فصلنامه‌ی علمی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۱۰، شماره‌ی ۳، پاییز ۱۴۰۰

بررسی نقش تخلخل در ساختار سرامیک‌های تاریخی

نوع مقاله: علمی پژوهشی

سمیه نوغانی

استادیار گروه مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر، تهران، ایران

*s.noghani@art.ac.ir & somayeh.noghani@yahoo.com

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۳۰ مهر ۱۳۹۹

پذیرش: ۰۵ اردیبهشت ۱۴۰۰

صفحه ۷۶ تا صفحه ۹۰

در دسترس در نشانی:

www.ijcse.ir

زبان نشریه: فارسی

شاپا چاپی: ۲۳۵۲-۲۳۲۲

شاپا الکترونیکی:

۲۷۸۳-۳۰۰۳

چکیده:

شناخت ساختار مواد تاریخی، به ویژه ترکیبات بر پایه رس، علاوه بر جنبه‌های فنی و باستان‌شناختی، از منظر بررسی فرایندهای آسیب‌رسان نیز قابل توجه است. یکی از عوامل ساختاری حائزاهمیت در موادی مانند سرامیک‌ها اعم از سفال، آجر، و بدنه کاشی، پدیده تخلخل است که مجموعه‌ای از حفرات و فضاهای خالی را شامل می‌شود و برحسب ارتباط با محیط پیرامونی خود، به صورت باز یا بسته طبقه‌بندی شده و براساس زمان شکل‌گیری، به دو صورت اولیه و یا ثانویه تشکیل می‌شوند. مهم‌ترین نقش تخلخل‌های باز، عملکرد آن‌ها به عنوان کانال‌های انتقال رطوبت و یا هرگونه محلولی است که می‌توانند عامل شروع و یا ادامه یافتن بسیاری از واکنش‌های شیمیایی باشند. وجود رطوبت پدیده‌های انتقال یون‌ها، انحلال، هیدراسیون و تبلور نمک‌های محلول را به همراه خواهد داشت. در این مقاله با رویکرد تحلیلی و براساس نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی با روش‌های تخلخل‌سنجی جیوه (MIP) و تخلخل‌سنجی به شیوه غوطه‌وری (براساس استاندارد ASTM C20-92)، مهم‌ترین پیامدهای ناشی از وجود تخلخل در بافت یک قطعه سرامیکی ارزیابی شده است. این پیامدها عبارت‌اند از: الف) رابطه دمای پخت، درصد تخلخل، حجم و شعاع حفرات، ب) ارتباط اندازه تخلخل با فرایندهای انتقال رطوبت درون ساختار، و ج) رابطه تخلخل و شعاع حفرات با فشار تبلور نمک‌ها. نتایج بررسی‌هایی از این دست در آسیب‌شناسی و فرایند مرمت اشیاء تاریخی حائز اهمیت است. ایجاد شوک رطوبت بلافاصله پس از حفاری ناشی از شستشوی قطعه به منظور تمیزکاری، نمک‌زدایی و ... بدون توجه به شرایط اثر از منظر نوع حفرات موجود، ماهیت و میزان تخلخل، علاوه بر افزایش تراوایی و امکان نفوذ رطوبت و به دنبال آن ایجاد تنش‌های فشاری ناشی از تبلور مجدد نمک‌ها، می‌تواند به حبس رطوبت و فراهم آمدن فضایی برای واکنش‌های آتی از بستری پایا (ایستا) به روندی پویا (دینامیک) منجر شود.

کلیدواژه:

سرامیک‌های باستانی، ساختارشناسی، فرسایش داخلی، تخلخل، انتقال جرم

کد DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.2.5

۱- مقدمه

از جمله ویژگی‌های ساختاری حائز اهمیت در مواد متخلخل که بر خواص مکانیکی آن‌ها تاثیرگذار خواهد بود، پارامترهای تراوایی (Permeability) و تخلخل (Porosity) است. تراوایی یا نفوذپذیری، توانایی ماده در فراهم آوردن فضایی جهت جریان سیال در یک ماده متخلخل است و تخلخل به عنوان فضای خالی یا حجم خالی میان اجزاء تشکیل‌دهنده ماده

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.2.5]

تعریف می‌شود [۱]. روش‌هایی که برای اندازه‌گیری تخلخل در ساختار مواد به کار می‌رود عبارت‌اند از: روش غوطه‌وری، روش تخلخل‌سنجی جیوه، تخلخل‌سنجی هلیم و آنالیز تصویر [۲].

از منظر مواد معدنی تاریخی- فرهنگی، تخلخل در حوزه خاک، سنگ، سرامیک‌های رسی (آجر، سفال، کاشی)، و ملات‌ها اهمیت دارد. در سرامیک‌ها تخلخل به دو صورت اولیه (ناشی از فرآوری مواد اولیه و مرحله‌ی پخت در سرامیک های رسی) و ثانویه (در اثر گذشت زمان در محیط دفن و انحلال مواد) ایجاد می‌شود.

بنابراین عوامل موثر بر شکل‌گیری تخلخل در بافت یک ماده متخلخل تاریخی مانند سرامیک‌های رسی را می‌توان ناشی از عواملی چون ۱- نوع مواد اولیه و درصد مواد تجزیه‌پذیر طی فرایند پخت، ۲- نحوه فرآوری مواد اولیه و باقی‌ماندن مقداری حباب هوا در بافت ناشی از نحوه ورز دادن گِل، ۳- فرایند پخت (دمای پخت، اتمسفر کوره و ...)، ۴- شرایط زمان کاربری و ۵- شرایط محیط دفن (مانند حضور رطوبت، اسیدیته محیط، انحلال فازها و ...)، دانست [۳]. در سرامیک های رسی، الگوی معینی از شکل، اندازه، حجم و نحوه ارتباط حفرات وجود ندارد. اندازه دانه‌ها (فازهای بلورین) و نحوه پراکندگی اندازه دانه‌ها، چینش یا چیدمان دانه‌ها (نحوه قرارگیری آن‌ها نسبت به یکدیگر)، و میزان به هم پیوستگی این دانه‌ها (Cementation) در بافت، بر درصد تخلخل موثراند. همچنین مستقل از نحوه و زمان تشکیل، این حفرات از لحاظ حجمی می‌توانند بزرگ، متوسط و یا ریز و بسیار ریز (لوله‌های مویین) باشند.

علاوه براین، از لحاظ ارتباط این حفرات با یکدیگر و با سطح شیء، شبکه‌ی تخلخل در یک ماده متخلخل به حفرات باز (تخلخل موثر)، بسته (تخلخل غیرموثر) و کور تفکیک می‌شود (شکل ۱). نکته حائز اهمیت آن است که حفرات باز در انتقال رطوبت به درون شیء و خروج از آن نقش اساسی ایفا می‌کنند.

بنابراین تخلخل در یک شیء تاریخی از چند منظر قابل توجه و بررسی است: مورفولوژی تخلخل (شکل و اندازه حفرات)؛ باز یا بسته بودن حفرات؛ درصد تخلخل؛ نحوه توزیع و انتشار خلل و فرج در شیء.

