



بررسی اثر مقاومت، زمان و مقدار فشار آب و جهت بتن‌ریزی بر نفوذپذیری بتن

محمود نادری^۱، علیرضا کبودان^۲

^۱استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
^۲دانشجوی دکتری سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۲-۱۰
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۳-۱۳
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۴-۰۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۴-۱۹

کلمات کلیدی:

نفوذپذیری
محفظه استوانه‌ای
پیچش
فشار آب
جهت بتن‌ریزی

خلاصه: به دلیل نفوذ عوامل مخرب به داخل بتن و کاهش پایداری آن، اطلاع از میزان نفوذپذیری بتن بسیار مهم می‌باشد. در آیین‌نامه‌ها، نفوذپذیری بر اساس فشار و زمان مشخصی انجام می‌شود. در صورتیکه مقدار فشار و مدت اعمال آن از عوامل مهم نفوذپذیری می‌باشند. لذا، اثر مقدار فشار، مدت اعمال آن و جهت بتن‌ریزی بر نفوذپذیری نمونه‌های مکعبی بتنی ساخته شده با استفاده از سنگدانه‌های خشک و نسبت‌های آب به سیمان پرتلند نوع ۲ برابر با ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روز با استفاده از روش "محفظه استوانه‌ای" بررسی شده است. همچنین روش "پیچش" برای تعیین مقاومت نمونه‌ها بکاربرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند رابطه خطی بین تنش برشی حاصل از پیچش و مقاومت فشاری وجود داشته و نفوذپذیری در جهت بتن‌ریزی کمتر از جهت عمود بر آن بوده و مقدار توان به دست آمده در تقریب رابطه بین حجم و عمق نفوذ با مقدار فشار، صرف‌نظر از نسبت آب به سیمان، در یک سن و جهت مشخص تقریباً ثابت است. این موضوع در تقریب رابطه بین حجم و عمق نفوذ با مدت اعمال فشار با استفاده از تابع توانی مشاهده نگردید. رابطه معکوسی بین مقاومت فشاری و نفوذپذیری نمونه‌ها نیز مشاهده گردید. همچنین رابطه بین عمق و حجم نفوذ با استفاده از تابع خطی با دقت بسیار بالایی تقریب زده شد. اعداد رینولدز محاسبه شده نیز نشان‌دهنده جریان لایه‌ای نفوذ آب در نمونه‌های بتنی است.

۱- مقدمه

می‌کاهد [۱]. نفوذپذیری به صورت حرکت سیال (مایع یا گاز) در محیط متخلخل بتن تحت فشار اعمالی تعریف می‌شود. طبق تعریف انجمن بتن آمریکا، نفوذپذیری، توانایی بتن برای عبور مواد مایع و گاز از درون خود می‌باشد [۲]. لزوم به دانستن نفوذپذیری سازه‌های بتنی از اوایل دهه ۱۹۳۰ میلادی گسترش یافت. طراحان سدها و دیگر سازه‌های هیدرولیکی که در معرض فشارهای هیدرولیکی بالایی بودند، نیاز به دانستن دبی نفوذ آب را در چنین سازه‌هایی را داشتند. نفوذپذیری مهم‌ترین مشخصه‌ای است که رفتار بلند مدت سازه بتنی را مشخص می‌کند [۳]. تحقیقات بسیاری توسط محققان در مورد عوامل مؤثر بر نفوذپذیری بتن انجام گرفته است. از جمله این عوامل می‌توان به نسبت آب به سیمان [۴، ۵]، مقدار سنگدانه‌ها [۱، ۶]،

در طراحی سازه‌های بتنی مانند مخازن بتنی نگهداری مایعات، علاوه بر مقاومت کافی، دوام نیز باید مدنظر طراحان قرار گیرد. به عبارت دیگر، سازه بتنی باید به گونه‌ای طراحی گردد که هم از مقاومت مطلوبی برخوردار باشد و هم نفوذپذیری کمی داشته باشد. دوام به طور قابل توجهی به توانایی سازه بتنی برای مقابله با نفوذ عوامل مخرب مانند دی‌اکسید کربن و کلرید بستگی دارد. مهم‌ترین شاخصی که به وسیله آن دوام یک سازه بتنی ارزیابی می‌شود، نفوذپذیری آن است. ضمن اینکه آب به عنوان عاملی برای نفوذ عوامل مخرب به بتن عمل می‌کند و از عمر سرویس‌دهی آن

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



امکان تغییر شکل داخلی بتن وجود دارد. به دلیل کنده شدن ذرات از ریزساختار بتن در فشارهای بالا، بعضی از منافذ داخلی بتن بسته شده و اصطکاک داخلی منافذ در مقابل نفوذ آب بیشتر می‌شود.

از آنجا که دوام سازه‌های بتنی به طور قابل ملاحظه‌ای به نفوذپذیری آنها بستگی دارد، در این مقاله، نفوذپذیری نمونه‌های بتنی با نسبت‌های آب به سیمان و سن‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. در استانداردهای موجود برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن، مانند BS EN 12390-8 [۲۶] و DIN 1048 [۲۷]، مقدار فشار و زمان اعمالی به مقدار ثابتی محدود شده است (۵ بار و ۷۲ ساعت). در صورتی که در واقعیت مقدار فشار و زمان اعمال آن ثابت نیستند. برای مثال ارتفاع آب در پشت سدهای بتنی در فصل‌های مختلف متغیر است و در نتیجه، فشار اعمالی نیز متفاوت خواهد بود. در این مقاله، اثر مقدار فشار و مدت زمان اعمال در جهت‌های بتن‌ریزی و عمود بر آن و رابطه آنها با پارامترهای به دست آورده شده با استفاده از آزمایش نفوذپذیری ارزیابی شده است. برای اندازه‌گیری نفوذپذیری از روش "محفظه استوانه‌ای" [۲۸] استفاده گردیده است. از مزایای این روش می‌توان به هزینه ناچیز انجام آزمایش، دقت بالا و امکان انجام آزمایش در محل نام برد. همچنین برای ارزیابی مقاومت نمونه‌ها از روش ابداعی "پیچش" [۲۹] استفاده گردیده و با استفاده از نتایج حاصله، رابطه بین نفوذپذیری و مقاومت نمونه‌ها بررسی شده است.

۲- تجهیزات آزمایشگاهی

۲-۱- آزمایش "محفظه استوانه‌ای" [۲۸]

اندازه‌گیری نفوذپذیری با روش‌های مرسوم نیاز به صرف زمان زیاد و تجهیزات گوناگون و با حجم بالاست. همچنین به دلیل زمان‌بر بودن انجام این آزمایش‌ها، هزینه انجام آن‌ها نیز زیاد است. از طرفی اکثر آزمایش‌های موجود تنها در شرایط آزمایشگاهی قابل اعمال بوده و قابلیت انجام به صورت درجا را ندارند.

در این پژوهش بررسی نفوذپذیری با استفاده از دستگاه "محفظه استوانه‌ای" که روشی نوین برای اندازه‌گیری نفوذپذیری است، انجام شده است. این روش که توسط نادری ابداع شد، روشی دقیق با کاربردی گسترده در تعیین میزان نفوذپذیری بتن و سایر مصالح ساختمان چه در محیط آزمایشگاه و چه در محل پروژه است. این دستگاه به نام دستگاه "سیلندریکال چمبر" یا "محفظه استوانه‌ای" در

اندازه سنگدانه‌ها [۷-۹]، مشخصات ریزساختاری [۱۰، ۱۱]، تأثیر افزودنی‌ها [۱۰، ۱۲-۱۷]، اثر تنش وارده [۱۸-۲۰]، اثر دما [۲۱]، [۲۲] و ... اشاره کرد. مطابق این تحقیقات، تغییر در نسبت‌های اختلاط به شدت بر میزان نفوذپذیری نمونه بتنی تأثیرگذار است.

روش‌های اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن به دو روش مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی می‌شوند [۲۳]. روش مستقیم خود به دو صورت دبی ثابت و عمق نفوذ انجام می‌شود. بر اساس روش دبی ثابت، فشار اعمالی از یک سطح نمونه به آن اعمال شده و این عمل تا رسیدن به یک دبی ثابت و اندازه‌گیری آن در سطح دیگر نمونه ادامه می‌یابد. در این حالت گرادیان فشار ثابت است. در روش عمق نفوذ، دبی جریان در اثر فشار اعمالی ثابت نبوده و از طریق اندازه‌گیری عمق نفوذ، نفوذپذیری نمونه ارزیابی می‌شود. به دلیل ریزساختار متراکم بتن، ممکن است چند هفته نیاز باشد تا دبی با مقدار ثابت در نمونه بتنی حاصل شود. بنابراین به دلیل زمان کمتر آزمایش با استفاده از روش عمق نفوذ، این روش برای ارزیابی نفوذپذیری بتن ترجیح داده می‌شود. ضمن اینکه به دلیل زمان زیاد انجام آزمایش با استفاده از روش جریان ثابت و پیشرفت هیدراسیون، امکان تغییر ساختار داخلی نمونه بتنی وجود دارد. در روش غیرمستقیم نیز همانطور که از نام این روش پیداست، نفوذپذیری نمونه به طریق مستقیم اندازه‌گیری نمی‌شود. روش‌های پالس فشار ناپایدار و پرومکانیکی از روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری نفوذپذیری می‌باشند. اساس روش پالس فشار ناپایدار بر اساس اندازه‌گیری فشار به جای اندازه‌گیری دبی در زمان‌های مختلف استوار است. در روش‌های پرومکانیکی تاریخچه کرنش-زمان تحت گرما یا فشار اعمالی را که به حرکت سیال در شبکه منافذ بستگی دارد، اندازه‌گیری می‌کنند.

بر اساس مطالعات صورت گرفته توسط نویسندگان این مقاله، اثر مقدار فشار و زمان اعمال آن تنها در تحقیقات انجام شده در مراجع [۲۴، ۲۵] صورت گرفته است. همچنین تحقیقی ارائه نگردیده که در آن اثر جهت بتن‌ریزی بر نفوذپذیری بتن بررسی شده باشد. بر اساس تحقیقات انجام شده در مراجع [۲۴، ۲۵]، رابطه بین مقدار متوسط عمق نفوذ و مقدار فشار اعمالی توسط یک تابع توانی قابل تخمین است. مقدار توان به دست آمده با استفاده از این رابطه، صرف نظر از نسبت آب به سیمان مورد استفاده در این تحقیقات تقریباً ثابت گزارش شده است. همچنین با افزایش مقدار فشار، زمان اعمال فشار و نسبت آب به سیمان (کاهش مقاومت فشاری) عمق نفوذ افزایش می‌یابد. در فشارهای بالا



د) نمونه‌های آزمایش شده.



ج) اجزای مختلف دستگاه
محفظه استوانه‌ای.



ب) دستگاه آزمایش



الف) صفحه فلزی چسبانده شده روی
نمونه بتنی.

شکل ۱. آزمایش "محفظه استوانه‌ای".

