختصات x_e نقاط واقع بر لبه خارجی نمونه را محاسبه کرده و نقاطی که در بازه $|x_e - \bar{x}_e| \leq C\sigma_{x_e}$ قرار می‌گیرند، به‌عنوان نقاط واقع بر لبه خارجی نمونه انتخاب می‌شوند. در این نامساوی، ضریب C به‌صورت تجربی انتخاب شده که مقدار آن برابر $1/63$ است.

شکل (۶) نیز نمودارهای شعاع، تانژانت و انحنا را برای لبه خارجی نازک‌شده در شکل (۴) نشان می‌دهد.

که در این رابطه نقاط (x_j, y_j) و (x_{j+1}, y_{j+1}) به‌ترتیب نقاطی از لبه خارجی هستند که پیش و پس از نقطه درونیابی (x_{S_i}, y_{S_i}) قرار می‌گیرند. با محاسبه تانژانت، تابع انحنا نیز به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود [4]:

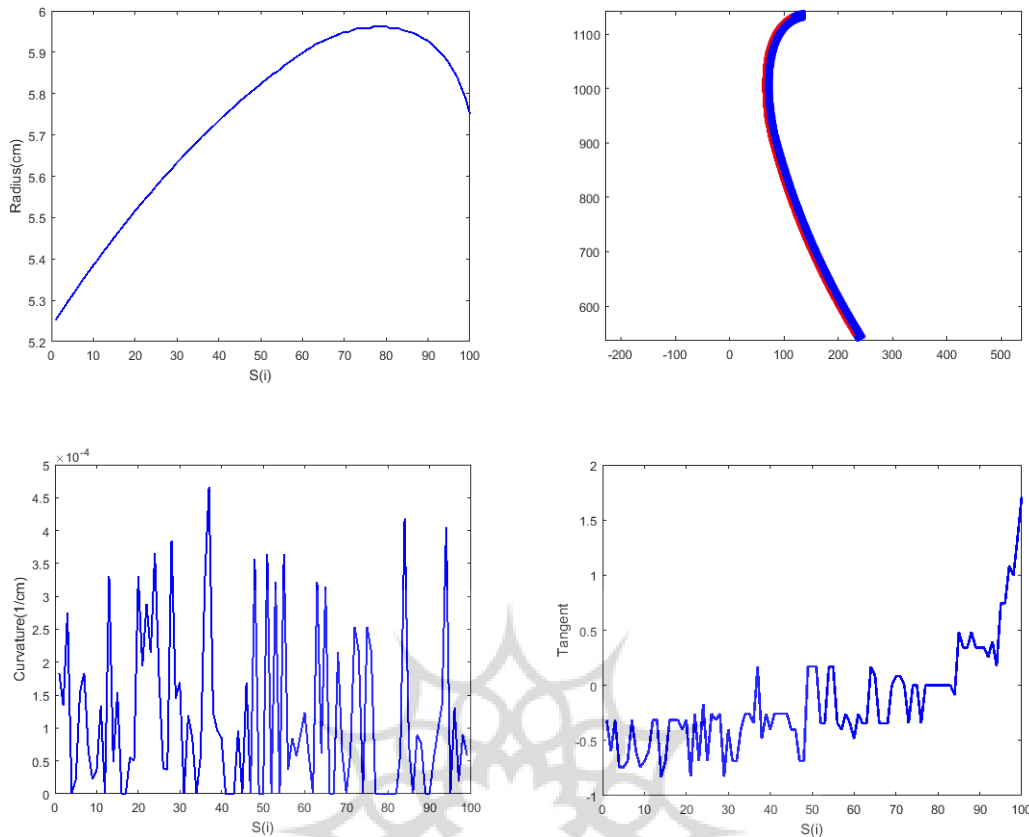
$$C_i = \frac{\frac{|\tan(\alpha_{i+1}) - \tan(\alpha_i)|}{h\lambda}}{(1 + \tan^2(\alpha_i))^{\frac{3}{2}}}, \quad i = 1, 2, \dots, 99 \quad (6)$$

که در رابطه فوق h فاصله بین نقاط درونیابی است. پارامتر λ نیز به کمک رابطه (۴-۳) تعریف می‌شود. در برخی از نمونه‌ها، هنگام استخراج لبه‌های تصویری تعدادی پیکسل خارج از لبه در باندهای بهینه ظاهر می‌شوند (شکل ۵). وجود این پیکسل‌ها به دلیل سادگی شرایط تعریف شده در استخراج لبه‌های



شکل ۵: وجود پیکسل‌های خطادار (نقاط قرارگرفته در دایره‌های نارنجی‌رنگ) در منحنی لبه خارجی ظرف. نقاط سبزرنگ، نقاط نمونه‌برداری بوده که با فواصل ثابت و به‌صورت خطی درونیابی شده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، این پیکسل‌ها خطاهای بزرگی را در نقاط نمونه‌برداری (نقاط مشخص شده در دایره‌های آبی‌رنگ) ایجاد می‌کنند. این نقاط در سیستم مختصات ریاضی نمایش داده شده‌اند.

Fig 5: The erroneous pixels (the red dots in orange circles) of an outer profile. The green dots are sample dots that interpolated linearly. As we see, these pixels make big errors in sampling points (The dots in blue circles). These points are depicted in the mathematical coordinate system.



