



ارزیابی معادله نفوذ آب در بتن با بکارگیری نتایج حاصل از روش محفظه استوانه‌ای

محمود نادری*، علیرضا کبودان

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۳
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۹/۲۶
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۱/۰۹

کلمات کلیدی:

بتن
محفظه استوانه‌ای
نفوذپذیری
معادله انتشار دو بعدی
نسبت آب به سیمان.

خلاصه: نفوذپذیری یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر دوام سازه‌های بتنی است. لذا نفوذ آب به داخل بتن در این مقاله مورد ارزیابی قرار گرفته است. با اینکه بیشتر محققین ضریب نفوذپذیری به دست آمده از معادله یک بعدی داری را مدنظر قرار داده‌اند، در این مقاله به دلیل حرکت آب در بتن در تمامی جهات، برای اولین بار از معادله انتشار دو بعدی که بیانگر نفوذ سیال به درون جسم متخلخل است، استفاده شده است. برای این منظور نمونه‌های بتنی مکعبی با نسبت‌های آب به سیمان مختلف، تهیه و با بکارگیری روش محفظه استوانه‌ای نفوذپذیری آنها اندازه‌گیری گردید. در این روش فشارهای آب وارده به بتن و مدت زمان نفوذ آب متغیر بوده است. معادله دو بعدی مورد نظر با استفاده از تبدیلات لاپلاس و هنکل حل گردیده و نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها مقایسه شده است. متوسط خطاهای محاسبه شده برای پیش‌بینی منحنی ترشدگی، بیشینه عمق نفوذ، متوسط عمق نفوذ و سطح ترشدگی نسبت به مقادیر آزمایشگاهی به ترتیب برابر با ۲۳/۰۷، ۱۳/۶۴، ۲۱/۴۱ و ۱/۶۶ درصد مشاهده شدند. ضرایب همبستگی بین مقدار فشار و مدت زمان نفوذ آب با توجه به متغیرهای بیشینه عمق نفوذ، متوسط عمق نفوذ، سطح ترشدگی، حجم نفوذ و ضرایب انتشار بهینه بزرگ‌تر از ۰/۹۵ مشاهده گردیدند. به علاوه، رابطه‌ای با دقت بالا بین ضرایب انتشار بهینه با متغیرهای ذکر شده مشاهده نگردید.

پژوهش‌ها است [۱، ۲].

عوامل متعددی بر دوام بتن مؤثرند. این عوامل شامل عملیات ساختمانی، طراحی، خصوصیات مصالح و شرایط محیطی که بتن در آن ساخته می‌شود و محیطی که در آن بهره‌دهی می‌کند. نقص‌ها و عیوب ناشی از تأثیر این عوامل اغلب نقطه شروع زوال بتن محسوب می‌شوند. در میان عوامل مؤثر بر دوام بتن، نفوذناپذیری بتن در برابر آب، اکسیژن، کلریدها، دی اکسید کربن و سایر مواد مضر از مشخصه‌های اصلی مؤثر در پایداری بتن است که تحت تأثیر مواد تشکیل‌دهنده و روش‌های ساخت آن قرار دارد. پایداری بتن در برابر عوامل مخرب شیمیایی باید از میزان قابل قبولی برخوردار باشد تا احداث چنین سازه‌هایی توجیه گردد. لذا نفوذپذیری بتن به عنوان مهم‌ترین عامل مؤثر در دوام بتن و یا به عبارت دیگر اصلی‌ترین عامل تعیین‌کننده آسیب پذیری بتن شناخته شده است [۳، ۴].

۱- مقدمه

بتن به دلیل دارا بودن مزایای بسیار در تعداد زیادی از ساختمان‌ها و سازه‌ها به کار گرفته می‌شود. بنابراین ارزیابی مشخصات مکانیکی و دوام بتن همواره از اهمیت خاصی برخوردار بوده است. طراحی بتن بر اساس مقاومت آن، نمی‌تواند پاسخگوی مناسبی برای دوام و تأمین عمر مفیدش در محیط‌های مختلف باشد. برای مثال، در شرایطی مانند شرایط حاکم بر خلیج فارس، که در آن سازه به طور مستقیم با آب حاوی املاح در تماس است، حتی استفاده از بتن‌های با مقاومت بسیار بالا نیز نمی‌تواند تضمین‌کننده دوام و پایداری این سازه‌ها باشد. از این رو توجه به دوام بتن و عوامل مؤثر بر آن مورد توجه ویژه محققین قرار گرفته است، به گونه‌ای که محور بسیاری از تحقیقات و

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: profmahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir

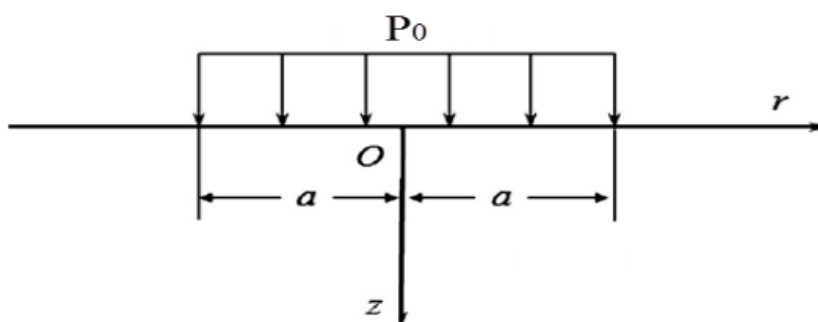


[۱۶].

همان‌گونه که در بالا اشاره گردید، از ضریب نفوذپذیری محاسبه شده با استفاده از معادله یک بعدی داری برای ارزیابی نفوذپذیری نمونه‌های بتنی استفاده می‌شود [۱۷-۲۱]. این در حالی است که نفوذ آب در یک نمونه بتنی به صورت یک بعدی صورت نگرفته و تحت اثر فشار وارده، آب از تمامی جهات به درون بتن نفوذ می‌کند. بنابراین استفاده از ضریب نفوذپذیری برای ارزیابی نفوذپذیری نمونه‌های بتنی مناسب به نظر نمی‌رسد [۱۷، ۲۲]. در نتیجه احساس می‌شود باید از معادلات و روابطی استفاده نمود که بتوان حرکت دو بعدی آب در بتن تحت فشار وارده را مدل کرد. البته معادله مورد نظر باید قادر به پیش‌بینی نفوذ آب به داخل بتن با دقت قابل قبولی باشد. معادله انتشار دو بعدی، معادله‌ای است که با وجود کاربردهای فراوان در علوم مختلف، دقت آن تاکنون در ارتباط با نفوذ آب در بتن ارزیابی نشده است و برای اولین بار در این تحقیق از این معادله جهت ارزیابی نتایج مربوط به نفوذ آب به درون جسم متخلخل بتن استفاده گردیده است. از کاربردهای این معادله در علوم مختلف می‌توان به محاسبات مربوط به نفوذ سیال به مخازن نفتی و گازی، مسائل انتقال حرارت، صنایع دارویی و انتقال مولکول‌ها در اثر گرادیان غلظت و ... اشاره کرد [۲۳-۳۱]. در تحقیقات حاضر برای اندازه‌گیری مقدار و عمق نفوذ آب به داخل بتن، از روش محفظه استوانه‌ای [۳۲] استفاده گردیده است. از مزایای این روش می‌توان به امکان انجام آزمایش هم در آزمایشگاه و هم در محل سازه اشاره کرد. همچنین با محاسبه حجم آب نفوذ کرده به داخل بتن با استفاده از نتایج آزمایش، نیازی به شکستن نمونه جهت اندازه‌گیری عمق نفوذ برای ارزیابی نفوذپذیری نمونه‌ها نیست. تحقیقاتی در زمینه نفوذپذیری بتن با استفاده از روش محفظه استوانه‌ای انجام شده است [۳۳-۳۷]. با توجه به اینکه در آیین‌نامه‌ها برای ارزیابی نفوذپذیری نمونه‌های بتنی از فشاری با مقدار ثابت که در مدت زمان مشخصی به نمونه‌های بتنی وارد شده استفاده می‌شود، در این مقاله نفوذپذیری نمونه‌های بتنی با نسبت‌های آب به سیمان مختلف تحت تأثیر آب با فشارهای وارده مختلف و مدت زمان‌های متفاوت ارزیابی شده است. داشتن این متغیرها در مقدار فشار آب و مدت‌های مختلف این امکان را فراهم می‌آورد تا علاوه بر بررسی تأثیر آنها بر نتایج به دست آمده، تأثیر این تغییرات بر دقت معادله انتشار نیز ارزیابی گردد.

معمولاً ارزیابی نفوذپذیری بتن به دو روش جریان با دبی ثابت و اندازه‌گیری عمق نفوذ انجام می‌گیرد. در روش جریان ثابت با اعمال آب دارای فشار بر روی نمونه، جریان با دبی ثابتی در آن برقرار می‌گردد. هنگامی که جریان آب با نرخ ثابت در نمونه حاصل شد، می‌توان ضریب نفوذپذیری را با استفاده از رابطه داری محاسبه نمود. برای اطمینان از به وجود آمدن جریان با دبی ثابت، باید تمام منافذ موجود در نمونه با آب پر شود. چنین جریانی در نمونه‌های بتنی با نفوذپذیری بسیار کم یا ایجاد نمی‌شود، و یا به مدت زمان بسیاری برای به وجود آمدن آن نیاز است. برای کوتاه کردن مدت زمان انجام آزمایش با استفاده از این روش، پیشنهاد شده است که فشار آب افزایش یابد. احتمال نشت آب در محل تماس بین نمونه و دستگاه آزمایش در اثر اعمال فشار زیاد بیشتر خواهد شد که این نشتی بر روی نتایج نهایی حاصل از آزمایش تأثیرگذار است. همچنین به دلیل طولانی بودن مدت زمان لازم برای رسیدن به جریان با دبی ثابت، به دلیل تداوم هیدراسیون، خصوصاً در سن‌های اولیه نمونه، ساختار منافذ آن تغییر یافته که منجر به تغییر در نفوذپذیری نمونه خواهد شد [۵-۱۳].

از آنجا که آزمایش‌های نفوذپذیری در برابر آب با استفاده از روش جریان با دبی ثابت با چالش‌های فراوانی همراه است، در برخی کشورهای اروپایی مانند آلمان، آزمایش نفوذ آب تحت فشار، در مدت زمان معینی از طریق اندازه‌گیری عمق آب نفوذ کرده در بتن انجام می‌گیرد (DIN ۱۰۴۸-۵-۱۹۹۱) [۱۴]. در این روش، انتهای نمونه بتنی تحت فشار ثابتی قرار گرفته و حجم آب نفوذ کرده به نمونه یا متوسط عمق نفوذ آب پس از شکستن نمونه به عنوان معیاری برای تعیین نفوذپذیری در نظر گرفته می‌شود. در استاندارد بریتانیا (BS EN ۱۲۳۹۰-۸) با تغییرات مختصر، این آزمایش با سهولت بیشتر ارائه شده است که در آن نمونه بتنی به مدت سه روز از سطح زیرین تحت فشار آب برابر با ۵ بار قرار گرفته و سپس حداکثر عمق نفوذ آب اندازه‌گیری می‌شود و از آن برای ارزیابی نفوذپذیری بتن استفاده می‌گردد [۱۵]. طبقه‌بندی کیفیت بتن در برابر نفوذ آب در آزمایش DIN ۱۰۴۸-۵ آمده است، اما هنوز طبقه‌بندی مشخصی برای این آزمایش براساس استاندارد بریتانیا ارائه نشده است. مناسب‌تر است که از روش جریان ثابت برای بتن‌های با نفوذپذیری زیاد و از روش اندازه‌گیری عمق نفوذ برای بتن‌های با نفوذپذیری کم استفاده شود



