مطالعات باستان‌شناسی، سال ۹، شمارهٔ ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۶

واکاوی جنبه‌هایی از متالورژی باستانی دشت قزوین بر مبنای داده‌های فلزی مکشوفه از قبور عصر آهن II قبرستان سگزآباد

طلحه قدوسیان*
دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد باستان‌سنجی دانشگاه هنر اسلامی تبریز
احد صمدی
دانشیار دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی سهند
حسن طلائی
استاد گروه باستان‌شناسی دانشگاه تهران

(از ص ۱۶۷ تا ۱۸۷)
تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۰۱/۱۵؛ تاریخ پذیرش قطعی: ۹۶/۳/۳۰

چکیده

متالورژی باستانی یکی از فرایندهای فرهنگی است که سیر تحول و پویایی آن در دشت قزوین از هزارهٔ ششم پ.م با دستیابی به فنّاوری مس طبیعی چکش‌کاری‌شده در تپه‌زاغه آغاز شده، و با ذوب و ریخته‌گری مس در تپه‌قبرستان و آلیاژسازی و کشف آهن در تپه سگزآباد، تا نیمهٔ هزارهٔ اول پ.م تداوم یافته است. پژوهش حاضر، گامی در جهت درک و تحلیل متالورژی باستانی دشت قزوین در عصر آهنII است. در این راستا نمونه‌های فلزی مکشوفه از قبور عصر آهن سگزآباد بر مبنای تحلیل‌های متالورژیکی آنالیز و بررسی شدند؛ بدین منظور از روش ICP-MS برای شناسایی ترکیب شیمیایی و تحلیل منشأ نمونه‌ها و همچنین از آزمون متالوگرافی و SEM-EDX برای شناسایی روش ساخت و آنالیز ریزساختاری آن‌ها استفاده شد. نتایج حاکی از کاربرد فلز پایه مسی با درصد بالای نیکل، کبالت، آهن و غیره است. این موضوع نشان از فرایندهای متالورژی کنترل نشده در ساخت نمونه‌ها دارد که پس از شکل‌دهی اولیه، چکش‌کاری سرد، گرم و تاب‌کاری شده‌اند. همچنین مشابهت عناصر کمیاب (کم‌مقدار) موجود در ساختار شیمیایی نمونه‌ها نشان‌دهندهٔ منشأ مشترک اکثر آن‌هاست. اما نکته قابل‌تأمل، به‌کارگیری دو فنّاوری فلزکاری با سطح متالورژی و منشأ کامل متفاوت در اواخر هزارهٔ دوم و اوایل هزارهٔ اول پ.م (آهنII) در دشت قزوین است.

واژه‌های کلیدی: دشت قزوین، قبرستان سگزآباد، قبور عصر آهن، متالورژی باستانی، ریزساختار

* رایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: t.ghodusiean@gmail.com

۱. مقدمه

کشف فلزات و دستیابی به فنون متالورژی از اهمیت ویژه‌ای در مطالعات فرهنگی، زمین‌شناسی، معدن و مهندسی علم مواد برخوردار است. فناوری فلز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین فرایندهای فرهنگی جوامع بشری در زمینهٔ تحولات اقتصادی، سیاسی، تجاری، نوآورانه و غیره است، به‌طوری‌که کشف آهن پدیدآورندهٔ بزرگ‌ترین انقلاب صنعتی در تاریخ بشر و مبنای تقسیم‌بندی دوران پیش‌ازتاریخ قرار گرفته است (طلایی، ۱۳۸۱: ۵۴۸). همچنین فلات ایران به‌دلیل غنی‌بودن از مواد خام، محل برخی از اولین نوآوری‌ها و فرایندهای متالورژی جهان به‌شمار می‌رود (Frame 2010:1700). دشت قزوین به دلیل غنای فرهنگی و شواهد متالورژی باستانی و مهم‌تر از همه، نقش محوری و مرکزیت آن در پیکره‌ی فلات ایران، پتانسیل‌های بالایی در جهت تبیین فرایندهای فرهنگی ادوار پیش‌ازتاریخ دارد. فلزکاری ازجمله فرایندهای فرهنگی است که در دشت قزوین به بهترین شکل از هزارهٔ ششم پ.م تا دورهٔ هخامنشی قابل‌مطالعه و بررسی است. مطالعات میان‌رشته‌ای در این حوزه می‌تواند به بسیاری از پرسمان‌های باستان‌شناختی و به‌ویژه چالش‌های باستان‌شناسی عصر آهن دشت قزوین، پاسخ‌های مستدل و روشمند ارائه نماید. اما این موضوع به دلیل فراهم نبودن زمینه‌های تخصصی مطالعات میان‌رشته‌ای، کمتر در حوزهٔ مسائل باستان‌شناختی ایران نمود پیدا کرده است. بنابراین، اغلب فرایندهای فرهنگی فلات ایران، در چارچوب مطالعات نظری باستان‌شناسی تفسیر و تبیین شده‌اند و برآیند آن، نظریات متناقض و معماهای هزار سو و اغلب بی‌جواب است.

دشت قزوین از معدود مناطق فلات ایران است که کاوش‌های باستان‌شناختی در آن از ۱۳۴۹ش. با شناسایی و حفاری سه محوطه‌ی مهم باستانی زاغه، قبرستان و سگزآباد به‌وسیلهٔ مؤسسه و گروه باستان‌شناسی دانشگاه تهران، در راستای برنامه‌ی آموزشی عملی دانشجویان باستان‌شناسی آغاز شده و بی‌وقفه ادامه دارد. کاوش‌های صورت‌گرفته، شواهد مطلقی از آثار دورهٔ نوسنگی تا ۵۰۰ پ.م در دشت قزوین را آشکار نموده است. همچنین داده‌ها و شواهد فلزکاری بخش قابل‌توجهی از یافته‌های باستان‌شناختی به‌ویژه از آثار عصرآهن دشت‌قزوین را شامل می‌شوند (طلایی، ۱۳۸۹: ۴۹-۴۵؛ ۱۳۸۱: ۵۵۶-۵۵۴ ؛ Malek Shahmirzadi 1979:50-63).

مطالعات باستان‌شناسی عصر آهن ایران در ابتدا بر مبنای فرضیات و نظریات سلیقه‌ای کاوشگران در هر منطقه بوده که نتیجهٔ آن فقط به انباشت داده‌ها انجامیده است. در مرحلهٔ دوم؛ کاوش‌های باستان‌شناختی و مطالعات عصر آهن با فعالیت هیئت‌های آمریکایی و در رأس آنها رابرت دایسون، در حوزهٔ دریاچه ارومیه آغاز شده و رویکردی روشمند به‌خود گرفته است (طلایی، ۱۳۹۰: ۵۰-۳۹). نتیجهٔ این مطالعات، شکل‌گیری فرضیات مختلف و جهت‌گیری انسان‌شناختی باستان‌شناسان شده است. در این راستا، دایسون کاوشگر اصلی تپه حسنلو، بر مبنای کاوش‌های باستان‌شناسی حوزهٔ دریاچهٔ ارومیه و تغییرات ناگهانی صورت‌گرفته در فرم و نوع سفالینه‌ها، پویایی فرهنگی ناشی از مهاجرت اقوام را در عصر آهن مطرح کرد (طلایی، ۱۳۷۳: ۲۶۳-۲۶۱؛ ۱۳۸۹: ۱۴۹-۱۴۸). همچنین یانگ در راستای مطالعات و کاوش‌های باستان‌شناسی خود در شمال غرب فلات ایران، افق‌های سفالی و مهاجرت ایرانیان را در قالب فرضیه پویایی فرهنگی برای تمام فلات ایران تبیین نمود (Young 1976: 10-30). وی تغییر در فرم سفال‌ها و رایج شدن سفال‌های خاکستری و گورستان‌های خارج از محوطه‌های استقراری را ناشی از مهاجرت اقوام ایرانی از شمال شرق به سراسر فلات ایران ذکر کرده است (طلایی،۱۳۷۳: ۲۶۳-۲۶۱). ایراد اساسی به فرضیات دایسون و یانگ این است که بیش‌ازحد بر ظهور سفال‌های خاکستری در لایه‌نگاری حسنلو تأکید نموده و آن را به کل فلات ایران تعمیم داده‌اند. همچنین بیشتر

سفال‌های موردمطالعه به‌وسیله یانگ از قبرستان‌های عصر آهن به‌دست آمده و در اکثر موارد ارتباط آنها با محل‌های استقراری مشخص نیست (طلایی، ۱۳۸۹؛ ۱۵۰). شاخص‌ترین استقرار عصر آهن دشت قزوین، تپه سگزآباد است که تغییرات فرهنگی در نیمهٔ هزارهٔ دوم پ.م در آن، برعکس نظریات دایسون و یانگ به‌صورت تدریجی بوده و تحول ناگهانی در ساختار و فرم سفالینه‌های تپه سگزآباد رخ نداده است (طلایی، ۱۳۷۳: ۲۶۳). نکته قابل‌تأمل در فرهنگ‌های عصر آهن دشت قزوین، همانند اکثر مناطق ایران هم‌زمان با تحولات سیاسی، فرهنگی و اقتصادی مربوط به اواخر هزارهٔ دوم و اوایل هزارهٔ اول پ.م (آهنII) است که در ادبیات باستان‌شناسی به‌عنوان «دوران تاریک» و ناشی از جابه‌جایی اقوام یاد شده است. اکثر آثار مربوط به این دوران از گورستان‌های بدون ارتباط با محل استقرار کشف شده‌اند. قبور عصر آهن قبرستان سگزآباد دشت قزوین نیز ازجمله گورستان‌هایی است که هیچ استقراری در ارتباط با آن یافت نشده و نزدیک‌ترین استقرار به آن تپه سگزآباد است. همچنین در این دوره محوطهٔ استقراری سگزآباد به‌لحاظ وسعت دچار افت شدید شده است؛ به‌طوری‌که نشانه‌های بارزی از استقرار موقت به‌صورت دیرک‌های چادر و سنگ‌چین‌های نامنظم بدون ارتباط با فضای معماری در مناطق غربی و مرکزی یافت شده است (طلایی، ۱۳۸۹؛ ۱۶۹). بنابراین، شناخت الگوی معیشت، تبادلات فرهنگی، اقتصادی و ارتباط گورستان‌ها با محوطه‌های استقراری، نیازمند مطالعات میان‌رشته‌ای است که کمتر در تبیین فرایندهای فرهنگی این دوره (آهن II) نمود پیدا کرده است. براین اساس، پژوهش حاضر می‌تواند گامی مفید و مؤثر در تبیین فرایندهای فرهنگی و ارزیابی فرضیات نظری باستان‌شناختی باشد.

۲. متالوژی باستانی دشت قزوین؛ چشم‌انداز پژوهشی

باوجود پیشینه‌ی متالورژی کهن و غنای داده‌های فلزی دشت قزوین، در زمینهٔ فرایندهای متالورژی باستانی تحقیقات اندکی در این ناحیه و حتی فلات مرکزی انجام شده است که در ادامه به شاخص‌ترین آنها پرداخته می‌شود.

مطالعات اولیه در زمینهٔ فلزکاری دشت قزوین به‌وسیله‌ی ملک شهمیرزادی بر مبنای یافته‌های فلزی تپه زاغه و سگزآباد انجام شده است. داده‌های فلزی به‌دست‌آمده از تپه زاغه از پایه مس هستند که به اعتقاد وی تمامی این اشیا از مس طبیعی و به روش چکش‌کاری ساخته شده‌اند (Malek Shahmirzadi 1977: 355-357). ایشان در پژوهشی دیگر به بررسی و طبقه‌بندی مصنوعات مسی و مفرغی مکشوفه از تپه سگزآباد شامل دکمه، حلقه، مجسمه، سر پیکان و سایر اشیا پرداخته است که برای هر گروه روش ساخت متفاوتی نظیر قالب باز و یک کفه، ریخته‌گری، ورقه‌های نواری و موم گمشده بیان داشته است و همچنین نزدیک‌ترین منابع مس مورداستفاده فلزکاران سگزآباد را منابع مس ناحیهٔ طارم معرفی نموده است (Malek Shahmirzadi 1979).

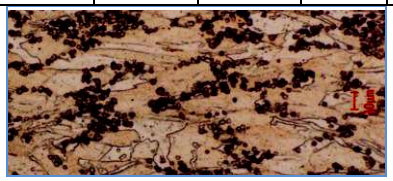
طلایی اشیای فلزی به‌دست‌آمده از لایه‌های استقراری عصر آهنI تپه سگزآباد را برمبنای روش‌های تزیین و فرم، مورد بررسی قرار داده و با اشیای فلزی سایر استقرارهای باستان‌شناختی هم‌دورهٔ سگزآباد مقایسه و تحلیل کرده است (Talai 1984). همچنین ایشان در پژوهشی دیگر (طلایی، ۱۳۸۱) کلیتی از فرایندهای فلزکاری فلات مرکزی را با تأکید بر دشت قزوین تبیین نموده است و بر مبنای نتایج حاصل از آنالیز عنصری داده‌های فلزی لایه‌های استقراری پنجم و ششم تپه سگزآباد به‌روش PIXE و بررسی کانی‌شناسی سنگ معادن مکشوفه از سطح تپه، به بررسی فنّاوری فلزگری کهن تپه سگزآباد در چارچوب

تحلیل‌های زیست‌محیطی پرداخته است. نتایج تجزیه عنصری نمونه‌های فلزی موردبررسی وی نشان از به‌کاربردن مس به نسبت خالص (۹۷٪) و حاوی مقادیر اندکی قلع و آرسنیک (کمتر از ۲ ٪) در ساخت آن‌ها دارد.