شکل ۶: نمودارهای شعاع (بالا سمت چپ)، تانژانت (پایین سمت راست) و انحنا (پایین سمت چپ)، برای لبه خارجی نشان داده شده (بالا سمت راست). در این نمودارها $S(i)$ نشان‌دهنده شماره نقطه نمونه برداری شده از لبه خارجی است.
Fig 6: The radius (upright), tangent (down left), and curvature (down right) diagrams of the outer profile (up left). $S(i)$ refers to the sampling number of the outer profile points.

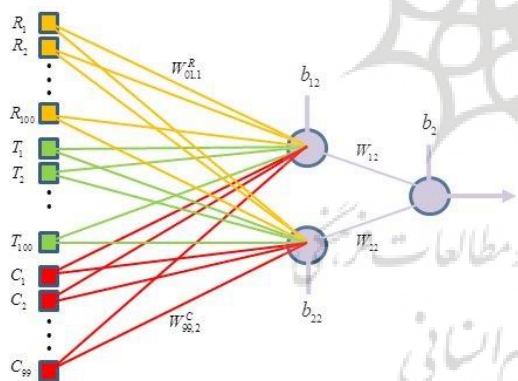
روش اول که اولین بار توسط «شپرد» مطرح و پس از وی توسط «اریکسون» و «استیکل» به کار گرفته شد، حجم هندسی سفال‌ها را مینا قرار می‌دهد [26]. در این روش، شکل هر ظرف سفالی به صورت ترکیبی از یک یا چند حجم هندسی فرض شده است و طبقه‌بندی نمونه‌ها بر این اساس انجام می‌شود. «وبستر» و «اسمیت» در سال‌های ۱۹۶۴ و ۱۹۷۱ روشی را بر مبنای نسبت قطر دهانه ظرف به ارتفاع (عمق) آن معرفی کردند [27]، [28]. «آذرنوش» در سال ۱۹۹۴ بدون توجه به حجم هندسی و یا نسبت قطر دهانه به ارتفاع، روشی را بر مبنای ویژگی‌های هندسی لبه ظروف، کف، شیب بدنه و ... ارائه کرد که مطابق آن ظرفی که دارای ویژگی‌های مشترکی هستند، در یک

توابع RTC به دست آمده برای نمونه‌های مختلف، مبنای انجام محاسبات و پردازش‌های طبقه‌بندی و گونه‌شناسی را تشکیل می‌دهند که در ادامه، به بررسی آن‌ها می‌پردازیم.

۳-۳. طبقه‌بندی سفال‌ها با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

یکی از مناقشات اصلی در تحقیقات باستان‌شناسی، انتخاب روش طبقه‌بندی سفال است. طبقه‌بندی از این جهت حائز اهمیت است که مینا و زیربنای اصلی گونه‌شناسی سفال‌ها نیز به شمار می‌رود. پیش از این، از روش‌های متفاوتی برای طبقه‌بندی سفال‌ها استفاده شده است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

متصل می‌شوند. خروجی شبکه یک کد تک‌رقمی صفر، یک و دو است که به ترتیب به کلاس‌های کاسه، کوزه و خمره (مشابه طبقه‌بندی «راستگویان») مربوط می‌شوند. مهم‌ترین مسئله در استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، آموزش شبکه است که در اینجا آموزش شبکه با بیست نمونه که به‌طور عمده ظروف کامل حاصل از کاوش‌های سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ هستند، انجام می‌شود. هریک از این نمونه‌ها به یکی از گروه‌های سه‌گانه فوق تعلق داشته و دارای کد مخصوصی هستند. لازم به ذکر است که در آموزش شبکه، سعی شد از نمونه‌هایی استفاده شود که از کارکرد آن‌ها اطمینان داریم. بر این اساس، از نه نمونه کاسه، چهار نمونه کوزه و هفت نمونه خمره برای آموزش شبکه استفاده شد. تعداد نورون‌های موجود در لایه پنهان شبکه نیز به‌صورت سعی و خطا تعیین شده است که در اینجا از دو نورون برای طراحی شبکه استفاده می‌شود. شکل (۷)، معماری شبکه عصبی مورد استفاده در طبقه‌بندی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۷: معماری شبکه عصبی طراحی شده برای طبقه‌بندی نمونه‌ها. لایه ورودی شامل توابع RTC بوده که برای هر نمونه ۲۹۹ مقدار را شامل می‌شود. فعال‌سازی نورون‌های لایه پنهان و لایه خروجی شبکه نیز به کمک تابع ReLU^+ انجام می‌شود. خروجی شبکه نیز معمولاً یک عدد اعشاری بوده که مقدار آن به نزدیک‌ترین عدد از مجموعه اعداد $\{0,1,2\}$ نسبت داده می‌شود.
Fig 7: The architecture of the designed neural network for the classification of potteries. The input layer includes RTC functions which have 299 numbers. The activation of neurons in the hidden layer and output layer is done by ReLU function. The output of the network is a float number that is assigned to the nearest number of the set $\{0,1,2\}$.