شکل ۱. جسم نیمه‌بینهایت تحت فشار اعمالی P_0

Fig. 1. A semi-infinite medium under an applied pressure of P_0

۲- معادله انتشار

$$P(r, 0, t) = P_0 H(t) H(a - r) \quad (t \geq 0, r \geq 0) \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial P}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (3)$$

$$\lim_{r \rightarrow +\infty} P = \lim_{r \rightarrow +\infty} rP = \lim_{r \rightarrow +\infty} r \frac{\partial P}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

$$\lim_{z \leftarrow +\infty} P = 0 \quad (5)$$

$$P(r, z, 0) = \frac{\partial P}{\partial t}(r, z, 0) = 0 \quad (6)$$

با استفاده از تبدیل لاپلاس نسبت به زمان در طرفین معادلات بالا، معادلات (۷) تا (۱۰) حاصل می‌شوند:

$$s \tilde{P} = \left(\beta_r \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \beta_r / r \cdot \frac{\partial}{\partial r} \right) \tilde{P} + \beta_z \frac{\partial^2 \tilde{P}}{\partial z^2} \quad (7)$$

$$\tilde{P}(r, 0, s) = \frac{P_0}{s} H(a - r) \quad (8)$$

$$\left. \frac{\partial \tilde{P}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \lim_{r \rightarrow +\infty} \tilde{P} = \lim_{r \rightarrow +\infty} r \tilde{P} = \lim_{r \rightarrow +\infty} r \frac{\partial \tilde{P}}{\partial r} = 0 \quad (9)$$

$$\lim_{z \rightarrow +\infty} \tilde{P} = 0 \quad (10)$$

که در آن \tilde{P} تبدیل لاپلاس فشار است. دو عبارت اول سمت راست معادله (۷) پس از تبدیل هنکل به صورت زیر نوشته می‌شود:

معادله انتشار که نفوذ سیال در جسم متخلخل را بیان می‌کند، بر اساس قانون بقای جرم به دست می‌آید [۳۸]. این اصل بیان می‌کند که نرخ افزایش جرم داخل حجم کنترل به علاوه نرخ خالص خروجی جرم از حجم کنترل صفر است. معادله انتشار دو بعدی به شکل زیر است:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \beta_r \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \beta_r / r \cdot \frac{\partial p}{\partial r} + \beta_z \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \quad (1)$$

که در آن P فشار (N/m^2)، t زمان (s)، β_r و β_z نیز به ترتیب ضرایب انتشار (s/m^2) در دو جهت r و z (شعاعی و قائم) هستند.

۲-۱ حل معادله انتشار دو بعدی

با توجه به این نکته که آب تحت فشار از وجوه اطراف نمونه بتنی به بیرون نشت پیدا نمی‌کند، نمونه بتنی را می‌توان به صورت یک جسم نیمه بینهایت در نظر گرفت. این جسم نیمه بینهایت بتنی تحت فشار اعمالی P_0 در شکل ۱ نشان داده شده است. حل تحلیلی معادله انتشار دو بعدی برای یک جسم نیمه بینهایت توسط محققین برای ضرایب انتشار برابر با یک انجام شده است [۳۹]. در این مقاله با استفاده از حل مذکور، حل تحلیلی این معادله با در نظر گرفتن ضرایب انتشار بهینه β_r و β_z ارائه شده است. شرایط مرزی و اولیه جسم نیمه بینهایت نشان داده شده در شکل ۱ به صورت روابط (۲) تا (۶) نوشته می‌شوند:

$$P(r, z, t) = L^{-1} \left[H_0^{-1} \left[\hat{P}(\zeta, z, s) \right] \right] \\ = H_0^{-1} \left[L^{-1} \left[\hat{P}(\zeta, z, s) \right] \right] \quad (16)$$

$$L^{-1} \left[\hat{P}(\zeta, z, s) \right] = \frac{P_0 a J_1(a\zeta)}{\zeta} g_0(\zeta, z, s) \\ g_0(\zeta, z, s) = L^{-1} \left[\frac{e^{-z \sqrt{\frac{s + \beta_r \zeta^2}{\beta_z}}}}{s} \right] = \quad (17)$$

$$\frac{1}{2} \left(e^{\sqrt{\frac{\beta_r}{\beta_z}} \zeta z} \operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{\beta_z t}} + \zeta \sqrt{\beta_r t} \right) + e^{-\sqrt{\frac{\beta_r}{\beta_z}} \zeta z} \operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{\beta_z t}} - \zeta \sqrt{\beta_r t} \right) \right)$$

$$P(r, z, t) = H_0^{-1} \left[L^{-1} \left[\hat{P}(\zeta, z, s) \right] \right] \\ = P_0 a \int_0^{+\infty} g_0(\zeta, z, t) J_1(a\zeta) J_0(r\zeta) d\zeta \quad (18)$$

با استفاده از معادله (۱۸)، مقدار فشار P در هر نقطه به مختصات (r, z) به دست می‌آید. نقاطی از محیط نیمه‌بینهایت که در آنها مقدار فشار بسیار ناچیز است، به عنوان بیشینه عمق نفوذ در نظر گرفته می‌شوند. با پیدا کردن این نقاط می‌توان منحنی ترشدگی را به دست آورد.

۳- روش محفظه استوانه‌ای [۳۲]

از این روش برای اندازه‌گیری نفوذپذیری سایر مصالح مانند آجر، ملات، سنگ و ... نیز استفاده می‌شود. از مزیت‌های این روش نسبت به روش‌های دیگر اندازه‌گیری نفوذپذیری مانند روش موجود در استاندارد بریتانیا، می‌توان به ارائه نتایج به صورت کمی اشاره کرد. در این روش، پس از زدودن آلودگی‌های سطحی، صفحه پایه توسط چسب اپوکسی بر روی سطح نمونه چسبانده می‌شود و پس از سخت شدن آن، دستگاه آزمایش بر روی صفحه پایه تثبیت می‌شود. سپس محفظه استوانه‌ای دستگاه را با آب پر نموده و با استفاده از اهرم دستی، فشار مورد نظر را به آب محفظه اعمال می‌کنیم (شکل ۲). مقدار نفوذ مایع در بتن را می‌توان از طریق میکرومتر تعبیه شده بر

$$H_0 \left(\beta_r \frac{\partial^2 \tilde{P}}{\partial r^2} + \beta_r / r \cdot \frac{\partial \tilde{P}}{\partial r} \right) = \\ H_0 \left(\beta_r / r \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \tilde{P}}{\partial r} \right) \right) = \int_0^{+\infty} \beta_r \frac{\partial}{\partial r} \\ \left(r \frac{\partial \tilde{P}}{\partial r} \right) J_0(\zeta r) dr = \left[\beta_r r \frac{\partial \tilde{P}}{\partial r} J_0(\zeta r) \right]_{r=0}^{r=+\infty} \quad (11)$$

$$- \left[\beta_r r \tilde{P} \frac{\partial J_0}{\partial r} \right]_{r=0}^{r=+\infty} + \beta_r \int_0^{+\infty} \tilde{P} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial J_0}{\partial r} \right) dr$$

که در آن J_0 تابع بسل از مرتبه صفر است. آخرین عبارت معادله (۱۱) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\beta_r \int_0^{+\infty} \tilde{P} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial J_0}{\partial r} \right) dr \\ = -\beta_r \zeta^2 \int_0^{+\infty} \tilde{P} r J_0(\zeta r) dr = -\beta_r \zeta^2 \hat{P} \quad (12)$$

که در آن $\hat{P} = \hat{P}(\zeta(z, s))$ تبدیل هنکل تابع $\tilde{P} = \tilde{P}(r, z, s)$ است. با استفاده از معادله (۹)، شکل نهایی معادله (۱۱) به صورت زیر خواهد بود:

$$H_0 \left(\beta_r \frac{\partial^2 \tilde{P}}{\partial r^2} + \beta_r / r \cdot \frac{\partial \tilde{P}}{\partial r} \right) = -\beta_r \zeta^2 \hat{P} \quad (13)$$

بنابراین تبدیل هنکل معادله (۷) با استفاده از شرایط مرزی ذکر شده به صورت معادله (۱۴) نوشته خواهد شد:

$$\beta_z \frac{\partial^2 \hat{P}}{\partial z^2} - (s + \beta_r \zeta^2) \hat{P} = 0 \quad (14)$$

با حل معادله دیفرانسیل معمولی (۱۴)، جواب تحلیلی مطابق رابطه (۱۵) به دست خواهد آمد:

$$\hat{P}(\zeta, z, s) = \frac{P_0 a J_1(a\zeta)}{\zeta} \frac{e^{-z \sqrt{\frac{s + \beta_r \zeta^2}{\beta_z}}}}{s} \quad (15)$$

که در آن J_1 تابع بسل از مرتبه اول است. جواب معادله (۱) با استفاده از تبدیل معکوس هنکل معادله (۱۵) و سپس تبدیل معکوس لاپلاس از حل به دست آمده محاسبه خواهد شد.



شکل ۲. دستگاه و آزمایش "محفظه استوانه‌ای" [۳۲]

Fig. 2. "Cylindrical chamber" apparatus and test; a) Splitting the concrete sample in two halves, b) Implementation of "Cylindrical chamber" test, c) "Cylindrical chamber" apparatus, d) Concrete sample split in halves



شکل ۳. طول مقیاس و سطح ترشدگی برای نمونه بتنی شکسته شده پس از اتمام آزمایش نفوذپذیری با استفاده از روش "محفظه استوانه‌ای" [۳۲].

Fig. 3. Scale length and wet surface for a concrete sample split in halves after completion of permeability test using "Cylindrical chamber" method

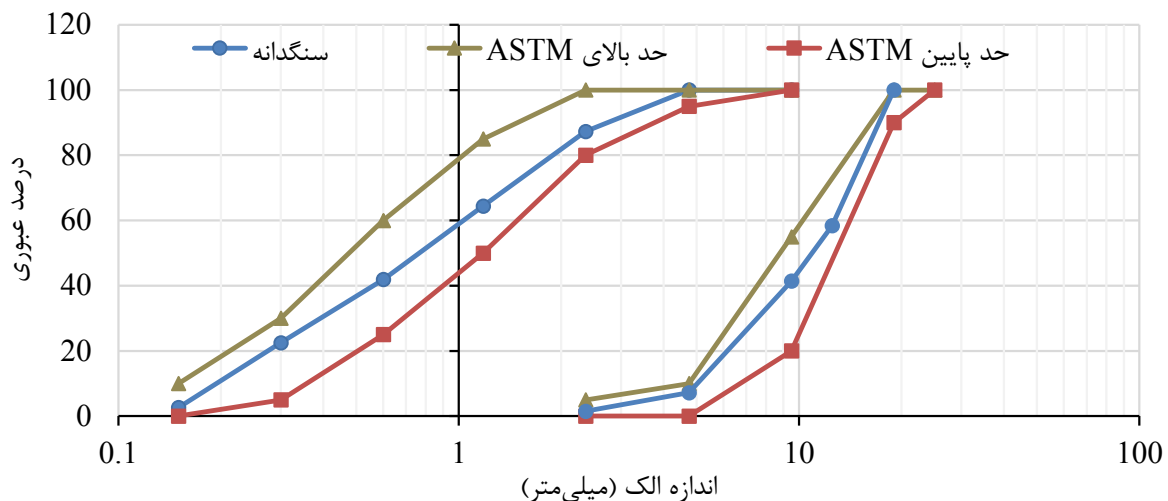
با استفاده از برنامه آنالیز عکس، مرز بین سطح تر و خشک توسط نقاطی مشخص می‌گردد. در نتیجه منحنی ترشدگی و ارتفاع نفوذ آب در نقاط مختلف نسبت به مبدأ دلخواه تعریف شده در عکس و بر اساس طول مقیاس به دست می‌آید. سطح منحنی محدود به نقاط مذکور برابر با سطح ترشدگی است که توسط نرم‌افزار مقدار آن قابل محاسبه است. بیشینه ارتفاع نفوذ آب در نمونه نیز می‌تواند به عنوان شاخصی برای ارزیابی نفوذپذیری نمونه‌های بتنی استفاده شود. برای اندازه‌گیری بیشینه عمق نفوذ، خطی عمود بر سطح نمونه به سمت بیشینه ارتفاع ترشدگی توسط نرم‌افزار رسم می‌شود. طول این خط که توسط نرم‌افزار محاسبه می‌گردد، برابر است با بیشینه عمق نفوذ. این طول در شکل ۳ نشان داده شده است.