بحرالعلومی و همکارانش سه نمونه از داده‌های فلزی مکشوفه از تپه زاغه را موردمطالعه و بررسی آزمایشگاهی قرار داده‌اند (بحرالعلومی و همکاران، ۱۳۸۶) که اشیای موردنظر دارای درصدهای مختلفی از مس می‌باشند. آن‌ها با بررسی متالوگرافی یک نمونه از آثار مزبور، وجود باندهای دوقلویی در زمینهٔ فلزی را نشانه استفاده از عملیات کار گرم یا چکش‌کاری گرم دانسته و از سوی دیگر؛ با مشاهده ساختار دفرمه یا واپیچش شده، خطوط لغزشی، تغییر شکل، کشیدگی دانه‌ها و جهت‌دار شدن آخال‌ها (جدول ۱)، اذعان نموده‌اند که در مرحله پایانی ساخت اشیا عملیات چکش‌کاری سرد بر روی آنها انجام‌گرفته است.

جدول ۱- نتایج بررسی متالورژیکی یک نمونه از داده‌های فلزی تپه زاغه (بحرالعلومی و همکاران، ۱۳۸۶: ۴۰-۳۳)

ترکیب شیمیایی	عنصر	Al	Ca	S	Sn	Fe	Na	Cl	Cu
	درصد وزنی	۰/۱	۰/۲۲	۰/۳	۰/۵۲	۰/۶۶	۱/۳۱	۱/۹۳	۹۳/۸۷



مقالهٔ مرتضوی و همکارانش یکی از جامع‌ترین گزارش‌های ارائه شده در زمینهٔ متالورژی باستانی دشت قزوین محسوب می‌شود (Mortazavi et al. 2011) این پژوهش بر روی آثار فلزی (پایه مس) مکشوفه از لایه‌های استقراری آهن I و II صورت گرفته است و بیانگر تنوع ترکیبات مس در ساخت مصنوعات فلزی آن دوره است. به‌طوری‌که فلزگران سگزآباد در عصر آهن از آلیاژهای مس- آرسنیک (Cu-As)، مس- قلع (Cu-Sn) و مس غیرآلیاژی (به‌نسبت خالص) به‌صورت هم‌زمان بهره برده‌اند. همچنین خلوص بالای آلیاژها و فلزات به‌کاررفته در ساخت این مصنوعات حاکی از مهارت بالای فلزگران این منطقه در استحصال و تصفیه کانسارهای فلزی است (جدول ۲). باوجود تنوع ترکیبات به‌کاررفته در آلیاژسازی تپه سگزآباد، اکثر نمونه‌ها روش ساخت یکسانی را نشان می‌دهند که شامل چکش‌کاری سرد و گرم و تاب‌کاری نهایی است. این امر می‌تواند دلیلی بر وجود کارگاه‌های تخصصی فلزکاری در آن دوره باشد. نکته قابل‌تأمل این است که درصد بالایی از اشیای فلزی تپه سگزآباد از مس غیرآلیاژی به نسبت خالص ساخته شده‌اند. این درحالی است که استفاده از مس به نسبت خالص (مس طبیعی) در سایر نواحی فلات ایران در عصر مفرغ و آهن چندان مرسوم نبوده است که این مسئله نشان‌دهندهٔ پیچیدگی تحلیل فرایندهای متالورژی در فلات ایران است و به‌سادگی نمی‌توان داده‌های به‌دست‌آمده از یک منطقه را به کل فلات ایران تعمیم داد.

جدول ۲- نتایج بررسی متالورژیکی یک نمونه از داده‌های فلزی تپه سگزآباد (Mortazavi et al. 2011: 52-53)

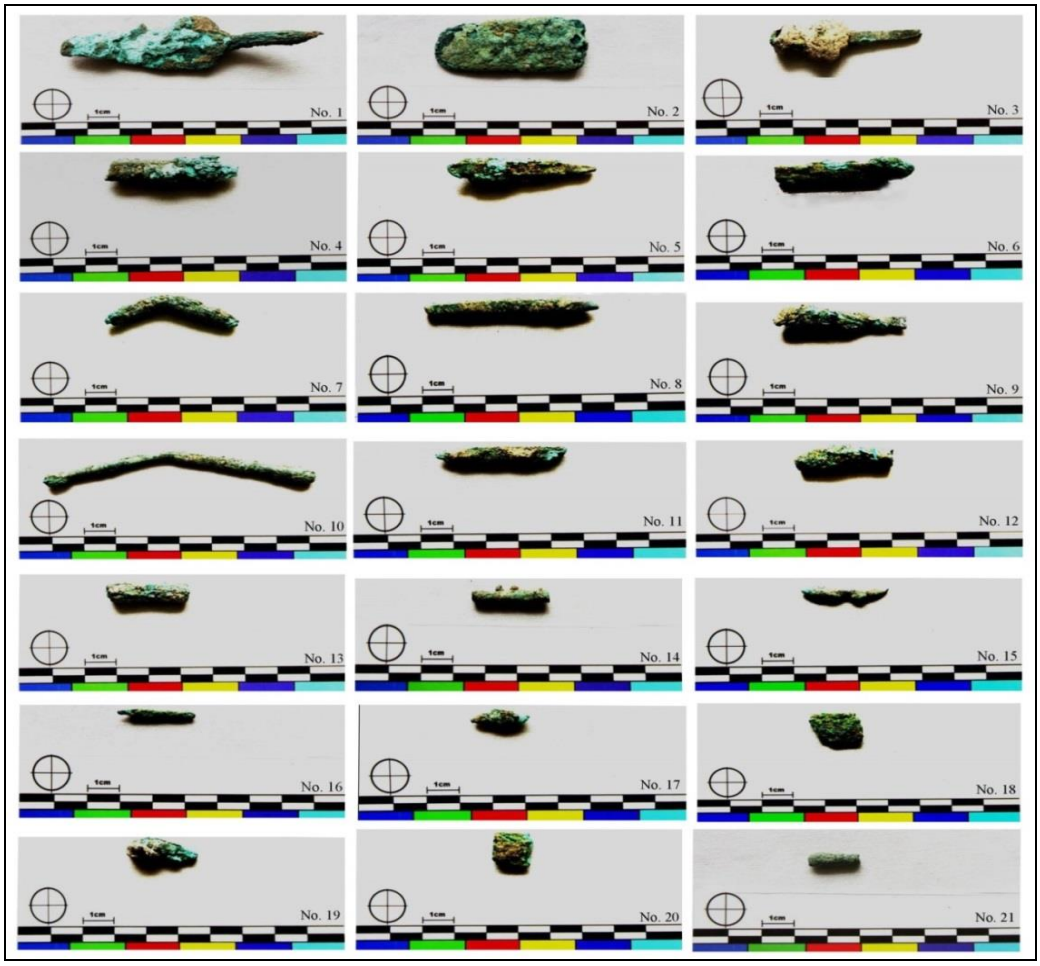
ترکیب شیمیایی	عنصر	P	Zn	Ni	Fe	Ag	Sn	As	Cu
	درصد وزنی	۰/۴۸	۰/۳۵	-	-	۰/۰۲	-	۰/۰۶	۹۹/۳

۳. داده‌های پژوهش و روش‌شناسی

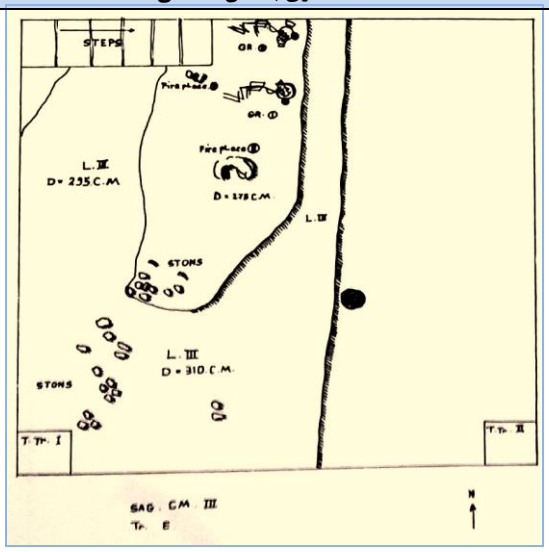
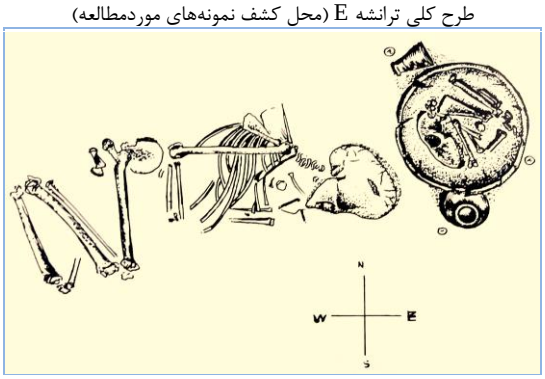
رهیافت پژوهشی و روش‌شناسی تحقیق پیش‌رو تجربی-تحلیلی بوده و مبتنی بر ابزارهای آنالیز و تجزیه دستگاهی در چارچوب تحلیل‌های متالورژیکی و آماری است.

۱،۳. داده‌ها: توصیف و انتخاب

داده‌های موردمطالعه در پژوهش حاضر شامل ۲۱ قطعه فلزی با ابعاد و فرم‌های به نسبت متفاوت می‌باشند (شکل۱ و جدول۳) که همهٔ آن‌ها از کاوش قبور عصر آهنII قبرستان سگزآباد قزوین در سال ۱۳۵۱ به‌وسیله ملک‌زاده به‌دست‌آمده‌اند (ملک‌زاده، ۱۳۵۶: ۸۰-۷۳). طبق گزارش کاوشگر، آثار مکشوفه از این گورها با آثار خورین و قیطریه قابل‌مقایسه هستند. همچنین برمبنای گونه‌شناسی سفالینه‌های مکشوفه از آنها، با آثار استقرار عصرآهن تپه سگزآباد و گورستان‌های خوروین، مارلیک، قیطریه، سیلکA و B شباهت زیادی دارند (فاضلی و نقشینه، ۱۳۸۵: ۱۲۱-۱۱۸). تمامی نمونه‌ها پایه مسی و اغلب به فرم میخ و سوزن هستند که سطوحشان پوشیده از رسوبات خاک و محصولات خوردگی سبز و سبز روشن است. این آثار از نظر باقی‌ماندهٔ مغز فلزی، به دو دسته قابل تقسیم بودند؛ دسته اول، خوردگی موضعی داشته و از مغز فلزی به‌نسبت سالمی برخوردار بودند. دسته دوم، خوردگی شدید داشته و به محصولات خوردگی تبدیل شده بودند. همچنین نمونه‌برداری از آثار، متناسب با روش و نوع آنالیز انجام گرفت.



