تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۹/۱
تاریخ پذیرش مقاله: : ۱۳۹۵/۱۱/۱۵

فن‌شناسی و آسیب‌شناسی دو خنجر مفرغی از هزارۀ دوم قبل از میلاد متعلق به محوطۀ باستانی گَروی

حمیدرضا بخشنده‌فرد[۱]، صدیقه طاهری بجگان[۲]

چکیده

اشیای مطالعه‌شده در این پژوهش دو خنجر مفرغی متعلق به محوطۀ باستان‌شناسی گَروی منسوب به اواخر عصر مفرغ و اوایل عصر آهن هستند که فاقد تزیینات اند و خوردگی و اکسیدشدگی روی سطح‌شان هویداست. هدف این پژوهش مطالعۀ فن‌شناسیِ اشیای مذکور از طریق انجام مطالعات تطبیقی و باستان‌شناسی به روش کتابخانه‌ای و انجام مطالعات فن‌شناسی و آسیب‌شناسی به روش آزمایشگاهی (شیمی تر، رادیوگرافی، متالوگرافی، و آنالیز عنصری مغز فلزی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به منظور شناسایی فلز و تکنیک ساخت آن است. پس از مطالعه و انجام آزمایش‌های ذکرشده، جنس این اشیا از مفرغ، تکنیکِ ساخت‌شان ریخته‌گری و چکش‌کاری، و متعلق به دورۀ عصر آهن تشخیص داده شد.

کلیدواژه‌ها: خنجر مفرغی، فن‌شناسی، خوردگی، هزارۀ دوم قبل از میلاد، محوطۀ گروی.

---

۱. استادیار دانشگاه هنر اصفهان hr.bakhshan@aui.ac.ir
۲. کارشناس ارشد حفاظت و مرمت اشیاء دانشگاه هنر اصفهان

مقدمه

حفظ، احیا، مرمت، و مطالعهٔ آثار تاریخی مقوله‌ای است که در عصر حاضر جایگاه ویژه‌ای به خود اختصاص داده است. اهمیت این امر به جز پیدایش عوامل جدید آلودگی (و لزوم شناخت و پیشگیری از آنها) و تشدید مکانیسم تخریب آثار تاریخی، که در نتیجهٔ صنعتی شدن جوامع در قرون اخیر رخ داده است، توجه ویژهٔ انسان عصر حاضر به پاسداشت میراثی‌ست که در معرض خطر نابودی و فراموشی است. هدف در این مقاله شناخت فنی اثر از نظر تکنولوژی و بررسی آسیب های وارده با رویکرد حفظ و نگه داری و مرمت بوده است.

این پژوهش شامل مطالعات تطبیقی باستان‌شناسی، معرفی آثار، مطالعات آزمایشگاهی و دستگاهی (شیمی تر، رادیوگرافی، متالوگرافی، و میکروسکوپالکترونی روبشی (SEM) جهت مشاهدات دقیق‌تر (EDAX)) به منظور آنالیز عنصری کمی فلزی این آثار است.

روش تحقیق

این پژوهش به روش کتابخانه‌ای و آزمایشگاهی انجام شد.

معرفی اشیا و شناسنامهٔ آنها

اشیای موضوعِ مطالعه دو خنجر مفرغی هستند که ضمن حفاری از قبرستانی واقع در محوطهٔ تاریخی گَروی در استان هرمزگان به دست آمده اند (نقشهٔ ۱).

رنگ غالب این اشیا سبز تیره و خوردگی‌های روی آنها به رنگ سبز روشن است. دسته و تیغهٔ خنجرها یکپارچه است و سوراخهایی روی دسته وجود دارد. وزن خنجرها نسبت به اندازه‌شان قابل توجه است که این امر نشان‌دهندهٔ آن است که دارای مغز فلزی هستند. به دلیل کاربرد جنگ‌افزاری این دو شیء بسیار چکش‌کاری‌های شده اند تا لبه‌های تیز آنها شکل بگیرد. دستهٔ آنها دندانه‌دار است که احتمال دارد با هدف اینکه بهتر در دست بنشیند، در دسته ایجاد شده باشد. شکل دستهٔ این خنجرها در قسمت انتهایی نسبتاً باریک است و به‌تدریج تا محل اتصال به تیغه پهن‌تر می‌شود. تیغه در پهن‌ترین قسمت، پهن‌تر از خود دسته است. طول خنجر شمارهٔ یک ۳۴ و عرض آن ۳/۲ سانتی‌متر (جدول ۱) ، و طول خنجر شمارهٔ دو ۳۷ و عرض آن ۴/۲ سانتی‌متر است (جدول ۲). روی سطح هر دو خنجر رسوبات سطحی، خوردگی‌های پودری‌شکلی به رنگ سبز روشن، و پاتین یک‌دستی به رنگ سبز تیره دیده می‌شود. همچنین اثرات اکسیدشدگی روی نوک تیغهٔ خنجر شمارهٔ دو مشاهده شد.

نمونه‌های مورد مطالعه دارای تیغه و دستهٔ یکپارچه‌ای هستند که روی آنها اتصال یا پرچی که از دو تکه بودن آن حکایت کند، مشاهده نشد. با توجه به یک‌دست و قرینه بودن دندانه‌های دسته‌ها، و همچنین رد چکش‌کاری روی تیغهٔ هر دو خنجر، می‌توان گفت این اشیا به صورت دوکفه‌ای ریخته‌گری شده اند و پس از قالب‌گیری روی آنها عملیات چکش‌کاری انجام شده است.

لبهٔ دسته‌ها دارای برآمدگی‌هایی است که در نتیجهٔ آن فضایی خالی روی دسته پدید آمده که احتمالاً محل الحاق تزیینات بوده است. سوراخهایی نیز بر روی دستهٔ خنجرها تعبیه شده است که محل احتمالی الحاقات تزیینی است. به نظر می‌رسد دندانه‌های روی دسته نیز به منظور جای گرفتنِ بهتر انگشتان ایجاد شده اند.