هدف از این پژوهش بررسی اثرات دمای پخت بر اندازه حفرات و درصد تخلخل، ویژگی‌های تخلخل و تاثیرات ناشی از وجود شبکه خلل و فرج در مواد متخلخل تاریخی است، با تاکید بر این نکته که پیامدهای ناشی از عدم توجه به وجود تخلخل در یک شیء چه خواهد بود؟

۲- فعالیت‌های تجربی

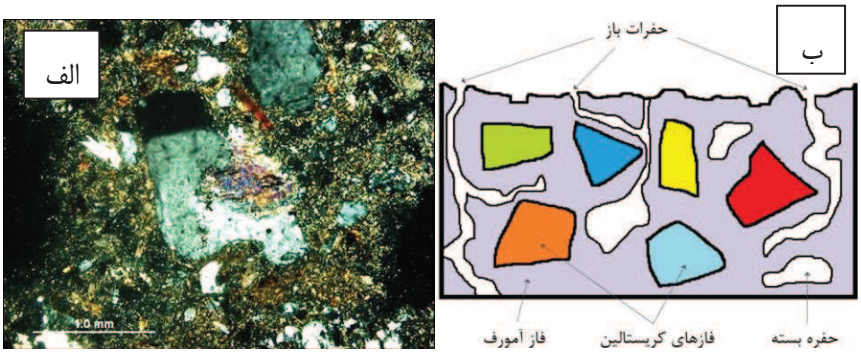
در این مقاله، عامل تخلخل در سرامیک‌های رسی، با روش تجربی و رویکرد توصیفی- تحلیلی و بر اساس نتایج آزمایشگاهی، بررسی شده است.

جهت انجام این پژوهش، تعدادی قطعه سرامیکی رسی در ابعاد و شرایط تولید مشابه، آماده‌سازی شد (جدول ۱). میانگین نتیجه آنالیز شیمیایی نمونه‌ها با استفاده از آنالیز فلورسانس پرتو ایکس (XRF) (Analyzer, Bruker, S4PIONEER, Germany، شرکت کانساران بینالود) برای عناصر اصلی و فرعی ترکیب عبارت اند از: SiO_2:۵۲/۲۰%، Al_2O_3:۱۴/۳۸%، Fe_2O_3: ۵/۶۲%، CaO: ۱۸/۵۳%، Na_2O: ۰/۸۵%، K_2O: ۲/۲۴%، MgO: ۳/۱۴%، TiO_2: ۰/۶۲%.

مواد اولیه تهیه نمونه‌ها یکسان بوده و پخت نمونه‌ها در محیط

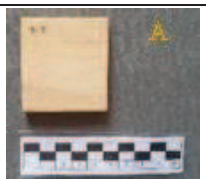
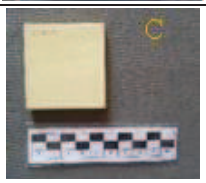
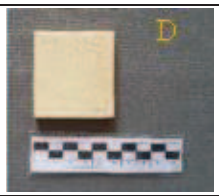
[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.2.5]



شکل ۱- (الف) بافت زمینه، حفرات (قسمت‌های سیاه رنگ) و فازهای بلورین در تصویر مقطع نازک نمونه سفال تاریخی (میکروسکوپ پلاریزان، آنالیزاتور + پلاریزاتور). (ب) طرح ترسیمی از تخلخل باز و بسته و همچنین فاز آمورف (بافت زمینه) و فاز کریستالین (دانه‌ها) در بافت یک ماده متخلخل مانند سرامیک رسی از منظر میکروسکوپی.

جدول ۱- معرفی نمونه‌های آزمایشگاهی مورد مطالعه در این پژوهش

Color Code [4]	Firing temperature (°C)	Samples size (cm)	Samples	Samples group
5YR 6/6 Redish yellow	850	5 x 5 x 1		A
5YR 7/6 Redish yellow	900	5 x 5 x 1		B
7.5YR 7/4 Pink	950	5 x 5 x 1		C
7.5YR 7/3 Pinkish white	1000	5 x 5 x 1		D
2.5Y 7/4 Pale yellow	1050	5 x 5 x 1		E

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.2.5]

اکسیداسیون و در کوره سرامیکی (کوره الکتریکی محصول شرکت متالورژ اصفهان، دانشکده هنرهای تجسمی دانشگاه هنر اصفهان) انجام گرفت. شرایط پخت نیز در همه گروه‌ها یکسان، و تفاوت تنها در درجه حرارت پخت بوده است.

زمان رسیدن به حداکثر درجه حرارت، ۳ ساعت، سرعت افزایش درجه حرارت، ۵ درجه در هر دقیقه و زمان ماندگاری نمونه‌ها در کوره در مجموع زمان پخت و سرد شدن تدریجی، ۲۴ ساعت بوده است (لازم به ذکر است درجه حرارت پخت نمونه‌ها براساس عمده محدوده‌ی دمای پخت سرامیک‌های تاریخی بین ۸۵۰ تا ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب و در پنج گروه طبقه‌بندی و نام‌گذاری شدند).

تخلخل‌سنجی نمونه‌های منتخب با دو روش غوطه‌وری (استاندارد ASTM C20-92 [۵]، آزمایشگاه مرمت دانشگاه هنر اصفهان) و تخلخل‌سنجی جیوه (Micromeritics Autopore IV: Mercury Immersion Porosimetry، دانشکده شیمی مواد، دانشگاه زیگن، آلمان) انجام گرفت.

در نهایت از هر گروه دمایی، چهار نمونه به صورت تصادفی ساده برای انجام آزمایشات تخلخل‌سنجی انتخاب شد (دو نمونه برای تخلخل‌سنجی جیوه و دو نمونه برای تخلخل‌سنجی با روش غوطه‌وری) و میانگین نتایج مورد استفاده قرارگرفت.

علاوه بر تخلخل‌سنجی، درصد جذب املاح با در نظر گرفتن میزان انتقال یون کلسیم به عنوان شاخص، اندازه‌گیری شد. جهت انجام این آنالیز، اشباع‌سازی نمونه‌ها در شرایط مشابه و در محلول ۰/۰۱ مولار کلسیم کلرید (Art. 2385, Merck) انجام گرفت. میانگین کلسیم انتقال یافته از محلول به نمونه‌ها، از طریق طیف‌سنجی جذب اتمی (مدل دستگاه: PERKIN-ELMER 2380, USA، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان) برروی محلول‌های اشباع‌سازی محاسبه شد (اندازه‌گیری براساس استاندارد ASTM D511-([6]14).

تحلیل داده‌ها و ترسیم نمودارها با استفاده از نرم افزارهای اکسل، زیگماپلات و مینی‌تب (نسخه ۱۶,۱,۰) انجام شد. نتایج آنالیزهای تخلخل‌سنجی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- میانگین نتایج حاصل از تخلخل‌سنجی جیوه و روش غوطه‌وری در نمونه‌های مورد مطالعه

Results of MIP Porosimetry				Results of Immersing Method Porosimetry				
Average Pores Radius (μm)	Average Pores volume (ml/g)	Porosity (%) (volume percentage)	Density (g/cm^3)	Water Absorption (%)	Open Pores Volume (cm^3)	Apparent Porosity (%)	Density (g/cm^3)	Sample Group
0.262	0.2666	42.84	1.607	23.380	8.901	40.003	1.711	A
0.304	0.2687	42.91	1.597	22.601	8.525	38.276	1.694	B
0.339	0.2771	44.05	1.590	21.901	8.441	36.475	1.666	C
0.391	0.2735	43.54	1.592	23.119	8.737	39.083	1.690	D
1.349	0.2491	41.87	1.681	18.625	6.836	33.590	1.807	E