شکل ۱- نمونه‌های موردمطالعه «مکشوفه از قبور عصر آهن II قبرستان سگزآباد دشت قزوین»

جدول ۳- مشخصات داده‌های فلزی موردمطالعه			کد نمونه
مستند نگاری باستان‌شناختی	مشخصه فنی	فرم	
 طرح کلی ترانشه E (محل کشف نمونه‌های موردمطالعه)	دارای مغز فلزی به نسبت سالم	سر پیکان	۱
	فاقد مغز و باقی‌مانده فلزی	چاقو	۲
	خوردگی شدید، مغز فلزی کم	میخ	۳
	دارای مغز فلزی سالم	میخ	۴
	دارای مغز فلزی کامل سالم	میخ	۵
	دارای‌باقی‌مانده‌فلزی‌متخلخل	میخ	۶
	فاقد مغز و باقی‌مانده فلزی	مفتول	۷
	فاقد مغز و باقی‌مانده فلزی	میخ	۸
	دارای مغز فلزی بسیار کم	میخ	۹
	دارای مغز فلزی سالم	سنجاق	۱۰
	فاقد مغز فلزی، خوردگی‌شدید	میخ	۱۱
	فاقد مغز فلزی، خوردگی‌شدید	؟	۱۲
 وضعیت اسکلت شماره۱ (ترانشه E، لایه LXIX، عمق ۲۷۵cm) و شیوهٔ قرارگیری نمونه‌ها در مجاورت آن (ملک‌زاده، ۱۳۵۶)	فاقد مغز فلزی، خوردگی‌شدید	؟	۱۳
	فاقد مغز فلزی، خوردگی‌شدید	؟	۱۴
	مغز سالم، خوردگی‌موضعی	سوزن	۱۵
	مغز اندک، خوردگی شدید	سوزن	۱۶
	فاقد مغز فلزی، خوردگی‌شدید	سوزن	۱۷
	فاقد مغز فلزی، خوردگی‌شدید	قسمتی از بدنه	۱۸
	مغز اندک، خوردگی شدید	؟	۱۹
	فاقد مغز فلزی، خوردگی‌شدید	قسمتی از بدنه	۲۰
	مغز اندک، خوردگی شدید	؟	۲۱

۲،۳. روش‌ها

شناسایی و آنالیز ترکیب شیمیایی نمونه‌های موردمطالعه با استفاده از دستگاه پلاسمای جفت‌شده القایی مجهز به طیف‌سنج جرمی (ICP-MS) مدل Agilent Series 4500 در شرکت مطالعات مواد معدنی زر آزما انجام گرفت. برای این منظور از کل نمونه‌های موردمطالعه، فقط تعداد شش نمونه که دارای حداقل ۰/۵ تا یک گرم مغز فلزی بودند مورد آنالیز شیمیایی با ICP-MS قرار گرفتند و آثار خوردگی در سایر نمونه‌ها به‌قدری زیاد است که امکان آنالیز شیمیایی آنها به دلیل نبود مغز فلزی لازم با روش مزبور امکان‌پذیر نبود. نمونه‌های منتخب پس از هضم اسیدی قوی (مخلوط اسیدی HNO_3 + HCl) برای آنالیز آماده شدند. هدف اصلی از انجام آنالیز نمونه‌ها با روش ICP-MS، علاوه بر تجزیه و درک ساختار شیمیایی، تحلیل منشأ آن‌ها برمبنای نوع و مقدار عناصر کمیاب (کم‌مقدار) است.

از میکروسکوپ نوری انعکاسی مدل Olympus (PMG3)[۲] و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به سیستم آنالیز عنصری (EDX) مدل Tescan MV2300[۳] برای تهیه تصاویر ریزساختاری و نیز آنالیز شیمیایی نمونه‌ها، اجزا و فازهای ریزساختاری و ناخالصی‌های (آخال‌ها) آنها استفاده شد. مشاهدات و آنالیز

SEM با استفاده از آشکارساز الکترون‌های برگشتی (BSE) انجام گرفت. علاوه بر آن، تعداد نُه نمونه کـه دارای حداقل مغز فـلزی قابل نمونه‌برداری بودند برای مشـاهدات ریزسـاختاری، شـــناسایی ناخالصـی‌هـا و فازهـای موجود در زمینهٔ فلزی آنها انتخاب شدند. برای این منظور قسمت کوچکی از ایـن نمونـه‌هـا جـدا و سـپس در رزین اپوکسی (چسب: رزین و سخت کننده) مانت سرد شده و پس از انجام عملیات سنباده‌زنی با ورقه‌های کاربیـد سیلیسیم و پولیش‌کاری (صیقل‌کاری) با پودر آلومینای یک میکرونی صورت گرفت. سطح پولیش شـده آنهـا بـا استفاده از یک محلول خورنده اسیدی (Scott 2014: 80-83; Scott 1991: 63-69) اچ یا حکـاکی شـیمیایی[۴] شده و سپس تحت مشاهده میکروسکوپی و آنالیز شیمیایی با EDX قرار گرفتند. این نمونـه‌هـا هـم از مقطـع طولی و هم از مقطع عرضی موردبررسی قرار گرفتند؛ به‌جز نمونه ۱۶ که به دلیـل ضـخامت بسـیار کـم و فـرم مفتولی آن، فقط از مقطع طولی موردمطالعه قرار گرفت. سطح نمونه‌ها قبـل از انجـام آنـالیز بـه‌منظـور ایجـاد سطحی با میزان رسانایی مناسب‌تر و مشاهده مطلوب مورفولوژی فازهای ریزساختاری، پوشش طلا داده شدند. پوشش طلا مانع از شارژ الکترونی در سطح نمونه‌ها حین مطالعه با میکروسکوپ الکترونـی مـی‌شـود (Frahm 2014: 6489).

۴. نتایج و تحلیل داده‌ها

۱،۴. تحلیل ترکیب شیمیایی نمونه‌های فلزی مکشوفه از قبرستان سگزآباد

نتایج تجزیه شیمیایی SEM-EDX ارائه شده از نمونه‌های موردمطالعه نشان می‌دهد (پیوست۲) کـه تمـامی آن‌ها از آلیاژهای پایه مس هستند و بر اساس داده‌های حاصل از آنالیز مزبور، مقدار مس در نمونـه‌هـای دارای مغز فلزی حدود ۷۰ تا ۸۲ درصد وزنی و در نمونه‌های فاقد مغز فلزی۴۰ تا ۵۵ درصـد وزنـی اسـت (نمـودار۱). نکته قابل‌تأمل، وجود ۳ تا ۶ درصد نیکل در ترکیب شیمیایی اکثر نمونه‌هاست (پیوست ۲). کـه البتـه در مـورد افزودن آگاهانه و تعمدی نیکل در ترکیب نمونه‌های موردمطالعه، نمی‌توان بـه‌طورقطـع اظهـارنظر نمـود، زیـرا علاوه بر نیکل، عناصری مثل روی، کبالت و آهن نیز در ترکیب شیمیایی اکثر آن‌ها بین ۲ تـا ۴ درصـد وزنـی شناسایی شد. از طرفی در بررسی ترکیب آلیاژی نمونه‌ها با روش ICP نیز، میزان نیکل حـدود ۱ تـا ۲ درصـد وزنی مشخص‌شده است[۵] (پیوسـت۱) که بعد از مـس، بیشـترین درصـد عناصـر را در ترکیـب شـیمیایی اکثـر نمونه‌ها به خود اختصاص داده و شایان‌ذکـر اسـت کـه تـاکنـون در هـیچ‌یـک از آلیاژهـای مسـی مکشـوفه از محوطه‌های باستانی ایران تا این مقدار نیکل و با این نسبت تقریب ثابت، گزارش نشده است. به‌جز یک نمونـه آلیاژ مسی مکشوفه از محوطه باستانی هفت‌تپه خوزستان (هزاره‌ی دوم پ.م) که حدود ۴ درصـد وزنـی نیکـل در ترکیب آن گزارش‌شده است (عود باشی و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۰۴) در هیچ‌یک از آلیاژهای مسی به‌دسـت‌آمـده از محوطه‌های باستان‌شناختی ایران، مقدار نیکل بیشتر از ۰/۵ تا ۲ درصد وزنی گزارش نشده است.

اولین گام روشمند برای تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده از آنـالیزها، بررسی مـاتریس همبسـتگی بـین متغیرهـا است که در پژوهش حاضر با استفاده از نرم‌افزار SPSS [۶] و به‌روش مـاتریس همبسـتگی اسـپیرمن- پیرسـون انجام شد (جدول ۴). مطالعه رابطه همبستگی میان دو متغیر و تعیین تأثیر یکی بر روی دیگری، جایگاه ویژه‌ای در مطالعات باستان‌شناسی دارد. کشف روابط و درک جهت و شـدت آن، عامـل مهمـی در شـناخت رفتارهـا و ساختار داده‌ها محسوب می‌شود. دو متغیر که مقیاس‌های اندازه‌گیـری کمـی داشـته باشـند ممکـن اسـت بـا یکدیگر رابطه داشته باشند. به عنوان مثال، افزایش مقادیر یک متغیر باعث کـاهش متغیـر دیگـر یـا بـرعکس

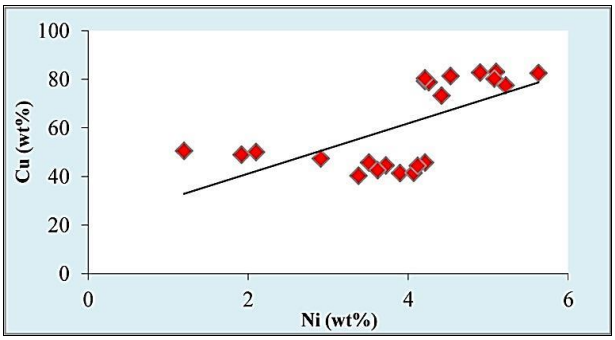
می‌شود (نیکنامی، ۱۳۸۷: ۲۲۱؛ بیورانی و جباری، ۱۳۹۲: ۲۲۶-۲۲۳). در جدول ماتریس همبستگی روابطی مشاهده می‌شود که نشان می‌دهند بعضی از عناصر با عناصر دیگر در ترکیب شیمیایی نمونه‌ها، رابطه مثبت (شدید، متوسط و کم) یا منفی دارد. برمبنای ترکیب شیمیایی نمونه‌ها و با بررسی ماتریس همبستگی آن‌ها می‌توان رابطه معناداری بین متغیرها پیدا کرد.

جدول ۴- جدول ماتریس همبستگی متغیرهای به‌روش اسپیرمن – پیرسون (برمبنای نتایج SEM-EDX)

Correlation	Cu	As	Sn	Ni	Zn	Co	Fe	Sb	P	S	Pb	Ag	Cr	Bi	Ca	Si	Mn	Cl
Cu	1.000	-.165	-.275	.601	-.035	.461	.142	-.487	-.119	-.207	.082	.222	.168	.109	.	.161	.110	-.899
As		1.000	-.028	-.553	-.676	.063	.572	-.253	-.051	.077	.693	-.087	-.228	-.068	.	-.044	-.203	.176
Sn			1.000	-.093	.012	.180	.169	.130	.069	.221	-.156	.061	-.262	.003	.	-.074	-.193	.307
Ni				1.000	.462	.416	.011	-.382	-.268	-.565	-.262	.060	-.082	-.101	.	.218	-.036	-.657
Zn					1.000	-.202	-.510	.084	-.456	-.529	-.581	-.282	-.131	-.410	.	.187	.476	-.011
Co						1.000	.542	-.291	.257	.089	.118	.367	-.059	.331	.	.343	-.023	-.514
Fe							1.000	-.469	.244	.092	.437	.192	-.458	.266	.	.091	-.395	-.122
Sb								1.000	.389	.461	-.046	.112	.170	.367	.	-.215	.070	.292
P									1.000	.757	.040	.608	.225	.800	.	-.106	-.254	.023
S										1.000	.022	.459	.123	.642	.	-.108	-.224	.213
Pb											1.000	.036	-.173	.335	.	-.085	-.369	-.089
Ag												1.000	.057	.535	.	-.107	-.338	-.224
Cr													1.000	.019	.	-.001	.388	-.101
Bi														1.000	.	-.082	-.313	-.159
Ca															1.000	.	.	.
Si																1.000	.228	-.183
Mn																	1.000	-.059
Cl																		1.000

نتایج حاصل از بررسی ماتریس ضرایب همبستگی میان متغیرها نشان می‌دهند (جدول ۴) که از میان عناصر آلیاژی مس؛ نیکل با ضریب همبستگی ۰/۶۰۱، بیشترین همبستگی مثبت با مس را دارد. بنابراین رابطه به نسبت بالا و معناداری بین مس و نیکل وجود دارد؛ یعنی در هر نمونه‌ای که درصد مس افزایش داشته است میزان نیکل آن‌هم افزایش را نشان می‌دهد. هرچند این فرض بر اساس میانگین درصد مس و نیکل در بین تمامی نمونه‌ها در نظر گرفته‌شده و ممکن است در بعضی از نمونه‌هایی که به‌صورت منفرد مقایسه شوند صادق نباشد. اما روند کلی برای تمامی نمونه‌ها به این صورت بوده است. همان‌طور که در نمودار پراکنش نیکل ـ مس (نمودار ۱) نشان داده‌شده، نمونه‌هایی که دارای درصد بالای مس هستند میزان نیکل آن‌ها هم بالاست. برای مثال نمونه‌های ۱، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۱۰ که مغز فلزی سالم‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها داشتند در ترکیب شیمیایی خود درصد بالایی از مس و نیکل را نشان می‌دهند و ازنظر فنون ساخت برای آزادسازی تنش‌های ناشی از چکش‌کاری گرم و سرد، تاب‌کاری (آنیل)[۷] شده‌اند که ریزساختارشان کمترین خطوط لغزشی را نشان می‌دهند (شکل ۲ تا ۴). در متالورژی امروزی به آلیاژهای مس حاوی بیش از ۱۰ درصد نیکل، برنز نیکلی اطلاق می‌شود، آلیاژهای مس- نیکل قابلیت کار گرم و سرد، شکل‌پذیری و استحکام بالایی دارند و هم‌چنین در حالت مس و نیکل در حالت‌جامد با هر نسبتی درهم حل می‌شوند. ازنظر مهندسی متالورژی افزودن نیکل، استحکام و مقاومت در برابر خوردگی و اکسایش آلیاژهای مس را افزایش می‌دهد و به همین خاطر در صنعت برای ساخت لوله‌های انتقال آب در زیردریا به‌کار می‌روند (اسمیت،۱۳۹۰: ۲۸۵). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که یکی از دلایل حفظ استحکام بیشتر و سالم ماندن مغز فلزی نمونه‌های مزبور نسبت به سایر نمونه‌ها، مربوط به درصد بالای نیکل و انجام عملیات حرارتی تاب‌کاری نهایی است. البته تنها وجود نیکل را نمی‌توان عامل بازدارنده خوردگی معرفی نمود و جهت اثبات قطعی این فرض نیاز به بررسی

