

## بررسی متالورژیکی ابزارآلات جنگی ایران باستان - ایلام میانه

نازلی شهیدی<sup>۱</sup>، محمود نیلی احمدآبادی<sup>۲\*</sup> و یسرا پویشمن<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس متالورژی و مواد - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی متالورژی و مواد - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۵/۱۰/۵، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۷/۴/۱۱، تاریخ تصویب ۸۷/۸/۶)

### چکیده

برای آگاهی از چگونگی ساختار متالورژیکی و نحوه ساخت ابزار آلات آهنی ایران باستان، برخی ابزار جنگی آهنی مکشوفه در حفاری‌های سال ۸۴-۱۳۸۳ اطراف شهر ایذه واقع در شمال خاوری اهواز، با نام کاوش بلوطک II مورد مطالعه قرار گرفت. نمونه‌ها از نظر تاریخی مربوط به دوران ایلام میانه (۳۰۰۰ سال پیش) و شامل یک میله آهنی، سرنیزه چهارپر و سرنیزه سه‌پر هستند. بررسی‌های میکروسکوپی توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی، بررسی‌های ماکروسکوپی توسط استریوماکروسکوپ، آزمایش اشترولاین، بررسی‌های XRD، سختی‌سنجی و چگالی‌سنجی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام گرفته حاکی از خلوص بالای آهن در نمونه‌ها است، به طوری که ساختار زمینه نمونه‌ها فریتی و درصد بسیار اندکی از سطح ساختار پرلیتی دارد. ناخالصی‌ها در نمونه‌ها ناشی از احیا ناقص سنگ معدن آهن و محبوس شدن آن در بین لایه‌های آهن احیاء شده هستند. تراکم و شکل ناخالصی‌ها بسته به شکل نمونه‌ها تغییرات اندکی داشته ولی اکثر ناخالصی‌ها را اکسیدهای آهن تشکیل می‌دهند.

**واژه‌های کلیدی:** فلزات باستانی، کوره‌های آهنگری، ساختار متالورژیکی، ایلام میانه، آهن فریتی، کوره‌های

احیا سنگ معدن آهن، عصر آهن

### مقدمه

نمی‌تواند دلیل محکمی بر پیش‌تر آغاز شدن عصر آهن باشد، زیرا حتی اگر وجود سنگ معدنی آهن در کوره ذوب مس به طور اتفاقی محتمل باشد، دمای کوره ذوب مس، تغییری در سنگ معدن آهن ایجاد نمی‌کند. بنابراین غلبه هنر تبدیل آهن خام به فولاد بود که باعث پیدایش عصر آهن شد [۳].

به طور کلی صنعت آهن را براساس استفاده بشر از آهن تا کنون، به سه دوره تقسیم می‌کنند [۴]:

۱. کشف و استفاده از آهن شهابی؛
۲. پیدایش آهن به عنوان محصول جانبی تصفیه طلا؛
۳. توسعه و تکامل احیای سنگ معدن آهن در کوره‌های Bloomery و کوره بلند.

ریکارد و زیمر اثبات کردند که اولین آهن مورد استفاده انسان که به عنوان سنگ مورد استفاده بشر قرار می‌گرفته، آهن شهابی بوده است. مردمان باستان به دلیل بی‌اطلاعی از خواص فلزی آن برای تبدیل آهن به سرنیزه به جای گرما دادن آهن شهابی، آن را به عنوان یک تکه سنگ کوبیده و از آن سرنیزه می‌ساختند. در خاور نزدیک باستان مقادیر طبیعی شهاب سنگ‌ها در طول تاریخ به میزان زیادی ناپدید

عصر آهن، بعد از عصر سنگ و عصر برنز، سومین دوره از دوره‌های پیش از تاریخ است که خود به چهار دوره تقسیم می‌شود. البته عصر آهن به دلیل تفاوت‌های زیاد زمانی کشف و استفاده از آهن در مناطق مختلف، بنابه کشور و موقعیت جغرافیایی آن در زمان خود تعاریف و آغازهای متفاوتی دارد. در تاریخ ایران عصر آهن چهار دوره تاریخی را شامل می‌شود [۱،۲]:

۱. عصر آهن I ۱۵۰۰-۱۲۰۰ ق.م.
۲. عصر آهن II ۱۲۰۰-۸۰۰ ق.م.
۳. عصر آهن III ۸۰۰-۵۵۰ ق.م.
۴. عصر آهن IV ۵۵۰-۲۴۰ ق.م. (هخامنشیان و اوایل اشکانیان)

بشر پیش از ساخت فولاد موفق به کشف آهن شده بود و آهن در زمین به فراوانی یافت می‌شد، ولی از آنجا که مقدار گرمای مورد نیاز آهن برای ذوب و یا شکل دادن، به مراتب بیشتر از مس (برنز) است، عصر آهن پیش از این آغاز نشد. پیدایش اتفاقی آهن در بوته ذوب فلزات، مدت‌ها قبل از آگاهی صنعتگران باستانی و توجه آنها به اثر گرمادهی بر ذوب‌پذیری،

شده‌است. در این شهاب سنگ‌ها بین ۲۶-۵٪ نیکل و ۵-۰/۳٪ کبالت یافت شده است. به دلیل پراکندگی این نوع از آهن در طول سالیان متمادی و هم چنین اندک بودن نمونه های موجود و مطالعات انجام گرفته اطلاعات دقیق تری از این نوع از آهن شهابی در دست نیست. [۳]

بشر بعد از آشنایی با آهن شهابی و آگاهی از خواص آن، هنگام تصفیه طلا متوجه وجود سنگ‌های خاصی در گل و لای طلا شد و دریافت که این سنگ‌ها همان خواص آهن را دارند [۴]. بشر در پی کاوش و شناخت طبیعت به معادن سنگ آهن برخورد کرد. بنابراین دوران کشف آهن هنگام تصفیه طلا سریع سپری شد. از آنجا که بشر پیش از این با خواص آهن شهابی آشنا شده بود، خواص فلزی این سنگ را دریافت و به دنبال راهی برای استفاده از فلز تازه یافته به جستجو پرداخت.