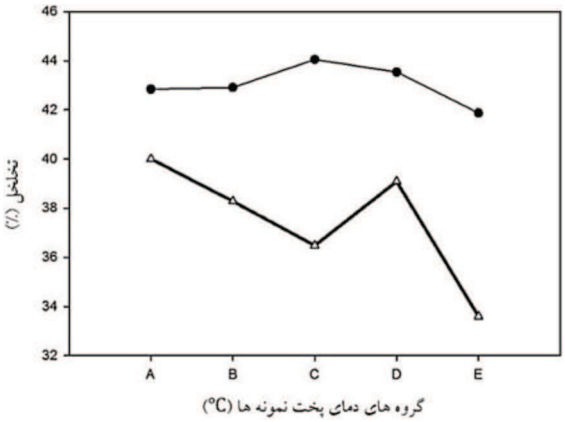
[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.2.5]

۳- رابطه حجم حفرات، تخلخل و چگالی با دمای پخت نمونه‌ها

با توجه به نوع و درجه حرارت پخت و همچنین ساختار سرامیک، رابطه درصد تخلخل و دمای پخت می‌تواند مستقیم یا متفاوت باشد. کاهش درصد تخلخل با افزایش دما به زینتر کامل و ایجاد فاز شیشه‌ای (آمورف) در درجه حرارت‌های بالا بستگی دارد [۷]. همچنین بخشی از تخلخل در سرامیک‌ها ناشی از خروج گاز در دمای پخت بالاست که می‌تواند به افزایش تخلخل بیانجامد [۸]. در اثر تنوع بسیار زیاد شرایط تولید، نگهداری و دفن نمونه‌های تاریخی است که الگوی مشابهی از شکل، اندازه و پراکندگی حفرات در این دسته از آثار را نمی‌توان ارائه داد.

در نمونه‌های مورد مطالعه، روند تغییرات درصد تخلخل با افزایش دما، در مجموع روند کاهشی را نشان می‌دهد (شکل ۲).



شکل ۲- نمودار تغییرات میانگین درصد تخلخل نمونه‌ها با دو روش اندازه‌گیری تخلخل‌سنجی جیوه (●) و تخلخل‌سنجی به روش غوطه‌وری (Δ). A: دمای ۸۵۰°C، B: دمای ۹۰۰°C، C: دمای ۹۵۰°C، D: دمای ۱۰۰۰°C، E: ۱۰۵۰°C.

به طور معمول، با افزایش دمای کوره، کانی‌های اولیه تشکیل دهنده بافت، تجزیه‌شده و در صورتی که شرایط مناسب فراهم باشد (عواملی مثل حداکثر دمای پخت و مدت زمان ماندگاری در حداکثر دمای پخت)، نرم شده، این فاز شبه مذاب به تدریج گسترش‌یافته و در بافت، ایجاد فاز آمورف (شیشه‌ای) را به دنبال خواهد داشت. طی این روند، ذرات (یا دانه‌ها)، به یکدیگر می‌پیوندند و نتیجه آن رشد (و بزرگ‌شدن) دانه‌ها و چگال‌شدن کل ماده است که البته این انتقال در زیر دمای ذوب اتفاق می‌افتد.

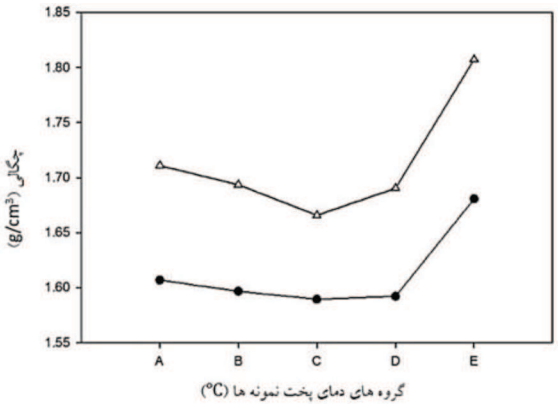
مراحل نهایی این فرایند با پیوستگی حفرات کوچک و بسته همراه خواهد بود، نیروهای انرژی سطحی درون هر حفره منجر به فشار منفی می‌شوند که تمایل به متراکم ساختن و چگال کردن (Densify) بدنه دارد [۹]. بنابراین با افزایش دمای پخت و درصورتی که بدنه وارد مرحله زینتر شده باشد (معمولا در دمای پخت ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و بالاتر)، چگالی افزایش یافته و افزایش چگالی به افزایش استحکام و مقاومت در برابر فرسایش‌های فیزیکی و شیمیایی می‌شود. اندازه چگالی نمونه‌های مورد مطالعه، در هر دو روش اندازه گیری، الگوی مشابهی را نمایش می‌دهد (شکل ۳).

در ابتدا و از دمای ۸۵۰ تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد، چگالی روند کاهشی داشته و از دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد این روند افزایشی شده و در ۱۰۵۰ درجه به بیش‌ترین مقدار می‌رسد. دمای ۹۵۰ درجه به عنوان نقطه مرکزی این تغییرات، قابل توجه است. معمولا تغییرات و تبادلات فازی با توجه به نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده مواد اولیه، در حدود ۹۰۰ – ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد. بسیاری از فازها تجزیه شده و در مقابل فازهای جدیدی شکل می‌گیرند. بنابراین می‌توان تغییرات چگالی را به تجزیه و تبادلات فازی در این محدوده

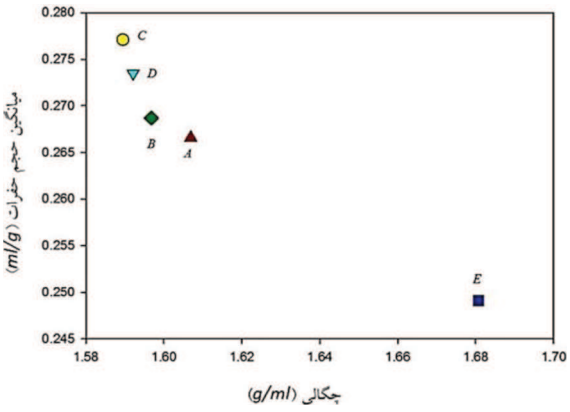
[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.2.5]

دمایی مرتبط دانست. پس از آن به تدریج با تشکیل فازهای درجه حرارت بالا و همچنین زینتر و تشکیل فاز شیشه‌ای، چگالی افزایش خواهد یافت. افزایش چگالی در پی افزایش فاز شیشه، تراکم بیش‌تر در ساختار و به دنبال آن استحکام بیش‌تر را به همراه خواهد داشت. تغییر حجم حفرات نسبت به دمای پخت و تغییرات چگالی در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۳- نمودار تغییرات میانگین چگالی نمونه‌ها در دو روش اندازه‌گیری تخلخل‌سنجی جیوه (●) و تخلخل‌سنجی به روش غوطه‌وری (Δ). A: دمای ۸۵۰°C، B: دمای ۹۰۰°C، C: دمای ۹۵۰°C، D: دمای ۱۰۰۰°C، E: ۱۰۵۰°C.



شکل ۴- نمودار تغییرات میانگین حجم حفرات نسبت به میانگین چگالی نمونه‌ها در نمونه‌های اندازه‌گیری شده به روش تخلخل سنجی جیوه.

در اینجا نیز نقطه تغییر در روند افزایش حجم حفرات، دمای ۹۵۰ درجه (گروه C) است و در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد و در واقع در بیش‌ترین چگالی، کم‌ترین میزان حجم حفرات مشاهده می‌شود. در نمونه‌های اندازه‌گیری شده با روش غوطه وری نیز کاهش قابل توجه میانگین حجم حفرات باز در نمونه های با دمای پخت ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد ($V= 6/836\ cm^3$) نسبت به نمونه‌های با دمای پخت ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد ($V= 8/901 cm^3$) است.

