تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۵
تاریخ پذیرش مقاله: : ۱۳۹۵/۱۱/۱۵

تحلیل بحران برپایهٔ سنجش عوامل مؤثر بر خوردگی فعال و ارزیابی بحران در مجموعه‌های برنزی باستانی

امید عودباشی[۱]

چکیده

امروزه ارزیابی و مدیریت بحران در مجموعه‌های تاریخی ـ فرهنگی یکی از موضوعات مهم در پژوهش‌های حوزهٔ حفاظت پیشگیرانه است. در سالیان گذشته روش‌ها و دیدگاه‌های نسبتاً متنوعی در زمینهٔ ارزیابی و مدیریت بحران در مجموعه‌ها و محوطه‌های باستانی مطالعه و استفاده شده اند و نتایج جالب توجهی از این پژوهش‌ها منتشر شده است. یکی از انواع مجموعه‌های موزه‌ای باستانی، مجموعهٔ اشیای فلزی هستند که ممکن است در کاوش‌های باستان‌شناسی کشف شوند. در این پژوهش، استفاده ار رهیافت ارزیابی بحران جهت تخمین شرایط حفاظتی در مجموعه‌های برنزی باستانی مورد توجه قرار گرفته است. این رهیافت بر روی وقوع خوردگی فعال (بیماری برنز) و عوامل مؤثر بر آن در زمان دفن و پس از حفاری متمرکز شده است. بر این اساس، نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی بر اساس یک سیستم مطالعاتی از پیش انجام‌شده (سیستم فلز ـ محیط ـ خوردگی) شامل شناسایی ماهیت خاک، شناخت مکانیزم خوردگی و اثر آنها بر شرایط حفاظتی اشیای برنزی مورد توجه قرار گرفته است. به همین منظور، دو مجموعهٔ برنزی به‌دست‌آمده از کاوشمحوطه‌های هفت‌تپهٔ‌خوزستان و سنگتراشان لرستان مطالعه و بررسیشده اند. در پژوهش حاضر به ارزیابی شرایط در دو مجموعه اشیای برنزی پرداخته شده که شامل شناخت مخاطرات و عوامل آسیب‌رسان به اشیای برنزی در هنگام حفاری، نگهداری و حفاظت از آنها و ارزیابی بحران بر اساس خوردگی فعال در دو مجموعه است. در نهایت شرایط حفاظتی و وضعیت حفاری و نگهداری اشیای دو مجموعه با توجه به ماهیت و وضعیت فرایند خوردگی رخداده در آنها و بر اساس نتایج حاصل از ارزیابی بحران در محیط موزه و خاک بررسی و تحلیل شده است.

کلیدواژه‌ها: ارزیابی بحران، برنزهای باستانی، بیماری برنز، کلرید محلول، رطوبت نسبی.

---

۱ استادیار گروه مرمت آثار تاریخی، دانشگاه هنر اصفهان، o.oudbashi@aui.ac.ir

مقدمه

اشیا بخشی از منابع اولیهٔ موجود در یک محوطهٔ باستانی هستند. اعتبار این منابع اولیه بستگی بـه شـناخت مـا از آنها و ایجاد پایداری در شرایط تغییریافتهٔ آنهـا در طـول زمان دارد. شناخت و ایجاد پایـداری اهـداف اصـلی هـر پـروژه حفاظـت اسـت (Bertholon, 2007: 32-32). از دیدگاه دانش حفاظت، مجموعه‌های برنزی باستانی بـه-دست‌آمده از حفاری‌های باستان‌شناسی در حقیقت در دو محیط مختلف قرار گرفته‌اند که عبارت اند از محیط دفن درازمـدت (خـاک) و محـیط نگهـداری پـس از حفـاری (موزه). در حقیقت شناخت محـیط و اثـر آن بـر اشـیای برنزی و ارزیابی شـرایط در ایـن دو دوره، امکـان ایجـاد شرایط مناسب به منظور حفاظت (به‌خصـوص حفاظـت پیشگیرانه) را ممکن می‌سازد.

ارزیابی بحران[1] و مدیریت بحران[2] در میراث فرهنگی یکی از مباحث مورد توجه در حوزهٔحفاظت و مرمت آثار تاریخی و فرهنگی است. رهیافت مدیریت بحران امکان ایجاد روش اتخاذ تصمیم جهت حفاظت پیشگیرانه را در مورد مجموعه‌های تاریخی ـ فرهنگی فراهم می‌کند. بحران یا خطر[3]در حقیقت احتمال رخ دادن یک تغییر نامطلوب است. ارزیابی بحران را می‌توان تجزیه و تحلیل میزان هر خطر یا کلیهٔ مخاطرات مؤثر بر برخی ماهیت‌ها دانست. تحلیل بحران، مطالعهٔ مواد در میراث فرهنگی و تعریف دقیق‌تر پارامترهای فرسایش اثرگذار بر اشیا موجب بهره‌گیری از مدیریت بحران در روش‌های حفاظت پیشگیرانه می‌شود. در نهایت مدیریت بحران استفاده از منابع موجود به شکلی است که خطرات احتمالی را کاهش دهد (Waller, 1995: 21; Waller, 2002; Ashley-Smith, 1999). در حقیقت ارزیابی بحران در مجموعه‌های تاریخی ـ فرهنگی شامل شناسایی جامع، اندازه‌گیری و تحلیل خطرات مؤثر بر اشیا یا مجموعه‌های فرهنگی بوده و همواره بر برآورد تحلیلی شرایط مجموعه‌ها استوار است (Muething, et al, 2005; Brokerhof et al, 2005; Wirilander, 2012). توسعهٔ ارزیابی بحران و مدل‌های بحران‌محور در حفاظت پیشگیرانه در بیست سال گذشته بسیار مورد توجه بوده است و موجب شده تا برنامه‌ریزی حفاظت فرایندی منطقی‌تر شود (Taylor, 2005).

بر این اساس یک فرایند ارزیابی بحران با تمرکز بر خوردگی فعال در آثار برنزی به‌دست‌آمده در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. ارزیابی شرایط در حقیقت ارزیابی آسیب‌های احتمالی وارد بر مجموعه از سوی عوامل آسیب‌رسان موجود در محیط قرارگیری مجموعه اشیای برنزی (محیط خاک و محیط موزه) است. این موضوع در واقع مفهومی مهم در حفاظت پیشگیرانه و مدیریت مجموعه‌های اشیای فرهنگی ـ تاریخی است که هدف آن فقط مطالعهٔ آسیب‌های موجود در اشیا نیست بلکه به آسیب‌هایی که پس از انجام حفاری ممکن است به اشیاوارد شود، توجه دارد. ارزیابی بحران در حقیقت نشانگر شرایطی است که مجموعه در آن قرار داشته و خواهد داشت (Taylor, 2005; Waller, 2003). در حقیقت، ارزیابی بحرانِ یک مجموعه بر اساس خطرات احتمالی تهدیدکنندهٔ آن، در کنترل و جلوگیری از اثر احتمالی مخاطرات یا بحران در آینده مؤثر است (Ashley-Smith, 1999: 19).با توجه به محیط قرارگیری اشیای برنزی در دوران درازمدت دفن و نیز محیط نگهداری پس از حفاری (یعنی موزه)، به نظر می‌رسد که در حوزهٔ حفاظت از اشیای برنزی باستانی (به‌خصوص حفاظت پیشگیرانه)، شرایط و ویژگی‌های دو محیط و اثر آنها بر فرسایش اشیا باید مد نظر قرار گیرد. به‌خصوص در بارهٔ بسیاری از محوطه‌های باستانی که دورهٔ حفاری معمولاً طولانی است و ممکن است که چند یا چندین سال ادامه یابد. با توجه به شرایط خورندگی خاک در محوطه‌هایی این‌چنین، حفاظت از اشیای برنزی در محل و بدون انجام حفاری‌های اضطراری جهت نجات‌بخشی اشیا یا انجام این قبیل فعالیت‌ها بایدنصب العین قرار گیرد. در حقیقت شناسایی محیط خاک جهت برنامه‌ریزی حفاری و وضع اشیای موجود در خاک و شرایط حفاظتی اشیای باستانی، نیازمند پایش شرایط و ارزیابی محیطی محیط خاک است (van Os et al,

2012; Jones et al, 2012).به همین دلیل، شرایط حفاظتی مجموعه‌های برنزی و نیز ارزیابی بحران در این مجموعه‌ها باید بر اساس دو محیط خاک و موزه مورد توجه قرار گیرد. زیرا حتی پس از آغاز حفاری، بخش عمده‌ای از اشیاکه حتی تا چندین سال در محیط خاک باقی می‌مانند، تحت اثر شرایط خورندهٔ خاک ممکن است دستخوش تغییر شوند، و اشیاییه‌دست‌آمده نیز پس از کشف معمولاً به موزه انتقال می‌یابند که می‌تواند به‌عنوان محیطی جدید با شرایط متفاوت مورد توجه باشد.

هدف از این مقاله ارائه رهیافتی برای ارزیابی بحران بر اساس عوامل مؤثر بر خوردگی فعال در برنزهای باستانی و با توجه به نتایج حاصل از مطالعات انجام‌شده روی محیط‌های قرارگیری اشیا در زمان دفن و پس از کاوش است. در حقیقت، ارزیابی بحران خوردگی فعال در مجموعه‌ها بر نتایج حاصل از فرایند مطالعات آزمایشگاهی و اقلیمیِ انجام‌شده روی مجموعه‌های برنزی باستانی موسوم به سیستم فلز ـ محیط ـ خوردگی استوار است (عودباشی، ۱۳۹۲).