طبقه قرار می‌گیرند [29]. «لباف خانیکی» [30] در سال ۱۳۸۷ روشی را بر اساس پارامترهای زاویه α (زاویه مرکز قوس نسبت به افق) و قطر دهانه ظرف در طبقه‌بندی سفال‌ها معرفی کرد. این شیوه طبقه‌بندی نیز در سال ۱۳۹۸ توسط «راستگویان» و در خصوص سفال‌های عصر آهن III به‌دست‌آمده از محوطه قره‌تپه سگزآباد انجام شد که در آن سفال‌ها از نظر کارکرد دارای بیشترین فراوانی در سه گروه کاسه، کوزه و خمره بوده‌اند. بر اساس این پژوهش، لبه‌های با زاویه بین ۲۰ تا ۷۵ درجه در گروه خمره، لبه‌های با زاویه ۱۷۵ تا ۷۵ درجه در گروه کاسه و لبه‌های با زاویه نزدیک به زاویه قائم نیز در گروه کوزه قرار می‌گیرند [31].

در این پژوهش، از شبکه عصبی مصنوعی به‌عنوان یک روش پیشرفته یادگیری ماشین برای طبقه‌بندی نمونه‌ها استفاده می‌شود. شبکه‌های عصبی اساساً سیستم‌های پردازش اطلاعات هستند که با هدف مدل‌سازی نحوه یادگیری مغز انسان طراحی شده‌اند. این شبکه‌ها بر مبنای فرضیات زیر توسعه یافته‌اند:

۱. پردازش اطلاعات در یک‌سری عناصر ساده به نام نورون (Neuron) صورت می‌گیرد.
۲. سیگنال‌ها بین نورون‌ها و از طریق سیناپس‌ها عبور داده می‌شوند.
۳. هر سیناپس دارای یک وزن مربوط به خود است که در یک شبکه عصبی، سیگنال عبوری در آن ضرب می‌شود.
۴. هر نورون از یک تابع فعال‌سازی (که معمولاً غیر خطی است) برای محاسبه پاسخ سیگنال ورودی استفاده می‌کند.

یک شبکه عصبی به‌وسیله الگوی ارتباط بین نورون‌ها (معماری شبکه)، روش تعیین وزن‌ها و بایاس‌ها در ارتباطات (آموزش شبکه) و تابع فعال‌سازی آن مشخص می‌شود [32].

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، توابع RTC ورودی‌های شبکه عصبی را تشکیل می‌دهند. این ورودی‌ها از طریق سیناپس‌های ارتباطی به لایه خروجی شبکه

لبه سفال‌ها پرداخته می‌شود. مشابه روش طبقه‌بندی، از توابع RTC در گونه‌شناسی سفال‌ها نیز استفاده می‌شود. اما، از آنجاکه هر یک از این توابع دارای واحد فیزیکی متفاوتی هستند، لازم است پیش از استفاده از آن‌ها در الگوریتم‌های یادگیری ماشین، مقادیر به‌دست‌آمده بین ۱- تا ۱ نرمال‌سازی شوند. در اینجا و با توجه به تعداد نقاط درونیایی، برای هر لبه خارجی تعداد صد شعاع، صد تاثرات زاویه و نودونه مقدار انحنا محاسبه شده و مقادیر به‌دست‌آمده به کمک روابط زیر نرمال‌سازی می‌شوند:

$$R_i^N = \frac{R_i - \bar{R}}{R_{\max} - R_{\min}}; \quad T_i^N = \frac{T_i - \bar{T}}{T_{\max} - T_{\min}}; \quad i = 1, 2, \dots, 100 \quad (7)$$

$$C_i^N = \frac{C_i - \bar{C}}{C_{\max} - C_{\min}}; \quad i = 1, 2, \dots, 99 \quad (8)$$

۴. نتایج و یافته‌های پژوهش

در این بخش، به بررسی دقت روش‌های مورد استفاده در طبقه‌بندی و گونه‌شناسی سفال‌ها پرداخته می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، اولین گام در مطالعات سفال‌های باستانی، طبقه‌بندی نمونه‌ها با استفاده از یک روش طبقه‌بندی است. در این پژوهش، از شبکه عصبی مصنوعی برای طبقه‌بندی و از توابع RTC به‌منظور معرفی ویژگی‌های هندسی نمونه‌های آموزشی شبکه عصبی استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده از این روش تعداد یازده خطا در مجموع ۲۰۹ نمونه سفالی را نشان می‌دهند. بنابراین، دقت شبکه عصبی در طبقه‌بندی نمونه‌ها ۹۴/۷ درصد ارزیابی می‌شود. با تصحیح نمونه‌های خطا دار، تعداد نمونه‌های قرار گرفته در هر طبقه به ترتیب عبارت‌اند از: طبقه کاسه‌ها با ۱۲۸ نمونه، طبقه کوزه‌ها با ۴۲ نمونه و طبقه خمره‌ها با ۳۹ نمونه. به این ترتیب، در مجموع ۲۰۹ قطعه سفالی، ۶۱/۲ درصد نمونه‌ها در طبقه کاسه‌ها، ۲۰/۱ درصد در طبقه کوزه‌ها و ۱۸/۷ درصد نیز در طبقه خمره‌ها قرار می‌گیرند. با انجام طبقه‌بندی، از روش اتصال همسایگی به‌منظور گونه‌شناسی نمونه‌های موجود در هر طبقه استفاده می‌شود.