نقشهٔ ۱. منطقهٔ تاریخی گروی در استان هرمزگان (مأخذ: گوگل مپ).

نام شیء	خنجر
کاربرد	جنگ‌افزار
اندازه	طول: ۳۴ سانتی‌متر
	عرض: ۳/۲ سانتی‌متر
	قطر تیغه: ۸ میلی‌متر
	قطر دسته: ۶ میلی‌متر
وزن	قبل از مرمت: ۱۶۴ گرم
	بعد از مرمت: ۱۶۱/۲ گرم
جنس	مفرغ
رنگ غالب	سبز تیره
تزیینات	ندارد
فن ساخت	ریخته‌گری و چکش‌کاری
قدمت	هزارهٔ دوم قبل از میلاد
محل حفاری‌شده	استان هرمزگان، شهرستان رودان، گَروی
زمان حفاری	سال ۱۳۸۸
وضع مرمت	مرمت‌شده (متفرقه)
وضع فعلی شیء	بدون کمبود و دارای رسوبات سطحی، خوردگی، و اکسیدشدگی

جدول ۱. شناسنامهٔ خنجر شمارهٔ (مأخذ: نگارنده).

نام شیء	خنجر	
کاربرد	جنگ‌افزار	
اندازه	طول: ۳۷ سانتی‌متر	
	عرض: ۴/۲ سانتی‌متر	
	قطر تیغه: ۴ میلی‌متر	
	قطر دسته: ۸ میلی‌متر	
وزن	قبل از مرمت: ۲۱۱/۴ گرم	
	بعد از مرمت: ۲۰۸/۳ گرم	
جنس	مفرغ	
رنگ غالب	سبز تیره	
تزیینات	ندارد	
فن ساخت	ریخته‌گری و چکش‌کاری	
قدمت	هزارهٔ دوم قبل از میلاد	
محل حفاری شده	استان هرمزگان، شهرستان رودان، گَروی	
زمان حفاری	سال ۱۳۸۸	
وضع مرمت	مرمت‌شده (متفرقه)	
وضع فعلی شیء	بدون کمبود و دارای رسوبات سطحی، خوردگی و اکسیدشدگی	

جدول ۲. شناسنامهٔ خنجر شمارهٔ دو (مأخذ: نگارنده).

مطالعات تطبیقی

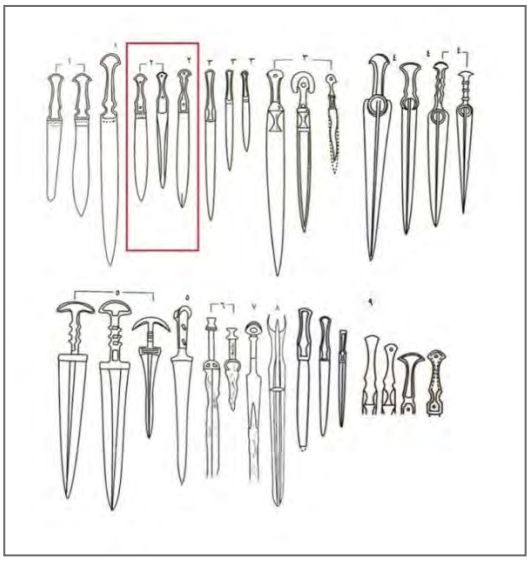
مطالعات تطبیقی این دو خنجر با در نظر گرفتن دسته‌بندی‌هایی که در منابع سه‌گانه (Khorasani, 2006؛ سکایا، ۱۳۸۳؛ طلایی، ۱۳۸۶) تعریف شده است و بر اساس فرم، اندازه، اتصال، تزیینات، قطر، و لبه‌دار بودن دسته انجام شده است. فرم این خنجرها به دستهٔ یک و دو از دسته‌بندی نُه‌گانهٔ جنگ‌افزارها شباهت داشت (تصویر ۱ و ۲).

نمونه‌های مشابه

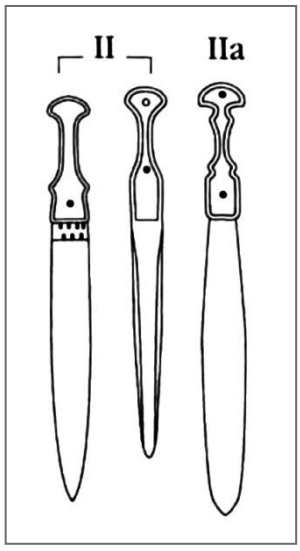
انواع خنجرهایی که از لحاظ تشابه فرم و جنس و اندازه در منابع مختلف اعم از کتاب و مقاله و تارنمای موزه‌ها یافت شدند، تاریخ‌گذاری و اطلاعات فن‌شناسی مشابهی دارند. اغلب آنها منسوب به لرستان و اواخر عصر مفرغ و اوایل عصر آهن هستند.

یک نمونهٔ مشابه، خنجری مفرغی منسوب به لرستان است که در موزهٔ ملی ایران نگهداری می‌شود. این خنجر از لحاظ فرم و اندازه شباهت بسیار زیادی به خنجر شمارهٔ دو دارد. با این تفاوت که نام پادشاه مردوک نادین آهه که پادشاه وقت بوده است بر روی دستهٔ آن حکاکی شده است اما خنجرهای موضوع این پژوهش فاقد کتیبه هستند (تصویر۳) (سکایا، ۱۳۸۳: ۳۷۹).

نمونهٔ دیگر خنجری است که در موزهٔ ملی ایران نگهداری می‌شود و در توضیحش آمده: «خنجری لبه‌دار که توسط قالب یک کفه‌ای روباز ریخته‌گری و پس از آن چکش‌کاری شده است» (تصویر ۴) (Khorasani, 2006: 37).



تصویر ۱. تقسیم‌بندی خنجرها بر اساس اندازه و فرم (مأخذ: سکایا، ۱۳۸۳: ۲۲۱).



تصویر ۲. خنجرهای دستهٔ دو، بر اساس تقسیم‌بندی از لحاظ اندازه و فرم (مأخذ: سکایا، ۱۳۸۳: ۲۲۱).