واژه Bloom به معنای شمش خام و نتراشیده‌ای از آهن یا فولاد است که به طور مستقیم از سنگ آهن در کوره‌ای به همین نام (Bloomery) حاصل می‌شود. Bloomery کوره‌ای است، که بر خلاف کوره بلند، در دمای کمتر از دمای ذوب آهن کار می‌کند (کمتر از ۱۱۳۰°C). کوره در زمین قرار گرفته و هوا توسط دو لوله که به عنوان دودکش عمل می‌کنند به طور طبیعی یا مصنوعی به درون کوره دمیده می‌شود. باستانیان در شروع کار کوره، برای پیش‌گرم کردن کوره، از زغال چوب استفاده و در مرحله بعد سنگ آهن را به همراه زغال به محتویات کوره اضافه می‌کرده‌اند تا محصول اسفنجی این کوره (Bloom) حاصل شود [۴]. کوره‌های Bloomery به دو صورت روباز و سرپوشیده بوده‌اند. کوره‌های Bloomery ابتدایی مکش طبیعی داشتند. به همین دلیل کوره‌ها را در ارتفاعات می‌ساختند تا به احتراق کمک کند. این طرز ساخت کوره تا هنگام اختراع دم آهنگری هم چنان ادامه داشت. کوره‌ها با گذشت زمان به منظور صرفه‌جویی در مصرف سوخت بزرگ‌تر شدند. با بزرگ‌تر شدن کوره‌ها، سنگ آهن مدت بیشتری در دمای کوره و در مجاورت زغال و سوخت قرار می‌گرفت و در نتیجه بیشتر کربوریزه می‌شد. همین موضوع سبب تولید تصادفی چدن شد. در ابتدایی‌ترین

استخراج مستقیم آهن از سنگ آهن، مخلوطی از سنگ آهن و زغال در کوره‌های گودالی زمینی یا اجاقی تحت عملیات قرار گرفته و ناخالصی‌ها به صورت سرباره سیال از کوره خارج و جمع‌آوری می‌شدند. باقی مانده سنگ آهن در کف کوره به شکل توده‌های سخت، خمیری و اسفنجی احیا شده که بعد از سرد شدن متخلخل می‌شدند. شمش‌های آهن خام در کوره دیگری به شدت گرم می‌شدند. نتیجه این حرارت-دادن‌ها آهنی بود که با چکش زدن، ناخالصی‌هایش خارج و به توده فشرده‌ای از آهن خالص تبدیل می‌شد [۵].

در نزدیکی تبریز و دریاچه ارومیه امروزی، معادن آهن وجود داشته و آثاری از ذوب آهن باقی-مانده است. باستان شناسان معتقدند که این بقایای ذوب متعلق به دوره اولیه کشف آهن (عصر آهن I) است. کوه‌های البرز در نزدیکی رشت و ماسوله معادن قدیمی آهن داشته است. در غرب تهران در نزدیکی قزوین آثار مقادیر زیادی هماتیت همچنین در نزدیکی فیروزکوه و کوهپایه‌های دماوند معادن باستانی نیز هماتیت و لیمونیت دیده شده است. کوه‌های نزدیک دامغان و سمنان و شاهرود دارای بقایای هماتیت و رسوبات لیمونیت هستند. در نزدیکی کاشان و قهرود مگنتیت و هماتیت و لیمونیت و غیره... در خراسان بقایایی از سنگ آهن و رسوبات آن مشاهده شده است [۵].

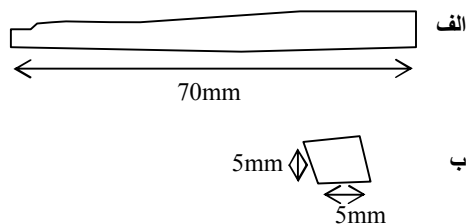
بررسی‌های باستان شناسی انجام گرفته، نشان می‌دهد که از جمله مناطقی که در گذشته ابزار آلات آهنی مورد استفاده قرار می‌گرفته‌اند در نواحی شهر ایزد در شمال خاوری اهواز است. بر اساس کشفیات انجام گرفته در سایت حفاری بلوطک II، نمونه‌هایی از این ابزار متعلق به دوران ایلام میانه (۳۰۰۰ سال پیش) به دست آمده است. هدف از این تحقیق بررسی سه نمونه از ابزار آلات جنگی متعلق به این دوران است که با هدف آگاهی از ساختار متالورژیکی نمونه‌ها و چگونگی ساخت آنها انجام گرفت.

### روش تحقیق

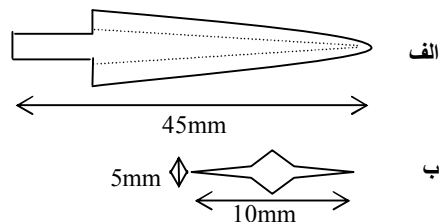
نمونه‌های مورد بررسی متعلق به دوران ایلام

با توجه به قدمت نمونه‌ها و مجاورت نمونه‌ها طی مدت زمان بسیار طولانی با خاک، سطح آنها تا عمق قابل ملاحظه‌ای دچار خوردگی شده، حتی در بعضی مقاطع نازک، تمام سطح مقطع خورده شده است. همچنین حفظ سطح، شکل و خواص نمونه‌ها برای دقت بیشتر در نتایج آتی تحقیق بسیار مهم است. بنابراین با توجه به حساسیت نمونه‌ها به حرارت، برای آماده‌سازی و بررسی آنها، بعد از برش از مانت سرد (رزین و سخت کننده) استفاده شده است. نمونه‌ها با سنباده‌های ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ سنباده زده شدند. سپس با نمد و پودر آلومینا  $0.1\mu\text{m}$  و  $0.3\mu\text{m}$  به مدت حداقل ۵ دقیقه پولیش شدند. سپس برای بررسی‌های میکروسکوپی با محلول اچ نایتال ۳-۵٪ متشکل از  $3\text{mgr} - 5\text{mgr}$  اسید نیتریک و  $5\text{mgr} - 7\text{mgr}$  الکل حکاکی شدند. بررسی‌های میکروسکوپی با میکروسکوپ نوری Zeiss به همراه نرم‌افزار Image analyzer و میکروسکوپ الکترونی روبشی Camscan-mv 2300.Cambridge.England با تجهیزات EDS انجام شد. به کمک تجهیزات EDS آنالیز عنصری و خطی نمونه‌ها برای تعیین عناصر موجود و چگونگی پراکندگی آنها در نمونه‌ها، بررسی شدند. برای مشاهده عمق ساختار پرلیتی و با استفاده از میکروسکوپ نوری، عکسبرداری‌های متوالی در دو جهت عمود برهم از سطح تا مرکز سطح مقطع آنها انجام شد. برای آگاهی از چگونگی سیلان فلز در نمونه‌ها بررسی‌های ماکروسکوپی توسط محلول اچ  $\text{CuCl}_2(45\text{g}) + \text{HCl}(118\text{mlit}) + \text{H}_2\text{O}(100\text{mlit})$  میکروسکوپ نوری استریو (Steriomicroscope) Meiji-techno انجام شد. به دلیل نبود دقت کافی تجهیزات EDS در آنالیز عنصر کربن و اهمیت وجود این عنصر، نمونه‌ها تحت آزمایش سنجش میزان کربن و گوگرد به روش اشترولاین توسط دستگاه LECO- CS244- America با دقت کربن و گوگرد بیش از  $0.1\% \pm$  قرار گرفتند. همچنین برای بررسی بیشتر کربن و چگونگی وجود آن، نمونه‌ها تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. عملیات حرارتی آنیل، روی دو نمونه به صورت، حرارت دادن در کوره در دمای  $600^\circ\text{C}$  به مدت ۱۵ دقیقه، سرد شدن در کوره تا دمای  $300^\circ\text{C}$ ، نگهداری در این دما به مدت ۱۵ دقیقه و