۴- مراحل انجام آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها، از نمونه‌های بتنی مکعبی ۲۸ روزه با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. سیمان مورد استفاده از شرکت آبیگ قزوین با نرمی برابر با 30.81 gr/cm^2 و چسب اپوکسی از شرکت مقاوم تدبیر قشم تهیه گردید. مشخصات این چسب در مرجع [۴۱] قابل مشاهده است. از آب شرب شهر قزوین نیز برای ساخت نمونه‌های بتنی استفاده شد.

روی دستگاه در زمان‌های مختلف قرائت کرد. مقدار حجم آب نفوذ کرده در نمونه در هر لحظه از زمان نیز از طریق حاصل ضرب مقدار قرائت شده از میکرومتر در سطح مقطعی که فشار به آن وارد می‌شود محاسبه می‌گردد. همچنین با استفاده از حجم آب نفوذ کرده در نمونه بتنی و مدت زمان نفوذ آب، متوسط نرخ نفوذ آب به داخل نمونه قابل محاسبه است. یادآور می‌شود که در روش‌های آزمایشگاهی موجود برای ارزیابی نفوذپذیری بتن مانند روش ذکر شده در استاندارد بریتانیا بدون تعبیه تجهیزات جانبی اضافی، این متغیرها قابل محاسبه نیستند که از مزیت‌های روش "محفظه استوانه‌ای" است.

پس از اتمام آزمایش، نمونه بتنی با استفاده از جک فشاری به دو قسمت تقسیم می‌شود (شکل ۲). بلافاصله پس از دو نیم کردن نمونه، از مقطع شکسته شده به منظور تعیین منحنی و سطح تر شده، عکس برداری می‌شود. در این مقاله برای این منظور از برنامه آنالیز تصویر ImageJ استفاده گردیده است [۴۰]. همان‌گونه که در شکل ۳ دیده می‌شود، از یک کولیس برای تعیین طول مقیاس جهت محاسبه سطح مقطع تر شده در عکس استفاده شده است (در شکل ۳، سه سانتی‌متر روی کولیس مشخص گردیده و طول آن به عنوان ورودی به برنامه آنالیز عکس داده شده است). فواصل بین دو نقطه دلخواه در عکس نسبت به این طول تعیین می‌گردد. سپس



شکل ۴. منحنی‌های دانه‌بندی سنگدانه‌ها.
Fig. 4. Grading curves of aggregates

جدول ۱. متغیرها، مقادیر انتخابی برای آنها و دلایل انتخاب این مقادیر برای ارزیابی تأثیر آنها بر نتایج حاصل از آزمایش نفوذپذیری

Table 1. Parameters and chosen magnitudes for them and the reason for choosing these magnitudes to evaluate their effects on the results obtained from permeability test

متغیر	مقادیر انتخابی برای متغیر موردنظر	دلیل انتخاب متغیر
نسبت آب به سیمان	۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶	با توجه به اینکه این مقادیر در اکثر تحقیقات متعارف در زمینه بتن انتخاب می‌شوند، از این مقادیر برای بررسی اثر نسبت آب به سیمان بر نتایج نفوذپذیری استفاده شده است.
مقدار فشار آب وارده	۰/۱۵، ۰/۲۵، ۰/۵۰، ۰/۷۵ و ۰/۹۵ مگاپاسکال	با توجه به اینکه در استانداردها از فشاری برابر با ۰/۵ مگاپاسکال برای ارزیابی نفوذپذیری نمونه‌های بتنی استفاده می‌شود، در این تحقیقات از دو فشار کوچکتر از ۰/۵ مگاپاسکال و دو فشار بزرگتر از ۰/۵ مگاپاسکال استفاده شده است. همچنین دقت معادله انتشار در نفوذ آب بتن برای این فشارها ارزیابی شده است.
مدت زمان نفوذ آب	۰/۵، ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ ساعت	از مقادیر انتخابی جهت بررسی اثر مدت زمان اعمال فشار بر نتایج نفوذپذیری استفاده شده است. دقت معادله انتشار در نفوذ آب به بتن در این مدت زمان‌ها نیز ارزیابی شده است.

جدول ۲. طرح اختلاط و مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های بتنی

Table 2. Mix design and compressive strength of 28-day concrete samples

نسبت آب به سیمان	سیمان (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	شن (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)
۰/۴	۳۶۰	۱۴۴	۱۲۴۰	۶۰۵	۴۷/۸۳
۰/۵	۳۶۰	۱۸۰	۱۲۴۰	۶۰۵	۳۶/۱۴
۰/۶	۳۶۰	۲۱۶	۱۲۴۰	۶۰۵	۲۸/۹۴

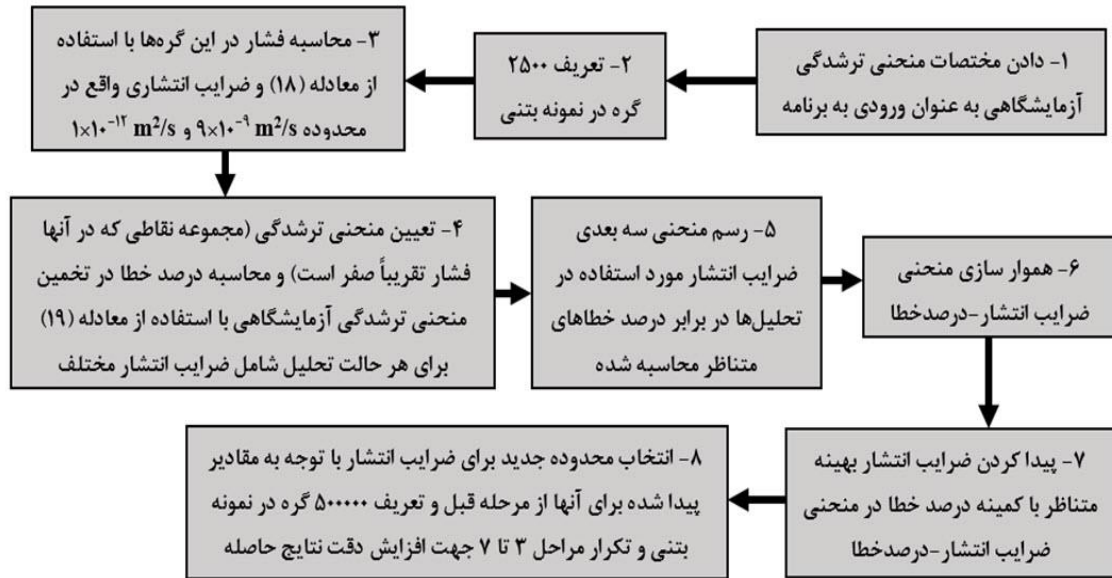
جدول ۳. ترکیب شیمیایی سیمان پرتلند تیب ۲ استفاده شده برای ساخت نمونه‌های بتنی

Table 3. Chemical composition of type II Portland cement used for preparing the concrete samples

نوع ترکیب	L.O.I	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	Cao	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
درصد وزنی	۱/۸۸	۱/۸۹	۰/۶۸	۰/۳۷	۳/۲۲	۶۲/۲۸	۳/۸۶	۴/۷۶	۲۰/۷۹

بتنی به کار گرفته شده است. متغیرهای مدنظر قرار داده شده عبارتند از W/C، فشار آب و زمان انجام آزمایش. مقادیر انتخابی برای این متغیرها و دلایل انتخاب آنها در جدول ۱ نشان داده شده است. طرح اختلاط، مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های بتنی و آنالیز ترکیبات شیمیایی سیمان مصرفی نیز به ترتیب در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است.

pH این آب برابر با ۷/۵، سختی کل ۲۴۱ میلی‌گرم بر لیتر، مقدار کلرید ۲۱/۶۰ میلی‌گرم بر لیتر و مقدار سولفات آن ۸۴/۷۵ میلی‌گرم بر لیتر است که در محدوده مقادیر مجاز ذکر شده در BS EN 1008:2002 قرار دارد [۴۲]. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر در شکل ۴ نشان داده شده است. میانگین نتایج ۲ آزمایش برای محاسبه نفوذپذیری نمونه‌های



شکل ۵. نحوه محاسبه ضرایب انتشار بهینه

Fig. 5. Procedure of optimum diffusion coefficients calculation

۵- تحلیل و بررسی نتایج

۵-۱- ارزیابی دقت معادله انتشار دو بعدی در نفوذ آب به بتن

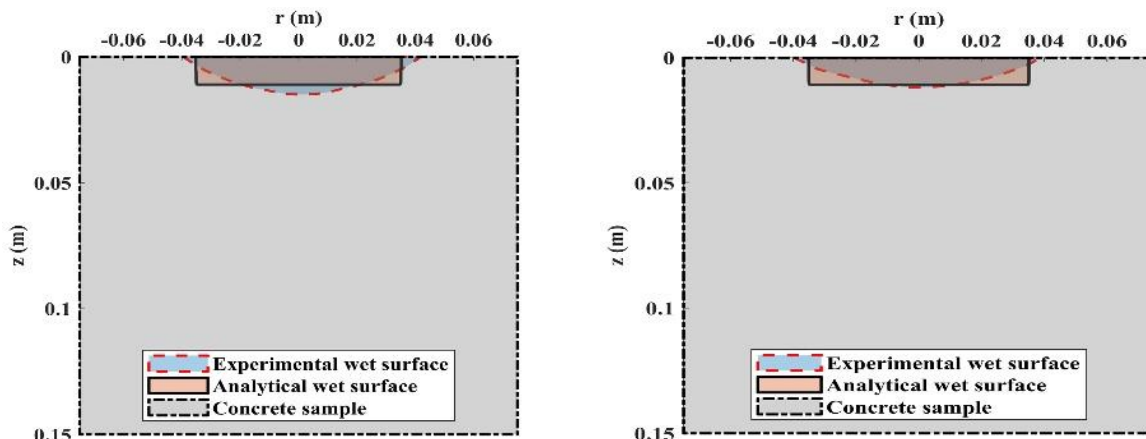
جهت پیدا کردن ضرایب انتشار بهینه، درصد خطاها برای تخمین منحنی ترشده، با استفاده از ضرایب انتشار مختلف و معادله (۱۹) محاسبه شدند.

$$err = 100 \times \frac{S_{diff}}{S_{exp}} \quad (19)$$

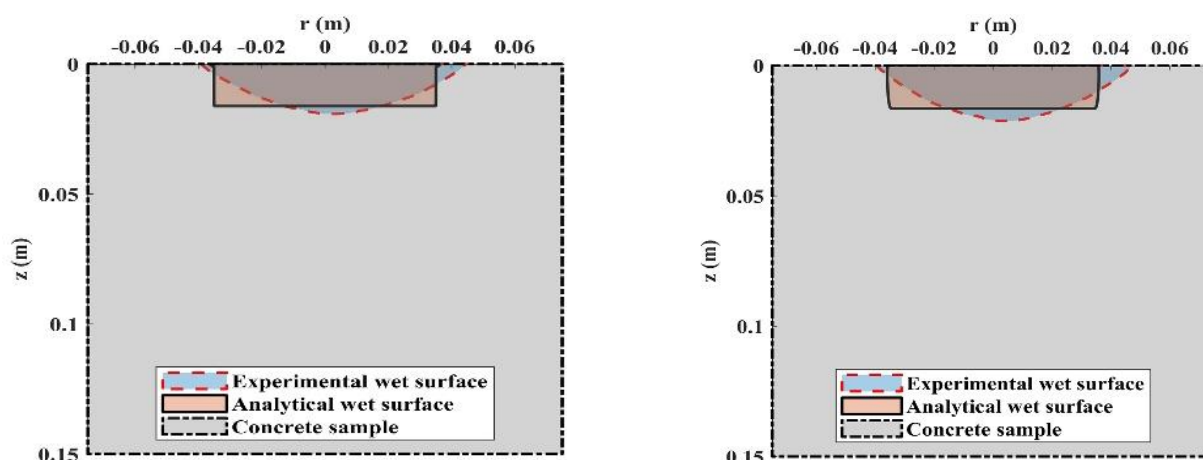
در این رابطه err خطا در تقریب منحنی ترشده، S_{diff} (mm²) قدر مطلق تفاوت سطح بین دو منحنی ترشده، تحلیلی و آزمایشگاهی و S_{exp} (mm²) سطح منحنی ترشده آزمایشگاهی است.