ارزیابی بحران

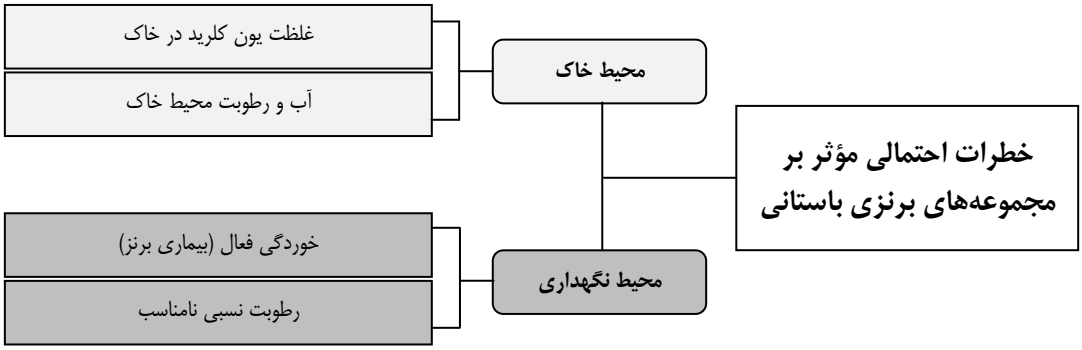
بحران یا خطر، ترکیبی از احتمال وقوع و تغییر در ارزش‌های موجود در یک اثر یا مجموعه‌ای از آثار است (Ashley-Smith, 1999). معمولاً در فرایندهای ارزیابی بحران به کلیهٔ مخاطرات (بحران‌های) مؤثر بر یک مجموعه پرداخته می‌شود. این مخاطرات در حوزهٔ حفاظتِ پیشگیرانه شامل ده خطر اصلی است که ذیل نیروهای فیزیکی، آتش، آب، اعمال غیرقانونی، آفات، آلاینده‌ها، تابش نور و UV، دمای نامطلوب، رطوبت نامطلوب، و اهمال انسانی طبقه‌بندی می‌شوند (Waller, 1994; Michalski, 1990). با این وجود، آنچه در این پژوهش مدننظر است، مخاطرات اثرگذار و ارزیابی بحران در خوردگی اشیای برنزی مدفون در خاک است که بر ترکیب و ماهیت محیط خاک، مکانیزم خوردگیِ رخداده در مجموعه‌ها، و خوردگی اشیا پس از حفاری تأکید دارد. مخاطرات یا بحران‌ها به طور کلی به سه نوع مشخص تقسیم می‌شوند (تصویر ۱) (Waller, 1994; 1995):

- نوع ۱ یا نادر[۴] و فاجعه‌آمیز[۵] مانند زمین‌لرزه و طوفان؛
- نوع ۲ یا گاه‌به‌گاه[۶] و شدید[۷] مانند نشت آب، استفاده از مواد پاکسازی نامناسب، و رطوبت نسبی بسیار بالا؛
- نوع ۳ یا دائمی[۸] و آهسته[۹] مانند رطوبت‌نسبی نامناسب و گازهای آلاینده.

بر اساس نتایج حاصل از مطالعات انجام‌شده روی خوردگی و پایداری اشیا برنزی باستانی از منظر روند خوردگی قبل و بعد از حفاری، به نظر می‌رسد که حضور و غلظت یون کلرید و میزان آب و رطوبت (به هر شکل) در محیط خاک و بیماری برنز و درصد رطوبت نسبی در محیط موزه، خطرات اصلی اثرگذار بر مجموعه‌های برنزی باستان‌شناسی هستند (تصویر ۲).

	دائمی	گاه‌به‌گاه	نادر
فاجعه‌آمیز			*نوع ۱*
شدید		*نوع ۲*	
آهسته	*نوع ۳*		

تصویر ۱. سه نوع بحران (خطر) شناخته‌شده بر اساس تکرار و شدت آنها (مأخذ: Waller 1994).



تصویر ۲. خطرات احتمالی اثرگذار بر مجموعه‌های برنزی باستانی پیش و پس از حفاری.

یکی از معادلات ساده و معمول مورد استفاده برای تخمین شرایط و ارزیابی بحران در مجموعه‌های موزه‌ای به شرح زیر است (معادلهٔ ۱) (Waller, 1994; Waller, 1995; Waller, 1999; Waller, 2002):

$$MR = P \times FS \times LV \times E \quad (۱)$$

شدت× کاهش ارزش × درصد فراگیر × احتمال = اهمیت بحران

- اهمیت بحران[۱۰] (MR): مقدار یا اثری که یک خطر بخصوص یک مجموعه را تهدید می‌کند.
- احتمال[۱۱] (P): تغییر احتمالی وقوع یک پدیده در یک شدت مشخص است.
- درصد فراگیر[۱۲] (FS): آن مقدار از مجموعه است که تحتِ اثر ریسک قرار می‌گیرد.
- کاهش ارزش[۱۳] (LV): به معنای کاهش ارزش‌های نهفته در مجموعه در راستای هدفی که در خود دارد.
- شدت[۱۴] (E): به معنای شدت و گستردگی بحران است و می‌تواند در مخاطرات دائمی و آهسته به جای احتمال (P) به کار رود.

البته باید ذکر نمود که این معادله می‌تواند به شکل زیر خلاصه شود (معادلهٔ ۲) (Ashley-Smith, 1999):

$$R = PV \quad (۲)$$

ارزش باقیمانده × احتمال = خطر (بحران)

با توجه به اینکه مخاطرات ذکرشدهٔ اثرگذار بر مجموعه‌های برنزی دائمی هستند و آهسته رفتار می‌کنند و در درازمدت بر آثار برنزی اثر می‌گذارند، احتمال (P) و شدت (E) یکی در نظر گرفته شده و اهمیت بحران بر اساس معادلهٔ ۳ محاسبه شده است (Waller, 1994; Waller, 1995):

$$MR = E \times FS \times LV \quad (۳)$$

کاهش ارزش × درصد فراگیر × شدت = اهمیت بحران

روش پژوهش

به منظور مطالعهٔ رهیافت ارزیابی بحران در مجموعه‌های برنزی به‌دست‌آمده از حفاری، دو مجموعه از اشیای برنزی به‌دست‌آمده از حفاری در ایران (مجموعه‌های برنزی محوطهٔ باستانی هفت‌تپه خوزستان متعلق به دورهٔ‌عیلام میانه و محوطهٔ سنگتراشان لرستان متعلق به عصر آهن)انتخاب شدند. انگیزهٔ انتخاب این دو مجموعه، کشف مجموعهٔ برنزی در حفاری‌های باستان‌شناسی محوطه‌های مزبور، وجود مقدار قابل‌توجه نمونه‌های مطالعاتی در بین مجموعهٔ برنزی کشف‌شده، امکان نمونه‌برداری از خاک محوطه‌ها، وجود ارزش‌های تاریخی و فنی ـ هنری در مجموعهٔ آثار برنزی کشف‌شده، ادامهٔ فعالیت‌های باستان‌شناسی در دو محوطه، عدم انجام فعالیت حفاظتی مشخص و مدون حین یا پس از حفاری، و قرارگیری اشیای کشف‌شده پس از حفاری در گنجینه یا موزه‌های مشخص بود. در ادامه به معرفی دو محوطه، محتوای باستان شناسی و مجموعه اشیای برنزی آنها پرداخته می‌شود.

محوطهٔ باستانی هفت‌تپه خوزستان در حدود هیجده کیلومتری جنوب شرقی محوطهٔ باستانی و شهر جدید شوش و در مختصات جغرافیایی ۴۸° ۱۹′ ۴۷′′ طول

شرقی و ´´۴۹ ´۰۴ °۳۲ عرض شمالی واقع شده است (Mofidi Nasrabadi, 2010: 3; Mofidi Nasrabadi, 2013: 161). این محوطه از تعدادی تپهٔ باستانی (جمعاً ۱۴ تپه مشخص) در کنار هم تشکیل شده است و به همین دلیل نیز در منطقه به هفت تپه معروف است. بر اساس مطالعات سطحی و ژئومغناطیس گسترهٔ محوطه باستانی حدود ۱/۷ در ۱/۳ کیلومتر تخمین زده شده است (Mofidi Nasrabadi, 2013: 161; Mofidi Nasrabadi, 2010: 3; Mofidi Nasrabadi, 2003/04: 225). در سال ۱۳۴۴ خورشیدی حفاری‌های باستان‌شناسی در این محوطه آغاز شد و تا سال ۱۳۵۷ توسط هیئتی به سرپرستی مرحوم عزت‌الله نگهبان ادامه یافت (نگهبان، ۱۳۷۲؛ Negahban, 1979: 9; Negahban, 1991; Potts, 1999: 196; Mofidi-Nasrabadi, 2010: 5). در سال ۱۳۷۷ با آغاز پروژهٔ بین المللی حفاظت و مرمت چغازنبیل، موزهٔ هفت‌تپه به‌عنوان مرکز مطالعاتی این پروژه در نظر گرفته شد. حفاری‌های باستان‌شناسی در این محوطه مجدداً در سال ۱۳۸۳ به سرپرستی بهزاد مفیدی نصرآبادی از سر گرفته شد. این مرحله از حفاری‌ها و مطالعات باستان‌شناسی تا سال ۱۳۹۱ خورشیدی در هشت فصل ادامه یافته است. حفاری‌های انجام‌شده در محوطهٔ باستانی هفت‌تپه خوزستان موجب کشف مقادیر قابل‌توجهی از بقایای معماری آجری و خشتی و اشیای مختلف ساخته‌شده از سفال، سنگ، استخوان و الواح گلی و یک مجموعه قابل توجه از اشیای متنوع برنزی شده است. بر اساس مطالعات باستان‌شناسی، محوطهٔ باستانی هفت‌تپه بقایای شهر ایلامی کابناک[۱۵] متعلق به مرحلهٔ اول دورهٔ عیلام میانی (عیلام میانی I)، حدود قرن ۱۴ ق‌م است (Negahban, 1979: 10; Mofidi Nasrabadi, 2004: 300; Mofidi Nasrabadi, 2010; Potts, 1999).

