

اثر میدان مغناطیسی ضعیف بر ضریب نفوذ گاز رادن

یاسمن نصیرزاده^{۱*}، عباس حسینی رنجبر^۱ و علی نگارستانی^۲

^۱دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

^۲دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی کرمان، کرمان، ایران.

*شیراز، گلدشت معالی آباد، خیابان لادن، ناحیه G، بلوک ۹۳، ساختمان ۲۷۴، طبقه دوم، واحد ۳، کدپستی: ۷۱۸۸۶-۸۵۱۴۷

پست الکترونیکی: y.nasirzadeh@chmail.ir

چکیده

مطالعات بسیاری در ارتباط با عوامل مؤثر بر خروج گاز رادن به عنوان پیش‌نشانگر زلزله انجام شده است. در این مطالعه، اثر میدان مغناطیسی مورد توجه قرار گرفته است. برای این منظور، تأثیر میدان‌های مغناطیسی ضعیف (حداکثر ۴۰ گوس) از سد صافی‌های نازک از جنس کاغذ و آلومینیوم مورد آزمایش قرار گرفته است؛ به طوری که هنگام استفاده از صافی کاغذی در رطوبت کمتر از ۱۰٪، ضریب نفوذ رادن از مقدار $1.0 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$ (برای میدان مغناطیسی صفر تا مقدار $1.0 \times 10^{-7} m^2 s^{-1} \times (2/43 \pm 0/08)$) برای میدان مغناطیسی ۳۹/۵ گوس و هنگام استفاده از صافی آلومینیومی در رطوبت کمتر از ۱۰٪ از مقدار $1.0 \times 10^{-6} m^2 s^{-1} \times (1/66 \pm 0/67)$ برای میدان مغناطیسی صفر تا مقدار $1.0 \times 10^{-9} m^2 s^{-1} \times (2/20 \pm 0/77)$ برای میدان مغناطیسی ۳۹/۵ گوس به دست آمد.

کلیدواژگان: ضریب نفوذ گاز رادن، میدان مغناطیسی، صافی.

۱. مقدمه

ضریب نفوذ در مواد مختلف، تحت شرایط متفاوتی توسط پژوهشگران بررسی شده است. عوامل محیطی متعددی می‌تواند بر این ضریب مؤثر باشد. تأثیر برخی عوامل مانند دما، رطوبت، فشار و... مورد بررسی قرار گرفته است [۴-۸]. از آنجاکه این احتمال وجود دارد که میدان مغناطیسی بر ضریب نفوذ رادن تأثیر داشته باشد، پژوهشگرانی مانند فینکلشتین^۱ و همکارانش مطالعاتی در این زمینه انجام دادند و افزایش دو برابری میانگین غلظت رادن را در طول طوفان‌های الکترومغناطیسی خورشیدی مشاهده کردند و آن را عاملی محتمل و مؤثر در خروج رادن از زمین معرفی کردند؛ البته آنان بر این عقیده بودند که تغییرات غلظت رادن در یک

رابطه قوی بین تغییرات غلظت گاز رادن اطراف گسل‌ها و آب‌های زیرزمینی در هنگام زلزله، سبب شده است گاز مذکور به عنوان یکی از پیش‌نشانگرهای زلزله در نظر گرفته شود [۱-۳]. مهاجرت گاز رادن درون خاک براساس دو فرایند نفوذ مولکولی و جریان همرفتی پایش می‌شود.

نفوذ فرایندی است که به موجب آن مولکول‌ها به نواحی با غلظت کمتر حرکت می‌کنند، براساس قانون فیک، $\vec{J} = -D \nabla C$ ، بیان می‌شود. جریان همرفتی با اختلاف فشار پایش می‌شود و از قانون دارسی، $(\vec{v} = -\frac{k}{\mu} \nabla P)$ ، پیروی می‌کند که \vec{v} که سرعت انتقال، ∇P تغییرات فشار، k نفوذپذیری

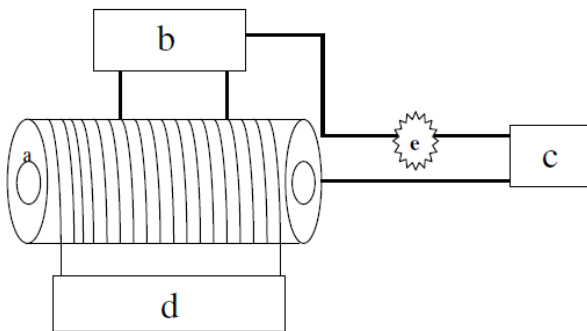
و μ ویسکوزیته یا لزجت است.