نمونه‌های بیشتر است؛ چون در نمونه‌های خورده شده و فاقد مغز فلزی هم میزان نیکل با نمونه‌های دارای مغز فلزی تفاوت چندانی ندارد و مکانیسم خوردگی محیطی نمونه‌ها با توجه به خواص متالورژیکی هرکدام از آنها می‌تواند بر نرخ خوردگی پایین و سالم ماندن مغز فلزی آن‌ها مؤثر باشد. علاوه بر نیکل در ترکیب شیمیایی اکثر نمونه‌ها عناصری مثل آهن، روی و کبالت با مقادیر میانگین ۳ تا ۴ درصد و هم‌چنین طیف وسیعی از عناصری نظیر آنتیموان، سرب، کروم و غیره نیز وجود دارد که بیشتر از این‌که عنصر آلیاژی محسوب شوند، به‌عنوان عناصر ناخالصی مطرح بوده و حاکی از یک فرایند ساخت متالوژی کنترل نشده در نمونه‌ها دارد تا یک فرایند ساخت حساب‌شده و آگاهانه، به‌گونه‌ای که به نظر می‌رسد این ناخالصی‌ها در مرحله استحصال و تشویه کامل جدا نشده و از سنگ معدن وارد زمینه فلزی شده‌اند. هم‌چنین وجود ناخالصی‌های نیکل، روی، کبالت، نقره، آهن، آرسنیک، سرب و غیره در اغلب آلیاژهای مسی باستانی گزارش‌شده است و وجود آن‌ها در زمینهٔ فلزات باستانی پدیده‌ای معمولی و اجتناب‌ناپذیر است (Petersen 2010: 52-53; Hauptmann 2007: 277-278).

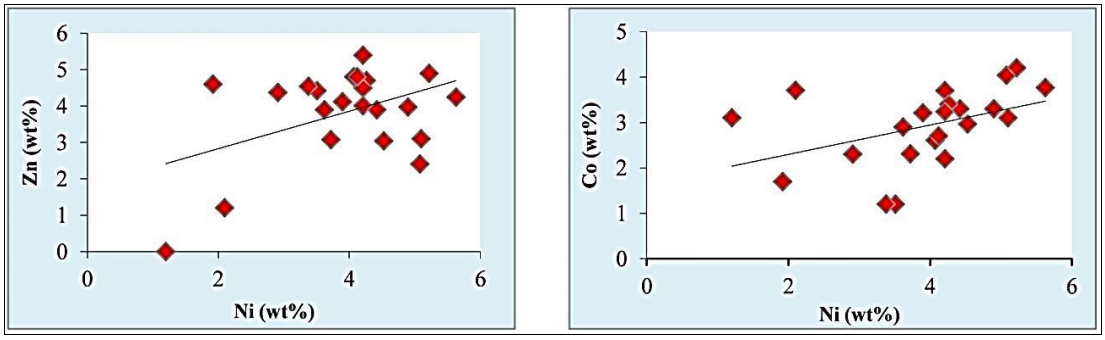


نمودار ۱- توزیع همبسته مس – نیکل (Cu-Ni) در نمونه‌های موردمطالعه

جدول ماتریس همبستگی، ضریب همبستگی مثبت و رابطه به نسبت معناداری بین نیکل، کبالت و روی را نشان می‌دهد (جدول ۴؛ نمودار ۲). بین عناصر کم‌مقدار نظیر بیسموت، نقره، گوگرد، فسفر و غیره نیز ضریب همبستگی مثبت و بالایی وجود دارد. هم‌چنین مقادیر به نسبت مشابه عناصر مزبور (کمیاب) در تمامی نمونه‌های آنالیز شده به‌روش ICP-MS نیز مشاهده می‌شود (جدول پ-۱). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سنگ معادن اولیه یکسانی (مربوط به ناحیه زمین‌شناسی واحدی) در ساخت نمونه‌های موردمطالعه به‌کاررفته است. هم‌چنین این همبستگی و تشابه علاوه بر یکسان بودن سنگ معدن اولیه به‌کاررفته جهت استحصال مس، می‌تواند بر تشابه مکان ساخت نمونه‌های موردمطالعه نیز دلالت داشته باشد.

هرچند کشف و استفاده از فلز آهن در اواخر هزارهٔ دوم پ.م (آهن II) در فلات ایران رایج شده و در بعضی از نواحی استفاده از مس کاهش‌یافته (Tornton 2009; Mortazavi et al. 2011: Pigott 2004)، همچنان از مس و آلیاژهای آن در دشت قزوین برای ساخت اشیای فلزی استفاده شده است؛ به‌طوری‌که بر اساس داده‌های فلزی عصر آهنI و II مکشوفه از بافت استقراری تپه سگزآباد دشت قزوین، فلزگران این ناحیه از آلیاژهای مس-آرسنیک (Cu-As)، مس- قلع (Cu-Sn) و مس غیر آلیاژی (با خلوص ۹۹٪) به‌صورت هم‌زمان برای ساخت اشیای فلزی بهره برده‌اند و هم‌چنین خلوص بالای آلیاژها و فلزات به‌کاررفته در ساخت اشیای فلزی آن دوره، حاکی از مهارت بالای فلزگران این منطقه در فنون متالورژی دارد (Mortazavi et al. 2011: 55-57). نمونه مشابه دیگری از تنوع آلیاژسازی عصر آهن سگزآباد دشت قزوین در مطالعات صورت گرفته بر

روی‌داده‌های فلزی عصر آهن و مفرغ گودین‌تپه کرمانشاه نیز گزارش‌شده است (Frame 2010: 1710-1713). اما میزان آرسنیک و قلع که جزو عناصر آلیاژی اصلی در متالورژی باستانی محسوب می‌شوند، فقط در یک نمونه (شماره ۲) از داده‌های فلزی قبور، حدود ۴ درصد آرسنیک مشخص‌شده است (جدول ۲- پ). در ترکیب شیمیایی سایر نمونه‌ها درصد قلع و آرسنیک کمتر از مقداری است که بتوان اضافه نمودن آنها را تعمدی فرض نمود. نکته قابل‌تأمل دیگر وجود دو سنت فلزکاری با سطح متالورژی به‌طور کامل متفاوت در عصر آهنII دشت قزوین است. هرچند داده‌های فلزی مطالعه شده از دو کانتکست متفاوت یعنی محوطه استقراری سگزآباد و قبور عصر آهن هستند اما تا این میزان افتراق در یک منطقه، نشان از پیچیدگی فرایندهای فرهنگی و قابلیت‌های فنّاورانه فلات ایران نظیر فنون ساخت متالورژی داشته که به‌سادگی نمی‌توان داده‌های به‌دست‌آمده از یک منطقه را به‌کل فلات ایران تعمیم داد و آن‌ها را به‌صورت یکپارچه تحلیل نمود.



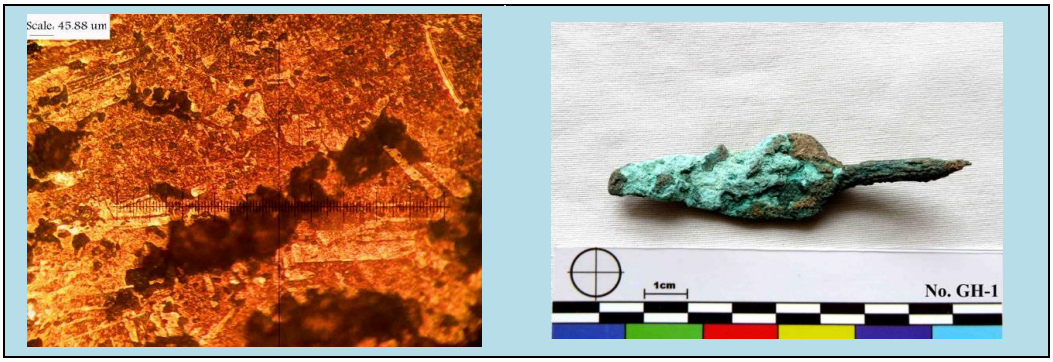
نمودار ۲- توزیع همبسته نیکل – کبالت (Ni-Co) و نیکل – روی (Ni-Zn) در نمونه‌های موردمطالعه

در جدول ماتریس همبستگی مس و کلر شدیدترین همبستگی منفی در بین تمامی متغیرها را نشان می‌دهند و ضریب همبستگی بین آن‌ها ۰/۸۹۹- است. یعنی با افزایش درصد مس در ترکیب شیمیایی نمونه‌ها، میزان کلر به‌شدت کاهش‌یافته و برعکس. نکته قابل‌توجه این است که در نمونه‌هایی که درصد مس در ترکیب آن‌ها به‌شدت کاهش پیدا کرده، هم‌زمان میزان کلر به‌صورت خطی افزایش‌یافته است. این نمونه‌ها فاقد مغز فلزی بوده و به محصولات خوردگی تبدیل شده بودند. دلیل افزایش یون کلر مربوط به واکنش آلیاژهای مسی با محیط دفن نمونه‌ها در فرایند خوردگی است که یون کلر در حضور رطوبت و اکسیژن با مس واکنش داده و کلرید مس یک ظرفیتی (نانتوکیت) تشکیل می‌دهد و سپس در مجاورت هوا و رطوبت به تری‌هیدروکسی کلریدهای مس تبدیل می‌شود که ترکیب همان محصولات خوردگی نمونه‌های موردمطالعه است (Casaletto et al. 2006: 618-623; Scott 2002: 40-52; Scott 1990: 190-210).

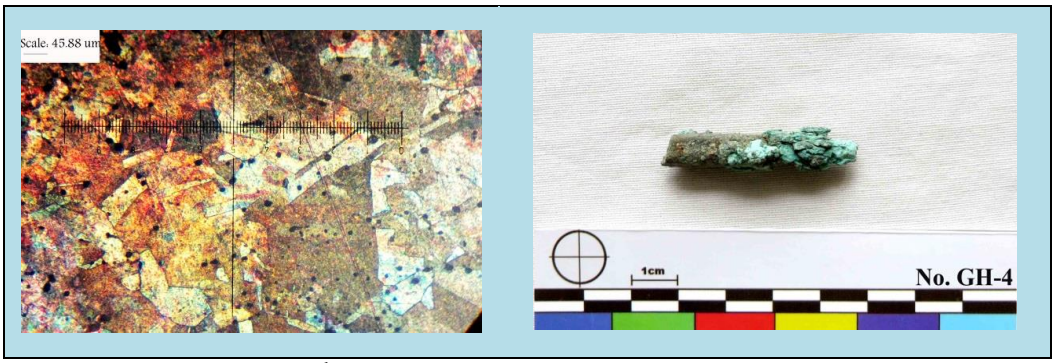
۲،۴. تحلیل ریزساختار و روش ساخت

مطالعات متالوگرافی روش ساخت تقریباً یکسانی را برای نمونه‌های موردمطالعه نشان می‌دهند؛ هرچند عملیات صورت گرفته به‌منظور شکل‌دهی نهایی آن‌ها تا حدودی با یکدیگر متفاوت بوده و به دو گروه مختلف قابل‌تفکیک هستند. مطابق شکل۲، گروه اول شامل چهار نمونه به فرم میخ (نمونه‌های ۳، ۴، ۵، ۶)، یک نمونه سر پیکان (نمونه۱) و یک نمونه به فرم میله‌ای (نمونه۱۰) است. مشاهدات ریزساختاری در نمونه‌های مزبور یک‌فاز زمینه فلزی با ساختار کارشده، دانه‌های تبلور مجدد یافته و هم‌محور α را نشان می‌دهد که دارای باندهای دوقلویی صاف و فاقد خطوط لغزشی هستند (شکل‌های ۲ تا ۴). وجود باندهای دوقلویی در ساختار فلزاتی مانند مس دارای شبکه بلوری FCC با انرژی نقص چیده شدن پایین، نشان از به‌کارگیری فرایند متالورژی خاصی

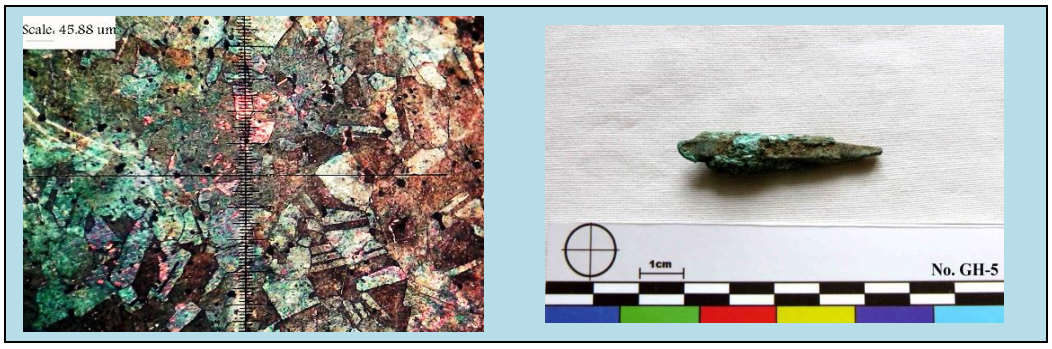
در ساخت آن‌ها دارد. به این معنا که این اشیاء به‌روش چکش‌کاری سرد یا گرم همراه با انجام عملیات تاب‌کاری ساخته‌شده‌اند (Scott 2014: 77-84). وجود باندهای دوقلویی صاف و عدم وجود خطوط لغزشی در آن‌ها حکایت از انجام تاب‌کاری کامل در مرحله نهایی ساخت آن‌ها دارد (Frame 2010: 1709).



