

بررسی خواص مکانیکی بتن ضایعاتی حاوی اکسید منیزیم واکنش پذیر

کد G

علی حیدری^۱، معصومه هاشم پور^۲، حامد جاودانیان^۳، مهسا شاهی^۴

۱- دانشیار دانشگاه شهرکرد، گروه مهندسی عمران، aliheidari@eng.sku.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه شهرکرد، hashempour@stu.sku.ac.ir

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهرکرد، javdanian@eng.sku.ac.ir

۴- دانشجوی کارشناسی، مهندسی عمران، دانشگاه شهرکرد، mahsashahi.j@gmail.com

aliheidari@eng.sku.ac.ir

چکیده

بتن اکسید منیزیمی نسل جدیدی از بتن‌های فاقد افت و ترک خوردگی حرارتی جهت اجرای بتن‌ریزی‌های حجیم و سدسازی است. در کنار روش‌های پرهزینه برای کاهش حرارت هیدراتاسیون بتن‌های حجیم که اغلب نمی‌توانند به طور کامل احتمال ترک خوردگی حرارتی را از بین ببرند، استفاده از اکسید منیزیم کلسینه یا واکنش پذیر به عنوان یک روش اقتصادی با روش اجرایی نسبتاً آسان برای ساخت بتن‌های کم حرارت توصیه شده است. از سویی دیگر اکسید منیزیم در طی فرآیند کربناته شدن سبب افزایش مقاومت بتن می‌شود. لذا لازم است نسبت آب به سیمان و مقدار ماسه به گونه‌ای انتخاب شود که فضای کافی برای ورود گاز دی اکسید کربن به بتن مهیا شود. در این طرح برای وارد کردن گاز دی اکسید کربن به شکل غیر مستقیم به بتن در کنار ضایعاتی همچون ضایعات کاشی و سرامیک و آجر از ضایعات بتن استفاده شد. ضایعات بتنی به علت آهکی بودن همواره در حال جذب گاز کربن دی اکسید موجود در هوا هستند. لذا این امر برای بهبود عملکرد بتن اکسید منیزیمی به عنوان راهکار مناسب، اقتصادی و محیط زیستی در نظر گرفته شد. نهایتاً نتایج آزمایش‌ها نشان داد مقاومت فشاری در بتن اکسید منیزیمی به نسبت نمونه شاهد افزایش می‌یابد که این مقدار برای نمونه حاوی ۴۰ درصد ضایعات و ۲ درصد اکسید منیزیم بیشینه مقدار یعنی ۶۰/۵ مگاپاسکال بوده است. مقاومت خمشی نیز با کاهش ضایعات و افزایش مقدار اکسید منیزیم افزایش می‌یابد. بیشترین مقاومت در این مطالعه مربوط به نمونه حاوی ۳۰ درصد ضایعات و ۲ درصد اکسید منیزیم به میزان ۱۰/۹ مگاپاسکال بوده است همچنین جذب آب نیز با افزودن اکسید منیزیم کاهش می‌یابد. افزایش مقدار اکسید منیزیم از ۲ تا ۶ درصد وزنی نیز به علت پر شدن تخلخل و کاهش حفرات بتن باعث کاهش بیشتر جذب آب بتن می‌گردد. کمترین جذب آب در این آزمایش مربوط به نمونه حاوی ۳۰ درصد ضایعات و ۶ درصد اکسید منیزیم به میزان ۶/۳۱ درصد بوده است.

کلمات کلیدی: بتن اکسید منیزیم، اکسید منیزیم واکنش پذیر، ضایعات ساختمانی، فرآیند کربناته شدن، توسعه پایدار.

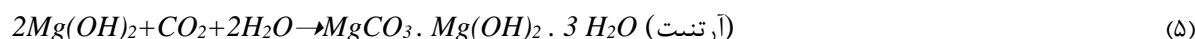
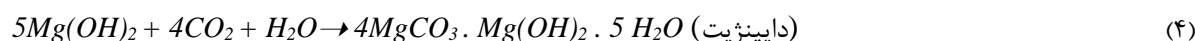
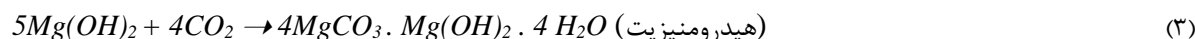
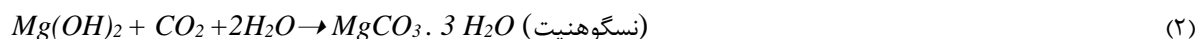
۱. مقدمه