با اتمام فرآیند آموزش، مقادیر بهینه پارامترهای شبکه (وزن‌ها و بایاس‌ها) محاسبه شده و می‌توان از آن‌ها برای طبقه‌بندی سایر نمونه‌ها نیز استفاده کرد. در این مرحله، با ورود توابع RTC هر نمونه جدید، طبقه یا کلاس مربوط به آن نمونه به کمک وزن‌ها و بایاس‌های محاسبه شده، تعیین می‌شود.

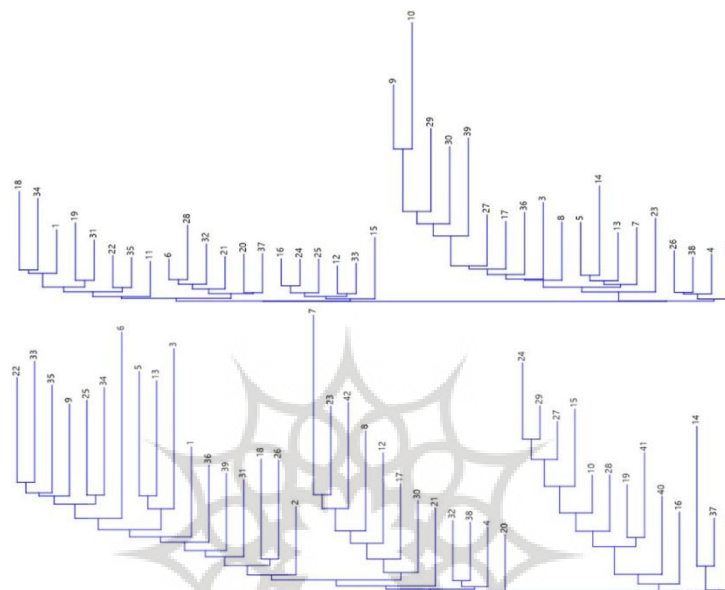
۳-۴. گونه‌شناسی سفال‌ها به کمک الگوریتم اتصال همسایگی

با انجام طبقه‌بندی، نمونه‌های سفالی به سه طبقه کاسه، کوزه و خمره تفکیک می‌شوند و در هر طبقه به بررسی تنوع شکل

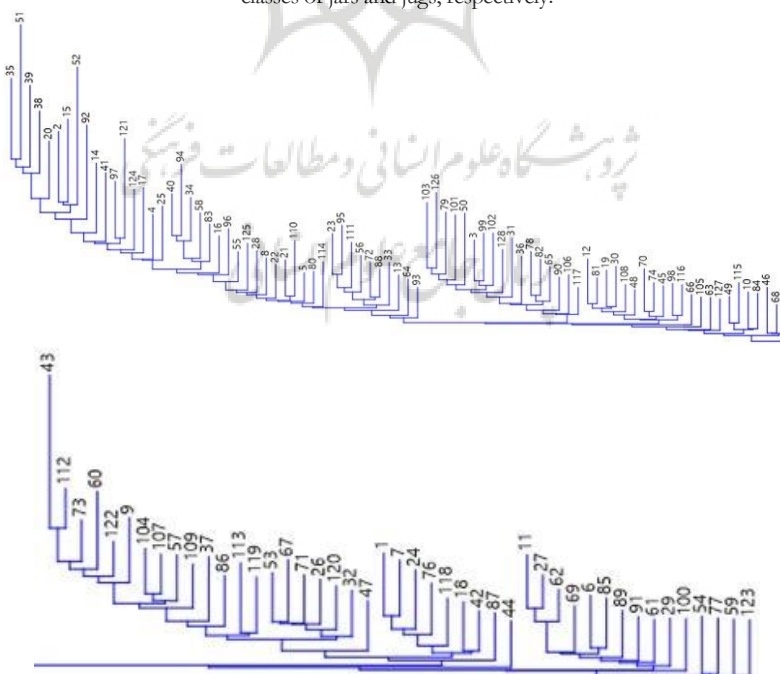
پس از نرمال‌سازی توابع، خوشه‌بندی نمونه‌ها به کمک داده‌های نرمال‌شده در نرم‌افزار PAST (Paleontological Statistics) انجام می‌شود. تاکنون در پژوهش‌های انجام‌شده در گونه‌شناسی سفال‌های باستانی، خوشه‌بندی درختی مناسب‌تر از سایر روش‌ها تشخیص داده شده است [33]، [9]. یکی از روش‌های متداول در خوشه‌بندی درختی روش اتصال همسایگی (Neighbor Joining) است. استفاده از این روش به‌عنوان یک روش طبقه‌بندی غیرنظارتی (Unsupervised classification) برای انجام خوشه‌بندی درختی (Hierarchical clustering) بسیار رایج است [10]. این الگوریتم در سال ۱۹۸۷ توسط «سایتو» و «نی» برای ایجاد درخت‌های فیلوژنتیک طراحی شده و از آن معمولاً برای تشکیل درخت‌هایی که بر اساس ساختار داده‌های DNA یا سری‌های پروتئین ایجاد شده‌اند، استفاده می‌شود [10]. در پژوهش حاضر نیز از این روش برای خوشه‌بندی داده‌های نرمال‌شده استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که تعداد خوشه‌ها به‌صورت تجربی انتخاب شده که نتایج آن در بخش (۴) ارائه می‌شوند.