با استفاده از درصد خطاهای محاسبه شده برای تقریب منحنی ترشده برای ضرایب انتشار مختلف و رسم منحنی انتشار-درصد خطاها و هموارسازی آن، ضرایب انتشار بهینه که متناظر با کمترین مقدار درصد خطا هستند، محاسبه گردیدند. در شکل ۶ منحنی‌های ترشده، تحلیلی و آزمایشگاهی برای نمونه‌های بتنی با نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴ که تحت فشارهای مختلف به مدت ۰/۵ ساعت نفوذپذیری آنها اندازه‌گیری شد، نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، بیشینه عمق نفوذ به دست آمده با استفاده از ضرایب انتشار بهینه کمتر از مقادیر متناظر آزمایشگاهی آنها است. در شکل ۷ نیز منحنی هموار شده ضرایب

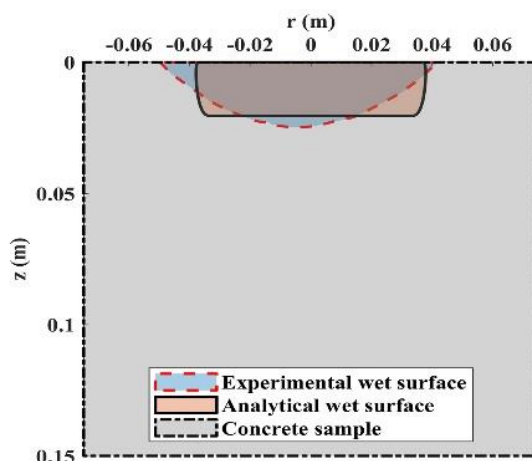
لازم به ذکر است که کلیه مراحل انجام آزمایش‌ها، در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) انجام پذیرفت. برای هر نمونه بتنی، پس از تعیین منحنی ترشده، ضرایب انتشار بهینه با استفاده از حل تحلیلی معادله، برای ارزیابی معادله انتشار، به دست آمدند. بدین منظور از برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار متلب (MATLAB) استفاده گردید. منظور از ضرایب انتشار بهینه، ضرایبی هستند که با استفاده از آنها تفاوت بین دو منحنی ترشده، تحلیلی و آزمایشگاهی به کمترین مقدار خود می‌رسد. به عبارت دیگر، ضرایب انتشار بهینه نزدیکترین منحنی ترشده، تحلیلی به منحنی ترشده آزمایشگاهی را نتیجه می‌دهند. برای این منظور، ابتدا از ۲۵۰۰ گره محاسباتی و ضرایب انتشاری واقع در محدوده $9 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ استفاده گردید تا بازه تقریبی برای ضرایب بهینه به دست آید. با مشخص شدن بازه تقریبی برای ضرایب انتشار بهینه، محدوده مورد نظر کوچک‌تر شده تا با استفاده از ۵۰۰۰۰۰ گره محاسباتی نتایج دقیق‌تری برای ضرایب انتشار به دست آید. سپس با هموار سازی منحنی سه بعدی ضرایب انتشار و خطای حاصله در تقریب منحنی تر شده، ضرایب انتشار بهینه متناظر با نقطه با حداقل مقدار خطا محاسبه شدند. الگوریتم مورد استفاده برای پیدا کردن ضرایب بهینه در شکل ۵ نشان داده شده است.



الف) منحنی‌های ترشدگی آزمایشگاهی و تحلیلی برای فشار برابر با 0/15 مگاپاسکال (ب) منحنی‌های ترشدگی آزمایشگاهی و تحلیلی برای فشار برابر با 0/25 مگاپاسکال



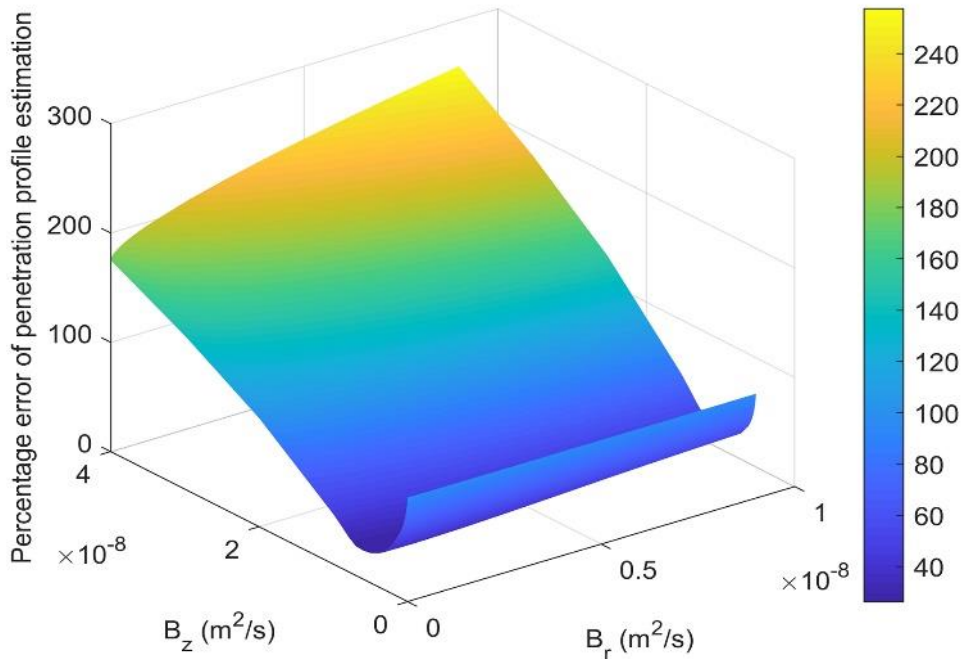
ت) منحنی‌های ترشدگی آزمایشگاهی و تحلیلی برای فشار برابر با 0/75 مگاپاسکال (پ) منحنی‌های ترشدگی آزمایشگاهی و تحلیلی برای فشار برابر با 0/50 مگاپاسکال



ث) منحنی‌های ترشدگی آزمایشگاهی و تحلیلی برای فشار برابر با 0/95 مگاپاسکال

شکل ۶. منحنی‌های ترشدگی تحلیلی و آزمایشگاهی در اثر نفوذ آب برای نمونه‌های با نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴ (زمان اعمال فشار برابر با ۰/۵ ساعت است).

Fig. 6. Analytical and experimental wet curves due to water penetration for specimens with W/C of 0.4 (The duration of applied pressure is 0.5 hour); a) Analytical and experimental wet curves for a pressure of 0.15 MPa, b) Analytical and experimental wet curves for a pressure of 0.25 MPa, c) Analytical and experimental wet curves for a pressure of 0.5 MPa, d) Analytical and experimental wet curves for a pressure of 0.75 MPa, e) Analytical and experimental wet curves for a pressure of 0.95 MPa



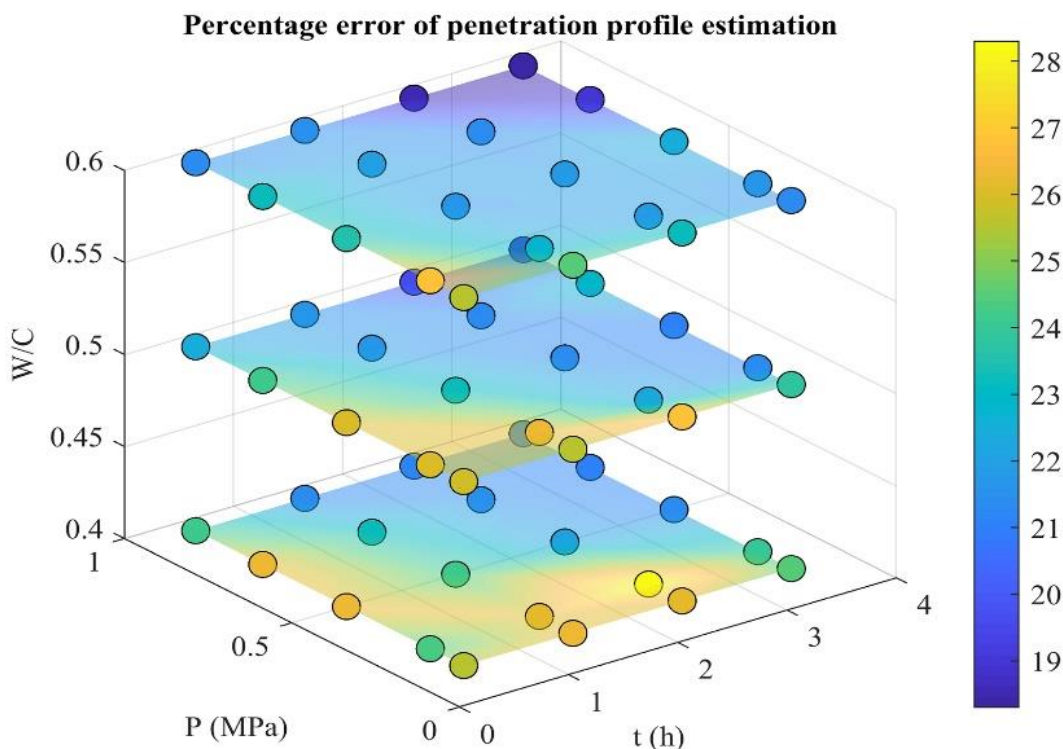
شکل ۷. نمودار ضرایب انتشار-درصد خطاها برای تخمین منحنی ترشدگی در اثر نفوذ آب برای نمونه‌های بتنی با نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۵ (فشار آزمایش برابر با ۰/۵ مگاپاسکال و مدت زمان اعمال فشار برابر با ۰/۵ ساعت است).

Fig. 7. Optimum diffusion coefficients-percentage errors graph for approximating the wet curve due to water penetration for concrete samples with W/C of 0.5 (Test pressure is 0.5 MPa and its duration is 0.5 hour)

سطح ترشدگی، مقادیر این متغیرها با استفاده از ضرایب انتشار بهینه محاسبه شده و قدر مطلق درصد خطای محاسبه شده برای تخمین آنها نسبت به مقادیر آزمایشگاهی در شکل ۹ نشان داده شده است. از مقادیر رسم شده در شکل ۹ می‌توان مشاهده کرد که بیشینه قدرمطلق درصد خطا برای تخمین بیشینه عمق نفوذ نسبت به مقدار آزمایشگاهی متناظر آن برابر با ۱۸/۲۴، کمترین مقدار آن برابر با ۷/۷۳ و مقدار متوسط قدرمطلق درصد خطا برابر با ۱۳/۶۴ است. همچنین در این شکل دیده می‌شود که بیشینه قدرمطلق درصد خطا برای تخمین متوسط عمق نفوذ نسبت به مقادیر آزمایشگاهی آن برابر با ۲۹/۵۵، کمترین مقدار آن برابر با ۱۶/۴۴ و مقدار متوسط قدرمطلق درصد خطا برابر با ۲۱/۴۱ است. به علاوه، در این شکل بیشینه مقدار قدرمطلق درصد خطا برای تخمین سطح ترشدگی برابر

انتشار-درصد خطاها برای تخمین منحنی ترشدگی جهت پیدا کردن ضرایب انتشار بهینه متناظر با کمترین درصد خطا برای نمونه بتنی با نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۵ که تحت فشار ۰/۵ مگاپاسکال به مدت ۰/۵ ساعت قرار داشت، نشان داده شده است. در شکل ۸، نمودار ۴ بعدی درصد خطاهای محاسبه شده برای تخمین منحنی ترشدگی بر حسب مقادیر فشار، مدت زمان نفوذ آب و نسبت آب به سیمان نشان داده شده است. بعد چهارم در این شکل به وسیله رنگ‌های مختلف متناظر با مقادیر درصد خطا در نظر گرفته است.

همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، بیشترین درصد خطای محاسبه شده برابر با ۲۸/۳۰، کمترین مقدار آن برابر با ۱۸/۳۰ و میانگین درصد خطاها برابر با ۲۳/۰۷ است. جهت ارزیابی معادله انتشار در تخمین مقدار بیشینه عمق نفوذ، متوسط عمق نفوذ و



شکل ۸. نمودار درصد خطاهای محاسبه شده برای تخمین منحنی ترشدگی بر حسب مقادیر فشار، مدت زمان نفوذ آب و نسبت آب به سیمان

Fig. 8. Graph of calculated percentage errors for approximating wet curve against pressure magnitudes, water penetration duration and W/C.

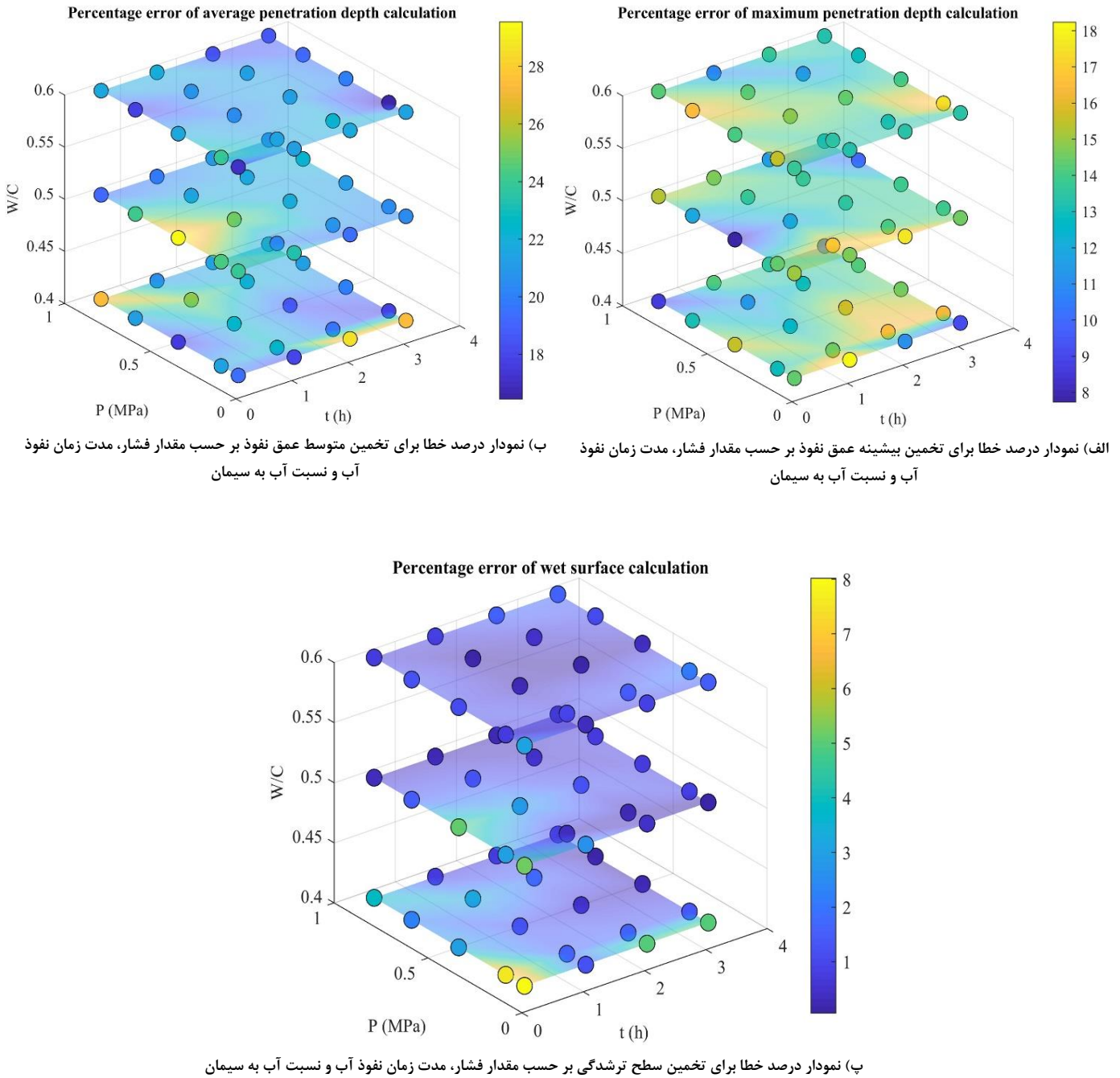
جهت برابر با $263/80$ ، کمترین مقدار آن برابر با $134/55$ و مقدار متوسط نسبت ضرایب انتشار برابر با $180/32$ است. علت بیشتر بودن ضرایب انتشار در جهت قائم نسبت به جهت شعاعی را می‌توان با جهت اعمال فشار توجیه کرد. تصور می‌شود چون که فشار در جهت قائم به نمونه بتنی وارد می‌شود، آب با سرعت بیشتر در این جهت نسبت به جهت شعاعی به داخل نمونه بتنی نفوذ می‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ضرایب انتشار بهینه به دست آمده در جهت قائم بیشتر از ضرایب انتشار بهینه در جهت شعاعی هستند.

در شکل ۱۱ ضرایب انتشار بهینه به دست آمده در جهت‌های قائم و شعاعی برای نمونه‌های بتنی ساخته شده با نسبت‌های آب به سیمان مختلف که نفوذپذیری آنها تحت فشارها و زمان‌های مختلف ارزیابی شد، نشان داده شده است. در این شکل دیده می‌شود که در

با $8/02$ ، کمترین مقدار آن برابر با $0/06$ و متوسط مقدار قدرمطلق درصد خطا برابر با $1/66$ درصد است. بررسی مقادیر محاسبه شده برای درصد خطاها نشان می‌دهد که معادله انتشار سطح ترشدگی را با دقت بیشتری نسبت به مقادیر بیشینه عمق نفوذ و متوسط عمق نفوذ تخمین می‌زند. همچنین دقت معادله انتشار در تخمین بیشینه عمق نفوذ بیشتر از متوسط عمق نفوذ است.

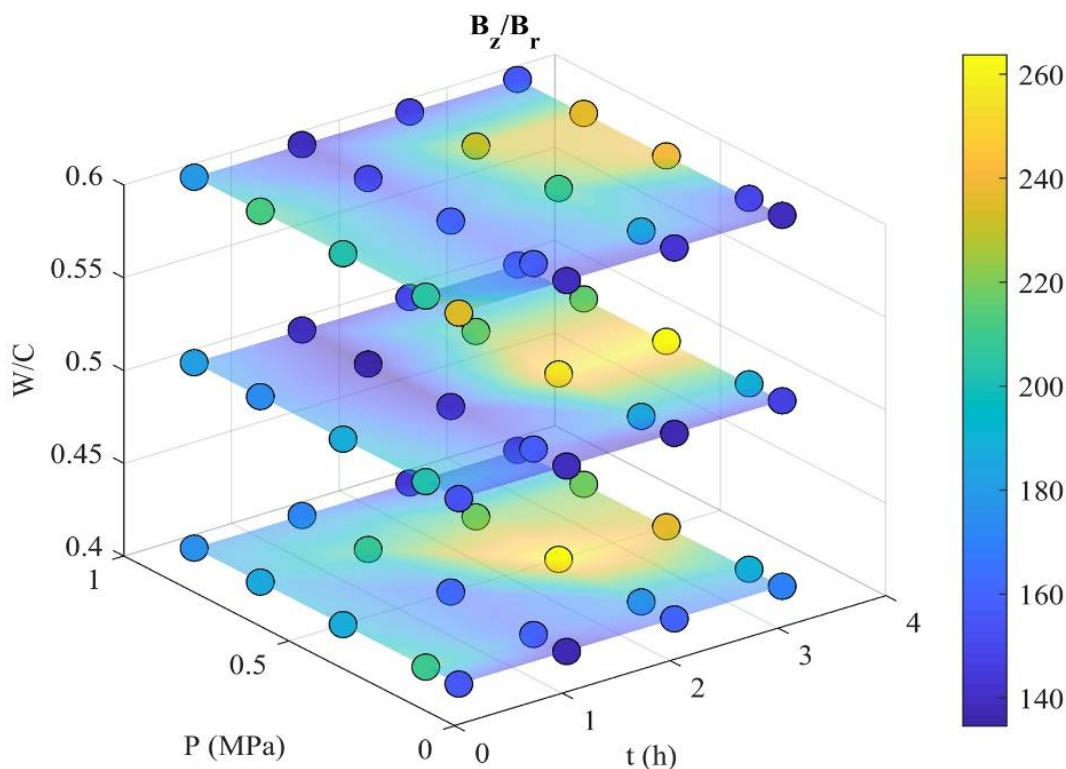
۲-۵- بررسی ضرایب انتشار بهینه

در شکل ۱۰ نسبت ضرایب انتشار بهینه در جهت قائم (جهت اعمال فشار) به جهت شعاعی (جهت عمود بر جهت اعمال فشار) نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که ضرایب انتشار بهینه در جهت قائم مقادیر بزرگتری نسبت به مقادیر متناظر آن در جهت شعاعی دارند. بیشینه مقدار نسبت ضرایب انتشار در این دو



شکل ۹. نمودار درصد خطا برای تخمین بیشینه عمق نفوذ، متوسط عمق نفوذ و سطح ترشدگی نسبت به مقادیر آزمایشگاهی بر حسب مقدار فشار، مدت زمان نفوذ آب و نسبت آب به سیمان.

Fig. 9. Graph of percentage error for approximation of maximum penetration depth, average penetration depth and wet surface with respect to experimental magnitudes against pressure magnitude, water penetration duration and W/C.; a) Graph of percentage error for approximation of maximum penetration depth against pressure magnitude, water penetration duration and W/C., b) Graph of percentage error for approximation of average penetration depth against pressure magnitude, water penetration duration and W/C., c) Graph of percentage error for approximation of wet surface against pressure magnitude, water penetration duration and W/C.



