

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر آب مغناطیسی بر خواص بتن متخلخل تازه و سخت شده

ساسان معتقد\*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیا

بهبهان

فرزاد بابادی، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیا بهبهان

صادق نیک‌سرشت، فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیا بهبهان

محبوبه میرزایی علی‌آبادی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی

خاتم‌الانبیا بهبهان

سید امین اصغری پری، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم-

الانبیا بهبهان

مهدی عسکری، استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیا بهبهان

Email: motaghed@bkatu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۲۷ - پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۹

### چکیده

بتن متخلخل با دارا بودن حجم حفرات زیاد به‌عنوان پیش‌تصفیه آب‌های سطحی عمل کرده، آب حاصل از بارندگی را در زمین فرو می‌برد و سبب تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی و کاهش رواناب می‌شود. استفاده از این بتن به دلایل زیست‌محیطی در حال افزایش است. مانع اصلی استفاده گسترده از این بتن در روسازی‌ها، مقاومت کم آن است. در این تحقیق، سعی شده با استفاده از آب مغناطیسی، خواص مقاومتی بتن متخلخل بهبود داده شود. به این منظور، ۹ نسبت مخلوط با آب معمولی و آب مغناطیسی ساخته شده است. به این منظور، جمعاً ۲۲۴ نمونه از بتن متخلخل ساخته شده و آزمایش‌های بتن سخت شده شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی مستقیم، نفوذپذیری و تخلخل انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از آب مغناطیسی سبب افزایش ۳۶ تا ۴۳ درصدی مقاومت فشاری ۷ روزه شده است. افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه بین ۹ تا ۱۶ درصد بوده است. نمونه‌های ۷ روزه ساخته شده با آب معمولی، حدود ۴۴-۴۸ درصد مقاومت ۲۸ روزه خود را کسب کرده‌اند؛ در حالی که نمونه‌های ۷ روزه ساخته شده با آب مغناطیسی، ۵۶-۶۱ درصد مقاومت ۲۸ روزه خود را کسب کرده‌اند. نمونه‌های ساخته شده با آب مغناطیسی حدود ۸-۳۴ درصد نسبت به نمونه‌های ساخته شده با آب معمولی کاهش نفوذپذیری داشته‌اند. افزایش مقاومت کششی نمونه‌های آب مغناطیسی ۷ روزه بین ۲۶ تا ۴۲ درصد و ۲۸ روزه بین ۴/۵ تا ۱۲ درصد مشاهده شده است. آب مغناطیسی، تخلخل نمونه‌ها را به میزان ۲/۸ تا ۷/۵ درصد کاسته است. نتایج نشان می‌دهد که با انجام تراکم، تخلخل حدود ۱۰ درصد کاهش یافته، اما نفوذپذیری یک‌ششم شده است. نمونه‌های ساخته شده با آب مغناطیسی، ظاهر و خواص فیزیکی یکنواخت‌تری داشته‌اند. واژه‌های کلیدی: بتن متخلخل، آب عمل‌آوری شده با مغناطیس، نفوذپذیری، مقاومت فشاری و کششی

## ۱. مقدمه

آب ماده‌ای مهم در بتن است که نقش اساسی در واکنش شیمیایی سیمان (هیدراتاسیون) دارد. هیدراتاسیون سیمان همه خواص اساسی بتن شامل ریزساختار، کارایی، مقاومت و دوام را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای ایفای چنین نقشی لازم است آب ویژگی‌های مشخصی داشته باشد. اعتقاد عمومی بر این است که آب شرب حداقل خواص لازم برای ساخت بتن را دارد. حداقل خواص به این معناست که آب لوله کشی تأثیر منفی بر خواص بتن ندارد. در کنار دیدگاه استفاده از آبی بدون تأثیر منفی عمده بر خواص بتن، دیدگاه دیگر استفاده از خواص مثبت آب است. دیدگاه دوم به دنبال پاسخ به این پرسش است که آیا می‌توان آب مناسب برای ساخت بتن را با آب با «تأثیر مثبت عمده» جایگزین کرد؟ به طور معمول، کیفیت و کمیت سایر اجزای تشکیل دهنده و کمیت آب برای بهبود خواص بتن تازه و سخت شده، مورد توجه محققان و سازندگان بتن بوده است. اما بحث کیفیت مثبت آب بر خواص بتن تا حدی کمتر مورد توجه بوده است.

استفاده از آب مغناطیسی به عنوان پیشنهادی اقتصادی در رابطه با کیفیت آب برای بهبود خواص بتن مطرح است. ایده استفاده از آب مغناطیسی در بتن به سال ۱۹۶۴ برمی‌گردد. پس از آن، تحقیقاتی در مورد تأثیر آب مغناطیسی بر خواص مهندسی بتن صورت گرفت. آب مغناطیسی با عبور آب از یک میدان مغناطیسی تولید می‌شود. مغناطیسی شدن آب باعث تغییر در عناصر ساختاری آب، ویسکوزیته و هدایت الکتریکی آب می‌شود (باراث و همکاران، ۲۰۱۶). تغییر در ساختار آب، به بهبود خواص آن برای استفاده در بتن و هیدراتاسیون کامل سیمان کمک می‌کند (سو و همکاران، ۲۰۰۰ و ۲۰۰۳). سو و همکاران (۲۰۰۰) افزایش ۹ تا ۱۹ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن حاوی پوزولان سرباره کوره آهن گدازی با آب مغناطیسی را نشان داده‌اند. افشین و همکاران (۲۰۱۰) تأثیر آب مغناطیسی بر ویژگی‌های

مکانیکی بتن پر مقاومت را مورد بررسی قرار دادند. آنها افزایش ۴۵٪ اسلامپ و ۱۸٪ مقاومت فشاری را گزارش کرده‌اند. این ویژگی‌های بهبود یافته بتن، بدون استفاده از هر گونه افزودنی شیمیایی که باعث آلودگی محیط زیست باشد، به دست آمده است. رضایی فر و ابویسانی (۱۳۹۲)، رهگذر و زمانی (۱۳۹۴)، تافیک و همکاران (۲۰۱۳)، احمد (۲۰۰۹)، کاندا ردی و همکاران (۲۰۱۴) و کرم و الشمال (۲۰۱۳) به مرور استفاده از آب مغناطیسی در بهبود خواص مهندسی بتن پرداختند. همه این تحقیقات آثار مثبت آب مغناطیسی را بر خواص بتن گزارش کرده‌اند. مظلوم و میری (۱۳۹۵)، اثر آب مغناطیسی بر مقاومت و روانی بتن‌های توانمند را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها افزایش ۳۶٪ روانی بتن با آب مغناطیسی را نشان داد. مانجوپریا و مالاتی (۲۰۱۶) افزایش ۲۵/۸۵ درصدی مقاومت فشاری و ۲۹/۲۶ درصدی مقاومت کششی بتن با استفاده از آب مغناطیسی را گزارش کرده‌اند. جین و همکاران (۲۰۱۷) مقاومت فشاری نمونه‌های بتن مخلوط شده با آب مغناطیسی را بیشتر از نمونه‌های با آب معمولی گزارش کرده‌اند. همچنین، بر اساس این مطالعات، افزایش مقاومت فشاری بتن آماده شده با آب مغناطیسی در سن اولیه بیشتر است. این تحقیقات دامنه وسیعی نداشته و تاکنون منجر به استفاده عمومی از این فناوری در بتن نشده است.