شاخه‌های نمودار) به‌منظور تفکیک نمودار استفاده می‌شود. بر این اساس، تعداد ۲۷ تیپ در طبقهٔ خمره‌ها، ۲۲ تیپ در طبقهٔ کوزه‌ها و ۸۳ تیپ در طبقه کاسه‌ها شناسایی شدند. شکل‌های (۸) و (۹) نمودارهای درختی به‌دست‌آمده از روش اتصال همسایگی را نشان می‌دهند.

در این بخش توابع نرمال شده RTC به‌عنوان ورودی‌های الگوریتم در نظر گرفته شده است که در ادامه، به تشریح نتایج آن پرداخته خواهد شد. خروجی روش اتصال همسایگی، یک نمودار درختی است که از آن به‌منظور تفکیک لبه‌های موجود در یک طبقه استفاده می‌شود. در این روش، پس از ترسیم نمودار درختی، از تشابه نمونه‌های مجاور (اندازه و نزدیکی



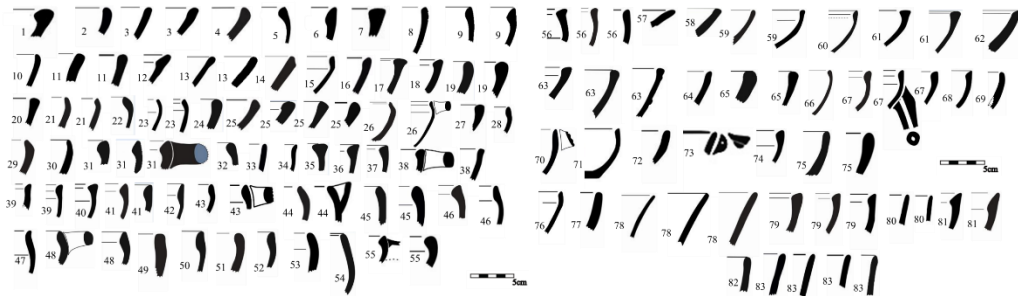
شکل ۸: نمودارهای درختی به‌دست‌آمده از روش اتصال همسایگی. نمودارهای اول و دوم به ترتیب به طبقات خمره‌ها و کوزه‌ها مربوط می‌شوند.
Fig 8: Hierarchical diagrams are derived from the neighbor-joining method. The 1st and 2nd diagrams are related to the classes of jars and jugs, respectively.



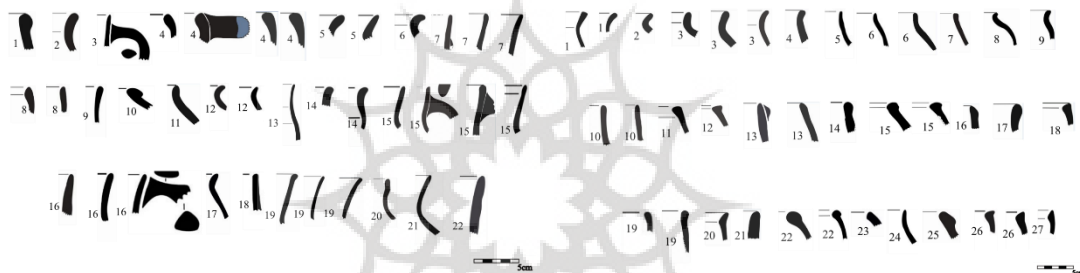
شکل ۹: نمودار درختی به‌دست‌آمده از روش اتصال همسایگی. نمونه‌های فوق متعلق به طبقهٔ کاسه‌ها هستند.
Fig 9: Hierarchical diagram derived from the neighbor-joining method. The above samples belong to the class of bowls.

لوح‌های مختلف در کنار یکدیگر نمایش داده شوند. شکل‌های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) لوح‌های مربوط به هر طبقه را به ترتیب نشان می‌دهند.

نمودارهای درختی، اگرچه تفسیر مناسبی از ویژگی‌های هندسی نمونه‌های مختلف ارائه می‌دهند، از نظر بصری و بررسی شکل هندسی لبه‌ها چندان مناسب نیستند. بنابراین، لازم است که لبه‌های تفکیک‌شده به ترتیب و به صورت



شکل ۱۰: نمایش تیپ‌های کاسه‌ها
Fig 10: The illustration of bowl types.



شکل ۱۱: نمایش تیپ‌های کوزه‌ها
Fig 11: The illustration of jug types.

شکل ۱۲: نمایش تیپ‌های خمره‌ها
Fig 12: The illustration of jar types.