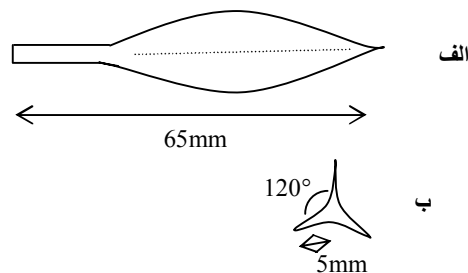
میان ۳۰۰ سال پیش) هستند که در سال ۸۴-۱۳۸۳ در سایت حفاری بلوطک II واقع در شهر ایذه در شمال خاوری اهواز کشف شدند. نمونه‌های مورد بررسی شامل یک میله آهنی، یک سرنیزه چهارپر و یک سرنیزه سه‌پر هستند. نمونه میله آهنی (S1) ۷۰mm طول و در بزرگترین سطح مقطع به طور تقریبی  $5 \times 5\text{ mm}^2$  مساحت دارد (شکل ۱). نمونه سرنیزه چهارپر (S2) طولی در حدود ۴۵ mm دارد و ابعاد سطح مقطع آن در بزرگترین سطح مقطع به طور تقریبی  $5 \times 10\text{ mm}^2$  می‌باشد (شکل ۲). نمونه سرنیزه سه‌پر (S3) ۶۵ mm طول دارد و پره‌های سرنیزه با یکدیگر در زاویه تقریبی  $120^\circ$  قرار گرفته که هر یک در حدود ۵ mm طول دارد (شکل ۳).



شکل ۱: الف: طرح شماتیک نمونه میله آهنی. ب: طرح شماتیک سطح مقطع نمونه میله آهنی.

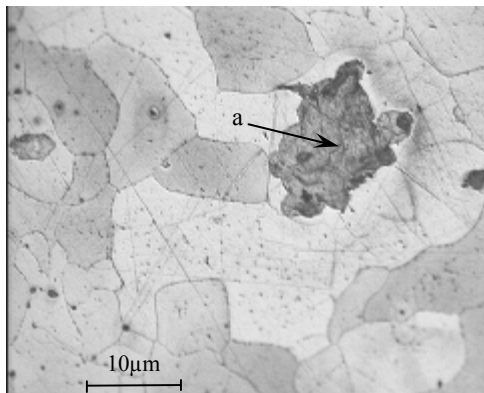


شکل ۲: الف: طرح شماتیک نمونه سرنیزه چهارپر. ب: طرح شماتیک سطح مقطع نمونه سرنیزه چهارپر.

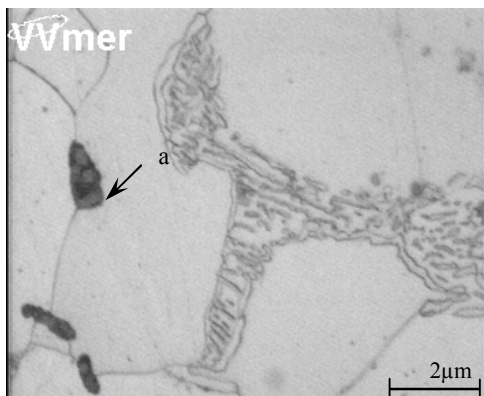


شکل ۳: الف: طرح شماتیک نمونه سرنیزه سه‌پر. ب: طرح شماتیک سطح مقطع نمونه سرنیزه سه‌پر.

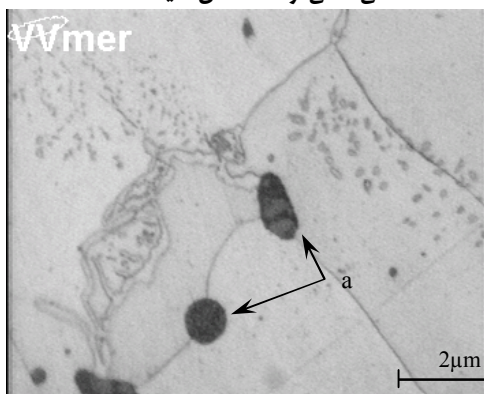
احیا شده (محصول کوره‌های احیای آهن) در کوره‌های آهنگری رخ داده است.



شکل ۴: ساختار نمونه میله آهنی قبل از آنیل فریتی است که نواحی تیره رنگ مشکوک به پرلیتی بودن هستند.  
a: ناخالصی نمونه ناشی از سنگ آهن احیا نشده



شکل ۵: ناحیه پرلیتی در زمینه فریتی نمونه میله آهنی بعد از آنیل.  
a: ناخالصی ناشی از سنگ آهن احیا نشده



شکل ۶: پراکندگی ناحیه پرلیتی در زمینه فریتی نمونه میله آهنی بعد از آنیل.  
a: ناخالصی‌های ناشی از سنگ آهن احیا نشده در نمونه.  
ساختار زمینه نمونه سر نیزه چهارپر (S2)

در مرحله آخر سرد شدن در کوره تا دمای محیط، انجام شد. آزمایش‌های سختی‌سنجی ویکرز روی نمونه‌ها با نیروی ۵۰ نیوتن انجام شد. آزمایش چگالی-سنجی نیز توسط دستگاه چگالی‌سنج دیجیتالی و با استفاده از روش ارشمیدس، غوطه وری نمونه‌ها در آب مقطر صفر درجه سانتی‌گراد، انجام گرفت. بررسی‌های XRD نیز روی نمونه‌ها انجام شد.

