

رابطه مقاومت سطحی و عمق نفوذ آب در بتن با بکارگیری آزمون‌های "کشیدن از سطح" و "محفظه استوانه‌ای" و بسط یک تئوری نوین

محمود نادری^۱، علی صابری ورزنه*^۲، سردارولی دین^۳

۱- استاد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران Profmahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir

۲- دکترای سازه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir

۳- دانشجوی دکترای سازه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران walidin@edu.ikiu.ac.ir

چکیده

برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن از مقدار عمق نفوذ آب در بتن استفاده می‌شود. در استانداردهای معتبر جهانی برای انجام این کار ابتدا آب تحت فشار وارد بتن شده و سپس با شکستن نمونه‌ی بتنی، مقدار عمق نفوذ آب به بتن اندازه‌گیری می‌شود. این درحالی است که اگر نیاز به ارزیابی دوام یک سازه‌ی بتنی یا منبع آب بتنی در محل باشد، هیچ آزمون درجای دقیقی جهت انجام این کار وجود ندارد. لذا در این مقاله ابتدا با استفاده از آزمون درجا و نوین "محفظه استوانه‌ای" مقدار عمق نفوذ آب در بتن اندازه‌گیری شده است. سپس با استفاده از ویژگی‌های ساختاری منافذ میکروسکوپی بتن که با استفاده از آزمون جیوه بدست می‌آید، مدل تئوری جدیدی ارائه شده است که با بکارگیری مدل مذکور می‌توان با دقت بالا مقدار عمق نفوذ آب در بتن را اندازه‌گیری کرد. ضمن مقایسه عمق نفوذ حاصل از آزمون "محفظه استوانه‌ای" و مدل تئوری جدید، مقدار مقاومت سطحی بتن با استفاده از آزمون "کشیدن از سطح" تعیین گردیده است. نتایج حاصله بیانگر رابطه معکوس بین مقاومت و عمق نفوذ آب در بتن می‌باشد. همچنین مشخص گردید که آزمون "محفظه استوانه‌ای" قابلیت اندازه‌گیری عمق نفوذ آب در بتن را بدون شکستن نمونه و با اطمینان بالای ۹۴ درصد دارا می‌باشد. روابط نوین استخراج شده نیز دارای دقت بسیار بالایی جهت ارزیابی عمق نفوذ آب به بتن را نشان دادند.

کلمات کلیدی

آزمون "کشیدن از سطح"، عمق نفوذ آب، بتن، روابط نوین، نفوذپذیری.

۱- مقدمه

در طراحی سازه‌های مختلف بتنی علاوه بر مقاومت مورد نیاز، دوام بتن نیز می‌بایست مد نظر قرار گیرد. به عبارت دیگر، بتن باید به گونه‌ای طراحی گردد که هم دارای مقاومت مناسب بوده و هم دارای نفوذپذیری کمی باشد. به دلیل نفوذ عوامل آسیب رسان به داخل بتن و کاهش دوام آن، اطلاع از مقدار نفوذپذیری بتن بسیار با اهمیت می‌باشد. همچنین نفوذپذیری بتن تحت شرایط حاد مانند دماهای بالا [۱]، فشار آب زیاد [۲]، یخ و ذوب یخ مداوم [۳]، حمله کلریدها [۴]، حمله سولفات‌ها [۵] می‌تواند تحت تاثیر قرار گیرد. علاوه بر این نفوذپذیری سطحی بتن تأثیر قابل توجهی بر عملکرد کوتاه مدت و بلندمدت آن دارد [۶]. ویژگی‌های نفوذپذیری اهمیت بسیار زیادی برای مقاومت بتن در برابر تأثیرات خارجی دارند.

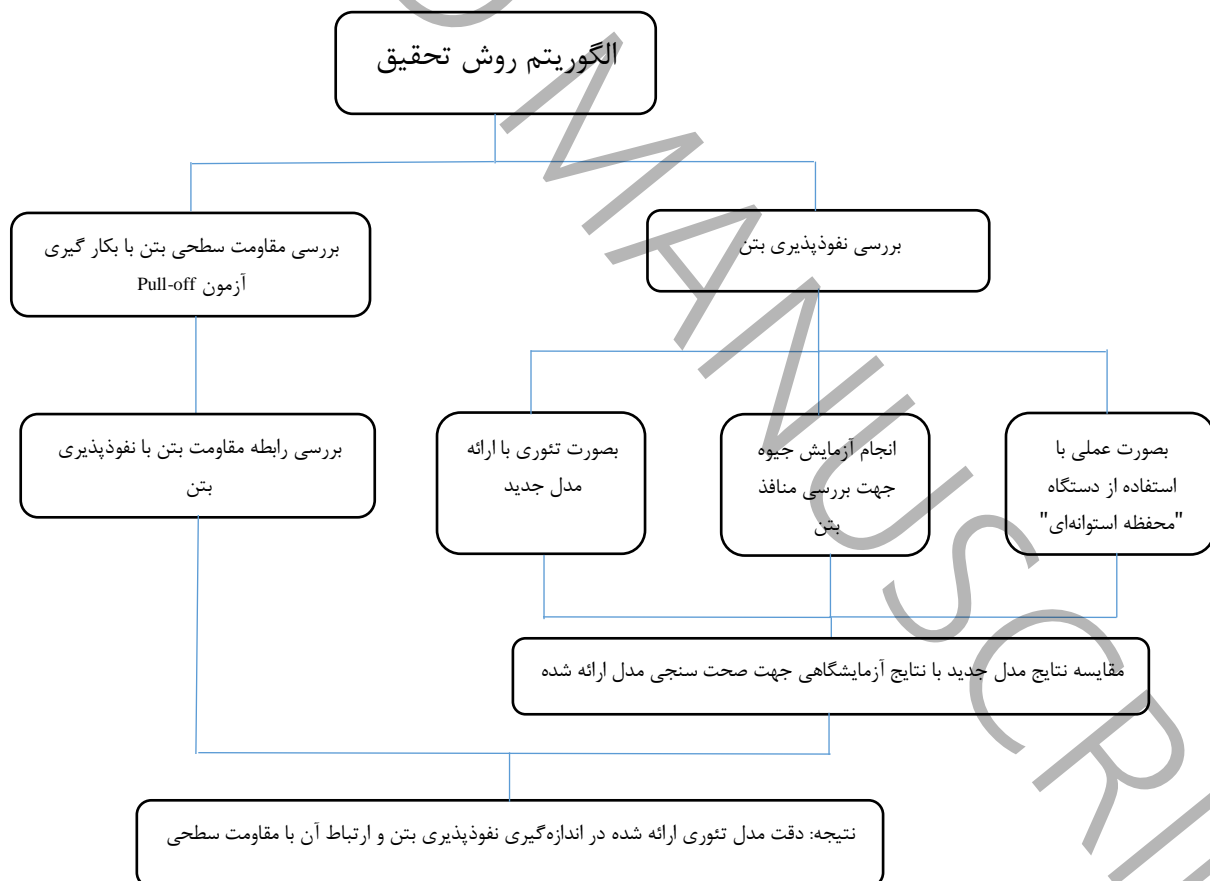
قابل ذکر است که منافذ مواد سیمانی با گستره قطر وسیع و مورفولوژی بسیار نامنظم باعث پیچیدگی و زبری کل ساختار میکروسکوپی منافذ می‌شود. همه ابعاد در هندسه متداول اعداد صحیح هستند. هندسه متداول، که به عنوان هندسه اقلیدسی شناخته می‌شود، ابعاد را به صورت یک‌بعدی، دو‌بعدی و سه‌بعدی تعریف می‌کند. با این حال، کانال‌های مویرگی موجود در بتن دارای اشکال نامنظم هستند و این هندسه نمی‌تواند اطلاعات دقیقی درباره پیچیدگی و توزیع منافذ ارائه دهد. به دلیل وجود تنوع وسیع در کانال‌های مویرگی بتن و در محیط‌های مشابه، محققان از تئوری فراکتال استفاده کرده‌اند. این تئوری به دلیل قابلیت‌های خاص خود، امکان بررسی پیچیدگی با ابعاد کسری مرتبط با این کانال‌ها را فراهم می‌آورد. همچنین، اطلاعات به دست آمده از این تئوری می‌تواند در تحلیل توزیع منافذ و نفوذپذیری بتن مورد استفاده قرار گیرد. در سال‌های اخیر، تئوری فراکتال ارائه شده توسط بنوایت ماندلبرات [۷]، در توصیف ساختار

منافذ مواد کامپوزیت سیمانی استفاده شده است، که موارد فوق در مطالعات محققان مختلف نیز بکارگرفته شده است [۸]. از سوی دیگر، ساختار منافذ مواد سیمانی به عنوان یک سیستم بسیار پیچیده به شمار می‌رود، که نمی‌توان آن را به‌طور کامل با پارامترهای متداول مانند تخلخل، حجم منافذ و توزیع قطر منافذ مشخص کرد [۹-۱۰]. اما از طریق تحلیل فراکتال، پیچیدگی ساختار منافذ بتن را می‌توان به‌طور مؤثر اندازه‌گیری و مقایسه نمود [۱۱-۱۲]. مدل‌های ارائه شده قبلی که برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن استفاده شده است دارای یک خلاء مهم می‌باشد. مدل‌های محققان قبلی، زمان عمل‌آوری و سن بتن را در نظر نمی‌گیرند در حالیکه مدل نفوذپذیری ارائه شده در این تحقیق متغیر زمان را در نظر می‌گیرد. که این مدل جدید را نسبت به مدل‌های موجود کامل‌تر می‌کند؛ به نحوی که اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن را با توجه به تغییرات زمان و روند عمل‌آوری آن با اختلاف کمی نسبت به مقادیر متناظر نتایج آزمایشگاهی امکان‌پذیر می‌سازد.

شناخت دقیق از عوامل اثر گذار بر نفوذپذیری و اتخاذ راهکارهای فنی مناسب می‌تواند عمر مفید سازه‌های بتنی را به‌طور چشم‌گیر افزایش دهد. برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن با آزمایش‌های رایج در دنیا، نیاز به صرف زمان زیاد و تجهیزات مختلف است. همچنین به دلیل زمان‌بر بودن انجام این آزمایش‌ها، هزینه انجام آن‌ها نیز زیاد است. از سوی دیگر بسیاری از آزمایش‌های مرسوم تنها در شرایط آزمایشگاهی قابل انجام بوده و قابلیت اعمال به صورت درجا را ندارند. روش نوین "محفظه استوانه‌ای" که توسط نادری در سال ۲۰۱۰ ابداع شد [۱۳]، برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن استفاده شده است. روش فوق‌الذکر روشی دقیق با کاربرد گسترده در تعیین میزان نفوذپذیری بتن و سایر مصالح ساختمانی چه در محیط کار و چه در محل سازه است [۱۴]. با توجه به نتایج تحقیقی که به منظور مقایسه بین روش "محفظه استوانه‌ای" و روش BS [۱۵] انجام شده است، مشاهده شد که همبستگی خوبی بین دو روش وجود دارد. در تحقیق مذکور، عمق نفوذ "محفظه استوانه‌ای" با عمق نفوذ بدست آمده از استاندارد BS محاسبه شده است که رابطه خطی با ضریب تعیین بیش از ۰/۹۵ بین نتایج حاصل از روش‌های مذکور مشاهده شده است [۱۶]. یکی از روش‌های درجا جهت اندازه‌گیری مقاومت سطحی بتن، آزمون "کشیدن از سطح" [۱۷] می‌باشد. تحقیقات گذشته بیانگر دقت مناسب این آزمون برای ارزیابی مقاومت سطحی بتن بصورت درجا می‌باشد [۱۸].