شکل ۲- ریزساختار میکروسکوپی نوری از مغز فلزی نمونه ۱، دارای ساختار تبلور مجدد یافته با باندهای دوقلویی (محلول اچ:کلروفریک آبی)



شکل ۳- ریزساختار میکروسکوپی نوری از مغز نمونه ۴، دارای ساختار با دانه‌های هم‌محور کاملاً تبلور مجدد یافته و باندهای دوقلویی صاف، که نقاط تیره پراکنده در کل ریزساختار، ناخالصی یا آخال‌ها هستند (محلول اچ:کلروفریک آبی)



تصویر ۴- ریزساختار میکروسکوپی نوری از مغز فلزی نمونه، شامل ریزساختار تبلور مجدد یافته با دانه‌های هم‌محور و دوقلویی‌های صاف به همراه ناخالصی‌ها که به رنگ تیره و به دلیل چکش‌کاری، کمی از زمینه فلزی جدا و حالت کشیده به‌خود گرفته‌اند (محلول اچ:کلروفریک آبی)

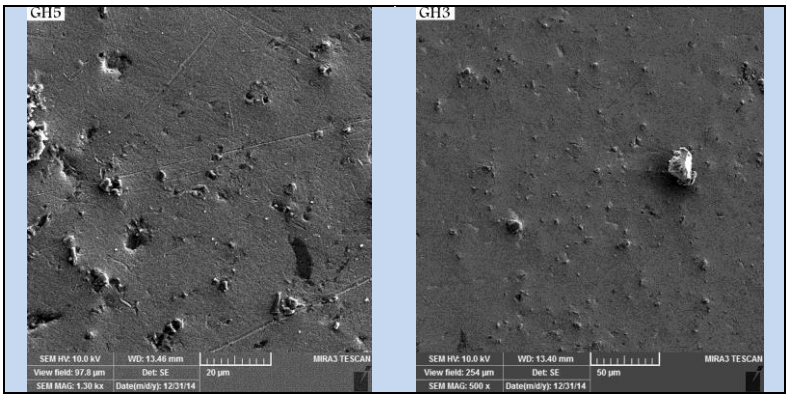
به‌طور کلی به نظر می‌رسد تمامی نمونه‌های گروه اول، تحت شکل‌دهی و چکش‌کاری گرم توأم با تاب‌کاری قرارگرفته‌اند که به دلیل تنش‌زدایی حین عملیات کارگرم و کاهش خطوط لغزش و سایر اثرات ناشی از کار مکانیکی و نیز به خاطر درصد بالای نیکل، از نرخ خوردگی کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها برخوردار بوده و مغز فلزی آنها سالم‌تر باقی‌مانده است. مشاهده درصد بالای ناخالصی‌ها و آخال‌ها در ریزساختار نمونه‌ها به‌صورت نقاط تیره‌رنگ ریز و پراکنده در کل ریزساختار، بیانگر پایین بودن سطح دانش تشویه و استحصال مس است که ناخالصی‌های سنگ معدن، وارد زمینه فلزی شده‌اند. این ناخالصی یا آخال‌ها

به‌صورت تیره‌رنگ درزمینهٔ فلزی کاملاً مشخص هستند که به دلیل چکش‌کاری در ریزساختار، بعضی از نمونه‌ها حالت پهن و کمی کشیده گرفته و در مواردی به دلیل شدت کار بیشتر، موجب جدایش آنها از زمینه شده است. این‌گونه ناخالصی‌ها اغلب در فلزات باستانی با انجام اعمال حرارتی ــ مکانیکی تبلور مجدد پیدا نمی‌کنند بلکه شکسته شده و به تکه‌های کوچک‌تری تبدیل می‌شوند (Scott 1991: 6-9).

گروه دوم شامل نمونه‌هایی به فرم سوزن هستند و اغلب مغز فلزی کمتری داشته و خوردگی بیشتری نسبت به نمونه‌های گروه اول (نمونه‌های میخی یا پینی شکل) دارند. بررسی ریزساختاری نمونه‌های سوزنی شکل در ریزساختار خود دانه‌های درهم و تغییر شکل یافته، واپیچش شبکه بلوری و خطوط لغزشی فراوانی را نشان می‌دهند (شکل ۵). ویژگی‌های مزبور حاکی از این است که نمونه‌ها پس از شکل‌دهی اولیه، تحت چکش‌کاری گرم و سرد و تاب‌کاری (آنیل) قرارگرفته‌اند و در ادامه برای دست‌یابی به فرم موردنظر به‌احتمال‌قوی سوزنی در مرحله نهایی به‌شدت چکش‌کاری سرد شده‌اند که شواهد و آثار آن به‌صورت خطوط لغزشی فراوان در ریزساختار نمونه‌های سوزنی شکل مشخص است (Scott 2014: 77; Scott 1991: 8-10). عملیات شکل‌دهی سرد به‌واسطه کرنش سختی بالایی که در نمونه‌های فلزی ایجاد می‌کند، می‌تواند برای سخت‌کردن فلزات یا آلیاژهایی که قابلیت عملیات حرارتی ندارند به‌کار گرفته شود (دیتر، ۱۳۸۷: ۲۸۵). باتوجه به باقی‌ماندن تنش‌های پسماند ناشی از چکش‌کاری سرد، مصنوع فلزی به‌وجود آمده، ساختاری به‌مراتب سخت‌تر نسبت به آلیاژ اولیه را نشان می‌دهد. این ویژگی با توجه به فرم سوزنی شکل نمونه‌ها، که اغلب در آن‌ها ایجاد یک ساختار سخت مدِنظر است قابل توجیه است و کاملاً هم‌خوانی دارد. اما به‌طورقطع نمی‌توان بیان کرد که در مرحله‌ی نهایی تولید از چکش‌کاری سرد برای دستیابی به ساختاری با سختی بیشتر بهره گرفته‌شده است. از طرف دیگر، زیاد بودن خطوط لغزشی و تنش‌های پسماند ناشی از چکش‌کاری سرد در مرحله‌ی نهایی ساخت نمونه‌های سوزنی شکل، خود می‌تواند دلیل دیگری برافزایش خوردگی و اکسایش آنها نسبت به سایر نمونه‌ها باشد (پیرون، ۱۳۸۷: ۱۵۹). صرف‌نظر از ارتقای خواص قطعه در اثر انجام عملیات شکل‌دهی یا چکش‌کاری سرد، اغلب از این عملیات برای رسیدن به شکل قطعه نهایی در نمونه‌های فلزی عصر باستان بهره می‌جستند. لذا هدف اصلی از سرد کاری نهایی نمونه‌های موردمطالعه را نمی‌توان نیل به‌سختی بالا در آنها تلقی نمود، چراکه کاربرد دقیق این اشیا مشخص نیست و اظهارنظر در این موردنیاز به مطالعه نمونه‌های بیشتری دارد. در ضمن اظهارنظر قطعی درخصوص روش ساخت نمونه شماره ۲ که فاقد مغز فلزی است بسیار دشوار و غیرممکن است.

تصویر ۵- ریزساختار میکروسکوپی نوری از مغز فلزی نمونه شماره ۹ با ساختار به‌شدت چکش‌کاری شده با دانه‌های درهم و تغییر شکل یافته و همچنین خطوط لغزشی فراوان (محلول اچ: کلروفریک آبی)

شکل ۶ تصاویری از انواع ذرات ناخالصی را در ریزساختار SEM نمونه‌های ۳ و ۵ (در حالت پولیش شده و بدون حکاکی شیمیایی) نشان می‌دهد. در این تصاویر، ناخالصی‌ها به‌صورت ذرات تیره یا روشن‌تر از فاز زمینه مشاهده می‌شوند. براساس نتایج آنالیز شیمیایی EDS از این ذرات مطابق شکل۶ حضور طیف گسترده‌ای از عناصر ناخالصی شامل آهن، نیکل، کبالت، روی، گوگرد و غیره در ترکیب اجزای فازی ریزساختاری حکایت از متالورژی کنترل‌شده در فرایند ساخت این نمونه‌ها دارد که میزان مس در ترکیب شیمیایی این فازها نسبت به فاز زمینه کمتر است و درصد عناصری نظیر آهن، گوگرد، سرب، بیسموت و غیره در آنها بیشتر است. ذرات سفیدرنگ دارای درصد بالایی از سرب و در بعضی از نمونه‌ها دارای مقادیر زیادی بیسموت هستند (شکل ۷). عدم انحلال سرب و نیز حلالیت بسیار پایین بیسموت در مس در حالت‌جامد باعث شده است که این دو عنصر، به‌صورت فازهای خالص جداگانه‌ای در ریزساختار فاز زمینه آلفا در نمونه‌های موردمطالعه رسوب نمایند. پیش‌تر نیز رسوب گویچه‌های سربی در مرزدانه‌های مس در حین انجماد مذاب گزارش‌شده است (عود باشی و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۰۵؛ Junk 2003: 29; Scott 1991: 23-24). تصاویر ریزساختاری اکثر نمونه‌ها شبیه هم است و هم‌چنین زمینه فلزی نمونه‌ی۶ ناخالصی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد که ترکیب فازهای تیره‌رنگ زمینه فلزی ترکیبی از مس، آهن، گوگرد، فسفر، سیلیسیم، آلومینیوم، تیتانیم، آرسنیک و کلسیم است. به مقدار خیلی کم کبالت، نیکل، روی و پتاسیم هم مشخص شد. در ترکیب فازهای ناخالصی نمونه ۴ و ۵ که به رنگ تیره و خاکستری در زمینهٔ فلزی قابل‌مشاهده هستند و مس، نیکل، آهن، روی، کبالت، سرب، آنیموان، فسفر، گوگرد و درصد بسیار کمی سیلیسیم، آلومینیوم، روی و نِودمیوم نیز شناسایی شد (شکل ۶).



شکل ۷- تصویر ذرات ناخالصی در ریزساختار SEM-BSE از نمونه شماره۳ (راست) و نمونه ۵ (چپ) (ذرات روشن در تصویر سمت راست دارای مقدار زیادی بیسموت و سرب و ذرات تیره و خاکستری در تصویر سمت چپ دارای مس، نیکل، آهن، گوگرد و غیره می‌باشند)

۵. بحث

تپه سگزآباد دشت قزوین شاخص‌ترین مرکز استقراری عصر مفرغ متأخر و عصر آهن (۲۱۰۰ تا ۵۰۰ ق.م) در شمال مرکزی فلات مرکزی ایران به‌شمار می‌رود که شواهد فلزکاری و متالورژی گوناگونی از مصنوعات فلزی گرفته تا ابزارهای ذوب و ریخته‌گری از آن کشف‌شده است. همچنین تپه سگزآباد و تپه حصار دامغان جزو اولین مراکز پیش‌ازتاریخی در شمال مرکزی فلات مرکزی ایران به‌حساب می‌آیند، که استفاده از مس‌های آلیاژی برای ساخت مصنوعات فلزی رواج پیداکرده است. اما تپه حصار برعکس سگزآباد در اواخر هزارهٔ سوم و اوایل هزارهٔ دوم پ.م دچار فروپاشی می‌شود و استقرار در سگزآباد تا دوران هخامنشی تداوم داشته است (طلایی، ۱۳۸۹؛ Thornton 2014; Thornton 2009). یافته‌های و شواهد متالورژیکی مربوط به عصر مفرغ متأخر

و عصر آهـن در تپـه سـگزآباد حکایـت از تنـوع فلـزات و آلیاژهـای آنهـا در سـاخت مصـنوعات فـلزی دارد. به‌طوری‌که به‌صورت هم‌زمان استفاده از مس‌های غیر آلیاژی (مس خالص)، مس- آرسنیک (Cu-As)، مس- قلع (Cu-Sn) و طلا رایج بوده است. علاوه بر تنوع آلیاژی، تنوع در فرم مصنوعات (انواع اشیاء تزئینی، ابزارهای جنگـی و مجسمه) و تنوع درروش ساخت آثار فلزی (ریخته‌گری، قالب باز و بسته، موم گم‌شـده و ورقـه‌هـای فلـز) نیـز دلیلـی بـر مهارت بالای فلزگران سگزآباد و وجـود کارگاه‌های صنعتی است که تپـه سـگزآباد را بـه شـاخص‌تـرین مرکـز متالورژی شمال مرکزی ایران در عصر مفرغ متأخر و عصر آهن تبدیل کرده است (طلایی، ۱۳۸۱؛ Mortazavi et al. 2011; Malek Shahmirzadi 1979; Malek Shahmirzadi 1977).