یکی از جدیدترین حفاری‌های باستان‌شناسی در ناحیهٔ لرستان در محوطهٔ سنگتراشان انجام شده است. این محوطه در حدود سی کیلومتری جنوب شرق شهر خرم‌آباد و در مختصات جغرافیایی ´´۷۴۸ ´۳۳ °۴۸ طول شرقی و ´´۵۵ ´۱۴ °۳۳ عرض شمالی قرار گرفته است. این محوطهٔ باستانی در سال ۱۳۸۲ کشف و در سال ۱۳۸۳ به شمارهٔ ۱۱۲۲۱ در فهرست آثار ملی ثبت شد (ملکزاده، ۱۳۹۱: ۱۲؛ Oudbashi et al, 2013). محوطهٔ سنگتراشان بین سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۰ خورشیدی در شش فصل به سرپرستی مهرداد ملکزاده و عطا حسن‌پور کاوش باستان‌شناسیکشد. حفاری‌های باستان‌شناسی در این محوطه موجب کشف بقایای معماری سنگی همراه مجموعهٔ بزرگی از اشیای منحصربه‌فرد برنزی همراه با تعداد کمی اشیا ساخته‌شده از سفال، آهن، سنگ، و استخوان شد. با توجه مطالعات باستان‌شناسی به نظر می‌رسد که این محوطهبقایای یک معماری سنگی است که به صورت خشکه‌چین یا با استفاده از ملات گل ساخته شده بوده است. این معماری سنگی احتمالاً بقایای معبد یا بنای مذهبی است که محل تقدیم اشیای برنزی به‌عنوان نذورات بوده است؛ مشابه با آنچه در محوطهٔ باستانی سرخ‌دم لری کشف شده است (Overlaet, 2011; Overlaet, 2003: 34-37). اشیاء برنزی در عمق کمی از سطح زمین بین ۰/۳ تا ۱ متر کشف شده‌اند و کل محوطه تنها یک لایه باستان‌شناسی را نمایش می‌دهد (Oudbashi et al, 2013). بقایای معماری و مجموعهٔ برنزی کشف‌شده در سنگتراشان را می‌توان به عصر آهن IIA و IIB (حدود ۱۰۰۰ تا ۸۰۰ ق‌م) تا اوایل عصر آهن III (۸۰۰ تا ۶۰۰ ق‌م) نسبت داد (ملکزاده، ۱۳۹۱: ۲۹۳-۲۹۴؛ Oudbashi et al, 2013: 152).

به منظور ارزیابی بحران در مجموعه‌های برنزی ذکرشده، میزان عوامل مؤثر بر فرایند خوردگی در برنزهای باستای با توجه به مطالب ذکرشده در بالا شناسایی و اندازه‌گیری شد. بر این اساس جهت شناسایی غلظت یون کلرید محلول، روش تیتراسیون حجمی (روش مور[۱۶]) بر اساس استاندارد ASTM D1411-09به کار گرفته شد (ASTM D1411-09, 2009; Miller et al, 2006; Pansu et al, 2006). میزان آب موجود در خاک نیز با توجه به عوامل متعددی چون:الف. محل قرارگیری اشیا نسبت به سطح آب زیرزمینی؛ ب.

ظرفیت نگهداری آب خاک؛ پ. بافت خاک؛ و ت. میزان بارش، تخمین زده شد. وجود خوردگی فعال در اشیای دو مجموعه نیز بر اساس نتایج مطالعات انجام‌شده روی مکانیزم خوردگی رخداده در اشیای برنزی دو محوطه مشخص شد (عودباشی، ۱۳۹۲؛ Oudbashi et al, 2016; Oudbashi, 2015). در نهایت میزان رطوبت نسبی و تغییرات آن نیز بر اساس اندازه‌گیری‌های اولیهٔ انجام‌شده و نیز اقلیم محل قرارگیری دو مجموعه (موزه) سنجیده و تخمین زدهشد. تخمین و ارزیابی بحران در دو مجموعه نیز بر اساس معادلهٔ ۳ محاسبه شد.

نتایج و بحث

ارزیابی بحران پیش از حفاری و حین حفاری

نتایج مطالعات انجام‌شده روی دو مجموعهٔ برنزی نشان داده است که در دو محیط متفاوت، از حیث خورندگی و عوامل مؤثر بر فرسایش اشیای برنزی، دو نوع خوردگی متفاوت از نظر ریخت‌شناسی و مکانیزم رخ داده است (Oudbashi et al, 2016; Oudbashi, 2015). نتایج بیانگر این مطلب است که خورندگی خاک نقش مهمی در شکل‌گیری و وقوع خوردگی در اشیای برنزی دارد. خاک محوطهٔ هفت‌تپه به‌شدت خورنده بوده و تعداد زیادی از نمونه‌های مطالعه‌شده (۷۳٪) نیز به طورکامل خورده شده بودند و فقط بخش کمی از نمونه‌ها حاوی بقایای فلزی آنهم به نسبت‌های متفاوت بودند (عودباشی، ۱۳۹۲). از سوی دیگر، خاک محوطهٔ سنگتراشان در محدودهٔ تاحدی خورنده قرار داشت که با توجه به میزان خوردگی موجود در نمونه‌های مطالعه-شده، بیش از ۵۰٪ از مادهٔ اصلی فلزی در کلیه نمونه‌ها حفظ شده بود. به طورکلی خورندگی خاک می‌تواند نشان‌دهنده خطرات احتمالی تهدیدکنندهٔ اشیاء موجود در خاک در حال حاضر باشد. با اینحال خورندگی خاک را نمی‌توان به‌عنوان فاکتور اصلی در خوردگی درازمدت اشیای برنزی باستانی مدنظر قرار داد. فاکتور اصلی در محیط خاک، وجود یون کلرید است. هر چه غلظت یون کلرید بیش‌تر باشد احتمال ایجاد خوردگی فعال (بیماری برنز) در اشیای ساخته‌شده از آلیاژهای مس نیز بیش‌تر است. به همین دلیل حضور و غلظت یون کلرید را می‌توان عامل مخاطره‌آمیز دیگری در محیط خاک دانست. نتایج نشان داد که در محوطهٔ هفت‌تپه علی‌رغم خورندگی بالای محیط خاک، آنیون اصلی اثرگذار بر نوع و ماهیت خوردگی رخداده در برنزهای باستانی، حضور و غلظت یون کلرید بود. به همین دلیل حضور و غلظت کلرید محلول را باید به تنهایی به‌عنوان یک فاکتور مخاطره‌آمیز دیگر در ارزیابی بحران خوردگی برنز در محیط خاک مدنظر قرار داد.

علی‌رغم وجود عوامل مؤثر فراوان بر خوردگی در محیط خاک، خاک‌های خشک اثری بر فرایند خوردگی برنز ندارند و برای وقوع خوردگی مؤثر بر ظاهر و ماهیت اثر به رطوبت (آب) نیاز است (De Guichen, 1995: 26). به همین دلیل وجود آب و میزان و نوع آن نیز به‌عنوان یکی دیگر از خطرات بالقوه در خوردگی اشیای باستانی برنزی در محیط خاک مؤثر است.

دو عامل ذکرشده هر یک به تنهایی نمی‌توانند موجب وقوع خوردگی در محیط خاک شوند. لازمهٔ وقوع خوردگی شدید در محیط دفن در درازمدت در برنزهای باستانی وجود رطوبت (آب) و یون کلرید است. به همین دلیل در ارزیابی بحران اشیای مدفون در خاک، این دو عامل باید در کنار یکدیگر و به شکل توام مدنظر قرار گیرند. جدول ۱ تخمین شرایط خوردگی و نوع آن را بر اساس میزان یون کلرید و حضور رطوبت (به هر شکل) در خاک به تصویر می‌کشد. بر این اساس، احتمال وقوع خوردگی و شدت آن را می‌توان با توجه به حضور هر یک از عوامل ذکرشده تخمین زده و پیش‌بینی کرد.

در جدول ۱، هر یک از عوامل در چهار سطح اصلی طبقه‌بندی می‌شوند که بر اساس آن از سطح ۱ تا سطح ۴، از کم‌ترین میزان حضور عامل اثرگذار تا بیش‌ترین میزان آن مشخص شده است. حضور رطوبت در خاک بر اساس چهار سطح خشک، نیمه‌خشک، مرطوب، و خیلی مرطوب طبقه‌بندی شده است. از سوی دیگر میزان کلرید اثرگذار در خوردگی به چهار سطح محیط

بدون کلرید (کم‌تر از ۱۰ mg/kg)، کلرید کم (۱۰ـ۱۰۰ mg/kg)، حاوی کلرید (۱۰۰ـ۱۰۰۰ mg/kg) و کلرید زیاد (بیش از ۱۰۰۰ mg/kg) تقسیم شده‌اند. این تقسیم‌بندی بر اساس مقدار ارائه‌شده در ارزیابی خورندگی خاک در جدول ۴ـ۹ ارائه شده است[iv]. میزان رطوبت در خاک را بر اساس پارامترهای سطح آب زیرزمینی، میزان بارندگی سالانه، بافت خاک و ظرفیت نگهداری آب آن می‌توان به شکل کیفی تعیین کرد.