غلظت رادن نسبت به زمان و برآزش منحنی مناسب، ضریب نشت و واپاشی و سپس ضریب نفوذ رادن تعیین می‌گردد.

۳. سیستم اندازه‌گیری غلظت رادن

به منظور مطالعه اثر میدان مغناطیسی بر نفوذ رادن، استوانه‌ای از جنس تفلون به طول $65/0\text{ cm}$ و قطر داخلی و خارجی به ترتیب $4/4\text{ cm}$ و $7/1\text{ cm}$ ساخته شد. روی سطح جانبی این استوانه سه دور سیم مسی با قطر $0/6\text{ mm}$ و طول تقریبی ۶۰۰ متر پیچیده شد. در دو قاعده این استوانه، صافی‌های مختلف (مورد مطالعه) را می‌توان قرار داد.

آشکارساز مورد استفاده در این سیستم، آشکارساز فعال RAD7 است که غلظت رادن و تورون را به‌طور پیوسته و مستقل از طریق شمارش تابش‌های آلفای ناشی از این دو گاز، اندازه‌گیری و مستقیماً به علامت‌های الکتریکی تبدیل می‌کند. شکل ۱، چینش قسمت‌های مختلف اندازه‌گیری غلظت رادن استوانه را در حالت‌های مختلف اعمال میدان مغناطیسی نشان می‌دهد.



شکل ۱: سیستم اعمال میدان مغناطیسی بر گاز رادن و اندازه‌گیری غلظت آن: (a) استوانه تفلونی سیم‌پیچی شده، (b) آشکارساز RAD7، (c) چشمه تولید رادن، (d) منبع تغذیه DC و (e) پمپ هوا

۴. روش انجام آزمایش

مطابق شکل ۱، حدود ۲ کیلوگرم سنگ معدن اورانیوم به‌عنوان چشمه تولید رادن در محفظه a قرار داده شد. پمپ هوا وظیفه به‌حرکت درآوردن بهتر و یکنواخت‌تر گاز رادن را در

دوره طولانی قابل توجه است و اندازه‌گیری‌های کوتاه‌مدت، اثر برجسته‌ای را نشان نمی‌دهد [۹].

در این مقاله، تأثیر میدان مغناطیسی بر ضریب نفوذ رادن از دو نوع صافی کاغذ و آلومینیوم مورد بحث قرار گرفته است.

۲. روش اندازه‌گیری ضریب نفوذ

معادله حاکم بر نفوذ از قانون فیک پیروی می‌کند. اگر محیط همگن و تغییرات خطی باشد، این معادله به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$J = \frac{D(C - C_0)}{d} \quad (1)$$

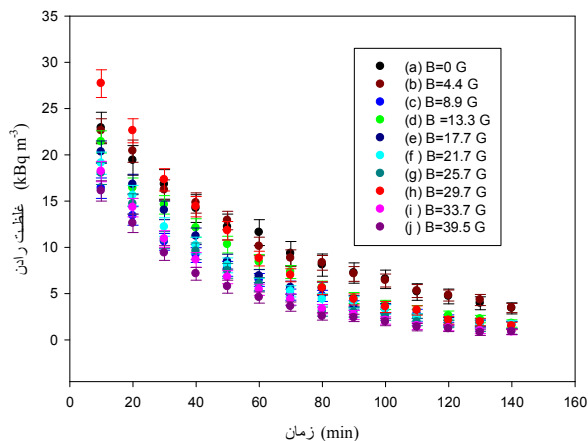
در هندسه فوق، d ضخامت صافی، C_0 غلظت اولیه رادن، C غلظت رادن در فاصله d و D ضریب نفوذ است. از طرفی، شار رادن گذرنده از استوانه با رابطه $i = \lambda_1 V (C - C_0)$ تعریف می‌شود که در آن، λ_1 ثابت نشت و واپاشی، V حجم استوانه و C غلظت رادن بر حسب $Bq\ m^{-3}$ است؛ بنابراین، رابطه چگالی جریان به رابطه زیر تبدیل خواهد شد:

$$J = \frac{\lambda_1 V (C - C_0)}{A} \quad (2)$$

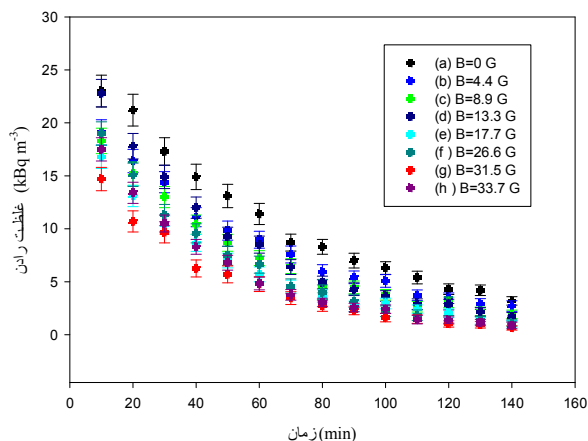
در رابطه فوق، A سطح مقطع استوانه است. با مساوی قرار دادن روابط (۱) و (۲)، ضریب نفوذ به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$D = \frac{\lambda_1 V d}{A} \quad (3)$$

روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری ضریب نفوذ گاز رادن از یک صافی، به‌کار گرفته شده است [۱۰-۱۳]. در این مطالعه، از روش نشت که به دو صورت انجام می‌پذیرد، استفاده شده است. در روش اول، ابتدا غلظت رادن محفظه مورد نظر به مقدار پیشینه رسانده می‌شود، سپس کاهش غلظت آن به‌طور پیوسته اندازه‌گیری می‌گردد؛ اما در روش دوم، با ورود رادن به محفظه خالی از رادن، افزایش غلظت آن به‌طور پیوسته اندازه‌گیری می‌شود. در هر دو مورد، با رسم نمودار، تغییرات



شکل ۲: نمودار غلظت رادن درون استوانه بر حسب زمان در میدان‌های مغناطیسی مختلف و هنگام استفاده از صافی کاغذی در رطوبت‌های کمتر از ۱۰٪: (a) بدون میدان مغناطیسی، (b) پس از اعمال میدان مغناطیسی ۸/۹ گوس، (c) پس از اعمال میدان مغناطیسی ۱۳/۳ گوس، (d) پس از اعمال میدان مغناطیسی ۱۷/۷ گوس، (e) پس از اعمال میدان مغناطیسی ۲۱/۷ گوس، (f) پس از اعمال میدان مغناطیسی ۲۵/۷ گوس، (g) پس از اعمال میدان مغناطیسی ۲۹/۷ گوس، (h) پس از اعمال میدان مغناطیسی ۳۳/۷ گوس و (i) پس از اعمال میدان مغناطیسی ۳۹/۵ گوس



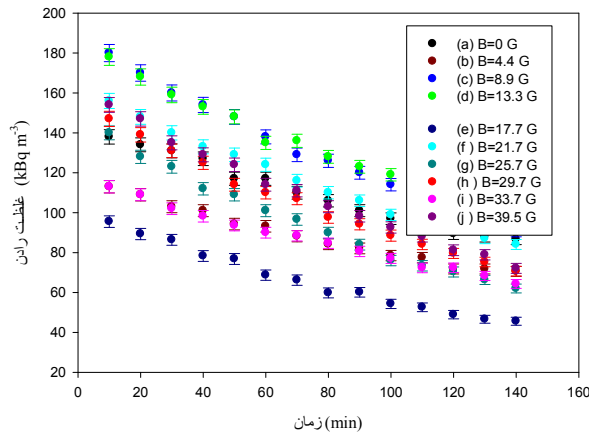
شکل ۳: نمودار غلظت رادن درون استوانه بر حسب زمان در میدان‌های مغناطیسی مختلف و هنگام استفاده از صافی کاغذی در رطوبت‌های بین ۲۰-۳۰٪: (a) بدون میدان مغناطیسی، (b) پس از اعمال میدان مغناطیسی ۸/۹ گوس، (c) پس از اعمال میدان مغناطیسی ۱۳/۳ گوس، (d) پس از اعمال میدان مغناطیسی ۱۷/۷ گوس، (e) پس از اعمال میدان مغناطیسی ۲۱/۷ گوس، (f) پس از اعمال میدان مغناطیسی ۲۵/۷ گوس، (g) پس از اعمال میدان مغناطیسی ۳۱/۵ گوس و (h) پس از اعمال میدان مغناطیسی ۳۳/۷ گوس