شکل ۱۰. نسبت ضرایب انتشار بهینه در جهت قائم به مقادیر متناظر در جهت شعاعی

Fig. 10. Ratio of optimum diffusion coefficients in vertical direction to those in radial direction

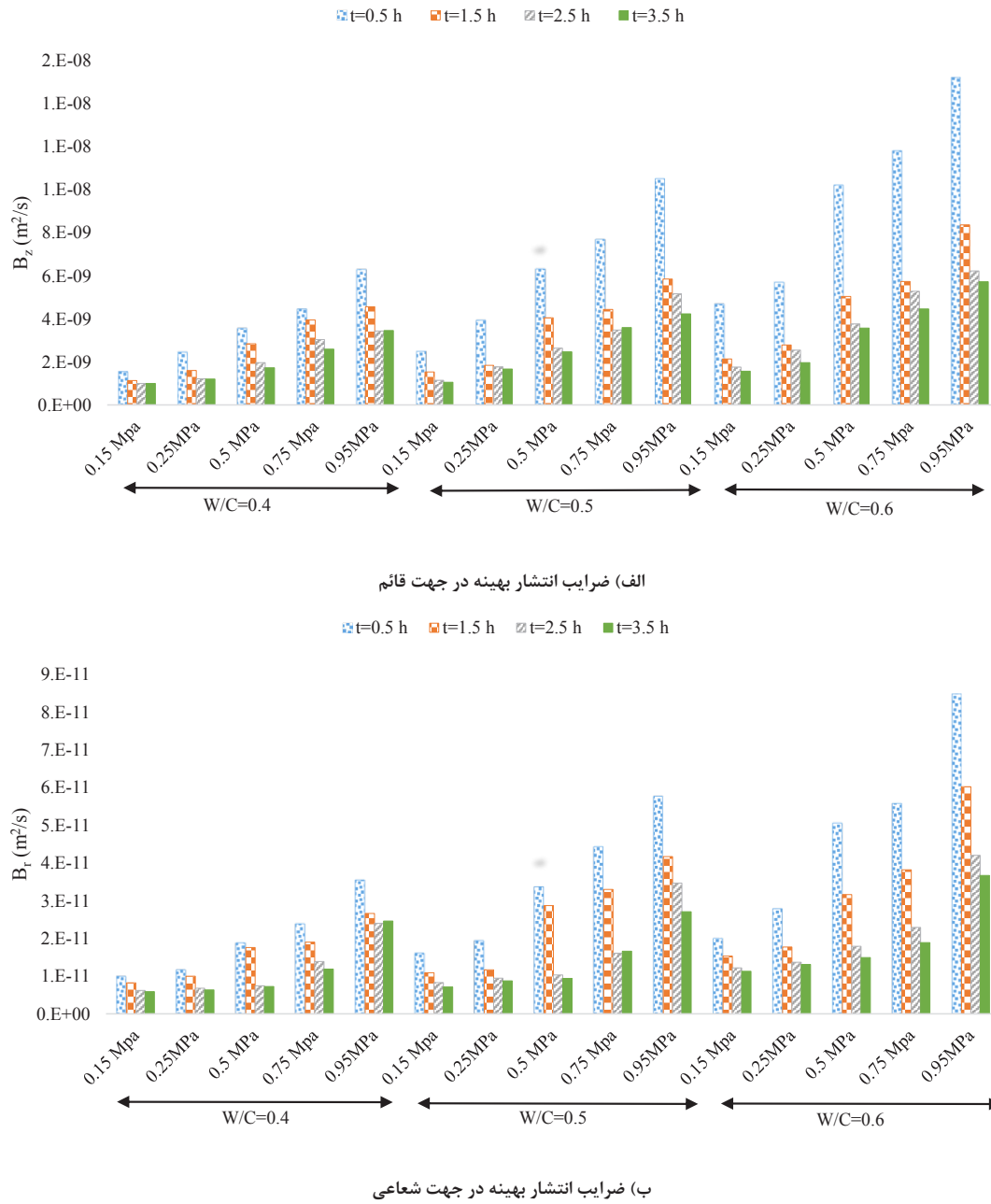
حالت نمونه اشباع شده و تمام منافذ آن از آب پر شده‌اند. همچنین با بررسی شکل ۱۱ می‌توان دریافت که در یک فشار و مدت زمان نفوذ آب ثابت، با افزایش نسبت آب به سیمان مقدار ضرایب انتشار بهینه در دو جهت افزایش می‌یابد. در یک مدت زمان عمل‌آوری مشخص، با کاهش نسبت آب به سیمان ریزساختار نمونه بتنی بهبود یافته و ارتباط منافذ مسدود شده و نمونه ساختار متراکم‌تری پیدا می‌کند. با بهبود ریزساختار، مقاومت در مقابل نفوذ آب به بتن بیشتر شده و در نتیجه ضرایب انتشار بهینه کاهش می‌یابند.

۵-۳- بررسی رابطه بین متغیرها

در شکل ۱۲ رابطه بین فشار، مدت زمان نفوذ آب و متغیرهای به دست آمده با استفاده از روش «محفظه استوانه‌ای» برای نمونه‌های بتنی با نسبت‌های آب به سیمان مختلف نشان داده شده است.

در شکل ۱۲ برای تقریب رابطه بین متغیرها از تابع چند جمله‌ای درجه ۲ استفاده شده است. در جدول ۴ نیز ضرایب همبستگی به

یک مدت زمان نفوذ آب و نسبت آب به سیمان مشخص، با افزایش مقدار فشار وارده، مقدار ضرایب انتشار بهینه در دو جهت افزایش می‌یابد. دلیل این امر بیشتر شدن نرخ نفوذ آب به نمونه با بیشتر شدن مقدار فشار وارده است. همچنین در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که در یک فشار و نسبت آب به سیمان ثابت، با افزایش مدت زمان نفوذ آب از مقدار ضرایب انتشار بهینه کاسته می‌شود. با گذشت زمان، تصور می‌شود که فشار آب موجود در منافذ باعث کنده شدن ذرات از دیواره داخلی منافذ شده و در نتیجه آن منافذ بسته می‌شوند. با بسته شدن منافذ، مقاومت و اصطکاک در برابر نفوذ آب به بتن بیشتر شده و باعث می‌شود که آب با سرعت کمتری به داخل بتن نفوذ کند. بنابراین از مقدار ضرایب انتشار بهینه کاسته می‌شود. در یک فشار ثابت و نسبت آب به سیمان ثابت آزمایش، با افزایش زمان ضرایب انتشار بهینه مربوط به یک جهت به یکدیگر نزدیکتر شده و در صورتی که مدت زمان نفوذ آب بیشتر شود، به مقدار ثابتی میل می‌کنند (بسته به طرح اختلاط نمونه، ممکن است چند روز نیاز باشد تا این امر محقق شود و جریان با دبی ثابت در نمونه بتنی پدید آید). در این



شکل ۱۱. ضرایب انتشار بهینه به دست آمده در جهت‌های قائم و شعاعی برای نمونه‌های بتنی ساخته شده.

Fig. 11. Optimum diffusion coefficients of prepared concrete samples obtained for vertical and radial directions; a) Optimum diffusion coefficients in vertical direction, b) Optimum diffusion coefficients in radial direction

آب نفوذی که با استفاده از تابع چند جمله‌ای درجه ۲ تخمین زده شده ترسیم شده است.

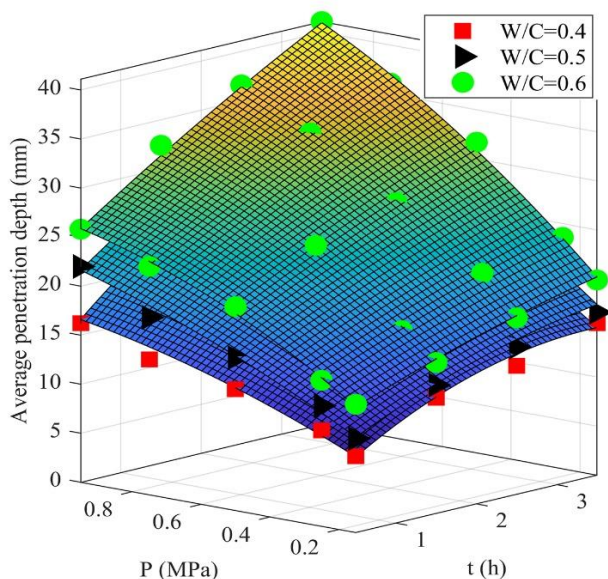
ضرایب همبستگی محاسبه شده برای روابط بین ضرایب انتشار بهینه در دو جهت و حجم آب نفوذی به دست آمده از توابع مختلف در جدول ۵ آورده شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۳ و جدول

دست آمده در تقریب روابط بین متغیرها آورده شده است. مشاهده می‌شود که این ضرایب در تخمین تمامی روابط دارای مقادیر بزرگتر از ۰/۹۵ هستند که نشان‌دهنده دقت بالای تابع درجه ۲ در تخمین رابطه بین متغیرهای ذکر شده است.

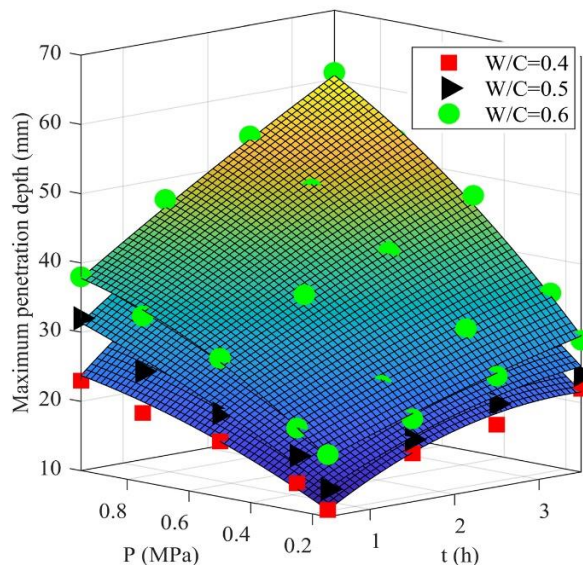
در شکل ۱۳ رابطه بین ضرایب انتشار بهینه در دو جهت و حجم

اشکال ۱۲-ث و ۱۲-ج دیده می‌شود، در یک مدت زمان نفوذ آب و نسبت آب به سیمان ثابت، با افزایش مقدار فشار وارده مقدار ضرایب انتشار بهینه نیز افزایش می‌یابد. چنین روندی نیز برای حجم آب نفوذ کرده در نمونه‌های بتنی با افزایش فشار در شکل ۱۲-ت دیده می‌شود. اما روند تغییرات ضرایب انتشار بهینه و حجم آب نفوذ کرده در نمونه‌های بتنی با تغییرات مدت زمان نفوذ آب با هم متفاوت است.

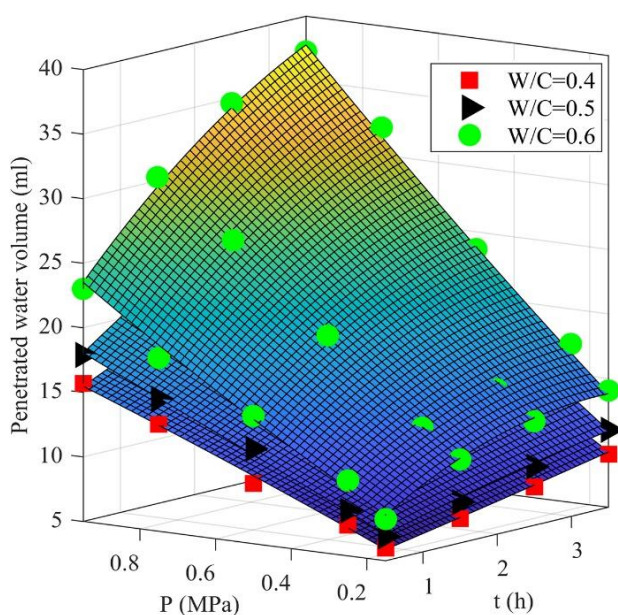
۵ قابل مشاهده است، تابعی با دقت مطلوب جهت تخمین روابط بین ضرایب انتشار بهینه در دو جهت و حجم آب نفوذ کرده در نمونه‌های بتنی وجود ندارد. بیشترین ضریب همبستگی به دست آمده در جدول ۵ برابر با ۰/۳۴۶۷ است که ضعیف به نظر می‌رسد. دلیل عدم وجود تابعی با دقت مطلوب را می‌توان با بررسی روند تغییرات متغیرهای مدنظر قرار داده توجیه نمود. همان‌طور که در



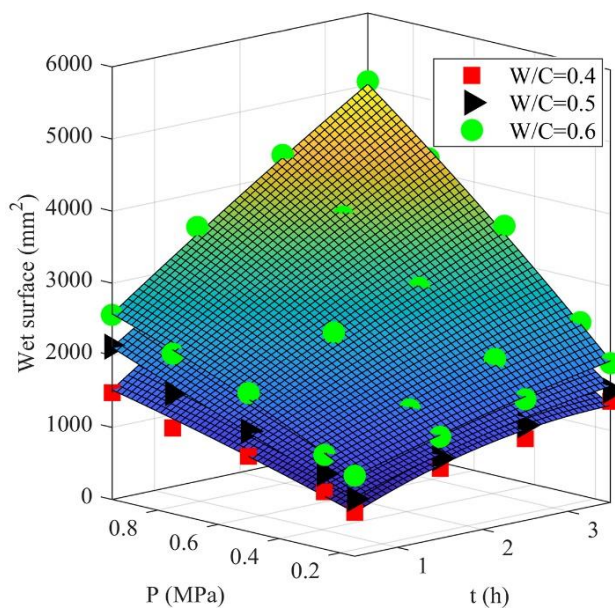
ب) رابطه بین فشار مدت زمان نفوذ آب و متوسط عمق نفوذ برای نمونه‌های بتنی با نسبت‌های آب به سیمان مختلف