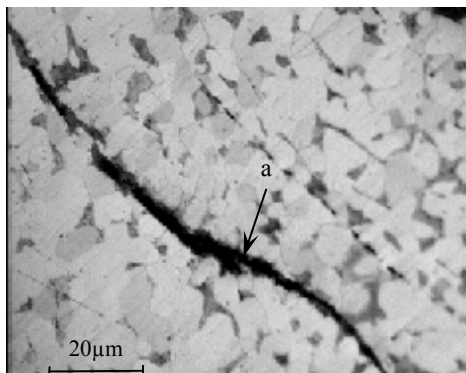
## بحث و نتیجه‌گیری

### ریز ساختار زمینه نمونه میله آهنی

#### ساختار زمینه نمونه میله آهنی (S1)

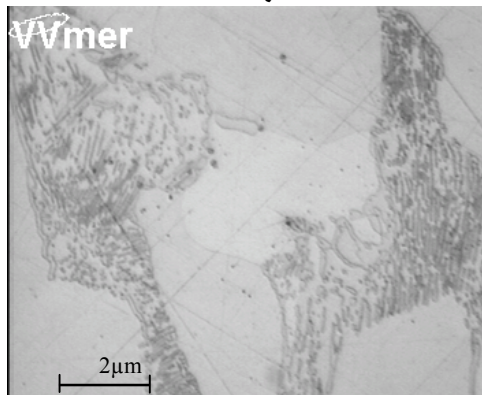
ساختار و دانه‌بندی مشاهده شده در تصاویر، قبل از آنیل نمونه S1 بسیار به ساختار و دانه‌بندی آهن فریتی شبیه است (شکل ۴). در سطح نمونه در بین دانه‌های فریتی علاوه بر مرز دانه‌های مشخص، تفاوت رنگ نیز مشاهده می‌شود. این تفاوت رنگ ناشی از تفاوت جهت‌گیری دانه‌های فریتی است. ولی تفاوت رنگ بعضی از دانه‌ها بسیار تیره‌تر از بقیه دانه‌ها است که شباهتی نیز با ناخالصی‌ها ندارند. این تفاوت رنگ می‌تواند بر اساس پرلیتی بودن این دانه‌ها باشد. بعد از انجام عملیات حرارتی آنیل، مطابق انتظار، دانه‌هایی که تفاوت رنگ بیشتری با دیگر دانه‌ها داشتند آنیل شده و لایه‌های پرلیتی بهتر و واضح‌تر نمایان شده‌اند (شکل ۵). به طور کلی می‌توان ادعا کرد که ساختار غالب نمونه S1 ساختار فریتی است و در بین دانه‌های فریتی، دانه‌های پرلیتی و ناخالصی‌ها قابل مشاهده هستند که مطابق با بررسی‌های قبل از آنیل، درصد سطحی که مناطق پرلیتی به خود اختصاص می‌دهند، نسبت به کل سطح مقطع نمونه بسیار کم است (در حدود ۵-۷٪ کل سطح مقطع). ساختار نمونه میله آهنی، صرف نظر از پرلیتی و یا فریتی بودن دانه‌ها، درشت‌دانه است و دانه‌ها جهت‌گیری خاصی ندارند. لایه‌های پرلیتی نمونه میله آهنی در بین و یا درون دانه‌های فریتی به صورت بسیار پراکنده و ریز مشاهده می‌شوند (شکل ۶). با توجه به عکسبرداری‌های متوالی که از سطح مقطع نمونه S1 انجام شد، مشخص شد که تراکم ساختار پرلیتی از سطح تا مرکز نمونه کاهش می‌یابد. این پدیده به دلیل حرارت دیدن سطحی آهن

بیشتری در ساختار پرلیتی نمونه S2، مشاهده می‌شود (شکل ۱۰). در بررسی عکسبرداری‌های متوالی از سطح مقطع نمونه S2 میزان پیوستگی و تراکم لایه‌های پرلیتی در سطح نمونه کمتر از مرکز آن مشاهده شده است. به طور کلی، درصد لایه‌های پرلیتی در نمونه S2 بیشتر از نمونه S1 است. در لبه‌های تیز نمونه S2 خوردگی ناشی از مرور زمان و ترک‌های ناشی از آن و نیز ترک‌های داخلی ناشی از شکل‌دادن به خوبی قابل مشاهده است.



شکل ۹: دانه‌بندی نمونه سرنیزه چهارپر که از دانه‌بندی نمونه میله‌آهنی ریزدانه‌تر است.

a: ترک لبه‌های تیز نمونه ناشی از خروج ناخالصی‌ها در زمان ساخت نمونه و بروز خوردگی در طی زمان ماندگاری در خاک.

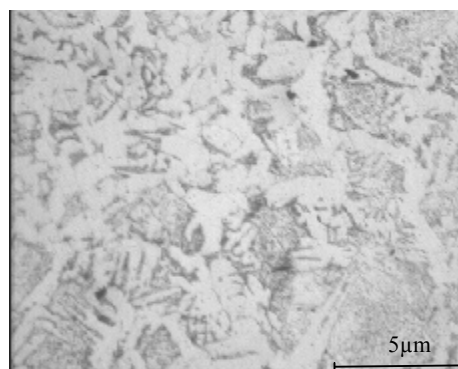


شکل ۱۰: پیوستگی ساختار پرلیتی نسبت به نمونه میله‌آهنی در نمونه سرنیزه چهارپر بیشتر است.

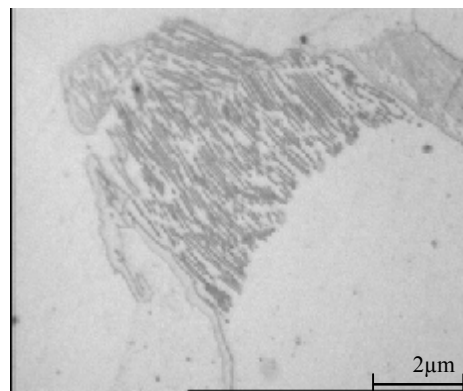
### ساختار زمینه نمونه سرنیزه سه‌پر (S3)

بر خلاف دو نمونه دیگر که به طور عرضی و عمود بر محور نمونه‌ها برش زده شده بودند، نمونه S3 به صورت طولی مقطع زده شد. در بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی، ساختار دانه‌های نمونه S3، فریتی و مشابه نمونه‌های قبلی ارزیابی شد (شکل ۱۱).

آهن در مجاورت زغال چوب، به عنوان سوخت کوره قرار داشته و کربوریزه شده است، ولی کربن به علت سرد شدن در هوا و خارج از کوره فرصت کافی برای نفوذ به عمق بیشتر را نداشته و از لایه‌های سطحی خارج نشده و لایه‌های پرلیتی در سطح خارجی نمونه، نسبت به مرکز آن تراکم بیشتری دارد. در نمونه S2 ساختار مشاهده شده قبل از آنیل، شباهت زیادی با ساختار قبل از آنیل نمونه S1 دارد. دانه‌های با ساختار فریتی به خوبی قابل تشخیص هستند. دانه‌های مشکوک به ساختار پرلیتی و تفاوت رنگ این دانه‌ها نیز مشاهده می‌شود (شکل ۷).

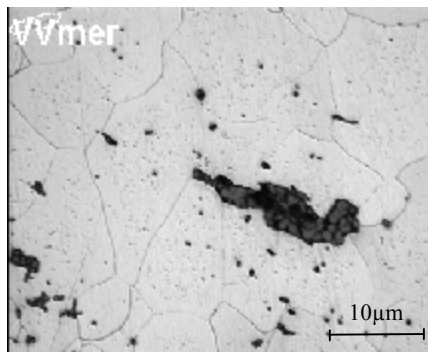


شکل ۷: ساختار فریتی قبل از آنیل نمونه سرنیزه چهارپر که نقاط تیره‌تر به نظر می‌رسد، پرلیتی باشند.