کل مدار به عهده دارد. صافی‌های کاغذی و آلومینیومی به ضخامت به ترتیب ۰/۷۶ mm و ۰/۰۳ mm و قطر مؤثر ۲/۵ cm در دو قاعده استوانه قرار گرفتند. آنگاه چشمه رادن به مدت ۱ ساعت در مدار سیستم توصیف‌شده قرار داده شد تا غلظت رادن به حد بیشینه خود برسد. سپس چشمه از مدار جدا شد و کاهش غلظت رادن در زمان‌های مختلف توسط آشکارساز (b)، در رطوبت‌های کمتر از ۱۰٪ و بین ۲۰٪ تا ۳۰٪ اندازه‌گیری شدند.

به منظور بررسی اثر میدان، ابتدا حالت بدون میدان مورد بررسی قرار گرفت؛ یعنی هیچ جریان الکتریکی به سیم‌پیچ محفظه استوانه‌ای اعمال نشد بدین معنی که پس از جداسازی چشمه، آشکارساز به مدت ۱۷۰ دقیقه (در فواصل ده دقیقه‌ای)، آلفاهای ناشی از رادن را شمارش کرد. سپس با اعمال میدان‌های مغناطیسی متفاوت از ۴/۴ تا ۳۹/۵ گوس ناشی از اعمال جریان‌های مستقیم از ۰/۱ تا ۰/۹ آمپر به سیم‌پیچ، اندازه‌گیری‌های غلظت رادن در محفظه استوانه‌ای انجام شد. اندازه‌گیری سه مرتبه با همان شرایط تکرار شد و در نهایت پس از میانگین‌گیری، محاسبات خطا انجام شد.

۵. نتایج و بحث

شکل‌های ۲، ۳ و ۴ تغییرات غلظت رادن درون استوانه بر حسب زمان را در میدان‌های مغناطیسی مختلف و در رطوبت‌های متفاوت هنگام بکار بردن صافیهای کاغذی و آلومینیومی نشان می‌دهد.



شکل ۴: نمودار غلظت رادن درون استوانه بر حسب زمان در میدان‌های مغناطیسی مختلف و هنگام استفاده از صافی آلومینیومی در رطوبت‌های کمتر از ۱۰٪: (a) بدون میدان مغناطیسی، (b) پس از اعمال میدان مغناطیسی ۸/۹ گوس، (c) پس از اعمال میدان مغناطیسی ۸/۹ گوس، (d) پس از اعمال میدان مغناطیسی ۱۳/۳ گوس، (e) پس از اعمال میدان مغناطیسی ۱۷/۷ گوس، (f) پس از اعمال میدان مغناطیسی ۲۱/۷ گوس، (g) پس از اعمال میدان مغناطیسی ۲۵/۷ گوس، (h) پس از اعمال میدان مغناطیسی ۲۹/۷ گوس، (i) پس از اعمال میدان مغناطیسی ۳۳/۷ گوس، و (j) پس از اعمال میدان مغناطیسی ۳۹/۵ گوس.

در جداول زیر، میانگین ضریب نشت و واپاشی تعیین شده برای تمامی نمودارها ذکر شده و سپس با استفاده از رابطه (۳)، ضریب نفوذ مربوطه محاسبه شده است.

جدول ۱: ضرایب نشت و نفوذ گاز رادن از صافی کاغذی در رطوبت‌های کمتر از ۱۰٪ و میدان‌های مغناطیسی متفاوت

میدان اعمالی (G)	میانگین ضریب نشت کل $(\bar{\lambda}_t)$ (min^{-1})	ضریب نفوذ $(m^2 s^{-1})$
$B = 0$	$(1/48 \pm 0.04) \times 10^{-2}$	$(1/45 \pm 0.04) \times 10^{-7}$
$B = 4/4$	$(1/55 \pm 0.09) \times 10^{-2}$	$(1/52 \pm 0.09) \times 10^{-7}$
$B = 8/9$	$(1/87 \pm 0.04) \times 10^{-2}$	$(1/84 \pm 0.05) \times 10^{-7}$
$B = 13/3$	$(1/98 \pm 0.11) \times 10^{-2}$	$(1/95 \pm 0.11) \times 10^{-7}$
$B = 17/7$	$(2/0.3 \pm 0.02) \times 10^{-2}$	$(2/0.0 \pm 0.03) \times 10^{-7}$
$B = 21/7$	$(2/13 \pm 0.03) \times 10^{-2}$	$(2/10 \pm 0.04) \times 10^{-7}$
$B = 25/7$	$(2/19 \pm 0.08) \times 10^{-2}$	$(2/15 \pm 0.08) \times 10^{-7}$
$B = 29/7$	$(2/28 \pm 0.03) \times 10^{-2}$	$(2/24 \pm 0.04) \times 10^{-7}$
$B = 33/7$	$(2/43 \pm 0.01) \times 10^{-2}$	$(2/39 \pm 0.03) \times 10^{-7}$
$B = 39/5$	$(2/47 \pm 0.07) \times 10^{-2}$	$(2/43 \pm 0.08) \times 10^{-7}$