بتن به عنوان مهمترین ماده‌ی ساختمانی دارای اهمیت زیادی می‌باشد. مصرف جهانی بتن به ازای هر نفر بیش از یک تن می‌باشد که این میزان مصرف، بتن را بعد از آب به پرمصرف‌ترین ماده روی زمین تبدیل می‌کند. با توجه به میزان مصرف و اهمیت آن، لزوم توجه و مطالعه در رابطه با این ماده احساس می‌شود. از طرفی سالانه میلیون‌ها تن ضایعات در جهان تولید می‌شود. اکثر این ضایعات قابلیت بازیافت را نداشته و یا بازیافت آن‌ها با صرف انرژی و آلودگی همراه است. همچنین انباشتن این مواد در حاشیه‌ی شهرها و رها کردن این ضایعات در محیط خطر این مواد را برای محیط زیست دو چندان کرده‌است لذا استفاده از ضایعات در بتن، راهکار مناسبی برای نیل به دو هدف دفع مواد زائد و دستیابی به خواص مثبت در بتن است [۱].

یکی از بزرگترین پروژه‌های بتنی در جهان، پروژه‌های سد سازی هستند. در سازه‌های بزرگ با بتن‌ریزی‌های حجیم با توجه به افزایش چشمگیر دما به علت حرارت آبگیری سیمان و افزایش احتمال ترک خوردگی حرارتی سد، اتکای صرف به افزودن پوزولان، سیمان با حرارت‌زایی کم، کاهش دمای مواد اولیه ساخت و... کافی نبوده و لازم است تمهیداتی اندیشیده شود. به نظر می‌رسد استفاده از اکسید منیزیم واکنش‌پذیر یا فعال در سال ۱۹۶۰ در ساخت سد بیشا صورت گرفته باشد. در این سد میکرو انبساطی در بتن و پس از گذشت دهه‌هایی از بهره‌برداری سد مشاهده شد [۲]. پس از آن مطالعات گسترده‌ای پیرامون علت عملکرد این نوع ماده در بتن و سیمان انجام گرفت. در حالت کلی اکسید منیزیم به دو شکل کلسینه و سنتز در صنعت موجود است. در حالت کلسینه، اکسید منیزیم در کوره گردان و در دمای ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد حرارت می‌بیند و عموماً سفید رنگ است اما در حالت سنتز این ماده در دمای ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ درجه سانتیگراد حرارت دیده و زرد رنگ می‌گردد. در حالت دوم که عموماً در ساخت سیمان نیز رخ می‌دهد به علت تبدیل شدن اکسید منیزیم به هیدروکسید منیزیم در مجاورت آب و افزایش حجم لازم است مطابق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و ASTM C 114 مقدار این ماده به ۶ درصد وزنی محدود شود. بدین ترتیب انبساط مخرب جلوگیری شده و سلامت بتن تضمین می‌گردد. اما در حالت کلسینه وضعیت شیمیایی تغییر می‌کند. یکی از تفاوت‌های عمده سیمان ساخته شده با اکسید منیزیم واکنش‌پذیر با سیمان پرتلند عادی فرآیند شیمیایی اصلی دخیل در افزایش مقاومت است. سیمان اکسید منیزیمی فرآیند کربناتاسیون و سیمان پرتلند فرآیند هیدراتاسیون دارد [۳-۶]. بدین صورت که در سیمان اکسید منیزیمی ابتدا این ماده با آب واکنش داده و هیدروکسید منیزیم یا بروسیت در طی یک واکنش گرماده مطابق رابطه ۱ تشکیل می‌شود.



پس از آن بروسیت در چرخه دوم با دی اکسید کربن و آب واکنش داده تا در یک واکنش دیگر کربنات منیزیم هیدراته ایجاد شود. این ماده ترکیبی از نسگوتهیت، هیدرومنیزیت، دایپنژیت و آرتنیت است. واکنش شیمیایی این مواد بصورت زیر است [۷-۱۰].