بنابراین فرایندهای متالورژی و فلزکاری تپه سگزآباد دشت قزوین، به دلیل تسلسل و تداوم آن‌هـا از مفـرغ متأخر تا دوران هخامنشی، یکی از مستدل‌ترین معیارها برای تبیین و تحلیـل سـایر فراینـدها نظیـر تحـولات فناوری و فرهنگی به‌ویژه در نیمه و اواخر هزارهٔ دوم ق.م (۱۴۵۰ تا ۱۲۰۰ ق.م) بـه‌شـمار مـی‌رونـد؛ کـه تعـابیر و تفاسیر گوناگونی درخصوص تحولات فنی و فرهنگی نیمهٔ هزارهٔ دوم ق.م فـلات ایـران ارائـه شـده اسـت و در مواردی بدون درنظرگرفتن چارچوب‌های فنّاورانه و فنی یک منطقه، نتایج سایر مناطق بدان تعمیم داده شـده اسـت. در راسـتای تـحولات ایـن دوره، دایسـون کـاوشـگر اصـلی تپـه حسـنلو برمبنـای کـاوش‌هـای باستان‌شناسی حوزهٔ دریاچهٔ ارومیه و تغییرات ناگهانی صورت‌گرفته در فرم و نوع سفالینه‌ها، پویـایی فرهنگـی ناشی از مهاجرت اقوام را در عصر آهن مطرح کرد و نیز یانگ در جهت مطالعات و کاوش‌هـای باسـتان‌شناسـی خود در شمال غرب فلات ایران، افق‌های سفالی و مهاجرت ایرانیان را در قالب فرضـیه پویـایی فرهنگـی بـرای تمام فلات ایران تبیین نمود و تغییر در فرم سـفال‌ها و رایج شـدن سـفال‌هـای خاکسـتری و گورسـتان‌هـای خارج از محوطه‌های استقراری را ناشی از مهاجرت اقوام ایرانی از شمال شرق به سراسر فلات ایران ذکر کـرده است (طلایی،۱۳۷۳: ۶۳-۶۰؛ Young 1976: 10-30). شاخص‌ترین استقرار عصر آهن دشت قزوین، تپـه سـگزآباد است که تغییرات فرهنگی در نیمهٔ هزارهٔ دوم پ.م در آن برعکس نظریات دایسون و یانگ بـه‌صـورت تـدریجی بوده و تحول ناگهـانی در سـاختار و فـرم سـفالینه‌هـای تپـه سـگزآباد رخ نـداده اسـت و همچنـین مطالعـات آزمایشگاهی و متالورژیکی انجام‌شده بر روی آثار فلز مفرغ متأخر (طلایی، ۱۳۸۱؛ مظاهری، ۱۳۷۸) و عصرِ آهـنI و II تپه سگزآباد (Mortazavi et al. 2011) نشان از عدم تحول ساختاری در مصنوعات فلزی در فرایند تحـولات نیمه هزارهٔ دوم ق.م است و فناوری فلزکاری و متالورژی در سـگزآباد تا اواخر هزارهٔ دوم و اوایل هزارهٔ اول ق.م روند رو به رشدی را طی نموده است. وجود تنوع آلیاژی (مـس- آرسـنیک، مـس- قلـع و مـس خـالص) و همچنـین خلوص بالای آثار فلزی، به‌طوری‌که بسیاری از آن‌ها با مس خلوص ۹۹٪ ساخته شده‌انـد کـه نشـان از مهـارت فلزگران سگزآباد در تشویه و استحصال کانی‌های فلـزی اسـت (طلایـی، ۱۳۸۱: ۵۵۸ ؛ Mortazavi et al. 2011: 52) اما نکته قابل‌تأمل در فرهنگ‌های عصر آهن دشت قزوین، همانند اکثر مناطق ایران هم‌زمـان بـا تحـولات سیاسی، فرهنگی و اقتصادی مربوط به اواخر هزارهٔ دوم و اوایل هـزارهٔ اول پ.م (آهـن II) اسـت کـه در ادبیـات باستان‌شناسی به‌عنوان «دوران تاریک» و ناشی از جابه‌جایی اقوام یاد شده است. اکثر آثار مربوط به این دوران از گورستان‌های بدون ارتباط با محل استقرار کشف‌شده‌اند. قبور عصر آهن قبرستان سگزآباد دشت قزوین نیـز ازجمله گورستان‌هایی است که هیچ استقراری در ارتباط با آن یافت نشده و نزدیک‌تـرین اسـتقرار بـه آن تپـه سگزآباد است (طلایی، ۱۳۸۹؛ ۱۶۹).

بنابراین در این راستای آثار فلزی مکشوفه از قبور عصر آهن قبرستان سگزآباد جهت مقایسه با آثار فلزی مکشوفه از بافت استقراری عصر آهن سگزآباد مورد مطالعه و بررسی متالورژیکی و آزمایشگاهی قرار گرفتند که نتایج حکایت از سطح متالورژی و فنّاوری فلزکاری کامل متفاوت نمونه‌های قبرستان نسبت به نمونه‌های فلزی استقرار عصر آهن سگزآباد دارد. نمونه‌های فلزی قبرستان سگزآباد از مس‌های غیر آلیاژی با درصد بالایی از نیکل، کبالت، آهن و غیره ساخته‌شده‌اند که به دلیل مقادیر به نسبت یکسان تمامی عناصر در ساختار نمونه‌های قبور نمی‌توان آلیاژسازی تعمدی فرض کرد و تا این میزان عناصر در ترکیب آلیاژی نشان از فرایند متالورژی کنترل نشده در ساخت آنها است که در مرحله‌ی استحصال و تشویه وارد زمینه فلزی شده‌اند و نیز عناصر آلیاژ ساز قلع و آرسنیک به‌جز در یک نمونه که ۴ درصد آرسنیک در ساختار آن شناسایی شد در ترکیب شیمیایی سایر نمونه مقادیر قلع و آرسنیک کمتر از میزانی است که بتوان آلیاژسازی تعمدی دانست (پیوست ۱ و ۲)، درحالی‌که نمونه‌های فلزی مکشوفه از استقرار عصر آهنI و II دارای تنوع و خلوص بالای آلیاژها و فلزات به‌کاررفته در ساخت آنها است. آثار فلزی استقرار برعکس ـ از آلیاژهای مس- آرسنیک، مس- قلع و مس به نسبت خالص ساخته‌شده و نیز اکثر آنها روش ساخت یکسانی را نشان می‌دهند که با چکش‌کاری سرد، گرم و تاب‌کاری نهایی شکل داده‌شده‌اند و دلیلی بر وجود کارگاه‌های تخصصی فلزکاری است که صنعت‌گران توانسته‌اند به‌روش های به نسبت استانداردی در ساخت مصنوعات فلزی دست یابند (Mortazavi et al. 2011: 55-57). شاخص‌ترین تفاوت نمونه‌های فلزی مکشوفه از بافت استقراری تپه سگزآباد با نمونه‌های مکشوفه از قبرستان در عناصر کمیاب (کم‌مقدار) است. به‌طوری‌که منشأ مواد اولیه «سنگ معدن» متفاوتی را نشان می‌دهند. تشابه عناصر کمیاب شناسایی‌شده در ساختار نمونه‌های فلزی استقرار شامل؛ سرب، روی، نقره، فسفر، آهن و غیره می‌تواند دلیلی بر تشابه سنگ معدن اولیه و یا استحصال و آلیاژسازی هم‌زمان مس و کانی‌های آلیاژ ساز قلع و آرسنیک و یا حتی کارگاه ساخت یکسان آنها باشد. هم‌چنین تجزیه عناصر کمیاب در شش نمونه‌ی آنالیزشده از آثار فلزی قبرستان به‌روش ICP-MS، همبستگی بسیار نزدیک‌بین آنها و کامل متفاوت با نمونه‌های استقرار را نشان می‌دهد که حاکی از منشأ واحد و یکسان سنگ معادن اولیه به‌کاررفته در ساخت نمونه‌های قبرستان دارد. هم‌چنین نمونه‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ بیشترین شباهت در میزان و درصد عناصر کمیاب را با یکدیگر نشان می‌دهند که با توجه به شباهت فرمی آنها تا این میزان‌همبستگی، امری طبیعی به نظر می‌رسد. وجود عناصری مثل نیکل، کبالت، منگنز، روی، آهن و غیره به نسبت ثابت (پیوست ۱) و توزیع همبسته آنها در تمامی نمونه‌ها حکایت از به‌کارگیری کانسارهایی در ساخت این مصنوعات فلزی دارد که دارای درصد بالای نیکل، کبالت، روی و آهن بوده‌اند. ضمن اینکه مشاهده عناصر کمیاب به نسبت یکسان در ترکیب شیمیایی و نیز هم‌روندی مقادیر این عناصر در اکثر نمونه‌های قبرستان بیانگر منشأ یکسان سنگ معدن اولیه به‌کاررفته جهت استحصال مس و ساخت مصنوعات فلزی از آن است و هم‌چنین می‌تواند بر مکان ساخت یکسانی دلالت داشته باشد. بر اساس گزارش‌های موجود از معادن فلزی دشت قزوین تاکنون کانسارهای مس با درصد بالایی از ترکیبات نیکل و کبالت شناسایی نشده است (توکل و همکاران، ۱۳۹۲: ۴۰-۳۵؛ جهاندیده کاظم‌پور و همکاران، ۱۳۹۱: ۲۶-۲۱؛ آقا نباتی، ۱۳۸۵: ۵۸۷-۵۸۵؛ حاج علیلو، ۱۳۸۲؛ Bazargani et al. 2008; Momenzade 2004) و غیربومی بودن سنگ معدن اولیه به‌کاررفته در ساخت نمونه‌های قبرستان محتمل است. برمبنای تحقیقاتی که تاکنون درزمینهٔ کانی‌زدایی مس و سایر فلزات در معادن مسی ناحیه طارم [۸] در منطقهٔ قزوین صورت گرفته، دو نوع کانی‌سازی هیپوژن و سوپرژن گزارش شده

که در اکثر آنها، کانی‌زایی مس با سرب و روی همراه بوده است. ضمن اینکه ترکیبات نقره، طلا و آهن نیز در غالب کانی‌های مسی شناسایی‌شده‌اند. اکثر معادن مس ناحیهٔ قزوین رگه‌ای بوده و شامل کانه‌های مسی، کالکوپیریت، مالاکیت، آزوریت، کوولیت، برونیت و ترکیبات غیر مسی شامل کانهٔ سرب «گالن»، کانهٔ روی «اسفالریت» و کانهٔ آهن «پیریت» هستند (توکل و همکاران، ۱۳۹۲: ۴۰-۳۵؛ جهاندیده کاظم‌پور و همکاران، ۱۳۹۱: ۲۶-۲۱؛ آقانباتی، ۱۳۸۵: ۵۸۷-۵۸۵) که با توجه به تشابه در نوع عناصر کمیاب شناسایی‌شده در ساختار نمونه‌های فلزی مکشوفه از بافت استقراری عصر آهنI و II سگزآباد با معادن مسی دشت قزوین «ناحیه طارم»، استفاده از معادن فلزی این ناحیه توسط فلزگران سگزآباد نیز محتمل است؛ بنابراین در اواخر هزارهٔ دوم و اوایل هزارهٔ اول پ.م (عصر آهن II) می‌توان دو فناوری فلزکاری با منشأ کاملاً متفاوت در تپه سگزآباد تبیین نمود و هم‌چنین با توجه به تحولات صورت‌گرفته در طی عصر آهنII در تپه سگزآباد و با نظر به نتایج پژوهش مزبور «برمبنای فنّاوری فلزکاری» می‌توان دریافت که این تفاوت بنیادی و ساختاری در زمینهٔ متالورژی به‌احتمال مربوط به تحولات اواخر هزارهٔ دوم و اوایل هزارهٔ اول پ.م ناشی از وجود فرهنگ‌های یکجانشین و کوچ‌رو در دشت قزوین است که شواهد آن در بافت استقراری تپه سگزآباد به‌صورت افت معیشت و کاهش وسعت استقرار گزارش‌شده؛ به‌طوری‌که نشانه‌های بارزی از استقرار موقت به‌صورت دیرک‌های چادر و سنگ‌چین‌های نامنظم بدون ارتباط با فضای معماری در مناطق غربی و مرکزی یافت شده است (طلایی، ۱۳۸۹؛ ۱۶۹). البته، اثبات قطعی این فرضیه و همچنین شناخت الگوی معیشت و چگونگی ارتباط گورستان با استقرار، نیازمند بررسی و تحلیل نمونه‌های فلزی بیشتری از سگزآباد و نواحی هم‌جوار در ارتباط با منشأ و سنگ معدن اولیه است.