Fig. 1. "Cylindrical chamber" test a) Metallic base plate attached to a concrete specimen b) "Cylindrical chamber" apparatus c) Different parts of "Cylindrical chamber" apparatus d) Tested specimens

$$V = h \times A \quad (1)$$

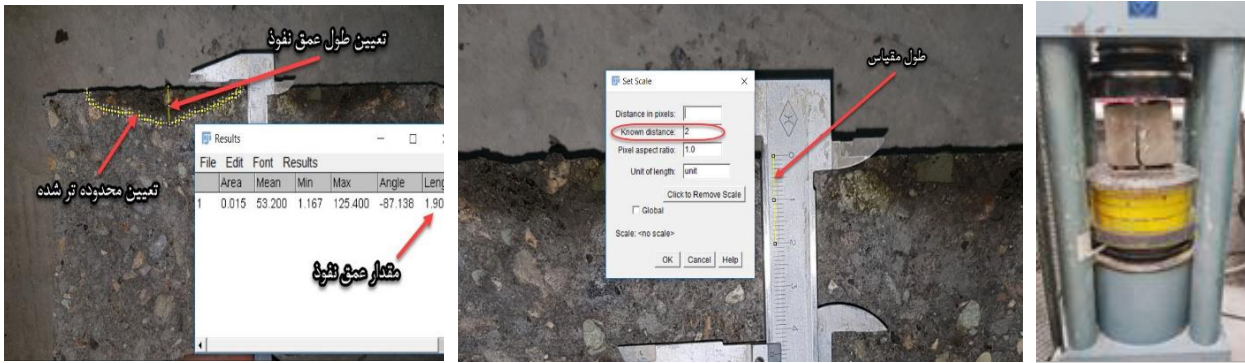
$$Q = \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

که در آن V حجم آب نفوذ کرده به نمونه (m^3)، h قرائت میکرومتر (m)، A سطح مقطع اعمال فشار (m^2)، Q نرخ نفوذ آب (m^3/s) و t مدت زمان (s) است. پس از انجام آزمایش بلافاصله نمونه توسط جک فشاری به دو قسمت تقسیم شده و پس از مدت کوتاهی که بیشینه عمق نفوذ قابل تشخیص باشد، از سطح مقطع تر شده توسط آب عکس گرفته شده تا با استفاده از برنامه آنالیز عکس مقدار بیشینه عمق نفوذ در مقطع تعیین شود. مطابق شکل ۲، از یک کولیس برای تعیین طول مقیاس استفاده می‌شود. تعریف طول مقیاس جهت مشخص کردن فواصل بین نقاط در عکس ضروری است. فواصل بین نقاط در شکل نسبت به این طول اندازه‌گیری می‌شوند. بدین جهت مطابق شکل ۲-ب، فاصله‌ای مشخص روی کولیس انتخاب شده و طول این فاصله (۲ سانتی متر مطابق شکل) به برنامه آنالیز عکس به عنوان ورودی داده می‌شود. سپس محدوده تر شده توسط نقاطی مشخص گردیده و محل بیشینه عمق نفوذ به صورت چشمی تعیین می‌شود. مقدار عمق نفوذ به عنوان خروجی برنامه قرائت می‌شود.

این آزمایش قابلیت انجام روی سطوح افقی (دال‌ها و عرشه پل) و عمودی (ستون‌ها) را دارد. از مزایای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

دنیا شناخته شده است. این دستگاه قابلیت آزمایش بر روی اتصالات بتنی و ژئوممبران‌ها با امکان انجام آزمایش قبل و بعد از نصب آن‌ها در صنعت راه سازی را دارد. دستگاه آزمایش "محفظه استوانه‌ای" در شکل ۱ نشان داده شده است.

در ابتدای آزمایش یک صفحه فلزی زیر سری به کمک چسب اپوکسی بر روی سطح بتن چسبانده شده و چسب اضافه از روی سطح نمونه برداشته می‌شود. در ادامه، قسمت فوقانی که شامل محفظه فشار به همراه گیج اندازه‌گیری فشار و میکرومتر است، بر روی صفحه زیرسری به کمک پیچاندن آن بر صفحه زیرسری محکم می‌شود. سپس درون محفظه کاملاً با آب پر می‌شود. به منظور خروج هوای احتمالی موجود در محفظه یک شیر تخلیه هوا در دستگاه تعبیه شده است. با چرخاندن دسته تنظیم فشار، فشار به مقدار دلخواه موردنظر تنظیم می‌گردد. با گذشت زمان از شروع آزمایش، به دلیل وجود اصطکاک داخلی با منافذ بتن و لزجت آب از مقدار فشار اعمالی کاسته می‌شود. فشار دستگاه را می‌توان به کمک چرخاندن مجدد دسته تنظیم فشار ثابت نگه داشت. با چرخاندن دسته تنظیم فشار، پیستون فشار به سمت پایین حرکت می‌کند. حرکت به سمت پایین پیستون توسط میکرومتر قابل قرائت است. در فواصل زمانی دلخواه از شروع آزمایش عدد میکرومتر قرائت می‌شود. با داشتن قرائت میکرومتر و سطح اعمال فشار (سطح داخلی صفحه زیرسری)، حجم آب نفوذ کرده به بتن و نرخ نفوذ آب در زمان قرائت میکرومتر توسط روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شود.



ج) قرائت بیشینه عمق نفوذ.

ب) تعیین طول مقیاس.

الف) دو نیم کردن نمونه.

شکل ۲. تعیین عمق نفوذ.

Fig. 2. Determination of penetration depth a) Splitting a specimen in halves b) Determination of scale length c) Reading maximum penetration depth



شکل ۳. آزمایش "پیچش".
Fig. 3. "Twist-off" test

دلیل دمای بالای تولید شده و عدم به وجود آمدن جریان پایدار در اثر استفاده از ولتاژ بالا، تغییرات به وجود آمده در مایع منفذی به ویژه در بتن‌های دارای پوزولان در اثر حرارت، تفاوت بالای نتایج به دست آمده و عدم قابلیت استفاده مجدد از نمونه پس از آزمایش دارای محدودیت می‌باشند [۳۰، ۳۱]. اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی برای ارزیابی دوام بتن نیز دارای محدودیت‌هایی است. برای مثال، به دلیل اثر پلاریزاسیون و خاصیت خازنی بتن اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی با استفاده از جریان DC برای نمونه‌های بتنی مناسب نمی‌باشد [۳۲].

۲-۲- روش "پیچش [۲۹]" (Twist-off)

در این روش که در سال ۲۰۰۵ توسط نادری ابداع گردید، ابتدا سطح نمونه توسط برس سیمی زبر شده و آلودگی‌ها از سطح نمونه

- دستگاه آزمایش بسیار ساده است.
- میزان نفوذپذیری را به صورت کمی ارائه می‌کند.
- دستگاه در عین سادگی دارای دقت بالایی است.
- سرعت انجام آزمایش بالا، هزینه انجام آن ناچیز و قابلیت تکرار آن زیاد است.
- قابلیت حمل آن به سخت‌ترین مکان‌ها میسر است.
- استفاده از این روش نیاز به مهارت و برنامه‌ریزی خاصی برای تکنسین آزمایش ندارد.
- محدودیت ابعادی برای نمونه مورد آزمایش وجود ندارد.
- قابلیت استفاده برای سایر مصالح مانند سنگ، ملات، سفال، آجر فشاری و ... را دارد.

• قابلیت ارزیابی نفوذپذیری سازه در محل را دارد.
روش‌های دیگر ارزیابی دوام بتن مانند آزمایش RCPT، به

جدول ۱. طرح اختلاط نمونه‌های آزمایش شده در یک متر مکعب
Table1. Mix proportions of the tested specimens per cubic meter of concrete

نسبت آب به سیمان (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	شن (kg/m^3)	سیمان (kg/m^3)	آب (kg/m^3)
۰/۴	۶۰۵	۱۲۴۰	۳۵۰	۱۴۴
۰/۵	۶۰۵	۱۲۴۰	۳۵۰	۱۸۰
۰/۶	۶۰۵	۱۲۴۰	۳۵۰	۲۱۶

جدول ۲. ترکیب شیمیایی سیمان پرتلند نوع ۲ استفاده شده برای ساخت نمونه‌ها
Table2. Chemical compositions of type II Portland cement used for preparation of the specimens

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

(۳) محاسبه کرد.

$$\tau = \frac{T.r}{J} = k.T \quad (3)$$

که در آن τ تنش برشی حاصل از پیچش (N/m^2)، T گشتاور پیچشی ($N.m$)، r شعاع صفحه فلزی (m)، J ممان اینرسی قطبی (m^4) و k ضریب ثابت (m^{-3}) است.

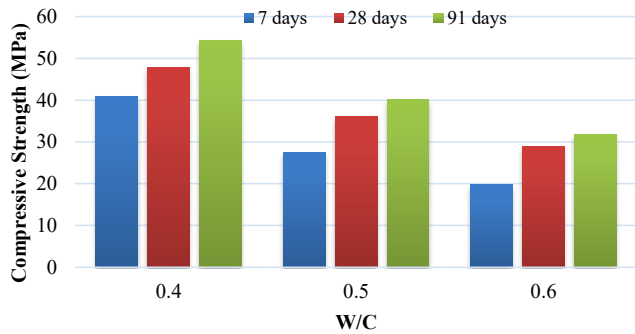
۳-روش تحقیق

در این تحقیق، نفوذپذیری، مقاومت فشاری و لنگر پیچشی لازم برای جدا کردن صفحه‌های فلزی از سطح نمونه‌های بتنی ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه با نسبت‌های آب به سیمان برابر با ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ مورد ارزیابی قرار گرفته است. ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ مقادیر معمول برای نسبت آب به سیمان برای بتن‌های ساخته شده با استفاده از سیمان پرتلند می‌باشند. سیمان مورد استفاده، سیمان پرتلند نوع ۲ کارخانه آبیگ قزوین با نرمی برابر با 3081 gr/cm^2 است. طرح اختلاط نمونه‌ها و آنالیز ترکیبات شیمیایی سیمان مورد استفاده به ترتیب در جداول ۱ و ۲ آورده شده است. آب استفاده شده جهت ساخت نمونه‌ها، آب شرب شهر قزوین می‌باشد. pH آب مصرفی ۷/۵، سختی کل ۲۴۱ میلی‌گرم بر لیتر، مقدار کلرید ۲۱/۶۰ میلی‌گرم بر لیتر و مقدار سولفات ۸۴/۷۵ میلی‌گرم بر لیتر است که در محدوده مقادیر مجاز ذکر شده در استاندارد BS EN 1008:2002 قرار دارند [۳۳].

زدوده می‌شود. سپس صفحات فلزی با ابعاد مشخص توسط چسپ اپوکسی بر روی سطح نمونه چسبانده می‌شود و پس از کسب مقاومت کافی توسط چسب، با استفاده از یک دستگاه پیچش‌سنج، لنگر پیچشی لازم جهت جدا کردن صفحه فلزی از سطح نمونه اندازه‌گیری می‌شود. پس از جدا شدن صفحه، باید به طور چشمی محل جدا شدن صفحه از نمونه را بررسی کرد تا اطمینان حاصل شود که جدا شدگی از سطح بتن باشد. در صورتیکه جدا شدگی از سطح چسب باشد، نتایج آزمایش نامعتبر خواهد بود.