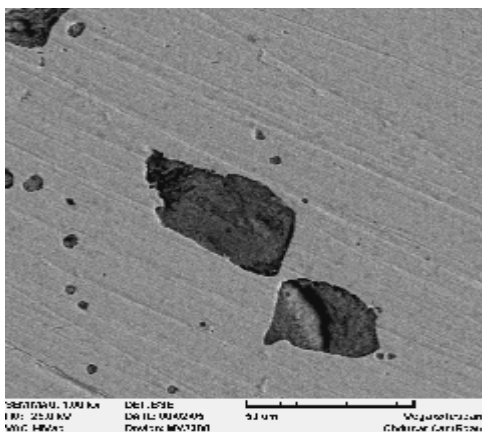
شکل ۸: ساختار پرلیتی نمونه سرنیزه چهارپر بعد از آنیل.

با انجام عملیات حرارتی آنیل بر روی نمونه S2 ساختار پرلیتی مانند نمونه میله‌آهنی نمایان‌تر می‌شود (شکل ۸) که در صد کمی از سطح را اشغال می‌کند ولی در مقایسه با نمونه میله‌آهنی تراکم بیشتری دارد، (۱۰-۱۵٪ از کل سطح مقطع). دانه‌بندی ساختار در نمونه S2 نسبت به نمونه میله‌آهنی ریزتر است (شکل ۹). همچنین پیوستگی



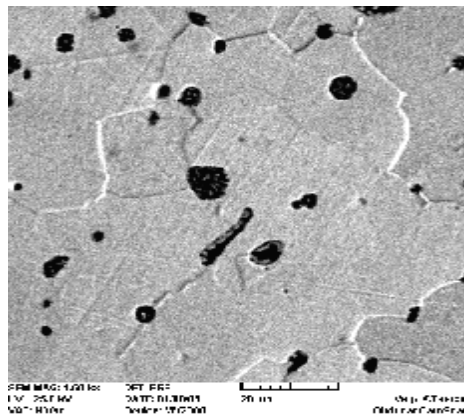
شکل ۱۳: ناخالصی‌های میله آهنی که روی مرز دانه قرار دارند و دچار کشیدگی شده‌اند.

در بررسی‌های عنصری با استفاده از تجهیزات EDS میکروسکوپ الکترونی عناصر موجود در نمونه S1، علاوه بر زمینه آهن، میزان قابل توجهی از ترکیبات (به ترتیب فراوانی) Fe، O، Al، Ca، Mg و C مشاهده شده است (شکل ۱۴).



شکل ۱۴: در آنالیز عنصری نمونه میله آهنی به ترتیب فراوانی Fe، O، Al، Ca، Mg مشاهده شد.

آلومینیوم موجود می‌تواند از بقایای پودر آلومینا که برای پولیش استفاده شده و در خلل و فرج نمونه نفوذ کرده، باشد ولی بقیه عناصر از عنصری هستند که به طور طبیعی در سنگ معدن آهن وجود دارند. بر همین اساس این گونه ناخالصی‌ها از سنگ معدن احیانشده ناشی شده‌اند که در آهن شکل داده شده باقی مانده است. در ناخالصی‌های کوچک‌تر آلومینا باقی مانده و بعد از پولیش شسته شده است، در نتیجه آلومینیوم مشاهده نشد. با توجه به درصد بسیار کم منیزیم که در بررسی یکی از ناخالصی‌ها مشاهده شد (شکل ۱۵)، نبودن منیزیم در دیگر

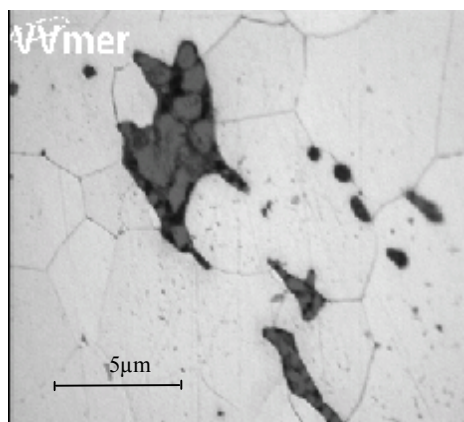


شکل ۱۱: ساختار زمینه نمونه سرنیزه سه پر ساختار فریتی است.

### سایر ترکیبات موجود در نمونه‌ها نمونه میله آهنی (S1)

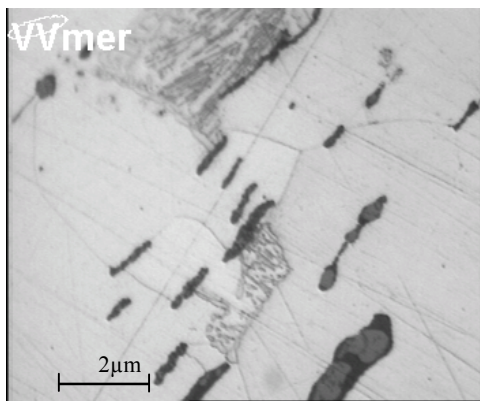
شکل و اندازه ناخالصی‌ها قبل و بعد از آنیل در نمونه S1 تغییر نکرده و بیشتر به صورت بقایای سنگ معدن هستند که در وسط نمونه گیر افتاده‌اند (شکل‌های ۵، ۶). ناخالصی‌ها احتمالاً به دلیل احیای ناقص سنگ معدن و روش شکل دادن نمونه پدید آمده‌اند. سطح ناخالصی‌ها در تصاویر میکروسکوپی ناصاف و اکسیده و در بعضی نواحی همراه با کندگی است که دلیل بر سخت بودن و شکنندگی ناخالصی-هاست و نیز اینکه ناخالصی‌ها منشأ سنگ معدنی دارند. ناخالصی‌ها در نمونه S1 شکل خاصی ندارند و به نسبت درشت هستند (شکل ۱۲).

بعضی ناخالصی‌ها که در مرز دانه‌ها قرار گرفته‌اند کشیده‌تر به نظر می‌آیند (شکل ۱۳).

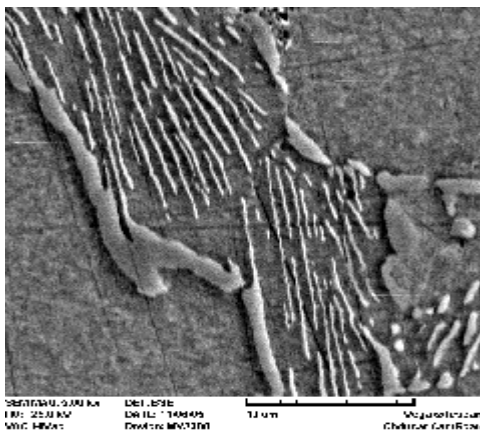


شکل ۱۲: ناخالصی‌ها در نمونه میله آهنی که شکل خاصی ندارند.