۶. نتیجه

برآیند نتایج پژوهش حاضر حکایت از به‌کارگیری مس‌های غیر آلیاژی با درصد بالایی از نیکل (۳ تا ۶ درصد)، کبالت، آهن و روی (۲ تا ۴ درصد) برای ساخت مصنوعات فلزی مکشوفه از قبور عصر آهنII قبرستان سگزآباد دارد. به خاطر مقادیر تقریباً یکسان عناصر آلیاژی موجود در ترکیب شیمیایی نمونه‌های موردمطالعه نظیر؛ نیکل، کبالت، روی و غیره نمی‌توان اذعان نمود که آلیاژسازی آن‌ها آگاهانه و هدفمند بوده است، بلکه بیشتر حاکی از یک برآیند متالورژی یا آلیاژسازی کنترل نشده و تصادفی دارد. نتایج هم‌چنین نشان می‌دهند عناصر آلیاژ ساز نظیر قلع و آرسنیک که در متالورژی باستانی دشت قزوین، به‌ویژه در عصر مفرغ و آهن برای ساخت اشیای فلزی کاربرد فراوانی داشته‌اند. تنها در یک نمونه از داده‌های فلزی موردمطالعه حدود ۴ درصد آرسنیک شناسایی شد و در سایر نمونه‌ها مقادیر قلع و آرسنیک بسیار کمتر از مقداری بودند که بتوان آن‌ها را آلیاژسازی آگاهانه و هدفمند تلقی نمود. هم‌چنین نتایج ارزیابی‌های ریزساختاری نمونه‌ها نشان می‌دهند که تمامی آن‌ها پس از ریختگی یا شکل‌دهی اولیه، به‌روش چکش‌کاری سرد و گرم و تاب‌کاری ساخته‌شده‌اند و برمبنای روش ساخت به دودسته قابل‌تمایزند؛ دسته اول که اغلب فرم سوزنی شکل دارند پس از شکل‌دهی و تاب‌کاری در مرحله پایانی به‌شدت چکش‌کاری سرد شده‌اند. چکش‌کاری سرد موجب کار سختی و سخت شدن اشیای فلزی می‌شود و با توجه به فرم سوزنی این نمونه‌ها که سختی بالا لازمه کارکرد آن‌ها است، بنابراین به‌نظر می‌رسد که متالورژی شکل‌دهی آنها هدف‌دار بوده است. دسته‌ی دوم، نمونه‌هایی هستند که پس از شکل‌دهی و چکش‌کاری سرد و گرم، تحت عملیات تاب‌کاری نهایی قرارگرفته‌اند. نوع و مقادیر عناصر

کمیاب (کم‌مقدار) شناسایی‌شده در ترکیب شیمیایی اکثر نمونه‌های فلزی قبور عصر آهنII قبرستان سگزآباد هم‌روندی یکسانی را نشان می‌دهند که مربوط به سنگ معدن اولیه به‌کاررفته در ساخت آن بوده و نشان‌دهندهٔ به‌کارگیری کانسارها با درصد بالایی از ترکیبات نیکل، کبالت، آهن و روی است. وجود ناخالصی‌های فراوان در زمینهٔ فلزی اکثر نمونه‌های قبور بیانگر عدم استفاده از عملیات متالورژی کنترل‌شده و پایین بودن سطح دانش استحصال و تشویه فلزات است که ناخالصی‌های سنگ معدن وارد زمینه فلزی شده‌اند. درحالی‌که مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده بر روی نمونه‌های فلزی مکشوفه از بافت استقراری عصر آهنI و II تپه سگزآباد، تنوع آلیاژسازی و سطح متالورژی پیشرفته‌تر از نمونه‌های قبور را نشان می‌دهد. همچنین مقایسه عناصر کمیاب شناسایی شده در ترکیب شیمیایی نمونه‌های فلزی مکشوفه از قبرستان با نمونه‌های فلزی مکشوفه از بافت استقرار عصرآهن سگزآباد حکایت از آن دارد که منشأ مواد اولیه آنها متفاوت از یکدیگر است؛ بنابراین در عصر آهنII وجود دو صنعت فلزکاری با منشأ و سطح متالورژی کامل متفاوت در سگزآباد دشت قزوین تا حدودی محرز است و نیز با توجه به دیگر شواهد باستان‌شناختی به‌دست‌آمده از تپه سگزآباد و اطراف آن، این تفاوت ساختاری و فنی می‌تواند مربوط به سکونت دو فرهنگ با سنت‌های فلزکاری متفاوت باشد. هرچند برای اثبات قطعی این فرض و همچنین تبیین سایر فرایندهای فرهنگی عصر آهنII نظیر الگوی معیشت، سکونت موقت و دائم، نیاز به بررسی داده‌های فلزی بیشتری از محوطه‌های باستان‌شناختی دشت قزوین و نواحی هم‌جوار است. البته پیش‌شرط و رویکرد مطالعات متالورژی باستانی برای تبیین فرایندهای فرهنگی، تحلیل منشأ داده‌های فلزی در ارتباط با معادن اولیهٔ است و درنهایت نتایج پژوهش مزبور نشان‌دهندهٔ پیچیدگی فرایند فرهنگی در جوامع پیش‌ازتاریخی فلات ایران است که به‌سادگی نمی‌توان داده‌های به‌دست‌آمده از یک منطقه و یا حتی یک استقرار را صرفاً بر اساس تحول یا شباهت در گونه و فرم به مناطقی دیگر تعمیم داد و یکپارچه تحلیل نمود.

تشکّر و قدردانی

از آقایان دکتر زارعی سرپرست آزمایشگاه مرکزی دانشگاه تبریز، مهندس مصیب‌زاده کارشناس آزمایشگاه پتروگرافی دانشکده علوم طبیعی، مهندس صبح دل مدیر فنی شرکت مطالعات مواد معدنی زر آزما، مهندس ظریف کارشناس آزمایشگاه XRD و SEM و مهندس نقی‌زاده کارشناس آزمایشگاه متالوگرافی دانشگاه صنعتی سهند به‌پاس همکاری در انجام آنالیزهای شیمیایی و متالوگرافی نمونه‌ها صمیمانه قدردانی می‌شود. همچنین نویسندگان مقاله مراتب سپاس خود را از آقایان؛ دکتر بهرام آجورلو، دکتر محمد مرتضوی و دکتر حسین جباری به‌پاس هم‌فکری و راهنمایی‌های ارزنده‌شان اعلام می‌نمایند.

پی‌نوشت

۱- داده‌های موردمطالعه، مربوط به قبور عصر آهن قبرستان سگزآباد هستند که در حدفاصل بین سگزآباد و تپه قبرستان واقع‌شده‌اند. درگذشته تحت عنوان قبور تپه قبرستان شناخته می‌شدند و به دلیل تشابه اسمی با تپه قبرستان که یک استقرار مربوط به هزاره پنجم و چهارم پ.م (مس-سنگی) است و نیز فقدان شواهدی از آثار عصرآهن در تپه قبرستان، در پژوهش حاضر از قبور عصر آهن محدوده‌ی غربی تپه قبرستان با عنوان قبور عصر آهن گورستان سگزآباد یاد شده است.

۲- آزمون متالوگرافی در آزمایشگاه متالوگرافی دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی سهند انجام شد.

۳- آنالیز SEM-EDX در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه تبریز انجام شد. همچنین تجزیه عنصری EDX به‌روش پنجره و به‌صورت میانگین از تمامی سطح نمونه‌ها صورت گرفت.

۴- اچ یا حکاکی نمونه‌های فلزی بر مبنای استاندارد انجمن مواد و آزمون آمریکا (ASTM) انجام گرفت.

۵- با توجه به اینکه طیف EDX بعضی از عناصر با یکدیگر هم‌پوشانی نشان می‌دهند درصدهای به‌دست‌آمده از آنها همواره با خطا همراه بوده و نمی‌توانند برای اهداف کمی دقیق مورد استناد قرار گیرند.

۶- آنالیز همبستگی اسپرمن- پیرسون با نرم‌افزار SPSS ورژن 17 انجام شد.

۷- وقتی یک قطعه یا شئ فلزی پس از فرایند چکش‌کاری، کارپذیری خود را از دست می‌دهد و لذا به جهت بازیابی خواص و کارپذیری دوباره، آن را تا دماهای بین ۵۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت می‌دهند؛ به این عملیات آنیل یا تاب‌کاری می‌گویند. پس از عملیات تاب‌کاری، امکان تغییر شکل و چکش‌کاری مجدد بر روی قطعه فلزی فراهم می‌شود تاب‌کاری (آنیل) باعث حذف تمام یا قسمتی از تنش‌های ناشی از عملیات کار سرد قبلی نیز می‌شود.

۸- بر اساس تقسیم‌بندی ذخایر مسی ایران، معادن مس ناحیه قزوین در زون طارم واقع‌شده‌اند که جزو زون‌های دارای ذخایر مس است.

پیوست

جدول ۱. نتایج تجزیه ترکیب شیمیایی نمونه‌های موردمطالعه به‌روش ICP-MS (برحسب درصد وزنی)

کد نمونه / عناصر	۱	۳	۴	۵	۶	۱۰
Ag	۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
As	۰/۰۹	۰/۰۷	–	۰/۰۱	۰/۱۲	–
Al	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۰۱
Ca	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۷	۰/۰۱
Co	۰/۹۸	۱/۰۳	۰/۸۷	۱/۰۲	۱/۰۸	۰/۳۲
Cr	۰/۰۲	۰/۰۹	۰/۸۲	۰/۷۳	۰/۰۱	۰/۰۱
Cu	۹۳/۹۲	۹۳/۰۲	۹۵/۰۵	۹۴/۷۳	۷۶/۰۳	۹۳/۹۴
Fe	۰/۷۹	۱/۰۳	۰/۷۲	۰/۸۷	۳/۰۱	۰/۹۴
K	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۰۱
Mg	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۳
Mn	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۰۲
Na	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۱۲	۰/۰۱
Ni	۱/۴۲	۱/۶۲	۱/۶۹	۱/۷۳	۱/۰۳	۱/۲۷
P	۰/۴۲	۰/۷۷	۰/۲	۰/۳	۱/۴	۰/۱۲
Pb	۰/۵	۰/۵۲	۱/۰۳	۰/۰۱	۲/۸۷	۰/۳۱
S	۰/۳۱	۰/۶۹	۰/۰۷	۰/۴	۱/۰۷	۰/۱۱
Sb	۰/۱۲	۱/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۳/۴	۲/۹۳
Si	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۴/۰۸	۰/۰۱
Sn	–	–	–	-	۰/۰۸	–
Ti	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۲	۱/۲۱	۰/۰۱
Bi	۰/۰۱	۰/۰۱	–	–	۲/۴	–
Zn	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۱۲	۰/۰۵

جدول ۲. نتایج تجزیه ترکیب شیمیایی نمونه‌های موردمطالعه به‌روش SEM-EDX (برحسب درصد وزنی)