با توجه به جدول ۱ شش نوع برآیند محتمل در خاک[۱۷] (PI_S) را بر اساس اثرگذاری دو پارامتر مهم مؤثر بر خوردگی اشیای برنزی مدفون در محیط خاک می‌توان برآورد کرد که بر اساس آن از وضع«بدون خطر» تا وضع«خطر شدید» طبقه‌بندی شده است. طبق این طبقه‌بندی از محیط کاملاً خشک و بدون کلرید به‌عنوان محیط بدون خطر و از محیط مرطوب حاوی کلرید زیاد به‌عنوان احتمال خطر شدید نام برده شده است. البته ترکیب‌های مختلف موجود بر اساس رابطهٔ بین آنها شکل‌های مختلف دیگری از احتمال خطر را در محیط خاک نمایش می‌دهند. هر یک از نتایج احتمالی با یک عدد بین صفر تا یک مشخص شده است.

تخمین اهمیت بحران در مجموعه‌های برنزی پیش و حین حفاری بر اساس معادلهٔ ۳ محاسبه شد. شدت (E) بر اساس مقادیر داده‌شده به برآیند محتمل خاک (PI_S) در جدول ۱ محاسبه شده و صفر تا ۱ در نظر گرفته شده است ($E=PI_S$). درصد فراگیر یا درصد اشیا تحت اثر محیط (FS) مجموعه بر اساس تعداد اشیایی که در این وضعیت قرار دارند مورد نظر است که می‌تواند بر اساس درصد اشیا یا تبدیل آن به مقدار بین صفر تا ۱ مشخص شود. کاهش ارزش‌های موجود در اشیای مجموعه (LV) نیز بر اساس شدت خوردگی و از بین رفتن پارامترهایی مانند جزییات سطحی و بقایای متالورژیکی (باقی‌ماندهٔ فلز) مشخص می‌شود. این پارامترها نیز در مطالعات نمونه‌های فلزی مشخص شده‌اند. این بخش از معادله نیز به صورت کلی مقدار بین صفر تا ۱ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه حداکثر مقدار هر یک از اجزای معادلهٔ ۱ است، در مجموع حداکثر شدت بحران نیز ۱ خواهد بود. در حقیقت، مقدار نهایی اهمیت بحران را می‌توان مقداری بین صفر تا ۱ محاسبه کرد.

جدول ۱. تعیین برآیندهای محتمل در محیط خاک (PI_S) بر اساس غلظت یون کلرید و میزان رطوبت در اشیای برنزی مدفون در خاک.

سطح ۴	مرطوب				
سطح ۳	نیمه مرطوب				
سطح ۲	نیمه خشک				
سطح ۱	خشک				
رطوبت (آب) / کلرید		۱۰ mg/kg	۱۰–۱۰۰ mg/kg	۱۰۰–۱۰۰۰ mg/kg	۱۰۰۰ mg/kg
		سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴

خطر شدید	پرخطر	خطر قابل توجه	کم خطر	خطر جزیی	بدون خطر
۱	۰/۸	۰/۶	۰/۴	۰/۲	۰

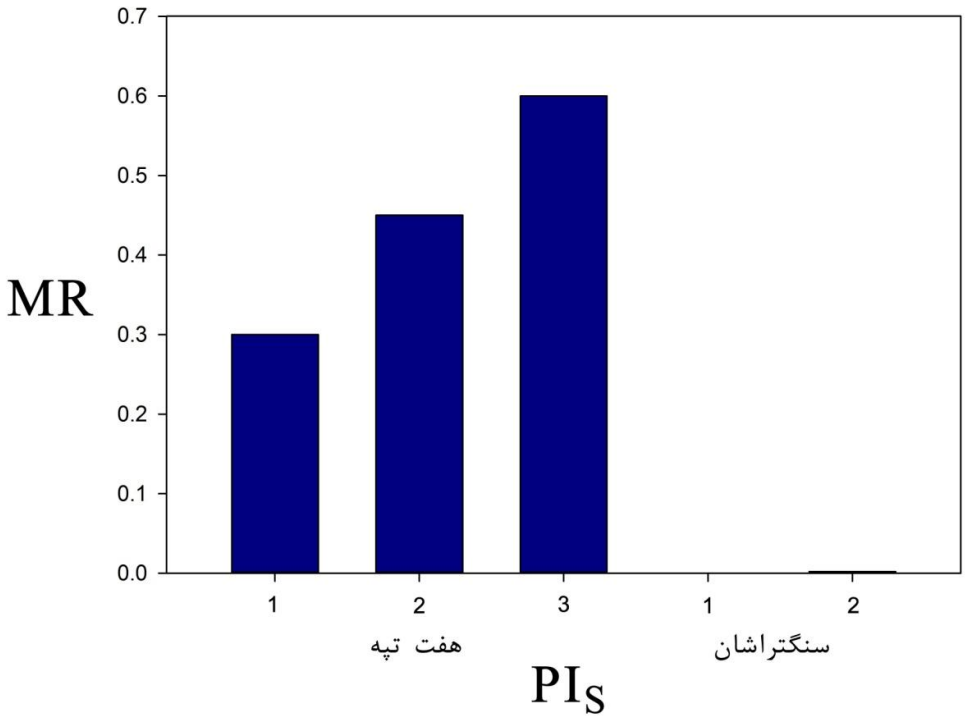
تخمین برآیند محتمل خاک (PI_S) در محوطهٔ هفت‌تپه نشان‌دهندهٔ این مطلب است که با توجه به مجموع رطوبت و آب موجود در محوطهٔ هفت‌تپه بر حسب میزان باران سالیانه، بالا بودن سطح آب زیرزمینی و بافت خاک، رطوبت موجود در خاک بین سطح ۲ و سطح ۳ در نوسان است. در عین حال میزان کلرید نیز بین سطح ۳ و ۴ متغیر است. بر این اساس، برآیند شاخص در خاک محوطهٔ هفت‌تپه در سه سطح کم‌خطر (۰/۴)، خطر قابل توجه (۰/۶) و پرخطر (۰/۸) متغیر است. کلیهٔ اشیاء مدفون در محوطهٔ متأثر از شرایط محیط خاک بوده و به همین دلیل درصد محتمل (FS) نیز ۱ در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه بر پایهٔ فاکتور فرسایش (*Fdat*) اندازه‌گیری شده در نمونه‌های مطالعاتی دو محوطه، مقدار اشیایی که کلیهٔ بقایای فلزی خود را از دست داده‌اند، ۷۳٪ برآورد شده است (عودباشی، ۱۳۹۲)، کاهش ارزش (LV) نیز ۰/۷۵ در نظر گرفته می‌شود.

محوطهٔ سنگتراشان از حیث میزان بارندگی ناحیه‌ای معتدل و مرطوب است اما عدم وجود آب‌های زیرزمینی نزدیک به اشیای مدفون (تراز پایین آب‌های زیززمینی)، عمق کم قرارگیری اشیا در خاک، بافت خاک و ظرفیت کم نگهداری آب توسط خاک محوطه، محیط آن را در دستهٔ نیمه‌خشک قرار می‌دهد. در عین حال به‌دلیل عدم وجود میزان قابل توجه یون کلرید در خاک محوطهٔ سنگتراشان، احتمال پیشروی خوردگی در ساختار اشیای مدفون در محوطه کم بوده و احتمال خطر بسیار کم است. با اینحال میزان کلرید در هر کیلوگرم خاک محوطه بر پایهٔ نمونه‌های آنالیزشده، در محدودهٔ سطح ۱ و سطح ۲ میزان کلرید قرار می‌گیرد که بر طبق آن برآیند محتمل بدون خطر (۰) و کم‌خطر (۰/۲) برای اشیای برنزی مدفون در خاک محوطهٔ سنگتراشان متصور است. بخش عمده‌ای از ساختار فلزی اشیای محوطهٔ سنگتراشان نیز حفظ شده و در عین حال جزییات سطحی نیز به خوبی در لایهٔ پاتین اشیا قابل تشخیص هستند. به همین دلیل، مقدار کاهش ارزش بسیار کم نیز حداکثر ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است. جدول ۲ مقادیر استفاده شده در محاسبهٔ اهمیت بحران را در دو محوطه و براساس برآیند محتمل محاسبه‌شده در آنها نمایش می‌دهد.

تصویر۳ نمودار اهمیت بحران را در اشیای قرارگرفته در محیط خاک دو محوطه بر اساس نتایج حاصل از معادلهٔ اهمیت بحران نمایش می‌دهد. بر این اساس در سه برآیند و احتمال موجود در محوطهٔ هفت-تپه، اهمیت بحران بین ۰/۳۰ تا ۰/۶۰ در نوسان است که مقدار قابل توجهی را در بر می‌گیرد. در حقیقت اشیای موجود در محیط خاک محوطهٔ هفت‌تپه تحت اثر خطر جدی ادامهٔ روند خوردگی قرار دارند. از سوی دیگر دو برآیند و احتمال حاصل در محوطهٔ سنگتراشان نشان-دهندهٔ این مطلب است که شرایط محیط دفن برای اشیای برنزی شرایطی بدون خطر و کم‌خطر است و بین صفر تا ۰/۰۰۲ در نوسان است. در حقیقت اهمیت بحران در خاک محوطهٔ هفت‌تپه چندین برابر محوطهٔ سنگتراشان است.