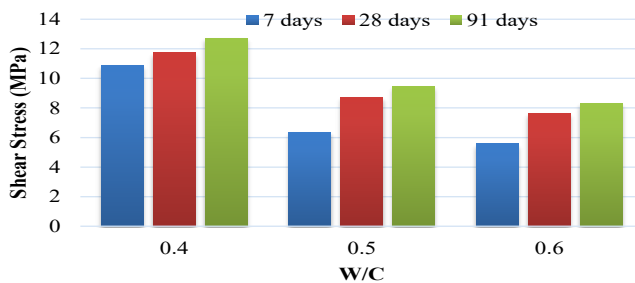
از این روش نیز می‌توان در محل استفاده کرد. همچنین خرابی جزئی به وجود آمده پس از جدا شدن صفحه فلزی به سادگی با استفاده از ملات قابل ترمیم است. بر اساس تحقیق انجام شده، رابطه خطی بین گشتاور پیچشی (یا تنش برشی حاصل از پیچش) به دست آمده با استفاده از این آزمایش و مقاومت فشاری نمونه وجود دارد و با داشتن مقدار گشتاور پیچشی می‌توان مقاومت فشاری را محاسبه کرد. در نتیجه با استفاده از منحنی‌های از پیش رسم شده به وسیله نتایج به دست آمده با استفاده از روش پیچش که رابطه بین تنش برشی ناشی از پیچش و مقاومت فشاری را نشان می‌دهد، می‌توان مقاومت فشاری را در محل تخمین زد.

هدف از انجام این آزمایش در این تحقیق بررسی رابطه بین تنش برشی به دست آمده ناشی از پیچش با استفاده از این روش و نفوذپذیری نمونه‌ها است. تنش برشی را می‌توان با استفاده از رابطه



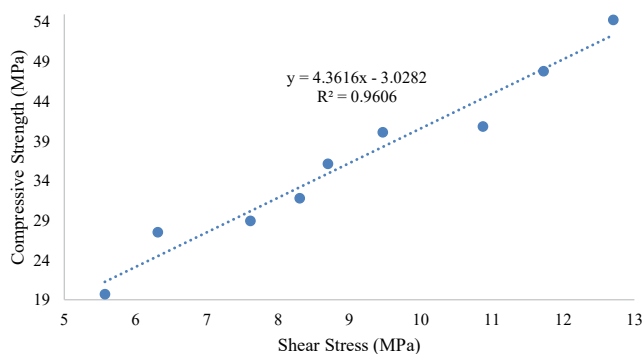
شکل ۵. مقاومت فشاری نمونه‌های با نسبت‌های آب به سیمان مختلف در سن‌های مختلف.

Fig. 5. Compressive strength of the specimens with different water to cement ratios at different ages



شکل ۶. تنش برشی ناشی از پیچش جهت جدا کردن صفحات فلزی از سطح نمونه‌ها با نسبت‌های آب به سیمان مختلف در سن‌های مختلف.

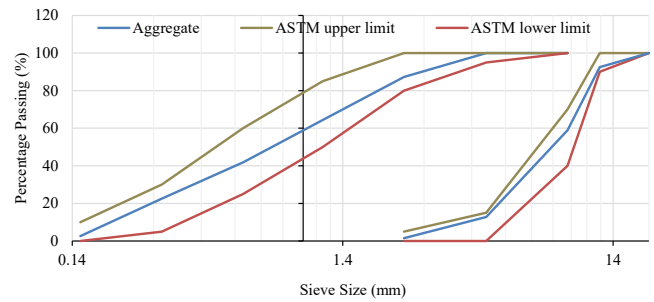
Fig. 6. Shear stress due to twisting moment for separating the metallic base plates from the surfaces of the specimens with different water to cement ratios at different ages



شکل ۷: رابطه بین مقاومت فشاری و تنش برشی ناشی از پیچش با استفاده از آزمون "پیچش".

Fig. 7. Relationship between compressive strength and shear stress due to twisting moment obtained from "Twist-off" method

بیشتر شود، مقدار بیشتری آب به ازای هر واحد وزن سیمان در مخلوط بتن وجود دارد؛ بنابراین در یک حجم ثابت از بتن ریزی تعداد حفره‌های آب بیشتری وجود خواهد داشت. این آب محبوس شده به



شکل ۴. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها.
Fig. 4. Aggregates grading curve

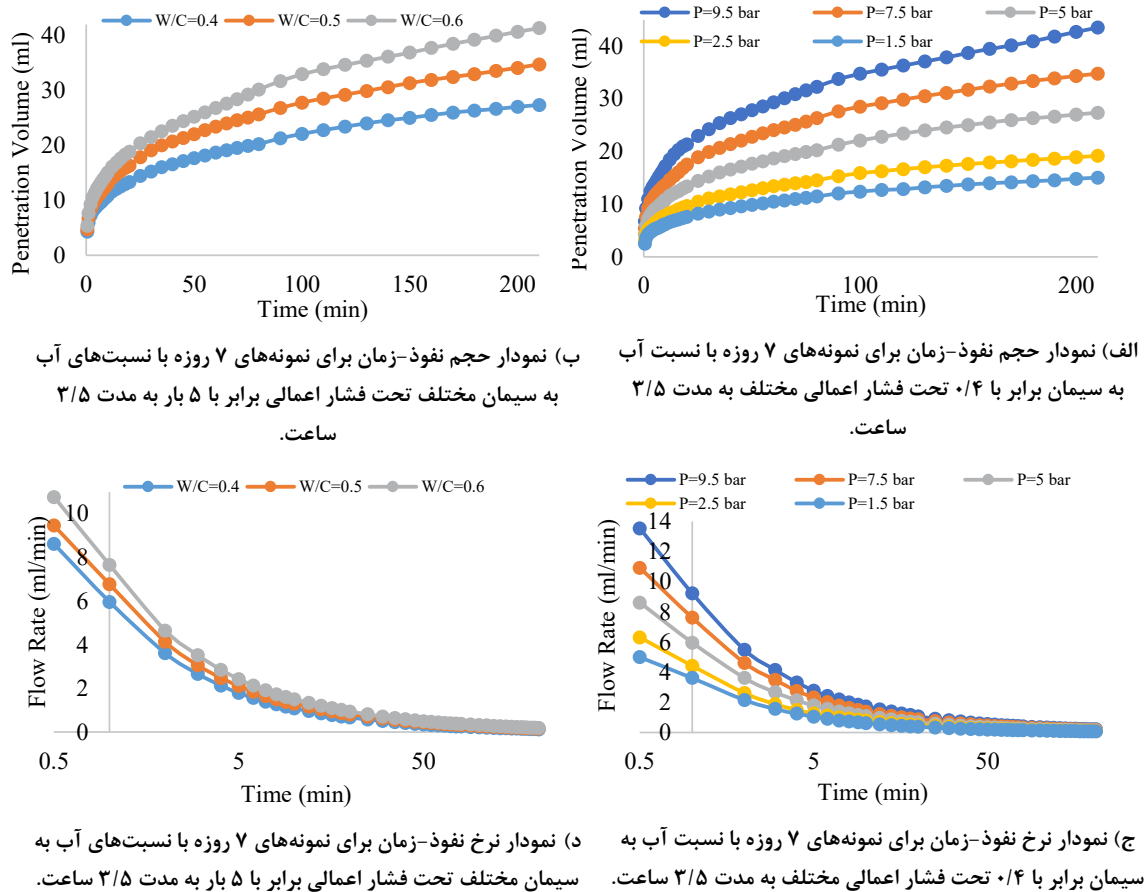
انجام آزمایش‌ها از نمونه‌های مکعبی با ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلیمتر که در آب-آهک عمل‌آوری شده بودند، استفاده گردید. دانه‌بندی سنگدانه‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. از سنگدانه‌های خشک برای ساخت نمونه‌ها استفاده گردید. جهت خشک کردن سنگدانه‌ها، آنها را در کنار سیستم گرمایشی محیط آزمایشگاه پهن کرده و جرم آنها در فواصل زمانی ۲۴ ساعت اندازه‌گیری می‌گردید و این عمل تا زمانی ادامه می‌یافت که تفاوتی بین دو جرم اندازه‌گیری شده مشاهده نمی‌گردید.

جهت انجام آزمایش نفوذپذیری از حداقل ۲ نمونه برای هر طرح اختلاط استفاده گردید. آزمایش مقاومت فشاری و "پیچش" نیز بر روی حداقل ۳ نمونه برای هر طرح اختلاط انجام گرفت. نتایج به صورت میانگین نتایج حاصل از آزمایش‌ها گزارش شده‌اند. از فشارهای برابر با 0.15 ، 0.25 ، 0.5 ، 0.75 و 0.95 مگاپاسکال برای بررسی اثر مقدار فشار بر نفوذپذیری نمونه‌ها استفاده گردید. مقادیر فشارهای ذکر شده به مدت 0.5 ، 1.5 ، 2.5 و 3.5 ساعت بر روی نمونه‌ها در دو جهت بتن‌ریزی و عمود اعمال شدند. درصد رطوبت نیز هنگام انجام آزمایش‌ها حدود ۴۰ درصد اندازه‌گیری گردید. لازم به ذکر است که تمامی آزمایش‌های ذکر شده در آزمایشگاه دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) انجام گرفته است.

۴- نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها

۴-۱- نتایج آزمون‌های "پیچش" و مقاومت فشاری

مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با استفاده از نسبت‌های آب به سیمان برابر با 0.4 ، 0.5 و 0.6 در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق نتایج به دست آمده، در یک سن مشخص با افزایش نسبت آب به سیمان مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. اگر نسبت آب به سیمان



شکل ۸. نمودارهای حجم نفوذ-زمان و نرخ نفوذ-زمان برای نمونه‌های مختلف.

Fig. 8. Penetration volume-time and flow rate-time diagrams for different specimens a) penetration volume-time diagram for the 7-day specimens with water to cement ratio of 0.4 under different applied pressures for 3.5 hour b) penetration volume-time diagram for the 7-day specimens with different water to cement ratios under an applied pressure of 5 bar for 3.5 hour c) Flow rate-time diagram for the 7-day specimens with water to cement ratio of 0.4 under different applied pressures for 3.5 hour d) Flow rate-time diagram for the 7-day specimens with different water to cement ratios under an applied pressure of 5 bar for 3.5 hour

پیچش به دست آمده با استفاده از آزمون "پیچش" نشان داده شده است. مطابق شکل، رابطه خطی بین تنش برشی ناشی از پیچش و مقاومت فشاری نمونه‌ها وجود دارد. ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۶۰۶ بیانگر دقت بالای تابع خطی در تخمین رابطه بین این دو متغیر است. بنابراین می‌توان از نتایج به دست آمده با استفاده از آزمون "پیچش" برای ارزیابی مقاومت نمونه‌ها استفاده کرد. خرابی ایجاد شده نیز سطحی و به راحتی قابل ترمیم است.

۴-۲- نتایج آزمون "محفظه استوانه‌ای"

نمودارهای حجم نفوذ-زمان و نرخ نفوذ-زمان برای نمونه‌های ۷ روزه که به مدت ۳/۵ ساعت با استفاده از آزمایش "محفظه استوانه‌ای" نفوذپذیری آنها در جهت عمود بر بتن ریزی ارزیابی گردیده، در شکل ۸

تدریج تبخیر می‌شود و فضاهای خالی را در بتن برجای می‌گذارد. حضور این حفره‌ها منجر به کاهش مقاومت می‌شود.

در یک نسبت آب به سیمان مشخص، با افزایش سن نمونه به دلیل پیشرفت واکنش هیدراسیون و پر شدن فضاهای خالی با محصولات این واکنش، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد.

مقدار لنگر پیچشی لازم برای جدا کردن صفحات فلزی از سطح نمونه‌ها با استفاده از آزمون "پیچش" اندازه‌گیری گردید و با جایگذاری آن در رابطه (۳) تنش برشی ناشی از پیچش به دست آورده شد. نتایج تنش برشی ناشی از پیچش برای نمونه‌های بتنی در شکل ۶ نشان داده شده است. روندی مشابه نتایج مقاومت فشاری مشاهده می‌شود. با افزایش سن و کاهش نسبت آب به سیمان تنش‌های به دست آمده افزایش می‌یابند.