در نهایت این چرخه، اکسید منیزیم طی یک فرآیند کربناته تبدیل به فرآورده‌های مفیدی در ساخت بتن و سیمان می‌شود. این مطالعه به بررسی استفاده از این ماده در ساخت بتن ضایعاتی جهت بهبود خواص آن می‌پردازد. نتایج نشان داده‌است

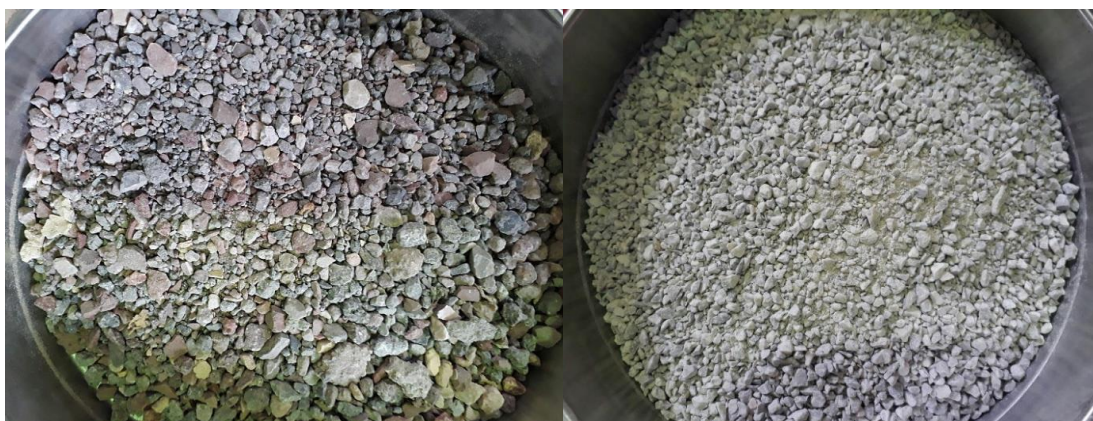
این بتن در سنین ۷ و ۲۸ روزه مقاومت خوبی از خود نشان داده و جذب آب نیز به نسبت نمونه‌های شاهد کاهش می‌یابد. همچنین مقاومت خمشی نیز با افزودن اکسید منیزیم بهبود می‌یابد.

۲. مواد و روش‌ها

مصالح مورد استفاده در این مطالعه شامل سنگدانه ضایعاتی، سیمان، آب، روان‌کننده و اکسید منیزیم بوده‌است. لازم به ذکر است در این مطالعه مراحل ساخت و آزمایش در آزمایشگاه بتن دانشگاه شهرکرد انجام گرفته‌است.

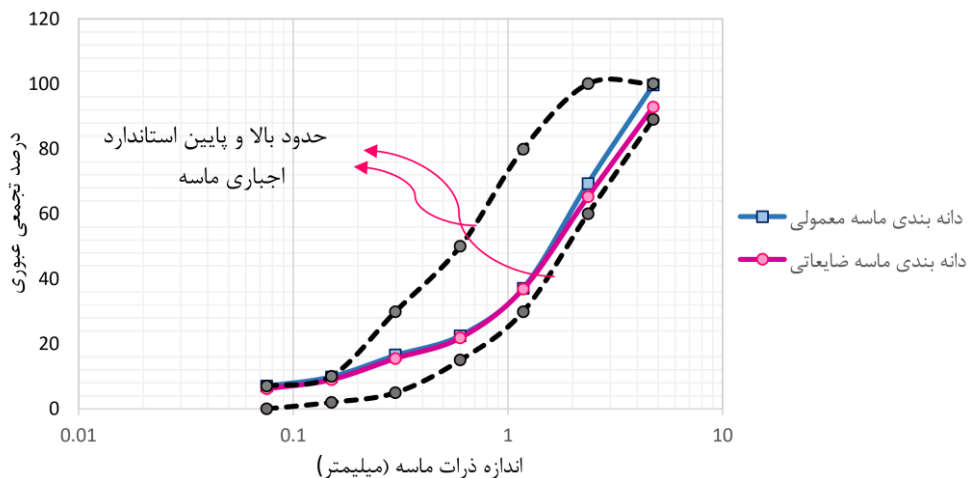
۱،۲. سنگدانه

در این مقاله به جهت استفاده از ضایعات ساختمانی به‌عنوان سنگدانه در بتن لازم است مصالح پیش از مصرف در بتن به اندازه کافی خرد شده و شرایط آن‌ها در بتن بررسی شود. در این نوع از بتن از شن استفاده نشده و سنگدانه مصرفی عبوری از الک ۴ یعنی به‌اندازه ماسه خواهد بود. ابتدا ضایعات ساختمانی از جمله، بتن، آجر، سنگ و ضایعات کاشی و سرامیک به‌طور کامل خرد شده و سپس به کمک الک ۴ ذرات شن از ماسه جدا می‌شود. ماسه عادی و ماسه ضایعاتی در شکل ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱- سمت راست: ماسه عادی، سمت چپ: ماسه ضایعاتی

نتیجه دانه‌بندی این دو ماسه مطابق با شکل ۳ می‌باشد. نتایج بررسی این دو گراف با الزامات دانه‌بندی ماسه ایران، نشان داد هر دو نوع ماسه در محدوده لازم بوده و قابلیت استفاده در بتن را دارا هستند.