۴- تأثیر تخلخل در فرایند آسیب‌های درونی ساختار سفال

حضور تخلخل در ساختار یک ماده تاریخی را با توجه به جنبه های آسیب‌شناسانه، حداقل از سه منظر می‌توان مورد توجه قرار داد:

۱- رابطه تخلخل با انتقال رطوبت درون ساختار

۲- رابطه تخلخل و شعاع حفرات با فشار تبلور نمک‌ها

۳- پدیده حبس رطوبت در حفرات با شعاع بسیار کم

۴-۱- رابطه تخلخل با انتقال رطوبت درون ساختار

تخلخل محل و کانال تبادل رطوبت شیء با محیط پیرامون خود است. تخلخل در ارتباط مستقیم با فرایند پخت قطعه بوده و از سویی دیگر درصد جذب آب به عنوان تابعی از دمای پخت قطعه مطرح می‌شود که با افزایش دمای پخت، جذب آب کاهش می‌یابد [۱۰]. آب می‌تواند به دو صورت مایع و بخار وارد ساختار ماده متخلخل شود [۱۱]. در حالت مایع، دو مکانیزم انتقال جابه‌جایی (از طریق مویینگی) و نفوذ (گرادیان غلظت) در حرکت آب نقش دارند [۱۲]. جذب آب از طریق مکانیزم نفوذ، به میزان تراوایی ماده و فشار هیدرواستاتیک بستگی دارد درحالی‌که عواملی چون کشش سطحی مایع و

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.2.5]

میزان حفرات مویین و شعاع حفرات در جذب آب از طریق مکانیزم مویینگی موثرند. در حالت جذب بخار آب نیز دو مکانیزم اصلی میعان (Condensation) (میعان سطحی و میعان در خلل و فرج) و جذب رطوبت از هوا (Hygroscopicity) حائز اهمیت هستند.

ارتفاع مایع در لوله مویین با شعاع حفره رابطه عکس دارد و از معادله ۱ (Jurin's Law) محاسبه می‌شود. در این رابطه، γ کشش سطحی مایع، θ زاویه تماس بین مایع و دیواره حفره، ρ چگالی مایع، g شتاب گرانش و r شعاع حفره است.

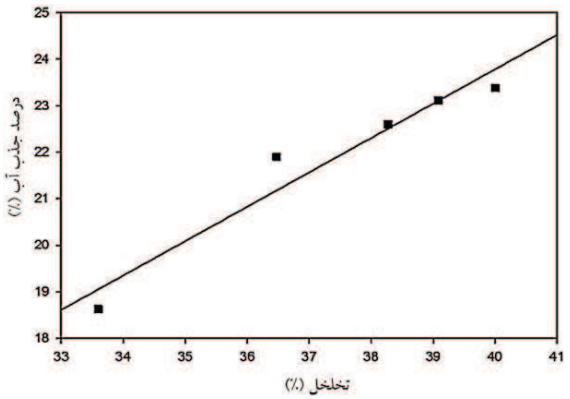
$$h = \frac{2\gamma cos\theta}{\rho g r} \qquad (1)$$

زاویه تماس آب با اکسیدهای فلزی مانند SiO_2 و Al_2O_3 بین ۱۰ تا ۶۰ درجه است. در سرامیک‌های معمولی نیز این زاویه از ۹۰ درجه بالاتر نمی‌رود [۱۳]. بنابراین اگر زاویه تماس آب با دیواره لوله مویین در یک سرامیک رسی، ۶۰ درجه درنظر گرفته شود (cos60 = 1/2)، برای آب خالص و بدون املاح (کشش سطحی آب: ۷۲×۱۰^{-۳} N M^{-1}، چگالی آب: $۱۰^{۳}$ kg. m$^{-۳}$، شتاب گرانش: ۹/۸۱ n.kg^{-1}) می‌توان ارتفاع آب در لوله مویین را محاسبه کرد. در نمونه‌های اندازه‌گیری شده با تخلخل سنجی جیوه، میانگین شعاع حفرات در گروه با دمای پخت ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد، ۰/۲۶۲ میکرومتر و گروه با دمای پخت ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد، ۱/۳۴۹ میکرومتر گزارش شده است. بنابراین:

$$h = \frac{2 \times 72 \times 10^{-3}(N.m^{-1}) \times 1/2}{10^{3}(Kg.m^{-3}) \times 9.81(N.Kg^{-1}) \times 0.262 \times 10^{-6}m} = 28.01\ m$$

$$h = \frac{2 \times 72 \times 10^{-3}(N.m^{-1}) \times 1/2}{10^{3}(Kg.m^{-3}) \times 9.81(N.Kg^{-1}) \times 1.349 \times 10^{-6}m} = 5.44\ m$$

ذکر این نکته ضروری است که در واقعیت برای سرامیک‌های تاریخی عدد ۲۸/۰۱ متر رخ نمی‌دهد، زیرا اولاً کشش سطحی و چگالی آب با توجه به وجود املاح با مقادیر در نظرگرفته شده برای آب خالص، متفاوت بوده و ثانیاً لوله‌های مویین در سرامیک ها دارای دیواره صاف، شیشه‌ای و یکدست نیستند که حداکثر کشش مویین رخ دهد و درنتیجه این عدد به مراتب کمتر خواهد بود. اما نکته مهمی که از این اعداد استنباط می‌شود، امکان انتقال و جذب رطوبت با قابلیت بسیار زیاد در سرامیک‌های تاریخی است. در نمونه فوق، اندازه شعاع لوله حدوداً ۵ برابر شده (نسبت شعاع حفره در دمای پخت ۱۰۵۰ درجه به دمای پخت ۸۵۰ درجه $\frac{1.349}{0.262} \cong 5.14$) و ارتفاع آب در لوله مویین به میزان یک پنجم کاهش یافته است. بنابراین احتمالاً (با توجه به مجموع شرایط) هر چه شعاع حفرات بزرگ‌تر باشد (به دلیل کاهش عملکرد نیروی مویینگی)، میزان جذب آب کاهش خواهد یافت. در ادامه، درصد تخلخل ظاهری و درصد جذب آب براساس استاندارد ASTM C20-92 اندازه‌گیری شد. ضریب همبستگی میان دو عامل درصد جذب آب و درصد تخلخل، ۰/۹۷۰+ با سطح معناداری (p-value) ۰/۰۰۶ محاسبه شد (شکل ۵).



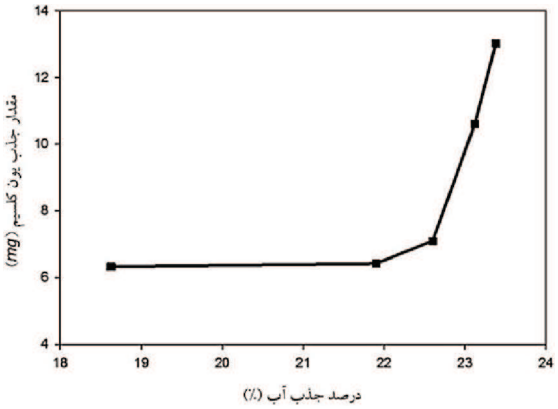
شکل ۵- نمودار رگرسیون خطی بین دو پارامتر درصد تخلخل و درصد جذب آب (نمونه‌های اندازه‌گیری شده به روش غوطه وری).

بنابراین به نظر می‌رسد براساس نتیجه محاسبات نظری معادله شماره ۱، در نمونه‌های با دمای پخت پایین‌تر که میانگین اندازه شعاع حفرات آن‌ها کوچک‌تر است (با توجه به نتایج

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.2.5]

تخلخل‌سنجی جیوه)، میزان ارتفاع آب در لوله‌های مویین بالاتر و جذب رطوبت بیش‌تر خواهد بود. این نکته می‌تواند اهمیت بررسی تخلخل‌ها را با توجه به آسیب‌های زمان دفن و البته اعمال رطوبت حین عملیات حفاری و یا استفاده از محلول‌ها در هنگام انجام درمان‌های مرمتی خاطرنشان سازد. علاوه براین، نفوذ رطوبت می‌تواند عامل انتقال املاح به درون ساختار شیء بوده و پدیده‌هایی چون نهان‌شکفتگی و شوره را به دنبال داشته باشد [۱۴]. بنابراین درصد جذب آب در نمونه با میزان جذب املاح نیز رابطه مستقیم خواهد داشت. برای مثال در نمونه‌های مورد مطالعه، میانگین جذب یون کلسیم در نمونه‌ها به روش اشباع‌سازی در سیستم غوطه‌وری اندازه گیری شد. نتایج حاکی از آن است که درصد جذب املاح با درصد جذب آب رابطه مستقیم داشته و با افزایش درصد جذب آب در نمونه، میزان یون‌های کلسیم منتقل شده به درون قطعات نیز افزایش یافته است (شکل ۶).



شکل ۶- افزایش درصد جذب آب در نمونه‌ها با افزایش میزان جذب یون کلسیم همراه بوده است (بیش‌ترین میزان مربوط به نمونه‌های گروه A و کم‌ترین میزان مربوط به نمونه‌های گروه E است). لازم به ذکر است نتایج حاصل میانگین جذب کلسیم در حداقل سه نمونه از هر گروه دمایی است.

نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن است که محل تبلور نمک با تعادل دینامیکی بین سرعت‌گریز آب از سطح (تحت تاثیر شرایط محیطی) و سرعت تامین مجدد محلول در این محل (با توجه به کشش سطحی، شعاع حفرات، ویسکوزیته سیال و طول مسیر از محلول تا محل تبخیر)، مشخص می‌شود [۱۵]. درواقع مکان شکل‌گیری بلور نمک، پیامد تعادل دینامیکی بین سه سرعت فرایند است [۱۶]:

۱- سرعت تامین رطوبت از طریق جریان مویینه (Capillary flow)
۲- سرعت نفوذ یون دراثر گرادیان غلظت ایجاد شده داخل محلول نمک
۳- سرعت از دست دادن رطوبت در اثر تبخیر

با مهاجرت محلول حاوی املاح به سطح حین فرایند تبخیر، یون‌ها در سطح بیرونی ماده‌ی متخلخل متبلور شده و شوره (Efflorescence) شکل خواهد گرفت. شوره نشانه‌ای از حضور نمک با غلظت بالا در ساختار ماده متخلخل است [۱۵]. انتقال نمک‌ها از خلل و فرج به سطح و تشکیل شوره به عواملی چون محل و موقعیت حفره حاوی نمک در ماده متخلخل، میزان تخلخل در ماده متخلخل، حرکت جریان سیال داخل فضای حفره، غلظت محلول نمک، و تغییرات رطوبت نسبی محیط بستگی دارد [۱۷].

تبلور نمک درون ساختار سفال در نتیجه‌ی تغلیظ موضعی املاح در خلل و فرج، نهان‌شکفتگی (Subflorescence) برخی از انواع نمک‌ها را به دنبال خواهد داشت [۱۸]. نهان شکفتگی می‌تواند در لایه زیرین سطح ماده و یا در اعماق آن رخ دهد. تبلور نمک در عمق داخلی یک شیء ناشی از سرعت بسیار کُند مهاجرت محلول از طریق حفرات، به سمت سطح بیرونی است [۱۵]. همچنین نفوذ نمک در مقدار رطوبت کمتر نسبت به ماده‌ی کاملاً اشباع شده، کندتر است [۱۲]. برخی از

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.2.5]

نمک‌ها تمایل به تشکیل شوره سطحی دارند در حالیکه برخی، نهان شکفتگی را ترجیح می‌دهند یا در خلل و فرج با سرعت بیش‌تری رشد می‌کنند. این پدیده نیز به شرایط محیطی به ویژه میزان رطوبت نسبی بستگی دارد که می‌تواند محل تبلور را تغییر دهد [۱۹] (شکل ۷- الف).

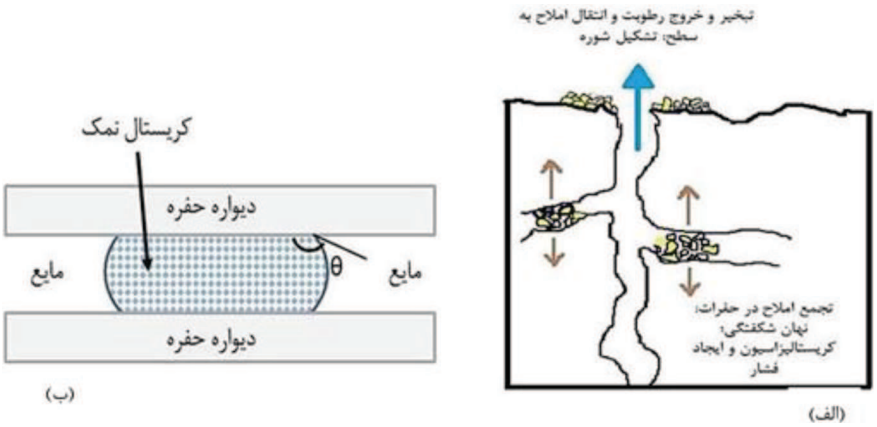
همانطور که ارتفاع مایع در لوله مویین (حفرات ریز و بسیار ریز) با شعاع لوله رابطه عکس دارد، میزان فشار وارده از طرف کریستال تشکیل شده به دیواره های لوله مویین نیز، با کاهش شعاع لوله، افزایش خواهد یافت (معادله ۲ و شکل ۷ – ب). در معادله ۱، p: فشار، r: شعاع حفره و θ: زاویه تماس سطح کریستال – مایع است.

$$p = \frac{-2\cos\theta}{r} \qquad (2)$$

مسئله قابل توجه در رابطه با حضور نمک‌ها در ساختار مواد متخلخل، تاثیر آن‌ها در فرایندهای هوازدگی و تخریب قطعه است. نظریات مطرح در خصوص مکانیزم تخریب توسط نمک‌ها عبارتند از: ایجاد فشار تبلور همچنین انبساط و انقباض ناشی از آب‌گیری و آب‌زدایی نمک در چرخه‌های تر و خشک‌شدن [۲۰]. تخریب ناشی از تنش مکانیکی (فشار تبلور) تشکیل بلور به شدت به ساختار حفرات و ویژگی‌های مقاومتی قطعه بستگی دارد. عوامل مهم ساختاری حفرات که در پایداری قطعه متخلخل نقش دارند عبارتند از: میزان تخلخل، [نحوه] پراکندگی اندازه حفرات و شکل حفرات [۲۱]. در فرایند انتقال نمک‌ها در داخل ساختار مواد متخلخل و در حالت ایجاد جریان سیال از طریق نیروی مویینه، الگوی این جابه‌جایی تحت تاثیر ساختار خلل و فرج در ماده (درنتیجه‌ی تفاوت نیروی فشار مویینه اعمال شده توسط حفرات با اندازه های متفاوت) خواهد بود [۱۶].

نکته‌ی دیگر آنکه فرایندهای تبخیر و تر شدن در یک ماده‌ی متخلخل حاوی نمک‌های محلول، منجر می‌شود به تشکیل"نواحی‌ای" از محلول‌هایی با غلظت‌های متفاوت نمک. اگر این محلول‌ها در ارتباط مستقیم با یکدیگر باشند، فرایند نفوذ متاثر از گرادیان غلظت، برای به تعادل رساندن غلظت‌های دو محلول مجاور آغاز می‌شود [۲۲].

علاوه براین، حرکت نمک‌ها در داخل ماده توسط سیال (آب)،



شکل ۷- (الف) طرح ترسیمی از شکل‌گیری شوره در سطح و نهان شکفتگی‌ها در حفرات داخلی یک شیء متخلخل از منظر میکروسکوپی و ایجاد تنش ناشی از کریستالیزاسیون به دیواره حفرات. (ب) طرح ترسیمی از کریستال تشکیل شده در یک حفره استوانه‌ای شکل (براساس [۲۰]).

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.2.5]

کاملاً به شرایط محیطی بستگی دارد: دما، رطوبت نسبی و همچنین حضور سایر نمک‌ها. تغییر در رطوبت نسبی، تبلور و انحلال جزئی نمک‌ها را به دنبال خواهد داشت. این پدیده در حفره‌هایی با اندازه متوسط تا بزرگ رخ می‌دهد [۹]، براساس این اصل که رشد نمک‌ها در خلل و فرج بزرگ‌تر انرژی آزاد تشکیل کم‌تری دارد [۱۹]. البته علاوه بر تبلور نمک، انحلال پذیری آن نیز با اندازه حفره در ارتباط است [۲۰، ۲۳].

۴-۲- پدیده حبس رطوبت در حفرات با شعاع بسیار کم

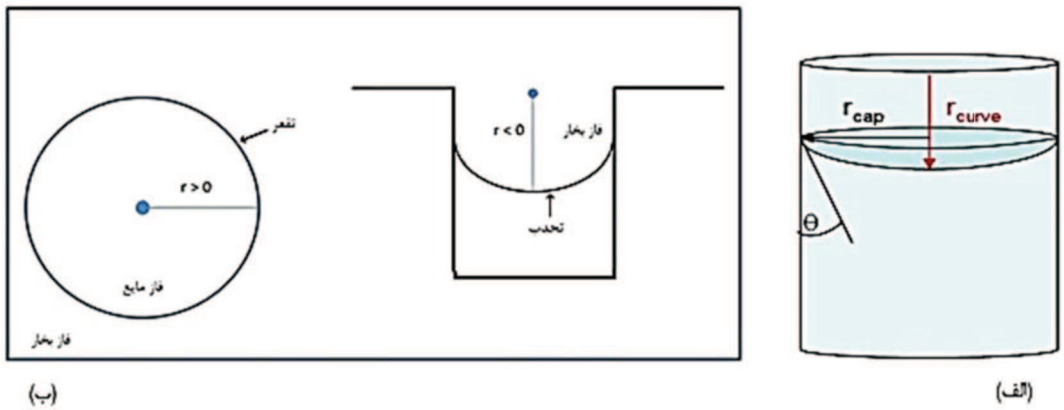
حضور نمک سبب کاهش فشار بخار درون حفرات می‌شود که تغییر پتانسیل انتقال برای نفوذ بخار را به دنبال خواهد داشت. آب‌گیری و آب‌زدایی نیز به فشار بخار واقعی درون سیستم حفره بستگی دارد. همچنین حضور نمک‌ها می‌تواند سبب تغییرات گرانروی و چگالی و نیز کشش سطحی محلول (و در واقع رطوبت موجود در شیء) شود [۱۲]. تمامی این عوامل بر انتقال رطوبت در شیء و جابه‌جایی نمک‌ها موثر خواهند بود.

براساس قانون لانگ – لاپلاس، هر سطحی که دارای انحنا باشد، حتما اختلاف فشاری بین دو طرف سطح وجود دارد بنابراین در یک حفره یا لوله مویین، که فصل مشترک مایع درون حفره با بخار به صورت خط مستقیم نیست (شکل ۸- الف) نیز این اختلاف فشار وجود دارد. اگر این فصل مشترک به صورت یک نیم‌کره درنظر گرفته شود، رابطه‌ی فشار بخار مایع در این حفره، P، با فشار بخار معمولی آن مایع یعنی P_0 به صورت معادله ۳ خواهد بود (قانون کلوین) که در آن، R ثابت گازها، r شعاع انحنا، γ کشش سطحی و V حجم مولی است [۲۴، ص. ۲۳].

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{2\gamma V}{RT}\frac{1}{r}\right) \qquad (3)$$

از نظر ریاضی، برای قطره مایع در فاز بخار، شعاع انحنا مثبت فرض می‌شود ($r > 0$) و در حفرات، شعاع انحنای مایع منفی ($r < 0$) در نظر گرفته می‌شود (شکل ۸- ب).

معادله ۳ را می توان به صورت $P = P_0\, e^{-(\frac{2v\gamma}{RTr})}$ نیز نوشت (عکس تابع نمایی). از آنجا که بقیه مقادیر توان e، اعدادی مثبت هستند (حجم مولی، کشش سطحی و ثابت گازها)،



شکل ۸- (الف) طرح ترسیمی رابطه زاویه تماس مایع در حفره مویین با شعاع انحناء آن [۲۵]. (ب) شعاع انحنای مثبت برای قطرات مایع در فاز بخار و شعاع انحنای منفی برای مایع درون حفره.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.2.5]

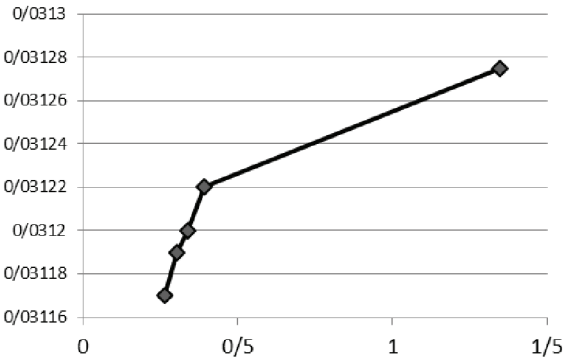
بنابراین اگر شعاع منفی باشد (تحدب انحنای سطح مایع درون حفره)، e به توان یک مقدار منفی می‌رسد و این مقدار هرچه باشد اگر فرضاً معادل Y در نظرگرفته شود، درنتیجه:

$$e^{-Y} = \frac{1}{e^{Y}} < 0 \Rightarrow P < P_0$$

با فرض برابری شعاع انحنای مایع و شعاع لوله مویین، می توان مقدار فشار بخار آب درون حفره را با درنظر گرفتن شرایط زیر، محاسبه کرد.

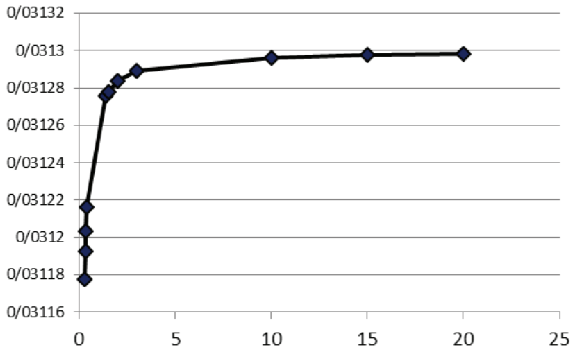
دما: $T = 25°C = 298.15K$ ، حجم مولی آب: $V = 18.0153 \times 10^{-6} m^3/mol$ ، ثابت گازها: $R = 8.3143 \frac{J}{K.mol}$، کشش سطحی: $\gamma = 0.072 \frac{J}{m^2}$، و فشار بخار آب: $P_0 = 0.0313\ atm$.

در شکل ۹ رابطه شعاع انحنای مایع (در اینجا میانگین شعاع تخلخل) با فشار بخار مایع درون حفره (براساس معادله $P = P_0 e^{-(\frac{2V\gamma}{RTr})}$ ، ارائه شده است.



شکل ۹- نمودار تابع فشار بخار (atm) درون حفره (محور Y) نسبت به شعاع انحنای مایع (µm) (در اینجا شعاع حفره) (محور X).

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش شعاع، فشار بخار درون مایع به فشار بخار آب در سطح نزدیک می‌شود. در این شرایط، شعاع انحنا باید بیش از ۲۰ میکرومتر باشد تا فشار بخار درون حفره با فشار بخار آب برابر شده (شکل ۱۰) و امکان تبخیر فراهم شود. در نمونه‌های مورد مطالعه، میانگین شعاع حفرات حداکثر ۱/۳۴۹ میکرومتر بوده (گروه دمای پخت ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد) و بنابراین در این نمونه‌ها با شرایط توضیح داده شده، رطوبت تمایل به میعان مویین دارد.



شکل ۱۰- نمودار تابع فشار بخار (atm) درون حفره (محور Y) نسبت به شعاع انحنای مایع (µm) (در اینجا شعاع حفره) (محور X) با افزایش اندازه شعاع.

بنابراین در حفره‌ها، فشار بخار مایع محبوس کم‌تر از فشار بخار اشباع معمولی (P_0) است. بخار در داخل حفره‌ها تمایل دارد به صورت شبنم میعان شود. همچنین به دلیل فشار بخار کم‌تر، مایع درون حفره کمی دیرتر از آب معمولی تبخیر می‌شود و اگر شعاع حفره به سمت صفر میل کند، مایع داخل حفره تمایلی به تبخیر شدن ندارد. پدیده به صورت میعان مویین و باقی ماندن آب درون حفرات، می‌تواند زمینه شروع و ادامه واکنش‌های شیمیایی مانند انحلال و تبادلات فازها درون بافت سرامیک را در مقیاس میکروسکوپی به دنبال داشته باشد که در طولانی مدت، آسیب و تخریب در ساختار را سبب می‌شود.

در مجموع می‌توان تخلخل را از چند منظر در سرامیک‌های تاریخی مهم دانست. وجود حفرات به هم پیوسته درون بافت می‌تواند شبکه‌ای از انتقال رطوبت را ایجاد کند. پی‌آمد

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.2.5]

مستقیم این پدیده، البته با توجه به تغییرات دما، چرخه‌های متناوب هیدراسیون و تبلور نمک‌های محلول و ایجاد تنش‌های فشاری ناشی از این تغییرات حجمی در شبکه‌های بلورین و درنتیجه ایجاد ریزترک‌ها و ترک‌ها خواهد بود. علاوه براین، کریستالیزاسیون رطوبت درون حفرات نیز با تغییرات حجمی همراه بوده و عامل ایجاد تنش است. این تنش‌ها به مرور می‌توانند سبب پوسته پوسته شدن لایه‌ها، شکست و جدایش قطعات در شیء شوند. در دماهای پخت پایین‌تر، به دلیل وجود ریزحفرات و براثر کشش مویین، رطوبت بیش‌تری درون ساختار جریان خواهد یافت. در مجاورت رطوبت با کانی های رسی و ترکیباتی مانند زئولیت‌ها (نوعی از کانی‌های آلومینوسیلیکات)، امکان تبادل یون فراهم می‌شود که به تدریج تخریب ساختارها را به همراه خواهد داشت. همچنین حضور رطوبت در دراز مدت می‌تواند انحلال برخی فازها و درنتیجه ایجاد فضای خالی بیش‌تر در بافت را به دنبال داشته باشد. نکته قابل توجه اینکه درصورتی که شعاع حفرات بسیار ریز شود، براساس قوانین فشار بخار، فرایند تبخیر به سمت صفر میل می‌کند و بنابراین رطوبت در حفره محبوس خواهد ماند. این پدیده می‌تواند به ایجاد مناطق موضعی مرطوب درون بافت شیء بیانجامد. این نکته به ویژه در زمان انجام عملیات تمیزکاری و نمک‌زدایی اشیاء متخلخل بسیار حائزاهمیت بوده و استفاده از حلال‌ها باید با دقت و توجه به ویژگی‌های تخلخل‌ها صورت گیرد.

۵- نتیجه‌گیری

تخلخل به عنوان مسیر حرکت رطوبت و انتقال یون‌های محلول، نقش قابل توجهی در آسیب‌های ساختاری مواد متخلخل دارد. تخلخل، محصول فرایندهای تولید (تخلخل‌های اولیه) و یا فرسایش ناشی از مرور زمان (تخلخل‌های ثانویه) است که درنتیجه‌ی انحلال و تخریب فازهای تشکیل‌دهنده بافت، به وجود می‌آید. تخلخل‌سنجی می‌تواند به عنوان آنالیز مکمل برای تخمین دمای پخت سرامیک‌های تاریخی و همچنین بررسی روند آسیب‌های آتی، مورد استفاده قرارگیرد. در سرامیک‌های رسی، درصد تخلخل با شرایط و کیفیت پخت قطعه رابطه مستقیم داشته و به طور کلی با افزایش دمای پخت، چگالی افزایش یافته و از درصد تخلخل کاسته می‌شود. دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند به عنوان نقطه تغییر روند افزایشی یا کاهشی این عوامل در نظر گرفته شود. به نظر می‌رسد در این محدوده دمایی تجزیه برخی فازها (مانند کربنات‌ها، برخی آلومینوسیلیکات‌ها مانند ایلیت و موسکوویت و ...) و تشکیل فازهای جدید ناشی از فرایند پخت و همچنین شروع زینتر و تشکیل فاز شیشه‌ای، به‌طورکلی کاهش تخلخل و افزایش چگالی را در پی داشته باشد.

علاوه بر درصد تخلخل، اندازه شعاع حفرات نیز در فرایندهای انتقال رطوبت موثر است. هرچه شعاع حفرات کوچک‌تر باشد، میزان کشش مویین و درنتیجه ارتفاع مابع در حفرات افزایش یافته و نفوذ رطوبت به درون بافت بیشتر می‌شود. در اثر افزایش احتمال نفوذ رطوبت، میزان انتقال املاح نیز از محیط به درون بافت ماده متخلخل، افزایش خواهد یافت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که درصد تخلخل و اندازه شعاع حفرات، با درصد جذب آب و همچنین مقدار جذب یون کلسیم (که به عنوان شاخص برای اندازه‌گیری میزان انتقال املاح از محلول اشباع به درون قطعه سرامیکی در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت) رابطه مستقیم دارد.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.2.5]

نکته قابل توجه دیگر، احتمال پدیده حبس رطوبت در حفرات بسیار کوچک است. طبق قانون لانگ – لاپلاس مشاهده می‌شود که با کاهش شعاع حفرات، فشار بخار مایع درون حفره نسبت به فشار بخار معمولی آب کم‌تر بوده و بنابراین تبخیر رخ نخواهد داد.