جدول ۲: ضریب نشت و نفوذ گاز رادن از صافی کاغذی در رطوبت‌های بین ۲۰-۳۰٪ و میدان‌های مغناطیسی متفاوت

میدان اعمالی (G)	میانگین ضریب نشت کل $(\bar{\lambda}_T)$ (min^{-1})	ضریب نفوذ $(m^2 s^{-1})$
$B = 0$	$(1/49 \pm 0/10) \times 10^{-2}$	$(1/47 \pm 0/10) \times 10^{-9}$
$B = 4/4$	$(1/63 \pm 0/06) \times 10^{-2}$	$(1/60 \pm 0/06) \times 10^{-9}$
$B = 8/9$	$(1/75 \pm 0/05) \times 10^{-2}$	$(1/72 \pm 0/05) \times 10^{-9}$
$B = 13/3$	$(1/99 \pm 0/18) \times 10^{-2}$	$(1/96 \pm 0/18) \times 10^{-9}$
$B = 17/7$	$(1/98 \pm 0/12) \times 10^{-2}$	$(1/95 \pm 0/12) \times 10^{-9}$
$B = 26/6$	$(2/29 \pm 0/07) \times 10^{-2}$	$(2/25 \pm 0/08) \times 10^{-9}$
$B = 31/5$	$(2/40 \pm 0/03) \times 10^{-2}$	$(2/36 \pm 0/04) \times 10^{-9}$
$B = 33/7$	$(2/48 \pm 0/04) \times 10^{-2}$	$(2/44 \pm 0/05) \times 10^{-9}$

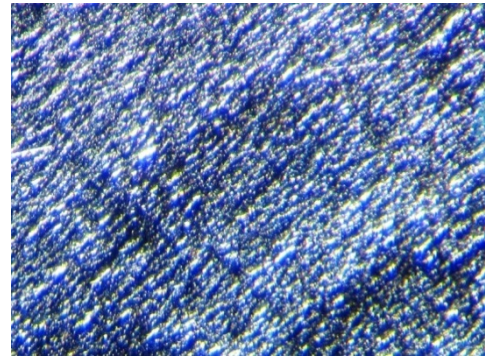
جدول ۳: ضریب نشت و نفوذ گاز رادن از صافی آلومینیومی در رطوبت‌های کمتر از ۱۰٪ و میدان‌های مغناطیسی متفاوت

میدان اعمالی (G)	میانگین ضریب نشت کل $(\bar{\lambda}_T)$ (min^{-1})	ضریب نفوذ $(m^2 s^{-1})$
$B = 0$	$(4/1 \pm 0/4) \times 10^{-3}$	$(1/66 \pm 0/67) \times 10^{-9}$
$B = 4/4$	$(2/6 \pm 1/1) \times 10^{-3}$	$(1/03 \pm 0/66) \times 10^{-9}$
$B = 8/9$	$(2/8 \pm 2/1) \times 10^{-3}$	$(1/11 \pm 0/91) \times 10^{-9}$
$B = 13/3$	$(4/6 \pm 0/2) \times 10^{-3}$	$(1/86 \pm 0/62) \times 10^{-9}$
$B = 17/7$	$(4/1 \pm 2/3) \times 10^{-3}$	$(1/66 \pm 1/10) \times 10^{-9}$
$B = 21/7$	$(4/9 \pm 0/1) \times 10^{-3}$	$(1/99 \pm 0/66) \times 10^{-9}$
$B = 25/7$	$(4/2 \pm 2/3) \times 10^{-3}$	$(1/70 \pm 1/10) \times 10^{-9}$
$B = 29/7$	$(5/3 \pm 1/0) \times 10^{-3}$	$(2/16 \pm 0/82) \times 10^{-9}$
$B = 33/7$	$(4/1 \pm 0/2) \times 10^{-3}$	$(1/66 \pm 0/56) \times 10^{-9}$
$B = 39/5$	$(5/4 \pm 0/6) \times 10^{-3}$	$(2/20 \pm 0/77) \times 10^{-9}$