با توجه به درصد بسیار اندک گوگرد و هم چنین نامتناسب بودن آن با درصد وزنی گوگرد در نمونه S2 که به دنبال می‌آید، وجود گوگرد می‌تواند ناشی از گذر زمان و آلودگی نمونه‌ها باشد که البته مورد بررسی این تحقیق نیست. میانگین سختی برای نمونه S1 ۱۵۲HV گزارش شد که فریتی بودن ساختار زمینه نمونه S1 را توجیه می‌کند. چگالی نمونه میله-آهنی  $7.713 \text{ gr/cm}^3$  محاسبه شد که بسیار به چگالی آهن خالص نزدیک است. در بررسی‌های XRD انجام شده روی نمونه S1 نیز به جز پیک‌های آهن و اکسیدهای آهن، پیک دیگری گرفته نشد.



شکل ۱۷: ناخالصی‌های نمونه سرنیزه چهارپر بسیار ریز و در راستای لبه‌های تیز سرنیزه کنشیده شده‌اند.

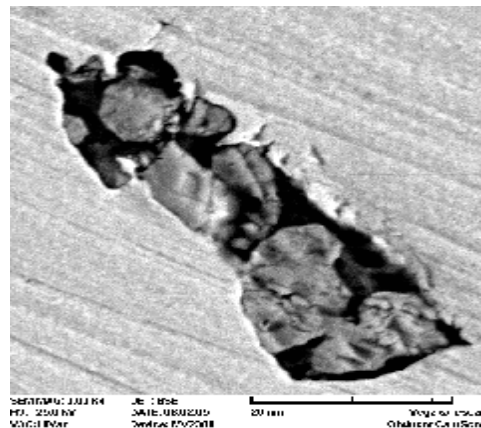


شکل ۱۸: ساختار پرلیتی نمونه سرنیزه چهارپر در زمینه فریتی بعد از آنیل.

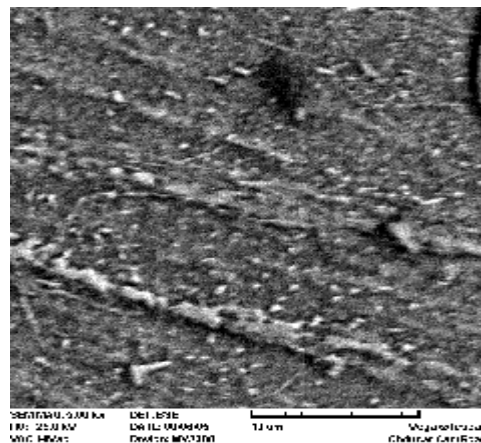
نمونه سرنیزه چهارپر (S2)

سطح ناخالصی‌ها، همانند نمونه S1، ناصاف بوده و شبیه به سنگ معدنی آهن است. ناخالصی‌ها در سرنیزه چهارپر در مرکز نمونه تراکم بیشتری دارند.

ناخالصی‌ها توجیه‌پذیر است. در سطح داخلی ناخالصی‌های نمونه S1 که دچار کشیدگی شده، سیلیسیم گزارش شده است. با توجه به اینکه نمونه‌ها مدت زیادی در خاک مدفون بوده‌اند، سیلیسیم می‌تواند ناشی از خاک منطقه باشد. قابل ذکر است که در مراحل بعدی نیز فقط یک بار و در آنالیز نمونه S3 سیلیسیم مشاهده شد. عنصر اصلی به دست آمده در آنالیز عنصری مرز دانه‌ها مطابق انتظار آهن است. کربن مشاهده شده نیز می‌تواند به دلیل حضور نواحی با ساختار پرلیتی در قطعه باشد (شکل ۱۶) ولی آنچه قابل توجه است خلوص آهن در مرز دانه‌ها می‌باشد. در آزمایش اشترولاین، نمونه میله آهنی ۰.۰۶wt٪ کربن و ۰.۲۶wt٪ گوگرد گزارش شد که این میزان کربن توجیه مناسبی برای وجود لایه‌های اندک پرلیتی در نمونه است.



شکل ۱۵: در بعضی از ناخالصی‌های نمونه میله آهنی، سیلیسیم مشاهده شد.



شکل ۱۶: ساختار پرلیتی نمونه میله آهنی.

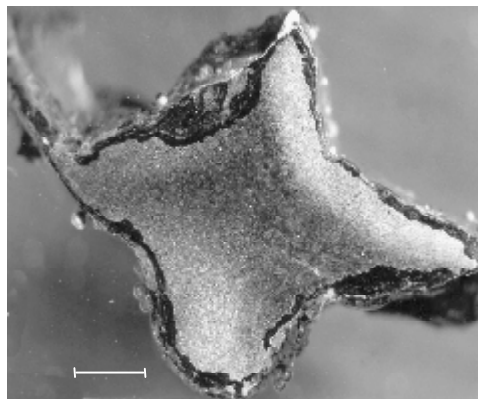




در حد دیگر عناصر ناخالصی نمونه افت می‌کند (شکل ۲۲) دیگر عناصر ناخالصی عبارتند از کلسیم، سدیم، پتاسیم، فسفر و غیره. درصد وزنی آهن مشاهده شده، در همه بررسی‌های نمونه، در ناحیه اکسیدی به دلیل وجود دیگر عناصر افت می‌کند. وجود کلسیم، سدیم، پتاسیم به دلیل سنگ معدنی آهن می‌باشد و فسفر می‌تواند از خاک منطقه طی سالیان درون قطعه نفوذ کرده باشد. مقدار اندکی نیکل نیز در نمونه S3 آنالیز شد که احتمال می‌رود در تولید شمش اولیه این نمونه، مقداری آهن شهابی نیز همراه با سنگ معدن آهن احیا شده و برای ساخت قطعات به کار رفته باشد. قابل ذکر است که استفاده از آهن شهابی در آن دوران کاملاً اتفاقی بوده و بشر در آن زمان نسبت به نوع آهن و سنگ آهن مصرفی خود اطلاع نداشته است [۳،۴].

در بین عناصر مشاهده شده، سیلیسیم نیز وجود دارد. فقط در این بررسی و یک مورد در نمونه S1، سیلیسیم دیده شد. به طور کلی وجود عناصر ناخالصی‌های سنگ معدنی آهن (کلسیم، پتاسیم، سدیم، منیزیم، منگنز،...) در تمام نقاط نمونه S3 به دلیل احیای ناقص سنگ معدنی ثابت است. میزان ناخالصی‌ها در نمونه S3 بسیار کم و متفاوت با ناخالصی‌های نمونه‌های دیگر است (شکل ۲۰). کم بودن ناخالصی‌های نمونه S3 می‌تواند به دلیل شکل خاص سرنیزه و نیاز نمونه به چکش کاری بیشتر نسبت به نمونه‌های قبلی باشد.