در تحقیقی که با بکارگیری سیمان تیپ ۲ در عمل‌آوری ۲۸، ۷ و ۹۱ روزه با نسبت‌های آب به سیمان برابر با ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ انجام شده است، مقدار نفوذپذیری بدست آمده با استفاده از دستگاه "محفظه استوانه‌ای" 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 ۰/۸۱ و ۰/۸۳ محاسبه گردید [۱۹]. در تحقیقی دیگر با استفاده از معادله انتشار و دستگاه "محفظه استوانه‌ای" مشخص گردید که در یک فشار و نسبت آب به سیمان مشخص، با افزایش زمان نفوذ آب، ضرایب انتشار بهینه کاهش می‌یابند. این امر می‌تواند به دلیل کنده شدن ذرات از دیواره منافذ موجود در نمونه بتنی و مسدود شدن آنها توسط این ذرات باشد [۲۰]. همچنین در تحقیقی نمونه‌های بتنی مکعبی ۲۸ روزه با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر، با بکارگیری انواع سنگدانه‌ها از قبیل گرانیت، اندزیت، سیلیس، آهک، مرمر و توف ساخته شدند. نفوذپذیری این نمونه‌های بتنی با نفوذپذیری سخره‌های آن‌ها بررسی گردیدند که نتایج حاصله از آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهند که سنگ سخره از نفوذپذیری کمتری نسبت به بتن ساخته شده با سنگدانه‌های همان سنگ سخره برخوردار است [۲۱]. در تحقیقی نمونه‌های بتنی با کاهنده‌های نفوذ مانند واترپروف، میکروسیلیس و مزوکریت با رده‌های مقاومتی ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ مگاپاسکال و سنین عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه تهیه شده‌اند. از نتایج آزمایش‌های انجام شده مشخص گردید که با افزایش سن بتن، نرخ افزایش نفوذپذیری بتن بدون افزودنی، بیشتر از بتن‌های حاوی مواد کاهنده نفوذ می‌باشد به طوری که بتن بدون افزودنی بعد از گذشت ۹۰ روز دارای ۷۲ درصد افزایش در نفوذپذیری است. اما بتن‌های حاوی مواد کاهنده نفوذ تقریباً ۴۶ درصد افزایش در نفوذپذیری دارند [۲۲]. افزودن ژئولیت در نمونه‌های بتنی باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود. با افزودن ژئولیت تا ۱۰ درصد، نفوذپذیری بتن کاهش یافته است و افزودن بیشتر آن موجب افزایش نفوذپذیری به دلیل تجمع ذرات ژئولیت و همچنین اثر رقیق‌کنندگی می‌شود. تمامی درصد‌های وزنی ژئولیت مورد استفاده در این تحقیق موجب کاهش نفوذپذیری نسبت به نمونه‌های ساخته شده با استفاده از سیمان پرتلند تیپ دو شدند. در نتیجه ژئولیت موجب کاهش مقاومت فشاری و نفوذپذیری نمونه‌های ۷ روزه می‌شود [۲۳]. علاوه بر این مشاهده شده است که رابطه معکوسی میان مقاومت سطحی با نرخ نفوذپذیری وجود دارد به طوری که نتایج به دست آمده از آزمون "محفظه استوانه‌ای" با مقادیر آزمایش پیچش نمونه‌های بتنی با مواد کاهنده نفوذ دارای ضریب همبستگی ۸۵ درصد است که در نتیجه

با افزایش مقدار نرخ نفوذپذیری و افزایش فضاهای خالی و خروج رطوبت از بتن مقدار مقاومت سطحی بتن کاهش می‌یابد. این رابطه میان مقاومت فشاری و نفوذپذیری دارای ضریب ۹۰ درصد است [۲۴]. در تحقیقی که تأثیر افزودنی‌های پوزولانی و پودر سنگ آهک بر ویژگی‌های نفوذپذیری، تخلخل و مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه مورد بررسی قرار گرفته است، مقادیر مختلفی از افزودنی‌ها به عنوان جایگزین ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد از وزن سیمان استفاده شده است. از نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان دادند که افزودنی‌های معدنی ذکر شده سبب بهبود ویژگی‌های دوامی بتن شامل نفوذپذیری، تخلخل و مقاومت ویژه الکتریکی نسبت به نمونه‌های بتنی بدون افزودنی شده هستند [۲۵]. علاوه بر این، با استفاده از دستگاه "محفظه استوانه‌ای" و بتن ۲۸ روزه با نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶، نتایج تحقیق نشان می‌دهد که آب سریع‌تر در جهت فشار آب اعمال شده به داخل بتن نفوذ می‌کند. به همین دلیل، ضرایب انتشار بهینه در این جهت بیشتر از مقادیر آن در جهت شعاعی است. نسبت متوسط ضرایب انتشار بهینه در جهت عمودی به مقادیر متناظر در جهت شعاعی، ۱۸۰/۳۲ محاسبه شده است [۲۶]. در تحقیقی دیگر مشخص شده است که ضرایب تعیینی کوچک‌تر از ۰/۱ برای تقریب روابط مشخصات هندسی سنگدانه‌ها، شامل: گردگوشگی، توپری و نسبت ابعاد با نفوذپذیری و مقاومت بتن‌های حاوی سنگدانه‌های مختلف محاسبه شده‌اند، که بیانگر تأثیر ناچیز شکل و مشخصات هندسی سنگدانه‌ها در مقایسه با تأثیر مشخصات مکانیکی و دوامی آن‌ها در نفوذپذیری و مقاومت بتن است [۲۷]. در تحقیق دیگری با استفاده از دستگاه محفظه استوانه‌ای به بررسی بتن کانال قزوین به صورت درجا پرداخته است. در این تحقیق، مقاومت سطحی و نفوذپذیری بتن در بخش‌های مختلف این کانال با استفاده از دستگاه‌های پیچش و محفظه استوانه‌ای ارزیابی شده است. این روش‌ها توانسته‌اند نتایج مفیدی را در خصوص ویژگی‌های بتن کانال ارائه دهند و به درک بهتر عملکرد بتن در شرایط واقعی کمک کنند [۲۸]. همچنین الگوریتم روش تحقیق در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱: روند انجام تحقیق

۲- کارهای آزمایشگاهی و تئوری

۲-۱- مصالح مورد استفاده

مواد استفاده شده برای ساخت نمونه‌های بتنی عبارت‌اند از: سیمان از نوع تیپ ۲، آب آشامیدنی شهری و دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های ریز و درشت بر طبق استاندارد ASTM C136 [۲۹] انجام پذیرفت. جذب آب شن و ماسه بر اساس استانداردهای ASTM C127 [۳۰] و ASTM C128 [۳۱] به ترتیب برابر ۲ و ۲/۵ درصد بدست آمد. چگالی ماسه و شن نیز به ترتیب برابر ۲۴۶۸ و ۲۵۸۵ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.

چسب مورد استفاده، از نوع رزین اپوکسی است که مشخصات آن در جدول ۱ قابل مشاهده است. این چسب به منظور چسباندن رینگ فلزی دستگاه "محفظه استوانه‌ای" روی وجه نمونه‌های بتنی استفاده می‌شود.

جدول ۱: مشخصات چسب استفاده شده

نسبت اختلاط	رنگ	مدت خشک شدن	زمان چسبیدن	مقاومت فشاری (MPa)
نسبت یک‌به‌یک	طوسی	۱۰ (hour)	۹۰ (min)	۷۰

۲-۲- آزمایش "کشیدن از سطح"

برای انجام این آزمون، صفحه فلزی مستقیماً به سطح بتن همان‌گونه که در شکل ۲-الف نشان داده شده است، چسبانده می‌شود. سپس تحت تنش کششی که به صفحه فلزی وارد می‌شود از سطح بتن جدا می‌شود (شکل ۲-ب). لازم بذکر است که پس از انجام آزمایش حالت استوانه‌ای جدا شده باید بررسی گردد که استوانه چگونه جدا شده است. زیرا حالت شکست بر نتیجه‌ی آزمایش اثرگذار است. در صورتیکه استوانه‌ی فلزی از قسمت چسب جدا شده باشد در این حالت نتیجه حاصل، اعتبار ندارد.

در این آزمایش مقدار مقاومت سطحی بتن در سنین مختلف مورد بررسی قرار خواهد گرفت. با توجه به اینکه سطح بتن بصورت مستقیم در معرض عوامل محیطی قرار دارد، لذا ارتباط مقاومت سطحی بتن با مقدار نفوذپذیری آن، از پارامترهای مهم بحساب می‌آید.



ج: شکست نمونه



ب: انجام آزمون "کشیدن از سطح"



الف: صفحه فلزی چسبیده

شکل ۲: مراحل انجام آزمایش "کشیدن از سطح"

۳-۲- تعیین اندازه منافذ با استفاده از آزمایش جیوه

آزمایش جیوه (MIP) رایج‌ترین روش برای مطالعه ویژگی‌های ساختار منافذ مواد سیمانی است. نمونه‌های بتنی که در این آزمایش استفاده شد در ابعاد ۸ میلی‌متر به شکل مکعبی هستند. این نمونه‌ها تحت فشار مشخص جیوه ($P = 0.14 \text{ MPa} - 228 \text{ MPa}$) قرار می‌گیرد. فشار باعث نفوذ جیوه در بتن می‌شود. دستگاه این آزمایش به شکل خودکار نتایج را اندازه‌گیری می‌کند. با استفاده از این آزمون پارامترهایی از جمله، توزیع منافذ، اندازه قطر منافذ و غیره قابل اندازه‌گیری می‌باشد که نقش مهمی در ارزیابی دقیق مقدار نفوذپذیری بتن دارا می‌باشد.

۴-۲- آزمون محفظه استوانه‌ای

این روش که توسط نادری اختراع شده است [۱۳]، روشی دقیق با کاربردی وسیع در اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن و سایر مصالح ساختمانی چه در محیط آزمایشگاه و چه در محل کار است. برای استفاده از دستگاه "محفظه استوانه‌ای" رینگ فلزی توسط چسب اپوکسی بر روی سطح بتن چسبانده می‌شود (شکل ۳-الف). پس از سخت شدن چسب، دستگاه نفوذپذیری روی صفحه فلزی نصب می‌شود (شکل ۳-ب). سپس دستگاه "محفظه استوانه‌ای" را کاملاً با آب پر کرده و جهت خروج هوای احتمالی موجود، یک شیر تخلیه هوا در دستگاه تعبیه شده است. پس از پر شدن دستگاه، شیر تخلیه هوا بسته شده و با چرخاندن اهرم دستی، فشار مورد نظر به آب داخل دستگاه اعمال می‌گردد که مقدار آن با استفاده از گیج تعبیه شده روی دستگاه قابل قرائت است. همچنین مقدار حجم نفوذ آب در بتن را می‌توان از طریق میکرومتر نصب شده در قسمت بالای دستگاه و در زمان‌های مختلف ثبت کرد.