جدول ۲. مقادیر استفاده‌شده و مقدار اندازه‌گیری‌شدهٔ اهمیت بحران محیط دفن اشیای برنزی در دو محوطهٔ هفت‌تپه و سنگتراشان.

محوطه	PI_S	E	FS	LV	MR
هفت‌تپه	۰/۴	۰/۴	۱	۰/۷۵	۰/۳۰
	۰/۶	۰/۶	۱	۰/۷۵	۰/۴۵
	۰/۸	۰/۸	۱	۰/۷۵	۰/۶
سنگتراشان	۰	۰	۱	۰/۰۱	۰
	۰/۲	۰/۲	۱	۰/۰۱	۰/۰۰۲



تصویر ۳. نمودار ستونی بیانگر اهمیت خطر اندازه‌گیری‌شده در دو مجموعهٔ برنزی هفت‌تپه و سنگتراشان در محیط خاک.

ارزیابی بحران در محیط نگهداری

ارزیابی بحران در مجموعه‌های موزه‌ای نیازمند اطلاعات ترکیبی از پایداری و دوام مواد باستانی و واکنش آنها به محیط اطراف و عوامل آسیب‌رسان موجود در آن است (Knight, 2002: 45). محیط موزه نیز به‌عنوان محیطی متفاوت پس از انجام حفاری امکان ایجاد خطر و اثرگذاری نامناسب بر اشیای قرارگرفته در خود را دارد. وجود ترکیبات کلریدی در محصولات خوردگی بیانگر وقوع بیماری برنز است که می‌تواند خود منبعی برای یون کلریدی باشد که با فلز واکنش می‌دهد. حضور یون کلرید در اشیاء دارای باقیمانده فلزی آنهم در مجاورت بخش فلزی بیانگر تشکیل نانتوکیت است که در حضور رطوبت و هوا به ترکیبات تری‌هیدروکسی کلرید مس تبدیل شده و روند بیماری برنز ادامه می یابد. البته باید خاطر نشان نمود که ادامه روند خوردگی فعال نیازمند حضور رطوبت است که خود به‌عنوان عامل اصلی مخاطره آمیز مورد توجه قرار می‌گیرد.

با توجه به عوامل اصلی مخاطره آمیز در خوردگی اشیا برنزی به‌دست‌آمده از حفاری، یک روش آنالیز بحران بر اساس وضعیت خوردگی اشیا برنزی و میزان رطوبت موجود در محیط موزه برقرار شده است. بر اساس این روش دو عامل خوردگی اشیا بر اساس به دست آمدن از محیط‌های حاوی یون کلرید و محیط‌های بدون یون کلرید و نیز وقوع یا عدم وقوع بیماری برنز در اشیا و نیز رطوبت نسبی بحرانی برای اشیا برنزی مورد توجه قرار گرفته‌اند.

وضعیت اشیاء موجود در محیط موزه را می‌توان به پنج گروه زیر تقسیم‌بندی کرد:

- اشیایی که از محیط (خاکِ) بدونِ کلرید به دست آمده‌اند و هیچ نشانی از بیماری برنز در آنها وجود ندارد (گروه A)؛
- اشیایی که از محیط (خاکِ) حاویِ کلرید کم به دست آمده‌اند و هیچ نشانی از بیماری برنز در آنها دیده نمی‌شود (گروه B)؛

- اشیایی که از محوطهٔ حاوی کلریدی به دست آمده‌اند که در بعضی از نمونه‌های کشف‌شده از آن بیماری برنز دیده شده است اما خود آنها نشانهٔ مشخصی از بیماری برنز در خود ندارند (گروه C)؛
- اشیایی که از محیط حاوی کلرید به دست آمده‌اند و نشانه‌هایی از خوردگی فعال در آنها مشاهده می‌شود (گروه D)؛
- اشیایی که از محیط حاوی کلرید زیاد به دست آمده‌اند و آشکارا خوردگی فعال (بیماری برنز) در آنها مشاهده می‌شود (گروه E).

این تقسیم‌بندی کلی است و می‌تواند بیانگر وضعیت‌های متفاوت اشیای برنزی حفاری شده از محیط‌های مختلف بر حسب حضور یون کلرید و وقوع بیماری برنز باشد. البته ممکن است شرایط تاحدی پیچیده‌تر شود اما در مجموع می‌توان این پنج احتمال را در خوردگی اشیای برنزی مرتبط با حضور یا عدم حضور یون کلرید در محیط مدنظر قرار داد.

پارامتر مهم در ارزیابی بحران در مجموعه‌های برنزی به‌دست‌آمده از حفاری، رطوبت نسبی است. رطوبت نسبی یکی از عوامل بسیار مهم در ادامهٔ روند خوردگی در اشیای فلزی در محیط موزه است (Podany, 2006). مشکل اصلی در نگهداری و حفاظت پیشگیرانه در اشیای برنزی، سطح و تغییرات رطوبت نسبی در محیط است. همان‌طور که پیش از این ذکر شد، بیماری برنز حاصل واکنش ترکیبات کلرید مس I با اکسیژن و رطوبت است که موجب تشکیل ترکیبات سبزرنگ بر سطح اشیای مسی و برنزی می‌شود. در واقع عدم حضور رطوبت بحرانی در محیط می‌تواند موجب جلوگیری از ادامهٔ واکنش شود. در مورد رطوبت نسبی بحرانی برای بیماری برنز مقادیر نسبتاً متفاوتی ذکر شده است. در برخی از منابع بیان شده است که رطوبت نسبی کم‌تر از ۳۹٪ باعث پایداری کامل نانتوکیت می‌شود. در عین حال مقدارRHبحرانی برای نانتوکیت در هوا و در کنار فلز بالاتر از ۴۶٪ است ودر رطوبت نسبی بین ۴۲ تا ۴۶٪ هیچ تغییر قابل مشاهده‌ای در نانتوکیت رخ نمی‌دهد. در این صورت رطوبت نسبی مناسب جهت انبار یا نمایش اشیای مبتلا به بیماری برنز را می‌توان بین ۴۲ تا ۴۶٪در نظر گرفت. رطوبت نسبی بحرانی برای بیماری برنز بیش از ۵۵٪ تخمین زده شده است (Scott, 1990; Selwyn, 2007). در برخی منابع نیز رطوبت نسبی بیش از ۴۰% به‌عنوان رطوبت نسبی بحرانی ارائه شده است و رطوبت نسبی کم‌تر از آن را به‌عنوان حد مناسب جهت نگهداری اشیای دچار بیماری برنز معرفی کرده‌اند (Turgoose et al, 1992; Podany, 2006). نکتهٔ جالب توجه این است که در یکی از مطالعات تازه روی تغییر CuCl به تری‌هیدروکسی کلریدهای مس در محیط آزمایشگاه، مشخص شده است که نمونه‌ها در رطوبت نسبی ۶۳٪ تغییر یافته‌اند و واکنش مرتبط با بیماری برنز رخ داده است. در حقیقت، نتایج بیانگر این مطلب است که رطوبت نسبی ۶۰٪ و کم‌تر از آن نیز می‌تواند به‌عنوان رطوبت نسبی مناسب جهت نگهداری اشیامبتلا به خوردگی فعال مورد توجه قرار گیرد (Papapelekanos, 2010).

رسیدن به رطوبت نسبی زیر ۳۹٪ مطلوب است اما در بیش‌تر موزه‌ها و انبارها امکانات کافی جهت دسترسی به این سطحاز رطوبت وجود ندارد. در عین حال نباید اجازه داده شود تا رطوبت از ۵۵٪ بالاتر رود چون واکنش‌های مرتبط با نانتوکیت بسیار سریع شده و با کم شدن رطوبت نسبی مجدداً متوقف نخواهد شد (Scott, 1990). در عین حال زمانی که رطوبت نسبی به۷۰٪ می‌رسد سرعت واکنش بسیار بالا می‌رود تا حدی که در طول یک روز این واکنش رخ می‌دهد (Scott, 1990; Papapelekanos, 2010).

با توجه به محدوده‌های رطوبت نسبی و حدود بحرانی گزارش‌شده در مطالعات، به نظر می‌رسد که می‌توان سه محدودهٔ مشخص رطوبت نسبی را برای اشیای برنزی آلوده به کلرید و دارای خوردگی فعال مشخص کرد:

- محدودهٔ RH کم‌تر از ۴۰٪ که هیچ اثری بر واکنش بیماری برنز ندارد؛
- محدودهٔ RH بین ۴۰ تا ۵۵٪ که در منابع مختلف حد بحرانی رطوبت نسبی در این محدوده تعریف شده است؛
- محدودهٔ RH بیش از ۵۵ درصد که بالاتر از محدودهٔ بحرانی است و به‌شدت بر روی اشیای مبتلا به بیماری برنز اثر می‌گذارد.