تصویر ۳. خنجر مفرغی لرستان، متعلق به دورهٔ عصر آهن منقش به کتیبهٔ نام پادشاه بابل، مردوک نادین آهه در موزهٔ ملی ایران (مأخذ: Khorasani, 2006).

تصویر ۴. خنجر مفرغی لرستان در موزهٔ ملی ایران (مأخذ: Khorasani, 2006).

تصویر ۵. خنجر مفرغی لرستان، متعلق به ۲۹۰۰ـ ۱۱۰۰ سال قبل از میلاد (مأخذ: www.timesancient.com ((access date: 10/05/2016).

شناسایی فلز، خوردگی‌ها و رسوبات به روش کلاسیک شیمی تر

هدف

شیمی تر یکی از روش‌های شناسایی مواد است که به منظور آنالیز کیفی و کمی مواد انجام می‌شود. پس از آماده‌سازی به روشی خاص برای هر نمونه، برای انجام آنالیزهای کمی یا کیفی از محلول‌ها و معرف‌های شیمیایی و سایر وسایل آزمایشگاهی مثل کوره، آون، دستگاه تقطیر، سانتریفوژ و... استفاده می‌شود (Odegaard & Carroll & Zimmt, 2005).

روش کار

در روش کلاسیک شیمی تر، مادهٔ مورد نظر جهت آماده‌سازی در اسیدهای لازم حل می‌شود و با استفاده از محلول‌ها و معرف‌های شیمیایی، شناسایی می‌شود. برای حل شدن بهتر نمونه در اسید، می‌توان آن را با رعایت فاصلهٔ مناسبی از شعله حرارت داد (Odegaard & Carroll & Zimmt, 2005).

جهت شناسایی فلز از تست‌های شناسایی کاتیون‌های مس، قلع، آهن، روی، و سرب استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج آزمایش‌های شیمی تر نمونه‌های تهیه‌شده از مغز فلزی اشیای مورد مطالعه به شرح زیر است:

کاتیون	مس	قلع	آهن	روی	سرب
خنجر شمارهٔ یک	+	+	–	–	+
خنجر شمارهٔ دو	+	+	–	–	+

جدول ۳. شناسایی فلز به‌کاررفته به روش شیمی تر (مأخذ: نگارنده).

با انجام تست‌های شناسایی مشاهده شد که اشیای مورد نظر با وجود دارا بودن مس و قلع، از جنس مفرغ اند و سرب شناسایی‌شده در آلیاژهای مورد نظر احتمالاً یا ناآگاهانه بوده است یا جهت تسهیل در ریخته‌گری استفاده شده است.

رادیوگرافی

هدف

فلزات پس از ریخته‌گری به شکل مذاب در قالب یا چکش‌کاری روی فازِ جامدشان می‌توانند به فرم‌های مختلف دربیایند. انوا تزیینات روی فلزات شامل اتصال چند قطعه به هم، حکاکی، قلم‌زنی، طلاکاری، مرصع-کاری، و میناکاری است. آثار تاریخی به‌جای‌مانده از گذشته، روش‌های سنتی ساخت صنایع دستی جوامع پیشین را به ما نشان می‌دهد. رادیوگرافی در تشخیص تکنیک تولید این آثار نقش بسیار مهمی دارد. جزئیات ساختاری یک شیء همیشه سریعاً به چشم نمی‌آید و ممکن است شیء در زیر لایه‌هایی از خوردگی‌ها و الحاقات پنهان شده باشد. رادیوگرافی غالباً برای آشکار کردن این نشانه‌های پنهان در تکنیک ساخت اثر به کار گرفته می‌شود.

رادیوگرافی یکی از روش‌های مهم تست‌های غیر مخرب است که برای شناسایی عیوب داخلی اعم از فلزی و غیر فلزی به کار می‌رود و بر اساس اختلاف در جذب اشعهٔ نافذ به وسیلهٔ قطعهٔ مورد بازرسی و با استفاده از تشعشعات الکترومغناطیسی با طول موج‌های خیلی کوچک یا تشعشعات ذره‌ای انجام می‌شود. به خاطر اختلاف در چگالی و تغییر در ضخامت قطعه یا اختلاف در خواص جذب که به سبب اختلاف در ترکیب و وجود عیوب است، قسمت‌های مختلف قطعهٔ مورد آزمایش، مقادیر مختلفی از اشعه‌ی نافذ را جذب می‌کنند (Middleton, Lang, 2005: 49).

یکی از اهدافی که به منظور آن رادیوگرافی انجام می‌شود، مطالعهٔ فلز از نظر ساختاری است که آیا مغز فلزی دارد یا خیر؟ این روش برای مجسمه‌های برنزی توخالی کاربرد ندارد (بخشنده فرد، ۱۳۸۹).

روش کار

در رادیوگرافی از اشعهٔ ایکس استفاده می‌شود که در این روش باید سه مسئله را مد نظر قرار داد: نوع و جنسیت شیء، میزان اختلاف پتانسیل (بر حسب

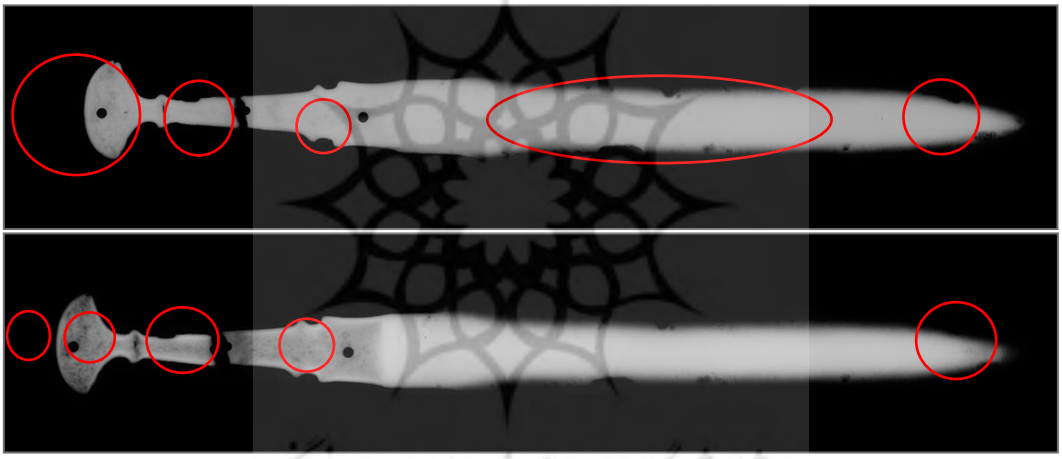
کیلوولت)، و میزان شدت جریان بر حسب میلی‌آمپر بر ثانیه یا دقیقه (بخشنده فرد، ۱۳۸۹).