نمونه‌های استفاده شده در آزمایش نفوذپذیری به صورت مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد. علت استفاده از نمونه‌های ۱۵۰ میلی‌متری به دلیل اندازه دستگاه "محفظه استوانه‌ای" می‌باشد. قطر این دستگاه که روی بتن قرار می‌گیرد برابر ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد. لذا اگر ابعاد نمونه از ۱۵۰ میلی‌متر کمتر باشد امکان دارد که آب نفوذ کرده به داخل بتن از اطراف نمونه خارج شده و باعث غیر قابل بودن نتایج می‌گردد. از طرفی افزایش ابعاد نمونه، تغییری در نتایج ایجاد نخواهد نمود. لذا محدودیت در مقدار حداکثر ابعاد نمونه وجود ندارد.

مقدار حجم آب نفوذ کرده در بتن در زمان‌های مختلف، توسط رابطه ۱ قابل محاسبه است. همچنین با استفاده از حجم آب نفوذ کرده در بتن و زمان نفوذ آب، نرخ نفوذ آب به داخل نمونه بتنی را می‌توان از رابطه ۲ محاسبه نمود.

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

$$Q = \frac{V}{t} \quad (2)$$

که در آن V حجم آب نفوذ کرده به نمونه بتنی (mm^3)، h مقدار میکرومتر (mm)، A سطح مقطع اعمال فشار (mm^2)، Q نرخ نفوذ آب (mm^3/Sec) و t مدت زمان (Sec) است.



ب: نصب دستگاه روی صفحه فلزی

الف: چسباندن صفحه فلزی روی نمونه

شکل ۳: آزمون محفظه استوانه‌ای

همچنین برای اندازه‌گیری عمق نفوذ آب به بتن، ابتدا طبق شکل ۴- الف نمونه به دو نیم تقسیم می‌شود. بلافاصله پس از نصف کردن نمونه بتنی، از مقطع شکسته شده عکس برداری شده (شکل ۴- ب) و منحنی و سطح ترشدگی توسط برنامه آنالیز تصویر (Image J) تعیین می‌گردند [۳۲].



ب: اندازه‌گیری عمق نفوذ

الف: دو نیم نمودن نمونه

شکل ۴: عمق نفوذ آب در بتن

۲-۵- آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت فشاری بتن یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مکانیکی آن است. با استفاده از رابطه ۳، می‌توان مقاومت فشاری بتن را از طریق تقسیم نیروی گسیختگی بر سطح نمونه آن محاسبه کرد:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (۳)$$

در رابطه ۳، F مقدار حداکثر نیروی (N) اعمال شده توسط دستگاه A سطح نمونه (mm²) بارگذاری و σ مقاومت فشاری (MPa) است. در این تحقیق مقاومت فشاری نمونه‌ها بر اساس استاندارد BS EN 12390-3 [۳۳] به دست آمده است.

۲-۶- مدل تئوری فراکتال

محیط متخلخل بتن که دارای منافذ مختلفی است، می‌توان به عنوان یک دسته از مویرگی‌های منحنی شکل در نظر گرفت. نفوذپذیری در محیط متخلخل بتن، با استفاده از تئوری فراکتال قابل محاسبه است. رابطه نفوذپذیری با پارامترهای ساختاری محیط متخلخل را می‌توان به صورت کمی با تحلیل و تجزیه فراکتال محاسبه نمود [۳۴]. با توجه به تحقیقات قبلی، محیط متخلخل (بتن) در واقع یکنواخت نیست. در سال ۲۰۰۲ چینگ و یو [۳۵] برای دریافت توزیع منافذ در محیط متخلخل با استفاده از قانون مقیاس‌بندی فراکتال، از رابطه ۴ استفاده کردند. ویژگی فراکتالی توزیع اندازه منافذ، معمولاً در منافذ مویرگی بزرگ به عنوان عامل مؤثر عمل می‌کند. در عین حال، ویژگی پیچیدگی در ناحیه منافذ کوچک ژل و ناحیه منافذ کوچک مویرگی نقش مؤثر دراد [۳۶-۳۷].

$$N(L \geq \gamma) = \left(\frac{\gamma_{\max}}{\gamma} \right)^{D_f} \quad (4)$$

در رابطه ۴، N تعداد منافذ، D_f بُعد فراکتال، γ_{\max} حداکثر قطر منفذ و L مقیاس طول است که با افزایش درجه پیچیدگی یک جسم فراکتال، به همان اندازه بُعد فراکتال آن نیز بزرگتر می‌شود [۴۱]. با مشتق‌گیری دو طرف رابطه ۴، تعداد منافذ dN در محدوده γ و $\gamma+d\gamma$ را می‌توان به صورت زیر (رابطه ۵) به دست آورد [۳۸، ۵]:

$$dN = -D_f \times \gamma_{\max}^{D_f} \times \gamma^{-(D_f+1)} \times d\gamma \quad (5)$$

برای محاسبه بُعد فراکتال مساحت سطحی D_f ، از رابطه ۶ استفاده می‌شود [۱۷]:

$$D_f = D_e - \frac{\ln \varepsilon}{\ln \left(\frac{\gamma_{\min}}{\gamma_{\max}} \right)} \quad (6)$$

در رابطه ۶ D_e بُعد هندسی اقلیدسی است که در فضای دوبعدی مقدار آن ۲ و در فضای سه‌بعدی مقدار آن مساوی با ۳ است [۱۷]. همچنین ε مقدار تخلخل بتن (۰/۱۵) است و γ_{\min} و γ_{\max} حداکثر و حداقل قطر منافذ است که حداکثر آن برابر با ۷۰ نانومتر و حداقل آن در محدوده قطر منافذ ژل قرار دارد که کمتر از ۱۰ نانومتر است. با جایگذاری این مقادیر در رابطه ۶ مقدار D_f به دست می‌آید: کانال‌های مویرگی موجود در بتن دارای پیچیدگی (پیچایی) است که آن را می‌توان با L_t نشان داد. اگر طول نمونه برابر با L_0 باشد، طول پیچیدگی کانال از L_0 بزرگتر است. در صورتی که اگر جریان در یک کانال مستقیم باشد، $L_t = L_0$ است. ویتکرافت و همکاران [۳۹] برای دریافت L_t از رابطه ۷ استفاده کردند:

$$L_t(t) = L_0^{D_t} \times \gamma^{1-D_t} \quad (7)$$

در رابطه ۷، D_t اندازه بُعد پیچیدگی را نشان می‌دهد که به معنای بُعد پیچ خوردگی مسیر مویرگی در هنگام عبور سیال از ساختار متخلخل است. هنگامی که $D_t = 1$ باشد، نشان دهنده یک مسیر مویرگی مستقیم است و D_t بزرگتر از آن، به یک مسیر مویرگی منحنی اشاره دارد. برای محاسبه D_t از رابطه ۸ [۴۰-۴۱] استفاده شده است:

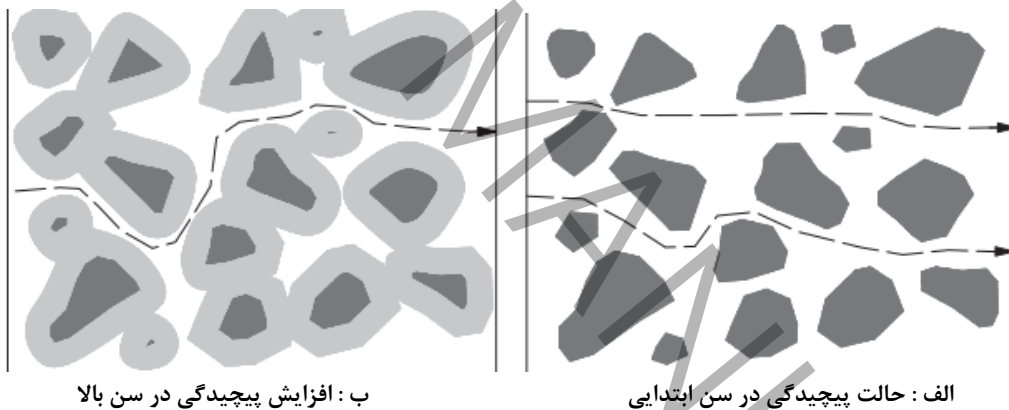
$$D_t = 1 + \frac{\ln \bar{\gamma}}{\ln \frac{L_0}{\bar{\gamma}}} \quad (8)$$

در رابطه ۸ \bar{r} قطر متوسط (nm) و \bar{t} متوسط پیچیدگی است که به ترتیب برای محاسبه آن‌ها از روابط ۹ و ۱۰ [۴۰، ۴۲] استفاده می‌شود:

$$\bar{r} = \frac{D_f \gamma_{\min}}{D_f - 1} \quad (9)$$

$$\bar{t} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{2} \sqrt{1 - \varepsilon} + \sqrt{1 - \varepsilon} \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{1 - \varepsilon}} - 1 \right)^2 + \frac{1}{4}}}{1 - \sqrt{1 - \varepsilon}} \right) \quad (10)$$

بُعد D_f فراکتال یک پارامتر است که می‌توان از آن برای نمایش پیچیدگی یک مجموعه فراکتال استفاده کرد. زمانی که تئوری فراکتال به ساختار ریز منافذ بتن اعمال می‌شود، این بُعد فراکتال می‌تواند به عنوان معیاری برای توصیف پیچیدگی مورد استفاده قرار گیرد. مطالعات نشان داده‌اند که این بُعد فراکتال می‌تواند نقش پل بین ریزساختار و عملکرد میکروسکوپی بتن داشته باشد. بنابراین، استفاده از مدل فراکتال برای تحلیل و ارزیابی مکانیسم بتن، به منظور شرح ساختار میکروسکوپی و خواص مکانیکی در سطح مقیاس ریز و بزرگ، بسیار مؤثر است. بنابراین، کانال‌هایی که در ریزساختارهای بتن در حد نانومتر و میکرومتر وجود دارند، هر چند این کانال‌ها مستقیم باشند، امکان عبور آب را بیشتر فراهم می‌کنند، اما افزایش بُعد پیچیدگی (D_f) منجر به ایجاد موانع بر سر راه جریان شده و باعث افزایش طول پیچیدگی (L_t) می‌شود. تغییر طول پیچیدگی در شکل ۵ نشان داده شده است. [۴۳-۴۴].



شکل ۵: تغییر ریزساختاری، در خمیر سیمان با افزایش زمان عمل‌آوری [۴۵]

نرخ جریان سیال در یک کانال مویرگی را می‌توان بر اساس رابطه اصلاح شده هاگن پوازی ۱۱ به دست آورد [۳۵]:

$$q(t) = \frac{\pi}{128} \frac{P}{L_t(t)} \frac{\gamma^4}{\mu} \quad (11)$$

در رابطه ۱۱، P فشار سیال (MPa) و μ ضریب ویسکوزیته (MPa S) سیال و $q(t)$ نرخ جریان سیال در کانال مویرگی (m^3/S) است. با استفاده از نرخ تعداد منافذ و نرخ جریان حجمی یک کانال، نرخ کل جریان (Q) از محیط متخلخل را می‌توان مطابق رابطه ۱۲ محاسبه کرد:

$$Q = - \int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} q(\gamma) dN(\gamma) = \frac{\pi P D_f}{128 \mu (3 + D_i - D_f)} \frac{\gamma_{\max}^{3+D_i}}{L_0^{D_i}} \times \left[1 - \left(\frac{\gamma_{\min}}{\gamma_{\max}} \right)^{3+D_i - D_f} \right] \quad (12)$$

در رابطه ۱۲، γ_{\max} ، γ_{\min} حداکثر و حداقل قطر منفذ، L_0 طول مویرگی، D_f مساحت سطح ویژه، D_i بعد پیچیدگی و μ ویسکوزیته می‌باشد. طبق قانون دارسی، نرخ نفوذپذیری را می‌توان به صورت رابطه ۱۳ نشان داد:

$$Q = \frac{K A P}{\mu L_0} \quad (13)$$

در رابطه ۱۳ A مساحت سطح مورد نظر در نمونه بتنی است [۴۶-۴۷].

در این قسمت روند اثبات روابط تحلیلی داده شده است:

هنگامی که یک مایع روی یک سطح شیبدار قرار داده شود، مایع به دلیل تنش برشی (τ) حاصل از گرانش جاری می‌شود. در مورد جریان لایه‌یی، لایه‌های خارجی نسبت به لایه‌های داخلی به سرعت بیشتری حرکت می‌کنند و سیال در تماس با سطح جامد زیر در حالت استراحت قرار دارد. سرعت جریان لایه‌ای (v) با تغییر زاویه و زمان اندازه‌گیری می‌شود. در مورد سیال نیوتنی، یک رابطه خطی بین τ و رابطه ۱۴ موجود است.

$$\tau = \mu \cdot \frac{dv}{dy} = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (14)$$

که در آن τ تنش برشی و μ ضریب ویسکوزیته سیال است. جریان لایه‌یی یک مایع نیوتنی را از طریق یک لوله استوانه‌ای با شعاع r تحت یک گرادیان فشار dp/dL مطالعه می‌شود. برای یک جریان ثابت سه نیروی وارد شده بر روی مایع (با شعاع y و طول ΔL) باید در تعادل باشند، همانطور که توسط رابطه‌ای ۱۵ توضیح داده شده است [۴۸].

$$p \pi y^2 - \left(p - \frac{dp}{dl} \Delta L \right) \pi y^2 - 2 \pi y \Delta L \tau = 0 \quad (15)$$

با ساده سازی رابطه ۱۵، رابطه ۱۶ حاصل می‌گردد.

$$\tau = \frac{dp}{dL} \frac{y}{2} \quad (16)$$

با در نظر گرفتن رابطه ۱۴ و رابطه ۱۶ رابطه ۱۷ به دست می‌آید.

$$\mu \frac{dv}{dy} = \frac{dp}{dL} \frac{y}{2} \quad (17)$$

از آنجای که dp/dL تابع y نمی‌باشد، می‌توان انتگرال رابطه ۱۷ را گرفت، که رابطه ۱۸ به دست می‌آید.

$$Q = - \frac{\pi r^4}{8 \mu} \frac{dp}{dL} \quad (18)$$

رابطه ۱۸ رابطه هاگن-پوازی است که نشان می‌دهد جریان یک مایع از یک لوله، تحت فشار (اما با علامت جهت مخالف) با گرادیان فشار متناسب است که با ویسکوزیته مایع نسبت معکوس دارد.

رابطه‌ی ۱۸، رابطه‌ی عمومی نفوذپذیری مایعات از یک جسم متخلخل است، [۴۹]. همچنین با توجه به رابطه ۱۹؛

$$K_l = \frac{\varepsilon r^2}{8} \quad (19)$$

با استفاده از رابطه ۱۹ و جایگذاری آن در رابطه ۱۸ رابطه ۲۰ حاصل می‌گردد [۴۹].

$$Q = -K_l \frac{A}{\mu} \frac{dp}{dL} = -K_l \frac{A}{\mu} \frac{p_2 - p_1}{L} \quad (20)$$

که در آن K_l ضریب نفوذپذیری است که بر حسب (mm^2) حاصل می‌شود. P_1 و P_2 فشار ورودی و خروجی در طول L یک جسم است. در تحقیق حاضر، آزمایش‌های نفوذپذیری بر سطح نمونه‌های بتنی تحت فشار ثابت 0.5 (MPa) به مدت زمان 5 ساعت با استفاده از آب، انجام شده است. علاوه بر این آب تحت فشار ذکر شده در یک قسمت از نمونه نفوذ می‌کند که با توجه به این حالت، شکل نهایی رابطه ۲۰ را مطابق رابطه ۲۱ ارائه می‌نماییم.

$$Q = K \frac{A}{\mu} \frac{p}{L} \quad (21)$$

قابل ذکر است که عمق نفوذ در مسائل نفوذپذیری بتن اهمیت خاصی دارد. همچنین، در برخی از استانداردهای معتبر جهانی، عمق نفوذ برای تعیین میزان نفوذپذیری بتن استفاده می‌شود که در سازه‌های بتنی و به شکل ویژه در منابع آب، کاربرد وسیعی دارد. نفوذ آب تحت فشار به داخل بتن با سرعت کم و به شکل جریان لایه‌یی است، برای حساب ضریب نفوذپذیری از قانون داریسی طبق رابطه‌ی ۲۲ استفاده می‌شود، که در آن u سرعت جریان (m/s)، x عمق نفوذ (m)، t زمان (s)، K ضریب نفوذپذیری (m^2)، μ لزجت ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)، و P فشار اعمالی (Pa) است [۴۷]:

$$u = \frac{dx}{dt} = -\frac{K}{\mu} \frac{p}{x} \quad (22)$$

با استفاده از انتگرال گیری رابطه‌ی ۲۲ رابطه‌ی ۲۳ دریافت می‌شود:

$$u = \frac{1}{2} x^2 = -\frac{K \times p}{\mu} t \quad (23)$$

ضریب نفوذپذیری با استفاده از رابطه‌ی ۲۳ چنین محاسبه می‌شود (رابطه ۲۴):

$$K = \frac{\mu \times x^2}{2 \times p \times t} \quad (24)$$

در رابطه فوق اگر بجای x از d_m استفاده شود، رابطه عمق نفوذ را به شکل رابطه ۲۵ می‌توان ارائه داد.

$$d_m^2 = \frac{2 \times K \times p \times t}{\mu} \quad (25)$$

در رابطه فوق d_m مقدار میانگین عمق نفوذ (mm)، K ضریب نفوذپذیری (mm^2)، t مدت زمان (Sec).

۲-۷- ساخت نمونه‌های بتنی

با توجه به اینکه امروزه بتن استفاده شده در بسیاری از سازه‌های معمولی دارای مقاومت فشاری حدود ۳۰ (MPa) می‌باشند لذا در این تحقیق از طرح اختلاط ارائه شده در جدول ۲ استفاده گردید. برای انجام آزمایش محفظه استوانه‌ای اقدام به ساخت حدود ۱۰۰ آزمون مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر شد.

جدول ۲: طرح مخلوط نمونه‌ها

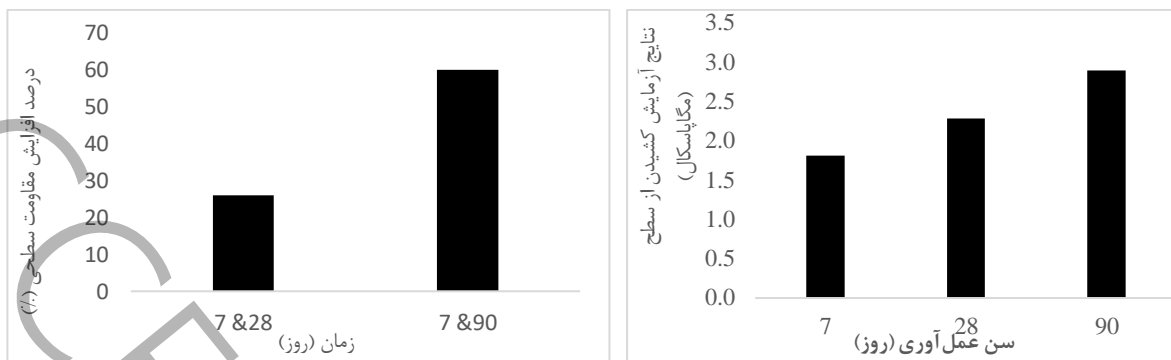
W/C	سیمان (kg/m^3)	شن (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	آب (kg/m^3)
۰/۵	۴۱۶	۶۸۷	۸۶۴	۲۰۶

پس از فرآیند بتن‌ریزی، نمونه‌ها به مدت تقریباً ۲۴ ساعت درون قالب باقی مانده. پس از این مدت، نمونه‌ها از قالب خارج شده و به مدت ۷ الی ۹۰ روز در آب آهک تحت عمل‌آوری قرار می‌گیرند. این عمل‌آوری تا زمان انجام آزمایش‌ها ادامه داشته است.

۳- تحلیل و بررسی نتایج به دست آمده

۳-۱- نتایج حاصل از روش "کشیدن از سطح"

با توجه به شکل ۶-الف، با افزایش زمان عمل‌آوری نمونه‌ها در نتایج آزمون "کشیدن از سطح" نیز افزایش مشاهده شده است. در شکل ۶ نتایج آزمون "کشیدن از سطح" حاصل از نمونه‌های بتنی و در سنین عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روز، نشان داده شده است. این افزایش در نمونه‌های با عمل‌آوری ۲۸ روزه نسبت به نمونه‌های با عمل‌آوری ۷ روزه حدود ۲۱ درصد و در نمونه‌های با عمل‌آوری ۹۰ روزه نسبت به نمونه‌های با عمل‌آوری ۲۸ روزه حدود ۳۷/۶ درصد می‌رسد. درصد تغییرات موجود بین مقاومت‌های سطحی مختلف در شکل ۶-ب نشان داده شده است. افزایش مقاومت فشاری در عمل‌آوری‌های ذکر شده نیز روند مشابه را دارد. افزایش مقاومت لایه سطحی در مقاومت‌های مختلف، نشان‌دهنده پیشرفت و تشکیل بیشتر محصولات هیدراسیون سیمان است که منجر به یک ساختار متراکم‌تر می‌شود. توسعه‌ی مقاومت به شدت به نوع و حجم محصولات هیدراسیون تشکیل‌شده وابسته است و بنابراین به واکنش‌های بین ترکیبات جامد و مایع برمی‌گردد [۵۰].



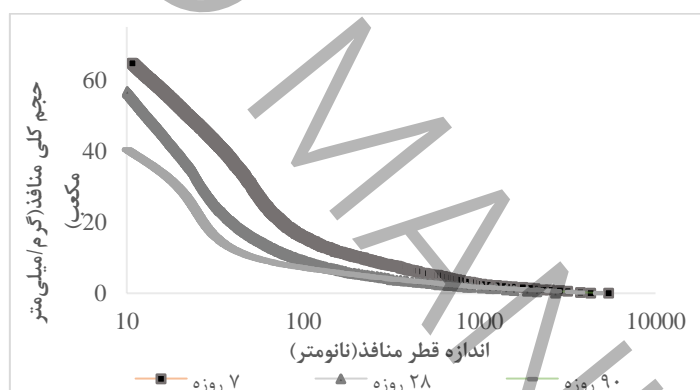
ب: درصد اختلاف

الف: مقاومت سطحی نمونه‌ها

شکل ۶: نتایج آزمون "کشیدن از سطح"

۳-۲- نتایج آزمون جیوه

با استفاده از آزمون جیوه، حجم کل منافذ در سنین مختلف عمل‌آوری در شکل ۷ نشان داده شده است. با استفاده از آزمایش جیوه می‌توان مشخصه‌های بیشتری از ساختار منافذ را به دست آورد، مانند تخلخل، سطح کل منافذ و متوسط قطر منافذ. این مشخصات در جدول ۳ نیز خلاصه شده است.



شکل ۷: تغییر در حجم کلی منافذ با افزایش زمان عمل‌آوری

با استفاده از حجم کل منافذ و مساحت سطح ویژه منافذ و جایگذاری آن در رابطه ۲۶، قطر متوسط منافذ به دست می‌آید [۵۱].

$$d_{av} = \frac{4 \times V}{A} \quad (26)$$

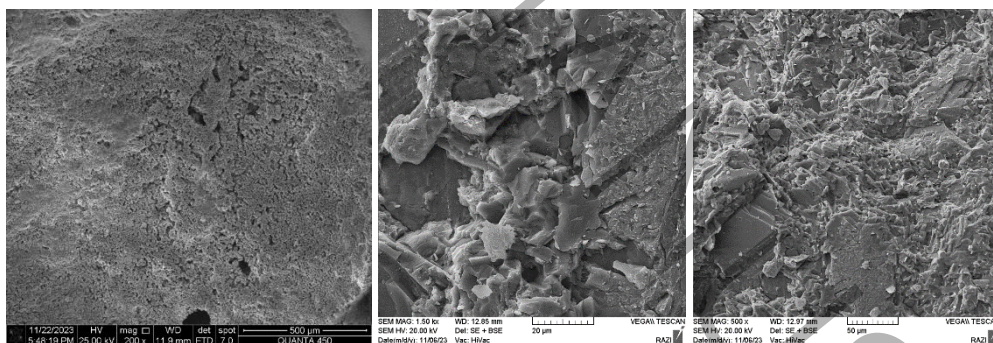
که در رابطه ۲۶، d_{av} قطر متوسط منافذ (nm)، V حجم کل منافذ (mm^3/gr) و A مساحت سطح ویژه منافذ (m^2/gr) است. با توجه به جدول ۳، مشاهده می‌شود که تخلخل، قطر متوسط منافذ و حجم کل منافذ با افزایش سن عمل‌آوری کاهش می‌یابد. علت این تغییرات، پیشرفت روند هیدراسیون سیمان است که باعث فشردگی ساختار منافذ بتن می‌شود. مساحت منافذ در ابتدای عمل‌آوری افزایش می‌یابد و سپس با گذشت زمان به حالت ثابت تبدیل می‌شود [۵۱]. علاوه بر این، منافذ ژل و منافذ ریز مویرگی در مساحت منافذ، نقش عمده‌ای دارد. در مرحله اولیه هیدراسیون، تغییر ساختار منافذ داخل بتن سخت شده، عمدتاً حفره‌های ماکرو، منافذ مویرگی بزرگ و منافذ مویرگی متوسط به صورت تدریجی به منافذ مویرگی ریز و منافذ ژل، تبدیل می‌گردد.

جدول ۳: مشخصات منافذ در سنین مختلف

عمل آوری (روز)	حجم کلی منافذ (mm ³ /gr)	مساحت سطح ویژه منافذ (m ² /gr)	قطر متوسط (nm)	تخلخل (%)
۷	۶۷	۵/۳	۵۰/۶	۱۸
۲۸	۵۸	۵/۹	۳۹/۳	۱۶
۹۰	۴۱	۶/۲	۲۶/۵	۱۳/۳

۳-۳- تأثیر عمل آوری بر ریز ساختار بتن

با توجه به شکل ۸-الف و ب، مشاهده می‌شود، که این نمونه‌ها دارای ریزساختار بسیار متراکمتری است. علت این حالت، پیشرفت روند هیدراسیون سیمان است که منافذ و فضاهای خالی را توسط محصولات هیدراسیون پر می‌کنند. فرایند سخت شدن و تراکم بتن بلافاصله پس از ریختن آن در قالب آغاز می‌شود و در طی این مرحله، هیدراسیون شیمیایی، سنگ سیمانی را تولید می‌کند و موجب به هم چسبیدن دانه‌های مخلوط بتن می‌شود [۵۲]. وجود رطوبت ناکافی در سطح بتن، باعث فرایند خشک شدن مرتبط با توسعه منافذ مویرگی می‌شود که در نتیجه، هیدراسیون ناقص و کاهش مقاومت و افزایش نفوذپذیری می‌شود [۵۳-۵۴]. این موضوع منجر به باقی ماندن یک ناحیه مرزی متخلخل در بتن شده و در نهایت کاهش مقاومت سطحی، کاهش مقاومت در برابر آب و هوا، مقاومت کمتر در برابر حملات شیمیایی و توسعه ترک‌های جمع‌شدگی و سایر آسیب‌های مشابه را به همراه دارد [۵۵-۵۶]. در شکل ۸-ت، نمونه ارائه شده به دلیل عمل آوری ناکافی، منجر به ایجاد شبکه‌های گسترده‌ای از منافذ در ریزساختار بتن می‌شوند. این منافذ که در تصویر الکترونی روبشی قابل مشاهده هستند، تأثیرات قابل توجهی بر ویژگی‌های فیزیکی بتن دارند. به‌ویژه، این وضعیت باعث افزایش قطر و حجم منافذ، همچنین نفوذپذیری و عمق نفوذ در بتن می‌گردد.



ت

ب

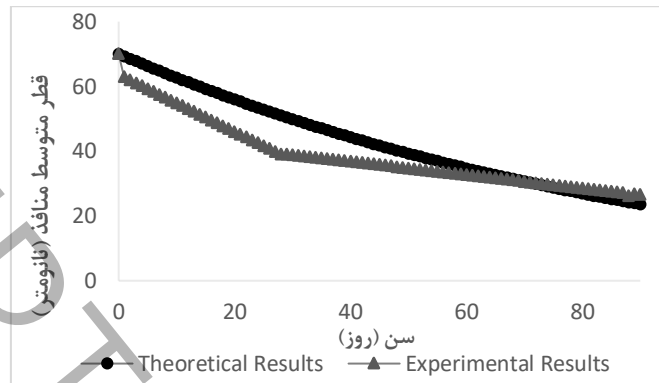
الف

شکل ۸: ریز ساختار بتن در عمل آوری‌های مختلف

۳-۴- ارائه مدل جدید فراکتال

با توجه به تحقیقات پیشین و آزمایش‌های انجام شده، مشاهده شده است که با افزایش سن عمل آوری در ریز ساختار منافذ بتن، تغییر به وجود می‌آید که علت این تغییر پیشرفت واکنش هیدراسیون سیمان است. این پیشرفت باعث کاهش اندازه منافذ می‌شود، زیرا محصولات واکنش ذکر شده به تدریج خلل و فرج را پر می‌کند [۵۷]. با توجه به این حالت طبیعی سیمان، استفاده از اندازه‌های قطر متوسط منافذ و قرار دادن آن در نمودار دو بعدی x و y به گونه‌ای که در جهت x ، سن عمل آوری و در جهت y قطر متوسط منافذ جایگذاری شود، داده‌های آزمایشگاهی در فضای متلب طبق روند فوق ترسیم می‌شود. سپس یک نمودار معادل با نمودار داده‌های آزمایشگاهی در فضای متلب رسم شده که این روند باعث حصول رابطه نوین ۲۷ و نمودار تئوری شکل ۹ شده است. این نمودار نشان

می‌دهد که با افزایش سن عمل‌آوری (t)، قطر متوسط منافذ کاهش می‌یابد. لذا افزایش سن به معنای افزایش مقاومت، کاهش منافذ و نفوذپذیری است. رابطه ۲۸ که بر اساس رابطه ۲۷ به دست آمده، رابطه مهمی است که در محاسبات استخراج مدل جدید فراکتال استفاده می‌شود.



شکل ۹: کاهش قطر منافذ با افزایش سن

$$\gamma = \gamma_{\max} \times C^{at} \quad (27)$$

$$\frac{\gamma_{\max}}{\gamma} = C^{-at} \quad (28)$$

در رابطه ۲۸، a ضریب زمان که بر اساس رابطه ۲۹ حاصل می‌گردد و t سن عمل‌آوری و C قاعده تابع نمایی که مقدار آن ۲ است. تعیین مقدار C و مقدار a ، بر این اساس است که منحنی تئوری، متناظر منحنی داده‌های آزمایشگاهی بوده، γ قطر منفذ و مقدار γ_{\max} نیز برابر حداکثر قطر متوسط که برابر با ۷۰ نانومتر است باشد.

$$a = \frac{16.01}{t - 1000} \quad (29)$$

لذا برای دریافت تعداد منافذ از قانون مقیاس‌بندی فراکتال (رابطه ۴) استفاده شده است و این رابطه با توجه به رابطه ۲۸ تبدیل به رابطه ۳۰ شده است. به طوریکه در رابطه ۴ نسبت γ_{\max}/γ به نسبت جدیدی که مساوی با C^{-at} است تغییر یافته است و رابطه به شکل رابطه جدید ۳۰ معرفی شده است.

$$N(t) = (C^{-at})^{D_f} = 2^{\frac{-16.01t D_f}{t-1000}} \quad (30)$$

در این تحقیق برای اندازه‌گیری طول پیچیده‌گی کانال مویرگی بتن از رابطه ۷ استفاده می‌شود، که به جای γ از مقدار رابطه ۲۷ استفاده شده که رابطه‌ی جدید ۳۱ به دست می‌آید.

$$L_t(t) = L_0^{D_t} (\gamma_{\max} C^{at})^{1-D_t} \rightarrow L_t(t) = L_0^{D_t} \gamma_{\max}^{1-D_t} 2^{\frac{16.01t(1-D_t)}{t-1000}} \rightarrow L_t(t) = L_0^{D_t} \gamma_{\max}^{1-D_t} 2^{\frac{-16.01t + 16.01t D_t}{t-1000}} \quad (31)$$

با مشتق‌گیری رابطه ۳۰، نرخ تغییرات تعداد منافذ dN را می‌توان به صورت رابطه ۳۲ به دست آورد.

$$dN(t) = \ln 2 \cdot 2^{\frac{-16.01t D_f}{t-1000}} \frac{16010 D_f}{(t-1000)^2} dt \quad (32)$$

با استفاده از روابط ۲۷ و ۳۱ می‌توان قطر متوسط و طول پیچیدگی جدید را در رابطه ۱۱ جایگذاری کرد که رابطه ۳۳ بدست می‌آید.

$$q(t) = \frac{\pi P \gamma_{\max}^{3+D_t}}{128 \mu L_0^{D_t}} 2 \left(\frac{16.01 t D_t + 48.03 t}{t-1000} \right) \quad (33)$$

با استفاده از نرخ جریان حجمی یک کانال $q(t)$ ، نرخ کل جریان $Q(t)$ از محیط متخلخل را می‌توان با انتگرال گیری رابطه ۳۴ محاسبه کرد؛ حالت نهایی رابطه نرخ کل جریان در رابطه ۳۵ و روند انتگرال گیری آن در رابطه ۳۴ نشان داده شده است که با بکارگیری این رابطه می‌توان نرخ کل جریان را برای زمان‌های مختلف عمل‌آوری حساب کرد.

$$Q(t) = \int q(t) \times dN(t) \rightarrow Q(t) = \int \frac{\pi P \gamma_{\max}^{3+D_t}}{128 L_0^{D_t} \times \mu} \times G \frac{16.01 \times t \times D_t + 48.03 \times t}{t-1000} G \frac{-15.94 \times t \times D_t}{t-1000} \ln 2 \frac{-16010 \times D_t}{(t-1000)^2} dt \quad (34)$$

$$Q(t) = \frac{\pi P \gamma_{\max}^{3+D_t}}{128 L_0^{D_t} \mu} \frac{D_f}{(3+D_t-D_f)} 2 \frac{16.01 t (3+D_t-D_f)}{t-1000} - \frac{\pi P \gamma_{\max}^{3+D_t}}{128 L_0^{D_t} \mu} \frac{D_f}{(3+D_t-D_f)} - 9 \quad (35)$$

مقدار نرخ کلی جریان Q یکی از پارامترهای مهم است؛ با محاسبه آن می‌توان به پارامترهای مهم دیگری نظیر مقدار حجم نفوذ، ضریب نفوذپذیری و عمق نفوذ دست پیدا کرد.

اکنون، با استفاده از نرخ جریان، می‌توان ضریب نفوذپذیری سیال را که در رابطه‌ی ۱۳ نشان داده شده است به شکل رابطه ۳۶ محاسبه کرد.

$$K = \frac{\mu L_0 Q}{A P} \quad (36)$$

در رابطه ۳۶، L_0 طول نمونه و A مساحت (mm^2) مورد نظر، در نمونه است. با جایگذاری رابطه ۳۵ به جای عبارت Q در رابطه ۳۶، رابطه ۳۷ بدست می‌آید. بر اساس تغییرات زمان می‌توان ضریب نفوذپذیری (K) را با بکارگیری مدل جدید محاسبه نمود.

$$K(t) = \frac{\pi D_f L_0^{1-D_t} \gamma_{\max}^{3+D_t}}{128 A (3+D_t-D_f)} 2 \frac{16.01 t (3+D_t-D_f)}{t-1000} - \frac{\pi D_f L_0^{1-D_t} \gamma_{\max}^{3+D_t}}{128 A (3+D_t-D_f)} \frac{9 \mu L_0}{A P} \quad (37)$$

رابطه ۲۵ عمق نفوذ را به شکل رابطه ۳۸ می‌توان ارائه داد.

$$d_m(t) = \sqrt{\frac{2 K P t}{\mu}} \quad (38)$$

در رابطه ۳۸، d مقدار عمق نفوذ و اندیس m مقدار حداکثر آن را نشان می‌دهد (mm)، K ضریب نفوذپذیری (mm^2)، t مدت زمان انجام آزمایش (Sec) است. P فشار استفاده شده در آزمایش است (MPa) و μ ویسکوزیته (MPa S) است. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت سطحی و عمق نفوذ در جدول ۴ داده شده است.

جدول ۴: مقادیر نتایج آزمایش‌ها مختلف

تعداد نمونه‌ها	تغییر انحراف	عمق نفوذ (mm)	تغییر انحراف	مقاومت سطحی (MPa)	تغییر انحراف	مقاومت فشاری (MPa)	سن عمل‌آوری (Day)
۸	۳/۵۶	۴۷	۱/۸۲	۱/۸۱	۳/۲۱	۲۷/۲	۷
۸	۲/۲	۴۶/۳	۳/۴۵	۱/۸۶	۲/۰۲	۲۷/۶۲	۹
۸	۲/۱	۴۵/۶	۱/۵	۱/۹	۲/۲	۲۸/۰۴	۱۱
۸	۱/۵۸	۴۴/۸	۲/۴	۱/۹۷	۲/۵۲	۲۸/۶۸	۱۴
۸	۱/۲	۳۴/۴	۲/۱	۲/۰۴	۳/۵	۲۹/۳۱	۱۷
۸	۲/۵۸	۴۱/۹	۲/۸۲	۲/۱۳	۲/۴۷	۳۰/۱۵	۲۱
۸	۲/۳	۳۹/۴	۳/۸۵	۲/۲۹	۳/۱۷	۳۱/۶۳	۲۸
۸	۲/۴	۳۶/۴	۱/۰۹	۲/۴۲	۱/۳۹	۳۵/۷۲	۴۲
۸	۱/۰۸	۳۴/۹	۳/۵۲	۲/۶	۰/۸۷	۳۶/۸	۵۴
۸	۰/۹	۳۳/۹	۲/۸۸	۲/۷	۲/۷۸	۳۷/۸۸	۶۷
۸	۳/۲	۳۳	۱/۸۹	۲/۷۹	۲/۱۳	۳۸/۹۷	۸۰
۸	۱/۱۶	۳۲/۳	۳/۸۶	۲/۹	۲/۱	۳۹/۸	۹۰

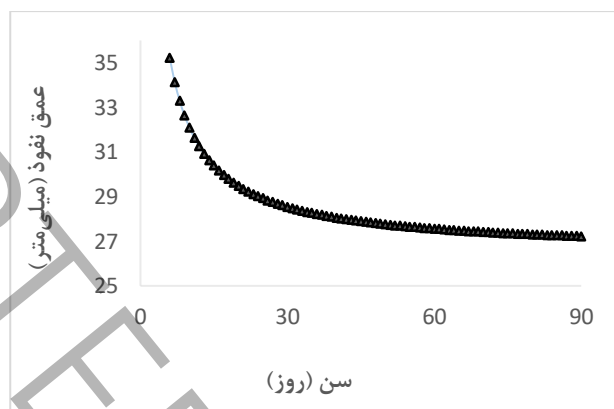
در جدول ۵ مقادیر عمق نفوذ، در سنین مختلف برای نتایج حاصل از مدل جدید فراکتال و آزمون محفظه استوانه‌ای نشان داده شده است. با توجه به این نتایج، مشاهده می‌شود که، درصد اختلاف بین نتایج عمق نفوذ در سن ۹۰ روز برابر ۸/۹ درصد است. مقدار اندک اختلاف، نشان از دقت مدل تئوری است. در کل روند تغییرات عمق نفوذ، با استفاده از مدل جدید فراکتال و نتایج آزمون محفظه استوانه‌ای دارای همخوانی مناسبی می‌باشد. در هر دو روش، مقدار عمق نفوذ با افزایش سن به شکل تدریجی کاهش می‌یابد که علت آن افزایش مقاومت بتن است.

جدول ۵: مقایسه مقادیر عمق نفوذ در سنین مختلف

سن (Day)	نتایج تئوری (mm)	نتایج آزمایشگاهی (mm)	درصد اختلاف (%)
۷	۳۷/۹۵	۴۷	۱۹/۲۶
۹	۳۶	۴۶/۳	۲۲/۲۵
۱۱	۳۴/۸	۴۵/۶	۲۳/۶
۱۴	۳۳/۵	۴۴/۸	۲۵
۱۷	۳۲/۷	۳۴/۴	۲۴/۶۵
۲۱	۳۱/۹	۴۱/۹	۲۳/۸۷
۲۸	۳۱/۱۲	۳۹/۴	۲۱
۴۲	۳۰/۳	۳۶/۴	۱۶/۷
۵۴	۲۹/۹	۳۴/۹	۱۴/۳۳
۶۷	۲۹/۷	۳۳/۹	۱۲/۵۴
۸۰	۲۹/۵	۳۳	۱۰/۶
۹۰	۲۹/۴	۳۲/۳	۸/۹

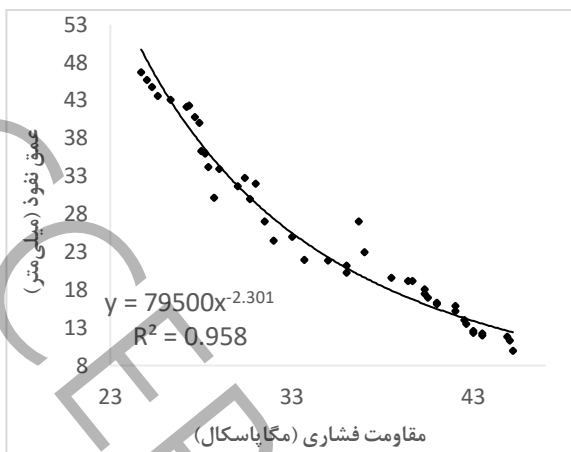
نمودار عمق نفوذ به دست آمده از رابطه ۳۸ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در نمودار مربوطه، مشاهده می‌شود که مقادیر عمق نفوذ با افزایش سن عمل‌آوری کاهش می‌یابد که با آزمایش‌های انجام شده مطابقت دارد و این بیانگر معتبر بودن تئوری مورد نظر است.

دلیل این کاهش، پیشرفت روند هیدراسیون سیمان است که منجر به کاهش منافذ و قطع کانال‌های مویینه گردیده است [۵۸]. با گذشت زمان و پیشرفت واکنش هیدراسیون، منافذ خالی با محصولات این واکنش پر می‌شوند و به همین ترتیب، مقادیر عمق نفوذ بتن کاهش می‌یابد. همچنین در فرآیند هیدراسیون، مقاومت پیوند ذرات در خمیره سیمان افزایش می‌یابد و خلل و فرج بین ذرات در خمیره سیمان کاهش پیدا می‌کند. فضاهاى موجود در خمیره سیمان تازه که از همان ابتدا مملو از آب هستند، با کمک فرآورده‌های ناشی از فعل و انفعالات هیدراسیون سیمان پر می‌شوند و از این رو، مقادیر نفوذپذیری بتن کاهش می‌یابند [۵۹].

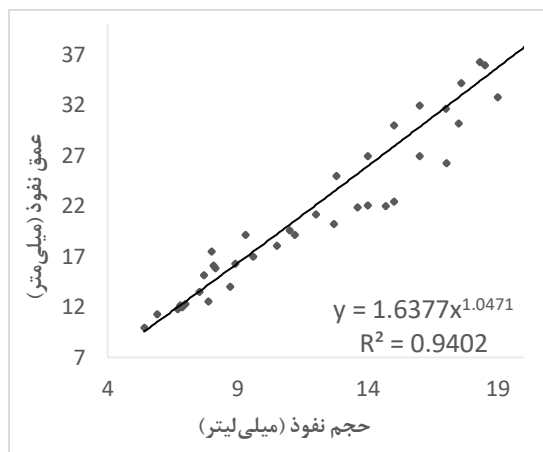


شکل ۱۰: روند عمق نفوذ با افزایش سن حاصل از رابطه ۳۸

همانطور که ذکر گردید، با استفاده از دستگاه محفظه استوانه‌ای می‌توان بدون شکستن نمونه مقدار نفوذپذیری را اندازه‌گیری کرد. روش‌های موجود فقط قابلیت اندازه‌گیری عمق نفوذ آب در بتن را دارا می‌باشند که برای انجام این کار نیاز به شکستن نمونه می‌باشد. در حالی که آزمون "محفظه استوانه‌ای" قابلیت اندازه‌گیری حجم نفوذ آب، بدون نیاز به شکستن نمونه را دارد. در این مقاله برای صحت سنجی مدل تئوری، نمونه‌های بتنی شکسته شده تا عمق نفوذ آن‌ها بررسی گردد. در غیر اینصورت می‌توان مقدار حجم آب نفوذ کرده به بتن را بر اساس میکرومتر نصب شده روی دستگاه و بدون نیاز به شکستن نمونه بدست آورد. در شکل ۱۱-الف مشاهده می‌شود که مقدار ضریب تعیین بین حجم نفوذ حاصل از آزمون محفظه استوانه‌ای و عمق نفوذ برابر ۹۴ درصد محاسبه شده است. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که بین حجم نفوذ حاصل از آزمون محفظه استوانه‌ای و عمق نفوذ ارتباط مستقیم برقرار است زیرا با افزایش حجم نفوذ، عمق نفوذ نیز افزایش می‌یابد. لذا می‌توان با استفاده از نمودار مذکور، مقدار حجم نفوذ آب در بتن را توسط آزمون محفظه استوانه‌ای محاسبه کرده و آن را به عمق نفوذ آب در بتن تبدیل کرد. همچنین، در شکل ۱۱-ب، رابطه بین مقاومت فشاری و عمق نفوذ بررسی شده است که ضریب تعیین ۹۵ درصد به دست آمده است. بنابراین، می‌توان با استفاده از مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی، جهت دریافت عمق نفوذ همان نمونه و یا عضو دیگر، با بکارگیری نمودار کالیبراسیون شکل ۱۱-ب اقدام کرد. قابل ذکر است که بین مقاومت فشاری و عمق نفوذ رابطه معکوس وجود دارد. به عبارتی با افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها، مقدار عمق نفوذ آب در بتن کاهش داشته است. با توجه به رابطه مستقیم بین مقاومت سطحی و مقاومت فشاری لذا می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقاومت سطحی نمونه‌ها، مقدار عمق نفوذ آب در بتن کاهش می‌یابد.



ب: مقاومت فشاری - عمق نفوذ



الف: حجم نفوذ و عمق نفوذ

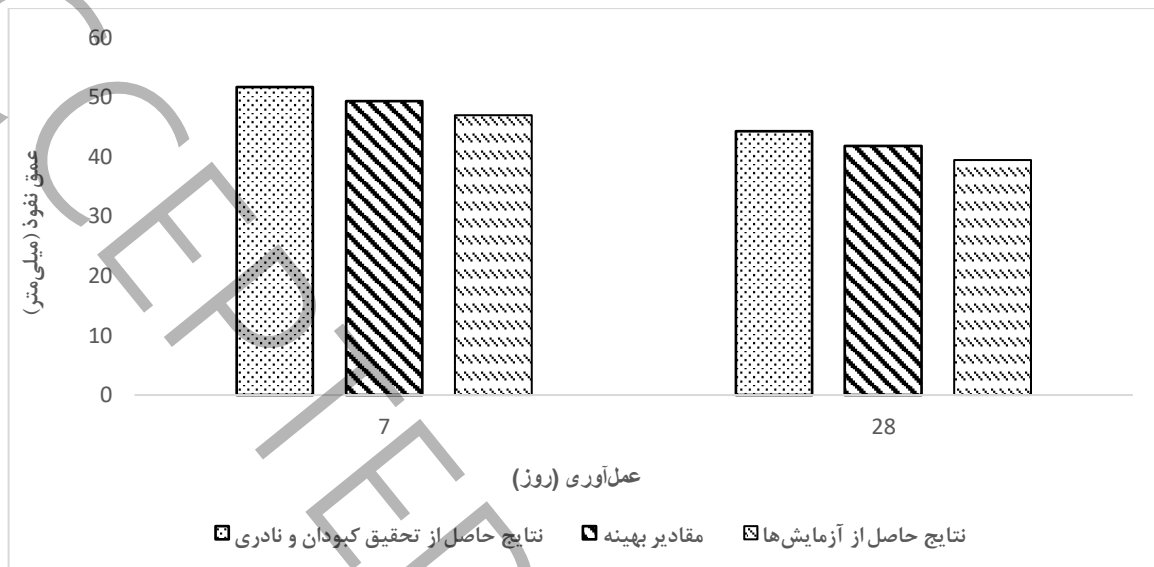
شکل ۱۱: همبستگی بین پارامترهای حجم نفوذ و عمق نفوذ

برای دریافت ضریب تعیین با استفاده از نتایج آزمایش‌ها و قرار دادن آن در برنامه اکسل و بکارگیری رگرسیون، رابطه همبستگی و ضریب مذکور از رگرسیون حاصل می‌شود. ضریب تعیین، که معمولاً با R^2 نشان داده می‌شود، مقداری بین ۰ و ۱ می‌باشد. به بیان ساده ضریب تعیین نشان می‌دهد که چند درصد تغییرات متغیرهای وابسته در یک مدل رگرسیونی با متغیر مستقل قابل اندازه می‌باشد.

۳-۵- صحت‌سنجی نتایج

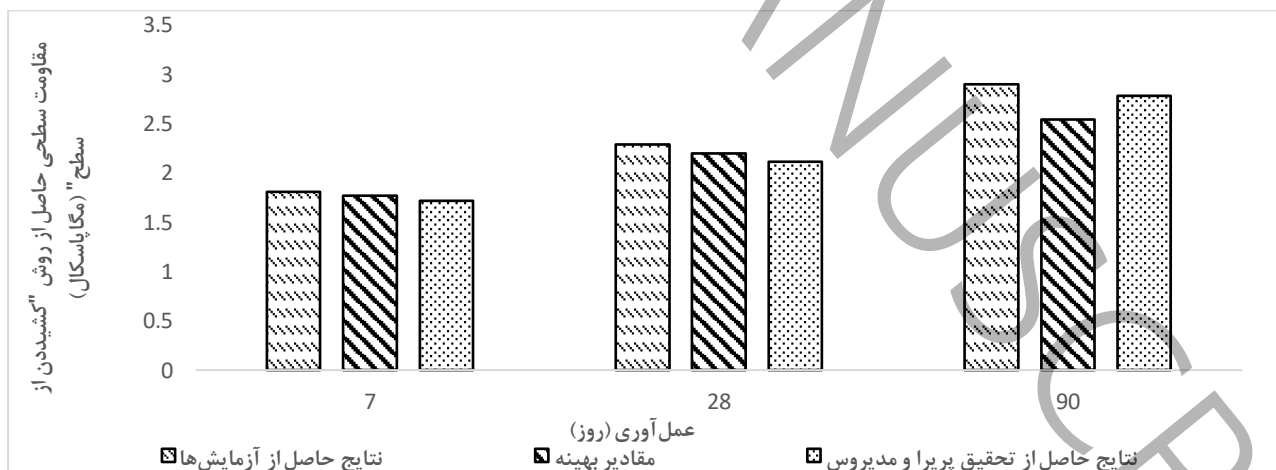
در این بخش به منظور اطمینان از صحت نتایج به دست آمده و همچنین معرفی مقادیر بهینه، نتایج آزمایش‌های این تحقیق با نتایج تحقیقات پیشین مقایسه شده است. در تحقیق کبودان و نادری (۲۰۲۰) [۴۶] با استفاده از آزمون "محفظه استوانه‌ای"، نتایج تقریباً مشابهی به دست آمده که مقادیر عمق نفوذ آب به بتن در تحقیق مذکور در سنین ۷ و ۲۸ روزه برابر با ۵۱/۶۹ و ۴۴/۲۸ میلی‌متر به دست آمده که نتایج حاصل از تحقیق حاضر برابر با ۴۷ و ۳۹/۴ میلی‌متر می‌باشد که اختلاف این دو به ترتیب برابر با ۶/۳ و ۱۰/۶ درصد بوده و مقادیر بهینه برای عمق نفوذ

نیز برابر با ۴۹/۳۵ و ۴۱/۸۴ میلی‌متر تعیین شده است. مقادیر عمق نفوذ در شکل ۱۲ قابل مشاهده است. همچنین تحقیق دیگری نادری و همکاران، (۲۰۱۷) [۶۰-۶۱] نیز نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت فشاری و طول دوره عمل‌آوری، نفوذپذیری بتن کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲: مقایسه نتایج عمق نفوذ

پریرا و مدیروس (۲۰۱۲) [۱۸] مقادیر مقاومت سطحی حاصل از روش "کشیدن از سطح" در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه را برابر با ۱/۷۲، ۲/۱۱ و ۲/۷۸ مگاپاسکال به دست آوردند که این مقادیر با نتایج حاصل از تحقیق حاضر که برابر با ۱/۸۱، ۲/۲۹ و ۲/۹ مگاپاسکال است، مقایسه شده و اختلاف این نتایج به ترتیب برابر ۵، ۸ و ۴ درصد است. همچنین، مقادیر بهینه نیز برابر با ۱/۷۷، ۲/۲ و ۲/۵۴ مگاپاسکال تعیین شده است. قابل ذکر است که وجود اختلاف ناچیز نشان دهنده صحت نتایج است که این تغییرات در شکل ۱۳ نیز نشان داده شده است.



شکل ۱۳: مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیق پریرا و مدیروس

۴- نتیجه‌گیری

- بررسی‌ها نشان داد که نفوذپذیری در دوام بتن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پارامترهای اصلی آن، شامل نرخ نفوذ، عمق نفوذ و ضریب نفوذپذیری، نقش قابل توجهی در تعیین عملکرد و دوام بتن ایفا می‌کنند.

- نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که کاهش مقاومت سطحی بتن منجر به افزایش نفوذپذیری آن می‌شود. در این شرایط، عوامل آسیب‌رسان قادر به نفوذ به داخل بتن خواهند بود که در نهایت منجر به کاهش عمر مفید سازه می‌گردد.

- با توجه به نتایج حاصل از مدل جدید فراکتالی، می‌توان بیان کرد که این مدل قادر به اندازه‌گیری نفوذپذیری با دقت بالا است. علاوه بر این، از این مدل می‌تواند در تخمین نفوذپذیری بتن معمولی استفاده کرد.

- تئوری استفاده شده در تحقیق حاضر تحت عنوان مدل جدید فراکتالی قادر است که روند عمل‌آوری سیمان را در نتایج خود نمایان سازد. این ویژگی به اعتبار تئوری مذکور می‌افزاید.

- روش "محفظه استوانه‌ای" نسبت به سایر روش‌های استاندارد، دارای مزایایی بیشتری است، زیرا در این روش می‌توان مقدار نفوذپذیری را بدون تخریب نمونه بتنی اندازه‌گیری کرد.

۵-پیشنهاد‌های آتی

مدل به‌کاررفته در این تحقیق برای نخستین بار در زمینه بتن معمولی و در مقاومت‌های مشخص مورد استفاده قرار گرفته است. در تحقیقات آتی، با بهبود و توسعه این مدل، امکان کاربرد آن در سایر زمینه‌ها که نفوذپذیری آن‌ها قابل اهمیت باشد نیز فراهم خواهد شد.

منابع و مراجع

- [1] Shen, L., Zhang, L., Yang, X., Di Luzio, G., Xu, L., Wang, H., & Cao, M. Multiscale cracking pattern-based homogenization model of water permeability in hybrid fiber-reinforced concrete after high-temperature exposure. *Journal of Building Engineering*, 84(2) (2024) 1-17.
- [2] Zhang, G., Zheng, H., Wei, X., Li, Z., Yan, Z., & Chen, X. Concrete mechanical properties and pore structure influenced by high permeability water pressure. *Developments in the Built Environment*, 17(2) (2024) 1-11.
- [3] Zeng, W., Wang, W., Pan, J., & Liu, G. Effect of steel fiber on the permeability of freeze-thaw damaged concrete under splitting tensile and compressive loads. *Journal of Building Engineering*, 80(2) (2023) 1-14.
- [4] Zeng, W., Zhao, X., Zou, B., & Chen, C. Topographical characterization and permeability correlation of steel fiber reinforced concrete surface under freeze-thaw cycles and NaCl solution immersion. *Journal of Building Engineering*, 80(4) (2023) 1-17.
- [5] Zhang, J., Zhou, L., Nie, Q., Wu, H., & Wu, L. Effects of calcium sulfate whiskers and basalt fiber on gas permeability and microstructure of concrete. *Construction and Building Materials*, 411(1) (2024) 134369.
- [6] Yang, J., Dong, Q., Chen, X., Shi, B., & Wang, X. Evaluation of concrete surface permeability: A dynamic water film-based approach. *Measurement*, 224(1) (2024) 113863.
- [7] Mandelbrot, B. B., & Mandelbrot, B. B. *The fractal geometry of nature*. New York: WH freeman. 5 (1982) 468 pages.
- [8] Xuan, W., Chen, X., Yang, G., Dai, F., & Chen, Y. Impact behavior and microstructure of cement mortar incorporating waste carpet fibers after exposure to high temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 187(7) (2018) 222-236.
- [9] Gao, Y., Jiang, J., De Schutter, G., Ye, G., & Sun, W. Fractal and multifractal analysis on pore structure in cement paste. *Construction and Building Materials*, 69(3) (2014) 253-261.
- [10] Chen, X., Zhou, J., & Ding, N. Fractal characterization of pore system evolution in cementitious materials. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(1) (2015) 719-724.
- [11] Ma, H., Sun, J., Wu, C., Yi, C., & Li, Y. Study on the pore and microstructure fractal characteristics of alkali-activated coal gangue-slag mortars. *Materials*, 13(11) (2020) 2442.
- [12] Mahamud, M., López, Ó., Pis, J. J., & Pajares, J. A. Textural characterization of chars using fractal analysis. *Fuel Processing Technology*, 86(2) (2004) 135-149.
- [13] Naderi, M. Determination of concrete stone mortar brick and other construction materials permeability with cylindrical chamber method, Registration of patent in Companies and industrial property Office Reg. N. 67726 Iran, (2010).
- [14] Naderi, M., & Kaboudan, A. Experimental study of the effect of aggregate type on concrete strength and permeability. *Journal of Building Engineering*, 37 (2) (2021) 1-11.
- [15] BS EN 12390-8, Testing Hardened Concrete. Depth of Penetration of Water under Pressure, British Standards Institution, London. (2009).
- [16] Naderi, M., & Kaboudan, A. 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.

- [17] ASTM C1583, Standard test method for tensile strength of concrete surfaces and the bond strength or tensile strength of concrete repair and overlay materials by direct tension (pull-off method), West Conshohocken PA, American Society for Testing and Materials (2004).
- [18] Pereira, E., & de Medeiros, M. H. F. Pull Off test to evaluate the compressive strength of concrete: an alternative to Brazilian standard techniques. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 5(4) (2012) 757-780.
- [19] Naderi, Mahmood, and Alireza Kaboudan. Evaluation of the effect of strength, duration, water pressure and casting direction on concrete permeability. *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 52, no. 9 (2020): 2379-2398.
- [20] Naderi, Mahmood, and Alireza Kaboudan. Evaluation of the Equation of Water Penetration into Concrete using Results of “Cylindrical Chamber” Method. *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 53, no. 5 (2021): 2175-2194.
- [21] Naderi, Mahmood, and Alireza Kaboudan. Effects of Concrete Constituent Materials on the Penetration of Surface Water. *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 53, no. 8 (2021): 3467-3480.
- [22] Parhizkari, Majid, Ali Saberi Vaezaneh, and Mahmood Naderi. The effect of penetration-reducing materials on concrete permeability and strength with. *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 55, no. 1 (2023): 19-40.
- [23] Kaboudan, Alireza, and Mohammadreza Keshtkar. Studying the permeability and strength of concretes containing silica fume, zeolite and fly ash using “Cylindrical chamber” method and British standard. *Journal of Structural and Construction Engineering* 7, no. 3 (2020): 92-113.
- [24] Naderi, Mahmood, Ali Saberi Vaezaneh, and Majid Parhizkari. The effect of different temperature cycles on permeability and surface resistance of concretes containing permeability-reducing materials. *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 55, no. 9 (2023): 1845-1862.
- [25] Naderi, Mahmood, and Alireza Kaboudan. The effect of mineral admixtures on permeability, porosity and electrical resistivity of concrete. *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 54, no. 3 (2022): 933-958.
- [26] Kaboudan, Alireza, Mahmood Naderi, and Majid Amin Afshar. The efficiency of Darcy and two-dimensional diffusion flow models to estimate water penetration into concrete. *Journal of Building Engineering* 34 (2021): 102012.
- [27] Kaboudan, A. R., and M. Naderi. Effect of aggregates on the compressive strength and permeability of concrete. *Sharif Journal of Civil Engineering* 37, no. 4.1 (2022): 81-92.
- [28] M. Naderi, and F. Mohammadi. Assessing The Influence Of Concrete Strength On Its Permeability Of Concrete Channel Used For Irrigation In Qazvin Province. *Sharif Journal of Civil Engineering* 34, no. 2.2 (2018): 143-150.
- [29] ASTM C136-19; Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA. (2019).
- [30] ASTM C127-15; Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA. (2015).
- [31] ASTM C128-15; Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA. (2015).
- [32] Abramoff, M. D., Magalhães, P. J., & Ram, S. J. Image processing with ImageJ. *Biophotonics international*, 11(7) (2004) 36-42.
- [33] Standard, BS. Testing hardened concrete. Compressive Strength of Test Specimens, BS EN, (2019). 12390-3.
- [34] Xu, P. A discussion on fractal models for transport physics of porous media. *Fractals*, 23(03) (2015) 1530001.
- [35] Yu, B., & Cheng, P. A fractal permeability model for bi-dispersed porous media. *International journal of heat and mass transfer*, 45(14) (2002) 2983-2993.
- [36] Kim, J., & Choi, S. Fractal-based microstructure reconstruction to predict the permeability of cement pastes. *Construction and Building Materials*, 366(4) (2023) 130157.
- [37] Liu, H., Xie, Z., Yu, R., & Zhang, N. A New Three-dimensional Fractal Dimension Model to Describe the Complexity of Concrete Pores. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 20(3) (2022) 127-138.
- [38] Wu, C. Q., Xu, H. J., & Zhao, C. Y. A new fractal model on fluid flow/heat/mass transport in complex porous structures. (2020). RETRACTED.
- [39] Wheatcraft, S. W., & Tyler, S. W. An explanation of scale-dependent dispersivity in heterogeneous aquifers using concepts of fractal geometry. *Water Resources Research*, 24(4) (1988) 566-578.
- [40] Xu, P., & Yu, B. Developing a new form of permeability and Kozeny-Carman constant for homogeneous porous media by means of fractal geometry. *Advances in water resources*, 31(1), (2008) 74-81.
- [41] Yu, B., & Liu, W. Fractal analysis of permeabilities for porous media. *AIChE journal*, 50(1), (2004) 46-57.
- [42] Bo-Ming, Y. Fractal character for tortuous streamtubes in porous media. *Chinese Physics Letters*, 22(1), (2005) 158.
- [43] Mandelbrot, B. B., & Aizenman, M. *Fractals: form, chance, and dimension*, (1979).
- [44] Mandelbrot, B. B., Passoja, D. E., & Paullay, A. J. Fractal character of fracture surfaces of metals. *Nature*, 308(5961), (1984). 721-722.
- [45] Wei, X., Xiao, L., & Li, Z. Prediction of standard compressive strength of cement by the electrical resistivity measurement. *Construction and Building Materials*, 31, (2012). 341-346.

- [46] KABOUDAN., A. Experimental and theoretical study of the effect of concrete constituent materials on the permeability of hardened concrete using “Cylindrical chamber” method. . Ph.D. Student. , Imam Khomeini International University (2020).
- [47] Murata, J., Ogihara, Y., Koshikawa, S., & Itoh, Y. (2004). Study on watertightness of concrete. *Materials Journal*, 101(2), 107-116.
- [48] Torrent, R. J., Neves, R. D., & Imamoto, K. I. Concrete permeability and durability performance: from theory to field applications. CRC Press. (2021).
- [49] Basheer, L., Kropp, J., & Cleland, D. J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. *Construction and building materials*, 15(2-3), (2001). 93-103.
- [50] Teriqet, A., Mohammadi, M., & Medras Y. Thermodynamic investigation of hydration and chemical shrinkage of cement containing slag. *Sharif. J. of Civil Eng*, 34(4) (2019) 82-57.
- [51] Wei, J., Chen, Z., Liu, J., Liang, J., & Shi, C. Review on the characteristics and multi-factor model between pore structures with compressive strength of coral aggregate. *Construction and Building Materials*, 370(4) (2023) 130326.
- [52] Taylor, H. F. *Cement chemistry* London: Thomas Telford. Booooook. (1997). (Vol. 2, p. 459).
- [53] Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., & Kerkhoff, B. *Design and control of concrete mixtures* Skokie, IL: Portland Cement Association. Vol. 5420. (2002). 60077-1083.
- [54] Siddiqui, M. S., Nyberg, W., Smith, W., Blackwell, B., & Riding, K. A. Effect of curing water availability and composition on cement hydration. *ACI Materials Journal*, 110(3), (2013) 315-322.
- [55] Springenschmid, R. *Betontechnologie für die Praxis*, 1st ed.; Beuth Verlag GmbH: Berlin, Germany, 2007.
- [56] Alexander, M., Bentur, A., & Mindess, S. *Durability of concrete: design and construction* (Vol. 20). (2017). CRC Press.
- [57] Verein Deutscher Zementwerke. *Zement-Taschenbuch*, 51th ed.; Verlag Bau + Technik.
- [58] Naderi, M., Kaboudan, A. R., & Amin Afshar, M. 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) (2020) 13-25.
- [59] Kim, J., & Choi, S. Fractal-based microstructure reconstruction to predict the permeability of cement pastes. *Construction and Building Materials*, 366(5) (2023) 130157.
- [60] Naderi, M., Kaboudan, A., & Akhavan Sadighi, A. 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.
- [61] Naderi, M., B. Maleki, and A. F Amiri. Assessing The Permeability Of The Oil And Its Components Into Porous Concrete Using New Cylindrical Chamber Method. *Sharif Journal of Civil Engineering* 33, no. 1.1 (2017): 89-93.

The relationship between strength and depth of water penetration in concrete by using pull-off and cylindrical chamber tests and developing a new theory

Mahmood Naderi¹, Ali Saberi Vaezaneh^{2*}, Sardarwali Din³

¹ Professor, Imam Khomeini International university, Qazvin, Iran. Profmahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir

^{*2} Ph.D, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. ali.saberi@edu.ikiu.ac.ir

³ Ph.D Student, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. walidin@edu.ikiu.ac.ir

ABSTRACT

The depth of water penetration in concrete is used to measure the permeability of concrete. In the valid international standards, to do this, first water under pressure enters the concrete, and then by breaking the concrete sample, the depth of water penetration into the concrete is measured. Meanwhile, if there is a need to evaluate the durability of a concrete structure or a concrete water source on site, there is no accurate on-site test to do this. Therefore, in this article, the depth of water penetration in concrete has been measured by using the in-situ and modern cylindrical chamber test. Then, using the structural characteristics of the microscopic pores of concrete, which is obtained by mercury test, a new theoretical model has been presented, which can be used to measure the water penetration depth in concrete with high accuracy. . While comparing the penetration depth obtained from the cylindrical chamber test and the new theoretical model, the surface resistance of concrete has been determined using the surface pull test. The obtained results show an inverse relationship between strength and water penetration depth in concrete. It was also found that the cylindrical chamber test has the ability to measure the depth of water penetration in concrete without breaking the sample and with a high confidence of 93%. The extracted new equations also showed very high accuracy to evaluate the depth of water penetration into concrete.

KEYWORDS:

Pull-off test, depth of penetration, concrete, new equations, permeability.