در شکل ۷ رابطه بین مقاومت فشاری و تنش برشی ناشی از

جدول ۳. نمونه‌های بتنی که نفوذ آب سرتاسری داشته و از داده های تحلیلی حذف شده اند

Table3. Concrete specimens which water has penetrated through their whole sections and have been removed from the analytical data

ردیف	مقدار فشار اعمالی	مدت زمان اعمال فشار	نسبت آب به سیمان	جهت آزمایش	سن نمونه
۱	۹/۵	۳/۵ ساعت	۰/۶	جهت بتن‌ریزی	۷
۲	۹/۵	۳/۵ ساعت	۰/۶	جهت عمود بر بتن‌ریزی	۷
۳	۹/۵	۲/۵ ساعت	۰/۶	جهت عمود بر بتن‌ریزی	۷
۴	۹/۵	۳/۵ ساعت	۰/۵	جهت عمود بر بتن‌ریزی	۷
۵	۷/۵	۳/۵ ساعت	۰/۶	جهت عمود بر بتن‌ریزی	۷

این نمونه‌ها در این تحقیق ارائه نشده است. مشخصات نمونه‌ها، مقدار فشار و مدت زمان اعمال برای نمونه‌های غیرقابل قبول در جدول ۳ آورده شده است.

۴-۲-۱- تأثیر جهت بتن ریزی بر میزان نفوذپذیری

در اشکال ۹-الف و ۹-ب نسبت حجم نفوذ و عمق نفوذ در جهت بتن‌ریزی به مقادیر متناظر در عمود بر آن آورده شده است. مطابق نتایج بدست آمده، حجم و عمق نفوذ در جهت بتن‌ریزی کمتر از حجم و عمق نفوذ در جهت عمود بر آن است. پس از ریختن بتن در قالب، عمل تراکم توسط ضربه با استفاده از کوبه انجام گردید. به نظر می‌رسد ارتباط بعضی از منافذ در اثر تراکم در این جهت قطع شده و در نتیجه نفوذپذیری در جهت بتن‌ریزی کمتر از جهت عمود بر آن به دست آمده است. ضمن این که وزن نمونه بتنی نیز باعث بسته شدن بعضی از منافذ در جهت بتن‌ریزی می‌شود.

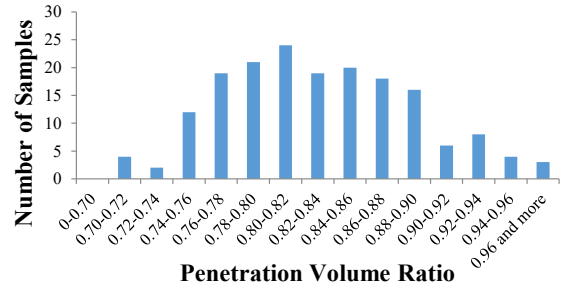
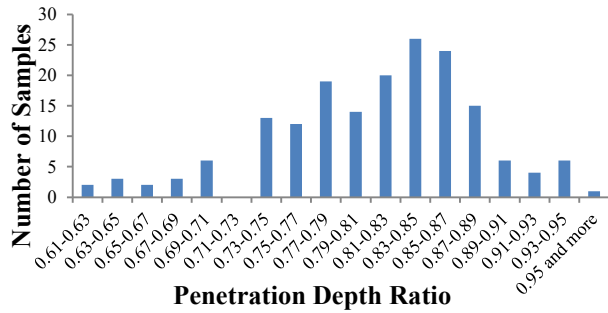
میانگین نسبت حجم و عمق نفوذ در جهت بتن‌ریزی به جهت عمود بر آن به ترتیب برابر با ۰/۸۳ و ۰/۸۱ به دست آمده است. نسبت حجم نفوذ در جهت بتن‌ریزی به جهت عمود بر آن برای ۸۴/۶۶ درصد از نمونه‌ها در بازه ۰/۷۴ تا ۰/۹۰ قرار دارد. همچنین ۸۱/۲۵ درصد از نمونه‌ها دارای نسبت عمق نفوذ در جهت بتن‌ریزی به جهت عمود بر آن در بازه ۰/۷۳ تا ۰/۸۹ می‌باشند.

۴-۲-۲- ارزیابی رابطه بین حجم و عمق نفوذ با مقدار فشار و مدت زمان اعمال آن

رابطه بین حجم نفوذ و فشار به صورت یک رابطه توانی در نظر

نشان داده شده است. اشکال ۸-الف و ۸-ج مربوط به نمونه‌های با نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴ تحت فشارهای اعمالی مختلف و اشکال ۸-ب و ۸-د مربوط به نمونه‌های با نسبت‌های آب به سیمان مختلف تحت فشار اعمالی برابر با ۰/۵ مگاپاسکال است. به دلیل شباهت نمودارهای ذکر شده با نمودارهای مربوط به سایر نمونه‌ها، از آوردن آنها خودداری شده و تنها نمودارهای شکل ۸ بررسی می‌شوند. نمودارهای مربوط به سایر نمونه‌ها تنها در مقادیر محاسبه شده با هم تفاوت دارند و روند کلی نمودارها یکسان است. بدیهی است که با افزایش بیشتر زمان آزمایش، حجم آب نفوذ کرده به نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد. مطابق شکل ۸-الف، با افزایش مقدار فشار اعمالی بر روی یک نمونه که در مدت زمانی مشخص به آن اعمال می‌شود، حجم نفوذ افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت آب به سیمان تحت فشار اعمالی در مدت زمانی معلوم، حجم آب نفوذ کرده در نمونه افزایش می‌یابد (شکل ۸-ب). در ابتدای آزمایش آب با سرعت بیشتری در نمونه‌های نفوذ می‌کند و با گذشت بیشتر زمان از شروع آزمایش، به دلیل پر شدن منافذ بیشتر از آب، از سرعت نفوذ کم می‌شده و به یک مقدار کوچک میل می‌کند که این روند در اشکال ۸-ج و ۸-د نشان داده شده است (در این اشکال محور زمان به صورت لگاریتمی درآمده است). در یک نسبت آب به سیمان مشخص، با افزایش فشار مقدار نرخ نفوذ آب بیشتر می‌شود (شکل ۸-ج). همچنین تحت فشار اعمالی ثابت، با افزایش نسبت آب به سیمان نرخ نفوذ نیز افزایش می‌یابد (شکل ۸-د).

لازم به ذکر است که در بعضی از نمونه‌ها، به دلیل زیاد بودن مقدار فشار اعمالی یا زیاد بودن نسبت آب به سیمان، نشت آب از وجوه اطراف نمونه در حین انجام آزمایش مشاهده گردید. نتایج مربوطه به

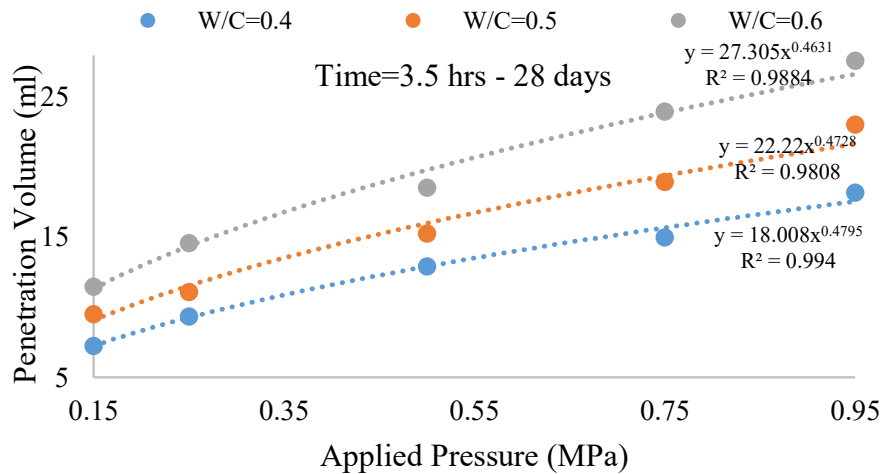


ب) نسبت عمق نفوذ در جهت بتن‌ریزی به جهت عمود بر آن.

الف) نسبت حجم نفوذ در جهت بتن‌ریزی به جهت عمود بر آن.

شکل ۹. نسبت حجم و عمق نفوذ در جهت بتن‌ریزی به جهت عمود بر آن برای نمونه‌های مختلف.

Fig. 9. Ratio of penetration volume and penetration depth in casting direction to those of in the direction perpendicular to casting for different specimens a) Ratio of penetration volume in casting direction to that of in the direction perpendicular to casting b) Ratio of penetration depth in casting direction to that of in the direction perpendicular to casting



شکل ۱۰: رابطه بین حجم نفوذ و فشار در جهت بتن‌ریزی برای نمونه‌های ۲۸ روزه با نسبت‌های آب به سیمان مختلف (زمان آزمایش ۳/۵ ساعت است).
Fig. 10. Relation between penetration volume and pressure in casting direction for the 28-day specimens with different water to cement ratios (test duration is 3.5 hour)

زمان انجام آزمایش، در یک سن مشخص مقدار توان به دست آمده با استفاده از تابع توانی برای تمامی نمونه‌ها تقریباً ثابت است و تنها با تغییر در سن نمونه‌ها و جهت انجام آزمایش مقدار آن تغییر می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که توان به دست آمده در یک سن مشخص در جهت بتن‌ریزی، به دلیل نفوذپذیری کمتر در این جهت، کوچکتر از جهت عمود بر آن است. با افزایش سن نمونه‌ها، به دلیل پیشرفت هیدراسیون و پر شدن منافذ از محصولات هیدراسون، مقدار توان کاهش می‌یابد. بنابراین بیشترین توان مربوط به نمونه‌های ۷ روزه و کمترین توان مربوط به نمونه‌های ۹۱ روزه می‌باشد. میانگین توان‌های به دست آمده در یک سن مشخص در جدول ۵ آورده شده است.

در شکل ۱۱، رابطه بین عمق نفوذ و فشار در جهت بتن‌ریزی برای

گرفته شده است ($V=a.P^n$). در شکل ۱۰ رابطه بین حجم نفوذ و فشار در جهت بتن‌ریزی برای نمونه‌های ۲۸ روزه با نسبت‌های آب به سیمان مختلف که به مدت ۳/۵ ساعت تحت فشارهای مختلف نفوذپذیری آنها ارزیابی شده است، مشاهده می‌شود. صرف‌نظر از نسبت آب به سیمان، توان به دست آمده برای تقریب این رابطه با استفاده از تابع توانی تقریباً ثابت (حدود ۰/۴۷) به دست آمده است. همچنین ضرایب همبستگی به دست آمده که در تمامی موارد بزرگتر از ۰/۹۸ می‌باشند، بیانگر دقت بالای تابع توانی در تقریب رابطه بین حجم نفوذ و فشار است. نتایج به دست آمده مربوط به سایر نمونه‌ها در جدول ۴ خلاصه شده است.

مطابق نتایج جدول ۱۰، صرف‌نظر از نسبت آب به سیمان و مدت

جدول ۴. مقدار توان (n) در رابطه بین حجم نفوذ و فشار ($V=a.P^n$)
 Table4. Value of the exponent (n) for the relationship between penetration volume and pressure ($V=a.P^n$)

جهت بتن ریزی												
نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۶				نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۵				نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴				$V=a.P^n$
۳/۵	۲/۵	۱/۵	۰/۵	۳/۵	۲/۵	۱/۵	۰/۵	۳/۵	۲/۵	۱/۵	۰/۵	زمان (ساعت)
۰/۴۸۷۶	۰/۵۰۵۶	۰/۵۰۲۱	۰/۴۹۵۴	۰/۴۹۰۷	۰/۵۰۸۷	۰/۵۰۱۸	۰/۵۰۳۴	۰/۴۹۰۹	۰/۵۱۰۳	۰/۵۱۱۳	۰/۵۰۶۴	نمونه ۷ روزه
۰/۴۶۳۱	۰/۴۸۵۳	۰/۴۵۷۲	۰/۴۵۹۰	۰/۴۷۲۸	۰/۴۷۹۹	۰/۴۷۴۸	۰/۴۶۸۴	۰/۴۷۹۵	۰/۴۸۲۳	۰/۴۷۳۲	۰/۴۷۶۸	نمونه ۲۸ روزه
۰/۴۲۹۰	۰/۴۱۶۲	۰/۴۰۰۷	۰/۴۲۴۶	۰/۴۲۵۵	۰/۴۱۲۶	۰/۴۱۵۲	۰/۳۹۷۹	۰/۴۱۸۴	۰/۴۲۰۶	۰/۴۱۳۶	۰/۴۲۷۱	نمونه ۹۱ روزه
جهت عمود بر بتن ریزی												
نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۶				نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۵				نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴				$V=a.P^n$
۳/۵	۲/۵	۱/۵	۰/۵	۳/۵	۲/۵	۱/۵	۰/۵	۳/۵	۲/۵	۱/۵	۰/۵	زمان (ساعت)
۰/۵۹۱۸	۰/۵۲۹۲	۰/۵۵۱۱	۰/۵۶۳۰	۰/۵۳۹۷	۰/۵۶۴۸	۰/۵۶۸۲	۰/۵۴۲۰	۰/۵۵۸۵	۰/۵۶۴۶	۰/۵۴۵۲	۰/۵۵۳۱	نمونه ۷ روزه
۰/۵۲۸۳	۰/۵۱۷۴	۰/۵۳۶۹	۰/۵۳۰۷	۰/۵۲۷۴	۰/۵۳۷۸	۰/۵۲۲۸	۰/۵۱۷۴	۰/۵۱۴۵	۰/۵۲۰۸	۰/۵۲۴۶	۰/۵۱۲۳	نمونه ۲۸ روزه
۰/۴۶۵۹	۰/۴۶۹۲	۰/۴۷۳۵	۰/۴۶۶۱	۰/۴۵۷۸	۰/۴۴۴۹	۰/۴۵۳۷	۰/۴۴۲۴	۰/۴۶۹۷	۰/۴۵۵۹	۰/۴۷۶۳	۰/۴۵۴۴	نمونه ۹۱ روزه

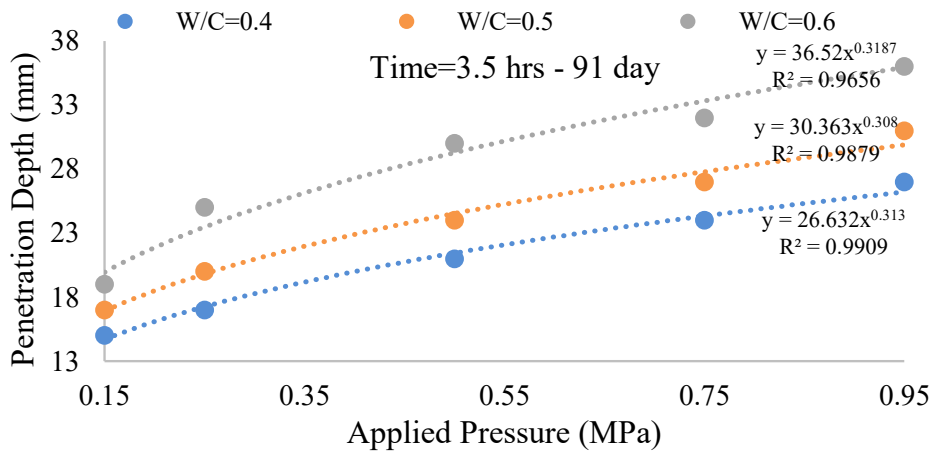
از تابع توانی جهت تقریب رابطه بین آنها استفاده شده است ($d=b.P^m$). همانند رابطه بین حجم نفوذ و فشار، در یک سن مشخص توان به دست آمده در تقریب رابطه عمق نفوذ و فشار نیز صرف نظر از نسبت آب به سیمان، مقداری تقریباً ثابتی (برابر با ۰/۳۱) دارد. ضرایب همبستگی به دست آمده نیز بزرگ تر از ۰/۹۶ می باشند. نتایج مربوط به سایر نمونه ها در جدول ۶ آورده شده است. مشاهده می شود که تنها جهت آزمایش و سن نمونه در مقدار توان رابطه عمق نفوذ و فشار تأثیر گذار است. در یک سن و جهت مشخص، توان به دست آمده برای تمامی نسبت های آب به سیمان استفاده شده در این تحقیق تقریباً ثابت می باشد. با افزایش سن نمونه مقدار توان کوچکتر می شود. همچنین توان به دست آمده در جهت بتن ریزی کمتر از مقدار متناظر

جدول ۵. میانگین توان های به دست آمده در تقریب رابطه بین حجم نفوذ و فشار با استفاده از تابع توانی

Table5. Average of the calculated exponents obtained from power function for the approximation of the relationship between penetration volume and pressure

سن نمونه	جهت بتن ریزی	جهت عمود بر بتن ریزی
۷ روز	۰/۵۰۱۲	۰/۵۵۵۹
۲۸ روز	۰/۴۷۲۷	۰/۵۲۴۲
۹۱ روز	۰/۴۱۶۸	۰/۴۶۰۸

نمونه های ۹۱ روزه با نسبت های آب به سیمان مختلف که به مدت ۳/۵ ساعت تحت فشارهای مختلف قرار گرفتند نشان داده شده است.



شکل ۱۱. رابطه بین عمق نفوذ و فشار در جهت بتن‌ریزی برای نمونه‌های ۹۱ روزه با نسبت‌های آب به سیمان مختلف (زمان آزمایش ۳/۵ ساعت است).
 Fig. 11. Relation between penetration depth and pressure in casting direction for the 91-day specimens with different water to cement ratios (test duration is 3.5 hour)

جدول ۶. مقدار توان (m) در رابطه بین عمق نفوذ و فشار ($d=b.P^m$)

Table 6. Value of the exponent (m) for the relationship between penetration depth and pressure ($d=b.P^m$)

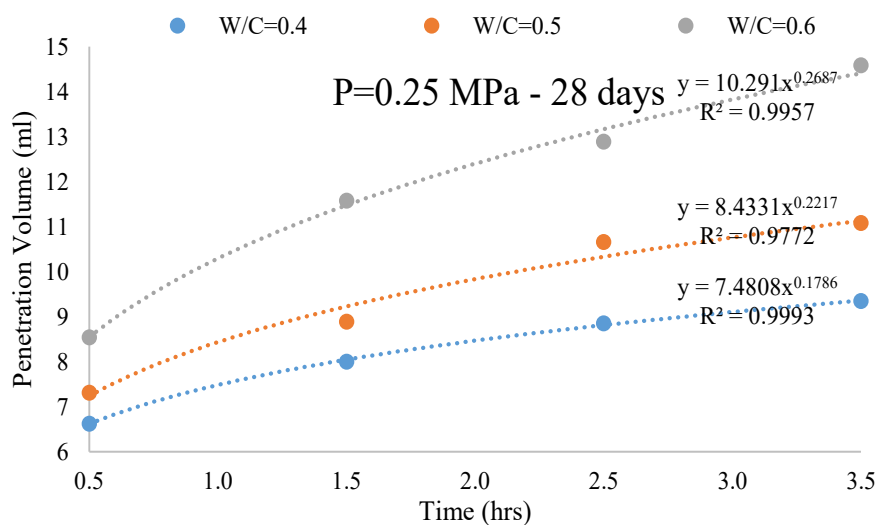
جهت بتن‌ریزی												
نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۶				نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۵				نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴				$d=b.P^m$
۳/۵	۲/۵	۱/۵	۰/۵	۳/۵	۲/۵	۱/۵	۰/۵	۳/۵	۲/۵	۱/۵	۰/۵	زمان (ساعت)
۰/۴۲۴۷	۰/۳۹۸۷	۰/۴۱۲۵	۰/۴۱۸۱	۰/۴۰۰۶	۰/۴۰۱۸	۰/۴۲۸۵	۰/۴۲۵۰	۰/۴۲۴۷	۰/۴۲۲۱	۰/۴۲۴۴	۰/۴۳۳۳	نمونه ۷ روزه
۰/۳۷۵۵	۰/۳۶۲۴	۰/۳۸۱۶	۰/۳۵۵۷	۰/۳۸۵۲	۰/۳۹۹۶	۰/۳۹۵۱	۰/۳۵۷۷	۰/۳۶۴۶	۰/۳۷۷۴	۰/۳۹۶۷	۰/۳۸۴۸	نمونه ۲۸ روزه
۰/۳۱۸۷	۰/۳۳۹۰	۰/۳۳۰۶	۰/۳۳۸۷	۰/۳۰۸۰	۰/۳۱۲۹	۰/۳۲۷۸	۰/۳۲۹۴	۰/۳۱۳۰	۰/۳۰۸۴	۰/۳۳۸۶	۰/۳۱۴۱	نمونه ۹۱ روزه
جهت عمود بر بتن‌ریزی												
نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۶				نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۵				نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴				$d=b.P^m$
۳/۵	۲/۵	۱/۵	۰/۵	۳/۵	۲/۵	۱/۵	۰/۵	۳/۵	۲/۵	۱/۵	۰/۵	زمان (ساعت)
۰/۴۲۱۷	۰/۴۴۷۵	۰/۴۵۴۲	۰/۴۶۴۳	۰/۴۷۱۲	۰/۴۶۶۱	۰/۴۶۳۸	۰/۴۵۱۱	۰/۴۶۵۴	۰/۴۷۰۲	۰/۴۶۰۲	۰/۴۷۲۲	نمونه ۷ روزه
۰/۳۹۵۶	۰/۳۸۷۴	۰/۴۰۷۰	۰/۳۸۰۴	۰/۴۰۲۵	۰/۳۹۹۸	۰/۴۱۸۲	۰/۴۱۱۸	۰/۳۸۹۰	۰/۴۰۸۸	۰/۴۰۹۳	۰/۳۸۱۲	نمونه ۲۸ روزه
۰/۲۹۴۱	۰/۳۰۴۵	۰/۳۱۷۹	۰/۳۰۹۶	۰/۳۱۳۱	۰/۳۰۹۰	۰/۳۱۰۷	۰/۲۹۴۲	۰/۳۰۵۶	۰/۳۱۵۸	۰/۳۰۳۳	۰/۳۳۸۶	نمونه ۹۱ روزه

آن در جهت عمود بر بتن‌ریزی است. با بیشتر شدن نفوذپذیری مقدار توان نیز بزرگ‌تر می‌شود. مقادیر میانگین توان‌های به دست آمده در

جدول ۷. میانگین توان‌های به دست آمده در تقریب رابطه بین عمق نفوذ و فشار با استفاده از تابع توانی

Table 7. Average of the calculated exponents obtained from power function for the approximation of the relationship between penetration depth and pressure

جهت عمود بر بتن ریزی	جهت بتن ریزی	سن نمونه
۰/۴۵۹۰	۰/۴۱۷۹	۷ روز
۰/۳۹۹۳	۰/۳۷۸۰	۲۸ روز
۰/۳۰۹۷	۰/۳۲۳۳	۹۱ روز



شکل ۱۲. رابطه بین حجم نفوذ و مدت زمان اعمال فشار در جهت بتن ریزی برای نمونه‌های ۲۸ روزه با نسبت‌های آب به سیمان مختلف (فشار آزمایش ۰/۲۵ مگاپاسکال است).

Fig. 12. Relation between penetration volume and duration of the applied pressure in casting direction for the 28-day specimens with different water to cement ratios (test pressure is 0.25 MPa)

و فشار مشخص وجود ندارد و ممکن است نمونه با نسبت آب به سیمان کمتر دارای توان بزرگتری باشد. همچنین در یک نسبت آب به سیمان مشخص و فشار ثابت، با افزایش سن نمونه، توان به دست آمده ممکن است کوچکتر یا بزرگتر شود. با تغییر جهت آزمایش نیز روند تغییرات توان نیز قابل پیش‌بینی نیست (الزاماً در راستای عمود بر بتن ریزی توان بزرگ‌تری به دست نمی‌آید). بنابراین می‌توان گفت که برخلاف رابطه بین حجم نفوذ و فشار که در آن توان به دست آمده تنها به سن نمونه و جهت آزمایش بستگی دارد، توان به دست آمده در تقریب رابطه حجم نفوذ و زمان اعمال فشار بسته به سن نمونه، مقدار فشار، نسبت آب به سیمان و جهت آزمایش مقادیر مختلفی دارد و با توجه به متغیرهای ذکر شده روند آن قابل پیش‌بینی نمی‌باشد.

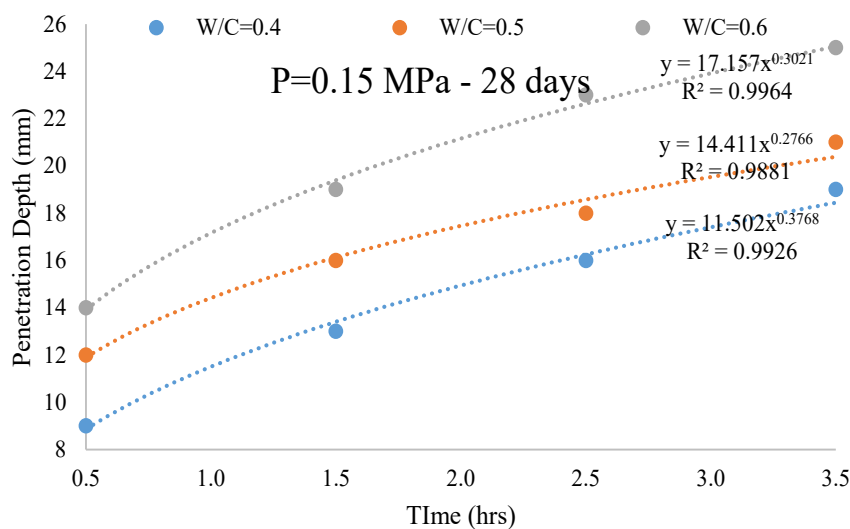
تقریب رابطه بین عمق نفوذ و فشار با استفاده از تابع توانی در جدول ۷ آورده شده است.

از تابع توانی جهت بررسی رابطه بین حجم نفوذ و مدت زمان اعمال فشار نیز استفاده شده است ($V = a_1 \cdot t^{n_1}$). در شکل ۱۲ رابطه بین حجم نفوذ و مدت زمان اعمال فشار در جهت بتن ریزی برای نمونه‌های ۲۸ روزه با نسبت‌های آب به سیمان مختلف که تحت فشار ۰/۲۵ مگاپاسکال نفوذپذیری آنها ارزیابی شده است، مشاهده می‌شود. مطابق شکل، توان به دست آمده در تخمین این رابطه با استفاده از تابع توانی برای نمونه‌های با نسبت‌های آب به سیمان مختلف متفاوت است. در جدول ۸، توان‌های به دست آمده برای فشارهای مختلف آورده شده است. مشاهده می‌شود که رابطه‌ای بین توان به دست آمده و نسبت آب به سیمان در یک سن

جدول ۸. مقدار توان (n_1) در رابطه بین حجم نفوذ و مدت زمان اعمال فشار ($V = a_1 \cdot t^{n_1}$)

Table 8. Value of the exponent (n_1) for the relationship between penetration volume and duration of the applied pressure ($V = a_1 \cdot t^{n_1}$)

جهت عمود بر بتن ریزی			جهت بتن ریزی			فشار (مگاپاسکال)	$V = a_1 \cdot t^{n_1}$
نمونه ۹۱ روزه	نمونه ۲۸ روزه	نمونه ۷ روزه	نمونه ۹۱ روزه	نمونه ۲۸ روزه	نمونه ۷ روزه		
۰/۲۴۴۰	۰/۲۰۵۳	۰/۲۴۳۶	۰/۲۳۱۲	۰/۲۰۲۹	۰/۳۱۷۶	۰/۱۵	نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴
۰/۱۸۹۱	۰/۲۰۴۰	۰/۳۰۹۸	۰/۱۴۶۵	۰/۱۷۸۶	۰/۲۲۵۶	۰/۲۵	
۰/۲۷۸۵	۰/۲۶۴۵	۰/۲۸۳۱	۰/۱۹۱۲	۰/۱۶۹۴	۰/۲۳۹۸	۰/۵۰	
۰/۲۴۲۳	۰/۱۹۱۰	۰/۲۶۸۸	۰/۱۸۶۲	۰/۲۱۳۹	۰/۲۷۶۲	۰/۷۵	
۰/۲۱۷۶	۰/۲۰۸۶	۰/۲۷۳۴	۰/۲۰۵۱	۰/۱۹۲۸	۰/۲۸۹۵	۰/۹۵	
۰/۱۸۱۸	۰/۲۳۰۹	۰/۲۳۰۲	۰/۱۸۵۲	۰/۲۱۶۳	۰/۳۲۵۵	۰/۱۵	نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۵
۰/۱۷۱۳	۰/۲۴۱۶	۰/۳۱۷۹	۰/۱۹۳۷	۰/۲۲۱۷	۰/۲۶۶۲	۰/۲۵	
۰/۲۲۵۶	۰/۲۰۰۷	۰/۲۵۷۴	۰/۲۰۰۰	۰/۲۲۵۸	۰/۳۳۶۲	۰/۵۰	
۰/۱۹۴۳	۰/۲۴۹۲	۰/۲۷۹۳	۰/۱۹۹۴	۰/۲۶۳۲	۰/۲۸۱۵	۰/۷۵	
۰/۱۷۳۶	۰/۲۵۳۴	۰/۲۴۹۴	۰/۲۱۳۷	۰/۱۹۵۶	۰/۳۰۶۱	۰/۹۵	
۰/۲۲۰۲	۰/۲۷۷۱	۰/۲۹۶۳	۰/۱۸۴۹	۰/۱۹۳۵	۰/۲۷۴۶	۰/۱۵	نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۶
۰/۱۶۹۲	۰/۲۳۰۰	۰/۳۱۶۶	۰/۲۲۲۶	۰/۲۶۸۷	۰/۳۲۱۵	۰/۲۵	
۰/۱۷۷۰	۰/۲۲۸۹	۰/۳۰۶۱	۰/۲۱۷۵	۰/۲۴۶۶	۰/۲۹۲۰	۰/۵۰	
۰/۲۱۲۶	۰/۲۷۱۸	۰/۲۶۷۸	۰/۲۱۱۴	۰/۲۴۷۵	۰/۲۸۶۲	۰/۷۵	
۰/۲۰۲۸	۰/۲۴۹۷	۰/۲۶۷۱	۰/۱۸۵۴	۰/۲۱۲۹	۰/۲۹۷۷	۰/۹۵	



شکل ۱۳: رابطه بین عمق نفوذ و مدت زمان اعمال فشار در جهت بتن ریزی برای نمونه‌های ۲۸ روزه با نسبت‌های آب به سیمان مختلف (فشار آزمایش ۰/۱۵ مگاپاسکال است).

Fig. 13. Relation between penetration depth and duration of the applied pressure in casting direction for the 28-day specimens with different water to cement ratios (test pressure is 0.15 MPa)

جدول ۹. مقدار توان (m_1) در رابطه بین عمق نفوذ و مدت زمان اعمال فشار ()

Table 9. Value of the exponent (m_1) for the relation between penetration depth and duration of the applied pressure ($d=b_1.t^{m_1}$)

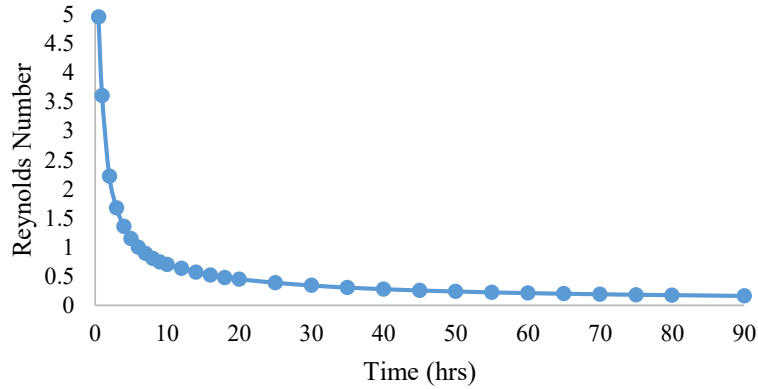
جهت عمود بر بتن ریزی			جهت بتن ریزی			فشار (مگاپاسکال)	$d = b_1.t^{m_1}$
نمونه ۹۱ روزه	نمونه ۲۸ روزه	نمونه ۷ روزه	نمونه ۹۱ روزه	نمونه ۲۸ روزه	نمونه ۷ روزه		
۰/۳۲۰۳	۰/۳۴۹۴	۰/۳۲۵۸	۰/۳۷۵۱	۰/۳۷۶۸	۰/۳۴۶۹	۰/۱۵	نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴
۰/۲۶۳۵	۰/۳۲۸۳	۰/۲۹۹۷	۰/۳۲۳۵	۰/۳۲۹۳	۰/۳۲۵۸	۰/۲۵	
۰/۲۳۵۰	۰/۳۱۱۶	۰/۳۳۶۹	۰/۳۶۴۶	۰/۳۰۸۵	۰/۳۶۷۶	۰/۵۰	
۰/۲۸۷۴	۰/۳۷۱۴	۰/۳۴۶۸	۰/۳۴۴۷	۰/۳۳۸۸	۰/۳۵۴۸	۰/۷۵	
۰/۲۷۹۸	۰/۳۵۰۴	۰/۲۸۴۵	۰/۳۵۸۹	۰/۳۶۰۳	۰/۳۰۸۳	۰/۹۵	
۰/۲۵۰۵	۰/۲۷۸۲	۰/۲۴۵۴	۰/۳۲۵۸	۰/۲۷۶۶	۰/۳۳۶۶	۰/۱۵	نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۵
۰/۲۲۵۹	۰/۲۷۳۵	۰/۲۷۷۱	۰/۳۵۸۸	۰/۳۱۶۳	۰/۳۰۲۳	۰/۲۵	
۰/۲۴۳۱	۰/۲۸۴۸	۰/۳۰۲۰	۰/۳۱۰۰	۰/۳۰۰۹	۰/۳۳۳۵	۰/۵۰	
۰/۲۵۴۴	۰/۲۸۵۵	۰/۲۶۸۷	۰/۳۳۷۱	۰/۳۱۳۸	۰/۳۰۰۸	۰/۷۵	
۰/۲۶۰۶	۰/۲۵۱۱	۰/۲۱۴۳	۰/۳۱۰۳	۰/۳۲۱۴	۰/۳۰۰۸	۰/۹۵	
۰/۲۰۳۳	۰/۲۱۲۶	۰/۲۵۸۴	۰/۳۳۰۶	۰/۳۰۲۱	۰/۳۱۹۲	۰/۱۵	نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۶
۰/۲۴۶۸	۰/۲۳۹۵	۰/۲۲۹۶	۰/۳۶۷۷	۰/۲۸۳۲	۰/۳۰۶۵	۰/۲۵	
۰/۲۳۵۳	۰/۲۱۹۹	۰/۲۶۰۳	۰/۳۴۵۰	۰/۳۱۹۷	۰/۳۰۹۷	۰/۵۰	
۰/۲۳۰۱	۰/۲۲۶۲	۰/۱۹۶۱	۰/۳۲۷۷	۰/۲۹۸۹	۰/۲۹۶۵	۰/۷۵	
۰/۱۸۵۶	۰/۲۳۶۶	۰/۱۵۳۲	۰/۳۳۳۵	۰/۳۱۰۹	۰/۲۷۵۱	۰/۹۵	

منافذ که به مقدار فشار و مدت زمان آزمایش نفوذپذیری بستگی دارد (با گذشت زمان تغییر شکل‌ها نیز بیشتر می‌شوند)، تغییر در روند عبور آب از منافذی که با گذشت زمان در اثر نفوذ آب کاملاً اشباع شده نسبت به منافذی که خشک‌تر بوده و دارای جذب آب بیشتری می‌باشند، می‌تواند از عوامل مؤثر در این رفتار باشند.

۴-۲-۳- بررسی نوع جریان نفوذ آب در بتن

طبقه‌بندی نوع جریان در محیط متخلخل بر اساس عدد بی‌بعد رینولدز انجام می‌گیرد. در سال ۱۸۸۳، رینولدز عددی بی‌بعد را معرفی کرد که می‌توانست الگوی جریان را معلوم کند [۳۴]. این عدد به خواص استاتیکی و دینامیکی سیال، هم‌چون سرعت، چگالی،

در شکل ۱۳ رابطه بین عمق نفوذ و مدت زمان اعمال فشار در جهت بتن‌ریزی برای نمونه‌های ۲۸ روزه با نسبت‌های مختلف آب به سیمان در فشار ۰/۱۵ مگاپاسکال نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تابع توانی با ضریب همبستگی بالایی این رابطه را تقریب زده است. توان‌های به دست آمده نیز با هم متفاوت هستند. در جدول ۹ توان‌های به دست آمده با استفاده از تابع توانی در تقریب رابطه بین عمق نفوذ و مدت زمان اعمال فشار آورده شده است. همانند رابطه بین حجم نفوذ و مدت زمان اعمال فشار، روند مشخصی در توان‌های به دست آمده در تقریب رابطه بین عمق نفوذ و مدت زمان اعمال فشار وجود ندارد. عواملی از قبیل مکش‌های مؤبینه، پیوستگی و انقطاع حفرات موجود در داخل بتن، تغییر شکل احتمالی حفرات و



شکل ۱۴. رابطه بین عدد رینولدز و مدت زمان آزمایش در جهت عمود بر بتن ریزی برای نمونه ۷ روزه با نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۶ تحت فشار برابر با ۰/۹۵ مگاپاسکال به مدت ۱/۵ ساعت.

Fig. 14. Relation between Reynolds number and test duration in the direction perpendicular to casting for the 7-day specimens with water to cement ratio of 0.6 under an applied pressure of 0.95 MPa for 1.5 hour

D قطر داخلی صفحه فلزی که آب از آن به داخل نمونه نفوذ می کند
(m) و μ لزجت آب (Pa.s) است.

با افزایش نسبت آب به سیمان و مقدار فشار و کاهش سن سرعت نفوذ آب در نمونه بتنی بیشتر خواهد شد. همچنین با گذشت زمان از شروع انجام آزمایش، سرعت نفوذ آب در نمونه بتنی و در نتیجه عدد رینولدز کاهش می یابد. بنابراین بیشترین مقدار عدد رینولدز در شروع آزمایش می باشد. با توجه به موارد ذکر شده در صورتی که عدد رینولدز محاسبه شده برای نمونه ۷ روزه در جهت عمود بر بتن ریزی با نسبت آب به سیمان ۰/۶ تحت فشار اعمالی برابر با ۰/۹۵ مگاپاسکال، وجود جریان لایه ای را در نمونه بتنی نشان دهد، در سایر نمونه ها نیز جریان از نوع لایه ای خواهد بود (زیرا در این نمونه بیشترین سرعت در شروع آزمایش نسبت به سایر آزمایش ها به وجود می آید). شکل ۱۴ تغییرات عدد رینولدز با گذشت زمان را برای نمونه ذکر شده نشان می دهد.

مطابق شکل، بیشترین مقدار عدد رینولدز در ابتدای آزمایش برابر با ۴/۹۶ به دست آمده که بسیار کوچکتر از ۲۳۰۰ (مرز بین جریان گذرا و لایه ای) است و با گذشت بیشتر زمان از شروع آزمایش از مقدار آن کاسته می شود تا به یک مقدار تقریباً ثابت برسد. مطابق شکل، پس از گذشت حدود ۲۰ دقیقه از شروع آزمایش عدد رینولدز به مقدار تقریباً ثابتی رسیده است. با توجه به اینکه عدد رینولدز به دست آمده برای سایر نمونه ها کوچکتر از ۴/۹۶ است، بنابراین می توان نتیجه گرفت که جریان نفوذ آب در سایر نمونه ها نیز از نوع

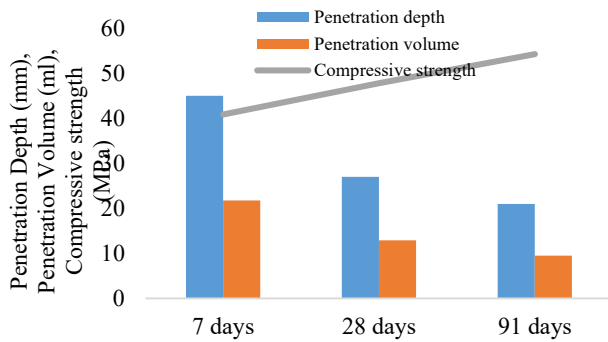
ویسکوزیته دینامیکی و ... وابسته است. وی مشاهده کرد که در هنگام ورود یک سیال رنگی به درون یک لوله آب، بسته به سرعت سیال رنگی، حالت های مختلفی رخ می دهد. در صورتی که سرعت سیال رنگی کم باشد، موازی با لوله به درون آب نفوذ می کند. در سرعت های بالا نیز حرکت مولکول های سیال به صورت دلخواه در جهت های مختلف است. در واقع عدد رینولدز بیان کننده نسبت نیروی اینرسی به نیروی لزجی است. با استفاده از عدد رینولدز سه نوع جریان تعریف می شود:

- ۱- جریان لایه ای که در آن عدد رینولدز کوچکتر از ۲۳۰۰ است ($Re \leq 2300$)
- ۲- جریان گذرا که در آن عدد رینولدز در بازه ۲۳۰۰ تا ۴۰۰۰ قرار دارد ($2300 < Re < 4000$)
- ۳- جریان آشفته که در آن عدد رینولدز بزرگتر از ۴۰۰۰ است ($4000 \leq Re$)

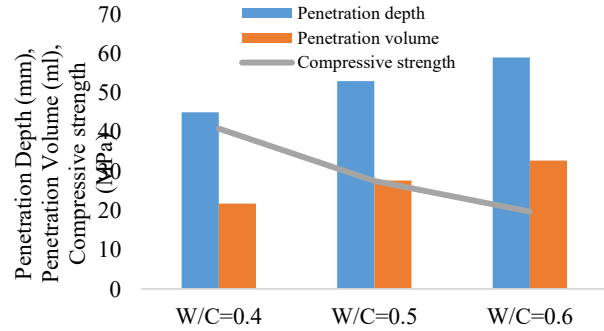
محاسبه عدد رینولدز و تعیین نوع جریان در نمونه بتنی از آن جهت دارای اهمیت است که در اکثر موارد جهت ارزیابی نفوذپذیری نمونه های بتنی از ضریب نفوذپذیری به دست آمده با استفاده از قانون دارسی استفاده می شود. قانون دارسی بر پایه لایه ای بودن جریان استوار است. عدد رینولدز به صورت رابطه (۴) محاسبه می شود.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (4)$$

که در آن ρ جرم حجمی ($\frac{kg}{m^3}$)، v متوسط سرعت نفوذ ($\frac{m}{s}$)،



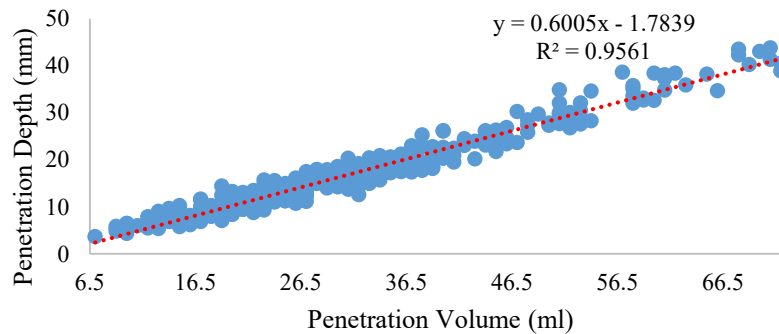
ب) نتایج مقاومت فشاری و نفوذپذیری نمونه‌های با نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴ در سن‌های مختلف.



الف) نتایج مقاومت فشاری و نفوذپذیری نمونه‌های ۷ روزه با نسبت‌های آب به سیمان مختلف.

شکل ۱۵. رابطه بین مقاومت فشاری و نفوذپذیری.

Fig. 15. Relation between compressive strength and permeability a) Results of the compressive strength and permeability for the 7-day specimens with different water to cement ratios b) Results of the compressive strength and permeability for the specimens with water to cement ratio of 0.4 at different ages



شکل ۱۶. رابطه بین حجم و عمق نفوذ.

Fig. 16. Relation between penetration volume and penetration depth

یک نسبت آب به سیمان ثابت، به دلیل کاهش منافذ، مقاومت فشاری افزایش یافته و نفوذپذیری کاهش می‌یابد. بنابراین بین مقاومت فشاری و نفوذپذیری یک نمونه رابطه معکوس وجود دارد.

نتایج حجم و عمق نفوذ در دو جهت بتن‌ریزی و عمود بر آن برای نمونه‌های ساخته در شکل ۱۶ نشان داده شده است. رابطه مستقیمی بین حجم نفوذ و عمق نفوذ مشاهده می‌شود. مطابق شکل ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۵۶۱ در تقریب این رابطه با استفاده از تابع خطی به دست آمده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، نفوذپذیری، مقاومت فشاری و لنگر پیچشی لازم

جریان لایه‌ای است و می‌توان از قانون دارسی برای محاسبه ضریب نفوذپذیری برای نمونه‌ها استفاده کرد.

۳-۴- روابط بین نتایج

در شکل ۱۵-الف مقاومت فشاری، عمق و حجم نفوذ برای نمونه‌های ۷ روزه با نسبت‌های مختلف آب به سیمان و در شکل ۱۵-ب مقاومت فشاری، عمق و حجم نفوذ برای نمونه‌های با نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴ در سن‌های مختلف نشان داده شده است. نتایج عمق و حجم نفوذ تحت فشار ۰/۵ مگاپاسکال به مدت ۳/۵ ساعت در جهت بتن‌ریزی به دست آمده‌اند. مطابق اشکال، با کاهش نسبت آب به سیمان در یک سن مشخص و همچنین افزایش سن در

نمونه‌ها وارد می‌شود، نمونه با نسبت آب به سیمان کمتر و سن بیشتر داری نفوذپذیری کمتر و مقاومت فشاری بیشتری است. بنابراین رابطه معکوسی بین مقاومت فشاری و نفوذپذیری نمونه‌ها وجود دارد. ۷- رابطه مستقیمی بین عمق نفوذ و حجم نفوذ در نمونه‌های بتنی مشاهده گردید. این رابطه با استفاده از تابع خطی با دقت بسیار بالایی تخمین زده شد.

نتایج به دست آمده با استفاده از سیمان پرتلند نوع ۲ گزارش شده‌اند. با توجه به اینکه از مواد افزودنی جهت بهبود مشخصات مکانیکی و دوام بتن استفاده می‌شود، می‌توان اثر مقاومت، زمان و مقدار فشار آب و جهت بتن‌ریزی بر نفوذپذیری نمونه‌های بتنی حاوی افزودنی‌های مختلف مانند دوده سیلیسی، خاکستر بادی، زئولیت و ... و همچنین مقایسه با نتایج به دست آمده را به عنوان کارهای آتی بررسی کرد. اثر تنش‌های اعمالی، سیکل‌های متوالی ذوب و یخ، اثر مقدار و نوع سنگدانه‌ها بر نتایج به دست آمده به عنوان پژوهش‌های آتی نیز قابل بررسی است.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	مساحت، m^2
D	قطر صفحه زیرسری، m
E	مدول الاستیسیته، N/m^2
h	قرائت میکروکتر، mm
J	ممان اینرسی قطبی، m^4
k	ضریب ثابت در محاسبه تنش برشی ناشی از لنگر پیچشی m^{-3}
P	فشار، N/m^2
Q	نرخ نفوذ، ml/min
r	شعاع صفحه‌های فلزی، m
Re	عدد رینولدز، Dimensionless
T	لنگر پیچشی، $N.m$
t	زمان، min
V	حجم نفوذ، ml
v	سرعت، m/s

علائم یونانی

برای جدا کردن صفحه‌های فلزی از سطح نمونه‌های بتنی ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه با نسبت‌های آب به سیمان برابر با ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ ارزیابی شده است. جهت ارزیابی نفوذپذیری نمونه‌ها در دو جهت بتن‌ریزی و عمود بر آن از فشارهای برابر با ۰/۱۵، ۰/۲۵، ۰/۵۰، ۰/۷۵ و ۰/۹۵ مگاپاسکال که به مدت ۰/۵، ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ ساعت به سطح نمونه‌ها وارد گردیدند، استفاده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که:

۱- بین مقاومت فشاری و تنش برشی ناشی از پیچش جهت جدا کردن صفحه‌های فلزی از سطح نمونه‌ها رابطه مستقیمی وجود دارد. تابع خطی با دقت بسیار بالا این رابطه را تخمین می‌زند.

۲- در یک نمونه با نسبت آب به سیمان ثابت با افزایش مقدار فشار وارده، نفوذپذیری نمونه بیشتر می‌شود. همچنین در یک فشار ثابت، با افزایش نسبت آب به سیمان نفوذپذیری افزایش می‌یابد. سرعت نفوذ در ابتدای آزمایش بیشترین مقدار را دارا است و با گذشت بیشتر زمان از شروع آزمایش از سرعت نفوذ کاسته می‌شود و در نهایت به یک مقدار تقریباً ثابتی می‌رسد.

۳- مقدار نفوذپذیری در جهت بتن‌ریزی به دلیل انجام عمل تراکم و وزن لایه‌های بتن‌ریزی، کمتر از جهت عمود بر بتن‌ریزی است. میانگین نسبت حجم و عمق نفوذ در جهت بتن‌ریزی به جهت عمود بر آن به ترتیب برابر با ۰/۸۳ و ۰/۸۱ به دست آمد.

۴- روابط بین حجم و عمق نفوذ-مقدار فشار و حجم و عمق نفوذ-مدت زمان اعمال فشار با استفاده از تابع توانی با دقت بالایی تقریب زده شد. توان به دست آمده در تقریب رابطه بین حجم و عمق نفوذ با مقدار فشار، صرف نظر از نسبت آب به سیمان، به جهت آزمایش و سن نمونه بستگی دارد و در یک جهت و سن مشخص تقریباً ثابت است. با افزایش سن نمونه توان به دست آمده کاهش یافته و در جهت بتن‌ریزی مقدار آن کمتر از جهت عمود بر بتن‌ریزی است. در صورتی که توان به دست آمده در تقریب رابطه بین حجم و عمق نفوذ با مدت زمان اعمال فشار بسته به جهت آزمایش، سن نمونه‌ها، نسبت آب به سیمان و مقدار فشار مقادیر متفاوتی به دست می‌دهد.

۵- عدد رینولدز به دست آمده برای نمونه‌ها نشان می‌دهد که جریان نفوذ آب در نمونه‌های بتنی از نوع جریان لایه‌ای است. در نتیجه قانون دارسی برای نمونه‌های بتنی قابل استفاده است.

۶- در یک فشار ثابت که به مدت زمان مشخصی به سطح

paste blended with fly ash, Construction and building materials, 175 (2018) 458-466.

- [11] S.D. Abyaneh, H. Wong, N. Buenfeld, Computational investigation of capillary absorption in concrete using a three-dimensional mesoscale approach, Computational Materials Science, 87 (2014) 54-64.
- [12] I.G. Amadi, K.I. Amadi-Oparaeli, Effect of admixtures on strength and permeability of concrete, The International Journal of Engineering and Science, 7(7) (2018) 1-7.
- [13] T. Markiv, K. Sobol, M. Franus, W. Franus, Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 16(4) (2016) 554-562.
- [14] K. Samimi, S. Kamali-Bernard, A.A. Maghsoudi, M. Maghsoudi, H. Siad, Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes, Construction and building materials, 151 (2017) 292-311.
- [15] F. Shaikh, S. Kerai, S. Kerai, Effect of micro silica on mechanical and durability properties of high volume fly ash recycled aggregate concrete (HVFA-RAC), Advances in Concrete Construction, 3 (2015) 317-332.
- [16] M.P. Khiavi, M.A. Ghorbani, Effects of micro silica on permeability of plastic concrete, Journal of Materials Science and Engineering A, 4(12) (2014) 372-375.
- [17] L.G. Li, A.K. Kwan, Adding limestone fines as cementitious paste replacement to improve tensile strength, stiffness and durability of concrete, Cement and Concrete Composites, 60 (2015) 17-24.
- [18] Y. Yuan, Y. Chi, Water permeability of concrete under uniaxial tension, Structural Concrete, 15(2) (2014) 191-201.
- [19] H. Wang, X. Sun, J. Wang, P. Monteiro, Permeability of concrete with recycled concrete aggregate and pozzolanic materials under stress, Materials, 9(4) (2016) 252.
- [20] C. Qian, B. Huang, Y. Wang, M. Wu, Water seepage flow in concrete, Construction and building materials, 35 (2012) 491-496.

لزجت، Pa.s μ

چگالی، kg/m³ ρ

تنش برشی، N/m² τ

منابع

- [1] X. Li, Q. Xu, S. Chen, An experimental and numerical study on water permeability of concrete, Construction and Building Materials, 105 (2016) 503-510.
- [2] ACI CT-13, ACI Concrete Terminology, American Concrete Institute, (2013).
- [3] N. Banthia, A. Biparva, S. Mindess, Permeability of concrete under stress, Cement and Concrete Research, 35(9) (2005) 1651-1655.
- [4] M. Dashtibadfarid, M. Afrasiabi, Low-Permeability Concrete: Water-to-cement ratio optimization for designing drinking water reservoirs, International Journal of Innovations in Engineering and Science, 2(11) (2017) 20-24.
- [5] S. Ahmad, A.K. Azad, K.F. Loughlin, Effect of the key mixture parameters on tortuosity and permeability of concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, 10(3) (2012) 86-94.
- [6] P. Halamickova, R.J. Detwiler, D.P. Bentz, E.J. Garboczi, Water permeability and chloride ion diffusion in Portland cement mortars: relationship to sand content and critical pore diameter, Cement and Concrete Research, 25(4) (1995) 790-802.
- [7] T.C. Fu, W. Yeih, J.J. Chang, R. Huang, The influence of aggregate size and binder material on the properties of pervious concrete, Advances in Materials Science and Engineering, 2014 (2014) 1-17.
- [8] B.A. Warda, A.N. Munaz, Effects of aggregate gradation on water permeability of concrete, Advanced Materials Research, 488 (2012) 248-252.
- [9] L. Kong, Y. Ge, Mechanism study of effect of coarse aggregate size on permeability of concrete, ACI Materials Journal, 112(6) (2015) 767-774.
- [10] Z. Yu, C. Ni, M. Tang, X. Shen, Relationship between water permeability and pore structure of Portland cement

- Intellectual Property Office (IRIPO), Registration number 67726, Iran (2010).
- [29] M. Naderi, Determination of material strength and adhesion, Intellectual Property Office (IRIPO), Registration number 32502, Iran (2005).
- [30] N. Gowripalan, H. Mohamed, Chloride-ion induced corrosion of galvanized and ordinary steel reinforcement in high-performance concrete, *Cement and Concrete Research*, 28(8) (1998) 1119-1131.
- [31] M.S. Ahmed, O. Kayali, W. Anderson, Chloride penetration in binary and ternary blended cement concretes as measured by two different rapid methods, *Cement and Concrete Composites*, 30(7) (2008) 576-582.
- [32] R.B. Polder, W.H. Peelen, Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity, *Cement and Concrete Composites*, 24(5) (2002) 427-435.
- [33] BS EN 1008, British standard for 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 Standard Institution, London (2002).
- [34] O. Reynolds, An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels, *Philosophical Transactions of the Royal society of London*, 174 (1883) 935-982.
- [21] H. Lun, R. Lackner, Permeability of concrete under thermal and compressive stress influence; an experimental study, *MATEC Web of Conferences*, 6 (2013) 03007.
- [22] M.B.A. Houaria, M. Abdelkader, C. Marta, K. Abdelhafid, Comparison between the permeability water and gas permeability of the concretes under the effect of temperature, *Energy Procedia*, 139 (2017) 725-730.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] J. Murata, O. Yoshio, K. Shigeo, I. Yoshinari, Study on watertightness of concrete, *Materials Journal*, 101(2) (2004) 107-116.
- [26] BS EN 12390-8, Testing hardened concrete: Depth of penetration of water under pressure, British Standards Institution, London (2009).
- [27] DIN 1048, Testing Concrete: Testing of Hardened Concrete (Specimens Prepared in Mould), Deutsches Institut für Normung, Germany (1991).
- [28] M. Naderi, Determination of the permeability of concrete, stone, mortar, brick and other building construction materials using cylindrical chamber method, Iran

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Naderi, A. Kaboudan, Evaluation of the effect of strength, duration, water pressure and casting direction on concrete permeability, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(9) (2020) 2379-2398.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16237.6166](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16237.6166)



