

## ارزیابی خواص مهندسی بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی و زئولیت طبیعی

رحمت مدن دوست<sup>۱\*</sup>، محمد حج فروش<sup>۲</sup>

۱- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران  
 ۲- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

## چکیده

هدف از این مقاله، ارزیابی خواص مهندسی بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی و درصد های مختلف زئولیت طبیعی می باشد. بدین منظور رفتار بتن خودتراکم در حالت تازه توسط آزمایش های جریان اسلامپ، زمان جریان ۵۰ سانتی متر ( $T_{50}$ )، زمان عبور بتن از قیف ۷، نسبت انسداد در جعبه L و شاخص پایداری چشمی بررسی شده است. خصوصیات مکانیکی و دوام بتن سخت شده با تعیین مقاومت های فشاری و کششی، مدول الاستیسیته و درصد جذب آب در سنین مختلف و تحت عمل آوری های مرطوب و خشک مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش های بتن تازه نشان داد که بکارگیری آب مغناطیسی و زئولیت طبیعی، موجب بهبود خواص رئولوژیکی و پایداری بتن خودتراکم می گردد. بنحوی که آب مغناطیسی قادر است جریان اسلامپ بتن را تا حدود ۳ درصد افزایش و ویسکوزیته پلاستیک مخلوط را بدون جداشدگی سنگدانه ها تا ۶ درصد کاهش دهد. همچنین حضور آب مغناطیسی و زئولیت می تواند خواص مکانیکی و دوام بتن خودتراکم را بهبود بخشد. بر این اساس، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی و ۲۰ درصد زئولیت به ترتیب به میزان ۴۲، ۱۲ و ۳۳ درصد در سن ۹۰ روز افزایش یافت. همچنین در همین اختلاط، میزان جذب آب بتن حدود ۴۸ درصد کاهش یافته است. در سن ۲۸ روز و تحت عمل آوری مرطوب، خواص مکانیکی بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی و ۲۰ درصد زئولیت شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته به ترتیب تا ۳۷، ۱۱ و ۳۰ درصد افزایش یافته است.

کلمات کلیدی: آب مغناطیسی، بتن خودتراکم، خواص مهندسی، زئولیت طبیعی، شرایط عمل آوری.

\*نویسنده مسئول: رحمت مدن دوست

پست الکترونیکی: rmadandoust@guilan.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰

## ۱- مقدمه

بتن خودتراکم بتن تازه‌ای است که با رفتاری مشابه مایع نیوتنی، می‌تواند تمام فضای قالب را بدون هرگونه لرزاننده خارجی و تنها در اثر وزن خود پر نماید. کاربرد عمده این نوع بتن در قسمت‌هایی از سازه با هندسه پیچیده و آرمان‌گذاری انبوه می‌باشد که متراکم کردن بتن در این نواحی با مشکلاتی روبروست. مفهوم بتن خودتراکم اولین بار در سال ۱۹۸۶ در پی مسئله دوام در سازه‌های بتنی و اینکه علت اصلی ضعف این سازه‌ها در عدم کیفیت بتن اجرایی است، پیشنهاد شد [۱]. نمونه اولیه این نوع بتن، در سال ۱۹۸۸ در دانشگاه توکیو و با اسلامپ بیشتر از ۶۲۰ میلی‌متر ساخته شد [۲]. از مزایای بتن خودتراکم می‌توان به افزایش سرعت اجرای بتن‌ریزی و در نتیجه کاهش زمان ساخت سازه [۳]، کاهش آلودگی صوتی ناشی از ویبره کردن و امکان ساخت سازه‌های بتنی ویژه، مانند بتن‌ریزی در زیر آب [۴] اشاره کرد. اگرچه ویژگی‌های بتن خودتراکم بسیار گسترده‌تر از بتن معمولی می‌باشد، لذا همچنان مقاومت و دوام، معیارهای اصلی موفقیت این بتن به شمار می‌روند.

اکثر تحقیقات در زمینه افزایش توانمندی بتن خودتراکم روی سنگدانه‌ها، سیمان مصرفی و افزودنی‌های مختلف متمرکز شده‌اند و تحقیقات اندکی در ارتباط با کیفیت و نوع آب مصرفی در بتن انجام شده است. آب اختلاط بتن از جمله مواردی است که در چارچوب آیین‌نامه‌های مختلف به کنترل خواص آن از جمله PH، ذرات معلق و ... پرداخته شده است، اما به خواص مولکولی آن توجه چندانی نگردیده است. آب مغناطیسی آبی است که با سرعت ثابت از میان میدان مغناطیسی قوی عبور می‌کند [۵]. مغناطیسی کردن آب از جمله روش‌هایی است که با تغییر در خواص مولکولی، می‌تواند موجب بهبود کیفیت آب و در نتیجه بهبود خواص مهندسی بتن گردد [۶]. آبی که از طریق گذراندن از میدان مغناطیسی به دست می‌آید، نه در ظاهر بلکه در ساختار مولکولی خود دچار دگرگونی‌هایی می‌شود [۷]. القاء میدان مغناطیسی روی مولکول‌های آب موجب قطبیده شدن آنها می‌گردد. یعنی مولکول‌های آب از ساختار نامنظم اولیه به حالت منظم رسیده و در یک راستا قرار می‌گیرند [۸]. همچنین القای میدان مغناطیسی روی مولکول‌های آب موجب می‌گردد که اجتماع آنها کوچک شده و فعالیت شیمیایی آب افزایش یابد [۹]. جوشی و کامات [۱۰] گزارش کردند که تأثیر میدان مغناطیسی بر پیوند هیدروژنی بین مولکول‌های آب موجب تغییراتی در خواص فیزیکی آب از جمله چگالی، کشش سطحی و هدایت الکتریکی می‌شود. حضور آب مغناطیسی در فرآیند هیدراتاسیون سبب می‌شود که ذرات سیمان به وسیله یک لایه تک مولکولی آب با چگالی و کشش سطحی کمتر احاطه شوند که در نتیجه با افزایش سرعت واکنش می‌توان میزان آب مصرفی را کاهش داد [۱۱-۱۲]. مطالعات دیگر نشان داده است که استفاده از آب مغناطیسی، مقاومت بتن در برابر آب‌انداختگی و یخ‌زدگی و همچنین مقاومت مکانیکی بتن را بهبود می‌بخشد [۱۳-۱۶]. افشین و همکاران [۱۷] در تحقیق خود بر روی خواص مکانیکی بتن با مقاومت بالا حاوی آب مغناطیسی نشان دادند که استفاده از آب مغناطیسی، مقدار اسلامپ و مقاومت فشاری بتن را به ترتیب به میزان ۴۵ و ۱۸ درصد افزایش می‌دهد. آنها همچنین گزارش کردند که در صورت بکارگیری آب مغناطیسی می‌توان به ازای اسلامپ و مقاومت فشاری یکسان، مقدار سیمان مصرفی را تا ۲۸ درصد کاهش داد. مطالعه در خصوص تأثیر آب مغناطیسی بر خواص تازه بتن حاوی مس باره نشان داد که کارایی بتن تا ۵۰ درصد افزایش می‌یابد [۱۸]. مطالعات دیگری توسط سو و همکاران در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۳ در مورد تأثیر آب مغناطیسی بر خواص بتن حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی [۱۹] و خاکستر بادی [۲۰] انجام شد. آنها نتیجه گرفتند که آب مغناطیسی با شدت میدان‌های ۱/۲-۰/۸ تسلا می‌تواند مقاومت فشاری بتن را ۱۹-۹ درصد افزایش دهد. همچنین اخیراً تأثیر آب مغناطیسی بر خواص بتن خودتراکم مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه آن شد که آب مغناطیسی می‌تواند میزان فوق روان‌کننده مورد نیاز بتن خودتراکم را با حفظ جریان اسلامپ تا ۴۵ درصد کاهش دهد [۲۱]. بنابراین آب مغناطیسی موجب بهبود خواص مکانیکی و کارایی بتن بدون استفاده از افزودنی‌های شیمیایی می‌شود و بدین طریق می‌توان از آلودگی‌های زیست محیطی جلوگیری کرد [۲۲].

استفاده از مصالح پوزولانی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی می‌تواند ضمن کاهش هزینه‌ها، کاهش آلودگی زیست محیطی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی، موجب بهبود خواص مقاومتی و دوام بتن شود [۲۳-۲۴]. ژئولیت طبیعی از جمله این پوزولان‌ها می‌باشد که در راستای نیل به این اهداف، در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. ذخایر ژئولیت در کشور ما فراوان است و می‌تواند به آسانی استخراج شود. در حالیکه دسترسی به سایر پوزولان‌ها مانند خاکستر بادی، دوده سیلیس، متاکائولن و سرباره کوره آهن‌گدازی به دلایل مختلف از جمله وارداتی بودن با مشکلاتی روبروست. مزیت اصلی ژئولیت در مقایسه با دیگر پرکننده‌ها، قیمت پایین و در دسترس بودن

آن می‌باشد. از طرفی فواید زیست محیطی زئولیت غیر قابل انکار است. والی‌پور و همکاران [۲۵] گزارش کردند که با جایگزینی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی سیمان با زئولیت در بتن معمولی، کاهش به ترتیب به میزان ۶۰/۳، ۶۹/۷ و ۶۴/۳ درصد در پتانسیل گرم شدن کره زمین ایجاد می‌شود. زئولیت حاوی مقادیر زیادی از  $\text{SiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  می‌باشد و می‌تواند با کلسیم هیدروکسید  $\text{Ca(OH)}_2$  حاصل از هیدراته شدن سیمان ترکیب شود و در نهایت با افزایش تولید ژل C-S-H و با بهبود ریز ساختار خمیر سیمان، موجب افزایش مقاومت بتن شود [۲۶]. نتیجه‌ای که دادستان و بای در خصوص بتن خودتراکم حاوی متاکائولن نیز گزارش کردند [۲۷]. تأثیر آب مغناطیسی و مصالح نانو نیز بر خواص مهندسی بتن خودتراکم مطالعه شده است. قدس [۲۸] گزارش کرد که مقاومت‌های فشاری و کششی بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی و نانوسیلیس در سنین اولیه بیشتر از سنین بالا می‌باشد. احمدی و شکرچی [۲۹] گزارش کردند که جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی سیمان با زئولیت، موجب افزایش به ترتیب به میزان ۱۴، ۱۶، ۲۳ و ۲۵ درصد در مقاومت ۲۸ روزه بتن می‌گردد. آنها همچنین نتیجه گرفتند که زئولیت، کارایی و جذب آب بتن را کاهش می‌دهد. بنحوی که هر چه درصد جایگزینی زئولیت در بتن افزایش یابد، تقاضای بتن به کاهنده شدید آب، جهت افزایش کارایی بالا می‌رود و این به دلیل وجود حفرات زیاد در ساختار زئولیت و سطح ویژه بالای آن می‌باشد [۳۰]. نتیجه‌ای که توسط چان و جی [۳۱]، والی‌پور [۳۲] و دوستی [۳۳] نیز گزارش شده است. اضافه کردن زئولیت به ساختار بتن به عنوان یک پرکننده عمل کرده و ضمن پر کردن خلل و فرج‌های بتن می‌تواند موجب افزایش چگالی و دوام بتن گردد که این موضوع در مطالعه جلال و همکاران [۳۴] در خصوص دوده سیلیس نیز اشاره شده است.

با توجه به این که تاکنون مطالعات محدودی در زمینه تأثیر آب مغناطیسی بر خواص بتن خودتراکم انجام شده است و از طرفی به نظر می‌رسد، مصالح پوزولانی نظیر زئولیت طبیعی بتواند بر عملکرد آب مغناطیسی در مخلوط‌های خودتراکم تأثیر گذار باشد، در مطالعه حاضر، تأثیرات آب مغناطیسی و زئولیت بر خواص مهندسی بتن خودتراکم بررسی شده است. انتخاب شدت میدان بهینه و درصدهای جایگزینی زئولیت بر اساس مطالعات گذشته و طرح‌های آزمایشگاهی اولیه صورت گرفته است. بر این اساس، خواص بتن تازه خودتراکم بوسیله آزمایش‌های جریان اسلامپ، زمان جریان ۵۰ سانتی‌متر ( $T_{50}$ )، زمان عبور بتن از قیف ۷، نسبت انسداد در جعبه L و شاخص پایداری چشمی بررسی گردید. خواص بتن سخت شده با تعیین مقاومت‌های فشاری و کششی (شکافت نمونه استوانه‌ای)، مدول الاستیسیته استاتیکی و درصد جذب آب در سنین ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز و تحت شرایط عمل‌آوری مرطوب و خشک مورد ارزیابی قرار گرفت.

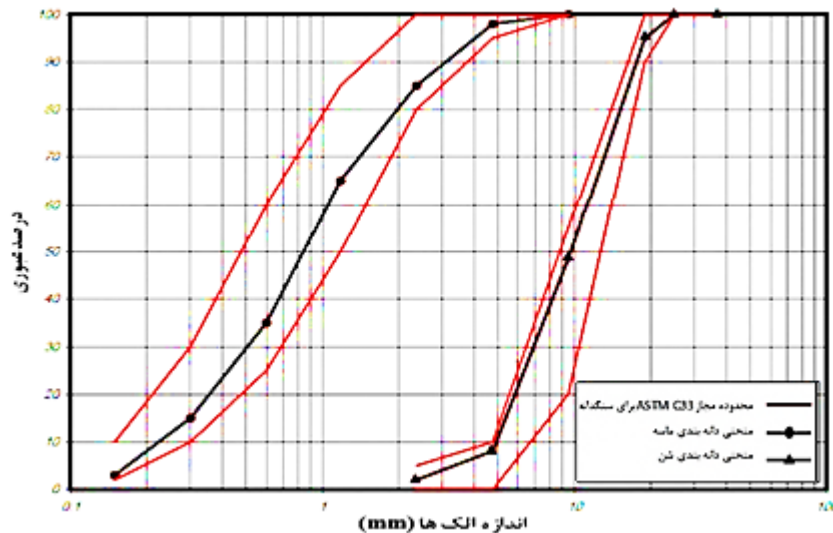
## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح مورد استفاده

در مطالعه حاضر، از سیمان پرتلند تیپ ۲ و زئولیت طبیعی با وزن‌های مخصوص به ترتیب ۳/۱۵ و ۲/۱۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب به عنوان مواد سیمانی استفاده شد. در جدول ۱، مشخصات شیمیایی این مصالح ارائه می‌شود. مصالح درشت‌دانه از نوع شکسته با حداکثر قطر اسمی ۱۹ میلی‌متر، وزن مخصوص ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و میزان جذب آب ۱/۰۱ درصد و مصالح ریزدانه شامل ماسه رودخانه‌ای با وزن مخصوص ۲/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب و میزان جذب آب ۵/۲۸ درصد می‌باشد. نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی و محدوده مجاز آیین‌نامه‌ای در شکل ۱ ارائه شده است. آب مورد استفاده در چرخه اختلاط بتن، به دو صورت آب مغناطیسی با شدت میدان ۰/۸ تسلا و آب شرب شهری می‌باشد. در تمامی اختلاط‌ها به منظور رسیدن به حد روانی مورد نیاز EFNARC [۳۵] از کاهنده شدید آب بر پایه کربوکسیلات با وزن مخصوص ۱/۱۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب مطابق استاندارد ASTM C494 [۳۶] استفاده شده است.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی سیمان و زئولیت.

ترکیبات شیمیایی	سیمان (%)	زئولیت (%)
SiO <sub>2</sub>	۲۲/۴۵	۶۶/۵
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴/۸۵	۱۱/۸۱
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۹۵	۱/۳
CaO	۶۴/۸۶	۳/۱۱
MgO	۰/۸	۰/۷۲
SO <sub>3</sub>	۰/۸۵	-
K <sub>2</sub> O	۰/۵۱	۳/۱۲
Na <sub>2</sub> O	۰/۲۵	۲/۰۱



شکل ۱: نمودار دانه بندی مصالح سنگی.

## ۲-۲- نسبت‌های اختلاط و روش آزمایش

به منظور دستیابی به اهداف این مطالعه، چهار اختلاط متفاوت شامل بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی و درصد‌های مختلف زئولیت (۵-۲۰ درصد وزنی مواد سیمانی) با نام‌های NZ5، NZ10، NZ15 و NZ20 طراحی گردید. دو اختلاط مینا نیز با آب معمولی (NW) و آب مغناطیسی (MW) و بدون حضور زئولیت ساخته شده است. در تمامی اختلاط‌ها، میزان کل مواد سیمانی ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۳۷ می‌باشد. جزئیات اختلاط نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. جهت ساخت نمونه‌ها، ابتدا شن و ماسه به مدت ۳۰ ثانیه در بتونیر مخلوط شدند. سپس نصف آب مصرفی به مدت ۱ دقیقه به بتونیر اضافه گردید. پس از این مرحله، بتونیر به مدت ۱ دقیقه خاموش شد تا سنگدانه‌ها آب لازم را جذب نمایند. سپس سیمان و زئولیت اضافه شده و ۱ دقیقه دیگر اختلاط انجام گردید. در حالیکه بتونیر به مدت ۳ دقیقه روشن بود، مابقی آب مصرفی و ماده افزودنی کاهنده شدید آب به مخلوط اضافه گردید. این روند مشابه روش اختلاط خیاط و همکاران [۳۷] برای تولید بتن خودتراکم می‌باشد. بتن‌های ساخته شده ابتدا تحت آزمایش‌های بتن تازه قرار گرفته و سپس به منظور تعیین مقاومت فشاری و میزان جذب آب بر اساس استاندارد ASTM C642 [۳۸] در قالب‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری و جهت تعیین مقاومت کششی و مدول الاستیسیته استاتیکی در قالب‌های استوانه‌ای ۱۵×۳۰ سانتی‌متری به ترتیب مطابق استاندارد ASTM C496 [۳۹] و ASTM C469 [۴۰] قالب گیری شدند. تمامی نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و تا سن

آزمایش، نیمی از آنها در داخل آب با دمای  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  و نیمی دیگر در محیط آزمایشگاه به منظور تحقق عمل آوری خشک نگهداری شدند. در شرایط مرطوب، نمونه‌های بتنی ساخته شده یک روز پس از قالب گیری از قالب باز شد و در زیر آب تا سن آزمایش نگهداری می‌شوند و پس از بیرون آوردن و خشک کردن تحت آزمایش قرار می‌گیرند. در شرایط خشک، نمونه‌ها پس از قالب برداری تا سن آزمایش در محیط آزمایشگاه و در شرایط خشک قرار می‌گیرند.

جدول ۲: جزئیات طرح‌های اختلاط.

شماره طرح	نام اختلاط	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	زئولیت (NZ)		آب (kg/m <sup>3</sup> )	شن (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	کاهنده شدید آب (kg/m <sup>3</sup> )	آب/مواد سیمانی
			(%)	(kg/m <sup>3</sup> )					
۱	Ctrl(NW)	۴۰۰	۰	۰	۱۴۸	۷۷۸	۱۰۸۵	۵/۷۵	
۲	Ctrl(MW)	۴۰۰	۰	۰	۱۴۸	۷۷۸	۱۰۸۵	۳/۱۵	
۳	NZ5	۳۸۰	۵	۲۰	۱۴۸	۷۷۸	۱۰۷۴	۴/۲۰	۰/۳۷
۴	NZ10	۳۶۰	۱۰	۴۰	۱۴۸	۷۷۸	۱۰۷۴	۴/۶۵	
۵	NZ15	۳۴۰	۱۵	۶۰	۱۴۸	۷۸۰	۱۰۶۵	۵/۷۳	
۶	NZ20	۳۲۰	۲۰	۸۰	۱۴۸	۷۸۰	۱۰۵۵	۹/۸۸	

### ۳- نتایج آزمایش‌ها و تفسیر آنها

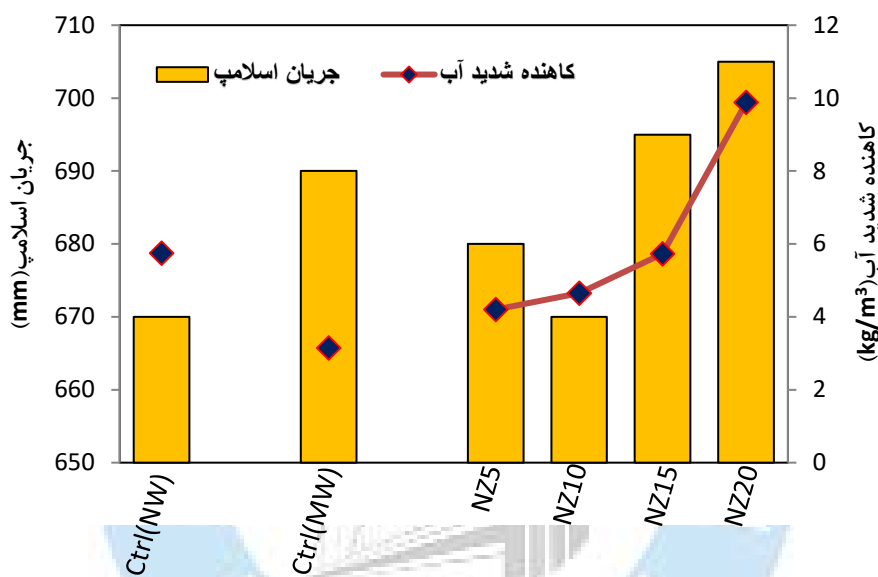
#### ۳-۱-۱- خواص بتن تازه خودتراکم

به منظور تأمین ویژگی‌های رئولوژیکی بتن خودتراکم، آزمایش‌های جریان اسلامپ، زمان جریان  $T_{50}$ ، زمان عبور بتن از قیف V، توانایی عبور (نسبت انسداد) در جعبه L و شاخص پایداری چشمی در فاز خمیری بتن انجام شد. در این مطالعه، تمامی نتایج بدست آمده از فاز خمیری، محدوده مجاز EFNARC [۳۵] برای پذیرش بتن خودتراکم را تأمین نمود. در نتیجه تمامی نمونه‌های ساخته شده از لحاظ خواص خودتراکمی بتن، مناسب ارزیابی می‌شوند.

#### ۳-۱-۱-۱- جریان اسلامپ

در شکل ۲، تغییرات میزان جریان اسلامپ و ماده افزودنی کاهنده شدید آب برای بتن خودتراکم ارائه شده است. تمامی اختلاط‌ها دارای جریان اسلامپ در محدوده ۷۰۵-۶۷۰ میلی‌متر با تنظیم مقدار کاهنده شدید آب از ۳/۱۵ تا ۹/۸۸ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشند. مطابق شیوه نامه EFNARC [۳۵]، بتن خودتراکم بر مبنای میزان جریان‌پذیری به سه رده SF1، SF2 و SF3 به ترتیب با جریان اسلامپ ۵۵۰-۶۵۰ میلی‌متر، ۶۶۰-۷۵۰ میلی‌متر و ۷۶۰-۸۵۰ میلی‌متر رده بندی و هر رده، برای کاربردهای توصیه شده‌ای منظور شده است. بر این اساس، همانگونه که از شکل ۱ مشاهده می‌گردد، تمامی اختلاط‌های این مطالعه در رده SF2 قرار می‌گیرند. این رده از بتن خودتراکم را می‌توان در اغلب کاربردهای معمول مهندسی مانند تیر، ستون و دیوارها بکار برد. مطابق شکل ۲، افزودن زئولیت، میزان کاهنده شدید آب

را برای نگه داشتن مخلوطها در محدوده جریان اسلامپ SF2، افزایش می‌دهد. این میزان در سطح جایگزینی ۲۰ درصد، به بیشترین مقدار خود و به بیش از ۲۱۳ درصد نسبت به نمونه کنترل با آب مغناطیسی می‌رسد. این در حالی است که در همین اختلاط میزان جریان اسلامپ، تنها بیش از ۲ درصد افزایش می‌یابد. این نتیجه در راستای مطالعات فنگ و همکاران [۴۱] و نجیمی و همکاران [۴۲] می‌باشد. این موضوع می‌تواند به دلیل سطح مخصوص ویژه بالای زئولیت نسبت به ذرات سیمان و در نتیجه جذب کاهنده شدید آب توسط زئولیت باشد. آب مغناطیسی و زئولیت موجب افزایش کاهنده شدید به میزان بیش از ۷۱ درصد نسبت به نمونه کنترل با آب معمولی می‌گردد. مطابق شکل ۲، آب مغناطیسی می‌تواند میزان جریان‌پذیری مخلوط خودتراکم را افزایش دهد. بر این اساس، استفاده از آب مغناطیسی موجب افزایش جریان اسلامپ به میزان ۳ درصد می‌گردد. دلیل آن می‌تواند آزادی عمل بیشتر مولکول‌های آب مغناطیسی در میان ذرات سیمان نسبت به آب معمولی باشد. این نتیجه در راستای مطالعات افشین و همکاران [۱۷] می‌باشد.



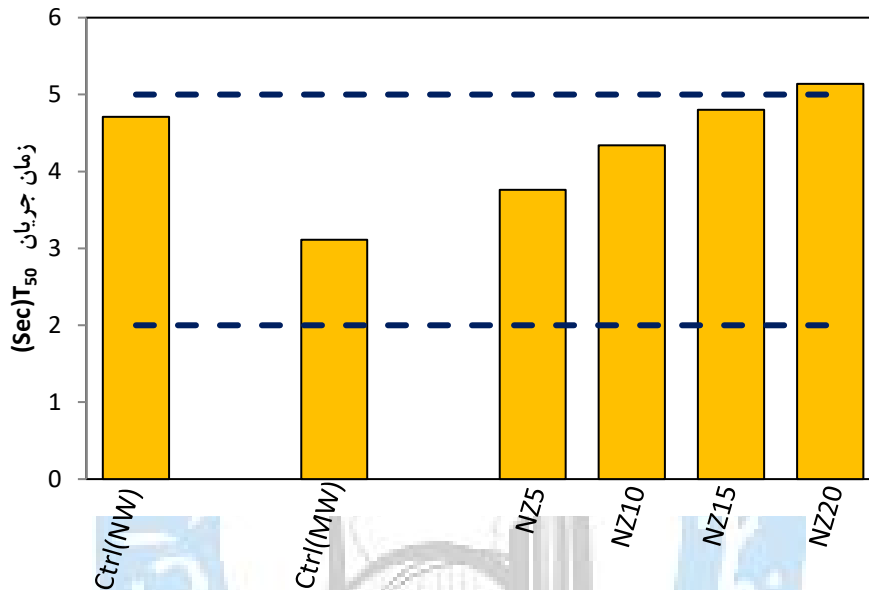
شکل ۲: تغییرات جریان اسلامپ و کاهنده شدید آب برای بتن خودتراکم.

## ۲-۱-۳- زمان جریان T<sub>50</sub> و زمان عبور بتن از قیف V

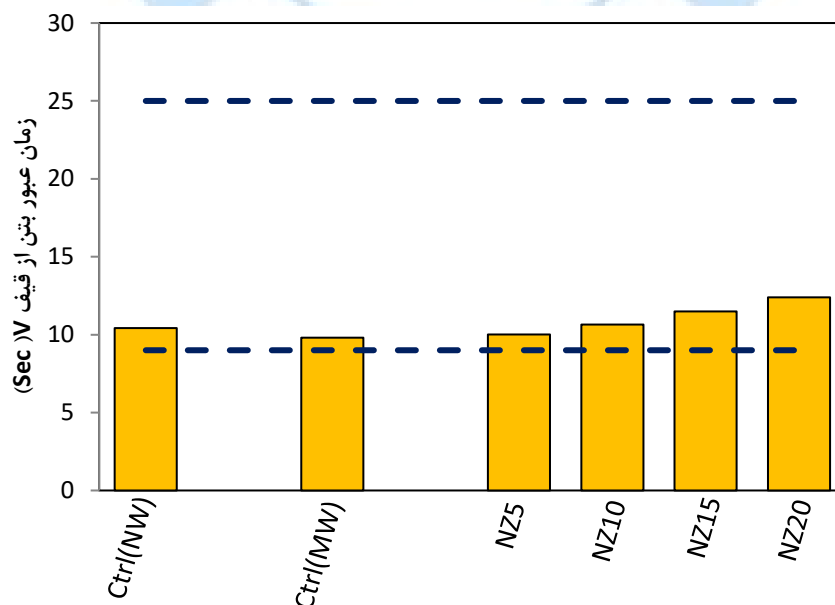
تغییرات زمان جریان T<sub>50</sub> برای تمامی اختلاطها در شکل ۳ ارائه شده است. این زمان برای طرح‌های متفاوت در محدوده ۵/۱۴-۳/۱۱ ثانیه می‌باشد. محدوده زمان جریان مناسب برای بتن خودتراکم ۲ تا ۵ ثانیه است. در این محدوده، ویسکوزیته مخلوط به اندازه‌ای است که مانع جداشدگی سنگدانه‌ها می‌شود [۴۳]. مطابق شکل ۳، زمان جریان T<sub>50</sub> با افزایش مقدار زئولیت، افزایش می‌یابد. این موضوع می‌تواند به دلیل قدرت بالای جذب آب زئولیت باشد که منجر به افزایش ویسکوزیته پلاستیک و کاهش جریان‌پذیری مخلوط می‌گردد. بیشترین زمان جریان T<sub>50</sub> مربوط به اختلاط NZ20 می‌باشد. این میزان نسبت به نمونه کنترل حاوی آب مغناطیسی و آب معمولی به ترتیب به بیش از ۶۵ و ۹ درصد افزایش یافته است. همچنین از شکل ۳ مشاهده می‌گردد که آب مغناطیسی می‌تواند زمان جریان مخلوط را به میزان ۳۴ درصد کاهش دهد.

زمان عبور بتن از قیف V برای اختلاطهای مختلف در شکل ۴ نمایش داده شده است. این زمان برای تمامی طرح‌ها، روندی مشابه زمان جریان T<sub>50</sub> دارد. زمان عبور مخلوطها از قیف V، در محدوده ۹/۸-۱۲/۳۹ ثانیه می‌باشد. محدوده مناسب زمان عبور بتن از قیف V برای بتن خودتراکم ۹ تا ۲۵ ثانیه است. مطابق شکل ۴، اختلاط NZ20، دارای بیشترین میزان ویسکوزیته پلاستیک و به مقدار بیش از ۲۶

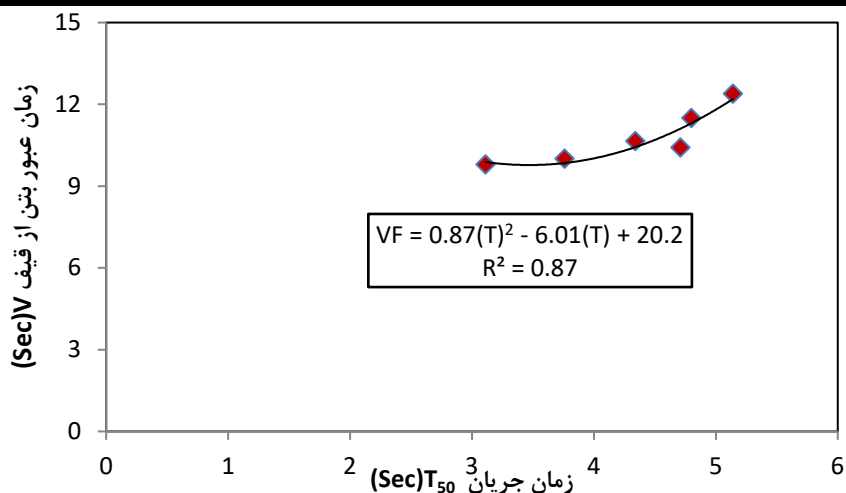
و ۱۸ درصد به ترتیب نسبت به نمونه کنترل با آب مغناطیسی و آب معمولی می‌باشد. این نتیجه در راستای مطالعه نجیمی و همکاران [۴۲] می‌باشد. آب مغناطیسی زمان عبور بتن خودتراکم از قیف V را به میزان ۶ درصد کاهش می‌دهد. بنابراین بر اساس شکل‌های ۳ و ۴، آب مغناطیسی با کاهش زمان جریان، ویسکوزیته بتن خودتراکم را کاهش و حضور ژئولیت، این زمان را افزایش می‌دهد. در شکل ۵، رابطه بین زمان جریان  $T_{50}$  و زمان عبور بتن از قیف V برای اختلاط‌های مختلف بتن خودتراکم نشان داده شده است. در این رابطه، زمان عبور بتن خودتراکم از قیف V با VF و زمان جریان  $T_{50}$  با T نشان داده شده است. مطابق این شکل، رابطه بسیار مناسبی بین زمان عبور بتن از قیف V و زمان جریان  $T_{50}$  وجود دارد. این رابطه توسط معادله درجه دوم و با ضریب همبستگی بالایی تخمین زده شده است.



شکل ۳: تغییرات زمان جریان  $T_{50}$  برای بتن خودتراکم.



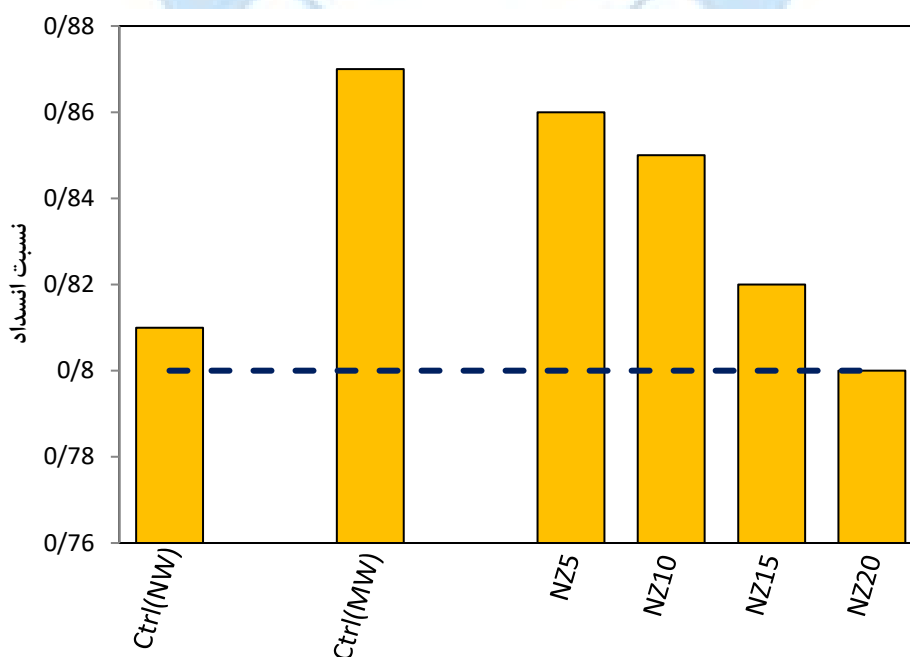
شکل ۴: تغییرات زمان عبور بتن از قیف V برای بتن خودتراکم.



شکل ۵: رابطه زمان عبور بتن از قیف V و زمان جریان  $T_{50}$  برای بتن خودتراکم.

### ۳-۱-۳- توانایی عبور (نسبت انسداد) در جعبه L

تأثیر آب مغناطیسی و درصدهای مختلف ژئولیت بر میزان نسبت انسداد بتن خودتراکم در شکل ۶ نشان داده شده است. EFNARC [۳۵] نسبت انسداد پایین تر از ۰/۸ را برای تولید بتن خودتراکم مجاز نمی‌داند. بنابراین تمامی اختلاط‌های طراحی شده، ضوابط پذیرش این موسسه را تأمین می‌کند. نسبت انسداد در تمامی طرح‌ها در محدوده ۰/۸-۰/۹۲ می‌باشد. مطابق شکل ۶، نسبت انسداد با افزایش مقدار ژئولیت کاهش می‌یابد. بر این اساس، اختلاط NZ20، کمترین توانایی عبور در جعبه L را داراست. همچنین آب مغناطیسی قادر است، میزان توانایی عبور بتن خودتراکم در جعبه L را بیش از ۸ درصد افزایش دهد.



شکل ۶: تغییرات نسبت انسداد (توانایی عبور) در جعبه L برای بتن خودتراکم.



## ۳-۱-۴ شاخص پایداری چشمی

جداشدگی سنگدانه‌ها و آب‌انداختگی بتن از جمله عواملی هستند که باید در حین ساخت و انتقال بتن کنترل شود. زیرا این عوامل به شدت بر مشخصه‌های مقاومت و دوام بتن تأثیر می‌گذارند. شاخص پایداری چشمی به عنوان ساده‌ترین روش برای ارزیابی پایداری بتن خودتراکم توسط ناظر انجام می‌شود. در تمامی اختلاط‌های این مطالعه، شاخص پایداری صفر یا یک بر اساس موسسه EFNARC [۳۵] می‌باشد که نشان از پایداری بالای مخلوط‌های ساخته شده دارد.

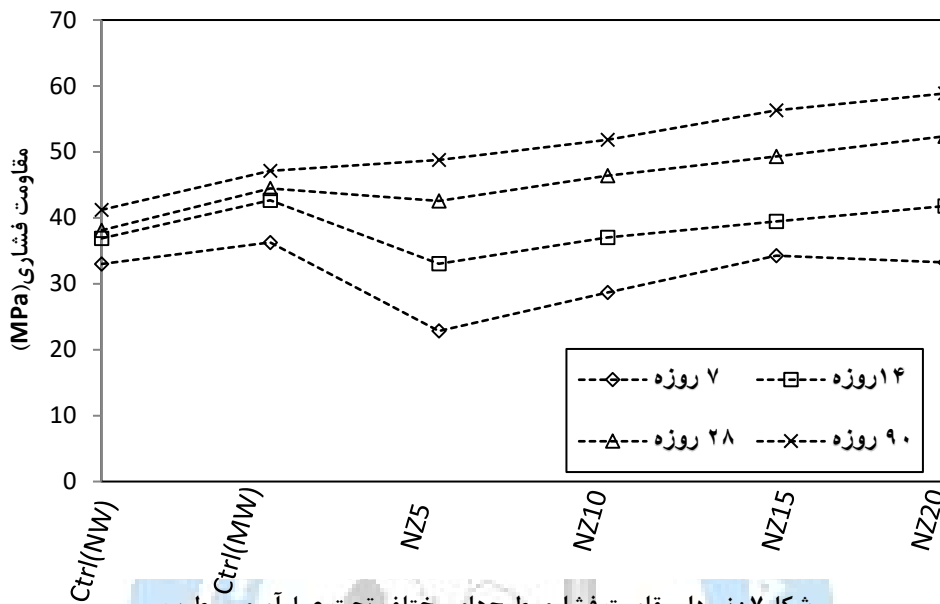
## ۳-۲- خواص بتن سخت شده خودتراکم

## ۳-۲-۱- مقاومت فشاری

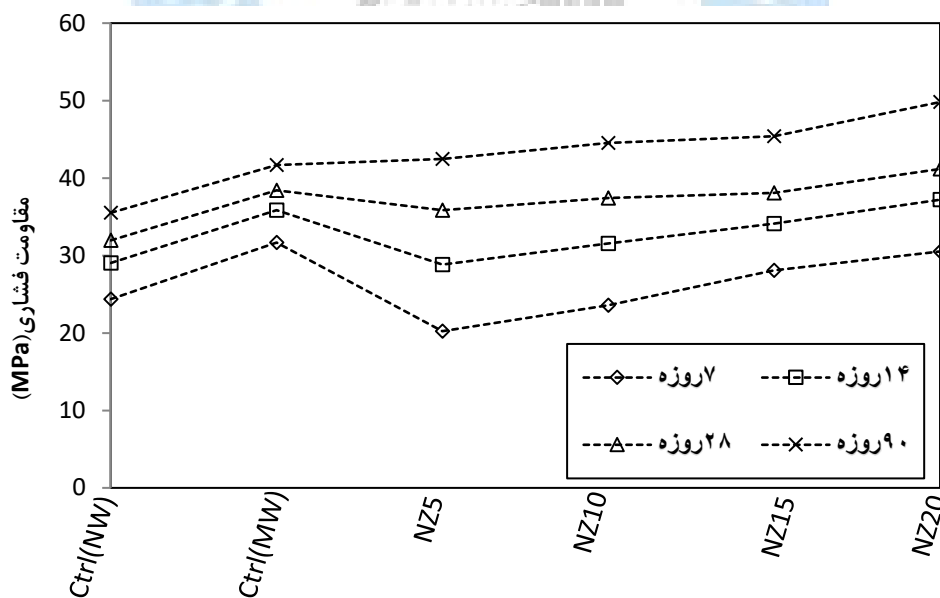
مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی و زئولیت طبیعی در سنین مختلف و تحت شرایط عمل‌آوری مرطوب و خشک به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. بر این مبنای مقاومت فشاری نمونه‌ها در حالت نگهداری مرطوب در محدوده  $22/83 - 58/86$  MPa متغیر است. این مقادیر تحت شرایط نگهداری خشک در محدوده  $20/49 - 23/81$  MPa نتیجه شده است. بنابراین عمل‌آوری مرطوب نمونه‌های بتن خودتراکم، مقاومت فشاری بیشتری نسبت به عمل‌آوری خشک نتیجه می‌دهد. مطابق شکل‌های ۷ و ۸، مقاومت فشاری نمونه‌ها با گذشت سن افزایش می‌یابد. بر این اساس، استفاده از زئولیت در بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی، موجب افزایش مقاومت فشاری بخصوص در سنین بالا می‌شود. اختلاط NZ20، کاهش در حدود ۹ درصد در مقاومت فشاری ۷ روزه نسبت به نمونه کنترل با آب مغناطیسی داشت. در حالیکه این مقدار در سن ۹۰ روز نه تنها جبران شد بلکه مقاومت فشاری حدود ۲۵ درصد افزایش یافت. این میزان تحت عمل‌آوری خشک بیش از ۱۹ درصد نتیجه شده است. علت این امر آن است که زئولیت به دلیل خاصیت پوزولانی خود، زمان هیدراتاسیون را طولانی کرده و با ایجاد یک جسم چگال‌تر موجب افزایش مقاومت فشاری بتن خودتراکم در سنین بالا می‌گردد. در سنین اولیه واکنش پوزولانی زئولیت فعال نشده و نمی‌تواند مانند سیمان به عنوان یک ماده چسباننده قوی، دانه‌های سنگی را در کنار یکدیگر قرار دهد. اما در سنین بالا، قدرت چسبانندگی آن افزایش یافته و می‌تواند جایگزینی مناسب برای بخشی از سیمان مصرفی گردد. این نتیجه در مطالعات رنجبر و همکاران [۳۰] برای بتن خودتراکم و والی‌پور و همکاران [۳۲] برای بتن معمولی حاوی زئولیت نیز مطرح شده بود. تأثیر همزمان آب مغناطیسی و زئولیت طبیعی در کسب مقاومت فشاری بتن خودتراکم چشمگیرتر است. بر این اساس، اختلاط NZ20، دارای مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه کنترل با آب معمولی به میزان بیش از ۴۲ درصد می‌باشد. همچنین آب مغناطیسی با شدت ۰/۸ تسلا می‌تواند مقاومت فشاری ۹۰ روزه بتن خودتراکم را به میزان بیش از ۱۴ و ۱۷ درصد تحت عمل‌آوری مرطوب و خشک افزایش دهد. در حضور نیروی مغناطیسی، مولکول‌های آب از هم جدا شده و در نتیجه این مولکول‌ها می‌توانند راحت‌تر در ذرات سیمان نفوذ کنند و هیدراتاسیون کامل‌تری به وجود آورند. موضوع دیگر آن است که لایه هیدراتاسیون ساخته شده توسط آب مغناطیسی در اطراف ذرات سیمان موجب می‌گردد تا مولکول‌های آب بتوانند سریعتر با ذرات سیمان واکنش شیمیایی ایجاد کنند. در حالیکه آب معمولی با ایجاد یک لایه ضخیم در اطراف ذرات سیمان، سرعت ادامه فرایند هیدراتاسیون را کاهش داده و واکنش موثری فراهم نخواهد شد. بر اساس مطالعات مختلف، بیشترین تأثیر شدت میدان در تولید آب مغناطیسی مربوط به ۰/۸ تسلا می‌باشد و میدان‌های بالاتر تأثیرات کمتری دارند. بنابراین حضور همزمان آب مغناطیسی و زئولیت موجب می‌گردد تا مقاومت فشاری بتن افزایش یابد. افشین و همکاران [۱۷] در تحقیق خود روی بتن با مقاومت بالا گزارش کردند که آب مغناطیسی مقاومت فشاری بتن را ۱۸ درصد افزایش می‌دهد. نتیجه‌ای که سو و همکاران [۱۹-۲۰] نیز گزارش کرده بودند. خاصیت پرکنندگی زئولیت نیز می‌تواند مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خودتراکم را افزایش دهد. زئولیت طبیعی با افزایش تولید ژل C-S-H و بهبود ریز ساختار خمیر سیمان، مقاومت فشاری بتن را افزایش می‌دهد.

همانطور که از شکل ۷ مشاهده می‌گردد، نمونه‌های حاوی آب مغناطیسی و ۵ درصد زئولیت در سنین ۷ تا ۲۸ روز روند کاهش مقاومت را

نشان می‌دهند، اما در سن ۹۰ روز این موضوع بر عکس می‌شود که نمایانگر آن است که در سنین بالا و حتی در حضور درصدهای پایین جایگزینی زئولیت، قدرت پوزولانی افزایش یافته و می‌تواند در دراز مدت تأثیرات بسزایی در روند کسب مقاومت بتن داشته باشد. هر چند که سهم اندک زئولیت از مواد سیمانی روند گیرش سیمان را کند می‌کند.



شکل ۷: نمودار مقاومت فشاری طرح‌های مختلف تحت عمل‌آوری مرطوب.

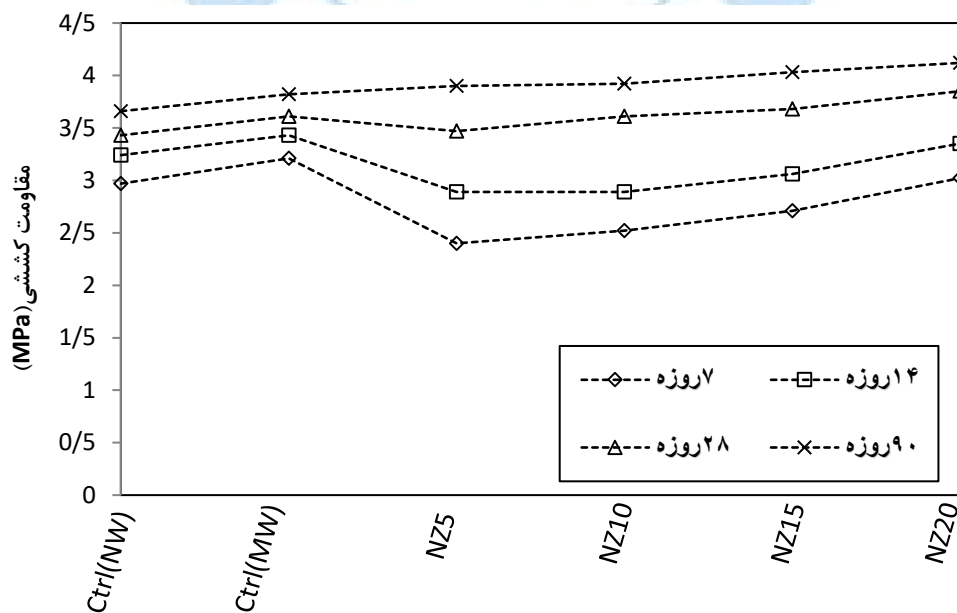


شکل ۸: نمودار مقاومت فشاری طرح‌های مختلف تحت عمل‌آوری خشک.

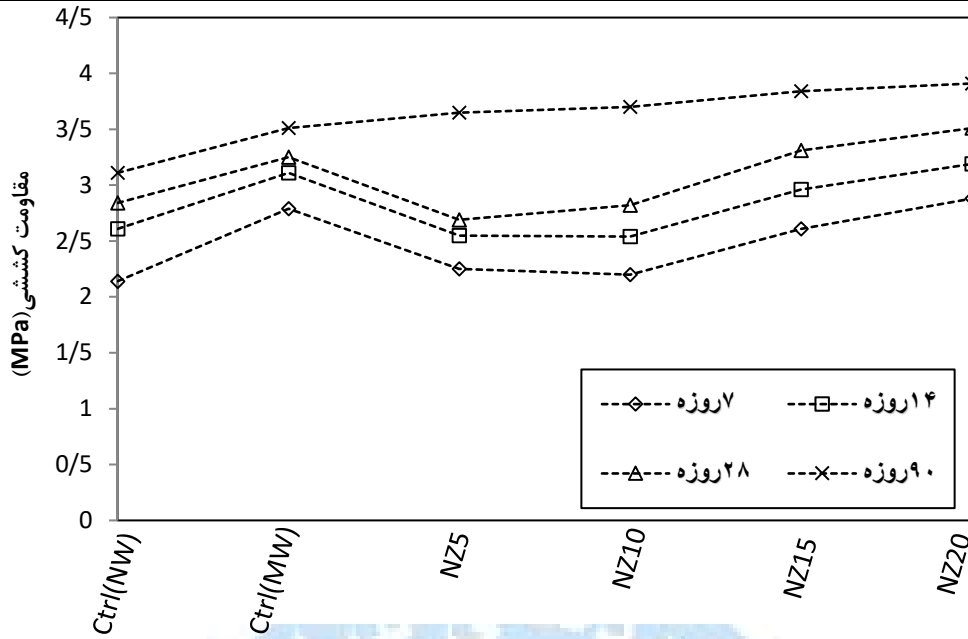
## ۲-۳- مقاومت کششی (شکافت نمونه استوانه‌ای)

مقاومت کششی نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی و زئولیت طبیعی در سنین مختلف و تحت شرایط عمل‌آوری مرطوب و خشک به ترتیب در شکل ۹ و ۱۰ ارائه شده است. مقاومت کششی بتن خودتراکم تحت عمل‌آوری مرطوب در محدوده ۲/۴-۴/۱۲ MPa می‌باشد. این مقادیر تحت شرایط نگهداری خشک در محدوده ۲/۳-۱۴/۹۱ MPa نتیجه شده است. بر این اساس، مقاومت کششی اختلاط NZ20 در سن ۹۰ روز و تحت شرایط عمل‌آوری مرطوب حدود ۱۲ درصد بیشتر از نمونه کنترل با آب معمولی می‌باشد. این میزان در شرایط عمل‌آوری خشک به بیش از ۷ درصد می‌رسد. همچنین آب مغناطیسی می‌تواند مقاومت کششی بتن خودتراکم را در سن ۹۰ روزه و تحت شرایط عمل‌آوری مرطوب و خشک به ترتیب به میزان ۴ و ۱۲ درصد افزایش دهد. بنابراین نرخ افزایش مقاومت کششی نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی و زئولیت نسبت به مقاومت فشاری کمتر است.

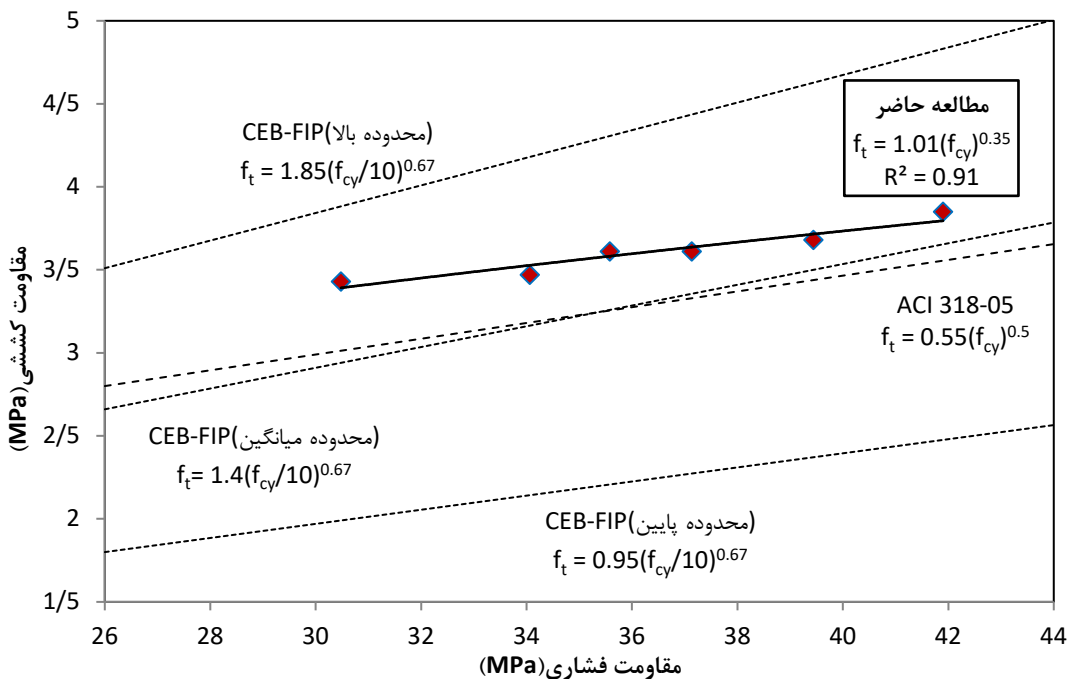
یکی از نقاط ضعف بتن، مقاومت کششی پایین‌تر آن نسبت به مقاومت فشاری می‌باشد. لذا ارزیابی و تعیین رابطه‌ای جهت پیش‌بینی مقاومت کششی بر مبنای مقاومت فشاری، همواره مورد توجه می‌باشد. بدین منظور در شکل ۱۱، تغییرات مقاومت فشاری استوانه‌ای طرح‌های مختلف در مقابل مقاومت کششی آنها در سن ۲۸ روزه و تحت شرایط عمل‌آوری مرطوب نمایش داده شده است. بر این مبنای می‌توان به رابطه توانی  $f_t = 1.01(f_{cy})^{0.35}$  با ضریب همبستگی مناسب  $R^2 = 0.91$  اشاره کرد. لازم به ذکر است که ابتدا با اعمال ضرایب مربوطه، مقاومت فشاری مکعبی به مقاومت فشاری استوانه‌ای تبدیل شده است. این ضرایب تبدیلی برای بتن خودتراکم توسط دومونه [۴۴] با گردآوری نتایج موجود در مطالعات مختلف ارائه شده است. همچنین در شکل ۱۱، روابط پیشنهادی آیین‌نامه‌های ACI 318-05 [۴۵] و CEB-FIP [۴۶] ارائه گردیده است. از شکل ۱۱ مشخص است که مقاومت کششی نمونه‌ها با افزایش مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌گردد که نتایج این مطالعه در محدوده توصیه شده توسط CEB-FIP [۴۶] قرار دارد. با اینحال استفاده از رابطه‌های ACI 318-05 [۴۵] و محدوده میانگین CEB-FIP [۴۶] جهت بررسی تغییرات مقاومت فشاری استوانه‌ای در مقابل مقاومت کششی نمونه‌های بتن خودتراکم، تخمین واقع بینانه‌تری از مقاومت کششی در یک مقاومت فشاری مشخص ارائه می‌دهد.



شکل ۹: نمودار مقاومت کششی طرح‌های مختلف تحت عمل‌آوری مرطوب.



شکل ۱۰: نمودار مقاومت کششی طرح‌های مختلف تحت عمل آوری خشک.

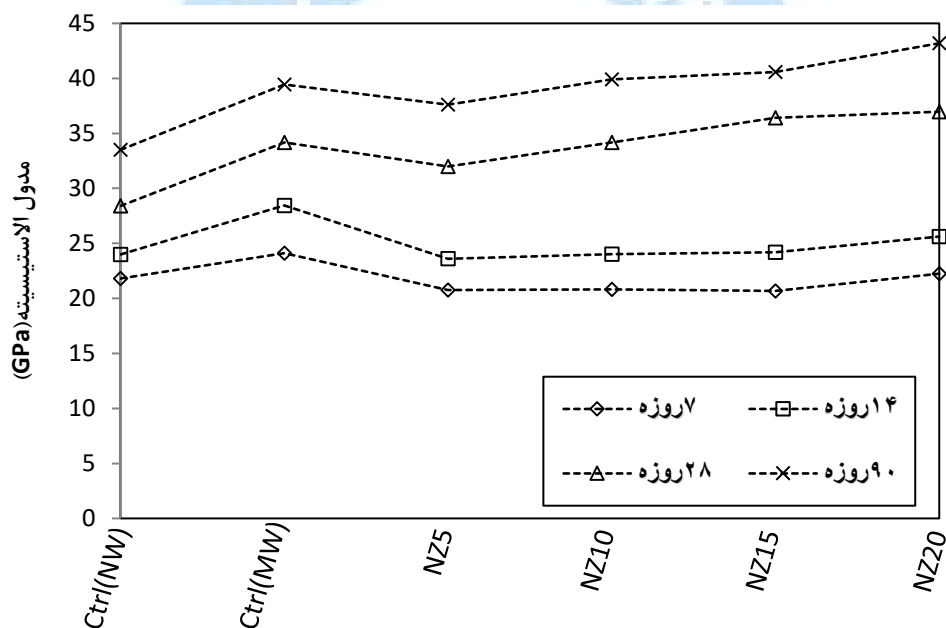


شکل ۱۱: رابطه مقاومت فشاری استوانه‌ای و مقاومت کششی طرح‌های مختلف بتن خودتراکم در سن ۲۸ روزه.

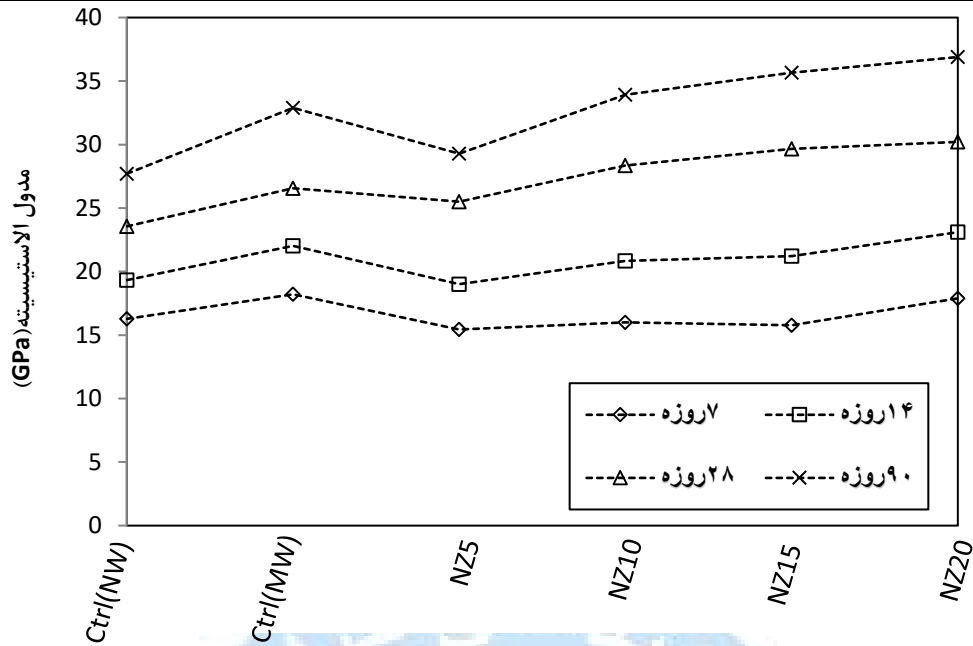
### ۳-۲-۳- مدول الاستیسیته استاتیکی

مدول الاستیسیته استاتیکی نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی و درصدهای مختلف زئولیت در سنین مختلف و تحت شرایط عمل‌آوری مرطوب و خشک به ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است. بر این اساس، مدول الاستیسیته نمونه‌های مختلف

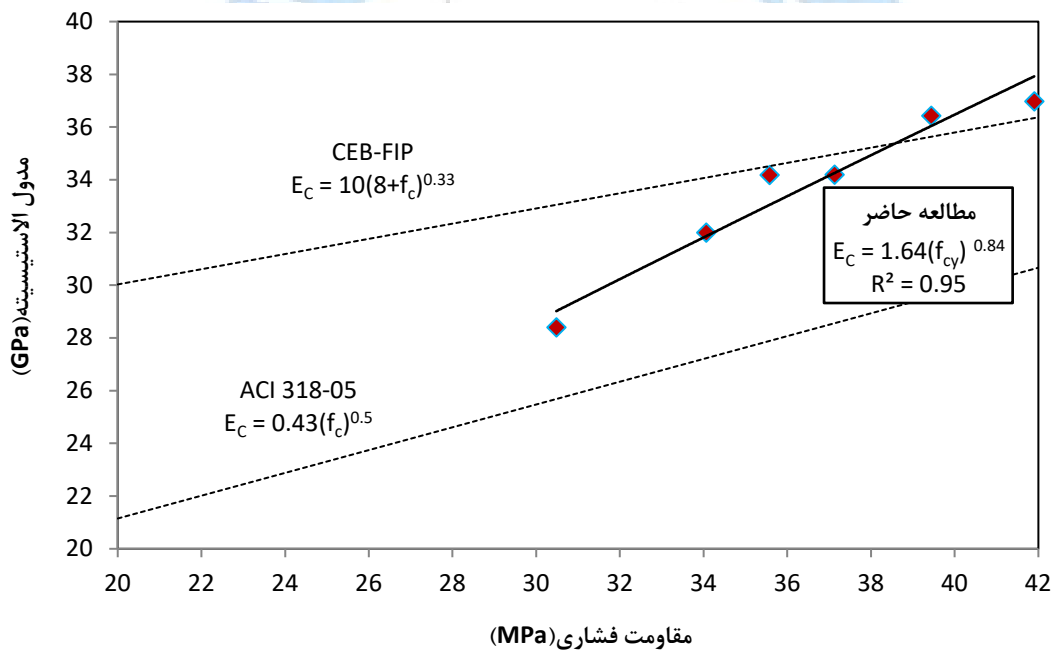
تحت عمل‌آوری مرطوب در محدوده  $43/19$  -  $20/68$  GPa می‌باشد. این مقادیر تحت عمل‌آوری خشک  $36/89$  -  $15/44$  GPa نتیجه شده است. بر این اساس، با گذشت زمان و سخت شدن نمونه‌ها، مدول الاستیسیته استاتیکی همانند مقاومت فشاری و مقاومت کششی افزایش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش میزان زئولیت در مخلوط، مدول الاستیسیته نمونه‌ها مشابه روند کسب مقاومت فشاری، افزایش می‌یابد. بر این اساس، اختلاط NZ20 در سن ۹۰ روز و تحت عمل‌آوری مرطوب و خشک به ترتیب بیش از ۱۲ و ۹ درصد افزایش را در مقایسه با نمونه کنترل حاوی آب مغناطیسی نشان می‌دهد. این مقادیر نسبت به نمونه کنترل با آب معمولی به ترتیب بیش از ۲۸ و ۳۳ درصد نتیجه شده است. بنابراین حضور آب مغناطیسی می‌تواند مدول الاستیسیته بتن خودتراکم را در سن ۹۰ روزه و تحت شرایط عمل‌آوری مرطوب و خشک به ترتیب بیش از ۱۷ و ۱۸ درصد افزایش دهد. شکل ۱۴، ارتباط بین مقاومت فشاری استوانه‌ای و مدول الاستیسیته استاتیکی نمونه‌های بتن خودتراکم را در سن ۲۸ روزه و تحت شرایط عمل‌آوری مرطوب نشان می‌دهد. بر این اساس، مدول الاستیسیته بتن خودتراکم با افزایش مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. بر این مبنا می‌توان به رابطه توانی  $E_c = 1.64(f_{cy})^{0.84}$  با ضریب همبستگی مناسب  $R^2 = 0.95$  اشاره کرد. همچنین این ارتباط با مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه‌های ACI 318-05 [۳۹] و CEB-FIP [۴۰] مقایسه شده است. مطابق شکل ۱۴، استفاده از آب مغناطیسی و زئولیت در بتن خودتراکم باعث می‌شود که مدول الاستیسیته در یک مقاومت فشاری مشخص نسبت به مقدار پیشنهادی آیین‌نامه ACI افزایش ولی نسبت به مقدار پیشنهادی آیین‌نامه CEB-FIP کاهش یابد. ویلانوا و همکاران [۴۷] گزارش کردند که رابطه ACI برای تعیین مدول الاستیسیته بتن خودتراکم قابل قبول می‌باشد.



شکل ۱۲: نمودار مدول الاستیسیته استاتیکی طرح‌های مختلف تحت عمل‌آوری مرطوب.



شکل ۱۳: نمودار مدول الاستیسیته استاتیکی طرح‌های مختلف تحت عمل آوری خشک.

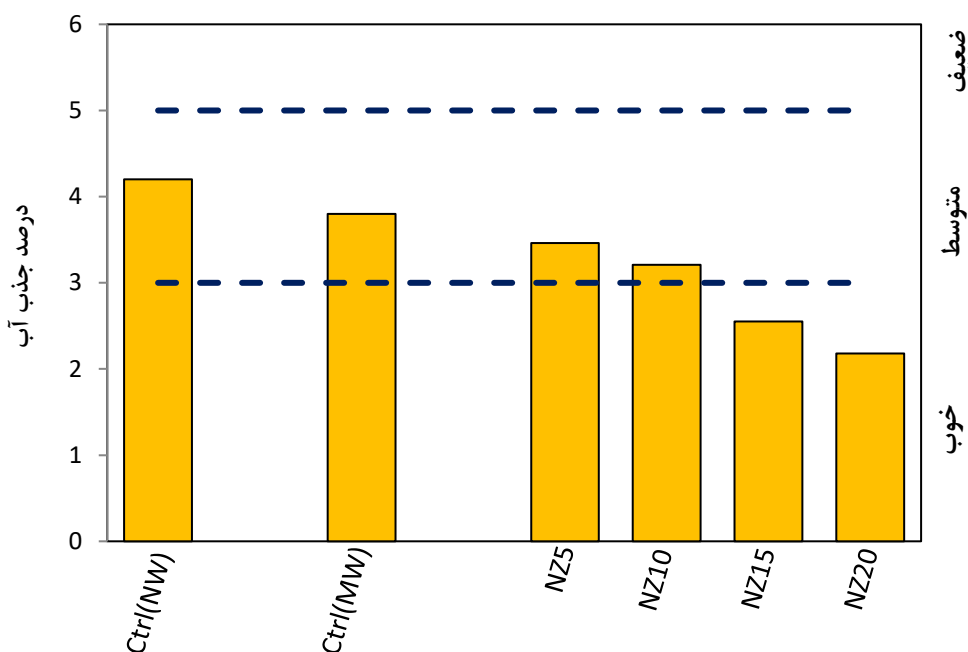


شکل ۱۴: رابطه مقاومت فشاری استوانه‌ای و مدول الاستیسیته استاتیکی طرح‌های مختلف در سن ۲۸ روزه.

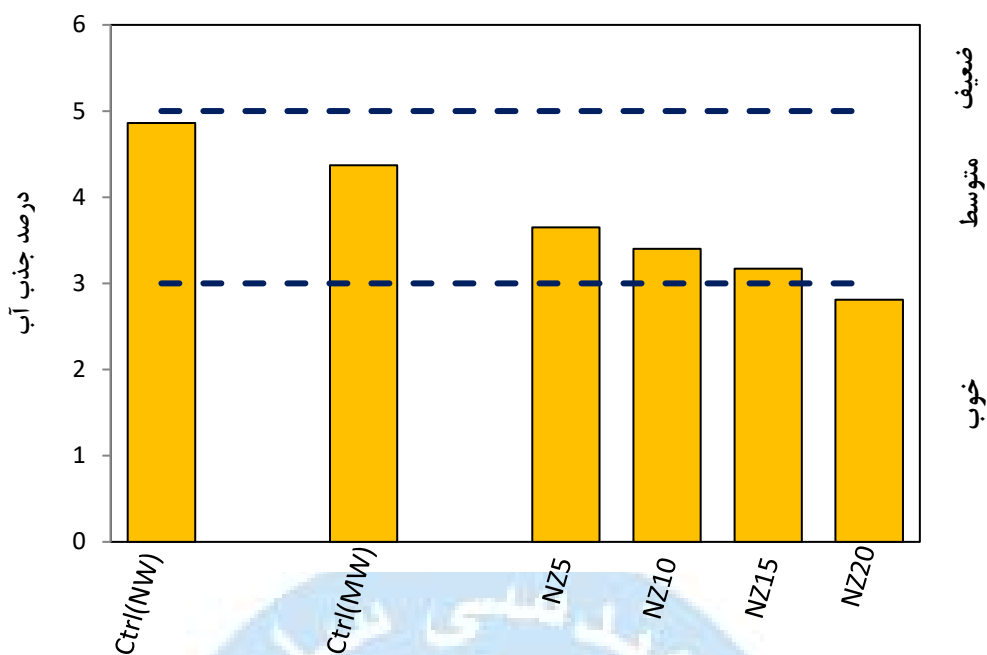
### ۳-۲-۳- درصد جذب آب

نتایج جذب آب نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی و درصد‌های مختلف ژئولیت در سنین ۲۸ و ۹۰ روز و تحت عمل آوری مرطوب و خشک به ترتیب در شکل‌های ۱۵ تا ۱۸ نشان داده شده است. جذب آب نمونه‌های بتن خودتراکم در سن ۲۸ روز و تحت شرایط

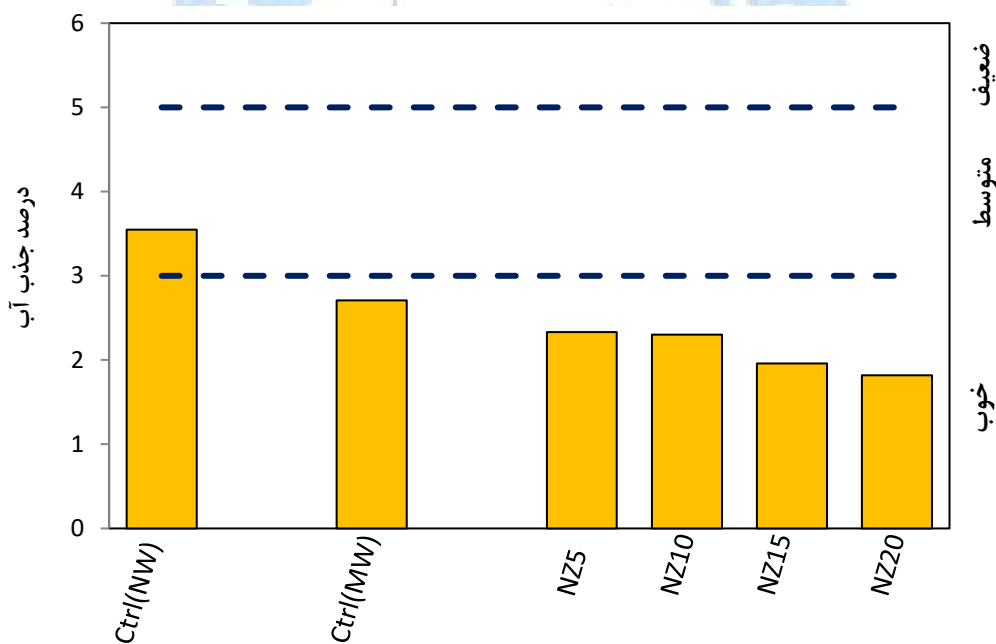
مرطوب و خشک به ترتیب در محدوده ۲/۱۸-۴/۲ و ۲/۸۱-۴/۸۶ می‌باشد. این مقادیر در سن ۹۰ روز و تحت شرایط مرطوب و خشک به ترتیب در محدوده ۳/۵۵-۱/۸۲ و ۴/۳۵-۲/۵۶ نتیجه شده است. توسط CEB [۴۶] کیفیت دوام بتن بر اساس میزان جذب آب به سه رده ضعیف، متوسط و خوب به ترتیب بر مبنای جذب آب ۵ درصد و بالاتر، بین ۳ تا ۵ درصد و کمتر از ۳ درصد تقسیم بندی می‌شود. بنابراین تمامی نمونه‌های بتن خودتراکم ساخته شده در این مطالعه، دارای رده کیفیتی خوب و متوسط هستند و می‌توانند به عنوان بتن با دوام بالا معرفی گردند. همانگونه که از شکل های ۱۵ تا ۱۸ مشاهده می‌گردد، آب مغناطیسی و ژئولیت می‌توانند میزان جذب آب بتن خودتراکم را کاهش دهند. بر این اساس، حضور همزمان آب مغناطیسی و ۲۰ درصد ژئولیت در بتن خودتراکم، بیشترین تأثیر را در کاهش جذب آب دارد. بر این اساس، اختلاط NZ20 می‌تواند میزان جذب آب بتن خودتراکم را در سن ۲۸ روزه و تحت عمل‌آوری مرطوب و خشک به ترتیب بیش از ۴۲ و ۳۵ درصد کاهش دهد. این مقادیر در سن ۹۰ روز و تحت عمل‌آوری مرطوب و خشک به ترتیب بیش از ۴۸ و ۳۶ درصد نتیجه شده است. این موضوع می‌تواند به دلیل کاهش تخلخل بتن در اثر تشکیل ژل سیلیکاتی در حضور پوزولان ژئولیت باشد. همچنین مطابق شکل‌های ۱۵ تا ۱۸، آب مغناطیسی به تنهایی می‌تواند میزان جذب آب بتن خودتراکم را حدود ۱۰ و ۲۳ درصد به ترتیب در سن ۲۸ و ۹۰ روزه کاهش دهد که دلیل آن می‌تواند افزایش مقاومت فشاری این نمونه‌ها در اثر کاهش فضای خالی در بتن باشد. افزایش سن در تمامی نمونه‌های بتن خودتراکم موجب کاهش میزان جذب آب می‌شود. بیشترین این میزان مربوط به اختلاط Ctrl(MW) می‌باشد که جذب آب ۹۰ روزه آن بیش از ۲۸ درصد کمتر از جذب آب ۲۸ روزه نتیجه شده است.



شکل ۱۵: درصد جذب آب بتن خودتراکم در سن ۲۸ روزه و تحت عمل‌آوری مرطوب.

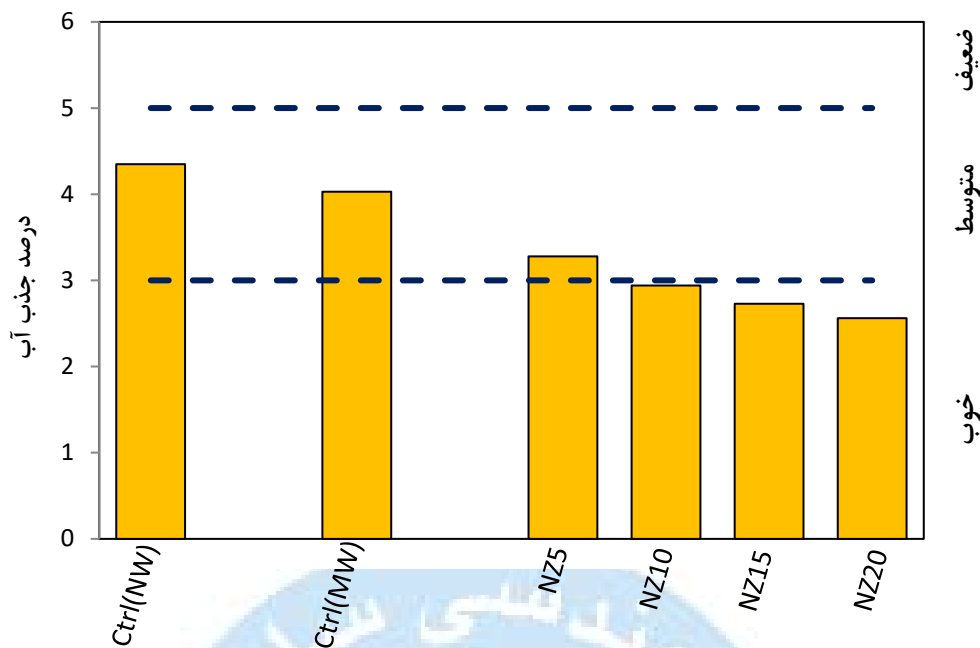


شکل ۱۶: درصد جذب آب بتن خودتراکم در سن ۲۸ روزه و تحت عمل آوری خشک.



شکل ۱۷: درصد جذب آب بتن خودتراکم در سن ۹۰ روزه و تحت عمل آوری مرطوب.





شکل ۱۸: درصد جذب آب بتن خودتراکم در سن ۹۰ روزه و تحت عمل آوری خشک.

#### ۴- نتیجه گیری

- در این مطالعه، تأثیرات آب مغناطیسی با شدت میدان ۰/۸ تسلا و ژئولیت طبیعی بر خواص بتن تازه و سخت شده خودتراکم تحت عمل آوری های مرطوب و خشک و در سنین مختلف مورد بررسی قرار گرفت که نتایج زیر قابل استنتاج می باشد.
- بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی با شدت میدان ۰/۸ تسلا و ژئولیت طبیعی دارای جریان اسلامپ در محدوده (SF2) می باشد و می توان آن را در اغلب کاربردهای معمول مهندسی مانند تیر، ستون و دیوار بکار برد.
  - حضور آب مغناطیسی با شدت میدان ۰/۸ تسلا موجب می گردد که تقاضای بتن خودتراکم به کاهنده شدید آب برای اختلاط حاوی ۲۰ درصد ژئولیت، از ۲۱۳ به ۷۱ درصد کاهش یابد.
  - آب مغناطیسی با شدت میدان ۰/۸ تسلا، ویسکوزیته بتن خودتراکم را که بوسیله زمان عبور بتن از قیف ۷ اندازه گیری می شود، به بیش از ۶ درصد کاهش می دهد. در حالیکه در حضور ۲۰ درصدی ژئولیت، این میزان حدود ۱۸ درصد افزایش می یابد.
  - آب مغناطیسی با شدت میدان ۰/۸ تسلا، میزان توانایی عبور بتن خودتراکم در جعبه L را بیش از ۸ درصد افزایش می دهد. در حالیکه این توانایی در حضور پوزولان ژئولیت کاهش می یابد.
  - اثر همزمان آب مغناطیسی با شدت میدان ۰/۸ تسلا و ۲۰ درصد ژئولیت، مقاومت فشاری بتن خودتراکم را در سن ۹۰ روز و تحت عمل آوری مرطوب حدود ۴۲ درصد افزایش می دهد. در حالیکه این میزان تحت عمل آوری خشک بیش از ۱۹ درصد نتیجه شده است.
  - مقاومت فشاری نمونه های بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی با شدت ۰/۸ تسلا با افزایش درصد ژئولیت و با گذشت سن افزایش می یابد. بر این اساس، نرخ رشد مقاومت فشاری نمونه ها در سنین ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب ۹ و ۳۷ درصد می باشد. این میزان در سن ۷ روز دارای اختلاف زیادی نیست.
  - در بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی با شدت میدان ۰/۸ تسلا و ۲۰ درصد ژئولیت، مقاومت کششی در سن ۹۰ روز و تحت

عمل‌آوری مرطوب حدود ۱۲ درصد افزایش یافته است. این میزان تحت شرایط عمل‌آوری خشک به بیش از ۷ درصد رسیده است.

- مقاومت کششی نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی با شدت ۰/۸ تسلا با افزایش درصد ژئولیت و با گذشت سن افزایش می‌یابد. بر این اساس، نرخ رشد مقاومت کششی نمونه‌ها در سنین ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب ۳ و ۱۱ درصد می‌باشد.
- در بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی با شدت میدان ۰/۸ تسلا و ۲۰ درصد ژئولیت، مدول الاستیسیته در سن ۹۰ روز و تحت عمل‌آوری مرطوب و خشک به ترتیب بیش از ۳۳ و ۲۸ درصد افزایش یافته است.
- مدول الاستیسیته نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی با شدت ۰/۸ تسلا با افزایش درصد ژئولیت و با گذشت سن افزایش می‌یابد. بر این اساس، نرخ رشد مدول الاستیسیته نمونه‌ها در سنین ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب ۶ و ۳۰ درصد می‌باشد.
- آب مغناطیسی با شدت میدان ۰/۸ تسلا می‌تواند مدول الاستیسیته بتن خودتراکم را در سن ۹۰ روز و تحت عمل‌آوری مرطوب و خشک به ترتیب بیش از ۱۷ و ۱۸ درصد افزایش دهد.
- درصد جذب آب نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی آب مغناطیسی با شدت میدان ۰/۸ تسلا و ۲۰ درصد ژئولیت دارای کمترین میزان می‌باشد. بر این اساس، میزان جذب آب بتن خودتراکم در سن ۹۰ روز و تحت عمل‌آوری‌های مرطوب و خشک به ترتیب تا ۴۸ و ۳۸ درصد کاهش یافته است. این میزان در سن ۲۸ روز به ترتیب تا ۴۲ و ۴۸ درصد نتیجه شده است.

## مراجع

- [1] Okamura, H., Ouchi, M. (2003). Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(1), 5-15.
- [2] Okamura, H., (1997). Self-compacting high performance concrete. *Concrete International*, 19(7), 50-54.
- [3] Self Consolidating Concrete. (2007), Reported by ACI Committee 237.
- [4] De Schutter, G., peter, J., Bartos, M., Domone, p., Gibbs, J. (2008). *Self-Compacting Concrete*. Whittles publishing.
- [5] Singh, S. and Naval, S. (2016). Effect of magnetic water on the engineering properties of self-compacting concrete using binary and ternary blends. *International Journal for Science, Management and Technology*. 9(1).
- [6] Siva Konda Reddy, B. Ghorpade, V. G., Sudarsana Rao, H. (2014). Influence of Magnetic Water on Strength Properties of Concrete. *Indian Journal of Science and Technology*, 7(1), 14-18.
- [7] Szczes, A., Chibowski, E., Holysz, P., Rafalski, P. (2011). Effect of static magnetic field on water at kinetic condition. *Chemical Engineering and processing*, 50(1), 124-127.
- [8] Al-Qahtani, H. (1996). Effect of magnetic treatment on gulf seawater. *Desalination*, 107(1), 75-81.
- [9] Lungader, M. (1995). Influence of magnetic field on the precipitation of some inorganic salts. *Journal of Crystal Growth*, 152(1), 94-100.
- [10] Joshi, K. M., Kamat, P. V. (1996). Effect of magnetic field on the physical properties of water. *Journal of the Indian Chemical Society*, 43, 620-622.
- [11] Gabrielli, C., Jaouhari, R., Maurin, G., Keddami, M. (2001). Magnetic Water Treatment for Scale Prevention. *Water Research*, 35(13), 3248-3259.
- [12] Kronenberg, K., and Klaus, J. (1985). Experimental Evidence for Effects of Magnetic Fields on Moving Water. *IEEE Transactions on Magnetics*, 21(5), 2059 - 2061.
- [13] Saddam, M. A. (2009). Effect of Magnetic Water on Engineering Properties of Concrete. *Al-Rafidain Engineering*, 17(1), 71-82.

- [14] Fu, W., Wang, Z. B. (1994). The new technology of concrete engineering. Beijing. The Publishing House of Chinese Architectural Industry, 56-59.
- [15] Chau, Z. J. (1996). The new construction method of concrete. Beijing. The Publishing House of Chinese Architectural Industry, 401-407.
- [16] Tawfic, Y. R., Abdelmoez, W. (2013). The Influence of Water Magnetization on fresh and hardened concrete properties. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), 4(6), 21-43.
- [17] Afshin, H., Gholizadeh, M., Khorshidi, N. (2010). Improving Mechanical Properties of High Strength Concrete by Magnetic Water Technology. Scientia Iranica, 17(1), 74-79.
- [18] Bhatath, S., Subraja, S., Kumar, P. A. (2016). Influence of magnetized water on concrete by replacing cement partially with copper slag. Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences 9(4).
- [19] Su, N., Yeong Hwa Wu., Yo Mar, Ch. (2000). Effect of Magnetic Water on the Engineering Properties of Concrete Containing Granulated Blast Furnace Slag. Journal of Cement and Concrete Research, 30, 599 - 605.
- [20] Su, N., Yeong Hwa, Wu., Yo Mar, Ch. (2003). Effect of Magnetic Field Treated Water on Mortar and Concrete Containing Fly Ash. Cement and Concrete Composites, 25(7), 681-688.
- [21] Gholhaki, M., Kheyroddin, A., Hajforoush, M., Kazemi, M. (2018). An investigation on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete incorporating magnetic water with various pozzolanic materials. Construction and Building Materials, 158, 173-180.
- [22] Jain, A., Laad, A., Singh, K. Murari, K. (2017). Effect of magnetic water on properties of concrete. International Journal of Engineering Science and Computing, 5(7).
- [23] Oner, A., Akyuz, S. (2007). An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete. Cement and Concrete Composites, 29(6), 505-514.
- [24] Yang, E. H., Yang, Y. Z., Li, V. C. (2007). Use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness. ACI Material Journal, 104(6), 620-628.
- [25] Valipour, M., Yekkar, M., Shekarchi, M., Panahi, S. (2014). Environmental assessment of green concrete containing natural zeolite on the global warming index in marine environments. Journal of Cleaner Production, 65, 418-423.
- [26] Nai-qian, F., Hsia-ming, Y., Li-Hong, Z. (1988). The strength effect of mineral admixture on cement concrete. Cement and concrete research, 18(3), 464-472.
- [27] Dadsetan, S., Bai, J. (2017). Mechanical and microstructural properties of self-compacting concrete, blended with metakaolin, ground granulated blast furnace slag and fly ash. Construction and Building Materials, 146, 658-667.
- [28] Ghods, A. (2014). A survey on the mechanical properties of magnetic self-compacting concrete containing nano silica. International Research Journal of Applied and Basic Sciences. 8(4), 413-418.
- [29] Ahmadi, B., Shekarchi, M. (2010). Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. Cement and Concrete Composites, 32(2), 134-141.
- [30] Ranjbar M. M., Madandoust R., Mousavi S. Y., Yosefi, S. (2013). Effects of natural zeolite on the fresh and hardened properties of self-compacted concrete, Construction and Building Materials. 47, 806-813.
- [31] Chan, S. Y., Ji, X. (1999). Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes. Cement and Concrete Composites, 21(4), 293-300.
- [32] Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi, M., Khani, S. (2013). Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study. Construction and Building Materials, 41, 879-888.

- [33] Dousti, A., Rashednia, R., Ahmadi, B., Shekarchi, M. (2013). Influence of exposure temperature on chloride diffusion in concretes incorporating silica fume or natural zeolite. *Construction and Building Materials*, 49, 393–399.
- [34] Jalal, M., Pouladkhan, A., Harandi, O.F., Jafari, D. (2015). Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 94, 90-104.
- [35] EFNARC. (2005). The European guidelines for self-compacting concrete; specification production and use.
- [36] ASTM Standard. (2004). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, ASTM Standard C494, ASTM International, West Conshohocken.
- [37] Khayat, K. H., Bickley, J., Lessard, M. (2000). Performance of self-consolidating concrete for casting basement and foundation walls. *ACI Material Journal*, 97(1), 374–380.
- [38] ASTM Standard. (2006). Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete, ASTM Standard C642, ASTM International, West Conshohocken.
- [39] ASTM Standard. (2004). Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, ASTM Standard C496, ASTM International, West Conshohocken.
- [40] ASTM Standard. (2002). Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression, ASTM Standard C469, ASTM International, West Conshohocken.
- [41] Feng, N. Q., Li G. Z., Zang X. W. (1990). High-strength and flowing concrete with a zeolite mineral admixture. *Cement Concrete Aggregates*, 12(2), 61–69.
- [42] Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B., Shekarchi, M. (2012). An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. *Construction and Building Materials*, 35, 1023–1033.
- [43] Barfield, M., Ghafoori, N. (2012). Air-entrained self-consolidating concrete: A study of admixture sources. *Construction and Building Materials*, 26(1), 490–496.
- [44] Domone, P. L. (1997). A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. *Cement and concrete composites*, 29(1), 1–12.
- [45] ACI Committee 318. (2005). Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318–05) and Commentary (318R–05). American Concrete Institute, Farmington Hills.
- [46] CEB-FIP. (1989). Diagnosis and assessment of concrete structures, state of the art report, *CEB Bull*, 192, 83–85.
- [47] Vilanova, A., Gomez, J. F., Landsberger, G. A. (2011). Evaluation of the mechanical properties of self-compacting concrete using current estimating models estimating the modulus of elasticity, tensile strength and modulus of rupture of self - compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3417–3426.