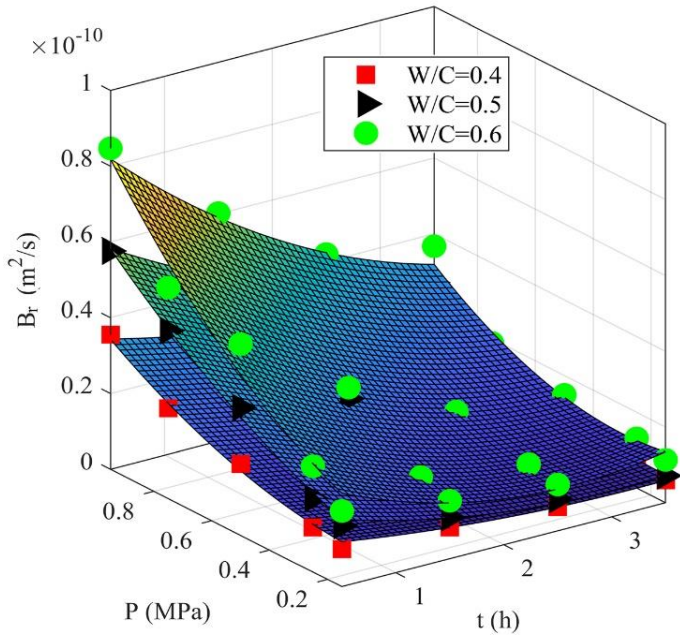
الف) رابطه بین فشار، مدت زمان نفوذ آب و بیشینه عمق نفوذ برای نمونه‌های بتنی با نسبت‌های آب به سیمان مختلف



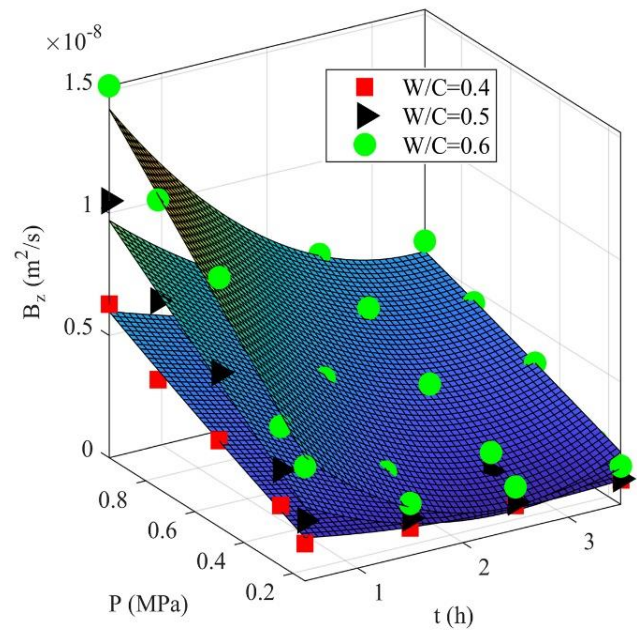
ت) رابطه بین فشار، مدت زمان نفوذ آب و حجم آب نفوذ کرده برای نمونه‌های بتنی با نسبت‌های آب به سیمان مختلف



پ) رابطه بین فشار، مدت زمان نفوذ آب و سطح ترشده برای نمونه‌های بتنی با نسبت‌های آب به سیمان مختلف



ج) رابطه بین فشار، مدت زمان نفوذ آب و ضرایب انتشار بهینه در جهت شعاعی برای نمونه‌های بتنی با نسبت‌های آب به سیمان مختلف



د) رابطه بین فشار، مدت زمان نفوذ آب و ضرایب انتشار بهینه در جهت قائم برای نمونه‌های بتنی با نسبت‌های آب به سیمان مختلف

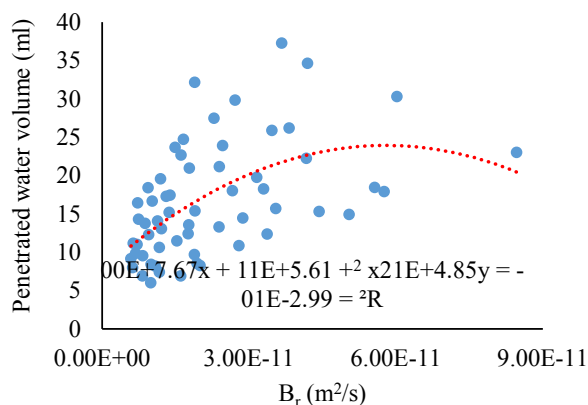
شکل ۱۲. رابطه بین فشار و مدت زمان نفوذ آب با متغیرهای به دست آمده برای نمونه‌های بتنی با نسبت‌های آب به سیمان مختلف.

Fig. 12. Correlation of pressure and water penetration duration with the parameters obtained for concrete samples with different W/C; a) Correlation of pressure, water penetration duration and maximum penetration depth obtained for concrete samples with different W/C, b) Correlation of pressure, water penetration duration and average penetration depth obtained for concrete samples with different W/C, c) Correlation of pressure, water penetration duration and wet surface obtained for concrete samples with different W/C, d) Correlation of pressure, water penetration duration and penetrated water volume obtained for concrete samples with different W/C, e) Correlation of pressure, water penetration duration and optimum diffusion coefficients in vertical direction obtained for concrete samples with different W/C, f) Correlation of pressure, water penetration duration and optimum diffusion coefficients in radial direction obtained for concrete samples with different W/C.

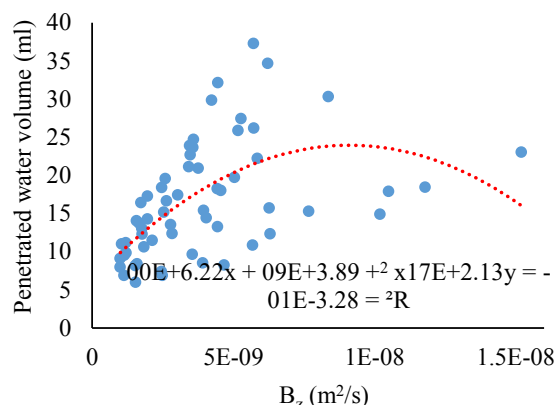
جدول ۴. ضرایب همبستگی مربوط به تابع چند جمله‌ای درجه دو برای تخمین روابط بین متغیرهای تحلیلی و آزمایشگاهی.

Table 4. Coefficients of determination of second-order polynomial function for approximating the correlation between analytical and experimental parameters

متغیرهای مرتبط							
فشار - مدت	فشار - مدت	فشار - مدت	فشار - مدت زمان	فشار - مدت زمان	فشار - مدت زمان	فشار - مدت زمان	نسبت
زمان نفوذ آب	زمان نفوذ آب	زمان نفوذ آب -	نفوذ آب - سطح	نفوذ آب -	نفوذ آب -	نفوذ آب -	آب به
ضرایب انتشار	ضرایب	حجم آب نفوذ کرده	ترشدگی	متوسط	عمق نفوذ	عمق نفوذ	سیمان
بهینه در جهت شعاعی	انتشار بهینه در جهت قائم						
۰/۹۵۱۲	۰/۹۸۲۵	۰/۹۹۶۰	۰/۹۸۸۷	۰/۹۸۵۵	۰/۹۸۸۰	۰/۴	نسبت
۰/۹۶۱۳	۰/۹۶۶۸	۰/۹۹۶۸	۰/۹۸۹۱	۰/۹۸۶۹	۰/۹۸۷۷	۰/۵	آب به
۰/۹۶۵۶	۰/۹۶۵۰	۰/۹۹۲۸	۰/۹۹۵۲	۰/۹۹۳۱	۰/۹۹۳۲	۰/۶	سیمان



ب) رابطه بین ضرایب انتشار بهینه در جهت شعاعی و حجم آب نفوذی



الف) رابطه بین ضرایب انتشار بهینه در جهت قائم و حجم آب نفوذی

شکل ۱۳. روابط بین ضرایب انتشار بهینه در دو جهت قائم و شعاعی و حجم آب نفوذی.

Fig. 13. Correlation between optimum diffusion coefficients in vertical and radial directions and penetrated water volume; a) Correlation of optimum diffusion coefficients in vertical direction and penetrated water volume, b) Correlation of optimum diffusion coefficients in radial direction and penetrated water volume

جدول ۵. ضرایب همبستگی محاسبه شده برای تخمین رابطه ضرایب انتشار بهینه و حجم آب نفوذ کرده در نمونه‌های بتنی با استفاده از توابع مختلف.

Table 5. Calculated coefficients of determination for approximating the correlation between optimum diffusion coefficients and penetrated water volume into concrete specimens using different functions

متغیرهای مرتبط	تابع توانی	تابع لگاریتمی	تابع نمایی	تابع درجه ۲	تابع خطی
ضرایب انتشار بهینه در جهت قائم-حجم آب نفوذ کرده	۰/۳۴۶۷	۰/۳۱۳۹	۰/۲۱۶۶	۰/۳۲۸۴	۰/۱۹۳۶
ضرایب انتشار بهینه در جهت شعاعی-حجم آب نفوذ کرده	۰/۳۱۳۱	۰/۲۹۹۴	۰/۲۴۷۶	۰/۲۹۹۴	۰/۲۳۶۸

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب مندرج در این مقاله می‌توان نتیجه گرفت که:

- ۱- معادله انتشار دو بعدی برای یک جسم نیمه‌بینهایت با دقت قابل قبولی منحنی ترشدگی نفوذ آب در نمونه‌های بتنی را پیش‌بینی می‌کند. متوسط خطای پیش‌بینی منحنی ترشدگی آزمایشگاهی با استفاده از منحنی ترشدگی تحلیلی، ۲۳/۰۷ درصد محاسبه گردید.
- ۲- متوسط خطای پیش‌بینی بیشینه عمق نفوذ، متوسط عمق نفوذ و سطح ترشدگی نسبت به مقادیر متناظر آزمایشگاهی با استفاده از معادله انتشار دو بعدی به ترتیب برابر با ۱۳/۶۴، ۲۱/۴۱ و ۱/۶۶ درصد محاسبه شدند که بیانگر پیش‌بینی سطح ترشدگی با دقت

همان‌گونه که در شکل ۱۲ دیده می‌شود، در یک فشار و نسبت آب به سیمان ثابت، با افزایش مدت زمان نفوذ آب ضرایب انتشار بهینه کاهش می‌یابند. در صورتی که با بیشتر شدن زمان انجام آزمایش، حجم آب نفوذ کرده در نمونه‌های بتنی بیشتر می‌شود. متفاوت بودن روند تغییرات ضرایب انتشار بهینه و حجم آب نفوذ کرده در نمونه‌های بتنی با تغییرات زمان دلیل عدم وجود تابعی با دقت مناسب در تقریب رابطه بین این متغیرها است. همچنین با توجه به تشابه روند تغییرات بیشینه عمق نفوذ، متوسط عمق نفوذ و سطح ترشدگی با حجم آب نفوذ کرده در نمونه‌های بتنی نسبت به تغییرات زمان و فشار وارده، می‌توان نتیجه گرفت که تابعی با دقت مطلوب جهت تخمین ارتباط این متغیرها با ضرایب انتشار بهینه وجود ندارد.