نتایج و بحث

اشیای مورد مطالعه توسط دستگاه اشعهٔ ایکس مدل جیلاردونی ساخت ایتالیا با دو اختلاف پتانسیل متفاوت و زمان‌های متفاوت و شدت جریان ۴/۵ میلی‌آمپر در معرض اشعهٔ ایکس قرار داده شدند. مشاهدات به شرح زیر است:

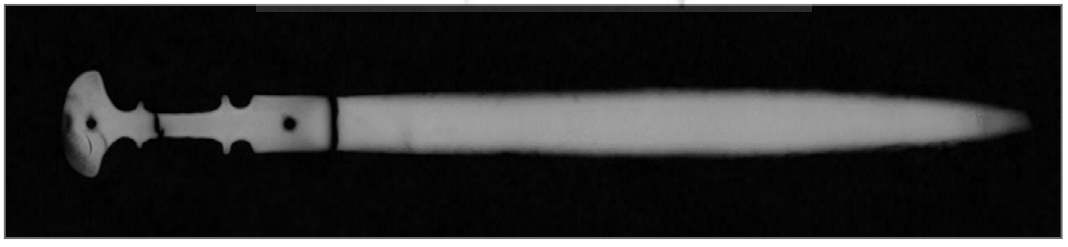
در تصاویر رادیوگرافی ترک‌ها و قسمت‌های خورده-شده و آسیب‌دیده مانند انتهای تیغه و ابتدای دسته، به سببِ آسیب‌دیدگی اشعهٔ ایکس را از خود عبور داده و چگالی کم‌تری نسبت به مغز فلزی دارند و بنابراین تیره-تر دیده می‌شوند. قسمت‌های روشن‌تر مغز فلزی شیء را نشان می‌دهد که به دلیل چگال بودن، اشعه را از خود عبور نداده است. سوراخ‌های مربوط به تزیینات احتمالی روی دسته و تیغه نیز مشاهده شد. اتصال یا پرچی در هیچ‌کدام از خنجرها مشاهده نشد. با توجه به یکسان بودن شدت جریان و مدت زمان صرف‌شده، تفاوت میزان خوردگی‌های ثبت‌شده در تصاویر ۶ و ۸ با تصاویر ۷ و ۹ می‌تواند به علت تفاوت در اختلاف پتانسیل باشد. در تصاویری که اختلاف پتانسیل بیش‌تر بوده، میزان خوردگی‌های بیش‌تری ثبت شده است.

تصویر رادیوگرافی شیء شمارهٔ یک



تصویر ۶. ترک‌ها، خوردگی‌ها، و سوراخ‌ها در تصویر رادیوگرافی یک طرف شیء شمارهٔ یک با اختلاف پتانسیل ۷۰ کیلو ولت و شدت جریان ۴/۵ میلی‌آمپر در دو دقیقه و فاصلهٔ نیم‌متری شیء از مبدأ اشعه (مأخذ: نگارنده).

تصویر رادیوگرافی شیء شمارهٔ دو



تصویر ۷. ترک‌ها، خوردگی‌ها، و سوراخ‌ها در تصویر رادیوگرافی طرف دیگر شیء شمارهٔ یک با اختلاف پتانسیل ۸۰ کیلوولت و شدت جریان ۴/۵ میلی‌آمپر در دو دقیقه و فاصلهٔ نیم متری شیء از مبدأ اشعه (مأخذ: نگارنده).

متالوگرافی

هدف

متالوگرافی عبارت است از بررسی و مطالعهٔ سطحِ مقطعِ فلزات و آلیاژها. هدف از متالوگرافی تعیین ساختمان داخلی و بررسی آن از نظر دانه‌بندی، مرز دانه‌ها یا توزیع دانه‌ها، و فازهای تشکیل‌دهندهٔ فلز است. علاوه بر آن می‌توان مشخصات ساختمانی، برخی از انواع اثرات کار مکانیکی، کشف عیوب ریز، ذرات غیر - فلزی، ترک‌های کوچک و در برخی موارد تعیین عناصر شیمیایی آلیاژها را نیز در زمرهٔ اهداف مطالعات متالوگرافی قرار داد (بخشنده فرد، ۱۳۸۹).

روش کار:

برای بررسی و مطالعات سطح مقطع یک فلز باید مراحل زیر را طی کرد: نمونه‌برداری از قطعهٔ مورد نظر، مانت کردن، آماده کردن سطح نمونه (سنگ‌زنی، سنباده زدن، پولیش کردن، و اچ کردن)، بررسی سطح مقطع به طریق میکروسکوپی، و ماکروسکوپی.

اچ کردن:

اچ کردن عبارت است از خوردگی سطح فلز به وسیلهٔ یک مایع خورنده که معمولاً نوعی اسید است. بعضی از فلزات بدون اچ کردن تا حدودی ساختمان خود را نشان می‌دهند (مانند چدن خاکستری و یا گرافیت کروی که بدون اچ کردن گرافیت‌هایش مشخص است). هنگام اچ کردن مرز دانه‌ها و مناطق پرانرژی سطح خورده‌شده و دانه‌بندی قطعهٔ کار مشخص می‌شود. همچنین دانه‌ها و فازهای مختلف ماده در مقابل مواد خورنده با شدت‌های متفاوتی خورده می‌شوند و این خود موجب تشخیص آنها از یکدیگر می‌شود (بخشنده فرد، ۱۳۸۹).