در اینجا از شبکه عصبی مصنوعی به‌عنوان یک روش پیشرفته یادگیری ماشین برای طبقه‌بندی نمونه‌ها استفاده شد. این پژوهش نشان داد چنانچه شبکه عصبی دارای ساختار و معماری مناسبی بوده و از نمونه‌های کافی برای آموزش شبکه استفاده شود، در آن صورت می‌توان به نتایج قابل قبولی در طبقه‌بندی نمونه‌ها دست یافت. در مطالعات علمی، معماری شبکه عصبی (تعداد لایه‌های شبکه و تعداد نورون‌ها) معمولاً به‌صورت تجربی و با سعی و خطا طراحی می‌شود. در پژوهش حاضر نیز از یک شبکه عصبی سه لایه با یک لایه پنهان و تعداد دو نورون در لایه پنهان به‌منظور طبقه‌بندی نمونه‌ها استفاده شد. به‌منظور صحت‌سنجی شبکه عصبی در پژوهش حاضر، سفال‌های مورد مطالعه به‌صورت سنتی نیز طبقه‌بندی شدند [34] که با مقایسه

۵. بحث در نتایج و یافته‌ها

این پژوهش روش‌هایی جدید را در طبقه‌بندی و گونه‌شناسی سفال‌های باستانی ارائه می‌دهد. در چنین مطالعاتی، آنچه در وهله اول حائز اهمیت است، معرفی ویژگی‌های هندسی نمونه‌هاست. این ویژگی‌ها را می‌توان به شیوه‌های مختلف و مشابه آنچه در پیشینه تحقیق بخش (۳-۳) ذکر شد، در نظر گرفت. همان‌طور که در بخش سوم اشاره شد، توابع RTC ویژگی‌های یکتا و منحصربه‌فردی را برای منحنی لبه خارجی سفال نشان می‌دهند که به کمک آن‌ها می‌توان نمونه‌های مختلف را از یکدیگر متمایز کرد. به همین دلیل، از این توابع در طبقه‌بندی و گونه‌شناسی نمونه‌های مختلف استفاده شد.

روش‌های انسانی با دشواری‌های فراوانی همراه خواهد بود.

از بررسی نتایج حاصل از پژوهش، به این نکته می‌توان پی بُرد که کیفیت نتایج به‌دست‌آمده به دقت محاسبات توابع RTC و فرضیات به‌کاررفته در الگوریتم‌های مختلف بستگی دارد. از این‌رو، در چنین مطالعاتی، انتخاب ویژگی‌های هندسی و الگوریتم‌های مورد استفاده در طبقه‌بندی و گونه‌شناسی نمونه‌ها از درجه اهمیت بالایی برخوردار بوده که می‌تواند کیفیت نتایج را تحت تأثیر قرار دهند.

۴. نتیجه‌گیری

این تحقیق، کارایی و قابلیت‌های استفاده از روش‌های عددی را در طبقه‌بندی و گونه‌شناسی سفال‌های باستانی اثبات می‌کند و دقت نتایج به‌دست‌آمده نیز گواه بر این مدعا هستند. این نتایج نشان می‌دهند که توابع RTC ویژگی‌های دقیق و منحصربه‌فردی را از نمونه‌های سفالی ارائه می‌دهند. از این‌رو، می‌توان آن‌ها را داده‌های مهم و قابل اعتمادی در طبقه‌بندی و گونه‌شناسی سفال‌های باستانی ایران تلقی کرد. افزون بر این، این پژوهش راه‌هایی جدید را در تحقیقات آینده و در جهت معرفی انواع توابع ریاضی به‌منظور معرفی ویژگی‌های هندسی جدید و روش‌ها و الگوریتم‌های نوین باز می‌کند که می‌توان از آن‌ها در بسیاری از مطالعات مشابه بهره بُرد.

بر اساس این پژوهش، دقت طبقه‌بندی حدود ۹۵ درصد و دقت گونه‌شناسی نیز بین ۹۵ درصد تا ۹۷ درصد ارزیابی شد. لبه‌های سفالی عصر آهن II در سه طبقه کاسه، کوزه و خمره طبقه‌بندی شده و به ترتیب در ۸۳، ۲۲ و ۲۷ گونه از یکدیگر تفکیک شدند.

چنانچه در بالا گفته شد، توابع RTC امکانی را برای باستان‌شناسان فراهم می‌کنند که به کمک آن‌ها می‌توان طرح‌های سفال را به صورت توابع ریاضی در اختیار داشت. از این توابع می‌توان در طبقه‌بندی و گونه‌شناسی هر مجموعه داده‌ای استفاده نمود. به بیان دیگر، اگر استفاده از چنین روش‌هایی در آینده فراگیر

روش سنتی و شبکه عصبی، دقت طبقه‌بندی شبکه حدود ۹۵ درصد ارزیابی شد که دقت قابل قبولی در طبقه‌بندی رقوم محسوب می‌شود. از برتری‌های روش شبکه عصبی در طبقه‌بندی سفال‌های باستانی نسبت به روش انسانی می‌توان به عدم اعمال سلیقه‌های فردی در طبقه‌بندی نمونه‌ها اشاره داشت. چراکه آموزش شبکه عصبی بر اساس مجموعه‌ای از اعداد ریاضی است و هیچ‌گونه سلیقه‌ای در این فرآیند دخیل نیست.

اما، برای گونه‌شناسی نمونه‌های موجود در هر طبقه نیز از توابع RTC استفاده شد، با این تفاوت که توابع مورد استفاده در این مرحله، توابع نرمال شده بوده که فاقد واحد فیزیکی هستند. در این مرحله، از روش اتصال همسایگی به‌منظور گونه‌شناسی نمونه‌ها استفاده شد. این الگوریتم یک ساختار درختی بر اساس کمینه اختلاف بین نمونه‌ها ارائه می‌دهد که به کمک آن می‌توان گونه‌های مختلف را از یکدیگر تفکیک کرد. اختلافات بین نمونه‌ها در نمودار درختی به‌صورت تدریجی بوده و گونه‌های مختلف بر اساس این تغییرات تدریجی به‌راحتی از یکدیگر متمایز می‌شوند.