الف. اثر میدان مغناطیسی بر دوقطبی‌های صافی مورد آزمایش و در نتیجه همسو کردن آن‌ها و عبور سریع‌تر و بیشتر رادن از آن‌ها؛ اما جنس صافی‌های مورد آزمایش از مواد پارامغناطیس (آلومینیوم) و دیامغناطیس (کاغذ) است. همان‌طور که می‌دانیم دو قطبی‌های مواد پارامغناطیس تحت تأثیر میدان‌های مغناطیسی قوی همسو می‌شوند و مواد دیامغناطیس خاصیت مغناطیسی ندارند. با توجه به ضعیف بودن میدان‌های اعمال شده و افزایش ضریب نفوذ رادن از هر دو صافی (پارامغناطیس و دیامغناطیس)، به‌نظر نمی‌رسد میدان تأثیری بر همسو کردن دوقطبی‌ها داشته باشد.

ب. میدان مغناطیسی اعمالی می‌تواند بر ذرات باردار مؤثر باشد و آن‌ها را از محیط استوانه خارج کند. رادن گازی نجیب است که الکترون‌های آن جفت شده‌اند؛ اما یون رادن ایجاد شده ناشی از واپاشی ذرات آلفا توسط رادیوم از یک طرف به سرعت الکترون‌های محیط را جذب می‌کند و به اتم خنثی رادن تبدیل می‌شود و از طرف دیگر، به دلیل انرژی جنبشی ناشی از Q واکنش در محیط مقداری یون تولید می‌کند؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که میدان مغناطیسی اثری بر رادن نخواهد داشت؛ اما این امکان وجود دارد که مقداری یون در اثر حرکت هسته رادن بلافاصله پس از تولید در محیط ایجاد شود. همچنین مقداری یون در اثر واپاشی رادن‌های محیط (قبل از ورود به آشکارساز)، در محفظه استوانه ایجاد شود. نیز از سویی چون اکسیژن و نیتروژن موجود در فضای استوانه خودبه‌خود دارای مقداری یون هستند، بر اثر اعمال میدان مغناطیسی بر حجم داخل استوانه، عمده این یون‌ها از مجموعه گازهای داخل استوانه خارج می‌شوند و به دیواره‌ها برخورد می‌کنند و چگالی گاز درون استوانه کاهش می‌یابد؛ بنابراین، اتم‌های رادن مسافت بیشتری را قبل از برخورد به دیگر مولکول‌ها طی می‌کنند. به عبارتی،

اثر جنس صافی‌ها نیز از مقایسه جداول ۲، ۱ و ۳ بیانگر این است که میزان افزایش ضریب نفوذ برای صافی آلومینیومی کمتر از کاغذ است و این نتیجه با توجه به خلل و فرج صافی‌ها (شکل ۵ و ۶) منطقی به‌نظر می‌رسد.



شکل ۵: تصویرخلل و فرج صافی آلومینیومی که توسط میکروسکوپ انعکاسی ۱۲۰ برابر شده است.



شکل ۶: تصویرخلل و فرج صافی کاغذی که توسط میکروسکوپ انعکاسی ۱۲۰ برابر شده است.

نتایج به‌دست‌آمده در جداول ۲ و ۱ بیانگر افزایش تقریباً ۱/۷ برابری ضریب نفوذ گاز رادن از صافی کاغذی هنگام اعمال میدان مغناطیسی ۳۹/۵ گوسی نسبت به حالتی است که هیچ میدان مغناطیسی به سیستم اعمال نشده. همچنین جدول ۳ نشانگر افزایش ۱/۳ برابر ضریب نفوذ گاز رادن از صافی آلومینیومی، هنگام اعمال میدان ۳۳/۷ گوس نسبت به حالت عدم اعمال میدان است. این افزایش می‌تواند به دو عامل مربوط شود:

۶. نتیجه گیری

در این مقاله، تأثیر میدان مغناطیسی ضعیف بر ضریب نفوذ گاز رادن از صافی‌های نازک کاغذ و آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفته است. نتیجه آزمایش دلالت بر افزایش ضریب نفوذ این گاز هنگام اعمال میدان مغناطیسی دارد.