هدف از انجام اچ شیمیایی، ظاهر کردن فازهای مختلف تشکیل‌دهندهٔ نمونه است. گاهی اوقات اچ شیمیایی برای نشان دادن ناهماهنگی‌های ساختمانی، تصویر فازهای تشکیل‌دهنده، نقص‌های سطحی و غیره به کار می‌رود. به جز برخی از موارد عمل اچ کردن معمولاً به روش غوطه‌وری انجام می‌گیرد. سطح نمونه باید پولیش شود و سپس نمونه در داخل محلول اچ گذاشته شده و در طی مدت اچ کردن به آرامی در داخل محلول حرکت داده شود. این مدت زمان بسته به ساختار نمونه از ۲ ثانیه تا ۱۰ ثانیه و حتی بیش‌تر، متغیر است. محلول اچ مورد استفاده برای مفرغ شامل ۱۲۰ میلی‌لیتر اتانول، ۳۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک غلیظ، و ۱۰ گرم $FeCl_3$ است (Scott D. A., 1992:72). پس از اچ کردن و شستشوی نمونه با الکل و خشک کردن آن با هیتر، نمونه زیر میکروسکوپ بررسی می‌شود.

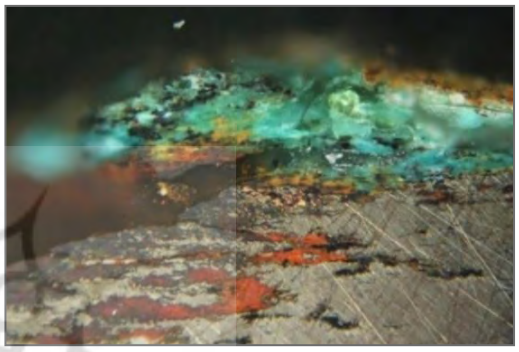
نتایج و بحث

تصاویر نمونه‌ها قبل از اچ شدن

تصویر ۱۰. اچ شدن طبیعی قبل از اچ شدن شیمیایی و مرزهای دانه‌بندی نمونه با زمینهٔ روشن و بزرگ‌نمایی ۱۰۰ برابر زیر میکروسکوپ نوری (مأخذ: نگارنده).

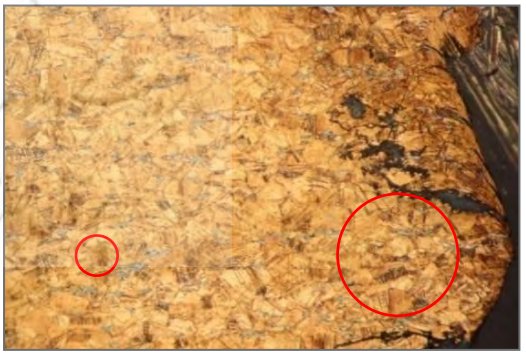
تصویر ۱۱. خوردگی‌های نمونه قبل از اچ شدن با زمینهٔ تیره توسط فیتر پولاریزان و بزرگ‌نمایی ۱۰۰ برابر زیر میکروسکوپ نوری (مأخذ: نگارنده).

تصویر ۱۲. خوردگی‌های نمونه با زمینهٔ روشن و بزرگ‌نمایی ۱۰۰ برابر قبل از اچ شدن زیر میکروسکوپ نوری (مأخذ: نگارنده).

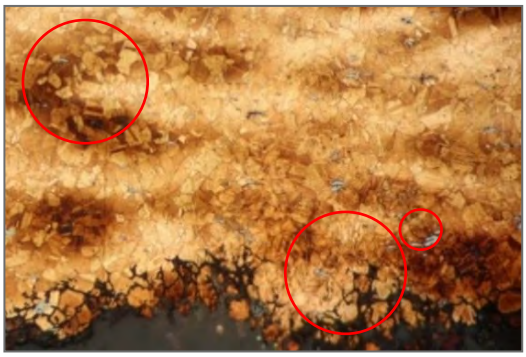


تصویر ۱۳. خوردگی‌های نمونه با زمینهٔ تیره توسط فیلتر پولاریزان و بزرگ‌نمایی ۱۰۰ برابر قبل از اچ شدن زیر میکروسکوپ نوری (مأخذ: نگارنده).

تصاویر نمونه‌ها پس از اچ شدن



تصویر ۱۴. آخال‌ها و خطوط لغزش و دوقلویی در تصویر نمونهٔ یک با زمینهٔ روشن و بزرگ‌نمایی ۲۰۰ برابر پس از اچ شدن زیر میکروسکوپ نوری (مأخذ: نگارنده).



تصویر ۱۵. تصویر نمونهٔ دو با زمینهٔ روشن و بزرگ‌نمایی ۲۰۰ برابر پس از اچ شدن و خطوط لغرش و دوقلویی و مرزبندی دانه‌های فلزی و آخال زیر میکروسکوپ نوری (مأخذ: نگارنده).

هدف از اچ کردن شیمیایی، تحت اثر قرار دادن نمونه توسط یک خورندهٔ شیمیایی و مشخص شدن دانه‌بندی و مرز بین دانه‌های ساختار فلزی است که در تصاویر ۱۰ و ۱۲ مشاهده می‌شود که این عمل به صورت طبیعی انجام شده و مرزبندی دانه‌های فلزی توسط خوردگی مرزدانه‌ای و میان‌دانه‌ای تقریباً مشخص است.

پس از اچ شدن، خطوط دوقلویی ناشی از تابکاری در تصاویر ۱۴ و ۱۵ مشاهده شد. خطوط دوقلو نشان‌دهندهٔ این است که شیء ابتدا چکش‌خورده و سپس حرارت دیده است. همچنین خطوط دیگری که پس از آنیلینگ (بازپخت) و سردکاری روی کریستال‌ها ایجاد می‌شود، خطوط لغزش یا کرنش نامیده می‌شوند. این خطوط نشان می‌دهند که کریستال‌های فلز پس از چندین مرحله چکش‌کاری و آنیلینگ در آستانهٔ از هم پاشیدن قرار گرفته اند. این فلزات زودتر در معرض فرایندهای خوردگی از خود تصویرالعمل نشان می‌دهند. آخال‌های کشیده‌شده در راستای طولی نیز در تصاویر ۱۴ و ۱۵ مشاهده شد. علل وجود آخال‌ها وجود نخاله در مادهٔ مذاب اولیه و خالص نبودن آلیاژ یا قالب‌گیری کثیف و جاگذاری نادرست ماهیچه است (بخشنده فرد، ۱۳۸۹).