با مقایسه لوح‌های به‌دست‌آمده از روش RTC با روش سنتی [34] در هر طبقه، حدود سه تا پنج درصد خطا در گونه‌شناسی نمونه‌ها به‌چشم می‌خورد. علت این امر را می‌توان به برخی از نویزهای تصویری و همچنین خطای محاسبات توابع RTC نسبت داد. اما باید توجه داشت که چنین شیوه‌هایی (روش‌های رقوم طبقه‌بندی و گونه‌شناسی) از مزایای بیشتری نسبت به روش‌های انسانی برخوردارند، چراکه نخست می‌توان دید جامع‌تری نسبت به تیپ‌های مختلف و ارتباط قرارگیری آن‌ها در کنار یکدیگر داشت، اتفاقی که عملاً در روش انسانی با خطای بسیار بیشتری همراه خواهد بود. همچنین به‌عنوان عامل دوم از مزایای روش‌های رقوم می‌توان به تعمیم‌دادن آن‌ها به تمامی کاوش‌ها و بررسی‌های باستان‌شناسی ایران اشاره کرد. به بیان دیگر، با استفاده از روش‌های رقوم می‌توان ارتباط بین محوطه‌های باستانی و دوره‌های مختلف آن‌ها را در سرتاسر ایران به صورت یکجا و مقایسه‌ای بررسی نمود، امکانی که در

اینجانبان در راستای پیشبرد اهداف پژوهش صمیمانه تشکر و قدردانی نماییم.

شود، امکان ایجاد یک پایگاه داده جامع از سفال‌های ایران فراهم خواهد شد، اتفاقی که به نظر می‌رسد یکی از ضروریات دانش باستان‌شناسی در دنیای معاصر است.

پی‌نوشت‌ها

1. Iterative Closest Point
2. Discrete Cosine Transform
3. Elliptic Fourier Analysis
۴. تابع فعال‌سازی واحد خطی ترمیم‌شده (Rectified Linear Unit) که به اختصار ReLU نامیده می‌شود، یک تابع تک‌ای خطی است که خروجی آن مثبت بوده، هرگاه ورودی مثبت باشد و در غیر این صورت خروجی برابر صفر خواهد بود.
۵. اعداد نوشته‌شده در سمت چپ هر لبه سفالی معرف شماره تیب است.

تقدیر و تشکر

این پژوهش برگرفته از طرح جایگزین خدمت سربازی آقای علی اعراب بوده و با همکاری مؤسسه باستان‌شناسی دانشگاه تهران و زیر نظر مرکز نخبگان و استعداد های برتر نیروهای مسلح انجام شده است. در اینجا لازم می‌دانیم که از نهادهای نامبرده به جهت همکاری با

References

- [1] Rice PM. Pottery analysis: a sourcebook. Chicago: University of Chicago Press; 1987. 559 p.
- [2] Sinopoli CM, Sinopoli CM. Approaches to archaeological ceramics. Springer; 1991.
- [3] Willis S. A date with the past: Late Bronze and Iron Age pottery and chronology. Prehistoric Britain: The Ceramic Basis. 2002;4–21.
- [4] Stewart J. Calculus, Early Transcendentals. Brooks Cole, Canada. 7th international metric edition edition. 2012.
- [5] Hagstrum MB, Hildebrand JA. The two-curvature method for reconstructing ceramic morphology. American Antiquity. 1990;55(2):388–403.
- [6] Karasik A, Smilansky U. Computerized morphological classification of ceramics. Journal of Archaeological Science. 2011;38(10):2644–57.
- [7] Wilczek J, Monna F, Navarro N, Chateau-Smith C. A computer tool to identify best matches for pottery fragments. Journal of Archaeological Science: Reports. 2021;37:102891.
- [8] Mostafa Dehpahlavan, "Report of Archaeological excavations of Qareh Tepe in Sagzabad," Institute of Archaeology of Tehran University, Tehran, Scientific Report 2019. [In Persian].
- [9] Smith ME, Feinman GM, Drennan RD, Earle T, Morris I. Archaeology as a social science. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2012;109(20):7617–21.
- [10] Saitou N, Nei M. The neighbor-joining method: a new method for reconstructing phylogenetic trees. Molecular biology and evolution. 1987;4(4):406–25.
- [11] Childe VG. Piecing Together the Past: The interpretation of Archeological Data. London; 1956.
- [12] Mostafa Dehpahlavan, "Newly discovered cemeteries of second and third iron age of Qareh Tepe in Sagzabad (Chapter 3)," Report of seventeenth anniversary conference of archaeology of Iran, pp. 437-444, 2019. [In Persian].
- [13] Gentelli L, Blichert-Toft J, Davis G, [ده‌پهلوان مصطفی، گزارش مقدماتی کاوش آموزشی و پژوهشی دانشجویان باستان‌شناسی دانشگاه تهران، کاوش قره‌تپه سگزآباد، مؤسسه باستان‌شناسی دانشگاه تهران، تهران، گزارش علمی ۱۳۹۷].
- [ده‌پهلوان مصطفی، گورستان‌های نویافته عصر آهن ۲ و ۳ قره‌تپه سگزآباد (فصل سوم)، گزارش‌های هفدهمین گردهمایی سالانه باستان‌شناسی ایران، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری: ۴۳۷–۴۴۴]