کد نمونه / عناصر	As	Co	Cl	Cr	Cu	Fe	Ni	Zn	Sn	Sb	Pb	Ag	Al	Bi	Mn	P	S	Si
۱	۰/۰۱	۳/۷۷	-	۰/۱	۸۲/۵۱	۳/۲۹	۵/۶۳	۴/۲۴	۰/۰۱	۰/۲	-	۰/۱	-	۰/۰۱	۰/۱	۰/۰۲	۰/۰۱	-
۲	۴/۶	۳/۱	۳۰/۲	-	۵۰/۹۳	۵/۲۴	۱/۲	-	۰/۰۲	-	۴/۳	-	۰/۲	-	-	۰/۱۴	۰/۵۶	۰/۰۱
۳	۰/۱	۳/۳	-	۰/۳	۸۲/۸	۳/۷	۴/۹	۳/۹۷	۰/۱	۰/۴	-	۰/۰۳	-	-	۰/۱	۰/۳	-	-
۴	-	۳/۱	-	۲/۵۲	۸۲/۹۵	۲/۳۱	۵/۱	۳/۱	-	۰/۱	۰/۸۲	-	-	-	۰/۱	-	-	-
۵	-	۲/۹۷	-	۱/۸	۸۱/۳	۲/۶	۴/۵۳	۳/۰۴	-	۱/۷	۱/۳۷	۰/۰۲	۰/۱	-	۰/۱	۰/۳۲	۰/۴۹	-
۶	۰/۴	۳/۳	۲/۲	۰/۲	۷۳/۳۶	۳/۱۸	۴/۴۲	۳/۹	-	۳/۵۲	۴/۱۳	۰/۰۴	۰/۴۷	۱/۲	-	۰/۷	۰/۳	۰/۰۱
۷	۰/۳	۲/۳۱	۳۹/۵	۰/۹	۴۴/۵۲	۲/۹	۳/۷۲	۳/۰۷	-	۱/۲۲	۱/۲	-	۰/۱۵	-	-	۰/۲	-	۰/۰۱
۸	۰/۱	۳/۷۱	۲۶/۵	۲/۱	۴۹۹۸	۳/۵	۲/۱	۱/۲	۰/۱	۳/۸۴	-	۰/۱	۰/۱۸	۱/۳	-	۲۶/۸	۲/۶	۰/۰۱
۹	-	۲/۲	۲/۱۱	۲/۲۸	۷۹۳	۲/۱۲	۴/۲۱	۴/۰۱	-	۱/۸۳	-	-	-	-	۱/۹۳	-	-	۰/۰۱
۱۰	-	۴/۰۴	-	-	۸۰۱۲	۴/۴	۵۰۸	۲/۴	-	۱/۲	۰/۶	-	-	۰/۸	-	۰/۶۷	۰/۹	-
۱۱	-	۲/۳	۳۳/۸۱	۲/۳	۴/۳	۱/۸۲	۲/۹۱	۴/۳۷	-	۴/۰۲	-	-	۰/۱۵	-	۱/۸۱	۰/۲	-	۰/۰۱
۱۲	-	۱/۷	۳۳/۹۲	۰/۹	۴۸/۹۲	۱/۰۷	۱/۹۲	۴/۶	-	۴/۱۴	-	-	۰/۱۲	-	۱/۴	-	۱/۴	۰/۰۱
۱۳	۰/۴	۲/۷	۳۴/۲۷	-	۴۵/۶۳	۳/۸۲	۴/۲۱	۵/۴	۰/۲	۱/۳۸	-	-	۰/۱۵	-	۱/۰۱	۰/۱	-	۰/۰۱
۱۴	-	۱/۲	۳۲/۸	۰/۳۳	۵/۶۷	۲/۶	۳/۵۱	۴/۳۲	-	-	-	-	۰/۱۶	۰/۱	-	۰/۳۳	۰/۱۲	-
۱۵	-	۲/۴	۲/۱	۰/۸۲	۷۸/۸۲	۳/۷	۴/۲۶	۴/۷	-	-	-	-	-	-	۱/۶	۰/۲	۰/۱	-
۱۶	-	۲/۲۴	۱/۲	۰/۷	۸۰/۳۲	۲/۱۲	۴/۲۱	۴/۵	-	۱/۲	-	-	۰/۱	۰/۱	۱/۹	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۱
۱۷	۰/۲	۲/۲۱	۳۹/۹	۱/۱	۴۱/۳۱	۲/۲۵	۳/۹	۴/۱۲	-	۱/۲۵	-	-	۰/۱۴	-	۰/۴	۰/۰۱	۰/۱۲	-
۱۸	۰/۰۱	۲/۶۱	۴۰/۲۳	-	۴۱/۴۵	۲/۴	۴/۰۷	۴/۸	-	۳/۸۲	۰/۰۱	-	۰/۱۷	-	-	۰/۴۲	-	۰/۰۱
۱۹	-	۴/۲	۱/۱	۰/۸	۷۷/۵	۳/۴	۵/۲۳	۴/۹	-	-	۰/۲	-	۰/۱۸	-	۱/۳	-	-	۰/۳
۲۰	۰/۰۱	۱/۲	۴۴/۸۴	-	۴۰/۲۴	۲/۹	۲/۳۸	۴/۵۴	-	۲/۴۲	-	-	۰/۱۸	-	-	-	۰/۳	-
۲۱	۰/۰۱	۲/۹	۴۰/۲۶	-	۴۲/۵۲	۲/۸	۳/۶۲	۳/۹	۰/۲۷	۲/۷	-	-	۰/۱۹	-	-	-	۰/۷	۰/۰۱
۲۲	-	۲/۷	۳۵/۱۷	۱/۳	۴۶۲۹	۲/۹۷	۴/۱۲	۴/۸	-	۲/۰۳	-	-	۰/۱۴	-	۱/۴	۰/۶۷	۰/۰۴	۰/۰۱

منابع

آقا نباتی، سیدعلی (۱۳۸۵)، *زمین‌شناسی ایران*، تهران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

اسمیت، ویلیام (۱۳۸۰)، *ساختار، خواص و کاربرد آلیاژهای مهندسی*، ترجمه‌ی علی‌اکبر اکرمی و مرتضی سید ریحانی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، مؤسسه انتشارات علمی.

بحرالعلومی و همکاران، (۱۳۸۶)، «بررسی باستان‌سنجی اشیاء فلزی تپه زاغه»، *پژوهش‌های باستان‌شناسی و مطالعات میان-رشته‌ای*، سال سوم، ش ۵، صص ۴۲-۳۱.

بیورانی، حسین؛ حسین خامنه‌ای‌جباری (۱۳۹۲)، *تحلیل آماری با نرم‌افزارهای Minitab و SPSS*، چاپ دوم، کردستان، دانشگاه کردستان.

پیرون، د.ل (۱۳۸۷)، *الکتروشیمیایی خوردگی*، ترجمه‌ی محمدعلی گل عذار با همکاری احمدرضا ریاحی، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان.

توکل، ربابه؛ سیدرضا مهرنیا؛ نیما نظافتی، جمال شیخ ذکریایی (۱۳۹۲)، «توزیع ژئوفرکتالی سیلیس و ارتباط آن با کانه-زایی طلا در محدوده نیکویه (منطقه طارم، استان قزوین)»، *زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته*، دانشگاه شهید چمران اهواز، دوره سوم، ش ۸، ۴۶-۳۴.

جهاندیده‌کاظم‌پور، کامران؛ مهدی حسینی؛ سعید حکیمی‌آسیابر (۱۳۹۰)، «مطالعه نحوه مانه‌زایی در کانسار پلی‌متال عباس-آباد (شمال باختر استان قزوین)»، *زمین و منابع*، دانشگاه آزاد واحد لاهیجان، دوره چهارم، ش ۳، ۳۲-۲۱.

حاج علیلو، بهزاد (۱۳۸۲)، «بررسی خصوصیات متالورژیکی زون ساختاری البرز و معرفی آثار کانی سازی طلا در دگرسانی گرمابی این مناطق»، تهران: بیست و دومین همایش سازمان زمین‌شناسی.

دیتر، ج. ای (۱۳۷۳)، *متالورژی مکانیکی*، ترجمه‌ی شهره شهیدی، تهران، مرکز نشر دانشگاهی.

طلایی، حسن (۱۳۹۰)، *باستان‌شناسی و هنر ایران در هزاره اول قبل از میلاد*، چاپ هشتم، تهران، سمت.

ـــــــــــ (۱۳۸۹)، *عصر آهن ایران*، چاپ دوم، سمت، تهران.

ـــــــــــ (۱۳۸۱)، «تکنولوژی فلزگری کهن در تپه سگزآباد دشت قزوین»، *مجله دانشکده ادبیات و علوم انسانی دانشگاه تهران*،دوره ۱۶۴ ، ش ۰، صص ۵۶۴-۵۴۷.

ـــــــــــ (۱۳۷۳)، «پویایی فرهنگی در باستان‌شناسی ایران»، *یادنامه اولین گردهمایی باستان‌شناسی ایران*، شوش، سازمان میراث فرهنگی کشور، تهران، صص ۲۶۳-۲۵۹.

عودباشی، امید؛ سید محمدامین امامی؛ حسین احمدی؛ پرویز دوامی (۱۳۹۳)، «فلزگری کهن و استحصال مس در محوطه‌ی باستانی هفت‌تپه‌ی خوزستان، هزاره‌ی دوم قبل از میلاد»، *مهندسی مواد و متالورژی*، دوره ۲۵، ش ۲، صص ۱۲۲-۹۹.

لطفی، محمد؛ مجید میرمحمدصادقی و جعفر عمرانی (۱۳۷۲)، نقشه پراکندگی کانسارهای ایران، سازمان زمین‌شناسی کشور، تهران.

فاضلی نشلی، حسن (۱۳۵۸)، *باستان‌شناسی دشت قزوین از هزاره‌ی ششم تا هزاره‌ی اول قبل از میلاد*، تهران، دانشگاه تهران.

ملک‌زاده، فرخ (۱۳۵۶)، «گزارش مقدماتی حفاری ترانشه E تپه قبرستان (فصل حفاری ۱۳۵۱)»، مجله مارلیک (*نشریه مؤسسه باستان‌شناسی و تاریخ هنر، سال ۲۵۳۶ شاهنشاهی*)، ش ۲، صص ۸۰-۷۳.

نیکنامی، کمال‌الدین (۱۳۸۷)، *روش‌های تحلیل کمی در پژوهش‌های باستان‌شناسی*، چاپ اول، تهران سمت.

Bazargani-Guilani, K. Parchekani, M. & Nekouvaght Tak, M. A. 2008- Mineralization in the Taroum mountains, View to Barik-Ab Pb-Zn (Cu) deposit, Western Central Alborz, Iran, WSEAS Conferences in Cambridge 1: 55-63.

Casaletto, M. P. De Caro, T. Ingo, G. M. Riccucci, C. 2006. Production of Reference "Ancient" Cu-Based Alloys and Their Accelerated Degradation Methods. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 83, 618–623.

Frame, L. 2010. Metallurgical Investigations at Godin Tepe, Iran, Part I: The Metal Finds, *Journal of Archaeological Science*,37, 1700-1715.

Frahm, E. 2014. *Scanning Electron Microscopy (SEM); Applications in Archaeology*, Department of Archaeology, University of Sheffield.

Hauptmann, A. 2007. *The Archaeometallurgy of Copper "Evidence from Faynan, Jordan"*. In: G. A.Wagner, B. Herrmann (eds.), *Natural Science in Archaeology, Springer*, pp.230-275.

Henderson, J. 2000. *The Science and Archaeology of Materials; An investigation of inorganic matrials*. London and New York: Routledge.

Junk, M. 2003. *Material Properties of Copper Alloys Containing Arsenic, Antimony, and Bismuth, the Material of Early Bronze Age Ingot Torques*. Germany: Unpublished Ph.D. Dissertation, der Technischen Universität Bergakademie Freiberg.

Malek Shahmirzadi, S. 1979. *Copper, Bronze and their Implementation by Metalsmiths of Sagzabad Qazvin Plain: Iran, AMI*. 12: 49-66.

_____ . 1977, *Tepe Zagheh: A Six Millennium B.C. Village in the Qazvin Plain of the Central Iranian Plateau*, Unpublished Ph. D. Dissertation in Anthropology, University of Pennsylvania.

Momenzade, M., 2004. *Metallische Bodenschatze in Iran in Antiker Zeit in: Persiens Antike Pracht, Herausgeber*:Thomas Stollner, Rainer Slotta and Abdolrasool Vatandoust, Deutsches Bergbau-Museum. Bochum. 8: 180-190.

Mortazavi, M. Salehi, A. Golozar, A. Talai, H. 2011. *Preliminary Metallurgical Investigation of Copper-Based Artifacts at Tepe Sagzabad in Qazvin Plain, Iran (1500-800 BC)*: *Iranian Journal of Archaeological Studies* 2: 49-59.

Petersen, G. G., 2010. *Mining and Metallurgy in Ancient* Perú: Translated by William E. Brooks, Geological Society of America, Inc

Pigott, V. C. 2004. *On the Importance of Iran in the Study of Prehistoric Copper-Base Metallurgy*: Proceedings of International Conference, Persia's Ancient Splendour, Mining, Handicraft and Archaeology pp. 30-45.

Pinasco, M. R. Ienco, M. G. Piccard, P. Pellati, G. Stagno, E. 2007. *Mettalographic Approach to the Investication of Metallic Archaeological Objects*. Italy: Dept. of Chemistry and Industrial Chemistry (DCCI), University of Genoa. 31, 553-559.

Scott, D. A. 1990. *Bronze Disease: A Review of Some Chemical Problems and the Role of Relative Humidity*: JAIC. 29: 190-210.

_____. 1991. *Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals*: The J. Paul Getty Trust, Singapore.

_____ 2000. *A Review of Copper Chlorides and Related Salts in Bronze Corrosion and as Painting Pigments*: Studies in Conservation. 45: 40-52.

_____ 2002. *Copper and Bronze in Art, Corrosion, Colorants and Conservation*. Los Angeles: Getty Conservation Institute Publications.

_____. 2014. *Metallography and Microstructure of Metallic Artifacts:* in: Roberts and Thornton (eds.), Archaeometallurgy in Global Perspective; Methods and Syntheses, New York, Springer, pp. 67-90.

Talai, H. 1984. *Notes on Bronze Artifacts at Sagzabad in Qazvin Plain, Iran, Circa 1400 B.C*, Iranica Antiqua XIX: 31-42

Thornton, P. C. 2014. *The Emergence of Complex Metallurgy on the Iranian Plateau*, in: Roberts and Thornton (eds.), Archaeometallurgy in Global Perspective; Methods and Syntheses, New York, Springer, pp. 665-696.

Young, T. C. 1967. *The Iranian Migration in to the Zagros, IRAN* IV: 10-30.