میکروسکوپ الکترونی

هدف

امروزه روش‌های متفاوتی برای تحلیل ترکیبات فلزی وجود دارد که استفاده میکروسکوپ الکترونی روبشی

(SEM) یکی از این روش‌هاست. میکروسکوپ الکترونی روبشی یا SEM نوعی میکروسکوپ الکترونی است که قابلیت تصویربرداری از سطوح با بزرگ‌نمایی ۱۰ تا ۵۰۰۰۰۰ برابر با قدرت تفکیکی کم‌تر از ۱ تا ۲۰ نانومتر (بسته به نوع نمونه) را دارد (Scott D. A., 2002: 7).

این میکروسکوپ درواقع واحدی است مجتمع از گروهی تجهیزات، و خاصیت مشترک آنها تشکیل تصویر میکروسکوپی، بزرگ‌نمایی الکترونی، و استفاده از اشعهٔ الکترونی برای بررسی تصویر است. وجه تمایز آنها نیز در نوعِ اثر متقابلی است که بین برخورد الکترون‌ها و سطح نمونه رخ می‌دهد. شدت اثر متقابل ارتباط مستقیمی با تصویر حاصل‌شده دارد و به این ترتیب اطلاعات لازم از تصویرِ بزرگ‌نمایی‌شده استخراج می‌شود (بهرامی، ۱۳۸۱: ۳۸).

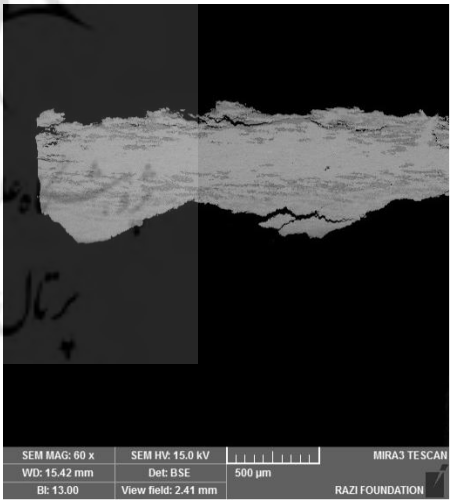
روش کار

در این پژوهش از میکروسکوپ الکترونیِ روبشی نشر میدانی (FE-SEM) مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN استفاده شد. ابتدا تصاویری با بزرگ‌نمایی‌های متفاوت از قسمت‌های مختلف نمونه گرفته شد، و چند ناحیهٔ متفاوت از لحاظ ساختاری مشخص شد و درصد وزنیِ عناصرِ مختلف در این نقاطِ مشخص‌شده و کل نمونه به صورت داده‌های نیمه‌کمی، به همراه نمودار فراوانی عناصر مشخص شد.

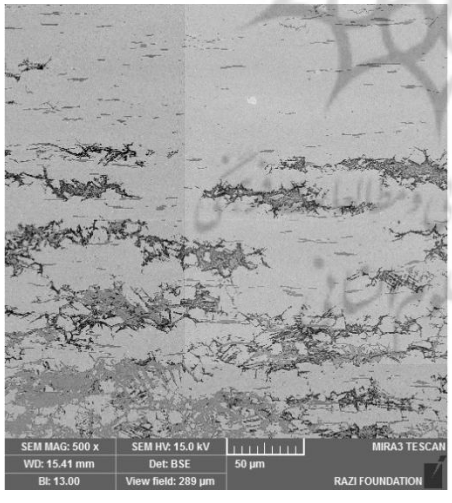
در آنالیز خطی که با میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد، یک خط در نمونه در نظر گرفته شد و از ابتدا تا انتهای این خط، سی نقطه از لحاظ ساختاری تحلیل شد و میانگین درصد وزنیِ عناصر مختلف در این سی نقطه به صورت داده‌های نیمه‌کمی در جدول و نمودار فراوانی مشخص شد. در این پژوهش از تیغهٔ شیء دو نمونه برداری شد.

تصاویر EDAX-BSE و نمودارهای فراوانی و اسکن خطی از تیغهٔ شیء دو.

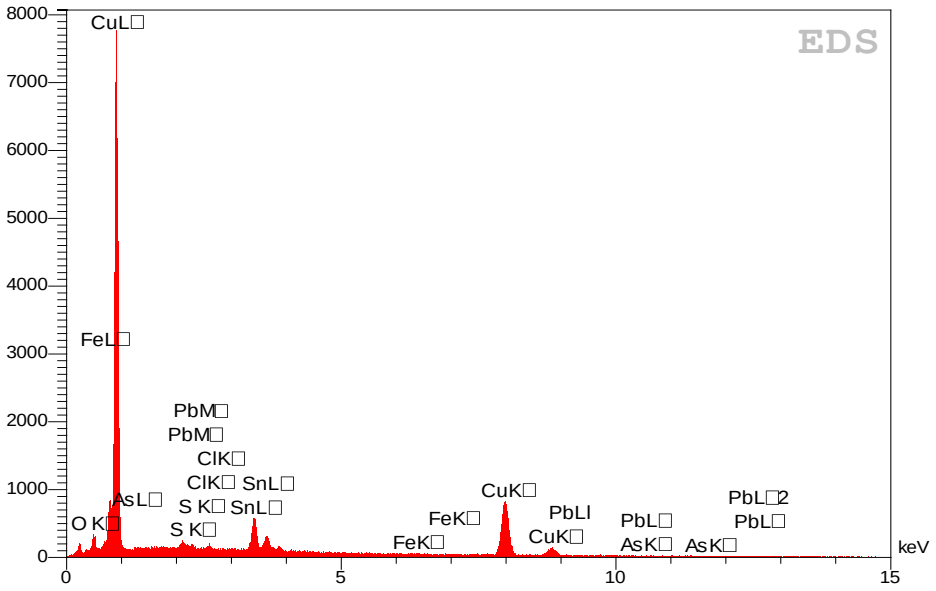
تصاویر EDAX-BSE تیغهٔ شیء دو با بزرگ‌نمایی‌های متفاوت.