معکوس تبدیل هنکل	H^{-1}
تابع بسل مرتبه صفر	J_0
تابع بسل مرتبه اول	J_1
تبدیل لاپلاس	L
معکوس تبدیل لاپلاس	L^{-1}
فشار وارده در هر نقطه، N/m^2	P
فشار وارده بر نمونه، N/m^2	P_0
متغیر مکان در جهت شعاعی، m	r
متغیر تبدیل لاپلاس	s
قدرمطلق تفاوت سطح بین دو منحنی ترشدگی تحلیلی و آزمایشگاهی، m^2	S_{diff}
مساحت منحنی ترشدگی آزمایشگاهی، m^2	S_{exp}
متغیر زمان، s	t
متغیر مکان در جهت قائم، m	z

علائم یونانی

ضریب انتشار در جهت شعاعی، m^2/s	β_r
ضریب انتشار در جهت قائم، m^2/s	β_z
متغیر بی بعد	ζ

مراجع

- [1] O.E. Gjrv, Quality Control for Concrete Durability, Concrete International, 37(11) (2015) 38-43.
- [2] S. Diniz, J. Padgett, F. Biondini, Durability design criteria for concrete structures—An overview of existing codes, guidelines and specifications, in: Fifth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2016), CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, 2017, pp. 1807-1814.
- [3] S.W. Tang, Y. Yao, C. Andrade, Z. Li, Recent durability studies on concrete structure, Cement and Concrete Research, 78 (2015) 143-154.
- [4] P. Berkowski, M. Kosior-Kazberuk, Material and structural destruction of concrete elements in the industrial environment, Procedia Engineering, 172 (2017) 96-103.
- [5] H.T. Ghashghaei, A. Hassani, Investigating the relationship between porosity and permeability coefficient for pervious concrete pavement by statistical modelling, Materials Sciences and Applications, 7(2) (2016) 101-107.
- [6] X. Li, S. Chen, Q. Xu, Y. Xu, Modeling the three-dimensional unsaturated water transport in concrete at the mesoscale, Computers & Structures, 190 (2017) 61-74.
- [7] A. Akhavan, F. Rajabipour, Quantifying the effects of crack width, tortuosity, and roughness on water permeability of cracked mortars, Cement and Concrete Research, 42(2) (2012) 313-320.
- [8] Q. Wang, N. Banthia, W. Sun, Water permeability of repair

بیشتری نسبت به دو متغیر دیگر است.

- ۳- ضریب انتشار بهینه در راستای اعمال فشار بیشتر از راستای عمود بر آن مشاهده گردید. احتمالاً سرعت بیشتر آب در راستای اعمال فشار عامل این پدیده می باشد. متوسط نسبت این دو ضریب حدود ۱۸۰ می باشد.
- ۴- برای مدت زمان نفوذ آب و نسبت آب به سیمان مشخص، با افزایش مقدار فشار آب، مقدار ضرایب انتشار بهینه در دو جهت قائم و شعاعی نیز افزایش می یابد. این امر می تواند مربوط به افزایش نرخ نفوذ آب، با افزایش مقدار فشار وارده باشد.
- ۵- برای مدت زمان مشخص نفوذ آب، با کاهش نسبت آب به سیمان، ضرایب انتشار بهینه در دو جهت قائم و شعاعی نیز کاهش می یابند. این تغییر می تواند به دلیل کاهش پیوستگی منافذ که ممکن است با کاهش مقدار نسبت آب به سیمان عاید شود، مرتبط باشد.
- ۶- در یک فشار و نسبت آب به سیمان مشخص، با افزایش زمان نفوذ آب، ضرایب انتشار بهینه کاهش می یابند. این امر می تواند به دلیل کنده شدن ذرات از دیواره منافذ موجود در نمونه بتنی و مسدود شدن آنها توسط این ذرات باشد.
- ۷- رابطه بین فشار و مدت زمان نفوذ آب با بیشینه عمق نفوذ، متوسط عمق نفوذ، سطح ترشدگی، حجم آب نفوذی و ضرایب انتشار بهینه در دو جهت قائم و شعاعی را می توان با استفاده از تابع چند جمله ای درجه دو با دقت قابل قبولی تخمین زد. ضرایب همبستگی به دست آمده برای تمامی این موارد بزرگ تر از ۰/۹۵ محاسبه شدند.
- ۸- ضرایب همبستگی ضعیف موجود بین ضرایب انتشار بهینه و حجم آب نفوذی، بیانگر آن است که ارتباط مستقیم و تأثیرگذار بین این متغیرها وجود ندارد. این مورد در روابط بین ضرایب انتشار بهینه با متغیرهای بیشینه عمق نفوذ، متوسط عمق نفوذ و سطح ترشدگی نیز صادق است. این امر می تواند به عوامل متفاوت تأثیرگذار بر تغییرات این متغیرها مربوط گردد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

a	شعاع فشار وارده، m^2
err	درصد خطای محاسبه شده برای تخمین منحنی ترشدگی، (%)
g_0	تابع برای محاسبه مقدار فشار
H	تبدیل هنکل
H_0	تابع هویساید

- [19] A. Haji, K. Parikh, M. Shaikh, M. Jamnu, Experimental investigation of pervious concrete with use of fly ash and silica fume as admixture, *International Journal of Innovation Engineering and Science Research*, 2 (2016) 154-161.
- [20] R. Peralisi, S. Cavalaro, A. Aguado, Advanced numerical assessment of the permeability of pervious concrete, *Cement and Concrete Research*, 102 (2017) 149-160.
- [21] P. Rattanachu, W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul, Water Permeability and Sulfate Resistance of Eco-Friendly High-Strength Concrete Composed of Ground Bagasse Ash and Recycled Concrete Aggregate, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(6) (2019) 04019093.
- [22] J.H. Yoo, H.S. Lee, M.A. Ismail, An analytical study on the water penetration and diffusion into concrete under water pressure, *Construction and Building Materials*, 25(1) (2011) 99-108.
- [23] R. Azin, M. Mohamadi-Baghmolaei, Z. Sakhaei, Parametric analysis of diffusivity equation in oil reservoirs, *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 7(1) (2017) 169-179.
- [24] A. Chang, H. Sun, C. Zheng, B. Lu, C. Lu, R. Ma, Y. Zhang, A time fractional convection–diffusion equation to model gas transport through heterogeneous soil and gas reservoirs, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 502 (2018) 356-369.
- [25] S. Aldousary, A.R. Kovscek, The diffusion of water through oil contributes to spontaneous emulsification during low salinity waterflooding, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 179 (2019) 606-614.
- [26] F. Falcini, R. Garra, V. Voller, Modeling anomalous heat diffusion: Comparing fractional derivative and non-linear diffusivity treatments, *International Journal of Thermal Sciences*, 137 (2019) 584-588.
- [27] X.J. Yang, J. Machado, D. Baleanu, F. Gao, A new numerical technique for local fractional diffusion equation in fractal heat transfer, *Journal of nonlinear science and applications*, 9(10) (2016) 5621-5628.
- [28] U. Dangui-Mbani, J. Sui, C. Ming, L. Zheng, G. Chen, Heat transfer analysis for a free boundary problem arising mortars under an applied compressive stress at early ages, *Materials and Structures*, 51(1) (2018) 1-11.
- [9] A. Amriou, M. Bencheikh, New experimental method for evaluating the water permeability of concrete by a lateral flow procedure on a hollow cylindrical test piece, *Construction and Building Materials*, 151 (2017) 642-649.
- [10] K. Yang, P. Basheer, B. Magee, Y. Bai, A. Long, Repeatability and reliability of new air and water permeability tests for assessing the durability of high-performance concretes, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(12) (2015) 04015057.
- [11] X. Li, Q. Xu, S. Chen, An experimental and numerical study on water permeability of concrete, *Construction and Building Materials*, 105 (2016) 503-510.
- [12] W. Vichit Vadakan, G.W. Scherer, Measuring Permeability of Rigid Materials by a Beam Bending Method: III, Cement Paste, *Journal of the American Ceramic Society*, 85(6) (2002) 1537-1544.
- [13] Q.T. Phung, N. Maes, G. De Schutter, D. Jacques, G. Ye, Determination of water permeability of cementitious materials using a controlled constant flow method, *Construction and Building Materials*, 47 (2013) 1488-1496.
- [14] DIN 1048 part 5: Test methods for concrete, *Deutsches Institut für Normung, Germany* (1991).
- [15] BS EN 12390-8, Testing hardened concrete. Depth of penetration of water under pressure, *British Standards Institution, London* (2009).
- [16] R. Khatri, V. Sirivivatnanon, Methods for the determination of water permeability of concrete, *Materials Journal*, 94(3) (1997) 257-261.
- [17] A.K. Chandrappa, K.P. Biligiri, Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach, *Construction and Building Materials*, 123 (2016) 627-637.
- [18] K.J. Shin, W. Bae, S.W. Choi, M.W. Son, K.M. Lee, Parameters influencing water permeability coefficient of cracked concrete specimens, *Construction and Building Materials*, 151 (2017) 907-915.

- compressive strength, permeability and reinforcement corrosion of concrete samples containing silica fume, fly ash and zeolite, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(2) (2019) 25-43 (In Persian).
- [36] M. Naderi, A. Kaboudan, M. Amin-Afshar, Studying the strength and diffusion and permeability coefficients of concretes containing silica fume, fly ash, zeolite and limestone powder, *Sharif Journal of Civil Engineering*, 36.2(2.2) (2020) 13-25 (In Persian).
- [37] M. Naderi, A. Kaboudan, Cylindrical Chamber: A New In Situ Method for Measuring Permeability of Concrete with and without Admixtures, *Journal of Testing and Evaluation*, 48(3) (2020) 2225-2241.
- [38] S. Whitaker, Diffusion and dispersion in porous media, *AIChE Journal*, 13(3) (1967) 420-427.
- [39] L. Zhang, X. Shang, Analytical solution to non-Fourier heat conduction as a laser beam irradiating on local surface of a semi-infinite medium, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 85 (2015) 772-780.
- [40] M. Abramoff, P. Magalhães, S.J. Ram, Image Processing with ImageJ, *Biophotonics International*, 11(7) (2004) 36-42.
- [41] Fosroc, Nitomortar FC: <https://fosroc.com/english/product/show/nitomortar-fc>.
- [42] BS EN 1008, Mixing water for concrete-specification for sampling, testing, and assessing the suitability of water, including water recovered From processes in the concrete industry, as mixing water for concrete, British Standards Institution, London (2002).
- in n-diffusion equation, *Propulsion and Power Research*, 5(4) (2016) 261-266.
- [29] L. Ning, E. Özarlan, C.F. Westin, Y. Rathi, Precise inference and characterization of structural organization (PICASO) of tissue from molecular diffusion, *NeuroImage*, 146 (2017) 452-473.
- [30] M.P. Di Cagno, F. Clarelli, J. Våbenø, C. Lesley, S.D. Rahman, J. Cauzzo, E. Franceschinis, N. Realdon, P.C. Stein, Experimental determination of drug diffusion coefficients in unstirred aqueous environments by temporally resolved concentration measurements, *Molecular pharmaceutics*, 15(4) (2018) 1488-1494.
- [31] Y. Yang, M. Wang, Pore-scale modeling of chloride ion diffusion in cement microstructures, *Cement and Concrete Composites*, 85 (2018) 92-104.
- [32] M. Naderi, Determination of the permeability of concrete, stone, mortar, brick and other building construction materials using cylindrical chamber method, Intellectual Property Office (IRIPO), Registration number 67726, Iran (2010).
- [33] M. Naderi, A. Kaboudan, Evaluation of the effect of strength, duration and water pressure and concrete casting direction on concrete permeability, *AMIRKABIR Journal of Civil Engineering*, 52(9) (2019) 2379-2398 (In Persian)
- [34] M. Naderi, A. Kaboudan, A. Akhavan Sadighi, Comparative Study on Water Permeability of Concrete Using Cylindrical Chamber Method and British Standard and Its Relation with Compressive Strength, *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 6(1) (2018) 116-131.
- [35] M. Naderi, A. Kaboudan, K. Kargarfard, Studying the

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Naderi, A. R. Kaboudan., (2021). Evaluation of the Equation of Water Penetration into Concrete using Results of "Cylindrical Chamber" Method. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(5): 2175-2194.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17381.6543](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17381.6543)