جدول ۳ برآیند محتمل موزه[۱۸] (PI_M) و اثر رطوبت نسبی بر خوردگی پس از حفاری و در محیط موزه روی گروه‌های مختلف مشخص‌شده از حیث وقوع یا عدم وقوع خوردگی فعال در اشیای برنزی باستانی را به نمایش می‌گذارد. طبق روابط جدول ۳، شش برآیند محتمل موزه در مورد اشیای مختلف با شرایط متفاوت می‌تواند وجود داشته باشد که عبارت اند از: شرایط بدون خطر یا عدم وقوع خوردگی فعال در محیط موزه، شرایط خطر بسیارجزیی یا احتمال بسیار کم وقوع خوردگی، خطر جزیی، کم‌خطر یا احتمال وقوع خوردگی فعال بسته به وجود یون کلرید یا تغییرات رطوبت نسبی، شرایط خطر قابل‌توجه که بیانگر احتمال بسیار زیاد وقوع بیماری برنز است، و در نهایت پرخطر که نشان‌دهندهٔ وقوع حتمی بیماری برنز به شکلی شدید است.

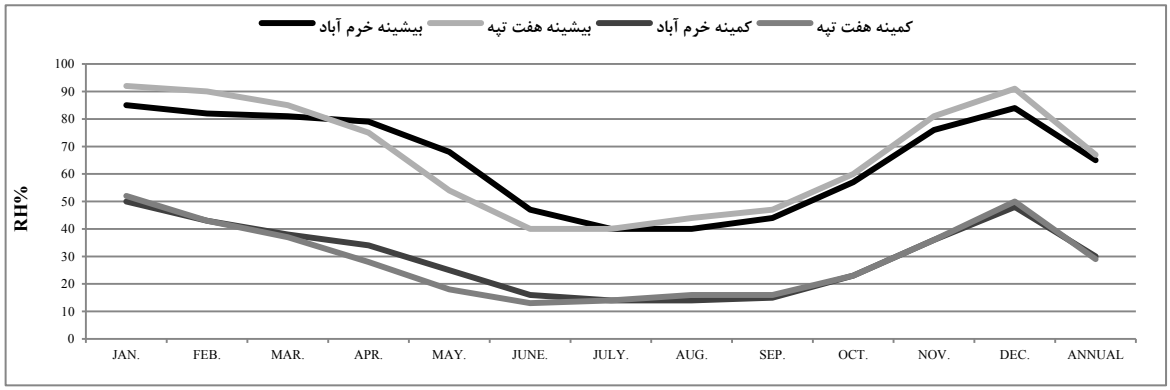
هیچ یک از دو موزهٔ هفت‌تپه و فلک‌الافلاک خرم‌آباد دارای سیستم کنترل رطوبت نسبی و حتی اندازه‌گیری و ثبت (پایش) سیستماتیک وضع موزه نیستند. به همین علت اطلاعات دقیقی در زمینهٔ وضعیت محیط موزه‌به‌خصوص رطوبت نسبی و تغییرات آن در محیط این دو موزه وجود ندارد. با این حال اندازه‌گیری‌های اولیه‌ای در موزهٔ هفت‌تپه انجام شده است که هرچند مداوم و برنامه‌ریزی‌شده نیست اما تاحدی نشان‌دهندهٔ وضع موزه از نظر میزان رطوبت نسبی و تغییرات فصلی آن است.

برخلاف موزهٔ هفت‌تپه، هیچ‌گونه اطلاعاتی از اندازه‌گیری‌های رطوبت نسبی در موزه و گنجینهٔ قلعهٔ فلک‌الافلاک وجود ندارد. با اینحالبر اساس وضع اقلیمی شهر خرم‌آباد (شکل ۴) می‌توان دریافت که در هشت فصل معتدل و سرد سال رطوبت نسبی در شهر خرم‌آباد به بیش از ۶۰ ٪ می‌رسد. با توجه به اینکه موزهٔ فلک‌الافلاک در یک بنای تاریخی با امکانات کم و بدون اتخاذ تدابیر دقیق جهت نگهداری اشیا قرار دارد، احتمالاً وضعیت رطوبت در فضای مخزن و فضای نمایش این موزه تا حد زیادی از وضعیت فضای باز تبعیت می‌کند.

جدول ۳. تعیین برآیندهای محتمل موزه (PI_M) در مجموعه‌های برنزی بر اساس درصد رطوبت نسبی و وضعیت مجموعه‌ها از نظر خوردگی فعال.

سطح ۳	>٪۵۵					
سطح ۲	٪۵۵-۴۰					
سطح ۱	<٪۴۰					
رطوبت نسبی / گروه اشیا	A	B	C	D	E	

پرخطر	خطر قابل توجه	کم‌خطر	خطر جزیی	خطر بسیار جزیی	بدون خطر
۱	۰/۸	۰/۶	۰/۴	۰/۲	۰



شکل ۴- منحنی تغییرات متوسط بیشینه و کمینه رطوبت نسبی در ناحیه هفت تپه و خرم‌آباد بر اساس داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک دزفول و خرم‌آباد.

بر اساس اندازه‌گیری‌های اولیه، رطوبت نسبی محیط نگهداری اشیای برنزی موزهٔ هفت‌تپه در زمستان حدود ۶۰٪ و در تابستان حدود ۴۰ تا ۴۵٪ است. در کنار آن رطوبت نسبی اقلیم ناحیهٔ هفت‌تپه نیز در زمستان بسیار بالاست و میانگین آن حدود ۹۰٪ اندازه‌گیری شده است. با توجه به شرایط اشیای موزهٔ هفت‌تپه می‌توان گفت که برآیند شاخص محیط موزه (PI_M) در زمان بالا بودن رطوبت نسبی (فصل زمستان) در محدودهٔ پرخطر با شدت (E) ۱ و در دورهٔ پایین بودن رطوبت نسبی در محدودهٔ خطر قابل توجه با شدت ۰/۸ است. از سوی دیگر کلیه اشیا در معرض این مخاطرات قرار دارند که طبق آن درصد فراگیر (FS) نیز برابر با ۱ است. با توجه به اینکه در صورت بالا رفتن رطوبت نسبی از محدودهٔ بحرانی ارزش‌های موجود در آثار برنزی به‌شدت تحت اثر قرار می‌گیرند، در مورد احتمال ۱، کاهش ارزش (LV) نیز ۰/۸ در نظر گرفته شده و برای احتمال ۰/۸، کاهش ارزش برابر با خود احتمال یعنی ۰/۶ در نظر گرفته شد.

مطالعات ارزیابی خاک در محوطهٔ سنگتراشان نشان‌دهندهٔ وجود مقدار بسیار کم یون کلرید در محیط خاک محوطه بود. از سوی دیگر مقدار بسیار کمی کلر در ساختار تعداد کمی از نمونه‌ها شناسایی شد. در عین حال هیچ نشانی از وقوع خوردگی فعال در نمونه‌های محوطهٔ سنگتراشان مشاهده نشد. بر این اساس مجموعه اشیای برنزی محوطهٔ سنگتراشان را می‌توان از برآیند شاخص در گروهB طبقه‌بندی کرد. با توجه به جدول ۲۴.۴ مجموعهٔ برنزهای سنگتراشان در محدودهٔRHکم‌تر از ۴۰٪ و ۴۰ تا ۵۵٪ در حالت برآیند شاخص بدون خطر (شدت=۰) قرار دارد و تنها در صورت بالا رفتن رطوبت نسبی و گذشتن از محدودهٔ رطوبت نسبی بحرانی، آنهم در صورت وجود یون کلرید در ساختار اشیا یا لایه‌های خاک سطحی روی آنها، امکان وقوع بیماری برنز در اشیا، با برآیند محتمل بسیار جزیی با احتمال ۰/۲ وجود دارد. با توجه به اینکه کلیهٔ اشیا تحت اثر شرایط مشابه قرار دارند، درصد فراگیر نیز ۱ محاسبه می‌شود. از سوی دیگر با توجه به میزان احتمال، کاهش ارزش نیز برای شدت صفر برابر با صفر و برای شدت ۰/۲ برابر با حداکثر ۰/۰۱ در نظر گرفته شد. مقادیر داده‌شده به پارامترهای مختلف ارزیابی بحران در دو مجموعهٔ برنزی هفت‌تپه و سنگتراشان بر اساس برآیندهای محتمل محیط موزه در دو موزهٔ محل نگهداری مجموعه‌ها و میزان اهمیت بحران حاصل از معادلهٔ ۳، در جدول ۴ ارائه شده است.

تصویر۵نمودار اهمیت بحران را در برآیندهای محتمل مورد نظر نمایش می‌دهد که نشان‌دهندهٔ تفاوت بسیار زیاد بین موزه مجموعهٔ اشیای برنزی هفت‌تپه و سنگتراشان است. نتایج نشان‌دهندهٔ اهمیت ریسک بسیار بالا در محیط موزهٔ هفت‌تپه است. در حقیقت در برآیند

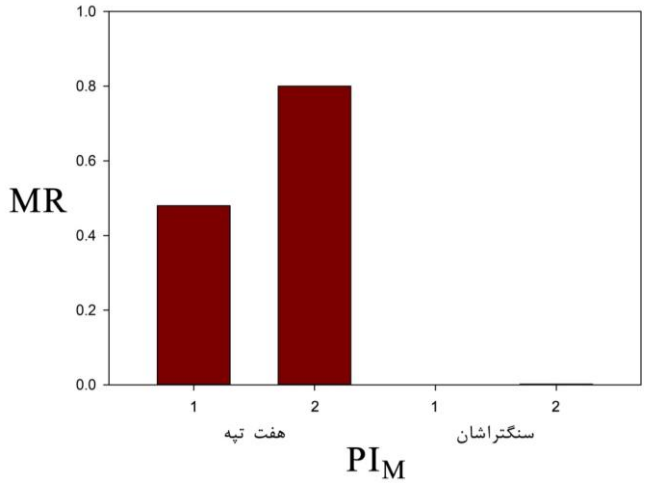
محتمل ۲ در موزهٔ هفت‌تپه (شرایط پرخطر) میزان ریسک به شدت بالا و برابر با ۰/۸ است. در برآیند محتمل ۱ نیز اهمیت ریسک بسیار قابل توجه است.