در نتیجه با توجه به دمای چکش کاری و شکنندگی ناخالصی‌ها، ناخالصی‌ها خرد شده و از نمونه خارج شده‌اند. در آنالیز نمونه S3 آهن (wt ۰.۷۷)، اکسیژن (wt ۰.۱۶)، کلسیم (wt ۰.۲) و منیزیم (wt ۰.۲) حاصل شده است. همه عناصر نامبرده از عناصر موجود در سنگ معدنی آهن هستند. در آنالیز قسمت‌های تیره تر ناخالصی که مرز شکستگی ناخالصی و مرز ناخالصی با زمینه آهنی است، علاوه بر عناصر پیشین، سیلیسیم (wt ۰.۳) نیز آنالیز شد. وجود سیلیسیم در مرز جدایی ناخالصی‌های نمونه و آنالیز عنصری خطی لایه اکسیدی سطح خارجی نمونه S3 می‌تواند ناشی از سنگ معدنی استفاده شده برای ساخت این سرنیزه باشد.



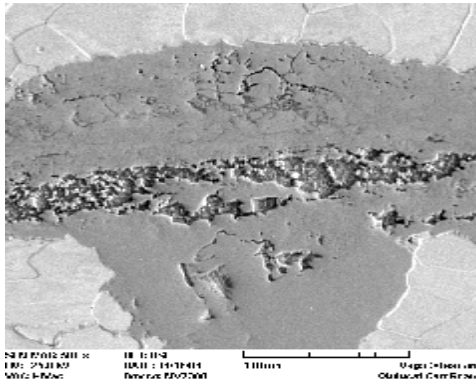
شکل ۲۳: ساختار میکروسکوپی نمونه سرنیزه چهارپر.

ناخالصی‌هایی که در نمونه S3 مشاهده شد بسیار اندک، کوچک و بی‌شکل بوده و بیشتر در مرز دانه‌ها قرار دارند. ناخالصی‌ها در مرز دانه دچار کشیدگی شده و ناخالصی‌هایی که درون دانه‌ها مشاهده می‌شوند، ریزتر و کروی‌تر است. علاوه بر ناخالصی‌ها در ساختار نمونه S3 حفره‌هایی مشاهده می‌شود که تقریباً روی محور طولی نمونه قرار گرفته‌اند (شکل ۱۹). حفره‌های مشاهده شده عمیق و عرضی (در راستای عمود بر محور طولی، محور مورد بررسی نمونه) هستند، پس منشأ آنها می‌تواند خوردگی فلز در اثر گذشت زمان بسیار طولانی و نیز نفوذ اکسیژن به درون سرنیزه و ایجاد اکسید درون قطعه باشد که اکسیدها به صورت سطحی هنگام سنباده زنی، پولیش و اچ بر طرف شده‌اند. این حفره‌ها در نمونه‌های قبلی که به طور عرضی مقطع زده شده و بررسی شدند، به شکل ترک‌هایی مشاهده شدند که راستای شعاعی داشته و از سطح تا محور مرکزی سطح مقطع نمونه‌ها گسترش یافته بودند و دلیل وجود آنها نیز نفوذ اکسیژن و خوردگی فلز در طی زمان برآورد شد. تجمع خاصی از اکسیدها و ناخالصی‌ها در نمونه S3 مشاهده می‌شود (شکل ۲۰). اکثر ناخالصی‌ها در اطراف محور مرکزی طولی نمونه تجمع کرده و در امتداد این محور کشیده شده‌اند (شکل ۲۱). با استفاده از تجهیزات EDS و آنالیز عنصری و خطی نمونه S3 بر روی ناحیه اکسید سطحی نمونه تا محور مرکزی انجام گرفته، در تمام سطح مقطع طولی نمونه (ناحیه اکسیدی و زمینه فریتی) آهن مشاهده شده است. بیشترین درصد وزنی اکسیژن در ناحیه پوشش اکسیدی که تیره‌تر است مشاهده می‌شود و در بقیه سطح درصد وزنی اکسیژن

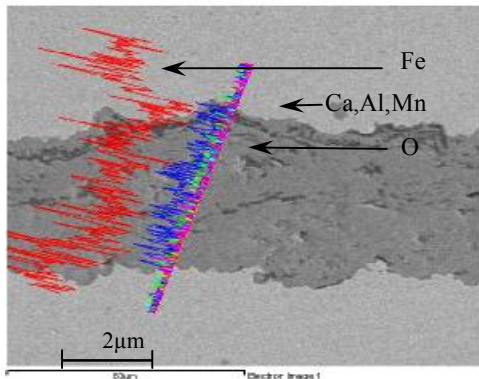
## نحوه شکل دادن نمونه‌ها

نمونه سرنیزه چهارپر (S2)

دو لبه پهن شده میله ادامه پیدا کرده تا میله در زوایای خود نازک شده و در نهایت دو لبه تیز سرنیزه حاصل شده است. فلزی که در لبه‌ها بوده بیشتر چکش خورده، در نتیجه ناخالصی‌ها خارج شده و فلز خالص‌تری حاصل شده است.



شکل ۲۵: پوشش اکسیدی ترک مرکزی نمونه سرنیزه سه‌پر.

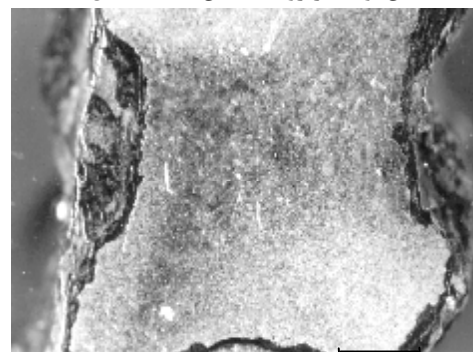


شکل ۲۶: آنالیز خطی ترک مرکزی نمونه سرنیزه سه‌پر، در صدوزنی اکسیژن در نواحی غیر اکسیدی در حد دیگر عناصر ناخالصی افت می‌کند. نمونه سرنیزه سه‌پر (S3).