در تصویر ۱۶. تصویر EDAX نمونه از تیغهٔ شیء دو توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگ‌نمایی ۶۰ برابر و قدرت تفکیک ۵۰۰ میکرومتر (مأخذ: نگارنده).



تصویر ۱۷ – تصویر EDAX نمونه از تیغه‌ی شیء دو توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگ نمایی ۵۰۰ برابر و قدرت تفکیک ۵۰ میکرومتر – مأخذ: نگارنده



نمودار ۱. نمودار نیمه‌کمی فراوانی عناصر در تیغهٔ شیء دو پس از تحلیل توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (مأخذ: نگارنده)

تصویر ۱۷ آخال‌های کشیده که ناخالصی‌های موجود در آلیاژ است به همراه خوردگی‌های مرز بین‌دانه‌ای که نتیجهٔ اچ‌شدن طبیعی است، مشاهده شد.

در این نمونه، میزان فراوانی عناصر به شرح زیر است:

عنصر	درصد وزنی
اکسیژن	۲۲/۹۹
گوگرد	۰/۹۹
کلر	۱/۰۸
آهن	۰/۲۰
مس	۶۵/۰۵
ارسنیک	۰/۷۸
قلع	۸/۷۰
سرب	۰/۲۲
جمع کل	۱۰۰/۰۰

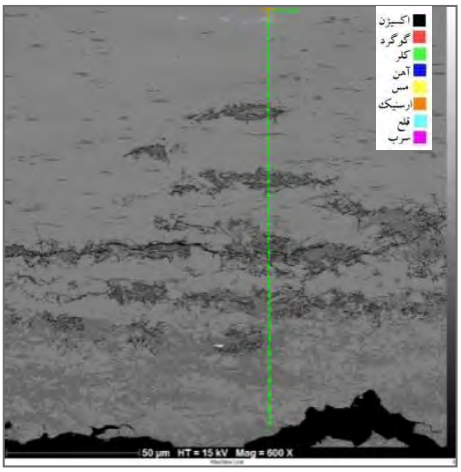
جدول ۴. وزنی عناصر موجود در نمونهٔ دو از تیغهٔ شیء دو پس از تحلیل توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (مأخذ: نگارنده).

درصدِ وزنیِ اکسیژن مشاهده‌شده در این نمونه نسبت به میزان مس و قلع، مقدار اکسید قابل توجه موجود در این قسمت از شیء را نشان می‌دهد. در مشاهدهٔ ماکروسکوپی هم رنگ قرمز و قهوه‌ای این قسمت از تیغهٔ شیء، بیانگر اکسیدی بودن آن بود. میزان سایر عناصر کم و قابل چشم‌پوشی است.

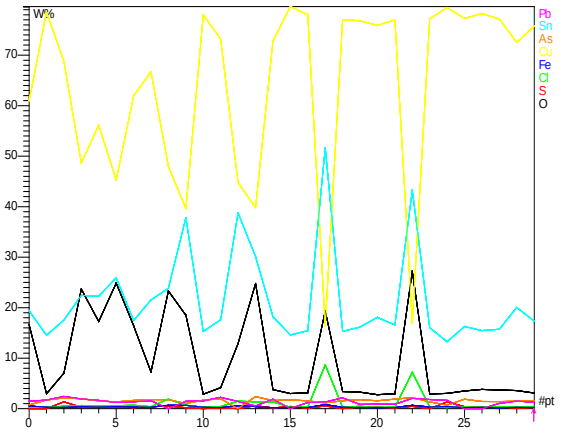
میانگین فراوانی عناصر در سی نقطهٔ اسکن‌شده در راستای یک خط فرضی در نمونهٔ دو از تیغهٔ شیء دو به شرح زیر است:

عنصر	درصد وزنی
اکسیژن	۹/۸۴
گوگرد	۰/۳۲
کلر	۱/۰۶
آهن	۰/۳۶
مس	۶۳/۹۵
ارسنیک	۱/۵۶
قلع	۲۱/۶۰
سرب	۱/۳۰
جمع کل	۱۰۰/۰۰

جدول ۵. میانگین کمی فراوانی عناصر در نقاط اسکن‌شده در آنالیز خطی نمونهٔ دو از تیغهٔ شیء دو (مأخذ: نگارنده).



تصویر ۱۸. اسکن خطی نمونهٔ دو از تیغهٔ شیء دو توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگ نمایی ۶۰۰ برابر و قدرت تفکیک ۵۰ میکرومتر (مأخذ: نگارنده).



نمودار ۲. میزان فراوانی عناصر مختلف در سی نقطهٔ اسکن‌شده در آنالیز خطی نمونهٔ دو از تیغهٔ شیء دو (مأخذ: نگارنده).

در در آنالیز خطی مشاهده شد در نقاطی که اکسیژن افزایش یافته است، میزان مس کاهش یافته و به همین نسبت میزان قلع نیز افزایش یافته است. بنابراین در این نمونه اکسید مس وجود دارد. هرجا اکسیژن در کنار مس حضور داشته، میزان قلع افزایش یافته است. سایر عناصر مقادیری ناچیز و قابل چشم‌پوشی دارند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش بر اساس مطالعات کتابخانه‌ای و آزمایشگاهی فن‌شناسی دربارهٔ دو خنجر مفرغی انجام شد. از مطالعات دوره‌های تاریخی و تطبیق اثر با نمونه‌های مشابه این نتیجه حاصل شد که این خنجرها متعلق به منطقهٔ لرستان و دورهٔ تاریخی اواخر عصر مفرغ و اوایل عصر آهن در ایران هستند.