با توجه به اینکه تغییرات رطوبت نسبی در موزهٔ هفت‌تپه مداوم و سالانه رخ می‌دهد و اینکه در وضعفعلی موزه امکان پایش و نگهداری اشیا در شرایط ایده‌آل وجود ندارد، به نظر می‌رسد که ادامهٔ نگهداری اشیای برنزی در این حالت موجب ادامهٔ روند فرسایش و از بین رفتن ارزش‌های فنی ـ هنری موجود در این مجموعه اشیای برنزی خواهد شد.

بر اساس نمودارها به خوبی آشکار است که مجموعهٔ برنزهای باستانی محوطهٔ هفت‌تپه هم در محیط دفن و هم در محیط نگهداری پس از کاوش در شرایط نامناسبی قرار دارد و اهمیت خطر در همهٔ شرایط و برآیندهای محاسبه‌شده به‌خوبی آشکار است. برخلاف آن در مجموعهٔ برنزهای محوطهٔ سنگتراشان وضعیت از حیث خوردگی فعال مناسب است و اهمیت خطر اندازه‌گیری شده، مقداری بسیار جزیی و قابل چشم‌پوشی را هم در محیط دفن و هم در محیط نگهداری نمایش می‌دهد. نتایج نشان داد که علی‌رغم اینکه پارامترهای مختلفی در خوردگی طولانی‌مدت فلزات در محیط خاک و ادامهٔ روند تخریب پس از حفاری نقش دارند، اما پارامترهای اصلی شامل حضور یا عدم حضور مقدار قابل توجه یون کلرید محلول و مقدار رطوبت و آب موجود در خاک هستند. در حقیقت، نتایج نشان می‌دهد که حضور یون کلرید در محیط دفن و میزان آن می‌تواند به طرزی چشمگیر روی شرایط حفاظتی و ارزیابی بحران در مجموعه‌های برنزی اثرگذار باشد. ذکر این موضوع اهمیت دارد که حتی در محیط‌هایی که رطوبت و رطوبت نسبی در حد بحرانی قرار دارد، عدم حضور یون کلرید در محیط خاک و آلوده نبودن اشیا با یون کلرید و عدم وقوع بیماری برنز در آنها می‌تواند موجب عدم ایجاد خطر در مجموعه‌های برنزی شود.

جدول ۴. مقادیر استفاده‌شده و مقدار اندازه‌گیری‌شده اهمیت بحران محیط نگهداری اشیای برنزی در دو موزهٔ هفت‌تپه و فلک‌الافلاک.

موزه	PI_M	E	FS	LV	MR
هفت‌تپه	۰/۸ ۱	۰/۸ ۱	۱ ۱	۰/۶ ۰/۸	۰/۴۸ ۰/۸
فلک‌الافلاک	۰ ۰/۲	۰ ۰/۲	۱ ۱	۰ ۰/۰۱	۰ ۰/۰۰۲



تصویر۵. نمودار ستونی بیانگر اهمیت خطر اندازه‌گیری‌شده در دو مجموعهٔ برنزی هفت‌تپه و سنگتراشان در محیط نگهداری.

با توجه به نتایج حاصل از رهیافت فلز ـ محیط ـ خوردگی، یک مدل ارزیابی بحران بر اساس پارامترهای مخاطره‌آمیز در خوردگی مجموعه‌های برنزی در دو محیط پیش و پس از حفاری برقرار شد. امکان برقراری مدل ارزیابی بحران در مجموعه‌های برنزی باستانی با استفاده از نتایج رهیافت مطالعاتی فلز ـ محیط ـ خوردگی میسر شد. از سوی دیگر، عملیات حفاری و حفاظت پیشگیرانه در محوطه‌های باستانی حاوی اشیای برنزی معمولاً بدون توجه دقیق به ماهیت محیط پیش از حفاری انجام می‌شود که موجب می‌شود تا به‌سبب عدم شناسایی شرایط اشیا پیش از حفاری، اثر محیط پس از حفاری حتی در صورت اتخاذ روش‌های حفاظت پیشگیرانه موجب تغییر در اشیا و در نتیجهٔ آن تغییر در ارزش‌های موجود در آنها شود. به طورمعمول موزه‌های ایجادشده در بناهای تاریخی (مانند موزهٔ فلک‌الافلاک) و سایت موزه‌های محوطه‌های باستانی (مانند موزهٔ هفت‌تپه)، موزه‌هایی کوچک با امکانات محدود هستند و امکانات نگهداری و پایش محیطی محدودی دارند. شناخت محیط و شرایط حفاظتی اشیا بر اساس یک رهیافت یکپارچه می‌تواند به برقراری راهبرد بلندمدت حفاظت در این موزه‌ها منجر شود.

نتیجه‌گیری

این مطالعه بر کاربرد نتایج حاصل از شناخت مجموعه‌های برنزی باستانی در ارزیابی بحران و شرایط حفاظتیآنها تمرکز دارد. این مطالعه به ارزیابی بحران مجموعه‌ها پیش و پس از حفاری، اثر نتایج حاصل از مطالعات مختلف ازمایشگاهی و اقلیمی در شناخت و حفظ ارزش‌های موجود در مجموعه‌های برنزی، و روش‌های معمول حفاظت پیشگیرانه در مجموعه‌های برنزی (پیش، حین و پس از حفاری) پرداخته است.

کاربرد نتایج حاصل از مطالعهٔ مجموعه‌های برنزی و شرایط آنها از منظر خوردگی فعال در ارزیابی بحران این مجموعه‌ها، بیانگر اثرگذاری نتایج مطالعات خوردگی و محیط‌های قرارگیری آنها بر شناخت بهتر مجموعه‌ها در راستای حفاظت پیشگیرانه از آنهاست. ارزیابی بحران در مجموعه‌های برنزی باستانی شامل دو بخش بود: ارزیابی وضعیت اشیا در محیط دفن و ارزیابی شرایط پس از حفاری به منظور نگهداری و نمایش مجموعه. توجه به دو جنبهٔ متفاوت مجموعه‌های برنزی باستانی به سبب وضعیت دوگانهٔ آنها در حوزهٔ حفاظت باستان‌شناسی بود. به همین دلیل ارزیابی بحران نیز در این نوع از مجموعه‌ها به دو بخش ارزیابی بحران محیط خاک و ارزیابی بحران محیط نگهداری تقسیم شد. با توجه به نتایج رهیافت، عوامل اصلی مخاطره‌آمیز در محیط خاک شامل حضور و غلظت یون کلرید محلول و شرایط خاک از حیث میزان آب موجود در خاک شناسایی شدند. پس از آن، وضعیت اشیای برنزی و ارزیابی بحران در آنها پس از حفاری در محیط نگهداری (موزه یا مخزن) مطالعه شد. بر این اساس، دو عامل وجود خوردگی فعال (بیماری برنز) و رطوبت نسبی محیط نگهداری به عنوان عوامل اصلی مورد توجه قرار گرفتند. نتایج حاصل از ارزیابی بحران هم در شناخت بهتر شرایط حفاظتی مجموعه‌ها و هم در مدیریت بحران (مدیریت حفاظت) از مجموعه‌های برنزی مؤثر است.

سپاسگزاری

از آقایان و خانم‌ها: پروفسور پرویز دوامی (دانشگاه صنعتی شریف)، دکتر سیدمحمدامین امامی، دکتر حسین احمدی، مهندس عاطفه شکفته و مهندس مهری قبادی (دانشگاه هنر اصفهان)، عطا حسن‌پور و دکتر مهرداد ملک‌زاده (هیئت باستان‌شناسی سنگتراشان)، دکتر بهزاد مفیدی نصرآبادی (هیئت باستان‌شناسی هفت‌تپه)، و مظفر فرهادپور (پایگاه پژوهشی چغازنبیل و هفت‌تپه)، برای در دسترس گذاشتن اطلاعات محوطه‌ها و مجموعه‌ها، انجام آزمایش‌ها و دیگر کمک‌های بی‌دریغ‌شان سپاسگزارام.

پی‌نوشت‌ها

1. Risk Assessment
2. Risk Management
3. Risk
4. Rare
5. Catastrophic
6. Sporadic
7. Severe
8. Constant
9. Gradual
10. Magnitude of Risk
11. Probability
12. Fraction Susceptible
13. Loss of Value
14. Extent
15. Kabnak
16. Mohr Method
17. Probability Indexof Soil
18. Probability Index of Museum

منابع

عودباشی، امید. (۱۳۹۲). *تحلیل ریخت‌شناسی خوردگی و شرایط حفاظتی در مجموعه‌های برنزی به‌دست‌آمده از حفاری با تمرکز بر سیستم فلز ـ محیط ـ خوردگی*. پایان‌نامه دکتری مرمت اشیای تاریخی و فرهنگی. استاد راهنما: سید محمدامین امامی، پرویز دوامی، استاد مشاور: حسین احمدی. اصفهان: دانشگاه هنر اصفهان، دانشکدهٔ مرمت (منتشرنشده).