بتن متخلخل نوع خاصی از بتن با تخلخل زیاد است که سازگار با محیط زیست بوده (شو، ۲۰۱۸) و از آن به عنوان رویه در روسازی پیاده‌روها استفاده می‌شود (رضایی لری و حسنی، ۱۳۹۷ و شابالالا و اکولو، ۲۰۱۹). وجود حفره‌های زیاد در این نوع روسازی، حجم رواناب در سطحی را کاهش می‌دهد. این مسأله در مناطقی که دفع رواناب سطحی به درستی انجام نمی‌شود می‌تواند حائز اهمیت باشد (پاچیده و همکاران، ۲۰۱۹). کاهش حجم رواناب از طریق جذب آن به طور محلی به تقویت سفره‌های آب زیرزمینی نیز کمک خواهد کرد. این بتن، پتانسیل خوبی برای استفاده در روسازی دارد

## ۲. برنامه آزمایشگاهی

برنامه آزمایشگاهی شامل انتخاب مصالح، تعیین ویژگی‌های مصالح تشکیل دهنده، تهیه نسبت‌های مخلوط، ساخت نمونه‌ها و آزمایش به شرح زیر انجام شده است. به منظور سنجش خواص، در این تحقیق، بر اساس روش‌های طرح، چهار نسبت مخلوط انتخاب و ساخت نمونه‌های مکعبی ۱۵\*۱۵ سانتی‌متری (جمعاً ۱۴ نمونه برای هر نسبت مخلوط) جهت بررسی مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه و ساخت نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵\*۳۰ سانتی‌متری (جمعاً ۱۴ نمونه برای هر نسبت مخلوط) برای بررسی نفوذپذیری، تخلخل و مقاومت کششی دو نیم شدن آنها بدون ویریه انجام شده است. در هر مورد، نمونه شاهد با آب معمولی ساخته شده است. همچنین، برای بررسی اثر کوبش و تراکم بر خواص بتن متخلخل، یک نسبت مخلوط انتخاب و نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای آن در سه لایه ریخته شده و هر لایه آن با ۲۵ ضربه میله کوبیده شده است. به این ترتیب، جمعاً ۹ طرح ساخته شده است.

### ۲-۱. مصالح مصرفی

در این پژوهش، هدف، استفاده از مصالح محلی در تولید بتن و ارزیابی قابلیت این مصالح است. به همین دلیل، در این تحقیق از سیمان تیپ ۵ استفاده شده است که در برابر حمله سولفات‌ها مقاوم بوده (دوست محمدی و همکاران، ۲۰۱۸) و برای بسیاری از مناطق خوزستان مناسب است. سیمان استفاده شده تیپ ۵ از کارخانه سیمان بهبهان می‌باشد که خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱. خصوصیات شیمیایی و فیزیکی سیمان پرتلند

تیپ ۵ کارخانه سیمان بهبهان

اکسید	مقدار (%)
SiO <sub>2</sub>	۲۱/۱۸
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴/۹۴
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۵/۰۴
MgO	۱/۳۹

(دوست محمدی و همکاران، ۱۳۹۷). در صورت استفاده از این بتن در معابر، سر و صدای ناشی از ترافیک به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. علیرغم این مزایا، این بتن به علت مقاومت کم چندان قابلیت استفاده در روسازی معابر ندارد (تیموری و همکاران، ۱۳۹۵؛ امانی و نیکویی، ۱۳۹۶). به این ترتیب، بتن متخلخل خوب باید حداقل سه خاصیت داشته باشد: تخلخل و نفوذپذیری آن به حدی باشد که در باران‌های منطقه رواناب سطحی تشکیل نشود، خواص تازه آن به صورتی باشد که اجرای صحیح آن میسر باشد و مقاومت آن جوابگوی نیازهای مقاومتی در طول عمر روسازی باشد. استپسینیک و آردلین (۲۰۱۶) نشان داده‌اند که وجود میدان مغناطیس داخلی می‌تواند هیدراتاسیون سیمان را در سنین اولیه در محیط متخلخل بهبود دهد. ابراهیمی جوزدانی و رئیسی (۲۰۲۰) اثر مثبت استفاده از آب مغناطیسی بر خواص تازه و سخت‌شده‌ی بتن خودتراکم را گزارش داده‌اند.

به این ترتیب، مشاهده می‌شود که آب مغناطیسی به عنوان ماده‌ای قابل تولید و اقتصادی در تهیه بتن محسوب می‌شود که نقش آن در افزایش کارایی و مقاومت بتن‌های معمولی تقریباً اثبات شده است. مسأله اصلی این تحقیق بررسی امکان استفاده از آب مغناطیسی برای بهبود خواص مقاومتی نسبت‌های مخلوط اقتصادی مناسب برای ساخت بتن متخلخل به گونه‌ای است که جوابگوی نیازهای اجرایی (خواص تازه) و بهره‌برداری (آب‌گذری و مقاومت پایدار) بدون تحمیل هزینه‌ی اضافه ناشی از مواد افزودنی خاص باشد. به عبارت دیگر، آیا با استفاده از آب مغناطیسی می‌توان بتن متخلخلی ساخت که با حفظ نفوذپذیری بتواند مقاومت کافی داشته باشد. یعنی، نقصان مقاومت ناشی از تخلخل زیاد را با خواص آب مغناطیسی جبران نمود. به این منظور، ۹ طرح بتن متخلخل مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج آزمایش‌های سخت شده تجزیه و تحلیل شده است. همچنین، در یک مورد، اثر همزمان تراکم و آب مغناطیسی در بهبود مقاومت بتن مورد آزمون قرار گرفته است.

درشت دانه بر اساس استاندارد ASTM C127-07 و آزمایش وزن مخصوص آن بر اساس استاندارد ASTM C29/C29 M-09 و برای مصالح ریزدانه بر اساس استاندارد ASTM C128-07 انجام و نتایج در جدول ۲ آمده است. نمونه مصالح سنگی مورد استفاده در ساخت بتن در شکل ۱ و نمودارهای دانه‌بندی مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها

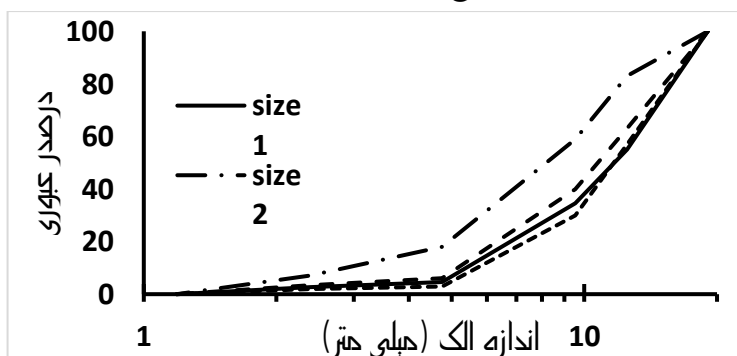
نوع سنگدانه	وزن مخصوص	درصد جذب
درشت دانه	۱۶۸۰	۰/۸
ریزدانه	۱۷۵۰	۱/۶

۶۲/۴	CaO
۲/۱۲	SO <sub>3</sub>
۰/۵۷	K <sub>2</sub> O
۰/۷۴	باقی مانده نامحلول
۳۰۵۰	وزن مخصوص دانه‌ای (kg/m <sup>3</sup> )

سنگدانه‌های درشت از نوع شکسته و با اندازه‌های مانده روی الک ۱/۲، مانده روی الک ۳/۸ و مانده روی الک ۴ بوده و مقداری ریزدانه با دانه‌بندی مانده روی الک ۸ و مانده روی الک ۱۶ در مخلوط استفاده شده است. جنس این سنگدانه‌ها آهکی بوده و از معادن بهبهان تأمین شده است. آزمایش وزن مخصوص و جذب آب مصالح



شکل ۱. نمونه مصالح سنگی مورد استفاده در ساخت بتن



شکل ۲. نمودارهای دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در ساخت بتن

(حدود ۸ لیتر) را درون مخزنی که یک آهنربای ۱/۲ تسلا بالای آن قرار داده شده ریخته و این آب با استفاده از یک پمپ از درون لوله آهنربا عبور می‌کند و به مخزن باز می‌گردد (شکل ۳). این سیکل بسته حدود سه ساعت

آب مصرفی برای ساخت نمونه‌ها، آب لوله کشی شهرستان بهبهان با pH حدود ۵/۹ و غلظت یون کلرید ۶۵ ppm بوده است. در فرایند مغناطیس کردن آب، برای اطمینان از مغناطیسی شدن کامل آب، حجم کمی از آب



شکل ۳. دستگاه مغناطیس کردن آب: مخزن، پمپ و آهنربای ۱/۲ تسلا

## ۲-۲. نسبت‌های مخلوط و ساخت نمونه‌ها

با توجه به طرح‌های ارائه شده توسط رضانیانپور و همکاران (۱۳۹۴) و کاستا و همکاران (۲۰۱۸) و با ساخت سری‌های مقدماتی و اصلاح مداوم، نسبت‌های مخلوط نهایی مورد آزمایش در این تحقیق در جدول ۳ نشان داده شده است. در این طرح‌ها، با توجه به هدف تحقیق، نسبت آب به سیمان و درصد خمیر ثابت نگه داشته شده است. از هر طرح، دو بار ساخت با آب معمولی و مغناطیسی انجام شده است که با توجه به تفاوت وزن مخصوص بتن‌های ساخته شده، اندکی تفاوت در وزن مصالح دیده می‌شود.

جدول ۳. نسبت‌های اختلاط بتن متخلخل

نسبت مخلوط	سنگدانه (kg)					مقدار سیمان (kg)	وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	نسبت آب به سیمان	درصد خمیر
	۱/۲	۳/۸	۴#	۸#	۱۶#				
Pc1	۷۸۳	۳۵۶	۵۲۲	۳۲	۴۷	۳۲۹	۱۷۴۰	۰/۳	۰/۲۴۵
Pc2	۲۹۴/۱	۴۱۵/۲	۷۰۹/۳	۱۹۰/۳	۱۲۱/۱	۳۲۶/۷۸	۱۷۳۰	۰/۳	۰/۲۴۵
Pc3	۶۸۲/۳	۴۱۱/۷	۶۰۸/۶	۴۶/۵۴	۶۰/۸۹	۳۳۸/۱۱	۱۷۹۰	۰/۳	۰/۲۴۵
Pc4	۷۳۵/۳	۴۶۱/۷	۴۶۱/۷	۱۷/۱	۳۴/۲	۳۲۳/۰۰	۱۷۱۰	۰/۳	۰/۲۴۵
Pcm1	۸۰۱	۳۶۴/۹	۵۳۴	۳۲/۰۴	۴۸/۰۶	۳۳۶/۲۲	۱۷۸۰	۰/۳	۰/۲۴۵
Pcm2	۳۰۴/۳	۴۲۹/۶	۷۳۳/۹	۱۹۶/۹	۱۲۵/۳	۳۳۸/۱۱	۱۷۹۰	۰/۳	۰/۲۴۵
Pcm3	۶۶۹/۷	۴۱۶/۳	۶۱۵/۴	۴۷/۰۶	۶۱/۵۴	۳۴۱/۸۹	۱۸۱۰	۰/۳	۰/۲۴۵
Pcm4	۷۴۸/۲	۴۶۹/۸	۴۶۹/۸	۱۷/۴	۳۴/۸	۳۲۸/۶۷	۱۷۴۰	۰/۳	۰/۲۴۵
Pcc	۸۶۰	۳۹۱	۵۷۳	۳۵	۵۱	۳۶۱	۱۹۱۰	۰/۳	۰/۲۴۵

تا مراحل ساخت برای کلیه بتن‌ها تا حد ممکن به طور یکسان انجام شود. تمهیدات در نظر گرفته شده برای این امر شامل یکسان بودن اپراتورهای انجام آزمایش‌ها،

نمونه‌های ساخته شده با آب معمولی با pc، نمونه‌های مغناطیسی با Pcm و نمونه‌های متراکم شده نیز با Pcc نام‌گذاری شده‌اند. در ساخت نمونه‌ها، سعی گردید

برای ساخت بتن در کنار نمونه‌های شاهد که بتن بدون هیچگونه عملیات و پیره داخل قالب‌های مورد نظر ریخته شد، یک نسبت مخلوط انتخاب شده (pcc) و هر نمونه مکعبی و استوانه‌ای آن در سه لایه ریخته شده و هر لایه آن با ۲۵ ضربه میله کوبیده شده است تا تأثیر تراکم بتن متخلخل بر مقاومت و نفوذپذیری آن بررسی شود.

نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در داخل قالب نگهداری می‌شوند. سپس نمونه‌های مقاومت فشاری و کششی از قالب خارج شده و به مخزن عمل‌آوری آب با دمای حدود ۲۵ درجه سلسیوس منتقل گردیده و تا سن انجام آزمایش در این وضعیت نگهداری می‌شوند. در شکل ۴، مخلوط کن، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها نشان داده شده است.

برای ساخت بتن با آب مغناطیسی مراحل نیز فوق تکرار شد. با این تفاوت که به جای آب معمولی از آب مغناطیسی استفاده شد. در مراحل اختلاط، پس از ریختن سنگدانه‌ها در میکسر و مخلوط کردن آنها و اضافه کردن سیمان، در حالی که میکسر در حال هم زدن سیمان و سنگدانه‌ها می‌باشد مقدار آب مورد نیاز بر اساس طرح از مخزن آب مغناطیس در حالی که آهنربا در حال مغناطیس کردن آب می‌باشد، توزین می‌شود و در دو مرحله به سیمان و سنگدانه‌های درون میکسر افزوده می‌شود. کلیه مراحل و زمان مخلوط کردن و مراقبت بتن مغناطیس همانند بتن معمولی می‌باشد تا تأثیر سایر عوامل مانند دمای نگهداری و یا زمان مخلوط شدن اجزای بتن، در هر دو بتن یکسان باشد.

ساخت بتن‌های هر سری در فواصل زمانی نسبتاً کوتاه، دقت در انتخاب مصالح، رطوبت مصالح سنگی، زمان مغناطیسی شدن آب، مدت زمان اختلاط بتن در میکسر و نیز طی کردن مراحل ساخت و انجام آزمایش‌های یکسان برای هر بتن می‌باشد. قبل از شروع به کار، رطوبت سنگدانه‌ها محاسبه می‌شود و بر اساس نتایج رطوبت سنگدانه‌ها، نسبت‌های ترکیب برای ساخت بتن در حالت رطوبت اشباع با سطح خشک اصلاح می‌گردند. برای ساخت بتن متخلخل ابتدا سنگدانه‌ها را به درون میکسر ریخته و حدود یک دقیقه صبر می‌کنیم تا سنگدانه‌ها تقریباً به صورت یکنواخت مخلوط گردند. سپس سیمان به سنگدانه‌های درون میکسر اضافه می‌شود. بعد از گذشت حدود سه دقیقه، یک دوم آب به مخلوط اضافه می‌شود و پس از سپری شدن حدود دو دقیقه، مابقی آب به مخلوط اضافه شده و به بتن اجازه داده می‌شود تا به مدت پنج دقیقه مخلوط گردد. با بررسی چشمی سعی شده است زاویه‌ی همزن میکسر طوری تنظیم شود که بتن تا حد امکان یکنواخت مخلوط شود؛ هر چند این امر با توجه به نوع میکسر مورد استفاده و دانه‌بندی خاص بتن متخلخل به طور صددرصد محقق نگردیده است.

بلافاصله پس از پایان یافتن فرایند اختلاط بتن، نمونه‌گیری از بتن برای انجام آزمایش‌های منتخب صورت می‌گرفت. برای انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه از نمونه‌های مکعبی و برای انجام آزمایش‌های مقاومت کششی دو نیم شدن و آزمایش نفوذپذیری ۷ روزه و ۲۸ روزه از نمونه‌های استوانه‌ای استفاده شده است. در استفاده از آب معمولی



شکل ۴. الف) مخلوط کن بتن، ب) ساخت نمونه‌های بتن متخلخل و ج) عمل‌آوری نمونه‌ها

### ۲-۳. آزمایش‌ها

مقاومت فشاری بتن براساس استاندارد PART116: BS1881 و با استفاده از ۷ نمونه مکعبی ۱۵ سانتی‌متری برای مقاومت ۷ روزه و ۷ نمونه برای مقاومت ۲۸ روزه

انجام شد. ساخت نمونه‌ها بدون اعمال انرژی خارجی (ویبره) صورت گرفت و نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج و تا زمان انجام آزمایش مطابق استاندارد عمل‌آوری شدند. شکل ۵- الف، دستگاه آزمایش مقاومت فشاری به همراه نمونه مکعبی را نشان می‌دهد.



ب) آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن (مستقیم)



شکل ۵. الف) جک آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش میزان نفوذپذیری روی ۹۰ نمونه استوانه‌ای انجام شد. برای محاسبه نفوذپذیری، ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای کاملاً با موم، سلفون و نوارهای لاستیکی با دقت بسیار زیاد آب‌بندی شده‌اند، به طوری که آب فقط از روی سطح نمونه وارد و از زیر سطح آن خارج می‌گردد (شکل ۶- الف). سپس، نمونه آب‌بندی شده درون لوله‌ای با قطر ۱۵ سانتی‌متر و طول ۲ متر که دارای شیبی سراسری برای مشاهده سطح آب بالای نمونه می‌باشد قرار داده می‌شود و دوباره محل اتصال نمونه و لوله آب-بندی می‌شود تا اجازه خروج آب را از محل اتصال ندهد. پس از آب‌بندی، نمونه و لوله روی یک سطح مشبک قرار داده می‌شوند و آب با استفاده از پمپ با دبی ثابت از درون مخزن آب از بالای لوله به نمونه تزریق می‌شود. به نمونه فرصت داده می‌شود تا با توجه به دبی آب ورودی، سطح آب در بالای نمونه در ارتفاع ثابتی قرار گیرد. این آزمایش در سیکل بسته‌ای از جریان آب صورت گرفت

آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن با اعمال نیروی فشاری قطری در طول نمونه استوانه‌ای بتن، بر اساس استاندارد ASTM C496 انجام می‌شود. در آزمایش شکاف استوانه‌ای یا دو نیم شدن، نمونه بتنی استوانه‌ای استاندارد با ابعاد ۱۵×۳۰ سانتی‌متر از پهلوی در طول دو خط محوری مخالف تحت فشار قرار می‌گیرد. بار به صورت پیوسته با سرعت ثابت در محدوده ۰/۷ تا ۱/۴ MPa/sec وارد می‌شود تا نمونه شکسته شود. تنش فشاری وارد بر این نمونه، تنش کششی متعامدی ایجاد می‌کند که در طول قطر عمودی تقریباً یکنواخت است. تنش کششی دو نیم شدن از رابطه  $2 \frac{P}{\pi LD}$  به دست می‌آید. در این رابطه، P بار وارده در لحظه شکست، L طول نمونه استوانه‌ای (۳۰۰ mm) و D قطر استوانه (۱۵۰ mm) است. شکل ۵- ب آزمایش کششی و چگونگی شکست نمونه را نشان می‌دهد.

بررسی آزمایشگاهی تأثیر آب مغناطیسی بر خواص بتن متخلخل تازه و سخت شده

$$K = (QL) / (AH) \quad (1)$$

که در این رابطه، K نفوذپذیری نمونه، Q دبی آب ورودی، L طول نمونه، A سطح مقطع عرضی نمونه که آب از آن وارد و خارج می‌شود و H اختلاف هد بالادست و پایین دست آب می‌باشد که در اینجا برابر است با ارتفاع سطح ثابت آب در بالای نمونه تا زیر نمونه.

تا تغییرات ارتفاع آب درون مخزن ناچیز شود و روی دبی پمپ تأثیر قابل توجهی نداشته باشد (شکل ۶-ب). پس از اندازه‌گیری اختلاف هد دو سر نمونه، که در واقع برابر است با ارتفاع ثابت آب تا سطح زیرین نمونه، با استفاده از اندازه‌گیری حجم آب ورودی از پمپ در زمان معین، دبی ورودی محاسبه می‌شود و طبق رابطه (۱) نفوذپذیری محاسبه می‌شود:



شکل ۶- الف) نحوه آب‌بندی کردن نمونه (آزمایش نفوذپذیری) ب) نحوه انجام آزمایش نفوذپذیری با هد ثابت



شکل ۷. نحوه انجام آزمایش درصد تخلخل

آزمایش تخلخل با ۹۰ نمونه استوانه‌ای و ۹۰ نمونه مکعبی انجام شده است. برای آزمایش نفوذپذیری، هر نمونه استوانه‌ای دو بار تحت آزمایش قرار گرفت تا خطای این آزمایش به حداقل برسد (۱۸۰ نتیجه نفوذپذیری). در آزمایش نفوذپذیری، به اندازه کافی به نمونه فرصت داده شده تا از ثابت بودن هد آب بالای آن اطمینان حاصل شود. برای محاسبه تخلخل، از روش استاندارد ASTM C1745/1754M استفاده شده است. ابتدا نمونه‌ها در گرمخانه کاملاً خشک شده و وزن خشک آنها (W2) به دست می‌آید. سپس، وزن نمونه‌های غوطه‌ور (W1) محاسبه می‌شود. به این منظور، از روش ارشمیدس استفاده شده است (شکل ۷). در نهایت، با استفاده از رابطه (۲)، درصد تخلخل محاسبه می‌شود:

$$A_t = \left( 1 - \frac{(w_2 - W_1)}{V * \rho_w} \right) * 100 \quad (2)$$



### ۳-۱. مقاومت

برای آزمایش مقاومت فشاری و کششی دو نیم شدن در سنین ۷ و ۱۴ روزه، برای هر نسبت مخلوط، به ترتیب از ۱۴ نمونه مکعبی و ۱۴ نمونه استوانه‌ای استفاده شده است. این آزمایش‌ها برای هر نسبت مخلوط با آب معمولی و آب مغناطیسی انجام شده است. با مشاهده و بررسی نحوه شکست نمونه‌ها مشخص گردید که نمونه‌های ساخته شده با آب مغناطیسی، یکنواخت و اکثراً از وسط نمونه به دو نیم تقسیم شده‌اند (شکل ۸). در صورتی که نمونه‌های ساخته شده با آب معمولی اکثراً به صورت نامنظم شکسته شده‌اند (شکل ۹).

در این رابطه،  $A_t$  درصد تخلخل،  $V$  حجم نمونه و  $\rho_w$  چگالی آب است. دو پارامتر دیگر قبلاً تعریف شده‌اند.

### ۳. تحلیل داده‌ها و نتایج

در این بخش، به بررسی و مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مقاومت، تخلخل و نفوذپذیری بتن‌ها پرداخته شده است. تخلخل همه نمونه‌ها محاسبه می‌شود. سپس، نمونه‌های مکعبی برای محاسبه مقاومت فشاری زیر جک قرار می‌گیرند. نمونه‌های استوانه‌ای پس از محاسبه تخلخل تحت آزمایش نفوذپذیری قرار می‌گیرند و در نهایت مقاومت کششی مستقیم آنها محاسبه می‌شود.



ب

الف

شکل ۸. شکست نمونه‌های ساخته شده با آب مغناطیسی (الف- ویره شده و ب- ویره نشده)



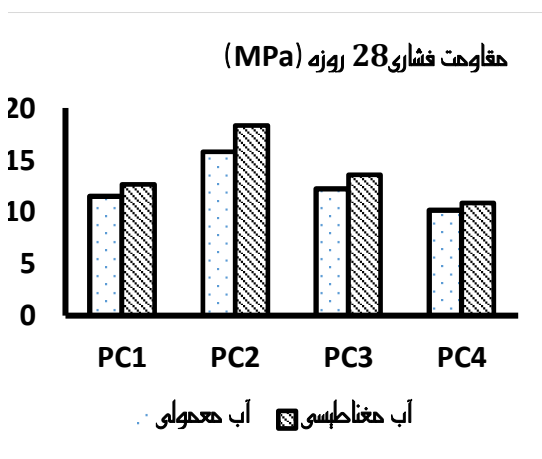
ب

الف

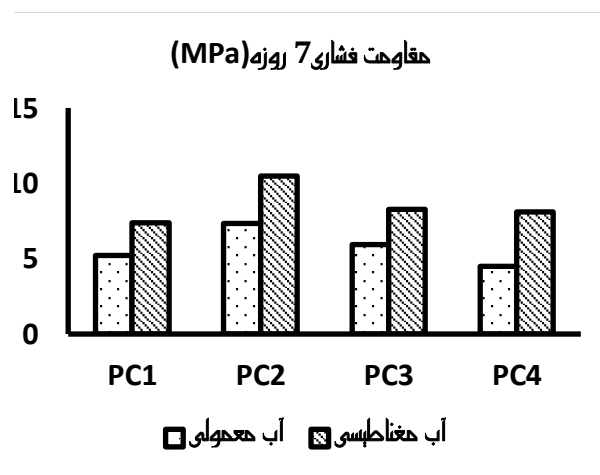
شکل ۹. شکست نمونه‌های متراکم و غیرمتراکم با آب معمولی (الف- ویره شده و ب- ویره نشده)

مغناطیسی ارائه شده است. در نمونه‌های ۷ روزه با آب مغناطیسی، حدود ۳۶-۴۳ درصد افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های ساخته شده با آب معمولی مشاهده شده است که بیشترین تأثیر مربوط به نسبت مخلوط ۲ با تخلخل ۲۷ درصد بود که کمترین درصد تخلخل را داشته است. این در حالی است که در نمونه‌های ۲۸ روزه این تغییر مقاومت فقط بین ۹ تا ۱۶ درصد بوده که باز هم بیشترین افزایش مقاومت مربوط به نسبت مخلوط ۲ بوده است.

علت این رفتار، نشست ملات در نمونه‌های ساخته شده با آب معمولی و تفاوت آشکار دانه‌بندی در ارتفاع استوانه است. در نمونه‌هایی که احتمال نشست بیشتر بوده است (به ترتیب از کم به زیاد، ۸-ب، ۸-الف، ۹-ب و ۹-الف)، این رفتار شدت بیشتری داشته است. تقریباً ۵۵ درصد نمونه‌های ساخته شده از آب معمولی شکستی مشابه شکل ۹-ب داشته‌اند. در شکل ۱۰ و جدول ۴، نتایج نهایی مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه برای نمونه‌های با آب معمولی و آب



(ب)



(الف)

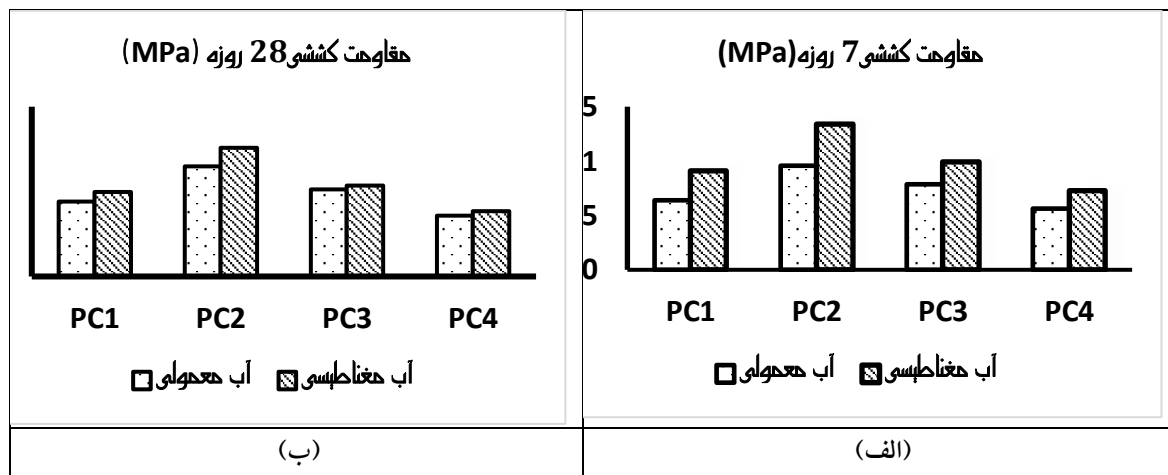
شکل ۱۰. میانگین مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه بتن متخلخل: (الف) آب معمولی و (ب) آب مغناطیسی

جدول ۴. نسبت مقاومت بتن‌ها با تغییر نوع آب و سن

نسبت مقاومت ۷ به ۲۸ روزه		نسبت مقاومت Pcm به Pc		مقاومت ۲۸ روزه (مگاپاسکال)		مقاومت ۷ روزه (مگاپاسکال)	
Pcm	Pc	۲۸ روزه	۷ روزه	Pcm	Pc	Pcm	Pc
۰/۵۸۳	۰/۴۵۳	۱/۱۰۰	۱/۴۱۶	۱۲/۶۵	۱۱/۴۹	۷/۳۸	۵/۲۱
۰/۵۷۲	۰/۴۶۵	۱/۱۶۱	۱/۴۲۹	۱۸/۳۳	۱۵/۷۸	۱۰/۴۹	۷/۳۴
۰/۶۱۰	۰/۴۶۸	۱/۱۱۳	۱/۳۹۵	۱۳/۵۹	۱۲/۲۱	۸/۲۹	۵/۹۴
۰/۷۴۸	۰/۴۴۱	۱/۰۶۷	۱/۸۰۸	۱۰/۸۳	۱۰/۱۵	۸/۱	۴/۴۸

درصد است. نتایج مقاومت کششی در شکل ۱۱ ارائه شده است. این نتایج در جدول ۵ خلاصه شده است. مشاهده می‌شود که افزایش مقاومت کششی نمونه‌های آب مغناطیسی ۷ روزه بین ۲۶ تا ۴۲ درصد و ۲۸ روزه بین ۴/۵ تا ۱۲ درصد است.

بعد از ساخت و نگهداری نمونه‌ها، در زمان اندازه‌گیری مقاومت آنها مشاهده شد که نمونه‌های ساخته شده با آب معمولی در سن ۷ روزه حدود ۴۴-۴۸ درصد مقاومت ۲۸ روزه خود را کسب کرده‌اند. این نسبت برای نمونه‌های ساخته شده با آب مغناطیسی حدود ۵۶-۶۱



شکل ۱۱. میانگین مقاومت کششی ۷ روزه و ۲۸ روزه بتن متخلخل با: الف) آب معمولی و ب) آب مغناطیسی

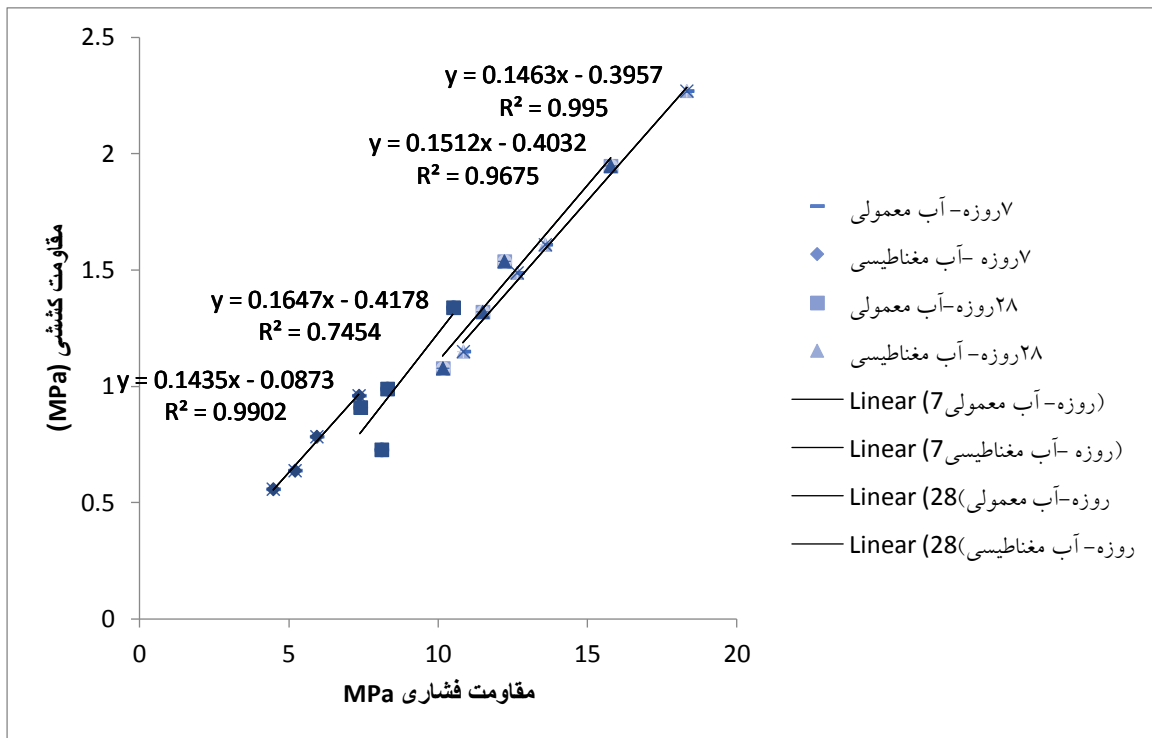
جدول ۵. مقایسه میانگین بهبود مقاومت تحقیق حاضر (بتن متخلخل) با سایر تحقیقات (بتن معمولی و بتن توانمند)

منبع	میانگین نسبت بهبود مقاومت (درصد)		مقاومت
	سایر تحقیقات	تحقیق حاضر	
رهگذر و زمانی، ۱۳۹۴	۲۰	۵۱	فشاری ۷ روزه
باراث و همکاران، ۲۰۱۶	۸		
رهگذر و زمانی، ۱۳۹۴	۱۳	۱۱	فشاری ۲۸ روزه
مانجوپریا و مالاتی، ۲۰۱۶	۲۵		
افشین و همکاران، ۲۰۱۰	۱۸		
مانجوپریا و مالاتی، ۲۰۱۶	۲۹،۵	۱۰	کششی مستقیم (۲۸ روزه)

مغناطیسی در سنین ۷ و ۲۸ روزه نشان می‌دهد. چنانچه در این شکل دیده می‌شود، مغناطیسی کردن آب، مقادیر مقاومت را تغییر داده، اما شیب منحنی رابطه مقاومت‌های کششی و فشاری تقریباً ثابت مانده است. چنانچه از شکل ۱۲ دیده می‌شود، در بتن متخلخل، با و بدون آب مغناطیسی، مقاومت کششی به طور تقریبی حدود ۱۲ درصد مقاومت فشاری است. این عدد با آنچه در مورد بتن معمولی متداول است همخوانی خوبی دارد. البته در مورد بتن معمولی، معمولاً منحنی توانی با توان کمتر از ۱ استفاده شده است (گادیک و همکاران، ۲۰۱۶). اما در بتن متخلخل، منحنی‌های خطی دقت قابل قبولی داشته‌اند.

در جدول ۵، روند تغییرات تقریباً مشابه تحقیقات دیده می‌شود. نسبت بیشتر مقاومت ۷ روزه را می‌توان به کم بودن مقاومت در بتن متخلخل و اثر اصلاحی زیاد آب مغناطیسی بر روان‌کنندگی (به علت عدم تراکم بتن) دانست. تأثیر بر مقاومت ۲۸ روزه با سایر تحقیقات شبیه است. در مورد کشش نیز رفتار مشابه فشار است. رهگذر و زمانی (۱۳۹۴) بیان کرده‌اند که آب مغناطیسی هیدراسیون را تسریع کرده و به همین جهت اثر افزایش مقاومت بیشتر می‌شود.

شکل ۱۲، روابط بین مقاومت کششی و فشاری را برای بتن‌های متخلخل ساخته شده با آب معمولی و آب



شکل ۱۲. رابطه بین مقاومت کششی و فشاری برای بتن‌های متخلخل در سنین مختلف با آب معمولی و مغناطیسی

این موضوع به علت کارایی بیشتر و در نتیجه کاهش درصد تخلخل نمونه‌های ساخته شده با آب مغناطیسی است. مقدار میانگین کاهش تخلخل در نمونه‌ها بین ۲/۸ تا ۷/۵ درصد است. کاهش تخلخل با وجود ثابت بودن دانه‌بندی سنگدانه‌ها، مقدار سیمان و آب، به علت بهبود عملکرد آب با مغناطیسی شدن می‌باشد.

### ۳-۲. تخلخل و نفوذپذیری

میانگین مقادیر نفوذپذیری با هد ثابت و تخلخل برای هر نسبت مخلوط در جدول ۶ داده شده است. جدول ۶ نشان می‌دهد که میزان نفوذپذیری نمونه‌های ساخته شده با آب مغناطیسی حدوداً ۸ تا ۱۵ سانتی‌متر در دقیقه نسبت به نمونه‌های ساخته شده با آب معمولی کمتر شده است.

جدول ۶. مقادیر میانگین نفوذپذیری و تخلخل نمونه‌های بتن متخلخل

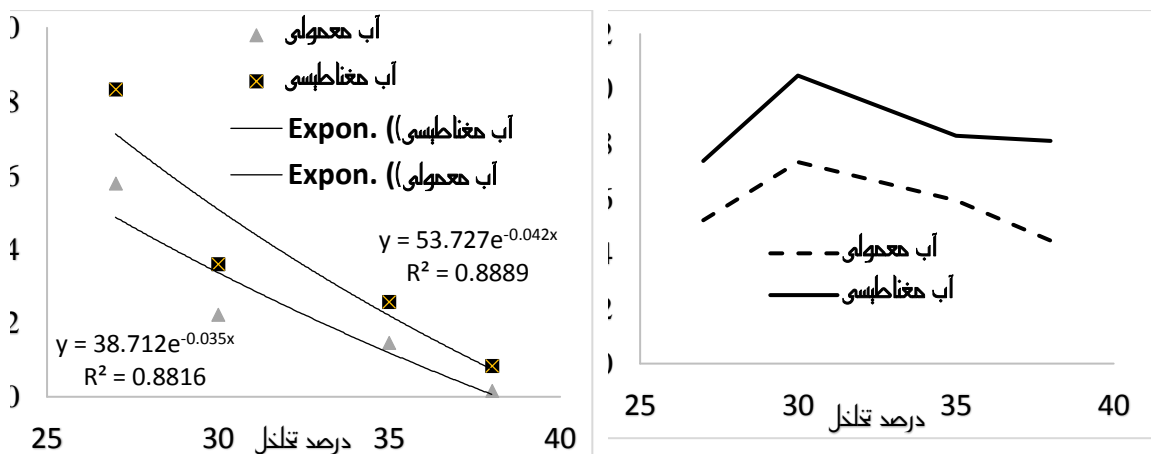
مشخصه	طرح								
	آب مغناطیسی					آب معمولی			
	Pcc	Pcm4	Pcm3	Pcm2	Pcm1	Pc4	Pc3	Pc2	Pc1
میانگین نفوذپذیری (cm/min)	۱۵/۲	۱۱۶	۷۵	۴۴	۹۹	۱۲۷	۸۷	۵۹	۱۰۷
میانگین تخلخل (%)	۲۵	۳۷/۵	۲۹	۲۵	۳۴	۳۹	۳۰	۲۷	۳۵

افزایش درصد تخلخل، کاهش مقاومت فشاری در تمامی نمونه‌ها با رفتاری تقریباً مشابه در سنین مختلف مشاهده می‌گردد. استفاده از آب مغناطیسی تا حدودی می‌تواند

در شکل ۱۲، تغییرات مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بر حسب درصد تخلخل نمونه‌های آب معمولی و آب مغناطیسی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با

در سن ۲۸ روزه حدود ۲ تا ۳ درصد افزایش تخلخل بدون کاهش مقاومت می‌تواند مد نظر باشد (شکل ۱۲-ب).

این کاهش را جبران نماید. بر این اساس، در سنین کم می‌توان افزایش حدود ۱۰ درصدی تخلخل را در این نمونه‌ها بدون کاهش مقاومت مشاهده کرد (شکل ۱۲-الف). البته این مسأله در سنین بالاتر قابل تعمیم نیست و



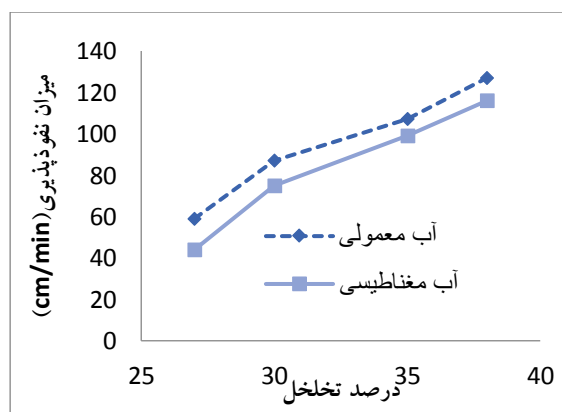
شکل ۱۲. الف) تغییرات مقاومت فشاری ۷ روزه و ب) ۲۸ روزه بر حسب درصد تخلخل

مشاهده می‌شود که وجود میدان مغناطیسی، ساختار فیزیکی آب را تغییر داده و کشش سطحی آب کاهش یافته و در نتیجه تجمع تعداد مولکول‌ها از ۱۳ مولکول به ۵ یا ۶ مولکول کاهش پیدا می‌کند. این تغییرات باعث افزایش روانی مخلوط بتن و کاهش آب مورد نیاز می‌شود و در نتیجه تسریع هیدراسیون سیمان موجب بالا رفتن مقاومت فشاری بتن خصوصاً در سنین کم می‌شود.

در شکل ۱۳، تغییرات نفوذپذیری بر حسب درصد تخلخل نمونه‌های آب معمولی و آب مغناطیسی ارائه شده است. چنانچه انتظار می‌رود، با افزایش درصد تخلخل، نفوذپذیری افزایش یافته است. میزان نفوذپذیری در نمونه‌های آب معمولی بیشتر از نمونه‌های آب مغناطیس می‌باشد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

- در این پژوهش، تأثیر آب مغناطیسی شده تحت تأثیر آهنربا با قدرت ۱/۲ تسلا بر خواص بتن متخلخل مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتایج این تحقیق، آب مغناطیسی به طور مؤثر کارایی بتن را افزایش می‌دهد که این موضوع در موارد زیر انعکاس یافته است:
- کاهش تخلخل نمونه‌ها تا ۷/۵ درصد دیده شده است.
  - وزن مخصوص بتن را می‌توان با استفاده از آب مغناطیسی تقریباً ۳/۵ درصد افزایش داد.



شکل ۱۳. تغییرات نفوذپذیری بر حسب درصد تخلخل (۲۸ روزه)

- مقاومت فشاری با استفاده از آب مغناطیسی تا ۱۱ درصد افزایش می‌یابد.
- مقاومت کششی را می‌توان با آب مغناطیسی تا ۱۰ درصد افزایش داد.
- با حفظ نفوذپذیری مناسب برای عبور رواناب، با استفاده از آب مغناطیسی می‌توان مقدار تخلخل را تا ۷/۵ درصد کاهش داد.
- آب مغناطیسی می‌تواند نقش تسریع کننده کسب مقاومت را در بتن داشته باشد.
- تراکم تخلخل حدود ۱۰ درصد و نفوذپذیری را بیش از ۸۵ درصد کاسته است. با توجه به کاهش عمده نفوذپذیری، تراکم روشی مناسب برای افزایش مقاومت در بتن متخلخل روسازی نخواهد بود.
- با بالا بردن نسبت مقاومت به تخلخل بتن، بدون تحمیل هزینه اضافه ناشی از مواد افزودنی، می‌توان روسازی‌های کم‌ترافیک (مانند پارکینگ‌ها و خیابان‌های فرعی) را با استفاده از بتن متخلخل ساخت. این نتایج با نتایج سایر تحقیقات در سایر انواع بتن همخوانی دارد. افزایش روانی به همراه کاهش تخلخل حاصل از افزایش روانی، کاهش نفوذپذیری در اثر بهبود روانی و اصلاح چسبندگی با مراجع همخوانی دارد (مظلوم و میری، ۱۳۹۵). میزان افزایش روانی در بتن متخلخل بیش از بتن‌های معمولی است. افزایش مقاومت در مقایسه با بتن‌های معمولی بیشتر است. علت، اثر بهبود دهنده آب مغناطیسی در اصلاح روانی و چسبندگی در کاهش نفوذپذیری و در نتیجه افزایش مقاومت است. این افزایش مقاومت در سنین اولیه بیشتر است. علت تسریع در هیدراتاسیون سیمان به علت کاهش تجمع مولکولی آب (همانند اثر تسریع کننده‌ها) است. این یافته نیز با نتایج تحقیقات پیشین همخوانی دارد (رهگذر و زمانی، ۱۳۹۴). در نتایج مشاهده می‌شود که آب مغناطیسی نفوذپذیری را بهبود اساسی داده است. همچنین، شکل شکست نمونه‌ها در بتن‌های ساخته شده با آب معمولی و آب مغناطیسی تفاوت اساسی دارد. با کنار هم قرار دادن این دو یافته که با نتایج تحقیقات قبلی همخوانی دارد می‌توان نتیجه گرفت که توزیع بهتر خمیر در جسم بتن و عدم نشست خمیر باعث این مسأله شده است. نشست خمیر در بتن‌های ساخته شده با آب معمولی منجر به ناهمگنی استوانه و تولید شمایل شکست شکل‌های ۸- ب و ۹- ب شده است. حالت شدیدتر این مسأله در نمونه ویرنه خورده شکل‌های ۸- الف و ۹- الف مشاهده می‌شود. بنابراین، تغییر مد شکست نتیجه تأثیر آب مغناطیسی در همگن‌سازی نمونه‌ها است.

## ۵. مراجع

- امانی، ن. و نیکویی، ن. ۱۳۹۶. "ارائه مدل ارزیابی و مقایسه‌ای روسازی‌های بتن خودتراکم و متخلخل با رویکرد توسعه پایدار". کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر.
- تیموری، ا.، موسوی، س. ف.، کرمی، ح.، فرزین، س. و جواهری طهرانی، م. ۱۳۹۵. "بررسی آزمایشگاهی اثر اضافه کردن افزودنی‌های مختلف بر ویژگی‌های بتن متخلخل قابل کاربرد در سیستم رواناب شهری". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۲(۲): ۶۴-۵۱.
- دوست‌محمدی، م.، فرزین، س.، کرمی، ح. و موسوی، س. ف. ۱۳۹۷. "بررسی آزمایشگاهی تأثیر سبک‌دانه‌های طبیعی بر برخی خصوصیات فیزیکی روسازی بتن متخلخل و ارائه رابطه مقاومت فشاری بر حسب درصد تخلخل". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۴(۱): ۹۹-۸۷.
- رضایی‌فر، ا. و ابویسانی، ا. ۱۳۹۲. "بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر خواص و رفتار بتن". دومین کنفرانس ملی صنعت بتن، دانشگاه سمنان.

رضایی لری، ع. و حسنی، ا. ۱۳۹۷. "ارزیابی تأثیر سرباره مس در بهبود خصوصیات مخلوط‌های بتنی متخلخل". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۴(۴): ۵۳-۷۰.

رضانیانپور، ع. ا.، جوشقانی، ع. ر.، عطائی، ا. و گل رو، ا. ۱۳۹۴. "بهبودسازی طرح اختلاط روسازی‌های بتنی متخلخل با استفاده از روش تاگوچی". اولین کنفرانس ملی رویه‌های بتنی، ۹ و ۱۰ اردیبهشت، دانشگاه تربیت مدرس.

رهگذر، م. و زمانی، م. ۱۳۹۴. "عملکرد و خواص بتن با آب مغناطیسی". تحقیقات بتن، ۸(۱): ۸۵-۹۹.  
مظلوم، م. و میری، م. ۱۳۹۵. "اثر آب مغناطیسی بر روی مقاومت و روانی بتن‌های توانمند". نشریه مهندسی سازه و ساخت، ۳(۲): ۳۰-۴۱.

Abdel-Magid, T. I. M., Hamdan, R. M., Abdelgader, A. A. B. and Omer, M. E. A. 2017. "Effect of magnetized water on workability and compressive strength of concrete". Proc. Eng., 193: 494-500.

Afshin, H., Gholizadeh, M. and Khorshidi, N. 2010. "Improving mechanical properties of high strength concrete by magnetic water technology". Sci. Iran., 17(1): 74-79.

Ahmed, S. M. 2009. "Effect of magnetic water on engineering properties of concrete". J. Al-Rafidain Eng., 7(1): 71-82.

Bharath, S., Subraja, S. and Arun Kumar, P. 2016. "Influence of magnetized water on concrete by replacing cement partially with copper slag". J. Chem. Pharm. Sci., 9(4): 2791-2795.

Bormashenko, E. 2019. "Moses effect: Physics and applications". Adv. Colloid Interfac. Sci., 269: 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.04.003>.

Costa, F. B. P., Lorenzi, A., Haselbach, L. and Silva Filho, L. C. P. 2018. "Best practices for pervious concrete mix design and laboratory tests". Revista Ibracon de Estrut. Mater., 11(5): 1151-1159. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952018000500013>

Doostmohamadi, M., Karami, H., Farzin, S. and Mousavi, S. F. 2018. "Improving the performance of porous concrete composites using zeolite as a coarse grain". Mech. Adv. Compos. Struct., 5(2): 157-163. <https://doi.org/10.22075/macs.2018.13363.1131>

Ebrahimi Jouzdani, B. and Reisi, M. 2020. "Effect of magnetized water characteristics on fresh and hardened properties of self-compacting concrete". Constr. Build. Mater., 242: 118196.

Gaedicke, C., Torres, A., Huynh, K. C. and Marines, A. 2016. "A method to correlate splitting tensile strength and compressive strength of pervious concrete cylinders and cores". Constr. Build. Mater., 125: 271-278.

Jain, A., Laad, A., Singh, K. and Murari, K. 2017. "Effect of magnetic water on properties of concrete". Int. J. Eng. Sci. Comp., 7(5): 11864-11866.

Karam, H. and Al-Shamal, O. 2013. "Effect of using magnetized water on concrete properties". SCMT3 Conference, Kyoto, Japan.

Konda Reddy, B., Ghorpade, V. G. and Sudarsana Rao, H. 2014. "Influence of magnetic water on strength properties of concrete". Indian J. Sci. Technol., 7(10): 14-18.

Manjupriya, T. and Malathy, R. 2016. "Experimental investigation on strength and shrinkage properties of concrete mixed with magnetically treated water". Int. J. Eng. Adv. Res. Technol., 2(3): 1-5.

Pachideh, G., Gholhaki, M. and Moshtagh, A. 2019. "Performance of porous pavement containing different types of pozzolans". Int. J. Eng., 32(9): 1277-1283.

Shabalala, A. N. and Ekolu, S. O. 2019. "Quality of water recovered by treating acid mine drainage using pervious concrete adsorbent". Water SA, 45(4): 638-647.

Stepišnik, J. and Ardelean, L. 2016. "Usage of internal magnetic fields to study the early hydration process of cement paste by MGSE method". J. Magn. Reson., 272: 100-107.

Su, N. Wu, Y. H. and Mar, C. Y. 2000. "Effect of magnetic water on the engineering properties of concrete containing granulated blast furnace slag". Cement Concrete Res., 30(4): 599-605.

Su, N. and Wu, C. F. 2003. "Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete containing fly ash". Cement Concrete Compos., 25(7): 681-688.

Tawfic, Y. R. and Abdelmoez, W. 2013. "The influence of water magnetization on fresh and hardened concrete properties". Int. J. Civ. Eng. Technol., 4(6): 31-43.

Wang, Y., Wei, H. and Li, Z. 2018. "Effect of magnetic field on the physical properties of water". Results Phys., 8: 262-267.

بررسی آزمایشگاهی تأثیر آب مغناطیسی بر خواص بتن متخلخل تازه و سخت شده

Xu, G. 2018. "Environmentally friendly pervious concrete made of 100% fly ash binder and enabled by graphene oxide". Doctoral Dissertation, Washington State University.