ترک مرکزی نمونه سرنیزه سه‌پر (S3)

در محور مرکزی طولی نمونه S3، ترک سرتاسری، از نوک سرنیزه تا انتهای پره‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۲۵). اطراف ترک به شدت خورده شده و پوشیده از اکسید است. ترک نسبتاً عمیق و بزرگ بوده، به طوری که با چشم غیر مسلح نیز تشخیص داده می‌شود. منشأ این ترک می‌تواند روش شکل‌دادن نمونه S3 باشد. برای تهیه این نوع سرنیزه، شمش از سه جهت شکل داده شده است. به طوری که شمش

ریز دانه بودن نمونه S2 و همچنین تراکم و پیوستگی بیشتر ساختار پرلیتی در مرکز نمونه نسبت به سطح آن چنانچه توضیح داده شده است ناشی از چکش‌کاری نمونه، برای ایجاد شکل مورد نظر بعد از حرارت دیدن در کوره‌های آهن‌گری است. کربن‌هایی که به صورت سطحی جذب شده بودند در اثر ضربات آهن‌گری از سطح خارج شده و ناخالصی‌های ناشی از احیای ناقص سنگ معدن آهن در ماده اولیه نیز در اثر آهن‌گری خرد شده‌اند. در مواقعی که ناخالصی‌ها بسیار به سطح نزدیک بوده‌اند از نمونه خارج شده‌اند که همین موضوع باعث خالص‌تر بودن سطح نمونه نسبت به مرکز آن است. بیشتر بودن درصد سطحی ساختار پرلیتی در نمونه S2 نسبت به نمونه S1 نیز به دلیل مجاورت بیشتر نمونه S2 با کربن در کوره‌های آهن‌گری با هدف گرما دادن و شکل دادن نمونه است. تجمع ناخالصی‌ها در مرکز سطح مقطع نمونه و نیز کشیدگی آنها در راستای لبه‌های تیز و همچنین خرد شدن ناخالصی‌ها ناشی از چکش‌کاری در دمای کوره‌های زغالی و روش شکل‌دادن سرنیزه است. در مقیاس ماکروسکوپی سطح نمونه S2، می‌توان سیلان تقریبی فلز را هنگام شکل‌دادن نمونه مشاهده کرد (شکل ۲۳). خط سیری که مشاهده می‌شود دال بر چکش‌کاری لبه‌های آهن اولیه بر روی سندان است (شکل ۲۴).



شکل ۲۴: سیلان فلز هنگام شکل دادن نمونه سرنیزه- چهارپر بیانگر نحوه شکل دادن نمونه است.

به طوری که قطعه‌ای از آهن احیا شده، ابتدا چکش خورده و به شکل میله قطوری در می‌آمده است. میله حاصل، مقطعی چهار گوش و یا دایره‌ای داشته و با چکش‌زنی پهن شده، سپس چکش‌زدن بر

آلومینا در خلل و فرج ترک مرکزی بعد از پولیش باشد. در نواحی مجاور ترک مرکزی عناصر ناخالصی با درصد وزنی نسبتاً ثابت وجود دارند، ولی درصد وزنی اکسیژن در ناحیه روشن تر (زمینه پرلیتی) افت شدیدی داشته و تقریباً به حد دیگر عناصر می‌رسد. تفاوت درصد وزنی آهن نیز ناشی از وجود و نبود اکسیژن و دیگر ناخالصی‌ها است. همین اتفاق نیز در آنالیز خطی پوشش اکسیدی سطح نمونه مشاهده شد (شکل ۲۲). بیشترین درصد وزنی اکسیژن در ناحیه پوشش اکسیدی که تیره‌تر است مشاهده می‌شود و در بقیه سطح، درصد وزنی اکسیژن در حد دیگر عناصر ناخالصی نمونه افت می‌کند.

### نتیجه‌گیری

۱. ساختار غالب در هر سه نمونه مورد بررسی، آهن فریتی بوده و در بین دانه‌های فریتی، لایه‌های پرلیتی مشاهده شد.
  ۲. ناخالصی‌ها در هر سه نمونه از جنس سنگ معدن آهن است که به صورت احیا نشده و در زمان ساخت نمونه‌ها در قطعه محبوس شده‌اند.
  ۳. روش شکل‌دادن هر سه نمونه به صورت چکش زنی در دمای کوره‌های آهن‌گری بوده است.
  ۴. متناسب با پیچیدگی شکل نمونه‌ها و به فراخور میزان آهن‌گری هر یک، میزان ناخالصی‌ها و اندازه آنها در نمونه‌ها متفاوت بوده و با پیچیده‌تر شدن شکل آنها میزان ناخالصی‌ها کمتر و اندازه آنها کوچک تر شده است.
- دانه بندی ساختار فریتی متناسب با افزایش پیچیدگی شکل نمونه کاهش می‌یابد.

آهنی در کوره آهن‌گری گداخته و بر روی سندانی با سطح محدب چکش زده شده است. تقعر وجوه سرنیزه یکسان نیست که می‌تواند ناشی از سطح سندان، تفاوت دمای قطعه هنگام چکش‌زنی و یا تفاوت نحوه چکش‌زنی باشد. ترک مرکزی ناشی از حضور اکسیدهای محبوس شده در شمش اولیه و همچنین ناشی از کشش بیش از حد نقاط مرکزی شمش هنگام چکش زدن و تیزکردن لبه‌های سرنیزه است (همانند آنچه امروزه در شکل دادن فلزات به روش کشش عمیق روی می‌دهد). ترک مرکزی در بعضی نقاط در یک راستای واحد نیست. نبود یکنواختی چکش‌کاری و تفاوت میزان سیلان فلز هنگام چکش‌کاری به دلیل یکسان نبودن خلوص فلز و دمای شکل‌دادن آن، همچنین وجود اکسیدهای محبوس شده در شمش اولیه می‌تواند سبب تغییر راستا و پهنای ترک در امتداد محور مرکزی نمونه شود. اطراف ترک، ناحیه تیره رنگی وجود دارد. این ناحیه تیره رنگ همان پوشش اکسیدی سطح درون ترک است. این ناحیه ناشی از نفوذ اکسیژن به مرکز نمونه S3 در طی سالیان طولانی است. اکسیژن نفوذ کرده و در فضای ترک مرکزی محبوس شده و باعث اکسید شدن سطح داخلی ترک مرکزی شده است. با استفاده از تجهیزات EDS و آنالیز عنصری و خطی ترک مرکزی نمونه S3 در ناحیه تیره رنگ که پوشش اکسیدی ترک را نشان می‌دهد، اکسیژن مشاهده می‌شود (شکل ۲۶). در کل منطقه بررسی شده (زمینه فریتی، پوشش اکسیدی ترک مرکزی و عمق ترک) عناصر کلسیم، منیزیم و آلومینیوم به میزان بسیار ناچیز مشاهده شد. کلسیم و منیزیم موجود از عناصر سنگ معدنی آهن احیا نشده است. آلومینیوم نیز می‌تواند ناشی از باقی ماندن

### مراجع

- 1 - Shahmirzadi, S. *Prehistoric Iran, archeology in Iran from first up to start of civilization*.
- 2 - Will Durant, (1993). *Our Oriental Heritage (the history of civilization)*, translated by: A. Arianpour, Simon and Schuster. Inc, 4<sup>th</sup> print.
- 3 Cramer, C. E. (1995). *What caused the Iron Age?*
- 4 - Forbes. R. J. (1997). *Studies in ancient technology -Chapter three: The early story of Iran*.
- 5 - Daneshi, G. H. (2001). *Metal Technology in Ancient Iran*, Sharif industrial university-material faculty, 5<sup>th</sup> print.
- 6 - Palasiyed, A. (1998). *Metallurgical Studies on Founded Ancient Bronze Alloy Things in Arjan Historical Place*.