به دلیل وجود لبه‌ها و دندانه‌های قرینه و منظم روی دسته، این نتیجه حاصل شد که این شیء به صورت قالب دوکفه‌ای ریخته‌گری شده است و با توجه به آثار چکش‌کاری روی تیغهٔ خنجرها در مشاهدات ماکروسکوپی و انجام متالوگرافی، این نتیجه حاصل شد که پس از ریخته‌گری، اشیا چکش‌کاری نیز شده اند.

ساختار فلزی مشاهده‌شده در نمونه‌های متالوگرافی نشان‌دهندهٔ شواهدی دال بر بازپخت و چکش‌کاری‌های سرد بود. خطوط دوقلویی بین دو ذرهٔ تقسیم‌شده و خطوط لغزش ایجادشده روی ذرات نشان‌دهندهٔ این امر است. ناخالصی‌هایی نیز در ساختار فلزی مشاهده شد که آخال نامیده می‌شوند و نشان‌دهندهٔ ناخالص بودن مواد مذاب اولیهٔ ساخت آلیاژ است.

در آزمون‌هایی که به روش شیمی تر انجام شد، عناصر تشکیل‌دهندهٔ این آلیاژها مس و قلع و سرب تشخیص داده شدند که در که عناصر اصلی آلیاژ مفرغ اند و با توجه به میزان کم سرب می توان گفت احتمالا این میزان به مثابه ناخالصی در مواد مذاب اولیه وجود داشته و استفاده از آن آگاهانه نبوده است.

با انجام رادیوگرافی، یکپارچه بودن اشیا مشاهده شد و هیچ‌گونه اتصال، پرچ، لحیم، و تزیینات دیده نشد. قسمت‌هایی از اشیا که دچار خوردگی شده است و چگالی کم‌تری نسبت به مغز فلزی دارد، اشعهٔ ایکس را از خود عبور داده و خود را خاکستری‌رنگ نشان داده است. اشیا دارای مغز فلزی قابل توجهی بودند.

در تصاویر EDAX و نمودارهای فراوانی و اسکن خطی به‌دست‌آمده از میکروسکوپ الکترونیِ روبشی از مغز فلزی یکی از اشیاء، درصد بالایی از مس و قلع (و همچنین میزان کم و قابل چشم‌پوشی از سایر عناصر

مانند سرب، ارسنیک، آهن ، کلر، گوگرد، اکسیژن) شناسایی شد که نشان‌دهندهٔ وضع مطلوب آلیاژ از نظر فنی وتکنیکی است.

منابع

بخشنده فرد، حمیدرضا. (۱۳۸۹). بررسی آثار تاریخی فلزی در مرمت. اصفهان: دانشگاه هنر اصفهان.

بخشنده فرد، حمیدرضا و غ. وطن خواه و و. پورزرقان. (۱۳۸۸). «مروری بر روش‌های حفاظتی در برابر بیماری برنز». در دانش مرمت و میراث فرهنگی، ش۳، ص۸۲.

بهرامی، جلال. (۱۳۸۱). «ابزار شناسی ساختار مواد». در کتاب ماه علوم و فنون، ش ۵۳ ، ص ۳۸.

سکایا، مدود. (۱۳۸۳). ایران در عصر آهن ۱. ترجمهٔ علی‌اکبر وحدتی. تهران: پژوهشکدهٔ باستان‌شناسی سازمان میراث فرهنگی و گردشگری.صص ۳۸-۲۲۱.

طلایی، حسن. (۱۳۸۵). عصر مفرغ ایران. تهران: سمت.

طلایی، حسن. (۱۳۸۶). باستان‌شناسی و هنر ایران در هزارهٔ اول قبل از میلاد. تهران: سمت.

طلایی، حسن. (۱۳۸۷). عصر آهن ایران. تهران: سمت.

غلامعلی، ه. (۱۳۵۳). هنر ساکنین فلات ایران (از آغاز پارینه سنگی تا آغاز تاریخ). در بررسی های تاریخی، ش۵۳، ص ۱۰۱_ ۱۴۸.

فرشاد، ف. (۱۳۵۵). «نخستین سازندهٔ آلیاژ فلزات ایرانیان بوده اند». در گوهر، ش۳۷، ص ۴۳_ ۴۴.

گراوند، م. (۱۳۹۱). حفاظت و مرمت یک خنجر برنزی متعلق به موزهٔ خصوصی حسین پناه. پایان نامه کارشناسی. دانشگاه هنر اصفهان.

مرکز پژوهش متالوژی رازی. (۱۳۹۵). آزمایشگاه مواد معدنی (آزمایشگاه XRF/XRD). بازیابی از مرکز پژوهش متالوژی رازی:
http://www.razi-center.net/ farsi/ XRFandXRD_testing.aspx.

ورجاوند، پرویز. (۱۳۵۷). «تمدن‌های پیش از تاریخ آسیای میانه (ماوراء النهر)». در بررسی‌های تاریخی، ش۷۷، ص ۱۹۷ــ ۲۳۴.

Odegaard, Nancy & Scott Carroll & Werner S. Zimmt. (2005). Material characterization tests of objects of art and archaeology. Archetype Books.

Middleton, Andres & Janet Lang. (2005). Radiography of cultural material. Elsevier Butterworth-Heinemann.

Khorasani, M. M. (2006) .Arms and Armor from Iran The Bronze Age to the End of the Qajar Period: Bronze and Iron Weapons from Iran. Legat Verlag.

Khorasani, M. M.(2009) .Bronze and iron weapons from Luristan.

Medvedskaya, I. N. (1982). Iran: Iron Age I. B.A.R.

Scott, D. A. (1990)." Bronze Disease: A review of some chemical problems and the role of relative humidity". in Iournal of American Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, pp.193-206.

Scott, D. A. (1992) .Metallography and microstructure of ancient and historic metals. Oxford University Press.

Scott, D. A. (2002). Copper and Bronze in Art: Corrosion, Colorants, Conservation. Getty Publications.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی