

مطالعات میکروسکوپی بر روی اشیاء آهنی باستانی به دست آمده از کاوش‌های باستان‌شناسی شمال ایران

علیرضا جعفری *

کارشناس ارشد مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی، دانشگاه هنر اصفهان
alireza_jafarii1988@yahoo.com

امید عودباشی

استادیار گروه مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی، دانشگاه هنر اصفهان

مهدی عابدینی عراقی

کارشناس ارشد سازمان میراث فرهنگی و صنایع دستی و گردشگری استان مازندران

شناسه ی دیجیتال (DOI): 10.22084/NBSH.2017.13218.1579

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۳۱

(از ص ۱۳۱ تا ۱۴۷)

چکیده

در این مقاله، ریزساختار تعدادی اشیاء آهنی باستانی با استفاده از روش‌های میکروسکوپی و میکرو آنالیز شامل متالوگرافی و میکروسکوپی الکترونی روبشی مجهز به آنالیز طیف‌سنجی پراش اشعه‌ی ایکس (SEM-EDS) مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف از مطالعه‌ی این اشیاء، شناسایی ریزساختار و روش‌های مورد استفاده در ساخت این اشیاء است. نمونه‌های مورد مطالعه شامل ۳ شیء آهنی متعلق به محوطه‌ی پهلوج (ساسانی) و ۲ شیء آهنی متعلق به محوطه‌ی لفورک (عصر آهن III) واقع در منطقه‌ی لفور استان مازندران است که در طرح نجات بخشی سال ۱۳۸۷ به منظور احداث سد البرز، مورد کاوش قرار گرفتند. سؤال مطرح شده در پژوهش این است که، آیا از روشی مشابه در دوره‌های مختلف جهت تولید اشیاء آهنی در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است؟ دلیل انتخاب این نمونه‌ها، کشف آن‌ها از دو محوطه‌ی نزدیک به هم در منطقه و متعلق به دو دوره‌ی مختلف، جهت مطالعه‌ی تفاوت‌ها و شباهت‌های احتمالی تکنیک تولید و استفاده از آهن در ساخت اشیاء در دوران باستان است. مشاهدات میکروسکوپی و نتایج آنالیز عنصری نمونه‌ها، نشان می‌دهد که اشیاء مذکور دارای خلوص بالای آهن هستند که می‌توان این خلوص بالا را مربوط به دمای بالای کوره و میزان کار زیاد بر روی اشیاء دانست. آخال‌های کشیده و کروی شکل مشاهده شده در ریزساختار اشیاء حاوی میزان نسبتاً زیادی از عناصر آهن و اکسیژن هستند؛ علاوه بر این، وجود عناصر دیگر نشان‌دهنده‌ی ناخالصی موجود در ترکیب آخال‌ها است. در تصاویر تهیه شده از نمونه‌های مورد مطالعه به روش میکروسکوپی، ساختار فریتی، دانه‌های متفاوت از لحاظ اندازه و آخال‌های پراکنده در اندازه‌های مختلف دیده می‌شود. تفاوت در اندازه‌ی دانه‌های فریتی و آخال‌ها نشان‌دهنده‌ی انجام کار گرم متناوب و میزان متنوع چکش‌کاری است. نمونه‌ای متفاوت از محوطه‌ی پهلوج، دارای ساختار سوزنی شکل، لایه‌ای و تیره‌رنگ، با ساختار مارتنزیتی است. به طور کلی شواهد به دست آمده از نتایج نمونه‌های مورد بررسی، بیانگر استفاده از آهن کار شده برای ساخت اشیاء آهنی دو محوطه است.

کلیدواژگان: شمال ایران، آهن باستانی، عصر آهن III، ساسانی، مطالعه‌ی فنی، روش‌های میکروسکوپی.

مقدمه

دانش استفاده از فلزات یا متالورژی جهت تولید اشیاء و ابزار متنوع را می‌توان یکی از فن‌آوری‌های کهن در طول تاریخ دانست. سابقه‌ی کاربرد فلزات در ایران به بیش از ۹۰۰۰ سال قبل باز می‌گردد (Oudbashi, 2012; Thornton, 2009). امروزه مطالعه‌ی ماهیت فلزات باستانی یکی از موضوعات مهم و مورد توجه محققین است. این مطالعات در زمینه‌های مختلفی مانند شناسایی ماهیت مواد به‌کار رفته، روش‌های ساخت و شکل‌دهی فلزات در دوران باستان انجام می‌شوند. با توجه به اهمیت و رشد مطالعات چند دهه‌ی اخیر بر روی دست‌ساخته‌های فلزی باستانی در سطح دنیا، این موضوع در ایران نیز بیش‌ازپیش مورد توجه قرار گرفته است. کشف مواد گوناگون باستانی، وجود آثار متنوع متعلق به دوره‌های مختلف تاریخی در موزه‌ها از یک سو و اهمیت و جذابیت موجود در نتایج حاصل از مطالعه‌ی مواد باستانی از سوی دیگر، موجب توسعه‌ی مطالعات آزمایشگاهی بر روی مواد آهنی باستانی و نیز رشد انتشار نتایج این‌گونه پژوهش‌ها در ایران شده است (امین‌صدری، ۱۳۹۰؛ نقوی، ۱۳۹۱؛ شیرمردی، ۱۳۹۳). در حقیقت، نتایج مطالعات آزمایشگاهی بر روی اشیاء آهنی باستانی به‌شناخت، حفظ و معرفی آثار باقی‌مانده کمک می‌کند.

ریزساختار آثار فلزی تاریخی به‌عوامل مختلفی از قبیل سرعت سرد شدن، ماهیت فلز و مقدار ناخالصی‌های موجود در فلز مورد استفاده برای ساخت آثار فلزی بستگی دارد؛ علاوه بر آن، ریزساختار هر شیء فلزی تاریخی، نشان‌دهنده‌ی نوع کار انجام شده بر روی آن است (Scott, 1991: 57). آهن، فلزی خاکستری‌رنگ است و امروزه یکی از متداول‌ترین و شناخته‌شده‌ترین فلزات است. آهن در زندگی روزمره‌ی انسان‌ها به‌صورت مصنوعات تولید شده استفاده می‌شود. این فلز در مقایسه با گزینه‌های دیگر ارزان بوده و یک ماده‌ی مناسب و با قابلیت‌های متنوع برای ساخت‌وساز است. ضعف مهم آهن، تمایل به زنگ‌زدن و خورده شدن است (Scott 1991: 57; Eggert, 2009: 10; Narain, & K Jain, 2009: 13-14). اشیاء ساخته شده از آهن در مجموعه‌های بسیاری از موزه‌ها یافت می‌شوند؛ همچنین از لحاظ خصوصیات متالورژیکی و ساختاری آهن از استثنائات مهم در بین فلزات به‌شمار می‌رود و در دماهای مختلف اشکال شبکه‌ای متعددی را اتخاذ می‌نماید (استوارت، ۱۳۹۳: ۵۶؛ فونتانا، ۱۳۷۳: ۴). روش‌های تولید آهن فلزی از سنگ معدن در طول تاریخ تغییر کرده است (از تولید آهن کار شده تا تولید فولاد). در آغاز، با پالایش آهن در کوره‌های کوچک دستی، این فلز را برای ساخت زیورآلات، در ردیف طلا و نقره استفاده می‌کردند (احسانی، ۱۳۸۶: ۵۴)، ولی پس از شناخت خواص فیزیکی آن در قبال نرمی مس و شکنندگی مفرغ، انسان پیش‌ازتاریخ به مزایای مقاومت آهن و فواید به‌کار گرفتن آن در کشاورزی، معماری و ساخت ابزار جنگی و سایر لوازم زندگی پی‌برد (Buchwald & Wivel, 1998). تولید فلز آهن از سنگ معدن در اواسط هزاره‌ی دوم قبل‌ازمیلاد آغاز شد، اما تعدادی از آثار آهن باستانی زودتر شناخته شده‌اند. همچنین می‌توان گفت که در فرآیند ذوب سنگ‌های حاوی عناصر فلزی، مس زودتر از آهن ذوب شده و استحصال می‌شود؛ در نتیجه مواد باقی‌مانده می‌تواند

حاوی آهن باشد، اما در فرآیند ذوب در یک بازه‌ی زمانی خاص قابل استفاده نباشد. آهن ابتدا در گونه‌هایی از شهاب‌سنگ‌ها (Meteoric Iron) شناخته شد، که این فلز را به صورت تقریباً خالص در خود داشته و البته معمولاً حاوی مقداری نیکل نیز بوده است. اولین آثار آهن باستانی شناخته شده، مهره‌های کوچکی متعلق به حدود ۳۲۰۰ سال قبل از میلاد، از دو تدفین در گِره (Gerzeh) در شمال مصر هستند. این مهره‌ها از شهاب‌سنگ به دست آمده، به دقت چکش‌کاری شده و به صفحات نازکی ساخته شده‌اند (Rehren et al., 2013). در بسیاری از موارد، اشیاء تاریخی حاوی آخال و بقایای سرباره‌ها هستند که بسته به میزان و نوع کار، اندازه و شکل آن‌ها دچار تغییر می‌شود. در برخی مطالعات، محققین با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و آنالیزهای دستگاهی از قبیل مشاهدات میکروسکوپی نوری و الکترونی (SEM-EDS) به بررسی و توصیف فلزات پرداختند (Pingitore et al., 2002; Dillmann et al., 2015). برای مطالعه‌ی ریزساختارهای اشیاء آهنی مورد مطالعه می‌توان از میکروسکوپ نوری بهره برد. ریز ساختار اشیاء فلزی تاریخی، نشان‌دهنده‌ی نوع کار انجام شده بر روی آن‌ها است. اهمیت مطالعات بر روی آثار آهنی به دست آمده از دو محوطه‌ی تاریخی لفورک و پهلوج می‌تواند در شناسایی ریزساختار دو گروه اشیاء متعلق به دوره‌ی زمانی متفاوت، با مختصات جغرافیایی نزدیک به هم به کمک محققین علوم آید. مطالعه‌ی ساختاری و فنی نمونه‌های مذکور می‌تواند به شناخت ویژگی‌ها و شرایط بهبود نگه‌داری آثار آهنی نیز کمک کرده و تکنیک ساخت و پیشرفت صنعت فلزکاری دوره‌های ساخت آثار را شناسایی و معرفی کند. در این مقاله، پنج شیء باستانی ساخته شده از آهن، به دست آمده از دو محوطه‌ی لفورک (عصر آهن III) و پهلوج (دوره ساسانی) مازندران که در یک ناحیه جغرافیایی قرار گرفته‌اند، با استفاده از روش‌های میکروسکوپی و آنالیز دستگاهی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. هدف از این پژوهش، شناسایی ریزساختار و تأثیر کار انجام شده بر روی ویژگی‌های ریزساختاری اشیاء است.

اهداف و سؤالات مورد نظر در این تحقیق، شامل: شناسایی ریزساختار و مطالعه تفاوت‌ها و شباهت‌های بین نمونه‌های دو محوطه‌ی (لفورک و پهلوج) مشابه از لحاظ مکانی و متفات از نظر زمانی است. سؤالات پژوهش را می‌توان این گونه مطرح نمود که، از لحاظ فن‌شناسی و ریز ساختاری، نمونه‌های به دست آمده از محوطه‌های لفورک و پهلوج چه ویژگی‌های دارند؟ ریزساختار آثار آهنی محوطه‌های مذکور در مقایسه با یکدیگر دارای چه شباهت‌ها یا تفاوت‌هایی هستند؟

مطالعه بر روی ساختار آثار آهنی تاریخی در ایران موضوعی جدید بوده و نسبت به فلزاتی مانند آلیاژهای مس، کمتر مورد توجه قرار گرفته است؛ اما در اروپا تحقیقات گسترده‌ای بر روی ساختار و فرسایش این گونه آثار صورت گرفته است. فیلیپ دیلمن و همکاران، و نف و همکاران در فرانسه، مطالعات و آزمایشات گسترده‌ای بر ساختار آهن تاریخی مدفون در خاک، به منظور شناخت ساختاری ویژه و بهبود شرایط فلز در مواجهه با محیط خورنده برای دفن تفاله‌های هسته‌ای در بشکه‌های فلزی انجام می‌دهند (Dillmann et al., 2002; Neff et al., 2005; Neff et al., 2006). ریزساختار

آثار فلزی تاریخی به عوامل مختلفی از قبیل: سرد شدن، ماهیت فلز و... بستگی دارد و نشان دهنده‌ی نوع کار انجام شده بر روی آن است. امروزه براساس اهمیتی که شناخت ریزساختار آهن (به خصوص آهن تاریخی) در صنعت دفع تفاله‌های هسته‌ای پیدا کرده، موجب شده که توجه ویژه‌ای، خصوصاً در اروپا به این نوع آثار شود. در ایران مطالعات و تحقیقات بر روی آثار آهن تاریخی بسیار محدود بوده است. از این حیث ناحیه‌ی مازندران کمتر مورد توجه بوده و مطالعات محدودی در محدوده‌ی شناسایی ریزساختار بر روی سایر آثار فلزی این منطقه صورت گرفته است. از آن جایی که محوطه‌های لفورک و پهلوج سوادکوه، در حال حاضر به علت قرار گرفتن در محدوده‌ی آبیگری سد البرز، دیگر در دسترس نیستند، نمونه‌های باقی مانده از این منظر دارای اهمیت است که این دو محوطه دیگر قابل کاوش نیستند.

معرفی محوطه‌های باستانی

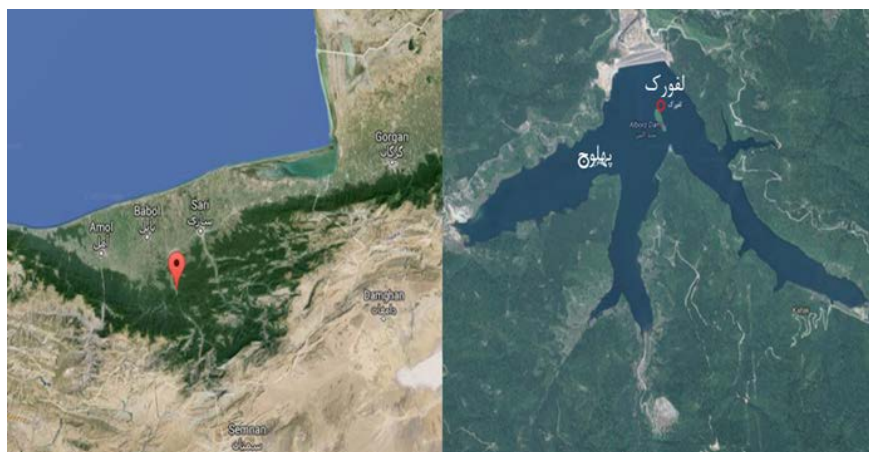
شهرستان سوادکوه در مرکز استان مازندران با مساحت ۲۰۷۸ کیلومتر مربع و در بین عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۹ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۳ دقیقه‌ی نیم‌کره‌ی شمالی و در بین طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۳۹ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۱۴ دقیقه‌ی نیم‌کره‌ی شرقی واقع شده است (عابدینی عراقی، ۱۳۸۷: ۱). شهرستان سوادکوه به چهار شهر شیرگاه، زیراب، پل سفید و آلاشت تقسیم می‌شود. دهستان لفور در ۳۰ کیلومتری جنوب غربی شهر شیرگاه قرار گرفته و دارای ۲۹ روستا بوده که از این تعداد، ۱۰ روستا به دلیل احداث سد البرز خالی از سکنه و تخلیه شده‌اند (تصاویر ۱ و ۲). این منطقه در کوه پایه‌های شمالی و پوشیده از جنگل البرز مرکزی قرار گرفته است و ارتفاع آن از سطح دریا بین ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ متر است و تمامی روستاهای منطقه‌ی لفور در حاشیه‌ی سه رودخانه‌ی آذررود، کارسنگ رود و گالش رود (اسکلیم رود) شکل گرفته‌اند (عابدینی عراقی، ۱۳۸۷: ۲). گورستان‌های لفورک و پهلوج در سال ۱۳۸۷ در طرح نجات بخشی به منظور احداث سد البرز توسط اداره‌ی کل میراث فرهنگی و صنایع دستی و گردشگری استان مازندران و به سرپرستی مهدی عابدینی عراقی مورد کاوش و حفاری قرار گرفتند (عابدینی عراقی، ۱۳۸۷: ۱۴). محوطه‌ی لفورک در مرکز دهستان لفور، به مختصات جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۳ دقیقه‌ی عرض شمالی و ۵۲ درجه و ۴۸ دقیقه‌ی طول شرقی و ارتفاع ۳۰۲ متر از سطح آب‌های آزاد قرار دارد. گورستان، مشرف بر دو دره‌ی آذررود و کارسنگ رود است. در بررسی‌های سطحی منطقه در برش جاده‌ی پایین دست گورستان، تعداد زیادی سفال عصر آهن به دست آمد که براساس نظریات و یافته‌های سرپرست کاوش، محوطه متعلق به عصر آهن III بوده است (عابدینی عراقی، ۱۳۸۷: ۱۰۲). در بررسی‌های سطحی منطقه، یک چاله‌ی حفاری غیرمجاز دیده شد که پس از بررسی درون چاله‌ی حفاری، یک ظرف سفالی از نوع ظروف تدفینی عصر آهن به دست آمد؛ لذا جهت اطمینان از این موضوع در نزدیکی چاله‌ی حفاری غیرمجاز، گمانه‌ای با ابعاد ۲×۲ متر ایجاد گردید. این گمانه باتوجه به وسعت کم آن، از نظر داده‌های فرهنگی و باستانی بسیار غنی بوده است. در این گمانه تعداد زیادی سفال قرمز داغدار و صیقلی

که از نوع سفال‌های تدفینی هستند، به‌دست آمد. براساس نظریات و یافته‌های سرپرست کاوش و همچنین تطبیق با محوطه‌های این منطقه که گاهنگاری شده‌اند (مانند تپه‌ی باستانی قلعه‌کش آمل) این محوطه متعلق به اواخر دوره‌ی عصر آهن بوده است. آثار آهنی به‌دست آمده از این کاوش، در گورو در کنار استخوان‌های اجساد کشف شده است. در مجموع از کاوش این محوطه، آثاری همچون آهن، سفال قرمز داغدار و صیقلی از نوع سفال‌های تدفینی و همچنین بقایای خاکسترو ذغال به‌دست آمده است (عابدینی عراقی، ۱۳۸۷: ۱۰۲-۱۰۳). انواع سفال‌های ظریف و مصنوعات فلزی و کوره‌ی پخت سفال به‌دست آمده خود نشان‌دهنده‌ی رونق اقتصادی و ارتباط مردم آن با مناطق و روستاهای همجوار بوده است (عابدینی عراقی ۱۳۸۷: ۵۰-۵۱). اغلب سفال‌های گورستان لفورک با نقوش داغدار به‌صورت خطوط عمودی، افقی، مورب، متقاطع و مدور بوده‌اند (عابدینی عراقی، ۱۳۸۷: ۴۷). نوع تدفین در این گورستان به‌صورت تاق‌باز و جهت تدفین شمال شرقی- جنوب غربی و به‌صورت جنینی و خوابیده به پهلوی چپ است و همچنین ساختار گورها به‌صورت چاله‌ای ساده بوده است.

گورستان پهلوج مشرف بر رودخانه‌ی اسکلم‌رود و در مختصات جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۳ دقیقه‌ی شمالی و ۵۲ درجه و ۴۸ دقیقه‌ی شرقی و ارتفاع ۳۰۰ متری از سطح دریا قرار گرفته است. براساس نظریات و یافته‌های سرپرست کاوش، این محوطه متعلق به اواخر دوره‌ی ساسانی بوده، که از نظر سنت‌های تدفین و انسان‌شناسی اواخر دوران تاریخی بسیار حائز اهمیت است (عابدینی عراقی، ۱۳۸۷: ۱۲۲). در مجموع، دو کارگاه به ابعاد ۵×۵ متر و یک کارگاه به ابعاد ۱۰×۱۰ متر ایجاد گردید که در آن‌ها تعداد ۱۱ گور که براساس یافته‌های کاوش و شاخص‌های موجود، متعلق به اواخر دوره‌ی ساسانی بوده است. آثار آهنی به‌دست آمده از این کاوش در گورو در کنار استخوان‌های اجساد کشف شده است. جهت تدفین به‌شکل غربی- شرقی و صورت روبه جنوب بوده است. در گورها و در کنار تدفین، بقایای خاکسترو ذغال به‌دست آمده که احتمالاً نشان‌دهنده‌ی انجام مراسمات همراه با آتش و یا سوزاندن موادی هنگام تدفین بوده است. در بعضی از تدفین‌ها، ظروف سفالی به‌صورت شکسته به‌دست آمده که نوع پراکندگی و شکستگی‌های ظرف سفالی، حاکی از شکستگی تعمدی پس از تدفین می‌باشد. همچنین کشف یک قاشق نقره‌ای به‌عنوان یک شیء تدفینی، مورد توجه بوده است. از کاوش این محوطه، آثاری دیگری همچون: تیغه و میخ‌های آهنی، سنگ مسطح، بست مفرغی و دستبند مفرغی، مهره‌هایی از جنس فیروزه، مهره‌ی تزیینی از جنس مروارید، مهره‌ی شیشه‌ای، مهره‌ی گلی، ظروف سفالی (با شکستگی عمدی)، استخوان حیوان، دندان گراز، بقایای خاکسترو ذغال، اجساد انسان و آجر به‌دست آمده و همچنین دیواره‌ی یکی از گورها سنگ چین با ملات گِل بوده است (عابدینی عراقی، ۱۳۸۷).

روشن پژوهش

معرفی نمونه‌ها: جهت مطالعه‌ی ریزساختاری آهن باستانی، ۳ نمونه‌ی به‌دست



تصویر ۱. تصویر هوایی از سد البرز، موقعیت محوطه‌ها لفورک و پهلوج پس از آبگیری سد (www.Googlemap.com).

آمده از محوطه‌ی پهلوج، شامل دو میخ آهنی (PC-7, PA-7) و یک تیغه (PAC-7) متعلق به دوره‌ی ساسانی و ۲ نمونه‌ی به‌دست آمده از محوطه‌ی لفورک، شامل یک سرنیزه (L-3) و یک سگک آهنی (L-7) متعلق به دوره‌ی عصر آهن III انتخاب شدند. جدول ۱، شامل توضیح مشخصات هر یک از نمونه‌ها است. هر ۵ نمونه‌ی به‌دست آمده دارای بقایای فلزی هستند که در بین لایه‌ی نازکی از محصولات خوردگی محفوظ شده‌اند (تصویر ۳). نمونه‌های مورد مطالعه متعلق به موزه‌ی «کلبادی» ساری هستند.



▲ تصویر ۲. نمای نزدیک سد البرز (نگارندگان، ۱۳۹۴).

روش آماده‌سازی و نحوه‌ی مطالعه‌ی اشیاء

به‌منظور انجام مطالعات میکروسکوپی از هر شیء، یک تکه جدا نموده و از آن مقطع صیقلی تهیه شد. جهت آماده‌سازی نمونه‌ها، تکه‌های جدا شده از هر نمونه درون رزین اپوکسی دو جزئی (رزین و سخت‌کننده) مانع شده و سپس با

جدول ۱. مشخصات اشیاء فلزی مورد مطالعه در این پژوهش (نگارندگان، ۱۳۹۴).

کد شیء	مشخصات حفاری اشیاء	کاربرد شیء	وزن نمونه (گرم)	اندازه شیء (سانتی‌متر)	دوره‌ی اثر	محوطه کشف اثر	عمق ترانسه (سانتی‌متر)	سال حفاری	مکان نگهداری اشیاء	سایر اطلاعات
P-A7	ترانسه A7 گور ۴	میخ	۸/۰۸	۶/۸×۱/۱	ساسانی	پهلوج	۱۷۵	۱۳۸۷	مخزن موزه کلبادی ساری	تدفینی همراه جسد دارای مغز فلزی
P-C7	ترانسه C7 گور ۲	میخ	۵/۵۴	۷×۱/۱	ساسانی	پهلوج	۲۰۰	۱۳۸۷	مخزن موزه کلبادی ساری	تدفینی همراه جسد دارای مغز فلزی
P-AC7	ترانسه AC7 گور ۵، شیء ۱	تیغه	۱۷/۸۵	۸/۵×۲/۱	ساسانی	پهلوج	۱۴۵	۱۳۸۷	مخزن موزه کلبادی ساری	تدفینی همراه جسد دارای مغز فلزی
L-7	ترانسه BB-66 گور ۱، شیء ۷	سگک	۱/۰۷	۴/۶×۰/۴	عصر آهن ۳	لفورک	۱۵۷	۱۳۸۷	مخزن موزه کلبادی ساری	تدفینی همراه جسد دارای مغز فلزی
L-3	ترانسه BB-66 گور ۳، شیء ۳	سرنیزه	۵۹/۳۷	۱۱/۵×۲/۶	عصر آهن ۳	لفورک	۱۶۵	۱۳۸۷	مخزن موزه کلبادی ساری	تدفینی همراه جسد دارای مغز فلزی



► تصویر ۳. تصاویر اشیاء مورد مطالعه از محوطه‌های پهلوج و لفورک (نگارندگان، ۱۳۹۴).

استفاده از کاغذ سنباده (شماره‌های ۲۴۰-۴۰۰-۶۰۰-۸۰۰-۱۲۰۰-۱۵۰۰-۲۰۰۰-۳۰۰۰) ساییده شدند. پس از آن، جهت حصول سطح صاف و براق، نمونه‌های مانده به وسیله‌ی خمیر الماس (۳، ۱، ۰/۵ میکرون) پرداخت شدند. جهت مطالعه‌ی میکروسکوپی و شناسایی ریزساختار موجود در نمونه‌ها، از میکروسکوپ نوری پلاریزان با نور انعکاسی استفاده شد. نمونه‌های مانده قبل و بعد از اچ با استفاده از میکروسکوپ متالوگرافی مدل BK-POL/BK-POLR ساخت شرکت All-tion کشور چین در آزمایشگاه دانشگاه هنر اصفهان مورد مطالعه قرار گرفتند. جهت مطالعه‌ی ریزساختار نمونه‌ها و شناسایی ترکیب آلیاژ و فازهای موجود در آن از روش میکروسکوپی الکترونی روبشی همراه با طیف‌سنجی تفرق انرژی اشعه‌ی ایکس (SEM-EDS) استفاده شد. برای بررسی سطح نمونه‌ها و شناسایی عناصر به کار رفته در ساخت اشیاء مورد مطالعه و همچنین تشخیص و تفکیک آخال‌ها از رگه‌ی سرباره‌های موجود در بدنه‌ی فلزی آن‌ها، آنالیز نیمه کمی عنصری با روش آنالیز طیف‌سنجی تفرق انرژی اشعه‌ی ایکس (EDS) انجام شد. به این منظور مقاطع صیقلی آماده شده در آزمایشگاه SEM بنیاد علوم کاربردی رازی تهران و با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM) مدل MIRA3 ساخت شرکت TE-SCAN کشور جمهوری چک به همراه دستگاه طیف‌سنج تفرق انرژی اشعه‌ی ایکس (EDS) مدل SAMx ساخت کشور فرانسه انجام شد. تصاویر میکروسکوپی الکترونی به صورت الکترون برگشتی (Backscattered Electron) تهیه شدند. تصاویر تهیه شده توسط الکترون‌های برگشتی (SEM-BSE) مربوط به عمق بیشتری از عناصر است و کنتراست موجود در این تصاویر، ناشی از تفاوت منطقه به منطقه‌ی عدد اتمی متوسط نمونه است؛ درواقع قسمت‌های روشن‌تر مربوط به عدد اتمی بالاتر نمونه است، درحالی‌که تصاویر تهیه شده توسط الکترون‌های ثانویه (Sec-ondary Electrons) مربوط به منطقه‌های کم عمق نمونه و نزدیک به سطح آن است (گلستانی‌فر و همکاران، ۱۳۸۹). این آزمایش غیرتخریبی برای شناسایی عنصری و بررسی میزان درصد عناصر نیز در نمونه انجام می‌شود (استوارت، ۱۳۹۳: ۱۳۵).

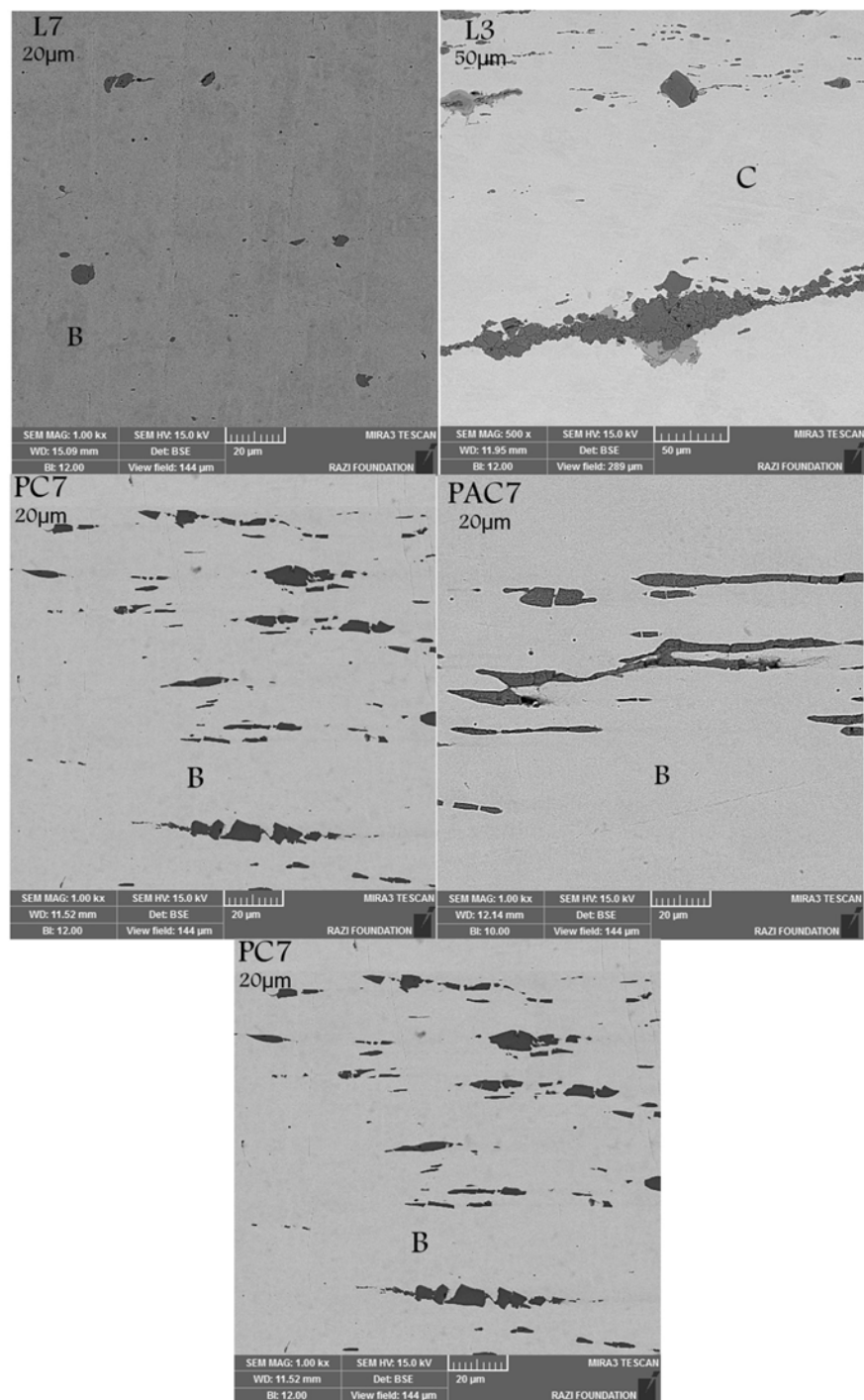
جدول ۲. ترکیب شیمیایی ساختار فلزی نمونه‌های مورد مطالعه با استفاده از آنالیز (SEM-EDS)، (نگارندگان، ۱۳۹۴). ◀

	Fe	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Cr	Mn
L3-C	97.44	0.14	0.15	0.06	-	0.26	-	-	-	-	0.11
L7-B	97.6	-	0.22	0.1	-	0.25	-	-	-	0.11	0.17
PA7-B	97.18	-	0.17	0.15	-	0.3	-	-	-	-	0.25
PAC7-B	97.4	-	0.1	-	0.13	-	0.1	0.08	-	-	0.21
PC7-B	97.47	-	-	-	-	-	0.12	-	0.16	-	0.17

نتایج و بحث

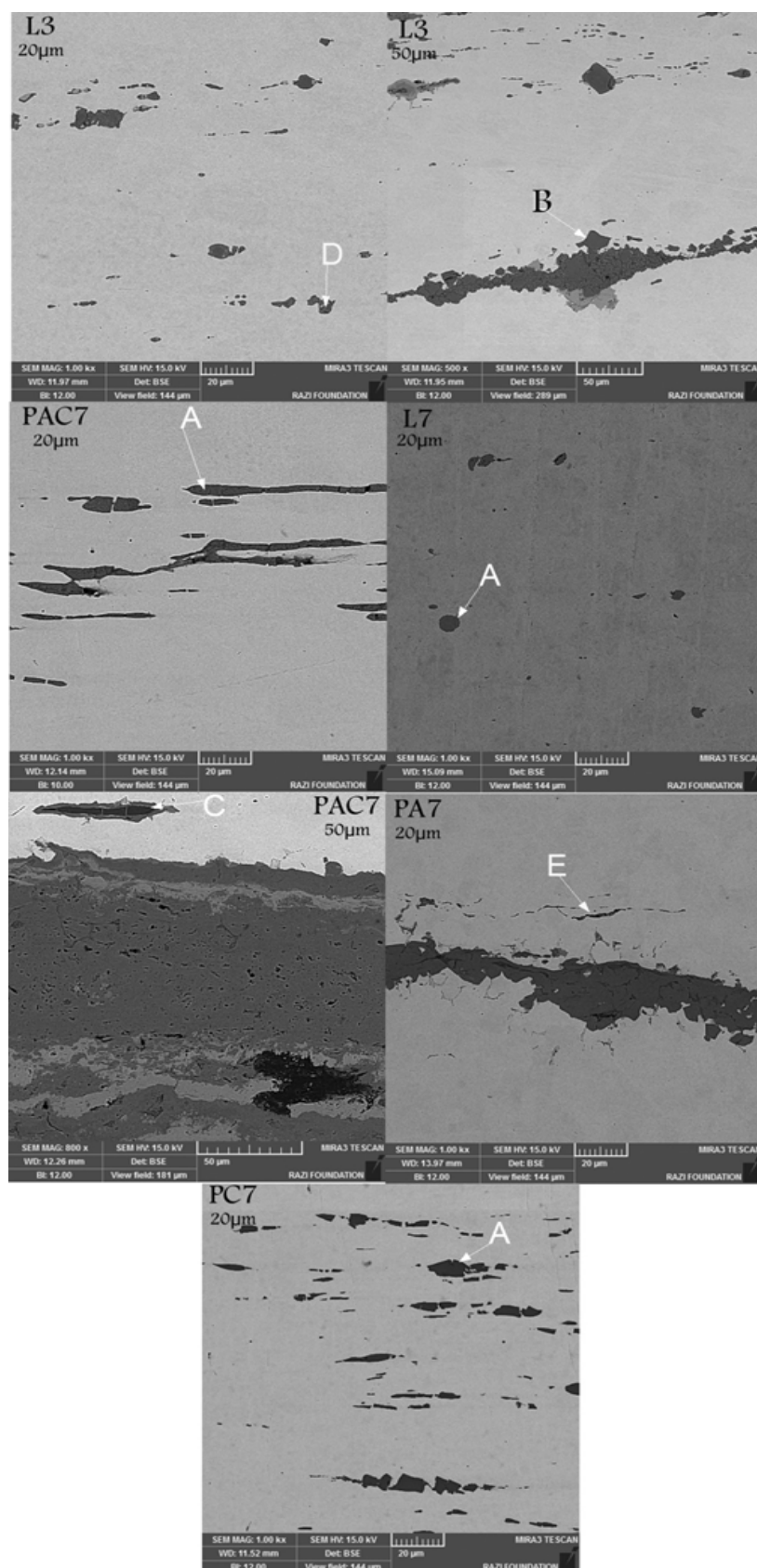
نتایج آنالیز EDS بر روی ساختار فلزی ۵ نمونه‌ی مورد مطالعه در جدول ۲، ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که ساختار اصلی نمونه‌ها آهن و با خلوص بیش از ۹۷٪ وزنی است. در آنالیز هر نمونه مقادیر ناچیزی از عناصر دیگری (همچون: منگنز، منیزیم، آلومینیوم، سیلیسیم، گوگرد، تیتانیوم، کروم، فسفر، پتاسیم و کلسیم) وجود دارد که میزان آن‌ها کمتر از ۱٪ وزنی است و می‌توان احتمال داد که به عنوان ناخالصی حضور دارند. تصاویر میکروسکوپی الکترونی از ساختار فلزی نمونه‌های L-3, L-7, PA-7, PC-7, PAC-7 بیانگر وجود آخال‌های سرباره‌ای هستند. آخال‌ها در نمونه‌ی L-7 به صورت کروی و پراکنده می‌باشند و در نمونه‌های L-7, PA-7, PC-7, PAC-7 آخال‌ها به صورت رگه‌های کشیده و پراکنده وجود دارند (تصویر ۴). آخال‌های رگه‌ای و کشیده، نشان‌دهنده‌ی آهن کار شده می‌باشد (Barrena, Gomez & Soria, 2008)؛ همچنین، هرچه آخال‌ها ریزتر باشند نشان‌دهنده‌ی کار بیشتر بر روی نمونه بوده، که بر اثر چکش‌کاری و عملیات حرارتی بیشتر به این شکل درآمده است.

به منظور شناسایی ماهیت آخال‌های موجود در نمونه‌ها، از آنالیز نقطه‌ای با استفاده از روش EDS استفاده شد (تصویر ۵). نتایج حاصل از آنالیز عنصری آخال‌های موجود در ساختار نمونه‌ها در جدول ۳، حاکی از آن است که؛ اکسیژن، آهن و سیلیسیم به عنوان عناصر اصلی تشکیل دهنده‌ی ترکیب آخال‌ها حضور دارند. در تمامی نمونه‌ها میزان درصد وزنی اکسیژن افزایش و میزان درصد وزنی آهن کاهش یافته، به استثناء آخال PA7-E که میزان تقریباً برابری دارند. تفاوت این نواحی در میزان درصد وزنی عناصر دیگر است. در ساخت فلزات غیر آلیاژی (اشیاء آهنی)، عناصر موجود در بدنه‌ی فلزی هنگام ذوب و ریخته‌گری به طور یکنواخت توزیع نشده، که این عدم یکنواختی مربوط به تکنولوژی ابتدایی ساخت اشیاء در دوران تاریخی است. برای ساخت آهن کار شده^۱ در دوران تاریخی و به منظور سهولت در اعمال کار سرد و گرم بر روی قطعه‌ی ساخته شده، می‌بایست کوره‌ی احیاء به گونه‌ای باشد که منجر به تولید آهن فریتی به همراه سرباره‌ی سیلیسی شود. سیلیسیم، اکسیژن و آهن، نشان‌دهنده‌ی رگه‌ی سرباره‌های سیلیسی است که در اشیاء محوطه‌ی پهلوج (PA-7, PC-7, PAC-7) میزان درصد وزنی بیشتری از سیلیسیم نسبت به اشیاء محوطه‌ی لفورک (L-3, L-7) دارد. آنالیز در ناحیه‌ی L7-A میزان بسیار بالای عنصر منگنز (۵۳/۷۷٪ وزنی) را نشان می‌دهد و وجود منگنز ممکن است مربوط به بقایای سرباره و یا کانه‌ی آهن باشد. کانه‌ی آهن مورد استفاده در تولید اشیاء آهنی، ترکیبات اکسیدی از قبیل: اکسیدهای منگنز، باریم، سیلیسیم، آهن



► تصویر ۴. تصاویر SEM-BSE از ساختار فلزی نگارندگان، (۱۳۹۴).

و آلومینیوم تولید می‌کنند. اکسیدهای منیزیم، پتاسیم و کلسیم می‌توانند متعلق به ساختار سرباره باشند (Buchwald & Wivel, 1998). همین‌طور عناصر کلسیم و آلومینیوم ممکن است مربوط به سنگ معدن مورد استفاده و یا ناخالصی باشد. منیزیم و پتاسیم موجود در ترکیب آهن مربوط به سوخت مورد استفاده در کوره‌ی احیاء می‌باشند (Buchwald & Wivel, 1998; Bachmann, 1982: 19). در مجموع



تصویر ۵. تصاویر SEM-BSE از آخال‌های نمونه‌ها (نگارندگان، ۱۳۹۴).

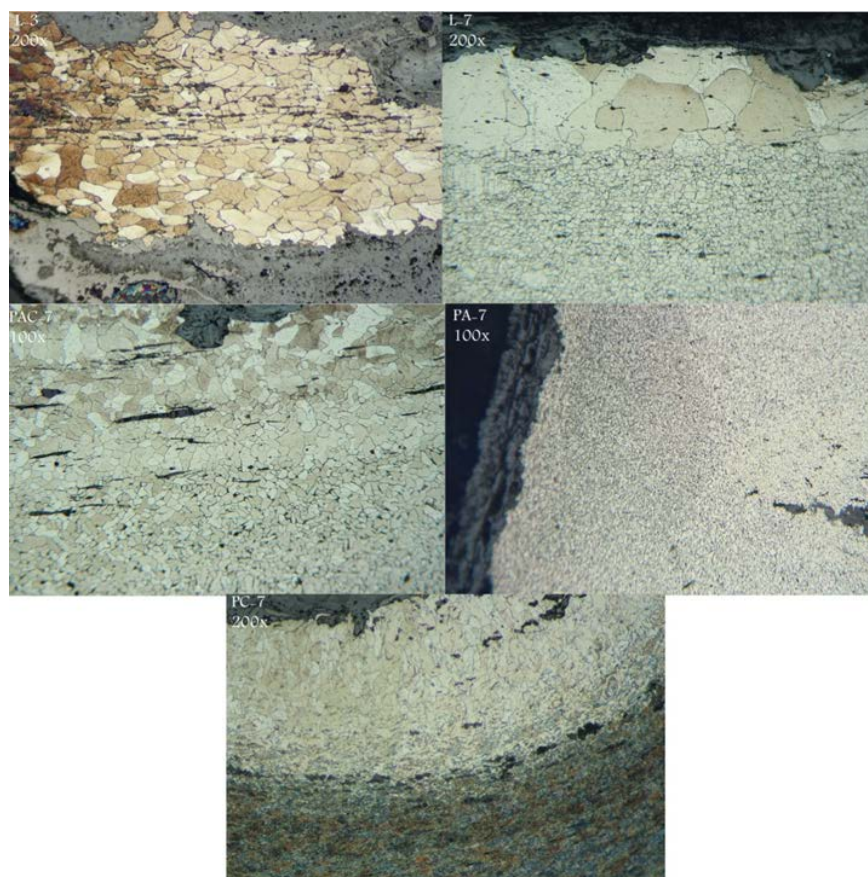
جدول ۳. ترکیب شیمیایی آخال‌های موجود در ریزساختار نمونه‌های مورد مطالعه با استفاده از آنالیز (SEM-EDS)، (نگارنگان، ۱۳۹۴). ▼

	O	Fe	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Cr	Mn
L3-B	50.92	24.18	-	2.05	21.39	1.08	-	0.1	-	-	-	-	0.28
L3-D	43.59	33.63	-	0.9	11.89	5.37	-	0.22	0.84	2.37	-	-	0.84
L7-A	34.34	10.22	-	-	0.22	0.2	-	0.23	-	-	-	1.02	53.77
PA7-E	3873	38.88	-	0.95	2.05	8.54	-	0.3	1.72	8.14	-	-	0.69
PAC7-A	48.54	24.19	-	2.16	4.51	12.56	1.26	-	1.47	4.39	-	-	0.91
PAC7-C	51.5	14	-	2.75	6.26	15.18	1.4	-	2.39	6.35	-	-	0.17
PC7-A	59.48	28.47	0.18	1.21	3.7	16.51	-	-	2.02	6.02	0.39	-	2.01

ماهیت سرباره‌ها به ترکیبات سوخت، شرایط دمایی کوره، ترکیبات فلز و کانه‌ی فلزی بستگی دارد (Buchwald & Wivel, 1998). سرباره‌های موجود در آهن‌های تاریخی در طول فرآیند تولید، خارج شده و در اطراف محیط کوره یافت می‌شوند؛ اما بخشی از آن‌ها در شمش باقی مانده و در طول فرآیند تولید شئی تحت کار سرد و یا گرم، به صورت کشیده و باریک درمی‌آیند. عملیات آهنگری در دمای پایین تر انجام شده و در مراحل مختلف چکش کاری می‌شود، که این فرآیند باعث فشردگی و باریک شدن سرباره می‌شود (Buchwald & Wivel, 1998; Bachmann, 1982: 11). در واقع رگه‌ی سرباره‌های موجود در ساختار فلزی توسط فاز فریت جدا می‌شوند، که فاز فریتی مشخصه‌ی آهن کار شده است (Barrena, Gomez & Soria, 2008). جهت کشیدگی سرباره‌ها در آهن کار شده به شیوه‌ی شکل دهی ترمومکانیکی و جهت کار انجام شده بر روی قطعه بستگی دارد. در صورتی که دمای کوره پایین باشد و فراوانی گاز منوکسید کربن (CO) و یا دی‌اکسید کربن (CO_2) در کوره محدود باشد، آهن تولید شده به عنوان آهن کم کربن شناخته می‌شود و ترکیبات سرباره‌ی غنی از اکسید آهن هستند. سرباره‌های غنی از اکسید آهن در مناطق فریتی قرار دارد (Buchwald & Wivel, 1998). از آن‌جا که حذف سرباره در آهن با گداخته شدن امکان پذیر است، بنابراین مراحل حرارت دهی باید در دماهای بالا اتفاق بیافتد تا سرباره‌ها از آهن جامد به حالت روان درآیند. دمای مناسب این کار حدود ۱۱۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است و این دما، کمترین حرارتی است که اکسید آهن احیاء می‌شود، اما در واقع این دما، زیر نقطه‌ی ذوب فلز قرار دارد؛ بنابراین آهن تولید شده در حالت جامد به شکل اسفنجی و یا شمش خامی است که حاوی سرباره است. عملیات آهنگری در دمای پایین تر انجام شده و در مراحل مختلف چکش کاری می‌شود، که این فرآیند باعث فشردگی و باریک شدن سرباره می‌شود (Buchwald & Wivel, 1998; Bachmann, 1982: 11). این موضوع که فلزات به طور کلی ناخالص هستند مهم است؛ زیرا نوع رشد بلور احتمالی، بسیار به میزان خلوص فلز بستگی دارد. زمانی که دانه‌ها به دلیل چکش کاری تغییر شکل یابند، پهن می‌شوند (شکل آن‌ها به وسیله‌ی لغزش، حرکت ناب‌جایی و ایجاد جابه‌جایی‌هایی در نتیجه‌ی کار بر روی آن‌ها، تغییر می‌یابد) تا زمانی که بر اثر انجام کار بیشتر، شکننده شوند. در این حالت، دانه‌ها کاملاً کار سخت شده‌اند. اگر تغییر شکل یا چکش کاری بیشتری بر روی فلز مورد نیاز باشد، باید آن را جهت بازگرداندن قابلیت شکل پذیری و چکش کاری، تابکاری^۲ نمود. کار

سرد و تابکاری را می‌توان در یک عملیات به شکل کار گرم ترکیب نمود. در این روش، شی کار شده تا دمای سرخ شدن حرارت دیده و چکش کاری می‌شود. این دو فرآیند، یعنی کار سرد همراه با تابکاری و کار گرم، عمدتاً ریزساختاری مشابه حاوی دانه‌های کار شده و باز تبلور یافته نمایش می‌دهند. بعضی فلزات، مانند آهن، معمولاً باید در حالی مورد کار قرار گیرند که بر اثر حرارت سرخ شده‌اند؛ پتک کاری آهن کار شده حاوی ناخالصی‌های سرباره، موجب ایجاد ریزساختار کار شده‌ای می‌شود که در آن سرباره‌ها به مرور باریک شده یا به شکل رگه‌های سرباره در طول شی کشیده می‌شوند. ذکر این موضوع مهم است که بسیاری از آخال‌های موجود در فلزات باستانی در نتیجه‌ی کار گرم یا کار سرد و تابکاری باز تبلور نمی‌یابند؛ بلکه یا به ذرات کوچکتر خرد شده و یا در نتیجه‌ی ادامه فرآیند کار، پهن می‌شوند (Scott, 1991: 115-116). سنگ آهن معمولاً ترکیبی از آهن و مقادیر زیادی از ناخالصی‌هایی مانند سیلیکا یا آلومینا (شن، ماسه و خاک رُس) است که اغلب به عنوان مواد معدنی با کانه‌های دیگر (کلوخته‌ی سنگ) هستند. آهن موجود در سنگ آهن به شکل اکسیدهای آهن یافت می‌شود، در نتیجه این ناخالصی‌ها، ابتدا باید آهن از کلوخته‌ی سنگ جدا شود و پس از آن به آهن خالص تبدیل می‌شود. تولید آهن از سنگ معدن، شامل یک واکنش اکسیداسیون و احیاء در قالب کوره‌ی بلند انجام می‌شود. در بالای این کوره پُر از اکسید آهن (معمول‌ترین آن هماتیت Fe_2O_3) است، اما همچنین می‌تواند مگنتیت (Fe_3O_4)، کک و سنگ آهک (CaCO_3) باشد. آهن می‌تواند در دمای ۸۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد (این دما به طور قابل توجهی کمتر از دمای ذوب آهن یعنی ۱۵۳۵ درجه‌ی سانتی‌گراد است) از اکسیدهای خود احیاء شود (Scott & Eggert, 2009: 2).

جهت شناسایی ریزساختار دانه‌ای نمونه‌ها، مقطع عرضی پنج نمونه با استفاده از محلول نیتال اِچ شدند. نتایج بررسی نمونه‌های مورد مطالعه به وسیله‌ی میکروسکوپ نوری نشان می‌دهد که هر پنج نمونه، ساختاری فریتی دارند (تصویر ۶). تصاویر میکروسکوپی نمونه‌ی L-3 نشان‌دهنده‌ی ساختار حاوی فریت بوده و دانه‌هایی با اندازه‌های متغیر در سطح نمونه پراکنده هستند. مغز فلزی همچنین دارای آخال‌های سرباره‌ای کشیده و تیره است. در حالت صیقلی آهن کار شده به علت چکش کاری و کارهای انجام شده شی دارای پراکندگی آخال‌های سرباره بوده، که برخی از آن‌ها در پهنای مقطع کشیده شده‌اند، در صورتی که میزان کار انجام شده بر روی شی کم یا ناقص باشد، سرباره به صورت گرد و گروی در اندازه‌های مختلف پدیدار می‌شوند. در نمونه‌ی L-7 دانه‌های فریتی در شی فلزی اندازه‌ی کوچکتری نسبت به دانه‌های فریت لایه‌ی خارجی دارد. همچنین دانه‌های هم محور شش وجهی همگن کاملاً تابکاری شده مشاهده می‌شود. مغز فلزی دارای پراکندگی آخال‌های سرباره‌ای کشیده و کروی و همچنین سرباره‌ی زاویه دار (چندضلعی گوشه تیز) است. نمونه‌ی PA-7 دارای ساختار فریتی بوده و این نمونه از دانه‌های پهن و فشرده تشکیل شده است. نمونه پس از اچ شدن، نشان‌دهنده‌ی لایه‌ای تیره‌تر در قسمت خارجی است که به دلیل ساختاری فشرده



► تصویر ۶. تصاویر میکروسکوپی با بزرگنمایی متفاوت از آزمایش متالوگرافی نمونه‌های مورد مطالعه پس از اچ کردن به وسیله محلول نیتال (نگارندگان، ۱۳۹۴).

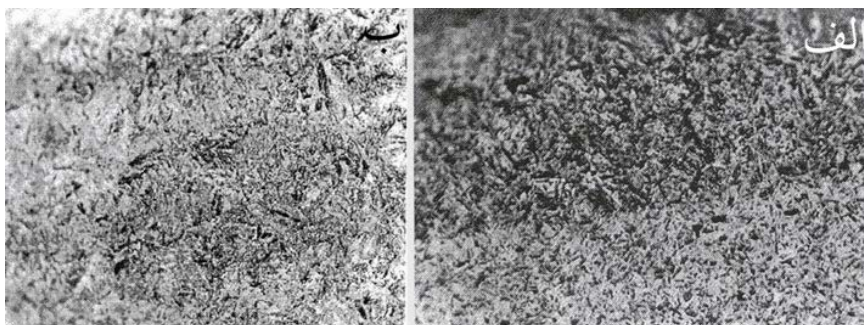
و تراکم دانه‌های فریت به این صورت نشان داده می‌شود. ساختار نمونه‌ی PAC-7 حاوی دانه‌ها فریت با اندازه‌های متفاوت بوده و در سطح نمونه، پراکنده هستند. ساختار نمونه‌ی PC-7 حاوی فریت در لایه‌های خارجی بوده و در مرکز نمونه ساختار فلز به صورت تیره‌تر، سوزنی‌شکل و لایه‌ای دیده می‌شود. آخال‌های سرباره‌های تیره در مغز فلزی به صورت کشیده در سطح نمونه پراکنده است. بررسی سطح مقطع نمونه‌های مورد مطالعه با میکروسکوپ نوری، نشان داد که هر پنج نمونه، ساختاری فریتی دارند (Scott, 1991: 35). هر پنج نمونه دارای ساختار حاوی فریت بوده و ایجاد این ساختار ممکن است به دلیل انجام کار سرد در بعضی مراحل ساخت باشد. اندازه‌ی دانه‌های فریت متغیر بوده و ایجاد این نوع تغییرات در ماده‌ی ظاهراً همگن، مشخصه‌ای برای قطعه آهن کار شده است. تراکم دانه‌های فریت در قسمت‌های خارجی و یا داخلی لایه‌ی فریتی ساختار فلزی در بعضی از نمونه‌ها نسبتاً بیشتر است. در نمونه‌ی PA-7 دانه‌های فریتی، پهن و کشیده و نشان‌دهنده‌ی مقدار چکش‌کاری بیشتر در این قسمت است. در نمونه‌ی L-7 لایه‌ی خارجی فریت درشت‌تر به دلیل حرارت‌دهی مجدد بوده که بر اثر آن دانه‌ها شروع به شکل‌گیری کرده و بزرگ می‌شوند. در مجموع می‌توان بیان نمود که این اشیاء از آهن کار شده ساخته شده‌اند که در حالت صیقلی، آهن کار شده دارای پراکندگی آخال‌های سرباره‌ای است، که بعضی از آخال‌ها در عرض پهنای مقطع کشیده شده

هستند. همچنین این آخال‌ها ممکن است در اثر کار سنگین به شکل رگه کشیده شده‌اند. آخال‌های ریز موجود در مغز فلزی نشان‌دهنده‌ی آن است که در زمان کار، آخال‌های بزرگتر به تکه‌های زاویه‌دار کوچکی شکسته شده‌اند. ساختار سوزنی‌شکل و لایه‌لایه در نمونه‌ی PC-7 احتمالاً نشان‌دهنده‌ی ساختار مارتنزیت برگشت‌دهی است. بسیاری از اشیاء باستانی تحت شرایط کنترل‌شده‌ی مناسبی ساخته نشده‌اند و مارتنزیت ممکن است در زمان سرد شدن فولاد حرارت‌دیده تا دمای اتاق، به‌خودی‌خود برگشت‌دهی شود؛ که به «خود-برگشت‌دهی» (Self-Tempering) موسوم است. مارتنزیت برگشت‌دهی، بسیار سریع‌تر از مارتنزیت برگشت‌داده نشده، با محلول‌های اچ واکنش نشان می‌دهد. یک شیء فولادی معمولاً، حدود ۸۰۰-۹۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد حرارت می‌بیند و سپس در آب سرد فرو برده می‌شود. به‌همین دلیل جزء مارتنزیت به‌شدت سخت تشکیل می‌شود. مقداری از سختی و شکنندگی مارتنزیت را می‌توان تا میزان متفاوتی با عملیات برگشت‌دهی، معمولاً ۲۰۰ تا ۵۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد از بین برد. بیشتر فولادها با کمتر از ۶۰ درصد کربن، مارتنزیت لایه‌ای ایجاد می‌کنند. لایه‌های جداگانه را نمی‌توان به‌وسیله‌ی میکروسکوپی نوری حتی تا بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر دید و آن‌چه می‌توان دید، تجمعی از توده‌های لایه‌ای کوچک است (Scott, 1991: 35; Scott & Eggert, 2009: 7).

در نمونه‌ی PA-7 دانه‌های فریتی پهن و کشیده، نشان‌دهنده‌ی میزان چکش‌کاری بیشتر در قسمت خارجی مغز فلزی است. نمونه‌ی L-7 لایه‌ی خارجی فریت بزرگتر است. این تغییراندازه همان‌گونه که ذکر شد، به این دلیل ممکن بوده که حرارت‌دهی مجدداً انجام شده و دانه‌ها شروع به شکل‌گیری مجدد کرده و درشت می‌شوند (تصویر ۷).

نتیجه‌گیری

بررسی مقاطع نمونه‌های اشیاء آهنی مورد مطالعه از دو محوطه باستانی ناحیه‌ی مازندران (PA-7, PC-7, PAC-7, L-7, L-3) با میکروسکوپ نوری نشان داد که هر پنج نمونه، ساختاری فریتی دارند. فریت ممکن است به دلیل انجام کار سرد در مرحله‌ی شکل‌دهی رخ داده است. اندازه‌ی دانه‌های فریت متغیر بوده و ایجاد این نوع تغییرات در ماده‌ی ظاهراً همگن، مشخصه‌ای برای تکه‌ی آهن کارشده است. تراکم دانه‌ها در لایه‌ی خارجی مغز فلزی نمونه‌ی PA-7 و دانه‌های فریتی پهن و



تصویر ۷. نمایشی از ساختار مارتنزیتی در آهن باستانی (Scott, 1991: 35-36).
الف. نشان‌دهنده انتقال بین مارتنزیت برگشت‌دهی شده با اچ روشن و اچ تیره به سمت لبه برش تیغه، بزرگنمایی ۳۸۰x.
ب. سوزن‌های مارتنزیت در لبه‌ی تیغه چاقو قرون وسطی انگلستان، شکل کلی مارتنزیت از نوع لایه‌ای، بزرگنمایی ۲۸۰x. ◀

کشیده، نشان‌دهنده‌ی میزان چکش‌کاری بیشتر این قسمت است. بر اثر چکش‌کاری بیشتر، دانه‌های فریتی ریزتر، پهن و کشیده روی هم قرار می‌گیرند. هر پنج نمونه، از آهن کار شده ساخته شده‌اند که در حالت صیقلی، دارای پراکندگی آخال‌های سرباره‌ای (کشیده و کروی یا شکسته) است. برخی از این آخال‌ها به دلیل چکش‌کاری و کار بر روی فلز، در عرض پهنای مقطع، کشیده شده است؛ این در حالی است که آخال‌هایی به دلیل کار کمتر و یا ناقص بر روی شیء، به صورت گرد و کروی و در اندازه‌های متفاوتی هستند. ممکن است در اثر کار سنگین به شکل رگه کشیده شده‌اند. ظاهر این آخال‌ها حاکی از آن است که، فلز، ابتدا تابکاری شده و سپس کار سرد بر روی آن صورت گرفته است. آخال‌های ریز موجود در ساختار فلزی نشان می‌دهد که در زمان کار، آخال‌های بزرگتر به تکه‌های زاویه‌دار کوچکی شکسته شده‌اند. ساختار سوزنی‌شکل و لایه‌لایه در نمونه‌ی PC-7، احتمالاً ساختار مارتنزیت برگشت‌دهی است. همان‌طور که نتایج حاصل از آنالیز عنصری مشخص نمود، میزان آهن در نمونه‌ها بیش از ۹۷٪ است؛ که در تصاویر حاصل از متالوگرافی نیز در واقع همان آهن آلفا یا فریتی مشاهده می‌شود. برای ساخت آهن کار شده در دوران باستان، به منظور سهولت در اعمال کار سرد و گرم بر روی قطعه‌ی ساخته شده، می‌بایست کوره‌ی احیاء به گونه‌ای باشد که منجر به تولید آهن فریتی همراه با سرباره‌ی سیلیسی می‌شود. با توجه به آنالیز عنصری از آخال‌های نمونه‌ها، می‌توان بیان کرد که حضور میزان قابل توجه عناصر سیلیسیم، اکسیژن و آهن، نشان‌دهنده‌ی رگه‌ی سرباره سیلیسی است. سرباره‌های موجود در آهن‌های تاریخی، در طول فرآیند تولید، از ساختار فلزی خارج می‌شوند؛ اما بخشی از آن‌ها در شمش اولیه باقی می‌مانند و در طول فرآیند تولید شیء تحت کار سرد و تابکاری به صورت کشیده و باریک در می‌آیند. از آن‌جا که حذف سرباره از آهن با گداخته شدن در دمای ۱۱۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد امکان‌پذیر است، در صورتی که دمای کوره پایین و میزان گاز مونوکسید کربن و یا دی‌اکسید کربن در کوره کم باشد، آهن تولید شده آهن کم کربن خواهد بود و ترکیبات سرباره‌ی غنی از اکسید آهن خواهند بود. سرباره‌های غنی از اکسید آهن، در مناطق فریتی قرار دارد؛ بنابراین دمای ساخت این اشیاء کمتر از ۱۱۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بوده و طی مراحل مختلف چکش‌کاری شده‌اند، که این فرآیند باعث فشرده و باریک شدن سرباره در ریزساختار شده است. در مجموع ریزساختار نمونه‌های مورد مطالعه، نشان‌دهنده‌ی ساختار فریتی بوده که بسته به میزان کار انجام شده‌ای که بر روی شیء انجام شده، دارای فشردگی و تغییر در لبه‌ی شیء و یا در قسمت داخلی دارد. در مجموع، طبق تصاویر میکروسکوپی متالوگرافی، ساختار فریتی نمونه‌ی L-3 نسبت به سایر نمونه‌ها دارای ساختار متفاوتی است که این تفاوت در اختلاف اندازه‌ی دانه‌های فریت لایه‌ی خارجی، نسبت به لایه‌ی داخلی است. این تفاوت حاکی از انجام عملیات دوباره‌ی حرارت‌دهی بر روی شیء است. در مجموع می‌توان بیان نمود که فرآیند تولید اشیاء آهنی مورد مطالعه نسبتاً مشابه است که بیانگر استفاده از فناوری مشابه در تولید آهن در دو دوره‌ی تاریخی مختلف است. با این وجود توسعه‌ی مطالعه بر روی اشیاء آهنی تاریخی می‌تواند به حصول نتایج دقیق‌تر در آینده منجر شود.

پی‌نوشت

۱. آهن اسفنجی همراه با مقداری کربن و کربور طی چندین مرحله چکش می‌خورد تا سرباره و اکسید کربن از آن آزاد شود و آهن کارشده (فرپورژه) تولید گردد. آهن کارشده مقدار کمی کربن دارد و در هنگام سرد شدن به آسانی سخت نمی‌شود (wrought iron).
۲. فرآیندی است که در آن با گرم کردن فلز تا دمای بالا و سپس سرد کردن آرام آن را نرم می‌کنند. هدف از فرآیند تابکاری برطرف کردن تنش‌ها و کرنش‌های پدید آمده در فلز بر اثر نوردکاری یا آهنگری است، به گونه‌ای که برای ماشین‌کاری به اندازه‌ی کافی نرم شود.

کتابنامه

- احسانی، محمدتقی، ۱۳۸۶. *هفت هزار سال هنر فلزکاری در ایران*، چاپ سوم، تهران: شرکت انتشارات علمی و فرهنگی.
- استوارت، باربارا، ۱۳۹۳، *روش‌های تجزیه‌ی مواد در مرمت و حفاظت آثار تاریخی*، ترجمه‌ی مسعود باقرزاده کثیری، تبریز: دانشگاه هنر اسلامی تبریز.
- امین‌صدری، رضا، ۱۳۹۰، «حفاظت و مرمت داس آهنی (متعلق به موزه ملی ایران)»، پایان‌نامه‌ی کارشناسی مرمت آثار، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان.
- شیرمرادی، شادی، ۱۳۹۳، «مطالعه و حفاظت و مرمت یک شیء آهن به محوطه‌ی قلاگوری سیمره لرستان»، پایان‌نامه‌ی کارشناسی مرمت آثار، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان.
- عابدینی‌عراقی، مهدی، ۱۳۸۷، «فصل دوم مطالعات باستان‌شناسی محوطه سد البرز لفور شهرستان سوادکوه»، مازندران: سازمان میراث فرهنگی و صنایع دستی و گردشگری (منتشر نشده).
- فونتانا، مارس جی، و گرین، نوربت دی، ۱۳۷۳، *مهندسی خوردگی*، ترجمه‌ی احمد ساعتچی، اصفهان: انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی اصفهان، چاپ اول.
- نقوی، سوگند، ۱۳۹۱، «بررسی فنی چهار نمونه خنجر آهنی متعلق به محوطه‌ی تاریخی سنگتراشان خرم‌آباد و ارائه طرح حفاظت و مرمت آن‌ها، پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد مرمت آثار، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان.
- گلستانی‌فرد، فرهاد، بهره‌ور، محمدعلی، و صلاحی، اسماعیل، ۱۳۸۹، *روش‌های شناسایی و آنالیز مواد*، تهران: دانشگاه علم و صنعت، چاپ چهارم.

- Buchwald, V. & Wivel, H., 1998, "Slag Analysis as a Method for the Characterization and Provenancing of Ancient Iron Object". Department of Metallurgy, Building 204, Technical University of Denmark, 2800 Lyngby, Denmark, *MATERIALS CHARACTERIZATION* 40:73-96.

- Dillmann, P., Balasubramaniam, R. & Beranger, G., 2002, *Characterization of Ancient Indian Iron and Entrapped Slag Inclusions Using Electron, Photon and Nuclear Microprobes*, Bull, Mater. Sci. Vol.24, No.3, June.

- Narain, shyam. K. & Jain, K., 2009, *Iron Artifacts History, Metallurgy, Corrosion and Conservation*, Agam Kala Prakashan.

- Oudbashi, O., Emami, S. M. & Davami, P., 2012, "Bronze in Archaeol-

ogy: A Review of the Archaeometallurgy of Bronze in Ancient Iran”, *Copper Alloys- Early Applications and Current Performance-Enhancing Processes*, Collini, L. (Ed.), Rijeka, InTech Open Access, 153-178.

- Pingitore, G., Cerchiara, T., Chidichimo, G., Castriota, M., Gattuso, C. & Marino, D., 2015, “Structural characterization of corrosion product layers on archaeological iron artifacts from Vigna Nuova, Crotone (Italy)”, *Journal of Cultural Heritage* 16, 372–376.

- Rehren, T., Belgia, T., Jambon, A., Kali, G., Kasztovszky, Z., Kis, Z., Kovacs, I., Maroti, B., Torres, M.M., Miniaci, G., Pigott, V.C., Radivojevic, M., Rosta, L., Szentmiklosi, L. & Szokefalvi-Nagy, Z., 2013, “5,000 years old Egyptian iron beads made from hammered meteoritic iron”, *Journal of Archaeological Science* 40, 4785-4792.

- Scott, D. A., 1991, *Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals*. The Getty Conservation Institute.

- Scott, D. & Eggert, G., 2009, *Iron and Steel in Art, Corrosion Colorant, Conservation*, London: Archetype Publication.

- Thornton, C. P., 2009, “The Emergence of Complex Metallurgy on the Iranian Plateau: Escaping the Levantine Paradigm”, *Journal of World Prehistory* 22, 301-327.

- Neff, D., Dillmann, P., Descostes, M. & Beranger, G., 2006, *Corrosion of Iron Archaeological Artefacts in Soil: Estimation of the Average Corrosion Rates Involving Analytical Techniques and Thermodynamic Calculation*, Corrosion Science.

- Neff, D., Dillmann, P., Bellot-Gurlet, L. & Beranger, G. 2005, *Corrosion of Iron Archaeological Artefacts in Soil: Characterisation of the Corrosion System*, Corrosion Science.

- Bachmann, H. G., 1982, *The Identification of Slag from Archaeological Sites*, Occasional Publication No 6 the Institute of Archaeology. London.

- Barrena, M. I., Gomez de Salazar, J. M. & Soria, A., 2008, “Raman Iron axes manufacturing technology. Departamento de Ciencia de los Materiales, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, Spain”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 266. 955–960.