ملکزاده، مهرداد. (۱۳۹۱). *نگاره‌شناسی و نشانه‌شناسی مفرغ‌های لرستانی بر پایهٔ یافته‌های کاوش باستان‌شناختی سنگ‌تراشان خرم‌آباد*. پایان‌نامه دکتری باستان شناسی. استاد راهنما: حمید خطیب شهیدی، استادان مشاور: علیرضا هژبری نوبری، مهدی موسوی کوهپر. دانشگاه تربیت مدرس، دانشکدهٔ علوم انسانی (منتشرنشده).

نگهبان، عزت‌الله. (۱۳۷۲). *حفاری هفت‌تپه دشت خوزستان*. تهران: سازمان میراث فرهنگی کشور.

Ashley-Smith, J. (1999). *Risk Assessment for Objects Conservation*. Oxford: Butterworth-Heinemann.

ASTM Standard D1411-09. (2009). *Standard Test Methods for Water-Soluble Chlorides Present as Admixtures in Graded Aggregate Road Mixes*. ASTM International. West Conshohocken, PA, DOI: 10.1520/D1411-09,www.astm.org.

Bertholon, R. (2007). "Archaeological Metal Artefacts and Conservation Issues: Long-term Corrosion Studies".In *Corrosion of Metallic Heritage Artefacts: Investigation, Conservation and Prediction for Long-Term Behaviour*. ed. P. Dillmann, G. Béranger, P. Piccardo and H. Matthiesen. Pp.31-40. European Federation of Corrosion Publication 48, Cambridge: Woodhead Publishing.

Brokerhof, A. W& T. Luger& B. Ankersmit& F. Bergevoet& R. Schillemans& P. Schoutens& T. Muller& J. Keirs& G. Muething& R. Waller. (2005). "Risk Assessment of Museum Amstelkring: Application to an Historic Building and its Collection and the Consequences for Preservation Management". In *Preprint of 14th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*. Hague 12-16 Sep. 2005, Vol. II, pp.590-596. London: James & James.

De Guichen, G. (1995). "Object Interred, Object Disinterred". In *Conservation on Archaeological Excavations, with Particular Reference to the Mediteranian Area*. ed. N. P. S. Price. Pp.21-28. Rome: ICCROM.

Jones, L., and M. Bell. (2012). In Situ Preservation of Wetland Heritage: Hydrological and Chemical Change in the Buried Environment of the Somerset Levels, UK. *Conservation and Management of Archaeological Sites* 14 (1-4), pp.115-125.

Knight, B. (2002). "Predicting the Unpredictable: How Does the Museum Environment Fluctuate?". In *Preprints of 13th Triennial Meeting of ICOM-CC*. Rio de Janeiro. 22-27 Sept. 2002. Pp.45-50. London: James & James.

Michalski. S. (1990). "An overall framework for preventive conservation and remedial conservation". In *ICOM Committee for Conservation 9th Triennial Meeting*. 26-31 Aug. 1990. Dresden. Ed. K. Grimstad. pp.589-591. London: James & James.

Miller, J. J., and D. Curtin. (2008). "Electrical Conductivity and Soluble Ions". In *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Ed. M. R. Carter and E. G. Gregorich. 2nd Edition. Taylor & Francis.

Mofidi Nasrabadi, B. (2003-2004). "Archäologische Untersuchungen in Haft Tappeh, Iran". In*Archäologische Mitteilungen aus Iran und Turan*, no.35/36, pp.225-239.

Mofidi Nasrabadi, B. (2004). "Elam: Archaeology and history". In *Persiens Antike Pracht, Bergbau Handwerk Archäologie, exhibition catalogue*. ed. T. Stöllner, R. Slotta and A. Vatandoust. Pp.294-309. Bochum: Deutsches Bergbau-Museum.

Mofidi Nasrabadi, B. (2010). *Vorbericht der archäologischen Ausgrabungen der Kampagnen 2005-2007 in Haft Tappeh (Iran)*. Münster.

Mofidi Nasrabadi, B. (2013). "Some Chronological Aspects of the Building Structures at Haft Tappeh". In *Susa and Elam, Archaeological, Philological, Historical and Geographical Perspectives, Proceedings of the International Congress*. 14-17, Dec. 2009. Ghent. ed. K. De Graef and J. Tavernier. Pp.161-172. Leiden/Boston: Brill.

Muething, G., R. Waller, and F. Graham. (2005). "Risk Assessment of Collections in Exhibitions

Corrosion". In *CCI Notes* 9/1, (Original Text by Logan, J., 1986). www.cci-icc.gc.ca/publications/notes/9-1_e.pdf,(Accessed: March 25 2011).

Taylor, J. (2005). "An Integrated Approach to Risk Assessments and Condition Surveys". In*JAIC,*no.44 (2),pp.127-141.

Turgoose, S& S. J. Duncan. (1992). "Techniques for Metal Sculpture Corrosion Inhibition". In *Dialogue/89: The Conservation of Bronze Sculpture in the Outdoor Environment*. ed. T. Drayman-Weisser. Pp.275-287. Texas: National Association of Corrosion Engineers.

Van Os, B& J. W. De Kort& H. Huisman. (2012). "A Qualitative Approach for Assessment of the Burial Environment by Interpreting Soil Characteristics; A Necessity for Archaeological Monitoring". In*Conservation and Management of Archaeological Sites,*no.14 (1-4), pp.333-340.

Waller, R. (1994). "Conservation risk assessment: A strategy for managing resources for preventive conservation". In *Preventive Conservation: Practice, Theory and Research, Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress*. 12-16 Sept. 1994. ed. A. Roy and P. Smith.pp.12-16. London: IIC. http://www.museum-sos.org/docs/WallerOttawa1994.pdf.

Waller, R. (1995). "Risk Management Applied to Preventive Conservation". In *Storage of Natural History Collections: A Preventive Conservation Approach*. Iowa City, Society for the Preservation of Natural History Collections,pp.21-27.

Waller, R. (1999). "Internal Pollutants, Risk Assessment and Conservation Priorities". In*Preprints of the 12th Triennial Meeting of ICOM-CC, Vol. I.* Lyon. ICOM Committee for Conservation. Pp.113-118. London: James & James.

Waller, R. (2002). "A Risk Model for Collection preservation". In*Preprints of the 13th Triennial Meeting of ICOM-CC, Vol. I.* Rio De Janeiro. ICOM Committee for Conservation.pp.102-107. London: James & James.

Waller, R. (2003). *Cultural property risk analysis model: Development and application to preventive conservation at the Canadian Museum of Nature*. PhD diss., University of Göteborg.

Wirilander, H. (2012). "Preventive Conservation: A Key Method to Ensure Cultural Heritage Authenticity and Integrity in the Preservation Process". In*E-Conservation Magazine,* no.24,pp.164-176.

in the Canadian Museum of Nature". In*JAIC,* no.44 (3), pp.233 -243.

Negahnban, E. O. (1991). *Excavations at Haft Teppe, Iran*. University Museums Monograph 70. University of Pennsylvania Museum Publications: Philadelphia.

Negahban, E. O. (1979). "Architecture of Haft Tepe". In Akten des VII Internationalen Kongresses für Iranische Kunst und Archäologie, München, 7-10 September 1976, *Archaeologische Mitteilungen aus Iran*, no.6, pp.9-29.

Oudbashi, O& A. Hasanpour & P. Davami. (2016). "Investigation on corrosion stratigraphy andmorphology in some Iron Age bronze alloys vessels by OM, XRD and SEM–EDS methods".*Applied Physics A*,no.122, p.262.

Oudbashi, O. (2015). Multianalytical study of corrosion layers insome archaeological copper alloy artefacts". In Surface and Interface Analysis,no.47, pp.1133-1147.

Oudbashi, O& S. M. Emami& M. Malekzadeh& A. Hassanpour& P. Davami. (2013). "Archaeometallurgical Studies on the Bronze Vessels from "Sangtarashan", Luristan, W-Iran". In*Iranica Antiqua*XLVIII, pp.147-174.

Overlaet, B. (2011). "Čāle Ǧār (Kāšān area) and votives, favissae and cave deposits in pre-Islamic and Islamic traditions". In*Archaeologische Mitteillungen aus Iran und Turan,* no.43, pp.113-140.

Overlaet, B. (2003). *The Early Iron Age in Pusht-i Kuh, Luristan, (Luristan Excavation Documents, Vol. IV).* Acta Iranica 40. Vol. XXVI. Leuven: Peeters Publishers.

Pansu, M& J. Gautheyrou. (2006). *Handbook of Soil Analysis: Mineralogical, Organic and Inorganic Methods*. Berlin: Springer.

Papapelekanos, A. (2010). "The Critical RH for the Appearance of "Bronze Disease" in Chloride Contaminated Copper and Copper Alloy Artefacts". In*E-Conservation Magazine*, no.13, pp.43-52.

Podany, J. (2006). "Corrosion of Metal Artifacts and Works of Art in Museum and Collection Environment". In *ASM Handbook Volume 13C, Corrosion: Environments and Industries*. ASM International,pp.279-288.

Potts, D. T. (1999). *The Archaeology of Elam: Formation and Transformation of an Ancient Iranian State*. Cambridge: Cambridge University Press.

Scott, D. A. (1990). "Bronze disease: A review of some chemical problems and the role of relative humidity". In*JAIC,* no. 29,pp.193-206.

Selwyn, L. S. (2007). "Recognizing Active