- Gitler H, Albarède F. Metal provenance of Iron Age Hacksilber hoards in the southern Levant. *Journal of Archaeological Science*. 2021;134:105472.
- [14] Turk G, Levoy M. Zippered polygon meshes from range images. In 1994. p. 311–8.
- [15] Wilczek J, Monna F, Barral P, Burlet L, Chateau C, Navarro N. Morphometrics of Second Iron Age ceramics—strengths, weaknesses, and comparison with traditional typology. *Journal of archaeological science*. 2014;50:39–50.
- [16] Forel B, Gabillot M, Monna F, Forel S, Dommergues CH, Gerber S, et al. Morphometry of Middle Bronze Age palstaves by discrete cosine transform. *Journal of archaeological science*. 2009;36(3):721–9.
- [17] Mostafa Dehpahlavan, "Introductory report of educational-research excavation of archaeology Students of Tehran University, Qareh Tepe excavation in Sagzabad," Institute of Archaeology of Tehran University, Tehran, Scientific Report of 2014. [In Persian].
- [18] Mostafa Dehpahlavan, "Introductory report of educational-research excavation of archaeology Students of Tehran University, Qareh Tepe excavation in Sagzabad," Institute of Archaeology of Tehran University, Tehran, Scientific Report of 2015 2015. [In Persian].
- [19] Mostafa Dehpahlavan, "Introductory report of educational-research excavation of archaeology Students of Tehran University, Qareh Tepe excavation in Sagzabad," Institute of Archaeology of Tehran University, Tehran, Scientific Report of 2016 2016. [In Persian].
- [20] Amir Sadegh Naghshineh, Hassan Talaei, and Kamal Al Din Niknami, "The iron age cemetery of Changbar," *Archaeology letter*, pp. 105-122, 2011. [In Persian].
- [21] Seifollah Kambakhshfard, Tehran of three thousand two hundred years old: based on archaeological excavations. Tehran, Iran: Faza publication, 1991. [In Persian].
- [22] Young TC. Excavations at Godin Tepe: first progress report. Occasional paper. 1969
- [23] Young Jr TC. A comparative ceramic chronology for Western Iran, 1500–500 BC. *Iran*. 1965;3(1):53–85.
- [24] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, *Digital Image Processing*. 2002.
- [25] Press WH, Teukolsky SA, Vetterling WT, Flannery BP. *Numerical recipes in C*. Cambridge university press Cambridge; 1992.
- [26] Shepard AO. *Ceramics for the Archaeologist*. Vol. 609. Carnegie Institution of Washington Washington, DC; 1956.
- [27] Webster G. *Romano-British coarse pottery: a student's guide*. Council for British Archaeology London; 1969.
- [28] Webster G. *Romano-British coarse pottery: a student's guide*. Council for British Archaeology London; 1969.
- [29] Callieri P. *The Sasanian Manor House at Hājīābād, Iran (Monografie di Mesopotamia, III)*. 1996;
- [30] Meysam Labbaf khaneiki, "The

- Sassanian potteries of northeast of Iran (Classification, Comparison and Analysis based on form properties)," Scientific-Research Journal of Faculty of Literature and Humanities of Tehran University, pp. 143-177, 2008. [In Persian].
- [الباف خانیکی میثم، سفال‌های ساسانی شمال شرق ایران (طبقه‌بندی، مقایسه و تحلیل بر اساس ویژگی‌های شکلی)، مجله علمی-پژوهشی دانشکده ادبیات و علوم انسانی دانشگاه تهران، ۱۳۸۷، ۱۷۷-۱۴۳].
- [31] Fatemeh Rastgooyan, "Classification and typology of third iron age potteries of Qareh Tepe in Sagzabad," Tehran, Master thesis 2019. [In Persian].
- [راستگویان فاطمه، طبقه‌بندی و گونه‌شناسی سفال‌های عصر آهن III قره‌تپه سگزآباد، تهران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تهران، استاد راهنما: مصطفی دهبهلوان، ۱۳۹۸].
- [32] Fausett LV. Fundamentals of neural networks: architectures, algorithms and applications. Pearson Education India; 2006.
- [33] Randriamihamison N, Vialaneix N, Neuviat P. Applicability and interpretability of Ward's hierarchical agglomerative clustering with or without contiguity constraints. Journal of Classification. 2021;38(2):363-89.
- [34] Ali Aarab, "Classification and typology of second iron age potteries derived from Qareh Tepe site of Sagzabad in Qazvin," Institute of Archaeology of Tehran university, Tehran, The alternative plan for military service project of the center of elites and top talents of the armed forces 2022. [In Persian].
- [اعراب علی، ۱۴۰۱، طبقه‌بندی و گونه‌شناسی سفال‌های عصر آهن ۲ به‌دست‌آمده از محوطه قره‌تپه سگزآباد در قزوین، مؤسسه باستان‌شناسی دانشگاه تهران، طرح جایگزین خدمت سربازی زیر نظر مرکز نخبگان و استعدادهای درخشان نیروهای مسلح].

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی