



امکان به‌کارگیری تکنیک پرتونگاری نوترونی دیجیتال بلادرنگ جهت مطالعه تبخیر آب در مواد متخلخل

احسان ناظمی^۱، امیر موافقی^{۱*}، بهروز رکوک^۱، مارین دینکا^۲، محمد حسین چوپان دستجردی^۱
۱. پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران-ایران
۲. مؤسسه تحقیقات هسته‌ای، میوونی ۱۱۵۴۰۰- رومانی

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۱/۲۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۶/۲۴

چکیده

مطالعه فرایند جذب و تبخیر سیالات در محیط‌های متخلخل در علمی هم‌چون زمین‌شناسی، عمران، محیط‌زیست و ... از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از دقیق‌ترین روش‌ها برای بررسی فرایندهای مذکور، پرتونگاری نوترونی است. با توجه به سطح مقطع بالای برهم‌کنش نوترون‌های حرارتی با هیدروژن، بررسی فرایند جذب و تبخیر سیالات حاوی هیدروژن هم‌چون آب، نفت و ... در داخل مواد متخلخل با حساسیت بالایی امکان‌پذیر می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از تکنیک پرتونگاری نوترونی دیجیتالی بلادرنگ به بررسی روند تبخیر آب از داخل یک نمونه متخلخل ساختمانی در دمای 10°C محیط آزمایشگاه پرداخته شده است. بدین‌منظور یک قطعه آجر ساختمانی به مدت ۲۴ ساعت در آب غوطه‌ور گردید و سپس در مقابل باریکه نوترونی قرار داده شد. در طول ۱۴۵ دقیقه زمان فعالیت رآکتور، ۳۰ تصویر با فواصل زمانی ۵ دقیقه از نمونه مرطوب ثبت گردید. تصاویر به‌دست آمده نشان داد که با استفاده از تکنیک به‌کار گرفته شده، تغییر توزیع و مقدار حجمی آب در داخل نمونه به‌خوبی قابل مشاهده است. هم‌چنین نتایج نشان داد که نسبت حجمی آب موجود در نمونه با آهنگ 3.94×10^{-4} درصد بر ثانیه در دمای محیط آزمایشگاه تبخیر می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: پرتونگاری نوترونی دیجیتالی بلادرنگ، محیط متخلخل، سیالات هیدروژن‌دار، تبخیر

Possibility of using real time digital neutron radiography to study the evaporation of water in porous materials

E. Nazemi¹, A. Movafeghi^{1*}, B. Rokrok¹, M. Dinca², M. H. Choopan Dastjerdi¹

1. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.BOX: 14395-836, Tehran-Iran
2. Institute for Nuclear Research (INR), Mioveni 115400, Romania

Research Article

Received 13.4.2020, Accepted 14.9.2020

Abstract

The study of the process of absorption and evaporation of fluids in porous media is of particular importance in sciences such as geology, civil engineering, environment, etc. Neutron radiography is one of the most precise methods for investigation of the mentioned processes. Due to the high cross-section of the interaction of thermal neutrons with hydrogen, precise investigation of absorption and evaporation of fluids containing hydrogen, such as water, oil, etc., is possible. In the present work, using the real-time neutron radiography technique, the vaporization of water from a porous building sample at 10°C in the laboratory was investigated. For this purpose, a building brick was immersed into water for 24 hours, and then was placed in front of the neutron beam. During 145 minutes of reactor operation, 30 images were recorded with a 5 minutes interval from the wet sample. The obtained images showed that using the utilized technique, the distribution variations and volumetric water content inside the sample are well visible. Also, the results indicated that the volumetric water content in the sample was evaporated with a rate of 3.94×10^{-4} percent per seconds in the laboratory environment.

Keywords: Real time digital neutron radiography, Porous media, Hydrogenous fluids, Evaporation

*Email: amovafeghi@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

مطالعه فرایند تبخیر و جذب آب در محیط‌های متخلخل در علمی هم‌چون زمین‌شناسی، عمران، محیط‌زیست و ... از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای بررسی تبخیر و جذب آب در مواد متخلخل از تکنیک‌های مختلف غیرمخرب مانند طیف رزونانسی مغناطیسی هسته‌ای [۱]، امپدانس الکتریکی [۲]، پرتونگاری فوتونی [۳-۴]، پرتونگاری نوترونی [۵-۸] و ... استفاده می‌گردد. از بین روش‌های مذکور، پرتونگاری نوترونی به‌علت سطح مقطع بالای برهم‌کنش نوترون‌های حرارتی با هیدروژن موجود در سیالاتی هم‌چون آب، نفت و ... دارای حساسیت بیش‌تری نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد.

تصویربرداری با نوترون‌ها به‌صورت مستقیم امکان‌پذیر نبوده و باید الگوی نوترونی ناشی از تضعیف (پس از عبور از جسم) توسط یک مبدل به پرتو دیگری مانند الکترون یا ایکس تبدیل شود تا بتواند روی صفحه تصویر تأثیر بگذارد. روش‌های ثبت تصویر در پرتونگاری نوترونی را می‌توان به دو دسته کلی تأخیری و آنی تقسیم‌بندی کرد. روش تأخیری به سه روش مستقیم، انتقالی و حک ردپای ذرات تقسیم‌بندی می‌شود و روش آنی نیز به دو دسته ترکیب صفحه سوسوزن با دوربین CCD و صفحات تصویربرداری نوترونی تقسیم‌بندی می‌گردد. از بین موارد مذکور، فقط از روش‌های آنی می‌توان برای بررسی روند جذب و تبخیر سیالات در محیط‌های متخلخل استفاده نمود؛ زیرا این فرایندها متغیر با زمان بوده و به همین جهت برای مشاهده و بررسی آنلاین آن‌ها، نیاز به یک روش ثبت تصویر سریع می‌باشد.

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در زمینه بررسی فرایند جذب و تبخیر آب از مواد متخلخل با استفاده از تکنیک پرتونگاری نوترونی صورت گرفته است. در سال ۲۰۰۴، Beer F.C. و همکاران در سامانه پرتونگاری نوترون SAFARI در افریقای جنوبی، به بررسی روند تبخیر آب از یک نمونه بتن ساختمانی پرداختند [۹]. آن‌ها در بازه‌های زمانی مختلف در طول ۷ روز متوالی، از نمونه بتنی با استفاده از پرتونگاری نوترونی تصویربرداری کرده و میزان تبخیر آب در هر روز را محاسبه کردند. در سال ۲۰۰۵، A. El Abd و همکاران در سامانه پرتونگاری نوترون DNR در کشور لهستان به مطالعه حرکت جبهه مرطوب در حین فرایند جذب آب در محیط‌های متخلخل ساختمانی پرداختند. آن‌ها با استفاده از تکنیک پرتونگاری نوترونی بلادرنگ از یک آجر ساختمانی که از یک سمت با یک منبع آب در تماس بود، در زمان‌های

مختلف تصویربرداری کردند. آن‌ها در این مطالعه نشان دادند که حرکت جبهه مرطوب، متناسب با ریشه دوم زمان سپری‌شده (زمان صفر، لحظه تماس آجر با منبع آب در نظر گرفته شده است) می‌باشد [۱۰]. در سال ۲۰۰۶، R. Hassanein و همکاران در سامانه پرتونگاری نوترون NEUTRA در کشور سوئیس، فرایند جذب آب در سه نمونه سنگ تزئینی را بررسی نموده و نتایج به‌دست آمده را با یکدیگر مقایسه کردند [۱۱].

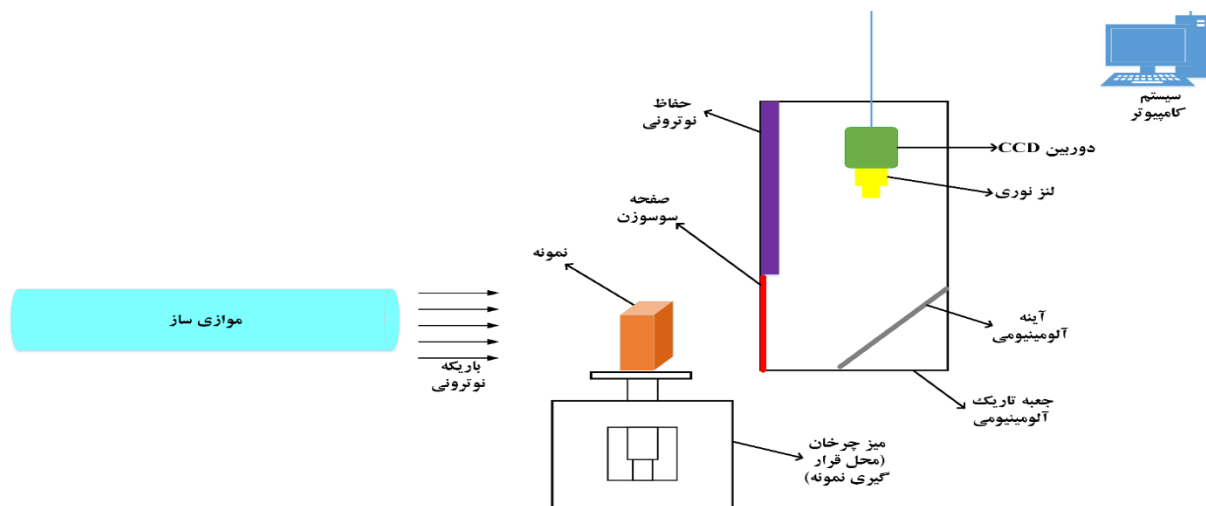
همان‌طور که اشاره شد، در سامانه‌های پرتونگاری نوترونی مختلف، پژوهش‌های زیادی بر روی فرایند جذب و تبخیر آب از مواد متخلخل ساختمانی صورت گرفته است. در پژوهش حاضر، اولین مطالعه انجام شده بر روی فرایند تبخیر آب از یک ماده متخلخل ساختمانی در سامانه پرتونگاری نوترون ²INUS واقع در رآکتور مؤسسه تحقیقات هسته‌ای کشور رومانی گزارش می‌شود. در این مقاله علاوه بر تعیین میزان آب تبخیر شده، آهنگ تبخیر آب نیز بررسی شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۲ معرفی سامانه پرتونگاری نوترون

آزمایش‌های تجربی در این پژوهش در سامانه پرتونگاری نوترون INUS واقع در رآکتور مؤسسه تحقیقات هسته‌ای کشور رومانی صورت گرفته است. این سامانه دارای یک سیستم آشکارسازی دیجیتال برای ثبت پرتوهای نوترون می‌باشد. سامانه پرتونگاری نوترون INUS شامل ۴ قسمت اصلی موازی‌ساز، میز چرخان، سیستم آشکارسازی و سیستم کامپیوتر جهت کنترل تجهیزات و پردازش تصاویر است [۱۲-۱۳]. شار نوترون حرارتی خروجی از موازی‌ساز و نسبت موازی‌سازی (L/D) این سامانه به ترتیب 1.16×10^5 n/s.cm² و ۹۳/۳۶ می‌باشد. سیستم آشکارسازی موجود در این سامانه نیز از صفحه سوسوزن، آینه و دوربین CCD تشکیل شده است. طرح‌واره تجهیزات و ساختار سامانه پرتونگاری نوترونی INUS در شکل ۱ نشان داده شده است.

در این پژوهش از یک قطعه آجر به‌عنوان یک نمونه ساختمانی متخلخل استفاده گردید. طول، عرض و ضخامت آجر مورد استفاده به ترتیب ۱۱۲ mm، ۳۰ mm و ۱۱/۵ mm بود. پیش از شروع آزمایش، نمونه به مدت ۲۴ ساعت در آب غوطه‌ور گردید تا کاملاً خیس شده و تخلخل‌های موجود در آن با آب پر شود. قبل از شروع فعالیت رآکتور، نمونه از آب خارج گردید و روی یک نگهدارنده آلومینیمی و در فاصله ۳۵ mm از صفحه سوسوزن قرار گرفت.

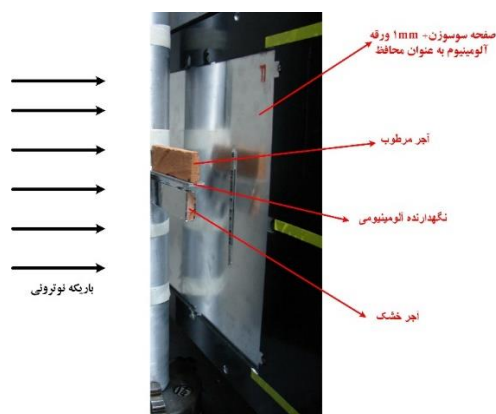


شکل ۱. طرح‌واره تجهیزات و ساختار سامانه پرتونگاری نوترونی INUS.

پس از انتخاب صفحه سوسوزن مناسب، تصویربرداری از نمونه اصلی (آجر خیس) آغاز گردید. برای تصویربرداری، از قابلیت مد متوالی^۲ موجود در نرم‌افزار دوربین CCD استفاده گردید. لازم به ذکر است که دوربین CCD موجود در سامانه پرتونگاری INUS از نسل جدید این نوع دوربین‌ها است که دارای سرعت ثبت تصویر بالا (در حد ۰/۱ ms) می‌باشد. زمان ثبت هر تصویر و زمان تأخیر در مد متوالی به ترتیب ۱۰ s و ۲۹۰ s انتخاب گردید. به عبارت دیگر، در هر ۵ دقیقه یک تصویر ثبت گردید. طرح‌واره ای از نحوه تقسیم‌بندی زمان‌ها در مد متوالی در شکل ۳ نشان داده شده است.

با توجه به زمان محدود فعالیت رآکتور، ۳۰ تصویر در مدت زمان ۱۴۵ دقیقه ثبت گردید. در پایان آزمایش و پس از ثبت تصاویر اصلی، میز چرخان که نمونه نیز روی آن قرار دارد، با کمک موتور پله‌ای در جهت افقی به اندازه ۳۰ cm حرکت داده شد تا هیچ جسمی در مقابل صفحه سوسوزن قرار نداشته باشد. سپس ۸ تصویر پروفایل باریکه^۳ ثبت گردید. پس از ثبت تصاویر پروفایل باریکه، به منظور قطع هرگونه پرتو نوترون یا گاما، دهانه خروجی موازی‌ساز توسط شاتر^۴ بسته شد و سپس ۸ تصویر تاریک^۵ ثبت گردید. برای تصاویر پروفایل باریکه و تاریک، مدت زمان ثبت باید برابر با زمان ثبت بقیه تصاویر در حین آزمایش اصلی (۱۰ s) انتخاب شود. از میانگین این تصاویر برای اصلاح نقوص پروفایل باریکه، جریان تاریک و نویز قرائت دوربین CCD و همچنین نقوص صفحه سوسوزن به کار می‌رود. از آن‌جا که برای تحلیل نتایج به دست آمده در این پژوهش همه تصاویر نسبت به تصویر اول بررسی می‌گردد، باید تا حد امکان نوسانات شدت باریکه حذف شود تا بتوان تغییرات مشاهده شده در تصاویر را به مقدار آب تبخیر شده نسبت داد.

سیستم آشکارسازی موجود در سامانه INUS دارای دو صفحه سوسوزن از جنس LiF-ZnS:Cu با ضخامت ۰/۳ mm و $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{:Tb}$ با ضخامت ۰/۱۲ mm می‌باشد. ابعاد دو صفحه با یکدیگر یکسان و برابر با $30 \times 30 \text{ cm}^2$ می‌باشد. به دلیل ضخامت کم صفحات سوسوزن، یک ورقه آلومینیومی با ضخامت ۱ mm به منظور محافظت صفحات در برابر آسیب‌های فیزیکی در مقابل آن‌ها قرار داده شده است. متناسب با نوع آزمایش، ابتدا باید صفحه مناسب انتخاب گردد. بدین منظور یک قطعه آجر با جنس و ضخامت یکسان با نمونه اصلی که پیش از شروع آزمایش به طور کامل خشک گردیده بود، در نزدیکی نمونه اصلی قرار داده شد و سپس تصویر هر دو نمونه با استفاده از دو صفحه سوسوزن موجود ثبت گردید. چیدمان آزمایشگاهی در شکل ۲ نشان داده شده است. هدف از قرار دادن نمونه خشک در کنار نمونه اصلی خیس شده، مقایسه میزان حساسیت تباین^۱ در تصاویر به دست آمده از دو صفحه سوسوزن بود. میدان دید برابر با ۲۲۶ mm تنظیم گردید. اندازه پیکسل در هر تصویر $226 \mu\text{m}$ می‌باشد که از تقسیم اندازه میدان دید بر تعداد پیکسل‌های دوربین CCD موجود (۱۰۰۰×۱۰۰۰ پیکسل) حاصل شده است.

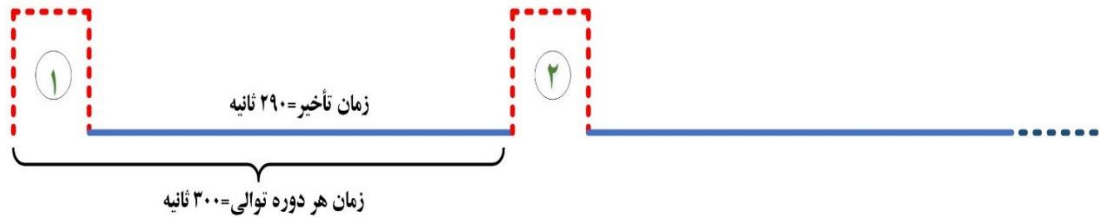


شکل ۲. چیدمان آزمایشگاهی.

2. Sequence mode
3. Beam profile
4. Shutter
5. Dark image

1. Contrast

زمان ثبت تصویر = ۱۰ ثانیه



شکل ۳. نحوه تقسیم بندی زمان ها در تصویربرداری با استفاده از مد متوالی.

$$\theta = 100 \times \frac{V_{water}}{V_{brick}} = 100 \times \frac{X_{water} \times A_{water}}{L_{brick} \times A_{brick}} \quad (3)$$

در این رابطه θ ، V_{water} ، V_{brick} ، A_{water} و A_{brick} به ترتیب نشان دهنده نسبت حجمی آب، حجم آب موجود در نمونه، حجم نمونه، مساحت آب موجود در نمونه و مساحت نمونه می باشد. از آن جا که مساحت آب و مساحت نمونه ای که در مقابل باریکه نوترونی قرار می گیرند با یکدیگر برابر می باشند، می توان نسبت حجمی آب را به صورت زیر نوشت:

$$A_{water} = A_{brick} \Rightarrow \theta = 100 \times \frac{X_{water}}{L_{brick}} \quad (4)$$

با انجام مقداری عملیات ریاضی بر روی روابط ۱ و ۲ می توان ضخامت آب موجود در نمونه و ضخامت نمونه را بر حسب شدت های ثبت شده استخراج نمود. با جایگذاری ضخامت آب موجود در نمونه و ضخامت نمونه به دست آمده از روابط ۱ و ۲ در رابطه ۴، نسبت حجمی آب مطابق رابطه ۵ محاسبه می گردد:

$$\theta(\%) = \frac{100}{\sum_{water} L_{brick}} \ln\left(\frac{I_{brick}}{I_{wetbrick}}\right) \quad (5)$$

در این رابطه L_{brick} و \sum_{water} اعداد ثابت در طول آزمایش می باشند که به ترتیب برابر با ضخامت نمونه (۱۱/۵ mm) و سطح مقطع ماکروسکوپی کل برهم کنش نوترون های حرارتی با آب (0.33 mm^{-1}) هستند [۱۰]. برای تعیین نسبت حجمی آب تبخیر شده از نمونه در هر زمان، کافی است نسبت حجمی آب نمونه مرطوب در هر زمان دلخواه را از نسبت حجمی آب نمونه مرطوب اولیه کم کرد. نسبت حجمی آب تبخیر شده از نمونه در هر زمان از رابطه ۶ محاسبه می شود:

اما حذف نوسانات باریکه به صورت فیزیکی امکان پذیر نیست و بنابراین باید به صورت نرم افزاری انجام شود. بدین منظور یک ناحیه از هر تصویر، که نمونه اصلی در آن موجود نباشد، انتخاب شده و میانگین مقادیر پیکسل های موجود در آن محاسبه می شود. سپس تمام مقادیر پیکسل های تصویر بر مقدار میانگین ناحیه انتخاب شده تقسیم می گردد. ناحیه انتخاب شده در تمام تصاویر باید مشابه باشد. کلیه عملیات پردازشی روی تصاویر اعم از رفع نقوص دوربین CCD و صفحه سوسوزن، حذف نوسانات شدت باریکه، حذف نویزهای نقطه ای و ... با استفاده از نرم افزار MATLAB انجام گرفته است.

۲.۲ محاسبه مقدار آب تبخیر شده

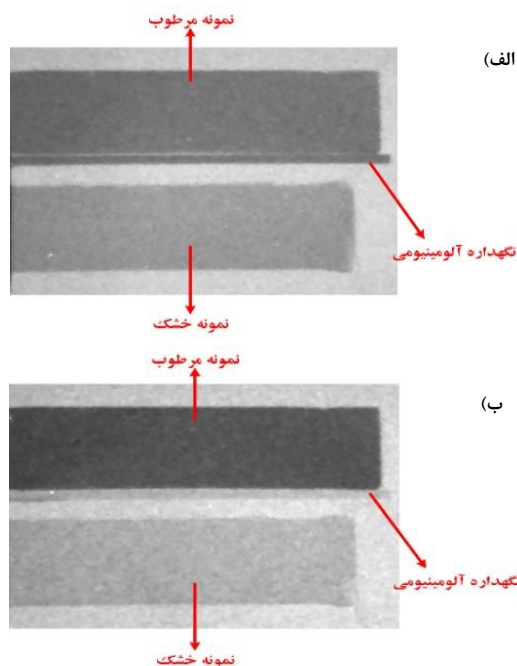
با استفاده از تکنیک پرتونگاری نوترونی می توان نسبت حجم آب به حجم یک نمونه متخلخل را با مقایسه نسبی تصویر ثبت شده نمونه کاملاً خشک و نمونه دارای رطوبت در هر زمان محاسبه نمود. نحوه محاسبه نسبت حجمی آب در ادامه توضیح داده شده است. شدت ثبت شده نمونه دارای رطوبت و شدت ثبت شده نمونه خشک به ترتیب از روابط ۱ و ۲ محاسبه می شوند:

$$I_{wetbrick} = I \cdot e^{-(\sum_{water} X_{water} + \sum_{brick} L_{brick})} \quad (1)$$

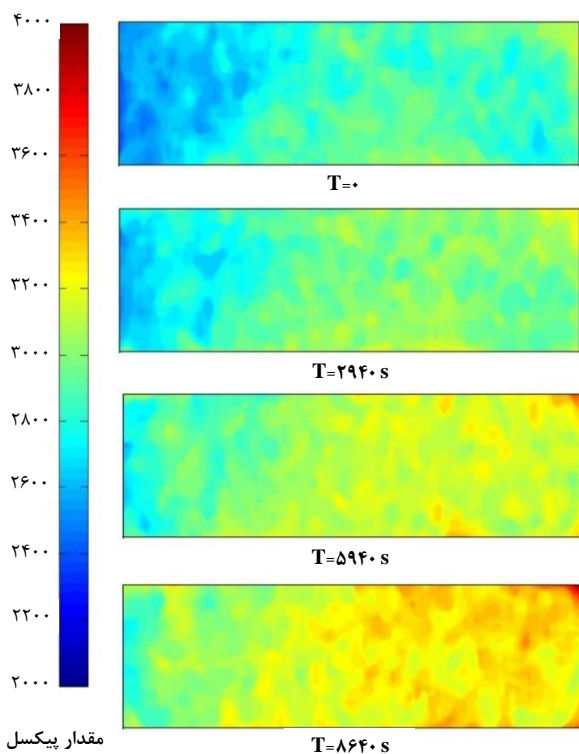
$$I_{brick} = I \cdot e^{-(\sum_{brick} L_{brick})} \quad (2)$$

در این روابط $I_{wetbrick}$ ، I_{brick} ، \sum_{water} ، \sum_{brick} و X_{water} به ترتیب شدت ثبت شده نمونه دارای رطوبت، شدت ثبت شده نمونه خشک، سطح مقطع ماکروسکوپی آب، سطح مقطع ماکروسکوپی نمونه خشک، ضخامت آب موجود در نمونه و ضخامت نمونه خشک می باشند. نسبت حجمی آب موجود در نمونه نیز طبق رابطه ۳ محاسبه می گردد:

زمان ۲۹۴۰، ۵۹۴۰ و ۸۶۴۰ ثانیه پس از آغاز تصویربرداری به صورت نمونه نشان داده شده است.



شکل ۴. تصویر پرتونگاره نوترونی از یک آجر کاملاً خشک در کنار یک آجر کاملاً مرطوب: الف) تصویر حاصل از صفحه $Gd_2O_3S:Tb$ ب) تصویر حاصل از صفحه $LiF-ZnS:Cu$.



شکل ۵. تصویر پرتونگاره نوترونی ثبت شده از نمونه مرطوب در زمان های ۰، ۲۹۴۰، ۵۹۴۰ و ۸۶۴۰ ثانیه پس از شروع آزمایش.

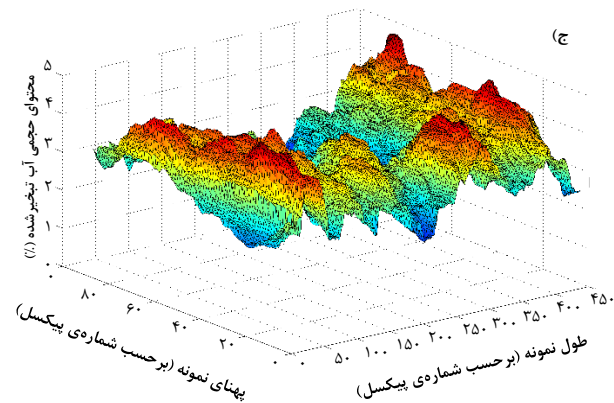
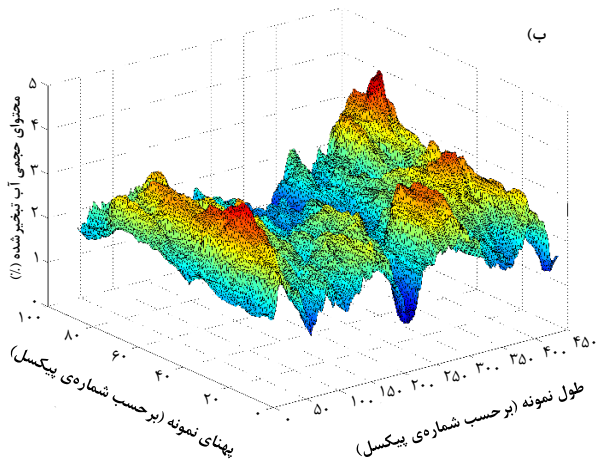
$$\theta_{wet1} - \theta_{wet2} = \frac{100}{\sum_{water} L_{brick}} \left[\ln\left(\frac{I_{brick}}{I_{wet1}}\right) - \ln\left(\frac{I_{brick}}{I_{wet2}}\right) \right] \quad (6)$$

در این رابطه I_{wet1} و I_{wet2} به ترتیب شدت ثبت شده به ازای نمونه مرطوب اولیه و شدت ثبت شده به ازای نمونه مرطوب در زمان دلخواه می باشند. در این پژوهش نمونه مرطوب اولیه همان نمونه کاملاً اشباع شده است که پس از خارج کردن از داخل آب مقابل باریکه قرار داده شد و اولین تصویر ثبت شده نیز مربوط به آن است. نسبت حجمی آب تبخیر شده در زمان های متفاوت نسبت به مقدار حجمی آب نمونه اولیه (تصویر اول) سنجیده می شود.

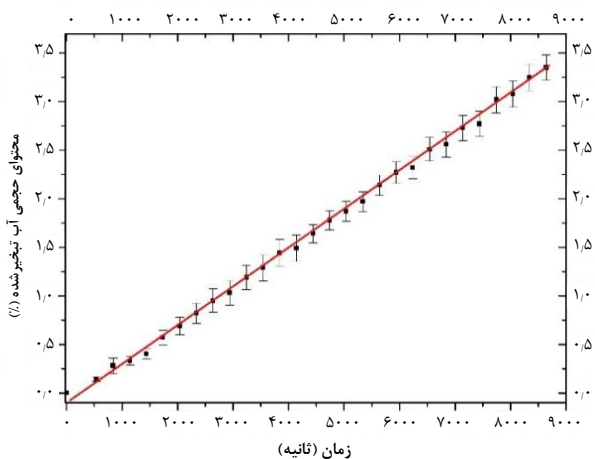
۳. بحث و نتایج

برای انتخاب صفحه سوسوزن مناسب برای انجام آزمایش ها، تصاویر حاصل از دو صفحه $LiF-ZnS:Cu$ و $Gd_2O_3S:Tb$ با یکدیگر مقایسه گردید. همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، وضوح تصویر حاصل از صفحه $Gd_2O_3S:Tb$ به دلیل ضخامت کم تر نسبت به صفحه $LiF-ZnS:Cu$ ، بهتر است. اما میزان اختلاف تباین بین دو نمونه موجود در تصویر حاصل از صفحه $LiF-ZnS:Cu$ به مراتب بیش تر از تصویر حاصل از صفحه $Gd_2O_3S:Tb$ می باشد. با توجه به هدف این پژوهش که بررسی مقدار آب تبخیر شده از نمونه است، تباین بهتر نسبت به وضوح تصویر برتری داشته و بنابراین صفحه $LiF-ZnS:Cu$ برای انجام آزمایش ها انتخاب می گردد.

پس از انتخاب صفحه مناسب، تصویربرداری از نمونه مرطوب در زمان های مختلف آغاز گردید. تصاویر به دست آمده در چهار زمان متفاوت در شکل ۵ به عنوان نمونه نشان داده شده است. برای مشاهده بهتر تغییرات شدت نسبت به زمان، تصاویر به صورت رنگی نمایش داده شده اند. همان طور که از این شکل مشاهده می شود، با گذشت زمان میزان شدت ثبت شده در تصاویر افزایش می یابد که متناسب با مقدار تبخیر آب موجود در نمونه می باشد. در این تصویر هم چنین مشاهده می شود که به علت توزیع آماری حفره ها در داخل نمونه، تجمع آب و میزان تبخیر آن در نقاط مختلف کاملاً یکنواخت نیست. میزان حجمی آب تبخیر شده از نمونه در زمان های مختلف با استفاده از رابطه ۶ محاسبه گردید. در شکل ۶ توزیع نسبت حجمی آب تبخیر شده در نقاط مختلف نمونه در ۳



شکل ۶. توزیع نسبت حجمی آب تبخیر شده در نقاط مختلف نمونه در سه زمان متفاوت پس از آغاز تصویربرداری: الف) ۲۹۴۰ s (ب) ۵۹۴۰ s (ج) ۸۶۴۰ s



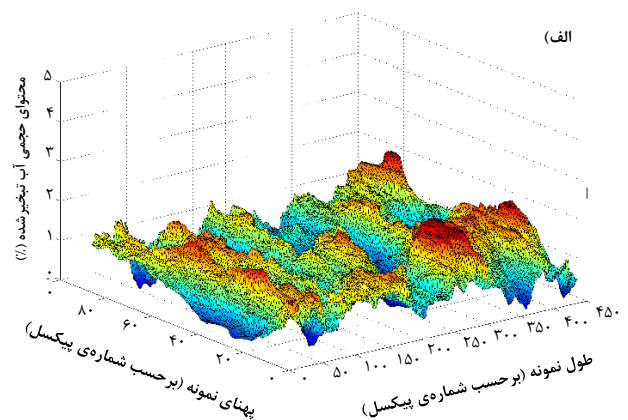
شکل ۷. تغییرات نسبت حجمی آب تبخیر شده برحسب زمان.

برای تعیین آهنگ تغییرات نسبت حجمی آب تبخیر شده نسبت به زمان، از نسبت حجمی آب تبخیر شده در هر تصویر میانگین‌گیری شد و سپس تغییرات نسبت حجمی آب تبخیر شده برحسب زمان رسم گردید. با برازش یک نمودار بر نقاط رسم شده می‌توان نتیجه گرفت که آهنگ تغییرات نسبت حجمی آب تبخیر شده در نمونه نسبت به زمان به صورت خطی است. شیب نمودار برازش خطی در شکل ۷ نشان می‌دهد که نسبت حجمی آب موجود در نمونه با آهنگ $10^{-4} \times 3,94$ درصد بر ثانیه در دمای 10°C تبخیر می‌گردد.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی روند تبخیر آب از داخل یک آجر ساختمانی (نمونه متخلخل) در دمای 10°C محیط آزمایشگاه پرداخته شد. برای این منظور ابتدا یک آجر ساختمانی به مدت ۲۴ ساعت قبل از شروع آزمایش در آب غوطه‌ور گردید. سپس نمونه کاملاً مرطوب در مقابل باریکه نوترونی قرار گرفت و با استفاده از مد متوالی، ۳۰ تصویر با فواصل زمانی ۵ دقیقه در طول ۱۴۵ دقیقه زمان فعالیت رآکتور ثبت گردید. تصاویر به دست آمده نشان داد که با استفاده از روش به کار گرفته شده، توزیع و مقدار حجمی آب در داخل نمونه به خوبی قابل مشاهده است. همچنین نتایج نشان داد که نسبت حجمی آب موجود در نمونه با آهنگ $10^{-4} \times 3,94$ درصد بر ثانیه در دمای محیط آزمایشگاه تبخیر می‌گردد.

با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان گفت که تکنیک پرتونگاری نوترونی دیجیتالی بلادرنگ روشی مناسب برای مشاهده آنلاین توزیع و همچنین بررسی روند تبخیر آب از محیط‌های متخلخل ساختمانی می‌باشد.

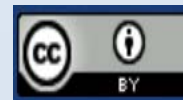


مراجع

1. R. J. Gummerson, et al., *Unsaturated water flow within porous materials observed by NMR imaging*. *Nature*, vol. **281**(5726), p.56. 1979.
2. S. S. Roels, et al., *A comparison of different techniques to quantify moisture content profiles in porous building materials*. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, vol. **27**, no. 4, pp. 261-276, 2004.
3. P.H. Baker, et al., *The application of X-ray absorption to building moisture transport studies*. *Measurement*, vol. **40** no. 9-10, pp. 951-959, 2007.
4. M.I. Nizovtsev, et al., *Determination of moisture diffusivity in porous materials using gamma-method*, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. **51**, no. 17-18, pp. 4161-4167, 2008.
5. N. Shokri, et al., *Drying front and water content dynamics during evaporation from sand delineated by neutron radiography*. *Water resources research*, vol. **44**, no. 6, 2008.
6. N. Shokri ,P. Lehmann, and D. Or, *Critical evaluation of enhancement factors for vapor transport through unsaturated porous media*. *Water resources research*, vol. **45**, no.10, 2009.
7. A.G. Abd, et al., *Neutron radiography studies of water migration in construction porous materials*. *IEEE transactions on nuclear science*, vol. **52**, no. 1, pp. 299-304. 2005.
8. N. Shokri, , P. Lehmann, and D. Or, *Characteristics of evaporation from partially wettable porous media*. *Water Resources Research*, vol. **45**, no. 2. 2009.
9. F. C. De Beer, W. J. Strydom, and E. J. Griesel, *The drying process of concrete: a neutron radiography study*. *Applied Radiation and Isotopes*, vol. **61**, no. 4, pp. 617-623. 2004.
10. A.E.G. El Abd, and J.J. Milczarek, *Neutron radiography study of water absorption in porous building materials: anomalous diffusion analysis*. *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. **37**, no.16, p.2305. 2004.
11. R. Hassanein, et al., *Investigation of water imbibition in porous stone by thermal neutron radiography*. *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. **39**, no. 19, pp. 4284, 2006.
12. M. Dinca, *Status of the Imaging Facility INUS at INR*, *Physics. Proc.*, vol. **88**, pp.167-174. 2017.
13. M. Dinca, M. Pavelescu, C. Iorgulis, *Collimated neutron beam for neutron radiography*, *Rom. Journ. Phys.*, vol. **51**, pp. 435-441, 2006.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers. •



استناد به این مقاله

احسان ناظمی، امیر موافقی، بهروز رکوک، مارین دینکا، محمدحسین چوپان دستجردی (۱۴۰۰). امکان به‌کارگیری تکنیک پرتونگاری نوترونی دیجیتال بلادرنج جهت مطالعه تبخیر آب در مواد متخلخل. ۷۷-۷۱، ۹۶، ۷۷-۷۱

DOI: [10.24200/nst.2021.1202](https://doi.org/10.24200/nst.2021.1202)

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1202.html