

تأثیر بارگذاری زود هنگام بر روی مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی پودر سنگ آهک و زئولیت



سمیه خالقی
دانشجوی کارشناسی ارشد عمران سازه



رحمت مدندوست
دانشیار گروه مهندسی عمران،
دانشگاه گیلان

چکیده

یکی از اهداف روش های جدید ساخت و ساز، کاهش زمان اجرای سازه می باشد. در این شرایط ممکن است بارهای بزرگی بر روی بتن در چند روز ابتدایی پس از بتن ریزی وارد می شود که سبب آسیب به سازه و تاثیر در روند رشد مقاومت سازه شود. هدف از مطالعه حاضر، بررسی تاثیر بارهای زود هنگام در مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن های خودتراکم حاوی پودر سنگ آهک و زئولیت در شرایط عمل آوری خشک و مرطوب می باشد. بدین منظور بتن های خودتراکم حاوی پودر سنگ آهک و زئولیت در شرایط ننگه داری مختلف در سنین ۷۳ و ۹۰ روز پیش بارگذاری در حد ۸۰ و ۹۰ درصد مقاومت فشاری خود در آن سنین تحت آسیب قرار می گیرند و پس از عمل آوری در شرایط خشک و مرطوب، مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن ها اندازه گیری می شود. مطابق با نتایج امکان بازیابی مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های آسیب دیده نسبت به نمونه های سالم در همه شرایط عمل آوری وجود دارد. آزمایشهای صورت گرفته در شرایط عمل آوری مرطوب و خشک نشان می دهد که بازیابی کامل مقاومت فشاری نمونه های آسیب دیده نسبت به نمونه های سالم تنها در نمونه های پیش بارگذاری شده در سن ۱ روز اتفاق افتاده است و در سایر سنین (۷۳ و ۹۰) روز کاهش مقاومت ۲۸ روزه نسبت نمونه های سالم رخ داده است. نتایج بیانگر آن است که بجز نمونه های حاوی پودر سنگ آهک در ۱ روز، در سایر موارد بیشترین بهبود مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های آسیب دیده در سنین اولیه (۷۳ و ۹۰) نسبت به نمونه های سالم در شرایط خشک رخ داده است.

کلیدواژه ها: بارگذاری زود هنگام، مقاومت فشاری، بتن خودتراکم، زئولیت، شرایط عمل آوری

مصرف بتن به علت ارزانی و دسترسی آسان به اجزای آن روز به روز در سراسر جهان توسعه می یابد. زیرا مصالح اصلی مورد استفاده در بتن به حد کافی در همه جای کره زمین یافت می شود. ساخت و ساز های بتنی همواره نیازمند جاگذاری و فشرده سازی مناسب بتن تازه در قالب به منظور رسیدن به خواص مکانیکی کافی در حالت سخت شده بتن می باشد. ایده بتن های خودتراکم برای اولین بار در سال ۱۹۸۶ در ژاپن مطرح شد [۱]. بتن خودتراکم نسل جدیدی از بتن با خاصیت شکل پذیری بالا و مقاومت کافی در برابر جداشدگی می باشد. این بتن نوع خاصی از بتن می باشد که می تواند به راحتی در داخل قالب جریان یابد و تمام گوشه های قالب و فضاهای بین آرماتورها را بدون نیاز به لرزاندن و هرگونه عمل فشرده سازی پرنماید [۲]. خاصیت پرکنندگی، خاصیت عبور و مقاومت در برابر جداشدگی، سه عامل اصلی و ضروری بتن های خودتراکم هستند. تعادل بین این سه عامل باید به دقت حفظ شود تا بتوان به خودتراکمی رسید [۱].

درسازه های بتنی ممکن است در سنین اولیه پس از اجرا که بتن به مقاومت چندانی دست نیافته است، بارهای عمودی و غیرعمودی نظیر جابجایی قطعات پیش ساخته، انبار کردن مصالح و... بر بتن وارد می شود. در صورتیکه این بارها نزدیک به مقاومت بتن باشند می توانند سبب ترک خوردن و کاهش مقاومت بتن شوند. سوالاتی ممکن است مطرح شود که آیا ترکها و آسیب های وارده در سنین اولیه بتن ماندگارند یا از بین می روند؟ آیا بتن می تواند مقاومت خود را در سنین بالاتر بدست آورد یا خیر؟

عبدالجواد وحداد در سال ۱۹۹۲ مطالعاتی در زمینه بازیابی مقاومت فشاری نمونه های آسیب دیده در بتن انجام دادند. آن ها در آزمایش های خود نمونه های بتن را در سنین ابتدایی (از ۲ تا ۷۲ ساعت) پس از ساخت با درصد های مختلف از ۶۵ تا ۱۰۰ درصد مقاومت فشاری

مورد بارگذاری قرار دادند. ایشان به این نتیجه رسیدند که بارگذاری تا ۹۰ درصد مقاومت فشاری بتن فراتر از ۸ ساعت از ساخت آن، تاثیری روی مقاومت فشاری بتن در سنین بالاتر ندارد. وی همچنین نتیجه گرفت که عمل آوری مرطوب یک نیاز ضروری برای بدست آوردن حداکثر بهبودی در مقاومت بتن است. در بارگذاری مجدد مشاهده کردند که شکست نمونه های آسیب دیده همیشه از ترکهای موجود آغاز می شود. وی همچنین بیان کرد، خودترمیمی کامل ترکها (پرشدن ترکها) به معنی بازیابی کامل مقاومت فشاری نیست [۳].

کلایس و دین در سال ۲۰۱۱ در تحقیقاتشان، نمونه های بتنی را تحت ۸۰،۷۰ و ۹۰ درصد مقاومت فشاری نهایی در سنین ۱، ۳ و ۷ روز پس از اجرا بارگذاری کردند و پس از ۲۸ روز نگهداری در آب مقاومت فشاری نمونه های آسیب دیده را را بدست آوردند. آن ها در آزمایش های خود به این نتیجه دست یافتند که بارگذاری تا ۹۰ درصد مقاومت فشاری در سنین ابتدایی عمر بتن (۱، ۳ و ۷ روز)، تاثیری بر کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ندارد، و بطور متوسط افزایش مقاومت فشاری ۶ درصدی نسبت به نمونه های سالم رخ داده است [۴].

در تحقیقی دیگر توسط کلایس و دین ارزیابی مجددی بر روی نتایج پژوهش عبدالجواد وحداد صورت گرفت. آنها به این نتیجه دست یافتند در اکثر نمونه هایی که تا ۹۰ درصد مقاومت فشاری فراتر از ۸ ساعت پیش بارگذاری شدند، افزایش میانگین ۵،۷ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به نمونه های سالم دارند [۴].

وجینی ویکتور و همکاران در سال ۲۰۱۱ در تحقیقاتشان عملکرد باکتری ها در بهبودی ترک مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق نشان داده شد که در سنین اولیه (۲۰ روز) توانایی بهبود ترک در مخلوط کنترل، بیشتر از مخلوط دارای باکتری می باشد. با افزایش عمر در سن ۴۰ روزه توانایی مخلوط کنترل و مخلوط دارای باکتری دارای

دارند و بدترین حالت در بازیابی مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های آسیب دیده تقریباً در شرایط عمل آوری خشک کنترل نشده رخ داده است. با اضافه کردن الیاف پلی پروپیلن به بتن، میزان آسیب وارده ناشی از پیش بارگذاری به نمونه های بتنی بیشتر شده است، که این آسیب بیشتر سبب تاثیر منفی در مقاومت ۲۸ روزه نمونه های پیش بارگذاری شده در ۱ روز شده است [۸].

با توجه به مطالعات محدودی که در گذشته در زمینه بارگذاری زود هنگام بتن خودتراکم صورت گرفته و توجه کمتر تحقیقات انجام شده به تاثیر انواع شرایط عمل آوری و حضور مواد پودری در بهبود نمونه های آسیب دیده، از اهداف این نوشته می باشد. مطالعه حاضر درباره مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی پودرسنگ آهک و ژئولیت تحت شرایط مختلف نگهداری در اثر بارگذاری زود هنگام در سنین اولیه پس از ساخت بتن می باشد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱ مصالح مصرفی

ماسه مصرفی، ماسه طبیعی شسته و شن مصرفی، شن شکسته با قطر سنگدانه حداکثر ۱۹ میلیمتر می باشد. مشخصات فیزیکی سنگدانه های مصرفی در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱) مشخصات فیزیکی سنگدانه های مصرفی

سنگدانه	جذب آب (%)	چگالی (gr/cm ³)	مدول نرمی	حداکثر قطر سنگدانه (mm)
شن	۲,۰	۲,۶۷	-	۱۹
ماسه	۲,۵	۲,۶۰	۳,۲۷	۴,۷۵

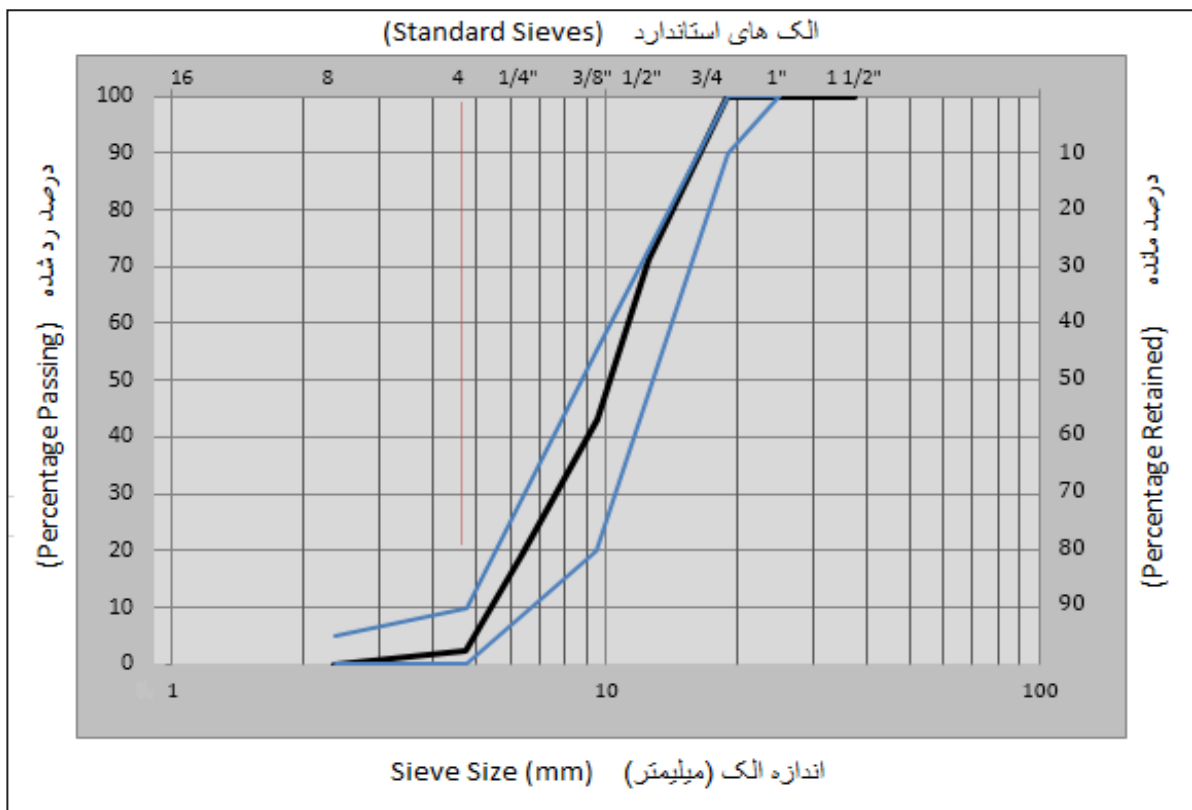
منحنی های مجاز و انتخابی سنگدانه مصرفی با قطر حداکثر اندازه ۱۹ میلی متر مطابق با استاندارد را نشان می دهد.

آستانه بهبودی یکسانی می باشند. با این حال در سن ۴۰ روزه هم در مخلوط کنترل و هم در مخلوط حاوی باکتری آستانه بهبودی افزایش یافته است. اما از سن ۴۰ روزه به بعد مخلوط حاوی باکتری توانایی بستن ترک ها تا ۰,۵ میلیمتر را نیز دارا می باشد [۵].

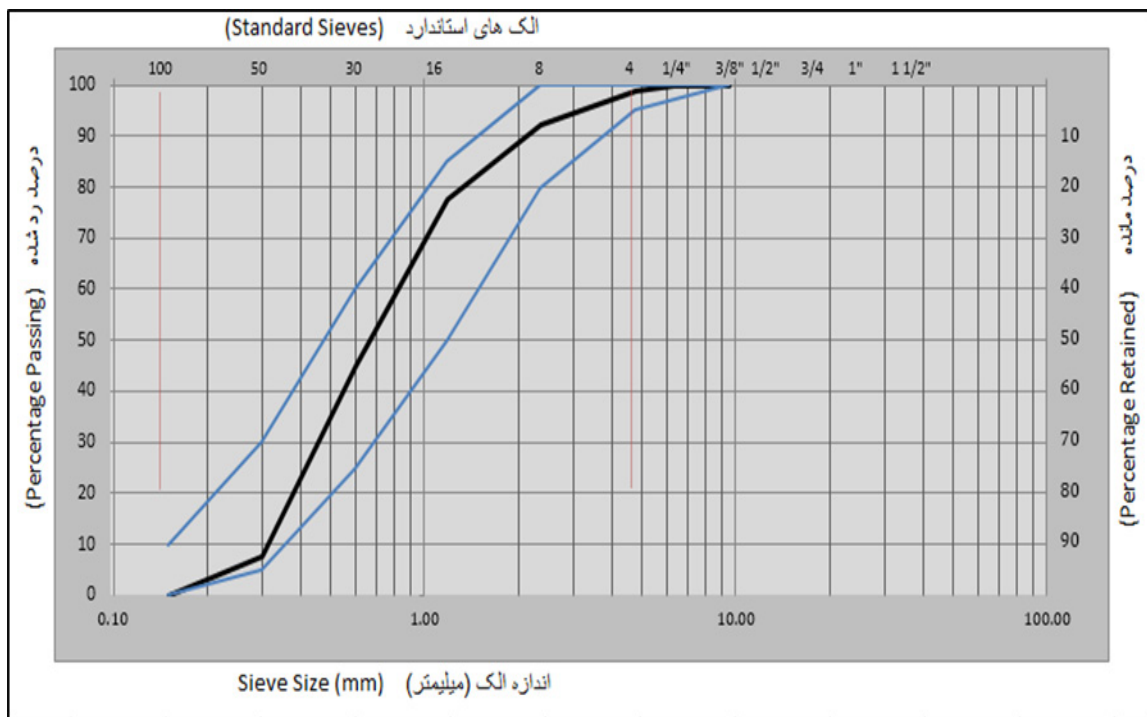
نوئل در سال ۱۹۹۵ اشاره کرد که ترکهای ریز در بتن های آسیب دیده می توانند در شرایط مرطوب به کمک شکل گیری کلسیم کربنات نامحلول ناشی از کلسیم هیدروکسید در سیمان بازیابی شوند [۶]. پدیده ترمیم بتن که محققان در بازیابی مقاومت نمونه های آسیب دیده به آن اشاره کردند ابتدا توسط آبرامز با مشاهده محو شدن ترکهای پل آزادراه پس از گذشت ۳ سال شناسایی شد [۷].

در تحقیقی دیگر توسط مدندوست و همکاران نمونه های بتنی حاوی الیاف پروپیلن را تحت ۹۵، ۹۰، ۸۰ درصد مقاومت فشاری نهایی درسین ۱,۳۰۷ روز بارگذاری کردند و پس از ۲۸ روز عمل آوری در شرایط مختلف مقاومت فشاری نمونه های آسیب دیده را بدست آوردند. آنها در آزمایش های خود به این نتیجه دست یافتند که مقاومت ۲۸ روزه نمونه های بتن بدون الیاف با عمل آوری مرطوب که تحت پیش بارگذاری تا ۹۰ درصد مقاومت فشاری نمونه ها قرار میگیرند، تاثیری در روند افزایش مقاومت فشاری بتن در سن ۲۸ روز ندارد، مطابق با نتایج، افزایش مقاومت فشاری تا ۱۲ درصد را نسبت به نمونه های بارگذاری نشده

در این مطالعه منحنی دانه بندی انتخابی سنگدانه مصرفی مطابق با استاندارد ASTM C 33 [۹] انتخاب شد. شکل (۱ و ۲) محدوده



شکل (۱) منحنی دانه بندی درشت دانه



شکل (۲) منحنی دانه بندی ریز دانه

از سیمان پرتلند نوع ۲ کارخانه سیمان هگمتان که مشخصات آن در جدول (۲) آمده استفاده شده است.

جدول (۲) مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۴۲۵-۲ کارخانه سیمان هگمتان [۱۰]

درصد وزنی	اجزاء و ترکیبات شیمیایی
۶۳,۲۴	CaO
۲۱,۵۴	SiO ₂
۴,۹۵	Al ₂ O ₃
۳,۸۲	Fe ₂ O ₃
۱,۵۵	MgO
۲,۴۳	SO ₃
۵۵,۰۵	C ₃ S
۲۰,۲۲	C ₂ S
۶,۶۶	C ₃ A
۱۱,۶۲	C ₄ AF



شکل (۳) زئولیت مصرفی

فوق روان کننده مورد استفاده با نام تجاری *FARCO PLAST P10-3R* بر پایه پلی کربوکسیلات های اصلاح شده می باشد، این ماده سبز تیره بوده و در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد وزن مخصوص آن ۱,۱ گرم بر سانتی مترکعب می باشد. در سالهای اخیر استفاده از انواع مواد پودری در بتن افزایش رو به رشدی داشته است و این مواد پودری موجب بهبود ویژگی مشخصه های بتن می گردد. پودر زئولیت ماده ای معدنی است که افزودن آن موجب بهبودی خواص بتن می شود. وزن مخصوص آن کم و حداکثر تا ۲,۵ می باشد. پودر زئولیت مصرفی در شکل (۳) مشاهده می گردد. مشخصات زئولیت مصرفی در جدول (۳) آمده است.

جدول (۳) آنالیز شیمیایی پودر زئولیت

نتایج آزمایش پودر زئولیت	ویژگی های استاندارد ملی شماره ۳۴۳۳	آزمایش های شیمیایی
۸۱,۹۳	حداقل ۷۰	Al ₂ O ₃ + SiO ₂ + Fe ₂ O ₃ (درصد)
۳,۸۳	حداکثر ۳	درصد رطوبت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد
۹,۳۳	حداکثر ۱۰	درصد کاهش وزن بر اثر سرخ شدن
۱۰,۵	-	درصد قلیایی های در دسترس

۲-۲ طرح مخلوط بتن

مخلوط که در جدول (۴) آمده است، در نظر گرفته شد. این طرح ها شامل یک نسبت آب به مواد سیمانی ثابت به مقدار ۰,۴ می باشد که در یک طرح ۱۰ درصد زئولیت جایگزین سیمان پرتلند شد. در هر دو طرح میزان مواد سیمانی 450 kg/m^3 در نظر گرفته شد. ضمناً به هر ۲ طرح ۱ درصد وزنی سیمان فوق روان کننده اضافه شد.

در این پروژه طراحی مخلوط ها با در نظر گرفتن شرایط خودتراکمی انجام گرفت بطوریکه پاسخگوی آزمایش های بتن تازه باشد. اجزای تشکیل دهنده بتن خودتراکم به نحوی متناسب شدند که حداکثر تجمع ذرات و حداقل حفرات را داشته باشند. به منظور انجام این مطالعه دو طرح

جدول (۴) طرح های اختلاط

شماره طرح	مجموع مواد سیمانی	نسبت آب به مواد سیمانی	Kg/m ³					
			سیمان	آب مصرفی	پودرسنگ آهک	زئولیت	ماسه طبیعی	درشت دانه
۱	۴۵۰	۰,۴	۴۵۰	۱۸۰	۲۵۰	۰	۸۵۰	۷۴۰
۲	۴۵۰	۰,۴	۴۰۵	۱۸۰	۲۵۰	۴۵	۸۵۰	۷۴۰

۳-۲ شرایط نگه داری نمونه ها

پس از ساخت بتن، نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در محیط آزمایشگاه نگه داری شدند. پس از ۲۴ ساعت نمونه ها از قالب خارج شده و به حوضچه و محیط آزاد مطابق با شرایط عمل آوری منتقل شده و تا آزمایش در دمای 24 ± 2 درجه سانتی گراد نگه داری شدند.

مرطوب: نمونه ها پس از قالب برداری در حوضچه قرار داده شدند و تا زمان آزمایش مجدد در آب عمل آوری شدند.

خشک: نمونه ها پس از قالب برداری در محیط آزمایشگاه با دمای 24 ± 2 درجه سانتی گراد نگهداری شدند.

۴-۲ آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد [BSI881] بر روی نمونه های بتنی به ابعاد $15 \times 15 \times 15$ سانتی متر در سنین ۱، ۳ و ۷ انجام شد. ابتدا نمونه های بتنی پس از اندازه گیری مقاومت فشاری بتن در سنین ۱، ۳ و ۷ روز با درصد های ۸۰ و ۹۰ درصد مقاومت فشاری خود در سنین ابتدایی پس از ساخت (۱، ۳، ۷ روز) بارگذاری شدند و مجدداً تحت همان شرایط عمل آوری قرار گرفتند. پس از ۲۸ روز مقاومت فشاری آن ها به همراه نمونه های پیش بارگذاری نشده اندازه گیری شد. بارگذاری مجدد در نمونه های آسیب دیده در همان جهت پیش بارگذاری صورت گرفت.

۳- نتایج و بحث

در این بخش میزان بازیابی در مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های آسیب دیده در بتن های حاوی زئولیت و پودرسنگ آهک نسبت به نمونه های پیش بارگذاری نشده (سالم)، تحت شرایط مختلف عمل آوری مورد بررسی و مطالعه قرار میگیرد.

۳-۱-۳ بتن خودتراکم حاوی پودرسنگ آهک

۳-۱-۱-۳ تاثیر میزان بارگذاری زودهنگام

مطابق با اشکال (۴) تا (۶) با افزایش میزان پیش بارگذاری نمونه ها در سنین اولیه (۱، ۳، ۷ روز)، مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های آسیب دیده نسبت به نمونه های سالم کاهش یافته است. احتمالاً افزایش آسیب وارده در پی افزایش میزان پیش بارگذاری علت این کاهش باشد. به نظر می رسد میزان آسیب وارده به حدی است که احتمالاً هیدراته شدن مجدد سیمان و خودترمیمی بتن قادر به بازیابی کامل مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های آسیب دیده نسبت به نمونه های سالم نمی باشد، و تقریباً کاهش در همه شرایط عمل آوری رخ داده است.

۳-۱-۲ تاثیر زمان بارگذاری زودهنگام

نتایج نشان می دهد که بیشترین تأثیر (مثبت) روی مقاومت فشاری ۲۸ روزه تحت شرایط عمل آوری مرطوب، در نمونه های بارگذاری شده زودهنگام در سن ۱ روز پس از ساخت بتن اتفاق افتاده است. مطابق با نتایج با

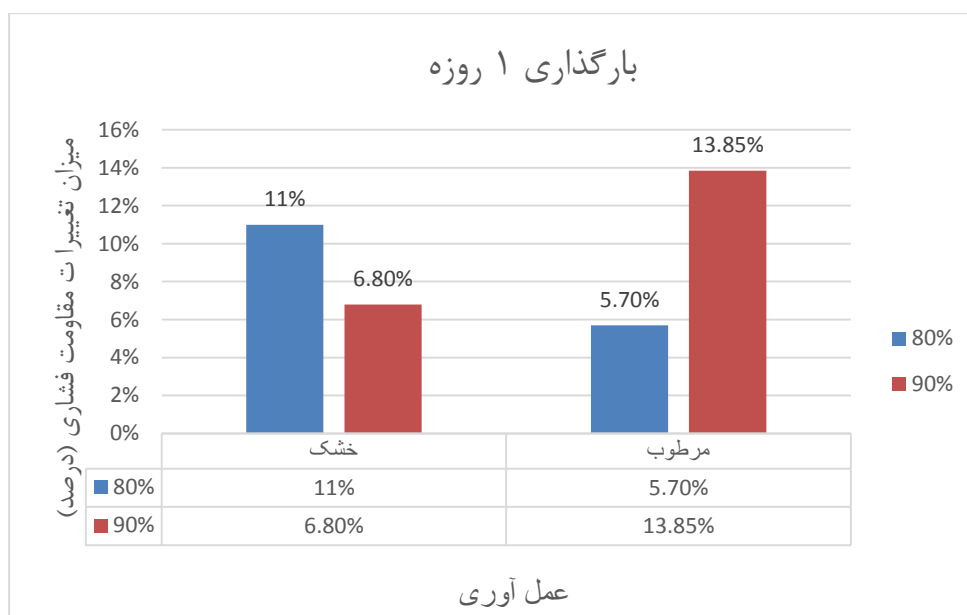
مشاهدات عینی، در نمونه های (۷،۳ روزه) بنظر می رسد جداسازی و رسوب (شستگی) بیشتر ذرات بتن ناشی از بارگذاری زود هنگام (که در زمان ایجاد ترک در بتن بوجود آمده اند) در شرایط عمل آوری مرطوب و خشک رخ داده است که احتمالاً سبب کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های آسیب دیده نسبت به نمونه های سالم شده است. بیشترین تاثیر (مثبت) مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های آسیب دیده، در نمونه های پیش بارگذاری شده پس از (۱ روز) از ساخت بتن در شرایط مرطوب رخ داده است. علت این امر می تواند حضور رطوبت به عنوان یک عامل اصلی در خودترمیمی بتن دانست. در این شرایط هر چه پیش بارگذاری زودتر انجام شود نمونه ها زمان بیشتری در مجاورت رطوبت قرار میگیرند. در این فرصت، احتمالاً واکنش سیمان عمل نشده با آب (هیدراته شدن) و شکل گیری خودترمیمی سبب افزایش بیشتر مقاومت فشاری نمونه های آسیب دیده در ۲۸ روز می شود.

افزایش زمان بارگذاری زود هنگام میزان بهبود در مقاومت ۲۸ روزه نمونه های آسیب دیده نسبت به نمونه شاهد کم شده است. احتمالاً سیمان هیدراته نشده کمتر سبب این کاهش شده باشد. همچنین در نمونه های ۳،۷ روزه احتمالاً، مقدار دسترسی کمتری به سیمان هیدراته نشده (نسبت به سن ۱ روزه) جهت هیدراته شدن مجدد و خودترمیمی بتن وجود دارد. بنابراین، مطابق با تحولات مورد انتظار، میزان بهبود در مقاومت فشاری نمونه های بارگذاری شده زود هنگام در این سنین (۷،۳ روزه) کمتر است.

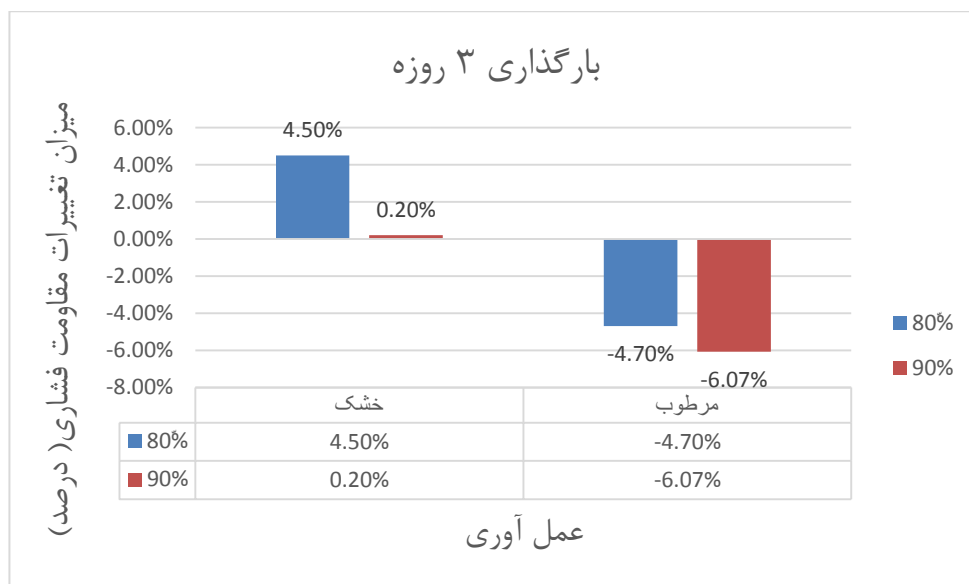
در شرایط عمل آوری خشک نتایج بدست آمده با شرایط عمل آوری مرطوب مطابقت دارد. در این شرایط نیز بیشترین تاثیر (مثبت) مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های آسیب دیده، در نمونه های پیش بارگذاری شده پس از ۱ روز از ساخت بتن رخ داده است.

۳-۱-۳ تاثیر شرایط عمل آوری

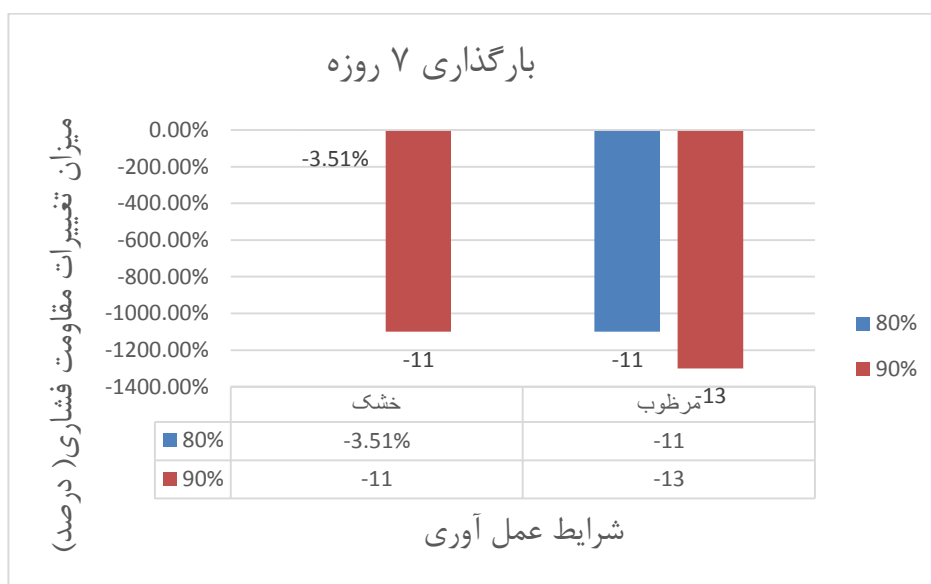
نتایج نشان می دهد با افزایش میزان بارگذاری زود هنگام، نمونه ها آسیب بیشتری می بینند. مطابق با



شکل (۴) میزان تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های حاوی پودرسنگ آهک بارگذاری شده در سن ۱ روزه نسبت به نمونه های بارگذاری نشده



شکل (۵) میزان تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های حاوی پودرسنگ آهک بارگذاری شده در سن ۳ روزه نسبت به نمونه های بارگذاری نشده

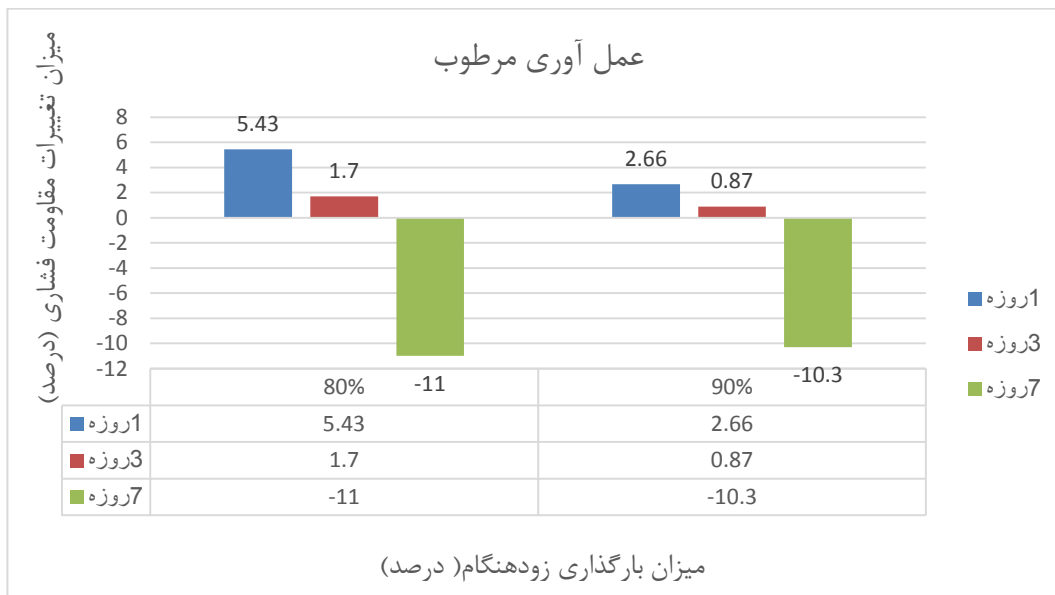


شکل (۶) میزان تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های حاوی پودرسنگ آهک بارگذاری شده در سن ۷ روزه نسبت به نمونه های بارگذاری نشده

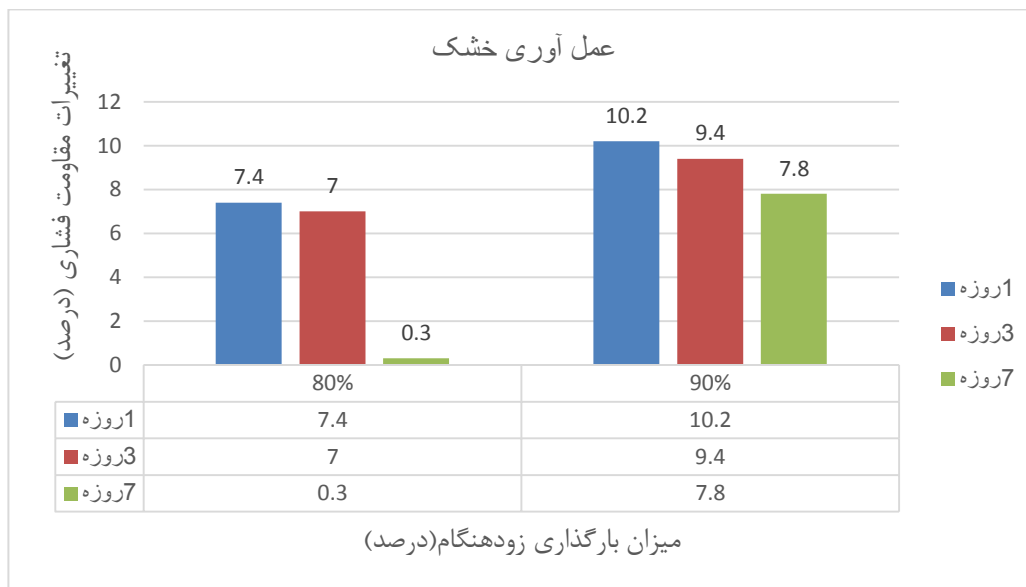
۲-۳ بتن خودتراکم حاوی زئولیت

مطابق با شواهد آزمایشگاهی، پیش بارگذاری تا ۹۰ درصد، نمونه های بتنی حاوی پودرسنگ آهک آسیب بیشتری نسبت به نمونه های حاوی زئولیت ایجاد کرده است. همچنین در پیش بارگذاری ۷،۳ روز پس از ساخت بتن، این افزایش آسیب ناشی از حضور پودرسنگ آهک چشمگیرتر از نمونه های حاوی زئولیت بوده است. مطابق با مشاهدات عینی به نظر می رسد انتقال این نمونه ها به حوضچه آب سبب جداسدگی و رسوب بیشتر ذرات بتنی

(که در زمان ایجاد ترک در بتن بوجود آمده اند) نسبت به نمونه های حاوی زئولیت در شرایط مرطوب شده است. به نظر می رسد در بتن های حاوی پودرسنگ آهک افزایش آسیب و جداسدگی به حدی است که احتمالاً هیدراته شدن مجدد و خودترمیمی قادر به بازیابی کامل مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به نمونه های سالم نباشد. مطابق با نتایج بدست آمده در اشکال (۷) و (۸) در پیش بارگذاری ۱۱ روزه نمونه های حاوی زئولیت کاهش مقاومت ۱۱ درصدی تحت عمل آوری مرطوب گزارش شده است.



شکل (۷) میزان تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های حاوی ژئولیت بارگذاری شده نسبت به نمونه های بارگذاری نشده



شکل (۸) میزان تغییرات مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های حاوی ژئولیت بارگذاری شده نسبت به نمونه های بارگذاری نشده

۴- نتیجه گیری

باتوجه به بررسی های انجام شده نتایج زیر قابل استنتاج است:

۱- میزان پیش بارگذاری، زمان پیش بارگذاری و شرایط عمل آوری از عوامل تاثیرگذار در بازیابی مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های آسیب دیده نسبت به نمونه های سالم می باشند.

۲- امکان بازیابی مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های آسیب دیده نسبت به نمونه های سالم در تمام شرایط عمل آوری وجود دارد.

۳- در شرایط عمل آوری خشک، بجز نمونه های حاوی پودرسنگ آهک پیش بارگذاری شده در سن ۷ روز، پیش بارگذاری تا ۹۰٪ مقاومت فشاری در سنین ابتدایی، تاثیری در کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های آسیب دیده

۶- نمونه های بتنی حاوی پودرسنگ آهک آسیب بیشتری نسبت به نمونه های حاوی زئولیت ایجاد کرده است. همچنین در پیش بارگذاری ۳ و ۷ روز پس از ساخت بتن، این افزایش آسیب ناشی از حضور پودر سنگ آهک چشمگیرتر از نمونه های حاوی زئولیت بوده است.

۷- در شرایط عمل آوری خشک در نمونه های حاوی زئولیت، با افزایش میزان پیش بارگذاری بازیابی کامل مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های آسیب دیده نسبت به نمونه های سالم رخ داده است.

۸- در بارگذاری مجدد نمونه های آسیب دیده، شروع ترک خوردگی همواره از ترک های موجود ناشی از پیش بارگذاری آغاز می شود.

نسبت به نمونه های سالم نداشته و حتی افزایش مقاومت تا ۱۰،۲ درصد نسبت به نمونه های سالم در برخی از نمونه ها بدست آمده است.

۴- در شرایط مرطوب، بازیابی کامل مقاومت فشاری نمونه های آسیب دیده نسبت به نمونه های سالم تنها در نمونه های پیش بارگذاری شده در سن ۱ روز اتفاق افتاده است و در سایر سنین (۳ و ۷) روز کاهش مقاومت ۲۸ روزه نسبت به نمونه های سالم رخ داده است.

۵- بجز نمونه های حاوی پودرسنگ آهک در سن ۷ روز، در سایر موارد بیشترین بهبود مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های آسیب دیده در سنین اولیه (۳، ۱ و ۷) روز نسبت به نمونه های سالم در شرایط نگه داری خشک رخ داده است.

مراجع

- [1] M. D. Safiuddin, J. S West & K. A. Soudki, *Properties of freshly mixed self-consolidating concretes incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material, Construction And Building Materials* 30 833- 842 (2012).
- [2] H, Okamura. & K, Ozawa" *Mix- design for self- compacting concrete"*, *Concrete Library of JSCE, No.25, pp107-120. (1995).*
- [3] Abdel-Jawad, Y., & Haddad, R. (1992). *Effect of early overloading of concrete on strength at later ages. Cement and Concrete Research, 22(5), 927-936.*
- [4] Claisse, P., & Dean, C. (2013). *Compressive strength of concrete after early loading. Proceedings of the Institution of Civil Engineers–Construction Materials, 166(3), 152-157*
- [5] Wiktor, V., & Jonkers, H. M. (2011). *Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. Cement and Concrete Composites, 33(7), 763-770.*
- [6] Neville AM (1994) *Properties of concrete, 4th edn. Longman Group Limited, Harlow, Essex, UK.*
- 7] D. A. Abrams, *concrete, V. 10, 50 (1925).*
- [8] مدندوست، رحمت. رنجبر تکلیمی، ملک محمد. غلامپور، مهرزاد. (۱۳۹۵). مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف پروپیلن پس از بارگذاری اولیه، هشتمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران- تهران.
- [9] *ASTM C33, 2005 Standard Specification for Concrete Aggregates.*
- [10] <http://www.hegmatancement.com>
- [11] *BS 1881, 1983 Method for making test cubes from fresh concrete, British Standards Institution.*

بررسی پدیده ستون کوتاه در ساختمان‌های بتن آرمه

و معرفی تکنیک‌های مقابله با آن



علی خیرالدین
استاد، دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه سمنان



حسین نادرپور
دانشیار، دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه سمنان



محمد حاجی
دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده
مهندسی عمران دانشگاه سمنان

چکیده

ستون‌ها از اعضای مهم سازه‌ای می‌باشند که عمدتاً در معرض نیروهای محوری با یا بدون ممان خمشی می‌باشند که شکست آن‌ها منجر به انهدام سازه می‌گردد. طراحی ایمن و حفظ ایمنی ستون‌ها همواره از موضوع‌های مورد بحث محققین بوده است. ستون‌های کوتاه در مقایسه با ستون‌های لاغر به دلیل سختی بیشتر نیروی زلزله بیشتری جذب می‌کنند. به همین دلیل ستون‌های کوتاه منبع قابل توجهی در خسارات جدی زلزله می‌باشند. حالت ستون کوتاه از طراحی معماری ساختمان سرچشمه می‌گیرد. این مقاله انواع حالات تشکیل ستون کوتاه و دلایل معماری که چرا این شرایط روی می‌دهد را ارائه می‌دهد و به زبان غیر فنی اثرات مضر آن‌ها را روی پاسخ سازه توضیح می‌دهد، همچنین راه‌حلی برای آن‌ها ارائه می‌گردند. راه‌حل را فقط می‌توان به وسیله یک رویکرد یکپارچه برای طراحی ساختمان که حاصل از تعامل مهندس، معمار و پیمانکار می‌باشد، به دست آورد. در این مقاله مطالعات آزمایشگاهی مربوط به ستون کوتاه و انواع روش‌های تقویت این ستون‌ها با *FRP* نیز بررسی خواهند شد. از بین روش‌های تقویت اشاره شده در این مقاله استفاده از الیاف *FRP* به صورت دور پیچ کامل بهترین روش بوده و با توجه به مدل سازی انجام شده در نرم افزار اجزای محدود باعث افزایش ۲/۰۶ برابری شکل‌پذیری و همچنین ۱/۲۳ برابری انرژی جذب شده می‌گردد.

کلمات کلیدی: ستون کوتاه، سختی، زلزله، بتن آرمه، مقاوم‌سازی

۱. مقدمه

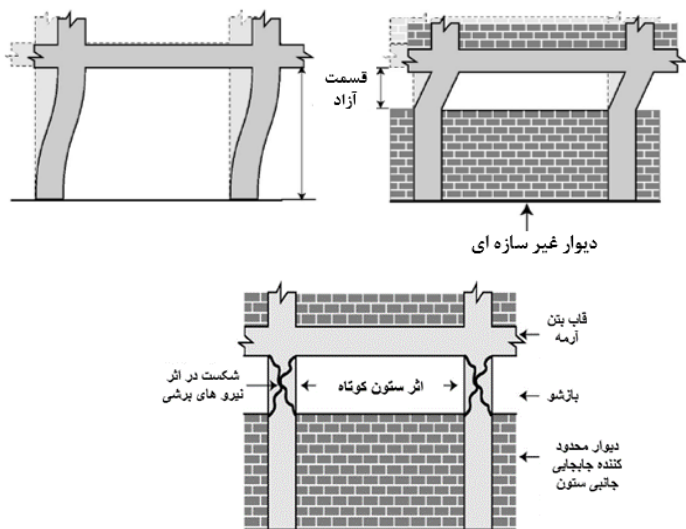
زلزله، متفاوت از رفتار مورد انتظار ستون بدون عناصر غیر سازه‌ای تکیه دارد. به‌طور کلی مشکل از طراحی معماری ساختمان‌ها سرچشمه می‌گیرد [۱]. بهترین راه‌حل این است که طراحان معماری و پیمانکاران ساخت‌وساز مشکل را درک کنند و از ایجاد این شرایط جلوگیری کنند. پیمانکاران نیاز به درک این مشکل دارند چون اغلب این

گزارش‌های آسیب زلزله در سراسر جهان موارد متعددی از اثرات ستون کوتاه را ارائه می‌دهد. اگرچه مشکل به‌عنوان آسیب به ستون ظاهر می‌شود، علت معمولاً به المان‌های غیر سازه‌ای تحمیل‌کننده یک الگوی پاسخ به حرکات

۲. منشأ ایجاد ستون کوتاه در سازه‌های بتن آرمه

۱- ستون کوتاه ناشی از وجود تیرهای عمیق: تیرهای محیطی که به‌منظور شکل‌دهی نما و یا نصب تابلو و... ممکن است عمیق‌تر از بقیه تیرها طرح شوند باعث کاهش طول و افزایش سختی ستون‌های متصل به آن در قاب می‌گردد و باعث عدم ایجاد تیر ضعیف و ستون قوی گشته و در زلزله باعث شکست برشی ستون می‌گردند. وجود تیرهای عمیق باعث تبدیل مود حرکت سازه از خمشی به برشی می‌شود [۳].

۲- ستون کوتاه ناشی از وجود پرکننده‌ها و عناصر غیر سازه‌ای: نیاز به جا دادن بازشوها در دیوارهای یک ساختمان به‌منظور فراهم کردن نور طبیعی و تهویه منجر به محصورشدگی جانبی جزئی در ارتفاع ستون توسط عناصر صلب و در نتیجه تشکیل ستون کوتاه می‌شود. (شکل ۲).



شکل ۲- محدودیت جانبی ستون و ایجاد پدیده ستون کوتاه [۱]

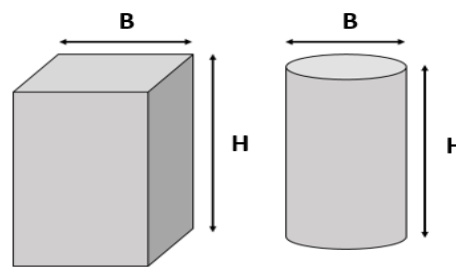
۳- ستون کوتاه ناشی از احداث ساختمان بر روی سطح شیب‌دار: منشأ بسیاری از تغییرات در طول ستون‌ها در ملاحظات معماری است که از آن جمله احداث ساختمان بر روی زمین شیب‌دار مانند دامنه کوه را می‌توان نام برد. در طی زلزله ستون‌های کوتاه‌تر مستعد جذب انرژی بیشتر و در نتیجه خرابی و خسارت بیشتر می‌باشند. از این‌رو ضروری است ستون‌های کوتاه‌تر را با مقاومت بیشتری طرح نمود [۴] (شکل ۳).

شرایط بعد از بهره‌برداری به وجود می‌آید، زمانی که پیمان کاران در بخشی از ارتفاع بین ستون‌ها به درخواست صاحب ساختمان بدون ورود معمار یا مهندس دیوارهایی را اضافه می‌کنند. شرایط ستون کوتاه غالباً به‌وسیله اندرکنش عناصر سازه‌ای و غیر سازه‌ای ایجاد می‌شوند که در طراحی و آنالیز سازه در نظر گرفته نشده‌اند [۱].

تعریف ستون از دیدگاه آبا [۲]:

$$\frac{H}{B} \leq 3 \rightarrow \text{پداستال یا ستونچه} \quad (۱)$$

$$\frac{H}{B} > 3 \rightarrow \text{ستون} \quad (۲)$$



شکل ۱- نمایش ابعاد ستون

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌کنید H و B به ترتیب ارتفاع و بعد ستون می‌باشد.

برای بررسی کوتاه بودن ستون باید علاوه بر $\frac{H}{B} > 3$ شرط زیر نیز برقرار باشد:

(الف) ستون با حرکت جانبی (مهاربندی نشده)

$$\frac{KL_u}{r} \leq 22 \quad (۳)$$

ستون کوتاه است \rightarrow

که در آن K ضریب طول مؤثر ستون، L_u طول آزاد قطعه فشاری و r شعاع ژیراسیون در صفحه قاب می‌باشد.

(ب) ستون‌های بدون حرکت جانبی

$$\frac{KL_u}{r} \leq 34 \pm 12 \frac{M_{1b}}{M_{2b}} \quad (۴)$$

ستون کوتاه است \rightarrow

که در آن M_{1b} و M_{2b} به ترتیب ممان کوچک‌تر و بزرگ‌تر در ستون می‌باشند.

۸- ستون کوتاه ناشی از راهروهای باز در مجتمع‌های مسکونی: محصور شدن بخشی از ارتفاع خالص ستون در مجتمع‌های مسکونی ساخته‌شده در کشورهای متعدد با پیروی از معماری مدرن توسط ایجاد راهروها در سمت چپ نمای ساختمان و استفاده از نرده و دیوارهای سخت به جای به کارگیری چراغ.

همچنین در صورتی که بدون در نظر گرفتن محاسبات و جزئیات اجرایی مناسب توسط مهندس محاسب، در هنگام اجرا در قسمتی از ارتفاع یک ستون تکیه‌گاه ایجاد گردد و یا طول اجرایی ستون کمتر از طول محاسباتی شود، امکان ایجاد پدیده ستون کوتاه وجود دارد.

۲. بررسی تحلیلی و مکانیسم ستون کوتاه

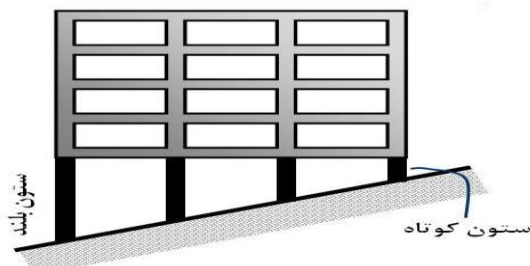
ستون کوتاه در مقایسه با ستون بلند دارای سختی و قابلیت جذب انرژی زلزله بیشتری است. از آنجائی که سختی با عکس توان سوم طول ستون ارتباط دارد (معادله ۵)، اگر طول ستون نصف شود سختی و جذب نیروی زلزله در آن ۸ برابر می‌گردد [۶].

$$K = 12 \frac{EI}{L^3} \quad (5)$$

K = سختی جانبی ستون با انحنای مضاعف، L = طول

ستون، EI = صلبیت خمشی ستون

در اثر بار جانبی ستون‌های کوتاه و بلند به یک‌میزان (A) در جهت افقی جابه‌جا می‌شوند. با توجه به آن که سختی جانبی ستون‌ها با توان سوم طول نسبت عکس دارد لذا ستون‌های کوتاه سختی بیشتری دارند. در نتیجه میزان نیروی لازم برای ایجاد تغییر شکل در ستون کوتاه به مراتب بیشتر از ستون‌های بلند است (با توجه به فرمول ساده $F = K\Delta$)؛ بنابراین چنانچه ستون‌های کوتاه برای این چنین بار بیشتری طراحی نشده باشند، در اثر زلزله دچار خسارت‌های بیشتری و حتی زوال می‌گردند. این زوال که با عنوان "اثر ستون کوتاه" نامیده می‌شوند، غالباً به صورت ترک‌های X شکل در ستون نمایان می‌شوند. نوع زوال این ستون‌ها، زوال برشی می‌باشد. شکست ترد برش



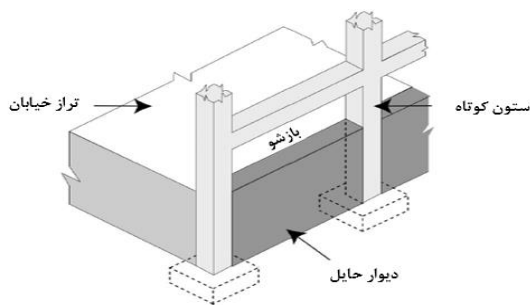
شکل ۳- پدیده ستون کوتاه در سازه شیب‌دار [۴]

۴- ستون کوتاه در حدفاصل پاگردها تا تراز طبقات: راه‌پله‌ها در اکثر طراحی‌ها به صورت اجزاء غیر سازه‌ای منظور شده و جداگانه طرح می‌گردند. در حالی که در اکثر ساختمان‌ها چون تیر پاگرد در ارتفاع ستون به آن متصل است حدفاصل پاگرد تا سقف طبقه به یک ستون کوتاه تبدیل شده و نیروی برش زیادی در هنگام زلزله جذب که در طراحی و محاسبات منظور نمی‌شود.

۵- ستون کوتاه ناشی از وجود نیم طبقه در ساختمان: طراحی نیم طبقه (بالکن) در داخل واحدهای تجاری و یا طبقات ساختمان باعث ایجاد پدیده ستون کوتاه می‌گردد [۵].

۶- ستون کوتاه ناشی از دوبلکسی شدن سازه‌ها: طول مؤثر ستون‌های واقع در فصل مشترک این سازه‌ها به اندازه‌های کوچک‌تری تقسیم می‌شود که هر یک از آن‌ها به صورت یک ستون کوتاه عمل می‌کنند [۶].

۷- ستون کوتاه ناشی از زیرزمین نیمه مدفون: استفاده از دیوارهای حائل در زیرزمین با ستون‌های تعبیه‌شده در آن‌ها که بخش کوچکی از ارتفاع ستون تا سقف طبقه بعدی ادامه می‌یابد به منظور ایجاد تهویه و روشنایی منجر به ایجاد ستون کوتاه می‌شود (شکل ۴).



شکل ۴- ستون کوتاه ناشی از ایجاد بازشو به منظور تهویه در زیرزمین

نیمه مدفون [۱]

در ستون‌های کوتاه به‌عنوان یکی از خطرناک‌ترین مدهای شکست در سازه‌های بتنی شناخته شده است. غالباً طراحی‌ها به‌گونه‌ای صورت می‌گیرد که زوال برشی تا قبل از رسیدن سازه به حداکثر ظرفیت موردنظر، در هیچ عضو سازه رخ ندهد [۳].

ارتباط بین ممان‌های خمشی داخلی در انتهای ستون‌ها و نیروی برشی مرتبط با آن‌ها به‌راحتی از طریق اصل معادلات تعادل و بی‌توجهی به اثر $P - \Delta$ به دست می‌آید:

$$V = \frac{M_a + M_b}{h} \quad (۶)$$

$M_a + M_b =$ جمع جبری ممان‌های انتهای ستون، $h =$ ارتفاع خالص ستون

در ستون کوتاه به دلیل حضور المان خارجی مهارکننده، ارتفاع خالص به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد و به‌طور معکوس نیروی برشی افزایش می‌یابد.

آیین‌نامه‌های طراحی مقاوم در برابر زلزله ملزم می‌کنند که نیروی برشی طراحی (V_e) در المان باید با استفاده از ممان مقاوم خمشی احتمالی (M_{pr}) در انتهای المان به دست بیاید. ممان مقاوم خمشی احتمالی باید با به‌کارگیری مساحت میلگردهای طولی واقعی در وجه المان، مقاومت گسیختگی برای میلگرد فولادی معادل با ۱/۲۵ برابر مقاومت تسلیم اسمی و ضریب کاهش مقاومت (ϕ) برابر با یک به دست بیاید. در نتیجه نیروی برشی طراحی باید با استفاده از معادله زیر به دست بیاید:

$$V_e = \frac{(M_{pr})_a + (M_{pr})_b}{h} \quad (۷)$$

مقدار h به کار گرفته شده در معادله (۷) باید مطابق با محدودیت‌های تغییر شکل‌های واقعی اعمال شده به‌وسیله المان‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای باشد.

۴. روش‌های مقابله با پدیده ستون کوتاه

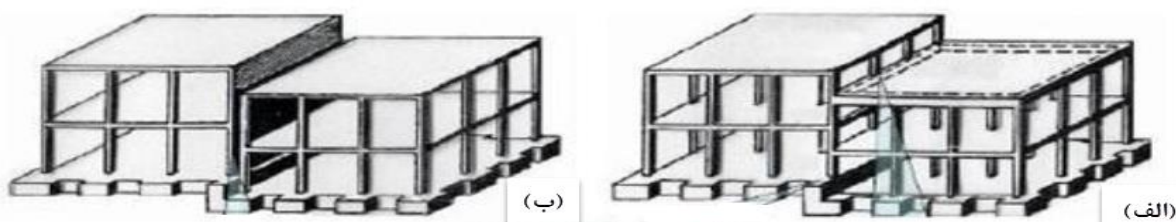
از آنجایی که پدیده ستون کوتاه در بسیاری از سازه‌ها اجتناب‌ناپذیر است، لازم است که طراحان تمهیداتی را برای کاهش اثرات مخرب آن پیش‌بینی نمایند. برای این

منظور برای حالتی که به دلایل معماری یا کاربری تمام ستون‌های طبقه کوتاه‌تر از طبقات دیگر می‌شوند، پیشنهاد می‌شود که ستون‌های سازه‌ای کاملاً با طبقات دیگر هم‌ارتفاع انتخاب شوند و برای جبران ارتفاع‌های زیاد از سقف‌های کاذب استفاده گردد تا نامنظمی‌ها به حداقل برسند. در موارد خاص که سازه بر روی سطح شیب‌دار بنا می‌شود و به‌ناچار تعدادی از ستون‌های طبقه همکف کوتاه‌تر از باقی ستون‌ها اجرا می‌شوند، برای جلوگیری از پیچش ناشی از اختلاف سختی ستون‌های کوتاه و بلند در طبقه می‌توان با کمک مهاربندی‌هایی در مجاورت ستون‌های بلند، سختی این ستون‌ها را نیز افزایش داد تا توزیع سختی در طبقه یکنواخت‌تر گردد.

در مورد سازه‌های دوبلکسی نیز از آنجا که قاب‌های فصل مشترک سخت تراز باقی قاب‌ها هستند، طراح باید عناصر برابر جانبی را در طبقه توزیع نماید که مرکز سختی و مرکز جرم حتی‌المقدور کمترین فاصله را نسبت به هم داشته باشند.

در ساختمان‌هایی که میانقاب یا پرکننده‌های سخت باعث ایجاد ستون کوتاه شده‌اند، می‌توان عناصر غیر سازه‌ای را از ستون‌ها به‌طور کلی جدا نمود به‌طوری‌که ستون آزادی کافی را برای عدم کاهش طول مهار نشده خود داشته باشد. یک‌راه‌حل دیگری نیز وجود دارد و آن مدنظر قرار دادن رفتار اعضای غیر سازه‌ای در محاسبات سازه‌ای است به‌طوری‌که اعضای غیر سازه‌ای سخت و ترد همانند دیوارهای کناری ساختمان‌ها، آسیب‌پذیرتر از اعضای سازه‌ای باشند دلیل آن‌هم انعطاف‌پذیری کم آن‌هاست. بعلاوه رفتار پسماند سیستم سازه‌ای وقتی که چنین اعضای غیر سازه‌ای در آن‌ها باشد بسیار پیچیده‌تر می‌شود. در این حالت پیچیدگی مسئله و درک و فهم درست پاسخ سازه مشکل می‌گردد. یک روش بسیار مناسب برای مدل‌سازی میانقاب آجری استفاده از میله معادل می‌باشد و فرض بر آن است که این میله‌ها فقط در فشار عمل می‌نمایند [۷]. ایده میله معادل به‌جای میانقاب آجری برای اولین بار در سال ۱۹۶۷ توسط پولیاکف مطرح شد [۸].

بروز خسارت ناشی از ستون کوتاه در زلزله‌های آینده جلوگیری نماید. زمانی که دیواری در قسمتی از ارتفاع ستون اجرا گردیده و قسمت دیگر ارتفاع ستون آزاد است، پیشنهاد می‌گردد با استفاده از مواد و مصالح مناسب تمام ارتفاع آزاد ستون قرار گرفته در قلاب را محصور کنیم. این کار می‌تواند از به وجود آمدن پدیده ستون کوتاه جلوگیری کند. اگر استفاده از این روش امکان‌پذیر نبود، باید قسمت آزاد ستون (که پتانسیل تشکیل ستون کوتاه را دارد) مورد بررسی و با استفاده از یک روش فنی مقاوم‌سازی شود [۱۰ و ۱۱].



شکل ۵- پرهیز از تعبیه اختلاف سطح در کف‌ها تا حد امکان [۵]

سازه‌های بتن‌آرمه رواج یافته است. در شکل (۶) انواع روش‌های متداول تقویت ستون‌های کوتاه را مشاهده می‌کنید که از صفحات *FRP* از جنس کربن (*CFRP*) و شیشه (*GFRP*) و همچنین لایه‌های متفاوت (۲ و ۳ و ۶ و ۹) با شکل‌های متفاوت استفاده شده است.

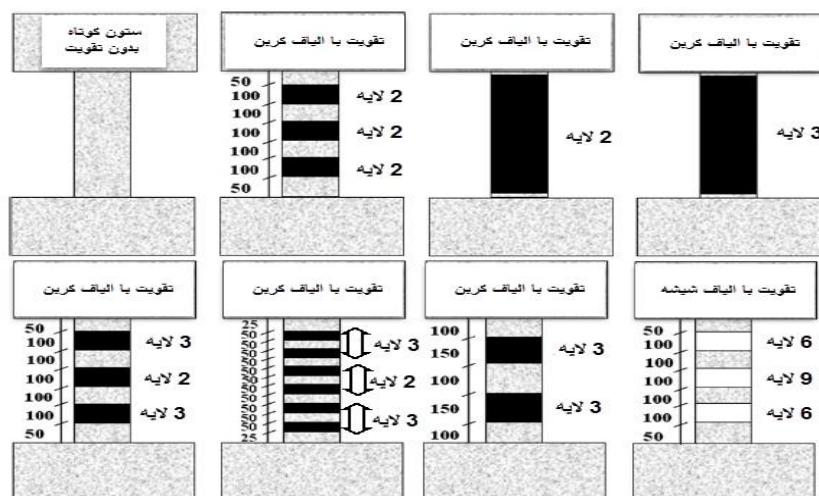
در راه‌پله‌ها نیز می‌توان ستون‌های اطراف راه‌پله که با پاگرد تلاقی دارند را نوعی ستون کوتاه محسوب کرد و در محاسبات لحاظ نمود. اگر راه‌پله در خارج از سازه اصلی و به طور مجزا طراحی گردد ولی به دلیل ملاحظات معماری الزام به طراحی راه‌پله در فضای داخلی سازه و در اتصال با ستون‌های اصلی سازه باشد، باید اثر تیرهای پاگرد بر ستون‌ها در محاسبات مدنظر قرار بگیرد تا برش‌های ناشی از نیروی زلزله تهدیدی برای ستون‌ها ایجاد ننماید [۹].

در ساختمان‌های موجود (ساختمان‌های ساخته‌شده مورد بهره‌برداری) با پتانسیل به وجود آمدن ستون کوتاه، روش‌های بهسازی لرزه‌ای و مقاوم‌سازی متفاوتی می‌تواند از

در شکل (۵-الف) باید از ایجاد اختلاف سطح پرهیز شود در شکل (۵-ب) نیز در اختلاف سطح بیش از ۶۰ سانتی‌متر باید دو ساختمان که اختلاف سطح دارند به وسیله درز انقطاع از یکدیگر جدا شوند.

۵. روش‌های متداول تقویت ستون‌های کوتاه بتن‌آرمه

استفاده از مواد کامپوزیت الیافی (*FRP*) که در سال‌های اخیر استفاده از این مواد در مقاوم‌سازی و بهسازی

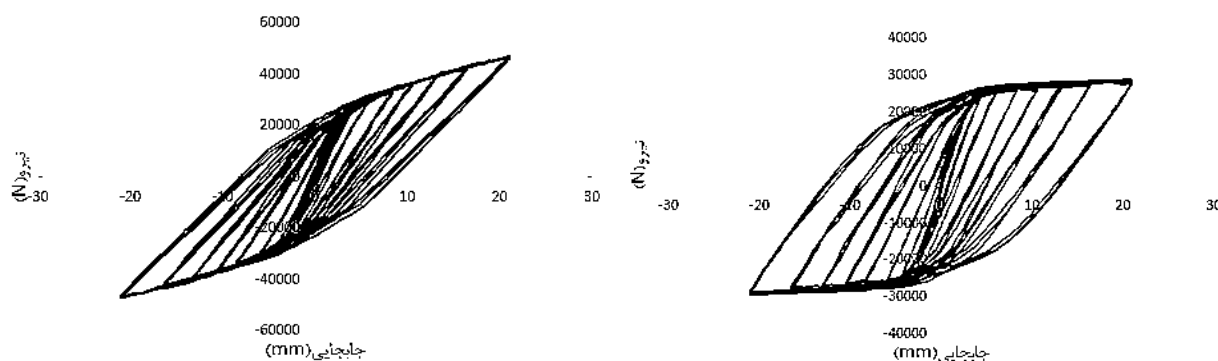


شکل ۶- روش‌های تقویت ستون‌های کوتاه با استفاده از الیاف [۱۲]

کتر به مراقبت‌های بعدی از مزایای این روش است [۱۳ و ۱۴].

۶. مدلسازی

دو ستون کوتاه دایره‌ای (یک ستون مرجع و یک ستون مقاوم‌سازی شده به صورت دور پیچ کامل یک لایه با الیاف CFRP) با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS مدلسازی شد که نتایج و منحنی‌های آن به قرار زیر می‌باشد:



ب) مدل مقاوم‌سازی شده

الف) مدل مرجع

شکل ۷- منحنی‌های هیستریزیس

جدول ۱- شکل‌پذیری و انرژی جذب‌شده ستون‌ها

ستون مرجع	ستون تقویت‌شده		
۱	۲/۰۶	شکل‌پذیری	
۱۸۸۶۲۹۸۹/۳۲	۲۳۲۹۸۴۰۸/۸	انرژی جذب‌شده (N.mm)	
۲/۸	۴/۷	بار ماکزیمم (Ton)	

به‌گونه‌ای است که از وقوع چنین پدیده‌ای جلوگیری به عمل آید. در سازه‌هایی که المان غیر سازه‌ای مانند دیوار باعث ایجاد پدیده مخرب ستون کوتاه می‌شود (ساختمان‌های آموزشی و... که نیاز به نورگیر و تهویه می‌باشد)، باید طراح سازه تأثیر دیوارهای پرکننده بنایی را در رفتار سازه ناشی از بارگذاری جانبی یا با ایجاد فاصله جداکننده از ستون در نظر بگیرد. اگر فاصله جداکننده تأمین شود، باید اقدامات مناسب جهت پایداری خارج از

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود استفاده از الیاف FRP به صورت دور پیچ کامل به میزان قابل‌توجهی باعث افزایش شکل‌پذیری و انرژی جذب‌شده می‌گردد، همچنین باعث تغییر مود شکست از حالت برشی به خمشی می‌شود.

۷. نتیجه‌گیری

ستون کوتاه یکی از پدیده‌های مخرب در سازه‌های بتن آرمه می‌باشد. مشکل اصلی، در طراحی معماری ساختمان‌ها می‌باشد. مهم‌ترین راه‌حل مقابله با پدیده ستون کوتاه، لحاظ نمودن شرایط طرح معماری و اجرا

صفحه دیوار بنایی هنگام بارگذاری جانبی باد یا زلزله انجام صفحات FRP به‌ویژه به‌صورت دور پیچ کامل می‌باشد زیرا نسبت به دو روش دیگر (ورق پوش فولادی و زره‌پوش بتنی)، با توجه به افزایش سختی ستون و در نتیجه جذب نیروی زلزله در این روش‌ها، برتری دارد.

مراجع

[1] Guevara, L., EERI, M., Garcí'a, L. (2005). "The Captive- and Short-Column Effects". *The Professional Journal of the Earthquake Engineering Research Institute*, Vol. 21 (1), pp 141-160.

[۲] نشریه شماره ۱۲۰ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور (آیین‌نامه بتن ایران (آبا)).

[۳] کارگران، علی. عملکرد لرزه‌ای غیرخطی ستون کوتاه در سازه‌های بتن‌آرمه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد، ۱۳۸۶.

[۴] خیرالدین، علی. کارگران، علی. "بررسی رفتار لرزه‌ای ستون‌های کوتاه بتن‌آرمه ناشی از احداث سازه بر روی سطح شیب‌دار"، مجله علمی پژوهشی مدل‌سازی در مهندسی، دانشگاه سمنان، سال هفتم، شماره ۱۸، پاییز ۱۳۸۸.

[۵] خیرالدین، علی. نادرپور، حسین. حسینی و اعظم، سید روح‌الله. "بررسی تأثیر فرم معماری بر نحوه آسیب پذیری سازه‌ای"، اولین کنفرانس سازه و معماری، تهران، دانشگاه تهران، دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، ۱۳۸۶.

[۶] خیرالدین، علی. میر نظامی، علیرضا. بررسی رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های فلزی با اختلاف تراز، سومین همایش ملی نقد و بررسی آئین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، تهران، اسفند ۱۳۸۱.

[۷] تابش پور، محمدرضا. بخشی، علی. "ارزیابی محاسباتی شکست ستون کوتاه در هنگام زلزله"، پژوهشنامه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، سال هشتم، شماره اول، بهار ۸۴.

[8] Polyakov, S. V. (1960). "On the interaction between masonry filler walls and enclosing frame when loaded in the plane of the wall," in *Translation in Earthquake Engineering*, pp. 36-42, Earthquake Engineering Research Institute (EERI), San Francisco, Calif, USA.

[9] Ramin, K., Mehrabpour, F. (2014), "Study of Short Column Behavior Originated from the Level Difference on Sloping Lots during Earthquake (Special Case: Reinforced Concrete Buildings)", *Open Journal of Civil Engineering*, Vol. 4, pp 23-34.

[۱۰] مقررات ملی ساختمان، مبحث ششم، (۱۳۸۵)، "بارهای وارد بر ساختمان"، وزارت مسکن و شهرسازی، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان.

[11] Wang, D.Y., Wang, Z.Y., Smith, S.T., Yud, T. (2016). "Size effect on axial stress-strain behavior of CFRP-confined, square concrete columns". *Construction and Building Materials*, vol. 118, pp 116-126.

[12] Colomb, F., Tobbi, H., Ferrier, E., Hamelin b, P. (2008). "Seismic retrofit of reinforced concrete short columns by CFRP materials". *Composite Structures*, Vol. 8(2), pp 475-487.

[13] American Concrete Institute (ACI), Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificacio'n (Icontec), and Asociacio'n Colombiana de Ingenieri'a Sísmica (AIS), 2002. *Essential Requirements for Reinforced Concrete Buildings*, International Publication Series 1, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 246 pp.

[14] Committee 318, American Concrete Institute (ACI), 1971. *Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-71)*, Detroit, MI, 102 pp.

بررسی ترمودینامیکی محلول منفذی در حین هیدراسیون در ملات سیمان حاوی سرباره



میلاذ محمدی
کارشناسی ارشد عمران-سازه
دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی



امیر طریقت
دانشیار دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

چکیده

در دهه‌های اخیر، درک جنبه‌های اساسی شیمی سیمان پیشرفت کرده است. با توجه به این پیشرفت‌ها، ضروری است که واکنش‌های هیدراسیون مواد سیمانی با مدلسازی ترمودینامیکی بررسی شوند. فرایند هیدراسیون به‌طور چشم‌گیری تحت تأثیر شیمی سیمان و ساختار میکروسکوپی آن قرار دارد، چنان‌که با تغییر اندکی در مواد تشکیل‌دهنده سیمانی می‌توان تفاوت‌های زیادی در محصولات هیدراسیون به وجود آورد. در این مقاله از مدل‌های ترمودینامیکی برای بررسی تغییرات غلظت محلول منفذی در حین هیدراسیون سیمان حاوی سرباره با درصدهای جایگزینی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ در دمای ثابت $20C^{\circ}$ استفاده شده است. مدل‌سازی ترمودینامیکی بر اساس روش به حداقل رساندن انرژی آزاد گیبس در نرم‌افزار *GEM* می‌باشد. محاسبات ترمودینامیکی با استفاده از اندازه‌گیری ترکیب محلول منفذی می‌تواند برای شناسایی فازهای تشکیل شده تحت شرایط مختلف مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق محاسبات ترمودینامیکی نشان می‌دهند که استفاده از سرباره در همان سنین اولیه، باعث کاهش کلسیم، فلیایی‌ها، هیدروکسید و همچنین سولفور می‌شود که نشان‌دهنده جذب آنها و مصرف کلسیم هیدروکسید در طی واکنش‌های پوزولانی و تشکیل فازهای مفیدی همچون سیلیکات کلسیم هیدراته در حین هیدراسیون می‌باشد و در نهایت موجب بهبود خواص ساختاری، عملکرد و دوام مواد سیمانی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: هیدراسیون، مدل‌سازی، ترمودینامیک، سیمان پرتلند، سرباره

مقدمه

در دهه‌های اخیر، درک جنبه‌های اساسی شیمی سیمان بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این راه استفاده از علم ترمودینامیک بسیار با ارزش است. این دانش، انگیزه قوی برای توسعه ارتباط بین کانی‌شناسی و خواص مهندسی خمیر سیمان هیدراته و البته، پیش‌بینی بهبود در عملکرد محصولات سیمان را موجب می‌شود. ترکیب و

پیشرفت فاز آبی در طول هیدراسیون سیمان، درک مناسبی از فرآیندهای شیمیایی و واکنش‌های بین فازهای مایع و جامد می‌دهند، که تنظیم و سخت شدن سیمان را کنترل می‌کنند.

از مواد مکمل سیمانی (*SCM's*) همچون پوزولان‌ها برای بهبود ویژگی‌های سیمان استفاده می‌شوند. افزودن

پوزولان‌ها می‌تواند باعث کاهش هیدروکسید کلسیم در خمیر سیمان و بهبود نفوذپذیری سیمان گردد [۱].

ترکیب این مواد مکمل سیمانی با سیمان پرتلند سبب تشکیل یک سیستم پیچیده‌تر می‌شود. هیدراسیون سیمان پرتلند و واکنش هیدرولیک مواد مکمل سیمانی به‌طور هم‌زمان رخ می‌دهند و ممکن است بر روی یکدیگر تأثیر بگذارند. شیمی مواد مکمل سیمانی به‌طور کلی با محتوای کلسیم کمتر نسبت به سیمان پرتلند مشخص می‌شوند. بنابراین تفاوتی در هیدرات‌های تشکیل شده در طول هیدراسیون وجود دارد که بر روی مقاومت و دوام تأثیر می‌گذارد.

سرباره به‌عنوان یک ماده مکمل سیمانی، جایگزین بخشی از کلینکر در سیمان‌های آمیخته می‌شود و خواص هیدرولیکی نهفته سیمانی و برخی ویژگی‌های پوزولانی (واکنش با آب‌آهک) را از خود نشان می‌دهد. همچنین افزودن سرباره به سیمان پرتلند به دلیل اثر پرکنندگی می‌تواند به واکنش هیدراسیون کلینکر سیمان پرتلند سرعت ببخشد [۲]. استفاده از سرباره علاوه بر بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی سیمان پرتلند، اثرات زیست محیطی و اقتصادی مطلوبی نیز دارد. ترکیب سیستم‌های سیمانی هیدراته شده بسیار پیچیده است، از این رو با استفاده از مدل‌سازی هیدراسیون می‌توان شناخت بهتری نسبت به سیستم‌های سیمانی پیدا کرد.

در دهه‌های گذشته مطالعات متعددی بر روی مدل‌سازی عددی هیدراسیون سیمان انجام شده است. لوتنباخ و همکارانش با استفاده از ترکیب کدهای انتقال و مدل‌سازی ترمودینامیکی به توصیف مکانیزم هیدراسیون سیمان

پرداخته‌اند [۳]. راستین و همکارانش از محاسبات ترمودینامیکی برای به دست آوردن درک بهتری از تغییرات در سیستم‌های سیمانی تازه و مقایسه ترکیبات اندازه گیری شده از محلول منفذی با شاخص‌های اشباع برای جامدات مختلف (آب‌آهک، ژل سیلیکاتی، اترینگایت و...) استفاده کرده‌اند [۴].

هدف این مقاله این است که با استفاده از مدل‌سازی ترمودینامیکی، محلول منفذی را در حین هیدراسیون سیمان پرتلند معمولی و سیمان آمیخته با سرباره بررسی کند که چگونه اضافه کردن مقداری سرباره باعث تغییر در محلول منفذی سیمان پرتلند می‌شود.

مصالح مصرفی

مواد اولیه مورد استفاده شامل سیمان پرتلند و سرباره است. سرباره به کاربرده شده در این کار تحقیقاتی، سرباره شرکت سهامی ذوب‌آهن اصفهان می‌باشد که آنالیز شیمیایی آن در جدول ۱ آورده شده است [۵]. سیمان مصرفی، سیمان پرتلند نوع ۱- $N-42.5$ است، که شامل ۰/۲ درصد CO_2 می‌باشد [۳]. ترکیبات شیمیایی و مینرالی سیمان پرتلند نوع ۱- $N-42.5$ در جدول ۲ ارائه شده، که توسط آزمایش فلورسانس اشعه ایکس (XRF) به دست آمده است. در این مطالعه از نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۵ و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شده است. برای بررسی تغییرات غلظت محلول منفذی سیستم‌های سیمانی، هیدراسیون سیمان پرتلند معمولی و هیدراسیون همان سیمان با جایگزینی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد سرباره در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی سرباره (%) [۵]

SiO_2	Al_2O_3	CaO	FeO	MgO	S	MnO	V_2O_5	TiO_2	Na_2O	K_2O
۳۵	۹/۵۰	۳۷	۰/۷۰	۱۰/۹۱	۱/۱۵	۱/۴۶	۰/۱	۳/۵	۰/۴۸	۰/۷۰

جدول ۲- ترکیب سیمان پرتلند [۳]

ترکیب فازهای اصلی [g/۱۰۰ g]	آنالیز شیمیایی [g/۱۰۰ g]		
Alite	۶۲/۵	CaO	۶۳/۷
Belite	۱۰/۵	SiO ₂	۲۰/۱
Aluminate	۷/۱	Al ₂ O ₃	۴/۴
Ferrite	۸/۲	Fe ₂ O ₃	۲/۷
CaO(free)	۰/۸۵	CaO(free)	۰/۸۵
CaSO ₄ .2H ₂ O	۴/۷	MgO	۱/۶
K ₂ SO ₄	۱/۳	K ₂ O	۰/۸۶
Na ₂ SO ₄	۰/۱۴	Na ₂ O	۰/۱۵
MgO	۱/۶	CO ₂	۰/۲
K ₂ O	۰/۱۴	SO ₃	۲/۹
Na ₂ O	۰/۰۹	Ignition loss	۰/۷۲
CaCO ₃	۰/۴۵	سطح مخصوص [m ² /kg]	۳۵۰

مدل سازی ترمودینامیکی

مدل سازی ترمودینامیکی اولین بار توسط شیمیدان‌ها برای انجام محاسبات در سیستم‌های پیچیده چندجزیی که در طبیعت اتفاق می‌افتند توسعه داده شد. روال به کارگیری الگوریتم‌های خاص برای به حداقل رساندن انرژی آزاد گیبس بر روی کامپیوترها اجرا شده است [۶]. این رویکرد ترمودینامیکی برای رسیدن به درک بهتری از هیدراسیون مواد سیمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطالعات پیشین توسط گارتنر و جنینگز [۷] در سال ۱۹۸۷، بارنر [۸] در سال ۱۹۸۸، برون [۹] در سال ۱۹۸۹ و ریردن [۱۰] در سال ۱۹۹۲ انجام شده که ثابت کرده‌اند هیدراسیون سیمان از اصول اولیه شیمی فیزیک به وسیله به حداقل رساندن انرژی آزاد سیستم پیروی می‌کنند. این مطالعات فایده مدل‌های تعادل ترمودینامیکی برای بررسی هیدراسیون سیمان را نشان می‌دهند.

محاسبات ترمودینامیکی با استفاده از اندازه‌گیری ترکیب محلول منفذی می‌تواند برای شناسایی فازهای تشکیل شده تحت شرایط مختلف مورد استفاده قرار گیرد. در این کار، داده‌های ترمودینامیکی مورد استفاده برای گونه‌های آبی و فازهای گازی از پایگاه داده‌ای ترمودینامیکی *PSI-GEMS* آورده شده است [۱۱].

مدل سازی با استفاده از نرم‌افزار *GEM* ورژن ۳،۳ انجام شده که بر اساس روش به حداقل رساندن انرژی آزاد گیبس می‌باشد. واکنش‌های هیدراسیون سیمان به صورت تابعی از زمان هیدراسیون محاسبه شده است. مدل سازی ترمودینامیکی امکان پیش‌بینی تغییرات غلظت در محلول منفذی تحت شرایط مختلف را فراهم می‌کند و همچنین باعث کاهش در زمان و هزینه مصرفی می‌گردد. تعادل ترمودینامیکی در سیستم زمانی به دست می‌آید که دیگر تمایلی برای تغییر خود به خودی وجود ندارد به طوری که

در زمان تعادل، انرژی آزاد گیبس در حالت حداقل خود قرار دارد [۶].

GEMS یک ابزار نرم‌افزاری پیشرفته برای مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده‌ای است که شامل محلول‌های جامد غیر ایده‌آل، مایعات و محلول‌های آبی، فازهای کانی‌های شبه‌پایدار، جذب و تبادل یونی است. پایگاه‌های داده‌ای *GEMS* از فرمت‌های مبتنی بر واکنش و داده‌های ترمودینامیکی حالت استاندارد حمایت می‌کنند. مزیت *GEMS* در مقایسه با سیستم‌های دیگر این است که پیچیدگی کمتری دارد و شامل فرآیندهای تکراری بی‌اثر نمی‌باشد. همچنین امکاناتی را برای افزودن کانی‌های جدید به پایگاه داده عرضه می‌کند [۱۲ و ۱۳].

برای ورودی‌های آن می‌توان از مشخصات *XRD* و *XRF* مواد استفاده کرد و نتایج مدل‌سازی آن به راحتی می‌تواند به صورت نمودار، جدول و یا فایل‌های متنی مورد استفاده قرار گیرد و رابط کاربری گرافیکی آن باعث می‌شود تنظیم و یا اصلاح مدل‌سازی‌ها، سریع و آسان گردد.

نتایج مدل‌سازی و تحلیل آن‌ها

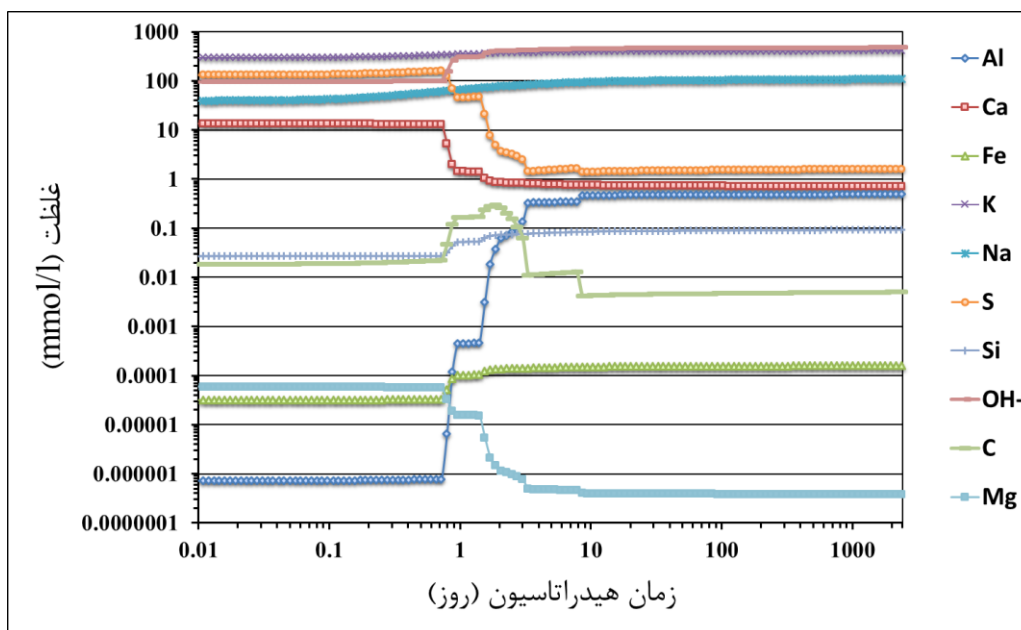
ترکیب فاز آبی سیمان هیدراته شده می‌تواند بینش خوبی نسبت به فرآیندهای شیمیایی و واکنش‌های بین فاز جامد و مایع به ما بدهد. ترکیب فاز مایع برای پی بردن به اطلاعاتی در مورد فاز جامد موجود در خمیر سیستم‌های سیمانی و سطح اشباع آن‌ها در زمان‌های مختلف هیدراسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد و تعیین می‌کند که کدام یک از فازهای هیدراته شده می‌تواند پایدار بماند و یا می‌تواند رسوب کند. تعیین ترکیب محلول منفذی و تغییر آن در طول هیدراسیون می‌تواند در بسیاری از موارد

به‌عنوان شرط لازم برای یک مدل ترمودینامیکی خوب در نظر گرفته شود.

روند مشاهده شده در مورد غلظت سدیم، پتاسیم، گوگرد، هیدروکسید، کلسیم، آلومینیوم، سیلیسیم، منیزیم، کربن و آهن در محلول منفذی سیمان پرتلند در شکل ۱ نشان داده شده است. در طول ساعات اولیه، ترکیب محلول منفذی تحت سلطه سدیم، پتاسیم، کلسیم، هیدروکسید و سولفور است. غلظت بالای مشاهده شده سدیم، پتاسیم و سولفات تنها پس از چند دقیقه می‌تواند به علت انحلال سریع فازهای سولفات قلیایی باشد. پتاسیم و سدیم، کاتیون‌های اصلی در محلول منفذی هستند. افزایش تدریجی مشاهده شده غلظت‌های قلیایی می‌تواند به دلیل کاهش محلول منفذی (به دلیل این‌که آب موجود توسط محصولات هیدراسیون مختلف مصرف می‌شود) و آزاد شدن تدریجی قلیاهای به دام افتاده در کانی‌های کلینکر که به آرامی در حال هیدراته شدن هستند، باشد.

غلظت سولفور، کلسیم و هیدروکسید در طول ساعات اولیه ثابت باقی می‌ماند. غلظت آلومینیوم، آهن، منیزیم، کربن و سیلیسیم در محلول منفذی بسیار کم است (اکسیدهای این عناصر با هم حدود ۰.۲۹٪ وزنی سیمان پرتلند معمولی را تشکیل می‌دهند).

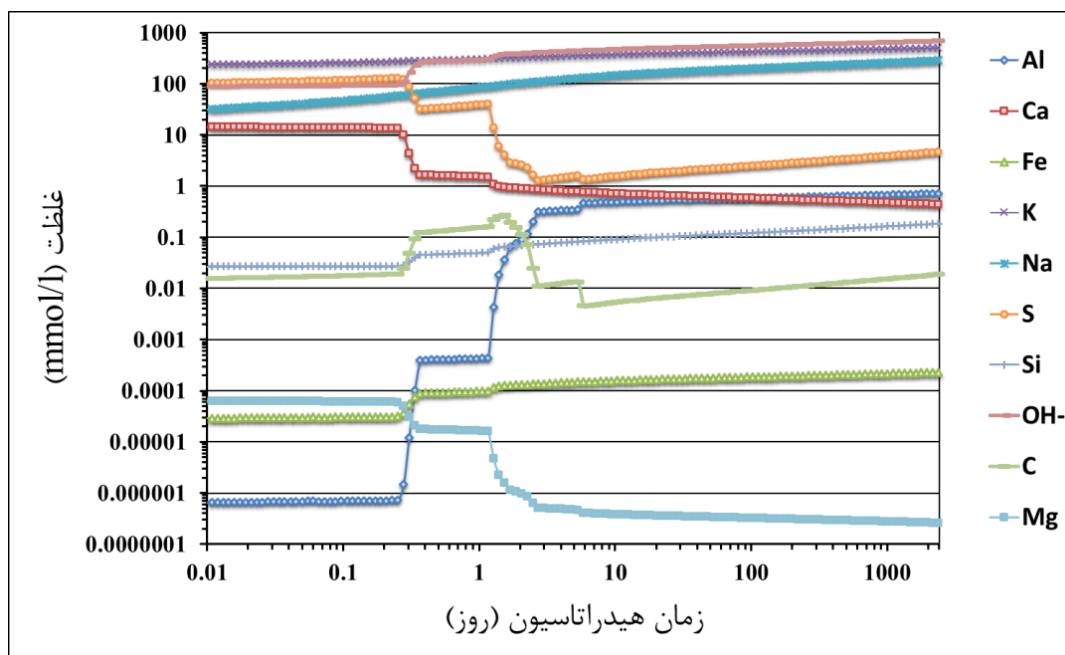
در بین ۱ تا ۳ روز از آغاز هیدراسیون، تغییر قابل‌ملاحظه‌ای در ترکیب محلول منفذی مشاهده می‌شود. غلظت کلسیم و سولفور به شدت کاهش می‌یابد، همان‌طور که گچ برای تشکیل اترینگایت به انتها می‌رسد؛ درحالی‌که غلظت هیدروکسید، سیلیسیم، آلومینیوم و آهن در همین زمان افزایش می‌یابد.



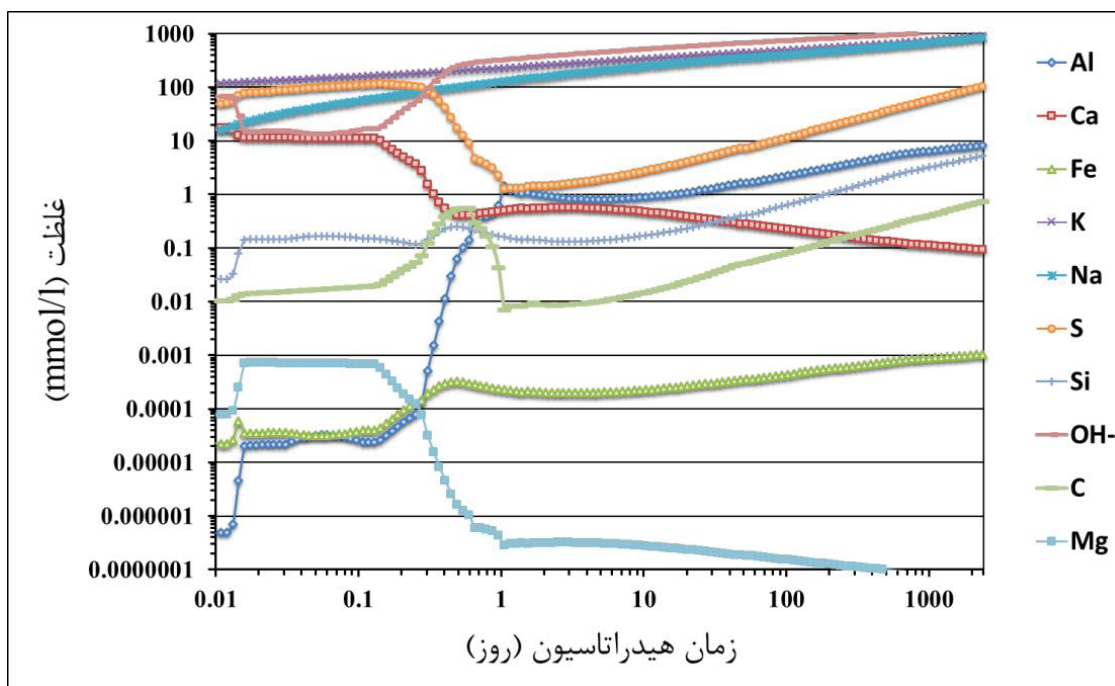
شکل ۱. تغییرات غلظت ترکیب‌های محلول منفذی در حین هیدراسیون سیمان پرتلند (w/c=۰/۵)

کاهش واضحی دارد که مربوط به مصرف کلسیم هیدروکسید در طی واکنش‌های پوزولانی است. غلظت سیلیسیم و آلومینیوم نسبتاً پایین است. در زیر به‌عنوان نمونه، تغییرات غلظت ترکیب‌های محلول منفذی در حین هیدراسیون سیمان پرتلند با جایگزینی‌های ۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ سرباره و در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵ در شکل‌های ۲-۴ آورده شده است.

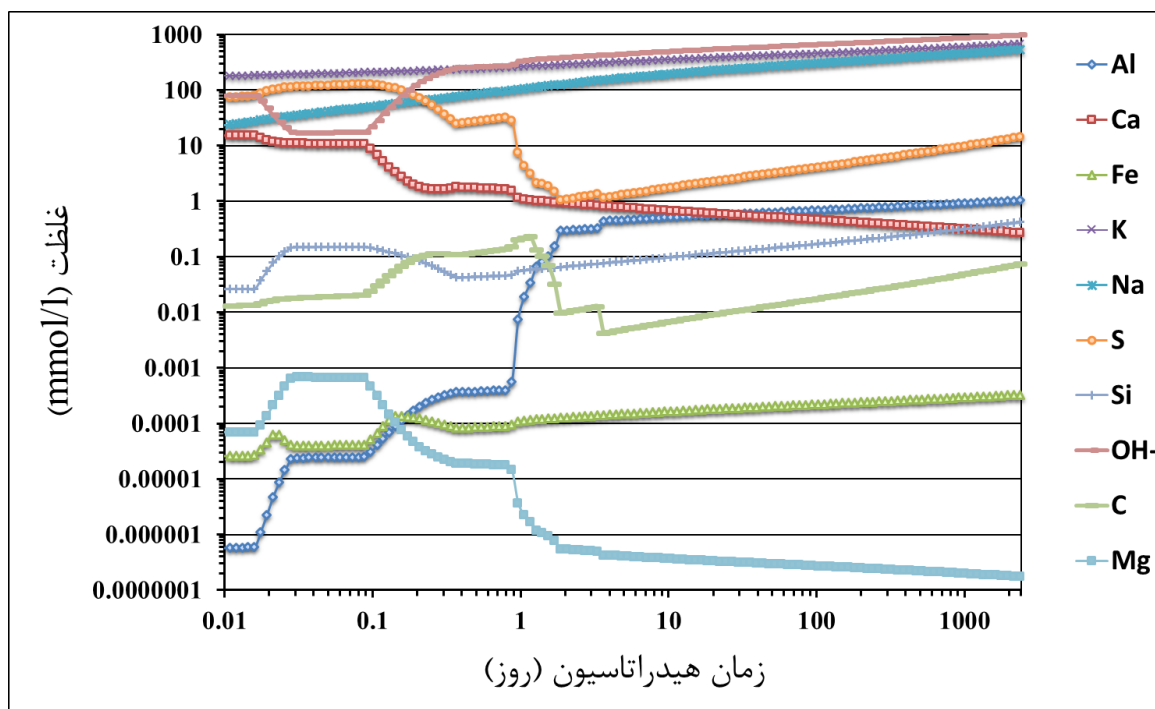
محلول منفذی سیمان‌های حاوی سرباره در سنین اولیه هیدراسیون، غلظت قلیایی کمتری نسبت به سیمان پرتلند دارند که می‌تواند به علت رقیق‌سازی سیمان پرتلند توسط سرباره و همچنین نشان‌دهنده‌ی جذب مواد قلیایی توسط محصولات هیدراسیون باشد. با این حال بعد از گذشت مدتی و در زمان‌های طولانی‌تر از هیدراسیون، غلظت قلیایی‌ها برای سیمان‌های حاوی سرباره، افزایش می‌یابد. غلظت کلسیم در محلول منفذی سیمان‌های حاوی سرباره



شکل ۲. تغییرات غلظت ترکیب‌های محلول منفذی در حین هیدراسیون سیمان پرتلند با جایگزینی ۲۰٪ سرباره (w/s=۰/۵)



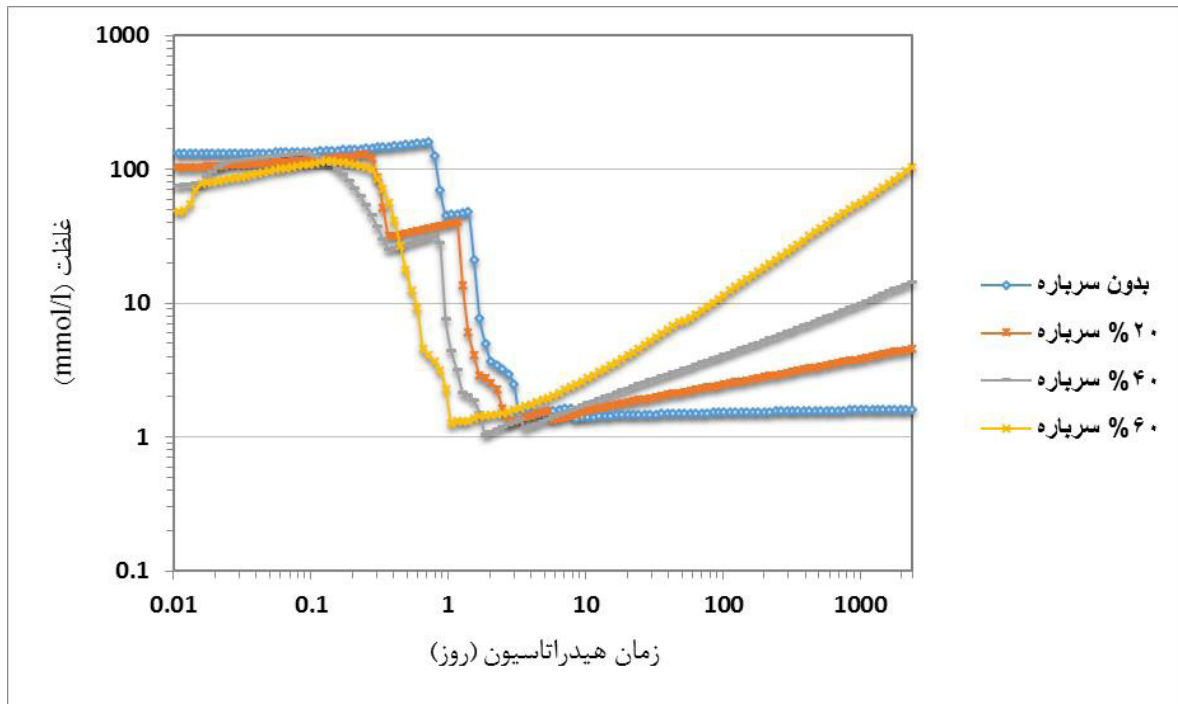
شکل ۳. تغییرات غلظت ترکیب‌های محلول منفذی در حین هیدراتاسیون سیمان پرتلند با جایگزینی ۴۰٪ سرباره (w/s=۰/۵)



شکل ۴. تغییرات غلظت ترکیب‌های محلول منفذی در حین هیدراتاسیون سیمان پرتلند با جایگزینی ۶۰٪ سرباره (w/s=۰/۵)

هیدراتاسیون، غلظت سولفور را کاهش می‌دهد. افزایش سولفور با گذشت زمان نیز می‌تواند به خاطر اضافه شدن سولفید در اثر انحلال سرباره به داخل محلول منفذی باشد (شکل ۵).

تفاوت اصلی در ترکیب محلول منفذی بین سیمان پرتلند و سیمان‌های حاوی سرباره، در غلظت سولفور است که اشاره دارد به تغییرات سولفات فازهای *AFt* و *AFm* جایگزینی سیمان پرتلند با سرباره به‌طور قابل توجهی در هفته اول



شکل ۵. تغییرات غلظت گوگرد در محلول منفذی سیمان‌های پرتلند حاوی سرباره به‌عنوان تابعی از زمان هیدراتاسیون ($w/s=0/5$)

نتیجه‌گیری

مدل‌سازی ترمودینامیکی ابزاری کارآمد برای پیش‌بینی تغییرات مرتبط با واکنش‌های هیدراتاسیون سیمان است. در مدل‌سازی با نرم‌افزار *GEM* تغییر پارامترها نسبت به سایر روش‌ها، سریع‌تر و آسان‌تر می‌باشد. مدل‌سازی‌های ترمودینامیکی به ما کمک می‌کنند که درک عمیق‌تری از فرآیندهای حاکم در سیستم‌های سیمانی به‌دست آوریم و همچنین بتوانیم بین سیستم‌های بررسی‌شده درون‌یابی کنیم. همچنین به بهینه‌سازی سیستم‌های سیمانی چندجزئی پیچیده نیز کمک می‌کند. مدل‌سازی ترمودینامیکی انجام‌شده قادر به محاسبه ترکیب محلول منفذی در طول هیدراتاسیون سیستم‌های سیمانی می‌باشد و به ما در درک اثر متقابل بین اجزای مختلف و محیط و پیش‌بینی تأثیر تغییرات در ترکیب سیمان کمک می‌کند. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان یک آزمایشگاه مجازی مواد ایجاد نمود که با صرف زمان و هزینه کمتر بتوان

فرآیندهای طبیعی مانند هیدراتاسیون و عوامل تأثیرگذار در آن را مدل‌سازی کرد. در این کار اثر افزودن سرباره در عملکرد مواد سیمانی مورد مطالعه قرار گرفته است. استفاده از سرباره باعث بهبود عملکرد مواد سیمانی می‌شود. سرباره بر روی میزان محصولات تشکیل شده تأثیر دارد. محاسبات ترمودینامیکی نشان می‌دهند که غلظت کلسیم در محلول منفذی سیمان‌های حاوی سرباره کاهش واضحی دارد که به دلیل مصرف هیدروکسید کلسیم در طی واکنش‌های پوزولانی و تشکیل فاز سیلیکات کلسیم هیدراته در حین هیدراتاسیون می‌باشد. همچنین با افزایش سرباره، غلظت‌های قلیایی‌ها و هیدروکسید در سنین اولیه، کاهش می‌یابند که نشان‌دهنده‌ی جذب مواد قلیایی توسط محصولات هیدراتاسیون می‌باشد.

که به دلیل اضافه شدن سولفید در اثر انحلال سرباره به داخل محلول منفذی است. و در کل استفاده از سرباره باعث بهبود خواص ساختاری، عملکرد و دوام مواد سیمانی می‌گردد.

تفاوت اصلی در ترکیب محلول منفذی بین سیمان پرتلند و سیمان‌های حاوی سرباره، در غلظت سولفور است که با جایگزینی سرباره به‌طور قابل توجهی در هفته اول هیدراسیون، کاهش می‌یابد. دلیل این امر افزایش نسبت Al_2O_3/SO_3 در سیمان‌های حاوی سرباره می‌باشد. همچنین در زمان‌های طولانی‌تر، این مقدار افزایش می‌یابد

مراجع

- [1] Uzal, B., Turanli, L. (2003). "Studies on blended cements containing a high volume of natural pozzolans". *Cement and Concrete Research*, 33, pp 1777–81.
- [2] Lothenbach, B., Le Saout, G. Ben Haha, M. Figi, R. Wieland, E. (2012). "Hydration of a low-alkali CEM III/B–SiO₂ cement (LAC)". *Cement and Concrete Research*, 42 (2), pp 410–423.
- [3] Lothenbach, B., Bary, B. Le Bescop, P. Schmidt, T. Leterrier, N. (2010). "Sulfate ingress in Portland cement". *Cem. Concr. Res.*, pp 1211–1225.
- [4] Lothenbach, B., Winnefeld, F. (2005). "Thermodynamic modelling of the hydration of Portland cement". *Cem. Concr. Res.* 36, pp 209–226.
- [5] Allahverdi, A., Najafi kani, I. Islamy namin, H. Negar Khatun, A. (2006). "Quality evaluation of Esfahan Steel slag to produce slag cement". *Eleventh National Congress of Chemical Engineering of Iran, Tehran, Tarbiat Modarres University.*
- [6] Kulik, D., Berner, U. Curti, E. (2003). "Modelling chemical equilibrium partitioning with the GEMS-PSI code". *PSI Scientific Report 4*, pp 109-122.
- [7] Gartner, E., Jennings, HM. (1987). "Thermodynamic of calcium silicate hydrates and their solutions". *Journal of the American Ceramic Society*, 70 (10), pp 743–749.
- [8] Berner, U. (1988). "Modelling the incongruent dissolution of hydrated cement minerals". *Radiochimica Acta*, 44/45, pp 387–393.
- [9] Brown, PW. (1989). "Phase equilibria and cement hydration". *Materials Science of Concrete*, 1 (1), pp 73–94.
- [10] Reardon, EJ. (1992). "Problems and approaches to the prediction of the chemical composition in cement/water systems". *Waste Management*, 12 (2–3), pp 221–239.
- [11] Thoenen, Tres., et al. (2014). "The PSI/Nagra Chemical Thermodynamic Database 12/07".
- [12] KULIK, D., DMYTRIEVA, S.V. WAGNER, T. THOENEN, T. BERNER, U. (2013). "GEMS: Gibbs energy minimization software for geochemical modeling". *Goldschmidt Conference Abstracts.*
- [13] Pichler, Markus., (2013). "ASSESSMENT OF HYDROGEN – ROCK INTERACTIONS DURING GEOLOGICAL STORAGE OF CH₄ – H₂ MIXTURES". *Department Mineral Resources & Petroleum Engineering Chair of Reservoir Engineering*, pp 39-40.

بررسی آزمایشگاهی تاثیر میکرو نانو حباب در حضور فوق روان کننده

بر زمان گیرش و مقاومت فشاری ملات سیمان



جلیل شفائی
استادیار دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه صنعتی شاهرود



سید فضل الله ساغروانی
دانشیار دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه صنعتی شاهرود



علی ترکی
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران
سازه های هیدرولیکی دانشگاه صنعتی شاهرود

چکیده

یکی از جدیدترین نوآوری های فناوری نانو استفاده از میکرو نانو حباب ها (میناب) به عنوان جایگزین آب در بتن می باشد. استفاده از میناب به عنوان جایگزین آب مصرفی در بتن می تواند در خصوصیات بتن اثرات ویژه ای داشته باشد. که بعضا این اثرات می تواند در جهت بهبود یا تضعیف خصوصیات بتن سخت شده و بتن در حالت خمیری باشد. با توجه به مشخصات فوق روان کننده ها، استفاده از آن ها می تواند نقش موثری در کاهش اثرات بعضا منفی میناب در خصوصیات بتن داشته باشد. در این پژوهش به منظور بررسی اثرات جایگزین میناب با آب در بتن در حضور درصد های مختلف روان کننده در مرحله ی اول تاثیر میناب بر زمان گیرش، جریان ملات سیمان و مقاومت فشاری ملات سیمان بررسی می گردد. بدین منظور تعداد ۱۶ نمونه آزمایشگاهی سوزن و یکات، ۴۸ نمونه آزمایشگاهی ملات فشاری سیمان و ۱۶ نمونه جریان ملات سیمان به ترتیب به منظور بررسی زمان گیرش، مقاومت فشاری و جریان سیمان با درصد های مختلف فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اتر (۰،۵، ۰،۹ و ۱،۴) در حضور و عدم حضور میناب آزمایش شد. نتایج نشان می دهد که فوق روان کننده باعث شد زمان گیرش افزایش چند ساعته بیابد و فوق روان کننده توانست کاهش جریان ملات سیمان با میناب را بهبود ببخشد. همینطور مقاومت فشاری با میناب نسبت به آب در سنین ۷ و ۲۸ روز افزایش داشت. مقاومت فشاری ملات سیمان با میناب در حضور فوق روان کننده نسبت به ملات سیمان با آب در حضور فوق روان کننده در سنین ۷ و ۲۸ روز افزایش داشته است که بیشترین مقاومت در ۰،۵ درصد فوق روان کننده رخ داد که در سن ۷ روز ۲۱ درصد افزایش و در سن ۲۸ روز ۱۰ درصد افزایش داشتیم.

کلمات کلیدی: ملات سیمان، مقاومت فشاری، زمان گیرش، میناب

۱- مقدمه

تکنولوژی نانو توسط ریچارد فیمن و مقاله معروف آن در سال ۱۹۵۹ با نام "اتاق های زیادی در کف وجود دارد"

معرفی گردید. [۱] نانوتکنولوژی یک شاخه نو ظهور در علم است که در ارتباط با فهمیدن و کنترل کردن مواد در ابعاد نانو می باشد. به طور مثال به مواد در ابعاد بین تقریبا ۱ تا

۱۰۰ نانومتر، نانو مواد گفته می شود. نوآور بودن فناوری نانو به طور چشمگیری، نوآوری فناوری سایر صنایع را نیز تحت تأثیر قرار می دهد. این امر فناوری نانو را به یک فناوری عام تبدیل می کند که در آن دگرگون سازی خلاقانه وجود داشته و نوآور بودن بسیار حایز اهمیت است [۲]. در صنعت ساخت و ساز طیف وسیعی از مواد مورد استفاده قرار می گیرند که بسته به کاربردها بایستی دارای خواص ویژه ای باشند. پس از موفقیت نانو سیلیس، بسیاری از نانو ذرات برای استفاده در بتن توسعه داده شدند، نانو آلومینا، نانو لوله کربنی و پلی کربوکسیلات و نانو کائولین و میناب^۱ از نمونه نانو موادی مصرفی در بتن هستند. برای بهبود کیفیت بتن سخت شده، کاهش نسبت آب به سیمان از ابتدای قرن بیستم در دستور کار ساخت بتن پایاتر و مقاومتر و با نفوذپذیری کمتر بوده و می باشد. همواره این کاهش W/C به کاهش کارایی و روانی بتن منجر می شد و تضادی وجود داشت که حل آن در گرو تغییر روش های ساخت و اجرا بود اما تا بکارگیری مواد کاهنده آب (روان کننده) تحول اساسی و عظیمی رخ نداد. استفاده همزمان از چند ماده نانو و فوق روان کننده ها در بتن باعث بهبود مشخصات بتن گردیده است. که در ادامه به مطالعات برخی از پژوهشگران در موارد استفاده از نانو مواد و فوق روان کننده ها می پردازیم.

۱-۲- پژوهش های اخیر:

افزودن نانو سیلیس به بتن موجب افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی، کاهش زمان گیرش و کاهش نفوذپذیری آب درون بتن و همچنین مقاومت بالاتر در برابر حمله های شیمیایی می شود. آزمایش هایی که بر روی نانو سیلیس انجام شده، نشان داده اند که این ذرات نه تنها برای محیط زیست مشکل ساز نیستند بلکه نتایج بهتری در مقایسه با میکرو سیلیس ارائه می کنند [۳]. در استفاده

۵٪ نانو سیلیس در بتن با عملکرد خیلی بالا، اسلامپ از ۳۳،۷۵ سانتی متر به طور قابل توجهی به ۲۲،۵ سانتی متر کاهش می یابد، که منجر به کاهش کارایی بتن می شود [۴].

السید عبدال رؤف و همکاران در سال ۲۰۱۴ نشان دادند که با اضافه کردن ۰،۴ و ۰،۸ درصد فوق روان کننده ی پلی کربوکسیلیک نسبت به وزن سیمان به ازای صفر تا ۳ درصد نانو سیلیکا مقاومت فشاری افزایش می یابد. [۵]

حبشی و احدیان در سال ۲۰۱۴ نشان دادند ۰،۴ درصد نانو سیلیکا و ۰،۸ درصد فوق روان کننده از مقدار سیمان، مقاومت فشاری و خمشی ۲۸،۷ و ۴۲ روزه بتن افزایش می دهد. [۶]

در سال ۲۰۱۵ شیخ و ساپیت نشان دادند که حضور فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات و نانو رس و نانو سیلیکا مقاومت های اولیه ملات سیمان را ۲۶ تا ۲۸ درصد افزایش می دهد. [۷]

با بهبود بخشی دمایی، با افزایش دما از ۲۵ تا ۴۵۰ درجه سانتی گراد، در استفاده های ۰،۱ و ۰،۲٪ نانو آلومینا در عدم حضور فوق روان کننده، افزایش مقاومت فشاری ۱۰،۸۹٪، ۳۱،۰۳٪ و ۲۰،۳۳٪ و افزایش مقاومت فشاری ۲۵،۲۲٪، ۴۵،۷۴٪ و ۲۸،۴۹٪ در حضور فوق روان کننده بدست آمده است [۸].

طبق آزمایش های نظری و همکارانش، بکار گیری حداکثر ۲٪ $nano-Fe_2O_3$ در بتن باعث کاهش زمان گیرش اولیه و نهایی بتن و افزایش مقاومت کششی و خمشی آن می گردد. درصد بهینه برای افزایش مقاومت خمشی و کششی ۱٪ است که بیشترین مقاومت را باعث میشود. افزایش مقاومت خمشی بدلیل مصرف سریع $Ca(OH)_2$ که در طی هیدراتاسیون سیمان پرتلند شکل گرفته است [۹].

طبق آزمایش های انجام شده عارفی و همکاران، با افزودن میناب، اسلامپ بتن کاهش می یابد. مقاومت فشاری، کششی، خمشی بتن افزایش می یابد. و زمان گیرش اولیه و ثانویه سیمان را کاهش می دهد. [۱۰]

^۱ Micro- nano bubble (MNB)

میشود و باهم مقایسه می شود. مواد استفاده شده در این پژوهش به شرح زیر می باشد:

۱-۲- سیمان: سیمان پرتلند تیپ ۲ مطابق استاندارد ۳۸۹ ملی ایران ساخته شده توسط شرکت سیمان شاهرود برای ساخت ملات و خمیر سیمان استفاده شده است.

۲-۲- آب: آب استفاده شده در این تحقیق از آب لوله کشی شهری شهرستان شاهرود می باشد. میناب به روش هیدرودینامیکی توسط *Iranian patent #83998* تولید می شود و مورد استفاده قرار گرفت. که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آب و میناب در جدول ۱ نشان داده شده است.

در این پژوهش قصد داریم تاثیر همزمان میناب و فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اتر در سه درصد ۰,۵ و ۰,۹ و ۱,۴ نسبت به وزن سیمان بر مقاومت فشاری ملات سیمان و زمان گیرش بررسی کنیم.

۲- مواد و روش ها:

برای مطالعه تاثیر همزمان میناب و فوق روان کننده یک سری آزمایش در مقیاس آزمایشگاهی طراحی و اجرا شده است و تمامی آزمایش ها در آزمایشگاه بتن و مصالح ساختمانی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شده است. ابتدا آزمایشات با آب معمولی انجام شده سپس با میناب انجام

جدول ۱- مشخصات اولیه آب معمولی و میناب

آب معمولی	میناب	موارد اندازه گیری
۲۵,۱	۲۵,۵	دما (°C)
۸,۱۷	۸,۳۴	Ph
۵۳۰	۱۰۶۵	قابلیت هدایت الکتریکی (μs/cm)
۱,۵۴	۲۹,۱۲	کدورت (ntu)
۱,۵۶	۱,۵۷	نیترات (mg/lit)
۱۰۰,۵	۱۰۰,۲	سولفات (mg/lit)
۲۳,۶	۲۳,۷	کلر (mg/lit)



شکل ۱- افزودنی کاهنده ی آب

۳-۲- مصالح سنگی: ماسه بکار رفته شده در ملات سیمان سیلیسی می باشد، که عبوری از الک ۳۰ و مانده روی الک ۵۰ می باشد و دانه بندی آن مطابق استاندارد *ASTM C778* است.

۴-۲- افزودنی کاهنده آب: افزودنی مورد استفاده از نوع فوق روان کننده^۲ بر پایه پلی کربوکسیلات اتر با وزن مخصوص ۱,۱ کیلوگرم بر لیتر و از افزودنی های نوع *G* مطابق *ASTM C494* و استاندارد ملی ایران *ISIRI 2930* می باشد.

۵-۲- آزمایش های بر روی سیمان: ابتدا با استفاده از استاندارد *ASTM C187* غلظت نرمال سیمان هیدرولیکی

² Super plastizer (SP)

جدول ۲- مقادیر سیمان و آب و فوق روان کننده

مقدار SP (gr)	سیمان (gr)	آب (gr)
0	۶۵۰	۱۶۲,۵
۰,۵ درصد وزن سیمان = ۳,۲۵	۶۵۰	۱۶۲,۵
۰,۹ درصد وزن سیمان = ۵,۸۵	۶۵۰	۱۶۲,۵
۱,۴ درصد وزن سیمان = ۹,۱	۶۵۰	۱۶۲,۵

۲-۶- آزمایش جریان سیمان هیدرولیکی:

تهیه ملات: ملات سیمان طبق روش ارائه شده در *ASTM C305* ساخته شد سپس با توجه استاندارد ملی ایران *ISIRI 2930* برای کمترین درصد فوق روان کننده ۱۲ درصد کاهش آب در نظر گرفته شد و بقیه درصد های کاهش آب با آزمون و خطا بدست آمد که برای صحت سنجی آن آزمایش جریان ملات سیمان هیدرولیکی با توجه به استاندارد *ASTM C1437* انجام شد. جدول ۳ طرح مخلوط ملات سیمان برای آزمایش جریان ملات سیمان در حضور درصد های مختلف فوق روان کننده نشان می دهد. تعداد نمونه ها برای جریان سیمان هیدرولیکی در مجموع ۱۶ می باشد.

جدول ۳- طرح مخلوط ملات سیمان برای آزمایش جریان ملات سیمان

مقدار SP (gr)	درصد کاهش آب	سیمان (gr)	آب (gr)	ماسه (gr)
۰,۰	۰,۰	۵۰۰	۲۴۲	۱۲۷۵
۰,۵ درصد سیمان = ۲,۵	۱۲ درصد	۵۰۰	۲۱۲,۹۶	۱۲۷۵
۰,۹ درصد سیمان = ۴,۵	۲۲ درصد	۵۰۰	۱۸۸,۷۶	۱۲۷۵
۱,۴ درصد سیمان = ۷	۳۵ درصد	۵۰۰	۱۵۷,۳	۱۲۷۵

Toni Technic تست شده است. تعداد نمونه در هر مقاومت ۳ تا می باشد که در کل ۴۸ تا نمونه برای این آزمایش ساخته شد. جدول ۴ طرح مخلوط ملات سیمان برای آزمایش مقاومت فشاری نشان می دهد.

با نسبت آب به سیمان ۰,۲۵ بدست آمد خمیر سیمان را درست کردیم، سپس براساس استاندارد *ASTM C191* زمان گیرش سیمان اندازه گیری شد و درصد های مختلف از فوق روان کننده را به آن اضافه کردیم. جدول ۲ مقادیر سیمان و آب و فوق روان کننده را برای آزمایش زمان گیرش سیمان نشان می دهد. تعداد نمونه ها برای زمان گیرش ۱۶ می باشد.



شکل ۲- خمیر سیمان در حضور فوق روان کننده

۲-۷- تعیین مقاومت فشاری ملات سیمان: این آزمایش طبق استاندارد *ASTM C109* بر نمونه های مکعبی ۵۰ میلیمتری در روزهای ۷ و ۲۸ انجام شده است. نسبت آب به سیمان ۰,۴۸۵ ثابت نگه داشته شده است. نمونه ها توسط جک هیدرولیکی کامپیوتری ساخت شرکت

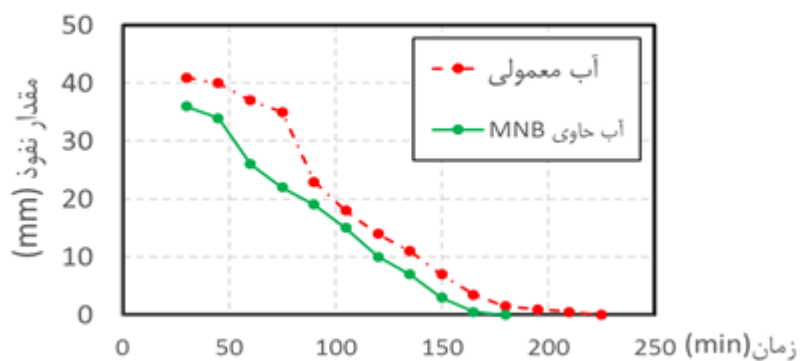
جدول ۴- طرح مخلوط ملات سیمان برای آزمایش مقاومت فشاری

مقدار SP(gr)	درصد کاهش آب	سیمان (gr)	آب (gr)	ماسه (gr)
۰,۰	۰,۰	۲۵۰	۱۲۱,۲۵	۶۸۷,۵
۰,۵ درصد سیمان = ۱,۲۵	۱۲ درصد	۲۲۰	۱۰۶,۷	۷۳۲,۱
۰,۹ درصد سیمان = ۲,۲۵	۲۲ درصد	۱۹۵	۹۴,۵۸	۷۶۹,۲
۱,۴ درصد سیمان = ۳,۵	۳۵ درصد	۱۶۲,۵	۷۸,۸۱	۸۱۷,۴

روان کننده می توان گفت در درصد های ۰,۵ و ۰,۹ ابتدا اثر میناب عمل می کند و باعث کاهش گیرش سیمان شده است ولی با گذشت زمان این اثر از بین می رود و اثر فوق روان کننده جایگزین آن می شود. اما در درصد ۱,۴ درصد این قضیه برعکس شده و ابتدا فوق روان کننده عمل می کند سپس با گذشت زمان میناب اثر می کند و باعث کاهش زمان گیرش می شود. (شکل ۶)

۳. نتایج و بحث:

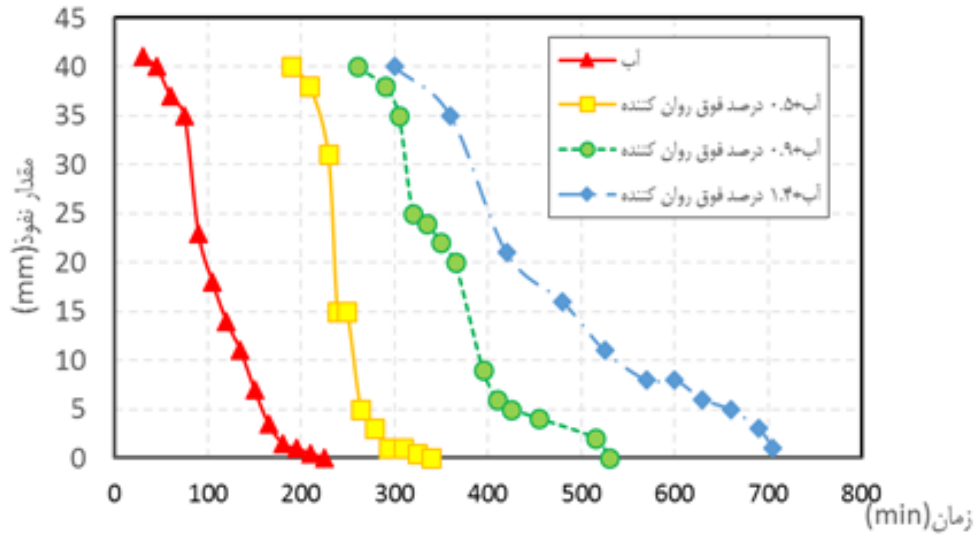
۱-۳ زمان گیرش: زمان گیرش اولیه خمیر سیمان حاوی میناب حدود ۳۰ دقیقه و زمان گیرش ثانویه حدود ۴۵ دقیقه کاهش یافت (شکل ۳). با اضافه کردن فوق روان کننده زمان گیرش اولیه و ثانویه خمیر سیمان با آب و میناب به سمت جلو پیش رفت و هرچه مقدار فوق روان کننده بیشتر بود این زمان بیشتر بود (شکل ۴ و ۵). در مقایسه میناب و آب در حضور درصد های مختلف فوق



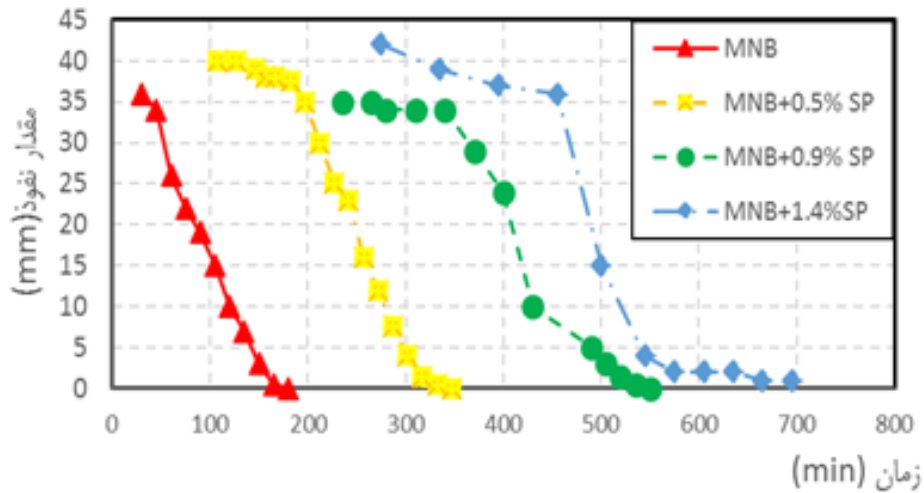
شکل ۳- مقایسه زمان گیرش سیمان حاوی میناب و آب معمولی

حضور فوق روان کننده تقریباً برابر جریان سیمان بدون فوق روان کننده است. همچنین همانطور که انتظار می رفت میناب جریان ملات را کاهش داد ولی این کاهش را فوق روان کننده بهبود داد. (شکل ۷)

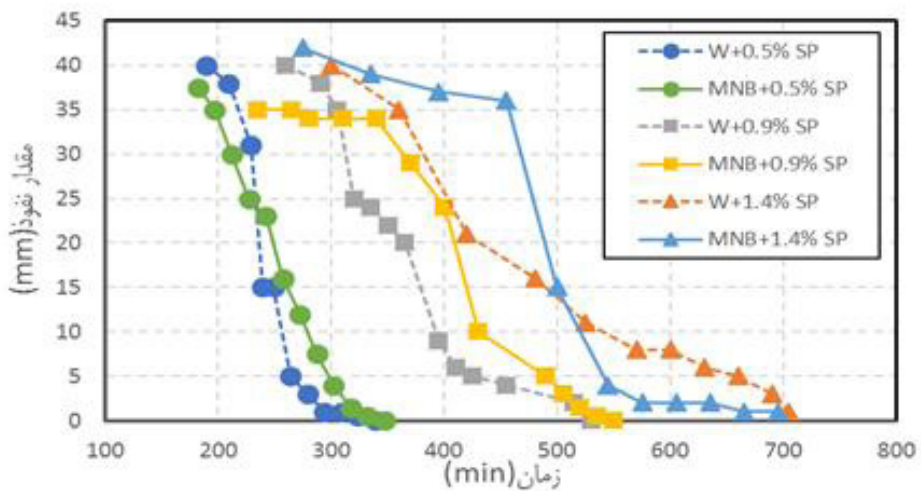
۲-۳ جریان ملات سیمان: در این پژوهش به ازای استفاده از هر درصد از فوق روان کننده مقداری کاهش آب فرض شده است که برای صحت سنجی آن آزمایش جریان ملات سیمان انجام شد. نتایج نشان می دهد این فرض تقریباً درست و قابل قبول است زیرا جریان سیمان در



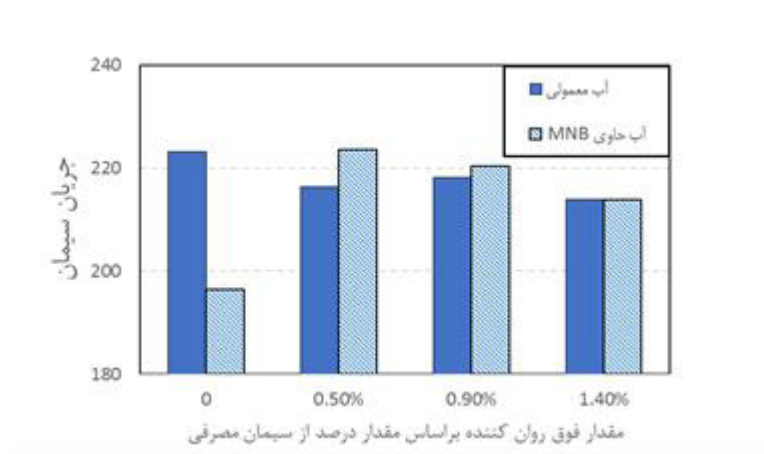
شکل ۴- مقایسه زمان گیرش سیمان با آب معمولی در حضور درصد های مختلف فوق روان کننده



شکل ۵- مقایسه زمان گیرش سیمان با میناب در حضور درصد های مختلف فوق روان کننده



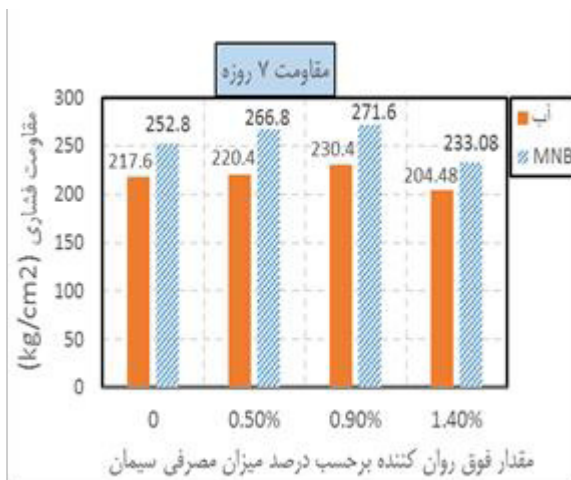
شکل ۶- مقایسه زمان گیرش سیمان با آب و میناب در حضور درصد های مختلف فوق روان کننده



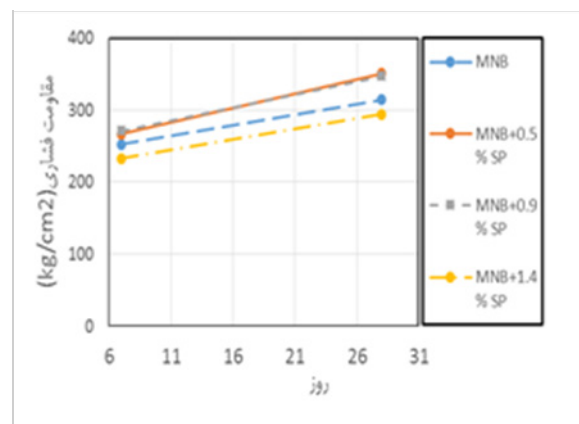
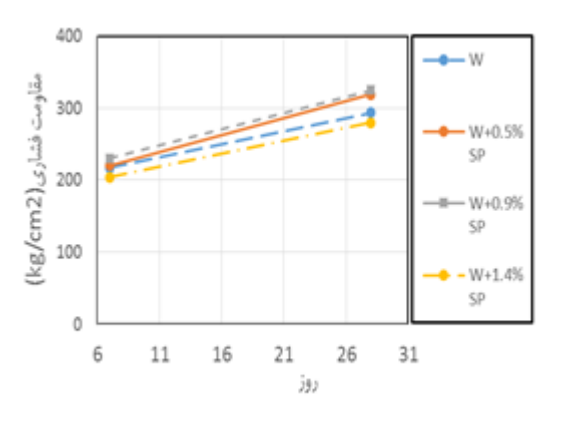
شکل ۷- صحت سنجی مقدار آب کاهش داده شده برای فوق روان کننده

روان کننده باعث افزایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه شده است. اما این افزایش مقاومت با گذشت زمان کمتر می شود (شکل ۸). روند کسب مقاومت فشاری ملات حاوی میناب و آب معمولی در حضور درصد های مختلف فوق روان کننده در شکل ۹ نشان داده شده است.

۳-۳ آزمایش مقاومت فشاری ملات سیمان: با توجه به طرح مخلوط ملات سیمان برای آزمایش مقاومت فشاری نتایج نشان داد که حضور میناب در ملات سیمان باعث افزایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه ملات سیمان می گردد. همینطور ملات سیمان با میناب در حضور فوق



شکل ۸- مقاومت فشاری ملات سیمان با آب و میناب در حضور درصد های مختلف فوق روان کننده در سنین ۷ و ۲۸ روزه



شکل ۹- روند کسب مقاومت فشاری ملات سیمان حاوی میناب و آب در حضور درصد های مختلف روان کننده

۴. نتیجه گیری:

فوق روان کننده استفاده شد که نتایج نشان داد بیشترین مقاومت فشاری بهینه در ۰,۵ درصد فوق روان کننده با افزایش ۲۱ درصدی در سن ۷ روزه و افزایش ۱۰ درصدی در سن ۲۸ مشاهده شد. در ۰,۹ درصد مقاومت فشاری در سن ۷ روزه ۱۸ درصد افزایش و در ۲۸ روزه ۷ درصد افزایش داشت و همینطور در ۱,۴ درصد مقاومت فشاری به دلیل کاهش شدید سیمان کمتر از حالت بدون فوق روان کننده شد و مقاومت فشاری آن ملات سیمان با میناب در سن ۷ روزه ۱۴ درصد افزایش و ۲۸ روزه ۵ درصد افزایش داشت. این کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه نسبت به مقاومت فشاری ۷ روزه نشان می دهد که این افزایش مقاومت فشاری به مقدار سیمان هم بستگی دارد هرچقدر سیمان کم باشد این افزایش کمتر بوده و در طی زمان سریعتر این افزایش، کاهش می یابد.

در این پژوهش به بررسی اثرات میناب و فوق روان کننده بر بتن، تعدادی نمونه با مشخصات گفته شده در این تحقیق ساخته شده که نتایج نشان می دهد میناب باعث کاهش زمان گیرش اولیه و ثانویه شده که این امر باعث می شود ملات سریعتر خود را بگیرد و سریعتر به مقاومت دست یابد که باعث افزایش مقاومت فشاری ملات در سنین اولیه شده است. این افزایش با مرور زمان کم می شود و اثر میناب کم تر به چشم می آید. همانطور که در نتایج پیداست در سن ۷ روزه مقاومت فشاری ملات سیمان با میناب ۱۶ درصد افزایش نسبت ملات سیمان با آب معمولی داشته است و این افزایش به ۷ درصد در سن ۲۸ روزه کاهش پیدا کرده است.

به دلیل گیرش سریع سیمان با میناب، کارایی و جریان ملات سیمان کاهش پیدا می کند که برای بهبود آن از

۵. مراجع:

- [1] Feynman R (1960), "There's plenty of room at the bottom", reprint from the speech given at the annual meeting of the West Coast section of the American Physical Society. *Caltech Engineering and Science*;23:22-36.
- [2] Bae S., Lim J. S., Shin K. M., Kim C. W., Kang S. K., Shin M., (2013) "The innovation policy of nanotechnology development and convergence for the new Korean government.", *Journal of nanoparticle research* 15.11: 1-15.
- [3] Chong K. P, Garboczi E. J (2002), "Smart And Designer Structural Material Systems", *Process in Structural Engineering and Materials*, 4(4):417-430.
- [4] Ganesan K.A., (2012), "Strength and water absorption properties of ternary blended cement mortar using rice husk ash and metakaolin", *Scholarly Journal of Engineering Research* . 1 (4): 51-59
- [5] Rauof, E. Elkady, H. Ragab, M. "Investigation on Concrete Properties for Nano Silica Concrete by using Different Plasticizers". *Civil and Environmental Research*, Vol.6, No.9, 2014.
- [6] Habashi, S. Ahadiyan, J. "Effects of Nano-material and R-B super plasticizer on the compressive strength of concrete, Type 2 Portland cement". *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, Vol 3 (4) March 2014: 40-47.
- [7] Shaikh, F. Supit, W. "Effects of Superplasticizer Types and Mixing Methods of Nanoparticles on Compressive Strengths of Cement Pastes". *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- [8] Heikal M, Ismail M.N, Ibrahim N.S (2015), " Physico-mechanical, microstructure characteristics and fire resistance of cement pastes containing Al₂O₃ nano-particles" *Construction and Building Materials* 91 232-242.
- [9] Nazari, A. Riahi, Sh. Shamekhi, S.F. Khademno, A(2010), "Assessment of the effects of the cement paste composite in presence TiO₂ Nanoparticles", *Journal of American Science*, vol.6(4), pp.43-46.
- [10] Arefi, A. Saghavani, S.F. Mozaffari, R. (2016) "Mechanical Behavior of Concrete, Made with Micro-Nano Air Bubbles", *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 49(1): 139 - 147

خصوصیات مقاومتی ملات های ماسه سیمان

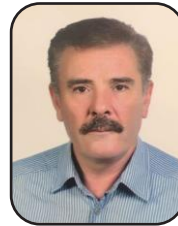
حاوی پودر دیاتومیت خام معدن ممقان



جمیل کسائی
کارشناس ارشد دانشکده
عمران دانشگاه تبریز



زهرا احمدی
دانشجوی کارشناسی ارشد
دانشکده علوم طبیعی
دانشگاه تبریز



جمشید اسماعیلی
دانشیار دانشکده عمران
دانشگاه تبریز



سودابه شریفی سیزکوه
دانشجوی کارشناسی دانشکده
عمران دانشگاه تبریز



کیوان عندلیبی
دانشجوی دکتری دانشکده
عمران دانشگاه تبریز

چکیده

این مقاله نتایج مطالعات بر روی خواص ملات ماسه سیمانی حاوی پودر دیاتومیت خام که جایگزین سیمان شده است را ارائه می دهد. استفاده از حجم زیادی از پودر های پوزولانی، تقاضای سیمان در صنعت ساخت را کاهش داده و بدین گونه هزینه ی تولید بتن کاهش یافته و از آلودگی زیست محیطی ناشی از انتشار گاز CO_2 کارخانه های سیمان کاسته می شود. هدف از این مطالعه بررسی ویژگی های کلیدی ملات سیمانی سازگار با محیط زیست است، که پودر دیاتومیت خام با درصدهای مختلف در آن جایگزین سیمان شده است. در پژوهش پیش رو به بررسی ملات سیمان حاوی ۴ مقدار درصد مختلف از پودر دیاتومیت خام که جایگزین سیمان شده (۰، ۱۵، ۳۰، ۴۰ درصد وزنی از کل مواد سیمانی) پرداخته شده است. با انجام آزمایش میز روان میزان کارایی ملات سیمانی مورد سنجش قرار گرفته و مقاومت فشاری و کششی در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۱ روز به عنوان خواص مقاومتی اندازه گیری شده است. نتایج آزمایش ها نشان می دهد که استفاده از حجم زیادی (تا ۴۰ درصد وزنی) از پودر دیاتومیت خام در ساخت مواد پایه سیمانی سازگار با محیط زیست با توجه به فعالیت پوزولانی قابل توجه این پودر به عنوان جایگزین سیمان، بسیار کارآمد و موفقیت آمیز است.

کلمات کلیدی: دیاتومیت خام، ملات سیمان، مقاومت فشاری، مقاومت کششی.

بتن یکی از پرکاربردترین و قابل استفاده ترین مصالح ساختمانی است که عموماً توسط مخلوط کردن سیمان پرتلند با سنگدانه ها و آب ساخته می شود [۱]. بر اساس میزان بتن تولید شده در سال ۲۰۰۷، می توان تخمین زد که سالانه برای تولید بتن ۲۰۵ میلیارد تن سیمان، یک میلیارد تن آب و ۱۰ میلیارد تن سنگدانه مصرف می شود [۲]. به عبارت دیگر هر تن از سیمان پرتلند که تولید می شود می تواند یک تن دی اکسید کربن را وارد اتمسفر کند [۱]. مصرف زیاد مواد پوزولانی در بتن میزان تقاضای سیمان جهت استفاده در صنعت ساخت و ساز را کاهش داده و بنابراین علاوه بر کاهش هزینه تولید بتن میزان آلودگی محیط زیست در اثر انتشار گاز دی اکسید کربن ناشی از کارخانه های سیمان به اتمسفر کاهش قابل ملاحظه ای می یابد [۳].

دیاتومیت نوعی سنگ رسوبی متشکل از ذرات ریز و بی شکل سیلیسی است که در اثر مکانیسم تجمع پوسته یا اسکلت های فسیل شده جلبک ها و جانوران میکروسکوپی و تک سلولی به نام دیاتومه ایجاد شده اند. دیاتومه ها موجودات تک سلولی بسیار ریزی هستند که متعلق به خانواده جلبک های دریایی می باشند [۴]. رسوبات دیاتومیتی معمولاً ریز دانه بوده و عمدتاً از سیلیس بی شکل اوپالی (اوپال نوع A) تشکیل شده اند. همراه سیلیس معمولاً مقدار کمی مواد آلی، رس و ندرتاً رسوبات آتشفشانی هم وجود دارد [۵]. دیاتومیت در حالت طبیعی استفاده می شود و دارای قابلیت های ضد حریق و پرمکنندگی بوده و به عنوان ماده غیر حلال کاربرد دارد. کاربرد اصلی دیاتومیت به عنوان ماده پرمکننده و ماده جذب کننده می باشد. دیاتومیت دارای کاربرد های متنوعی به واسطه داشتن ساختار های منفذ دار است و در جهان به طور گسترده به عنوان پرمکننده، ضد آتش و غیر حلال کاربرد دارد [۶]. دیاتومیت همچنین به عنوان ماده

پوزولانی در مواد پایه سیمانی بکار برده شده است. بر اساس مطالعه ی *Kastis* و همکاران در رابطه با ویژگی ها و هیدراسیون سیمان مخلوط شده با دیاتومیت های آهکی، استفاده از دیاتومیت به دلیل داشتن محتوای سیلیس فعال در صنعت سیمان پیشنهاد گردیده است. همچنین واکنش های پوزولانی دیاتومیت سبب تولید بیشتر مواد حاصل از هیدراسیون به ویژه در سنین بالاتر می شود [۵]. *Fragoulis* و همکاران ویژگی های فیزیکی و مکانیکی سیمان های مخلوط با دیاتومیت های حاوی رس و مواد آهکی را مطالعه کردند و نتایج مطالعه ی آنها نشان می دهد که وجود سیلیس فعال در پودر دیاتومیت با نرمی زیاد و ریز دانه سبب بود ویژگی های مکانیکی ملات می شود [۷]. *Degirmenci* و *Yilmaz* نقش دیاتومیت را به عنوان یک ماده ی جایگزین با سیمان پرتلند بررسی کردند و نتایج آنها نشان می دهد که آن دسته از سیمان هایی که با مقادیری از دیاتومیت جایگزین شده اند در برابر مواد سولفاته مقاومت بیشتری نسبت به نمونه های شاهد نشان می دهند. آنها همچنین بیان کردند که با افزایش میزان دیاتومیت در نمونه ها، درصد جذب آب نمونه ها کاهش پیدا می کند [۸]. *Ediz* و *Yilmiz* نقش دیاتومیت خام و کلسین شده را در تولید سیمان بررسی کردند و نتایج مطالعات آنها نشان می دهد که سیمان پرتلندی که تا نسبت ۱۰ درصد با دیاتومیت خام جایگزین شده است مقدار مقاومت قابل توجهی را نشان می دهد. همچنین کلسین نمودن دیاتومیت سبب تغییر در ساختار منافذ دیاتومیت می شود و سبب افزایش قابلیت خرد و پودر شدن آن می شود [۹]. *Krajci* و همکاران ویژگی های ترکیب سیمان حاوی دیاتومیت کلسین شده، رس و همچنین متاکائولن را بررسی کرده اند و نتایج مطالعه ی آنها نشان می دهد که واکنش های پوزولانی، ساختار منافذ و مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه شاهد

افزایش پیدا می کند [۱۰]. *Ergum* تاثیر استفاده از دیاتومیت و پودر مرمر را به عنوان جایگزین نسبی سیمان و ویژگی های مکانیکی بتن های حاصل را مطالعه کرده است. نتایج این مطالعه نشان می دهد که جایگزینی سیمان پرتلند توسط دیاتومیت و استفاده از فوق روان کننده های شیمیایی می تواند سبب افزایش ویژگی های مکانیکی مخلوط بتن گردد [۱۱]. *Letelier* و همکاران ویژگی های بتن حاوی دیاتومیت و سنگدانه های قابل بازیافت را بررسی کرده اند. در این تحقیق، بهترین نتایج در نمونه های بتنی حاوی ۲۵ درصد سنگ دانه بازیافتی و همچنین ۵ درصد دیاتومیت مشاهده گردید [۱۲].

هدف از این مطالعه بررسی نقش دیاتومیت خام استخراج شده از معدن دیاتومیت ممقان به عنوان یک ماده ی پوزولانی طبیعی قابل جایگزین با سیمان پرتلند در نمونه های ملات ماسه سیمان می باشد. همچنین تاثیر پودر دیاتومیت خام بر ویژگی های مقاومتی ملات با انجام آزمایش های مقاومت فشاری و مقاومت کششی مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- زمین شناسی و ساختار معدنی سنگ های دیاتومیتی منطقه ممقان

با توجه به گزارش سازمان زمین شناسی و اکتشاف معدنی شمال غرب کشور، در ایران مهمترین نهفته های دیاتومیت دار در ناحیه آذربایجان مشاهده شده است که شامل حوضه های رسوبی در اطراف تبریز، شرق دریاچه ارومیه و بخشی از شهرستان میانه (شمال غرب ایران) می شود. کانسار دیاتومیت ممقان در ۵۰ کیلومتری جنوب غرب شهر تبریز، در مسیر جاده ی تبریز به آذرشهر و در جنوب غرب قله ی آتشفشانی سهند واقع است. طول جغرافیایی منطقه مورد مطالعه $37^{\circ} 50' 18''$ به $37^{\circ} 58' 53''$ و عرض جغرافیایی آن $46^{\circ} 05' 45''$ به $46^{\circ} 15' 55''$ می باشد. عملیات طرح اکتشاف تفصیلی کانسار دیاتومیت ممقان از اواخر سال ۱۳۶۵ آغاز شده و ۹ افق دیاتومیتی

در منطقه تشخیص داده شده که عیار هر کدام به طور جانبی تغییر پیدا می کند. این منطقه توسط رسوبات اواخر دوران سنوزوئیک پوشیده شده است. در اواخر دوران سنوزوئیک از نظر زمین شناسی دریاچه کم عمقی کوه های سهند را احاطه کرده و آن را به صورت جزیره یا شبه جزیره در آورده است. پس از آغاز فعالیت آتشفشانی کوه های سهند رسوبات خاکستر آتشفشانی و سایر مواد آذرین خروجی با ورود به حوضه های دریاچه ای دامنه ی کوه های آتشفشانی سهند شرایط برای رشد و تکثیر دیاتومه ها فراهم شد. احتمالاً در یکی از فازهای آتشفشانی مواد خروجی یا گازهای سمی وارد محیط زیست دیاتومه ها شده و سبب مرگ دسته جمعی آنها شده است. پوسته سیلیسی این دیاتومه ها پس از مرگ ته نشست پیدا کرده و در اثر دیاژنز، ذخایر لایه ای شکل دیاتومیت را در منطقه ایجاد کرده است (شکل ۱). وجود لایه های مختلف در منطقه، نشانگر تکرار این فرایند در زمان های مختلف است و ضخامت نسبتاً کم آنها گسترش کم دیاتومه ها را نشان می دهد. متلاطم بودن محیط رسوبی سبب اختلاط و پرشدگی شدید حفره ها و حجرات دیاتومه ها با توف و ماسه های در برگیرنده آنها شده است و در نتیجه طول لایه ها کوتاه و اکثراً عدسی شکل و با ضخامت متغییر و مخلوط با ذرات گل و توف است. رنگ این رسوبات سفید تا سبز کم رنگ بوده و قدیمی ترین رسوبات مربوط به دوره ی میوسن است. لایه های دیاتومیت دار اکثراً افقی هستند و از نظر تکتونیکی به دلیل جوان بودن رسوبات، پیچیدگی خاصی مشاهده نمی شود و گسل های بزرگ و فعالی در منطقه وجود ندارند [۱۳]. نتایج مطالعات *XRD* صورت گرفته توسط سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی شمال غرب کشور نشان می دهد که کانسار دیاتومیت ممقان حاوی فازهای کوارتز کریستوبالیت، اوپال نوع A، هالیت و فلدسپات می باشد. شکل ۲ موقعیت منطقه مورد مطالعه را در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ آذر شهر نشان می دهد.



شکل ۱- ذخایر لایه ای شکل دیاتومیت در منطقه مورد مطالعه.

دانه بندی مربوط به ماسه مورد استفاده در شکل ۳ ارائه شده است. در ملات های تهیه شده از فوق روان کننده پایه پلی کربوکسیلات با وزن مخصوص حدود ۱/۵ گرم بر سانتی متر مکعب و میزان مواد جامد ۳۰ تا ۴۰ درصد استفاده شده است.

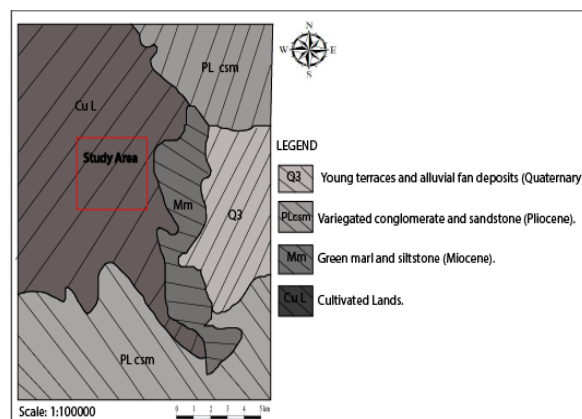
جدول ۱. آنالیز شیمیایی سیمان، دیاتومیت خام و ویژگی های کلینکر

Chemical analysis		
اکسید های اصلی	(%) سیمان	(%) دیاتومیت
SiO_2	۲۱/۵۷	۹۲/۰
Al_2O_3	۴/۶۵	۰/۰۵
Fe_2O_3	۳/۰۳	۰/۸۲
CaO	۶۳/۳۲	ND
MgO	۲/۴۰	ND
MnO	ND	۰/۰۸
TiO_2	ND	۰/۱۱
Na_2O	۰/۳۲	۰/۵۵
K_2O	۰/۸۱	۰/۳۴
P_2O_5	ND	۰/۰۴
$L.O.I$	۱/۳۳	۶/۰۱

ویزگی های کانی شناسی کلینکر	(%)
C_3S	۵۷/۶
C_2S	۲۰/۱
C_3A	۸/۴
C_4AF	۱۱/۰

ضرایب محاسباتی بوگه	(%)
Lime saturation factor	۹۲/۹
Silica Ratio	۲/۴
Alumina Ratio	۱/۵

ND=Not Detected (<0.01%)
L.O.I=Loss of Ignition (1000°C)



شکل ۲- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه، اقتباس از نقشه

زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ آذرشهر

۳- مطالعات آزمایشگاهی

۳-۱ مواد اولیه مورد استفاده

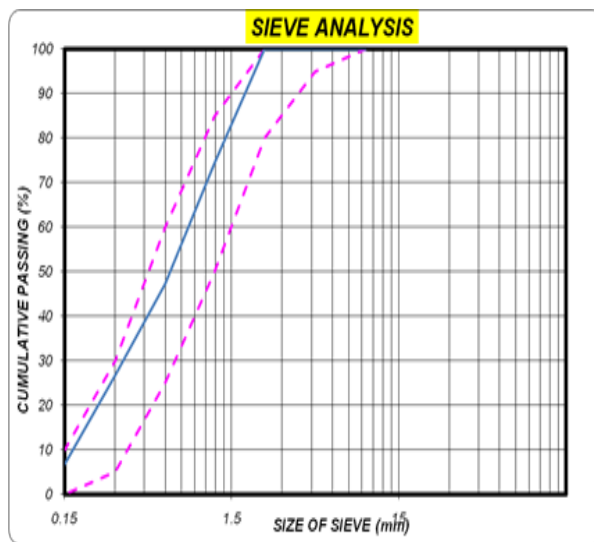
سیمان مورد استفاده در این مطالعه، از نوع سیمان پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ تولید شده در کارخانه سیمان صوفیان و دیاتومیت خام مورد استفاده از معدن دیاتومیت ممقان واقع در جنوب غرب شهر تبریز، استفاده شده است. ویژگی های شیمیایی سیمان و دیاتومیت و همچنین ویژگی های کلینکر سیمان در جدول ۱ ارائه شده است. میزان نرمی بلین سیمان پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ و دیاتومیت بکار رفته در این تحقیق به ترتیب ۳۹۳۵ و ۱۰۰۱۷ سانتی متر مربع بر گرم تعیین گردید.

همچنین در تمام طول آزمایش از ماسه ی رودخانه ای طبیعی به عنوان سنگدانه های ریز و با وزن مخصوص ۲/۶۵ و درصد جذب آب ۲ درصد استفاده شده است. مدول نرمی ماسه مورد استفاده ۲/۷۲ می باشد. منحنی

۲-۳ نسبت های اختلاط

نسبت های اختلاط محاسبه شده شامل درصدهای مختلفی از دیاتومیت خام می باشد که به جای سیمان جایگزین شده اند. این نسبت ها شامل ۰٪، ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ وزنی دیاتومیت می باشند که به جای سیمان پرتلند جایگزین شده اند. جدول ۲ نسبت های اختلاط بکار رفته در این تحقیق را نشان می دهد.

نسبت های اختلاط با نسبت آب به مواد سیمان ثابت و برابر ۰/۴۸ محاسبه شده اند و فوق روان کننده نیز با مقادیر متفاوت جهت رسیدن به کارایی مناسب و در تمام نسبت های اختلاط استفاده گردید.



شکل ۳- منحنی دانه بندی ماسه

جدول ۲- نسبت های اختلاط

Mix No	سیمان (kg/m ³)	دیاتومیت (kg/m ³)	W/Cm	آب (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	روان کننده (kg/m ³)
C	۵۴۳	۰	۰/۴۸	۲۶۳	۱۴۹۴	۲/۹
D15	۴۶۲	۸۱	۰/۴۸	۲۶۳	۱۴۸۹	۴/۳
D30	۳۸۰	۱۶۳	۰/۴۸	۲۶۳	۱۴۸۱	۵/۴
D40	۳۲۶	۲۱۷	۰/۴۸	۲۶۳	۱۴۷۳	۸/۱

۳-۳ آماده سازی نمونه ها

میلیمتر طول و با ضخامت ۲۵ میلیمتر به منظور اندازه گیری مقاومت کششی ساخته شده اند. پس از ریختن ملات در قالب ها، نمونه ها در کابین عمل آوری با دمای حدود ۲۳ درجه سانتی گراد و میزان رطوبت بیش از ۹۵ درصد به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند. سپس نمونه های ساخته شده در مخزن آب اشباع شده با اهک تا رسیدن به زمان انجام آزمایش عمل آوری گردیدند.

به منظور آماده سازی و ساخت ملات ماسه سیمان، ابتدا ماسه به همراه بخشی از آب (به میزان جذب آب ماسه) در مخلوط کن به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط گردید. پس از آن به ترتیب سیمان و دیاتومیت به مخلوط اضافه شده و هر کدام به مدت ۶۰ ثانیه ترکیب گردید. در نهایت ترکیب مابقی آب و روان کننده به تدریج به داخل مخلوط کن ریخته شده و به مدت ۱۲۰ ثانیه مخلوط گردید. بعد از اتمام ساخت ملات های حاوی درصد های مختلفی از دیاتومیت آزمایش هایی روی ملات تازه جهت تعیین و اندازه گیری قطر بازشدگی ملات تازه انجام گرفت. نمونه های مکعبی شکل با ابعاد ۵×۵×۵ سانتی متر جهت اندازه گیری مقاومت فشاری و نمونه های پایونی شکل با ابعاد ۷۶

۴-۳ روش آزمایش

آزمایش تعیین میزان قطر بازشدگی ملات برای اندازه گیری میزان قابلیت جریان ملات تازه بر اساس استاندارد ASTM C230 انجام شد [۱۴]. آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۱ روز بر اساس استاندارد ASTM

C109 انجام یافت [۱۵]. آزمایش اندازه گیری مقاومت کششی، نمونه های پاپیونی شکل، در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۱ روز بر اساس استاندارد ASTM C190 [۱۶] (شکل ۴) انجام شد.



شکل ۴- آزمایش تعیین مقاومت کششی

در سطح مخصوص و همچنین کم بودن وزن مخصوص در پودر دیاتومیت در مقایسه با سیمان، منجر به افزایش قابل توجه جذب آب در پودر دیاتومیت شده و کاهش قابل ملاحظه ای در کارایی پدید می آورد.

در واقع ساختار اسفنجی و سوراخ دار ذرات دیاتومیت به همراه فشار بسیار بالای ناشی از کشش کاپیلاره موجب جذب بسیار بالای طرح اختلاط توسط آن میگردد.

۲-۴ مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه های ملات ماسه سیمانی حاوی مقادیر مختلفی از پودر دیاتومیت در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۱ روز در جدول ۳ و شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می گردد، روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه ها با افزایش مقادیر دیاتومیت در سنین مختلف متفاوت می باشد. در نمونه های ۳ روزه، با افزایش مقدار پودر دیاتومیت در طرح اختلاط، مقاومت فشاری نمونه ها کاهش می یابد. این کاهش مقاومت فشاری در بیشترین مقدار خود ($D40$) حدوداً ۳۸ درصد می باشد. شدت این روند کاهش مقاومت فشاری با افزایش مقدار دیاتومیت در سنین بالاتر کاهش می یابد. به طوری که بیشترین مقدار کاهش مقاومت فشاری در نمونه های ۷ روزه به حدود ۱۲ درصد می رسد و این در حالی است که در نمونه های ۲۸ روزه این مقدار به حدود ۱ درصد کاهش پیدا می کند و در نمونه های ۹۱ روزه نه تنها کاهش مقاومت جبران شده بلکه به بیش از مقاومت نمونه های شاهد می رسد. در واقع نتایج به دست آمده حاکی از این امر می باشد که کاهش مقاومت فشاری نمونه ها در اثر افزایش مقدار پودر دیاتومیت، با افزایش سن نمونه ها جبران می گردد به طوری که در نمونه های ۲۸ روزه، مقاومت فشاری $D40$ که حاوی بیشترین مقدار دیاتومیت

۴- بحث و نتیجه گیری

۱-۴ کارایی

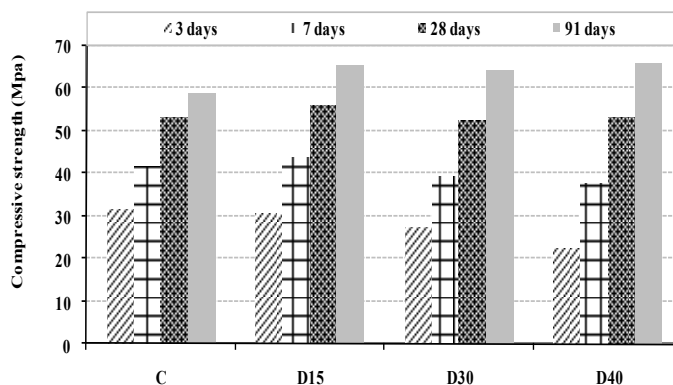
آزمایش میز جریان بر روی تمامی ملات های تازه انجام شده و کارایی اختلاط های دارای درصد هایی از پودر دیاتومیت مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج آزمایش در جدول ۳ آورده شده است. قابلیت جاری شدن ملات تازه با افزودن پودر دیاتومیت به طور قابل ملاحظه ای کاهش میابد. این کاهش روانی با افزودن مقداری فوق روان کننده در اختلاط ملات جبران شده است. نتایج میز جریان در همه ی اختلاط ها بین اعداد ۱۶۰ تا ۱۸۵ میلیمتر متغیر است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده میشود مقدار ابر روان کننده با افزایش مقدار پودر دیاتومیت استفاده شده در اختلاط، افزایش میابد. مقدار روان کننده استفاده شده در اختلاط ۴۰ درصد دیاتومیت حدوداً $2/8$ برابر نمونه شاهد است. این کاهش قابل توجه کارایی در ملات میتواند مربوط به ریزی بیش از حد و سطح مخصوص پودر دیاتومیت باشد. همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده، نرمی بلین دیاتومیت $2/5$ برابر بیشتر از سیمان و وزن مخصوص دیاتومیت ۱۰٪ کمتر از سیمان است. این افزایش چشمگیر

از طرفی به منظور هر چه فعال تر نمودن دیاتومیت از لحاظ خاصیت پوزولانی، در اکثر موارد از پودر دیاتومیت کلسین شده استفاده شده است. در این تحقیق با توجه به بالا بودن میزان SiO_2 دیاتومیت به کار رفته که خود بیانگر کیفیت بالای آن از لحاظ خصوصیات پوزولانی می باشد، مقادیر بیشتری از سیمان (تا ۴۰ درصد) توسط دیاتومیت خام (کلسین نشده) جایگزین شده است. نتایج مربوط به مقاومت فشاری نمونه ها حاکی از استفاده موثر از این پوزولان طبیعی در تولید ماده پایه سیمانی زیست محیطی و مقرون به صرفه می باشد. از طرفی نتایج دیگر تحقیقات انجام یافته بیانگر این است که نرمی زیاد و مقدار بیشتر دیاتومیت نسبت به سیمان منجر به کاهش تخلخل مخلوط های سیمانی می گردد که این امر به واسطه ی انسداد حفره ها و اثر پر کنندگی دیاتومیت می باشد.

است تقریباً با مقاومت فشاری نمونه شاهد برابر می باشد و در نمونه های ۹۱ روزه مقاومت فشاری $D40$ به اندازه ۱۲ درصد بیشتر از مقاومت فشاری نمونه شاهد می باشد. به نظر می رسد که با افزایش سن نمونه ها، واکنش پوزولانی پودر دیاتومیت در حضور سیمان کامل تر شده و منجر به جبران افت در مقاومت فشاری می گردد. واکنش پوزولانی ما بین سیلیس آمورف موجود در دیاتومیت و هیدراکسید کلسیم ایجاد شده در اثر واکنش هیدراسیون سیمان منجر به ماده نهایی متراکم تر و همگن می گردد. این سیلیس آمورف موجود در SiO_2 با $Ca(OH)_2$ واکنش داده و در نهایت *Calcium Silicate Hydrates (CSH)* ایجاد می گردد که همان دلیل اصلی افزایش مقاومت می باشد. در بیشتر تحقیقات انجام یافته بر روی اثر استفاده از پوزولان دیاتومیت بر خصوصیات مواد پایه سیمانی، تا حداکثر ۲۰- ۱۵ درصد از سیمان توسط دیاتومیت جایگزین شده است.

جدول ۳. نتایج مربوط به خصوصیات ملات های سیمان حاوی درصد های مختلف دیاتومیت

Mix No	مقاومت فشاری (مگا پاسکال)				مقاومت کششی (مگا پاسکال)				قطر بازشدگی	وزن مخصوص
	۳روز	۷روز	۲۸روز	۹۱روز	۳روز	۷روز	۲۸روز	۹۱روز	ملات بر حسب میلیمتر	خشک (kg/m^3)
C	۳۱/۴	۴۱/۹	۵۳/۱	۵۸/۸	۲/۹۴	۳/۳۷	۴/۳۶	۴/۶۷	۱۸۵	۲۰۷۶
D15	۳۰/۸	۴۳/۷	۵۵/۹	۶۵/۳	۲/۸۰	۴/۰۵	۵/۶۰	۵/۸۱	۱۷۵	۲۰۸۳
D30	۲۷/۳	۳۹/۲	۵۲/۴	۶۴/۴	۲/۵۵	۴/۲۷	۵/۶۰	۵/۹۰	۱۷۰	۲۰۴۶
D40	۲۲/۷	۳۷/۶	۵۳/۳	۶۵/۹	۲/۰۳	۴/۱۶	۵/۲۰	۵/۶۲	۱۶۰	۲۰۴۰

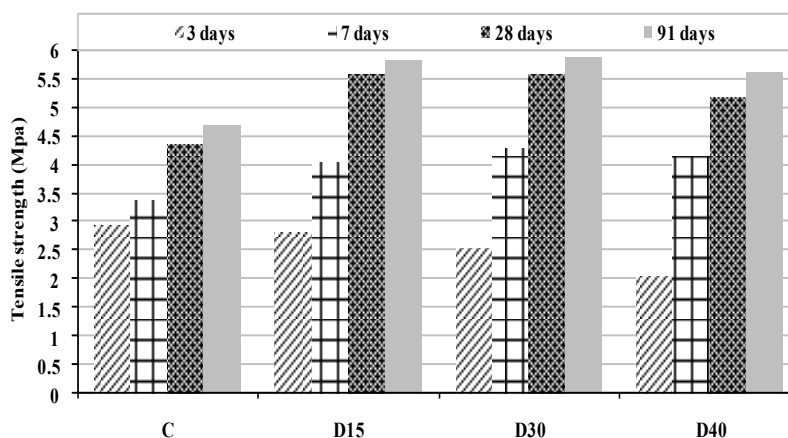


شکل ۶- نتایج مقاومت فشاری

۳-۴ مقاومت کششی

نمونه‌های ۲۸، ۷ و ۹۱ روزه حاوی دیاتومیت نسبت به نمونه شاهد افزایش قابل توجهی داشته است. این افزایش مقاومت کششی در بیشترین مقدار خود (در نمونه D15 ۲۸ روزه) حدوداً ۲۸ درصد نسبت به نمونه شاهد می باشد. همان طور که در قسمت مقاومت فشاری اشاره گردید، با افزایش سن نمونه ها، واکنش پوزولانی پودر دیاتومیت در حضور سیمان کامل تر شده و منجر به جبران افت و حتی افزایش مقاومت کششی می گردد. همانطور که مشاهده می گردد با وجود جایگزینی سیمان توسط مقادیر زیادی از دیاتومیت خام (کلسین نشده) در نسبت های اختلاط (تا ۴۰ درصد)، مقاومت کششی نمونه های حاوی دیاتومیت بیشتر از نمونه شاهد می باشد که نشانگر عملکرد مناسب ماده زیست محیطی نهائی از لحاظ مکانیکی می باشد.

نتایج آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه های ملات ماسه سیمانی حاوی مقادیر مختلفی از پودر دیاتومیت در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۱ روز در جدول ۳ و شکل ۷ نشان داده شده است. همانند نتایج به دست آمده در قسمت مقاومت فشاری، روند تغییرات مقاومت کششی نمونه ها نیز با افزایش مقدار دیاتومیت در سنین مختلف متفاوت می باشد. در نمونه های ۳ روزه، با افزایش مقدار پودر دیاتومیت در طرح اختلاط، مقاومت کششی نمونه ها کاهش می یابد. این کاهش مقاومت کششی در بیشترین مقدار خود (D40)، حدوداً ۴۵ درصد می باشد. کاهش مقاومت کششی در نمونه های حاوی دیاتومیت، با افزایش سن نمونه ها نه تنها جبران گردیده بلکه مقاومت کششی



شکل ۷- نتایج مقاومت کششی

- مقاومت فشاری نمونه های حاوی دیاتومیت در سنین اولیه (۳ روز) با افزایش مقدار دیاتومیت نسبت به نمونه شاهد کاهش می یابد. شدت کاهش مقاومت فشاری با افزایش سن نمونه ها کاهش یافته به طوری که در نمونه‌های ۲۸ روزه کاملاً جبران گردیده و در نمونه های ۹۱ روزه به بیش از مقاومت فشاری نمونه شاهد می رسد.

- مقاومت کششی نمونه های حاوی دیاتومیت در سنین اولیه (۳ روز) با افزایش مقدار دیاتومیت نسبت به نمونه

۵- نتیجه گیری

بررسی و تحلیل نتایج آزمایش های انجام گرفته بر روی نمونه های ملات حاوی درصد های مختلفی از دیاتومیت منجر به نتیجه گیری ذیل گردید:

- روانی ملات تازه با افزایش جایگزینی سیمان توسط دیاتومیت به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. البته این میزان کاهش روانی را می توان با افزایش مقدار فوق روان کننده در نسبت های اختلاط جبران نمود.

پوزولانی قابل توجه این پودر به عنوان جایگزین سیمان می توان نتیجه گرفت که ماده ای سبز و سازگار با محیط زیست را می توان با جایگزینی سیمان توسط مقادیر زیادی دیاتومیت در اختلاط، کاهش روانی ملات را به همراه دارد که این کاهش کارایی را می توان با افزایش مقدار فوق روان کننده جبران نمود.

شاهد کاهش می یابد. این کاهش مقاومت کششی نه تنها با افزایش سن نمونه ها جبران گردیده بلکه به بیش از مقاومت کششی نمونه شاهد می رسد. در واقع مقاومت کششی نمونه های ۲۸، ۷ و ۹۱ روزه حاوی دیاتومیت بیشتر از مقاومت کششی نمونه شاهد می باشد و این افزایش مقاومت در بیشترین مقدار خود حدود ۲۸ درصد می باشد.

- با در نظر گرفتن توام نتایج مربوط به خصوصیات مقاومتی ملات سیمانی حاوی دیاتومیت و همچنین فعالیت

۶- منابع

- [1] Mehta P.K, Monteiro P.J.M. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill; fourth edition, 2013 Dec 3.
- [2] Li Z. *Advanced Concrete Technology*. Wiley Blackwell; 2011 Jan 19; Available from: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470950067>
- [3] Safiuddin M, West JS, Soudki KA. *Hardened properties of self-consolidating high performance concrete including rice husk ash*. *Cement and Concrete Composites [Internet]*. Elsevier BV; 2010 Oct;32(9):708–17. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.006>
- [4] Dolley TP. *Diatomite*. *Ceramic Bulletin*; 1991; 70(5):860.
- [5] Kassis D, Kakali G, Tsivilis S, Stamatakis MG. *Properties and hydration of blended cements with calcareous diatomite*. *Cement and Concrete Research [Internet]*. Elsevier BV; 2006 Oct;36(10):1821–6. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.005>
- [6] Ivanov SÉ, Belyakov AV. *Diatomite and its applications*. *Glass and Ceramics [Internet]*. Springer Nature; 2008 Jan;65(1-2):48–51. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s10717-008-9005-6>
- [7] Fragoulis D, Stamatakis MG, Papageorgiou D, Chaniotakis E. *The physical and mechanical properties of composite cements manufactured with calcareous and clayey Greek diatomite mixtures*. *Cement and Concrete Composites [Internet]*. Elsevier BV; 2005 Feb;27(2):205–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.008>
- [8] Degirmenci N, Yilmaz A. *Use of diatomite as partial replacement for Portland cement in cement mortars*. *Construction and Building Materials [Internet]*. Elsevier BV; 2009 Jan;23(1):284–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.12.008>
- [9] Yilmaz B, Ediz N. *The use of raw and calcined diatomite in cement production*. *Cement and Concrete Composites [Internet]*. Elsevier BV; 2008 Mar;30(3):202–11. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.08.003>

- [10] Krajčí L, Kuliffayová M, Janotka I. Ternary Cement Composites with Metakaolin Sand and Calcined Clayey Diatomite. *Procedia Engineering* [Internet]. Elsevier BV; 2013;65:7–13. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.003>
- [11] Ergün A. Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials* [Internet]. Elsevier BV; 2011 Feb;25(2):806–12. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.002>
- [12] Letelier V, Tarela E, Muñoz P, Moriconi G. Assessment of the mechanical properties of a concrete made by reusing both: Brewery spent diatomite and recycled aggregates. *Construction and Building Materials* [Internet]. Elsevier BV; 2016 Jul;114:492–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.177>
- [13] Geological Survey & Mineral Exploration of Iran. Azerbaijan's Diatomite [Internet]. Tehran: Geological Survey & Mineral Exploration of Iran; 2008. Available from: <http://gsi.ir/fa/ReportsData.page>
- [14] Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement. ASTM International; Available from: http://dx.doi.org/10.1520/c0230_c0230m-14
- [15] Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). ASTM International; Available from: http://dx.doi.org/10.1520/c0109_c0109m-16a
- [16] Method of Test for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars. ASTM International.