مسافت آزاد میانگین رادن افزایش می‌یابد و موجب افزایش نشت رادن و آنگاه افزایش ضریب نفوذ آن می‌شود.

نکته دیگر مربوط به اثر رطوبت است. مقایسه جداول ۲ و ۱ نشان می‌دهد تغییر رطوبت حدود ۲۰٪ تأثیر چشمگیری بر ضریب نفوذ گاز رادن ندارد. با توجه به جنس صافی مورد آزمایش، این اختلاف رطوبت نمی‌تواند تأثیری بر خلل و فرج صافی داشته باشد و ظاهراً تأثیر محسوسی نیز بر حرکت یون‌های درون استوانه نداشته است.

۷. مراجع

- [1] Wakita H., Igarashi G., "Groundwater radon anomalies associated with earthquakes" *Tectonophysics*, Vol. 180, No. 4, 1990, pp. 237-254.
- [2] Walia V., Yang T. F., Hong W.L., Lin S.J., Fu C.C., Wen K.L., Chen C.H., "Geochemical variation of soil-gas composition for fault trace and earthquake precursory studies along the Hsincheng fault in NW Taiwan" *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 67, No. 10, 2009, pp. 1855-1863.
- [3] Zmazek B., Italiano F., zivcic M., Vaupotic J., Kobal, I., Martinelli G., "Geochemical monitoring of thermal waters in Slovenia: relationships: relationships to seismic activity" *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 57, No. 6, 2002, pp. 919-930.
- [4] Kazuhide I., Shinsuke K., Yuji A., Vayumi H., "Measurement of Effective Diffusion Coefficient of Building Materials by Cup Method and Analysis of Temperature Dependence" *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 588, No. 588, 2005, pp. 35-40.
- [5] Chauhan R.P., Nain M., Kant K., "Radon Diffusion Studies Through Some Building Materials: Effect of Grain Size" *Radiation Measurements*, Vol. 43, 2008, pp. 445-448.
- [6] Oufni L., "Determination of the Radon Diffusion Coefficient and Radon Exhalation Rate in Moroccan Quaternary Samples Using the SSNTD Technique" *Journal of Radioanalytical and nuclear Chemistry*, Vol. 256, No. 3, 2003, pp. 581-586.
- [7] Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N., *Transport Phenomena*, Second Ed., New York, John Wiley & Sons, 1960, Chapter 17.
- [8] Jaros M., Cenkowski S., Jayas D.S., Pabis S; "A Method of Determination of the Diffusion Coefficient Based on Kernel Moisture Content and its Temperature" *Drying Technology*, Vol. 10, No. 1, 1992, pp. 213 – 222.
- [9] Finkelstein M., Brenner S., Ne'emman E., Krosnov I., "The correlation of the geomagnetic field and radon density and its relation to biological effects" *Electromagnetic Compatibility*, 1992, 3.1.4/1-3.1.4/3.
- [10] Narula A.K., Goyal S.K., Saini S., Chauhan R.P., Chakarvarti S.K., "Calculation of Radon Diffusion Coefficient and Diffusion Length for Different Building Construction Materials" *Indian Journal of Physics*, Vol. 83, No. 8, 2009, pp. 1171-1175.
- [11] Chen J., Ly J., Schroth E., Hnatiuk S., Frenette E., Blain M.F., "Radon Diffusion Coefficients of Vapour Barrier Membranes Used in Canadian Building Construction" *Radiation and Environmental Biophysics*, Vol. 48, No. 2, 2009, pp. 153-158.

- [12] Quindos Poncela L.S., Fernandez P.L., Gomez Arozamena J., Sainz Fernandez C., "A Method for Measuring Effective Radon Diffusion Coefficients in Radon Barriers by Using Modified Lucas Cells" *Radiation Measurements*, Vol. 39, No. 1, 2005, pp. 87-89.
- [13] Jiranek M., Fronka A., "New Technique for the Determination of Radon Diffusion Coefficient in Radon-Proof Membranes" *Radiation Protection Dosimetry* Vol. 130, No. 1, 2008, pp. 22-25.