درنتیجه هرچه حفرات کوچک‌تر باشند، از سویی بر اثر پدیده مویینگی، افزایش انتقال رطوبت از محیط به درون قطعه سرامیکی رخ داده و از سویی دیگر، با کاهش شعاع حفرات، تمایل به میعان درون حفره بیشتر شده و تبخیر کم‌تر رخ می دهد. این به معنی باقی ماندن رطوبت در قطعه و احتمال بروز آسیب‌های آتی در آن است.

تشکر و قدردانی

با سپاس از راهنمایی‌های ارزشمند آقایان دکتر سیّد محمدامین امامی عضو هیات علمی دانشکده حفاظت و مرمت دانشگاه هنر اصفهان و دکتر محمد چالکش امیری، عضو هیات علمی دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی اصفهان.

منابع

[1] Sperl J, Trckova J. Permeability and porosity of rocks and their relationship based on laboratory testing. Acta Geodyn. Geomater 2008, 5 (1): 41 – 47.

[2] Andreola F, Leonelli C, Romagnoli M, Miselli P. Techniques Used to Determine Porosity. American Ceramic Society Bulletin 2000, 79 (7): 49-52.

[۳] نوغانی سمیه. بهینه‌سازی نمک‌زدایی سفالینه های تاریخی بدون لعاب براساس آنالیز پدیده های انتقال جرم در سیستم غوطه‌وری. رساله دکتری رشته مرمت اشیاء تاریخی – فرهنگی، دانشگاه هنر اصفهان: دانشکده حفاظت و مرمت؛ ۱۳۹۵.

[4] Munsell, A. H. Munsell Soil Color Chart. 2000. N.Y.: GretagMacbeth.

[5] Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water. ASTM, 2015.

[6] Standard Test Methods for Calcium and Magnesium in Water. ASTM, 2014.

[7] Maniatis Y, Tite M.s. Technological Examination of Neolitliic-Bronze Age Pottery from Central and Southeast Europe and from Near East. Journal of Archaeological Science 1981, 8: 59-76.

[8] Maniatis Y, Simopoulos A, Kostikas A, Perdikatsis V. Effect of Reducing Atmosphere on Minerals and Iron Oxides Developed in Fired Clays: The Role of Ca. Journal of the American Ceramic Society 2006, 66: 773 – 781.

[9] Martín-Márquez J, Rincón, JM, Romero M. Effect of firing temperature on sintering of porcelain stoneware tiles. Ceramics International 2008, 34(8): 1867-1873.

[10] Hamisi H, Park SE, Choi BH, An YT, Jeongin L. Influence of firing temperature on physical properties of Same clay and Pugu kaolin for ceramic tiles application. International Journal of Materials Science and Applications 2014, 3(5): 143-146.

[11] Charola AE. Salts in the deterioration of porous materials: an overview. JAIC 2000, 39: 327-343.

[12] Nicolai A, Grunewald J. Parametric study of salt transport and phase transition parameters in simulations of porous materials saturated with salt solutions under drying conditions. Paper presented at the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries 2008, Copenhagen.

[13] Watanabe T. Wettability of ceramic surfaces – A wide range control of surface wettability from super hydrophilicity to

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.2.5]

super hydrophobicity, from static wettability to dynamic wettability. Journal of The Ceramic Society of Japan 2009, 117: 1285-1292.

[۱۴] نوغانی سمیه، امیری محمد، امامی محمدامین. تعیین پارامترهای موثر بر فرایند نمک‌زدایی سفالینه‌های بدون لعاب در سیستم غوطه‌وری با استفاده از روش طراحی آزمایشات پاسخ سطح. مرمت و معماری ایران ۱۳۹۵؛ ۶ (۱۲): ۳۵ – ۵۰.

[15] Bourguignon ES. Study of deterioration mechanisms and protective treatments for the Egyptian limestone of the Ayyubid city Wall of Cairo. M.S. Thesis, University of Pennsylvania, 2000.

[16] Sawdy A, Heritage A, Pel L. A review of salt transport in porous media, assessment methods and salt reduction treatment. Paper presented at the SWBSS Copenhage, 2008.

[17] Gupta D. Efflorescence on pottery: A study. In A. A. Abbasi (Ed.), Dimensions of Human Cultures in Central India. New Delhi: Shapur & Sons Ltd; 2001.

[18] O'Brien P. An experimental study of the effects of salt erosion on pottery. Journal of Archaeological Science 1990, 17: 393-401.

[19] Rodriguez-Navarro C, Doehne E. Salt weathering: Influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern. Earth Surface Processes and Landforms 1999, 24: 191-209.

[20] Rijniers LA, Huinink HP, Pel L, Kopinga K. Experimental evidence of crystallization pressure inside porous media. Physical Review Letters (The American Physical Society) 2005, 94: 1-4.

[21] Benavente D, Linares-Fernandez L, Cultrone G, Sebastian E. Influence of microstructure on the resistance to salt crystallisation damage in brick. Materials and Structures 2006, 39: 105–113.

[22] Steiger M, Schwarz HJ. Deterioration mechanisms. Retrieved from http://193.175.110.91/saltwiki/index.php/Deterioration_Mechanisms.

[23] Rijniers LA, Pel L, Huinink HP, Kopinga K. Salt crystallization as damage mechanism in porous building materials—a nuclear magnetic resonance study. Magnetic Resonance Imaging 2005, 23: 273–276.

[۲۴] چالکش امیری محمد. مواد فعال سطحی. اصفهان: ارکان دانش؛ ۱۳۸۷.

[25] https://en.wikipedia.org/wiki/Capillary_condensation (Access Date: 1/7/1394).

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.2.5]

Iranian Journal of
Ceramic Science & Engineering
Vol. 10, No. 3, 2021

Investigation on the Role of Porosity in the Structure of Historical Ceramics

Somayeh Noghani

Assistant Professor, Faculty of Conservation, University of Art, Tehran, Iran

*somayeh.noghani@yahoo.com & s.noghani@art.ac.ir

Abstract: Structural characterization of historical materials, especially clay-based compositions, as well as technical and archaeological aspects, has a significant role in the diagnosis of the deterioration process. One of the most important parameters in the structure of clay-base ceramics (such as pottery, brick, and tile ware) is porosity that includes all open and closed pores in the matrix of porous material and it is formed through primary (during the preparation of raw materials) or secondary processes (during firing process and/or burial condition). The main function of open porosity is its role as moisture or any electrolyte transfer channel that can launch or continue many chemical reactions. This function has consequences such as ions transfer, phases dissolution, hydration, and crystallization of soluble salts. Therefore, take note of the percentage of the object's porosity, especially in the excavation process, is highly essential. In this paper, according to the analytical point of view, through porosimetric methods such as mercury intrusion porosimetry (MIP) and immersing method (based on ASTM C20-92), the most important effects of the presence of porosity in the ceramic matrix were investigated. These parameters are a) relation between firing temperature, percentage of porosity, volume, and radius of pores; b) relation between porosity and moisture transfer through the matrix; and c) relation between porosity and salt crystallization pressure. Without pay attention to the object's condition like types and amounts of pores, the possibility of increased permeability and diffusion of humidity, moisture shock immediately after excavation can occur as a result of cleaning or desalination process as well as salt crystallization pressure, capillary condensation, and further chemical reactions and physical erosions.

Keywords: historical ceramics, structure, internal erosion, porosity, mass transfer.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.2.5]