شکل ۲- منحنی دانه بندی ماسه عادی و ماسه ضایعاتی

۲.۲. سیمان

سیمان مصرفی، سیمان پرتلند تیپ ۱-۵۲۵ کارخانه سیمان شهرکرد بوده است. علت استفاده از این نوع سیمان مقاومت اولیه، افزایش دوام به علت افزایش تدریجی و مستمر مقاومتها، نفوذپذیری و انبساط کم به دلیل نرمی بالا بوده است. جدول ۱ آنالیز این ماده را نشان می دهد.

۳.۲. اکسید منیزیم واکنش پذیر

برای این مطالعه لازم است اکسید منیزیم در دمای ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد حرارت یافته و کلسینه شود. سپس برای استفاده در طرح مخلوط به اندازه سیمان یعنی کمتر از ۷۵ میکرون ریز شود. جدول ۱ آنالیز XRF این ماده را نشان می دهد.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی اکسید منیزیم

Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	S ₂ O ₃	TiO	LOI
۰/۴	۰/۰۸	۱/۴۲	۰/۰۶	۰/۱۹	۹۳/۶۴	۰/۰۲	۱/۶۹	۰/۰۸	۰/۱۸	۰/۰۱	۰/۳۲

۴.۲. آب مصرفی

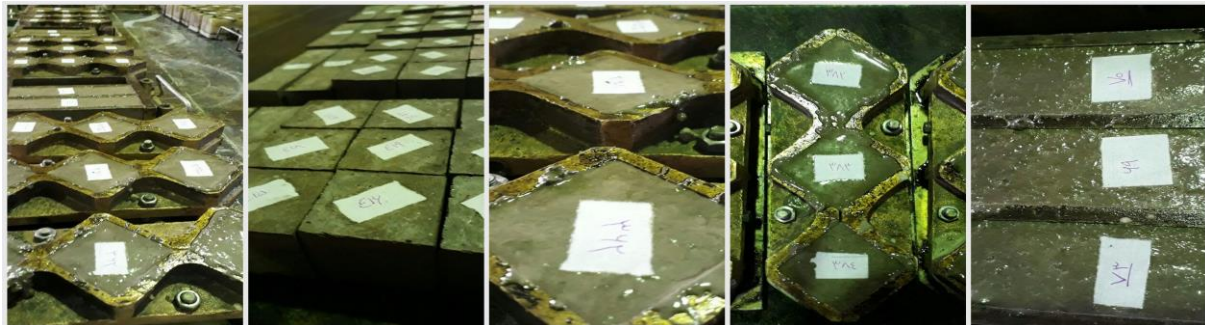
آب مصرفی نیز آب شرب شهری بوده است. این آب دارای PH ۷/۸، کلور ۴۰ mg/l، سولفات ۲۹ mg/l بوده است. لذا آب مصرفی به دلیل داشتن پارامترهای مجاز در طرح مخلوط، برای این امر مناسب می باشد.

۵.۲. ابرروان کننده

ابرروان کننده مورد استفاده در این مطالعه کاهنده خیلی شدید آب بر پایه پلی کربوکسیلات کوپلیمر است که در ساخت بتن های فوق توانمند کاربرد دارد. این ابرروان کننده قهوه ای رنگ با جرم حجمی ۱/۰۸، میزان یون کلر کمتر از ۰/۰۱ و PH تقریباً ۶ الی ۸ است.

۳. طرح مخلوط

ابتدا سیمان، سنگدانه و اکسید منیزیم برای ۵ الی ۱۰ دقیقه درون میکسر مخلوط می‌شوند. سپس آبی که روان‌کننده در آن حل شده است به مخلوط اضافه شده و مجدداً ۳ الی ۵ دقیقه دیگر فرآیند اختلاط ادامه می‌یابد. آنگاه بتن درون قالب‌های ۵×۵×۵ سانتیمتری و منشوری ۴×۴×۱۶ ریخته می‌شود. شکل ۳ نمونه‌های بتنی ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمونه‌های مکعبی و منشوری

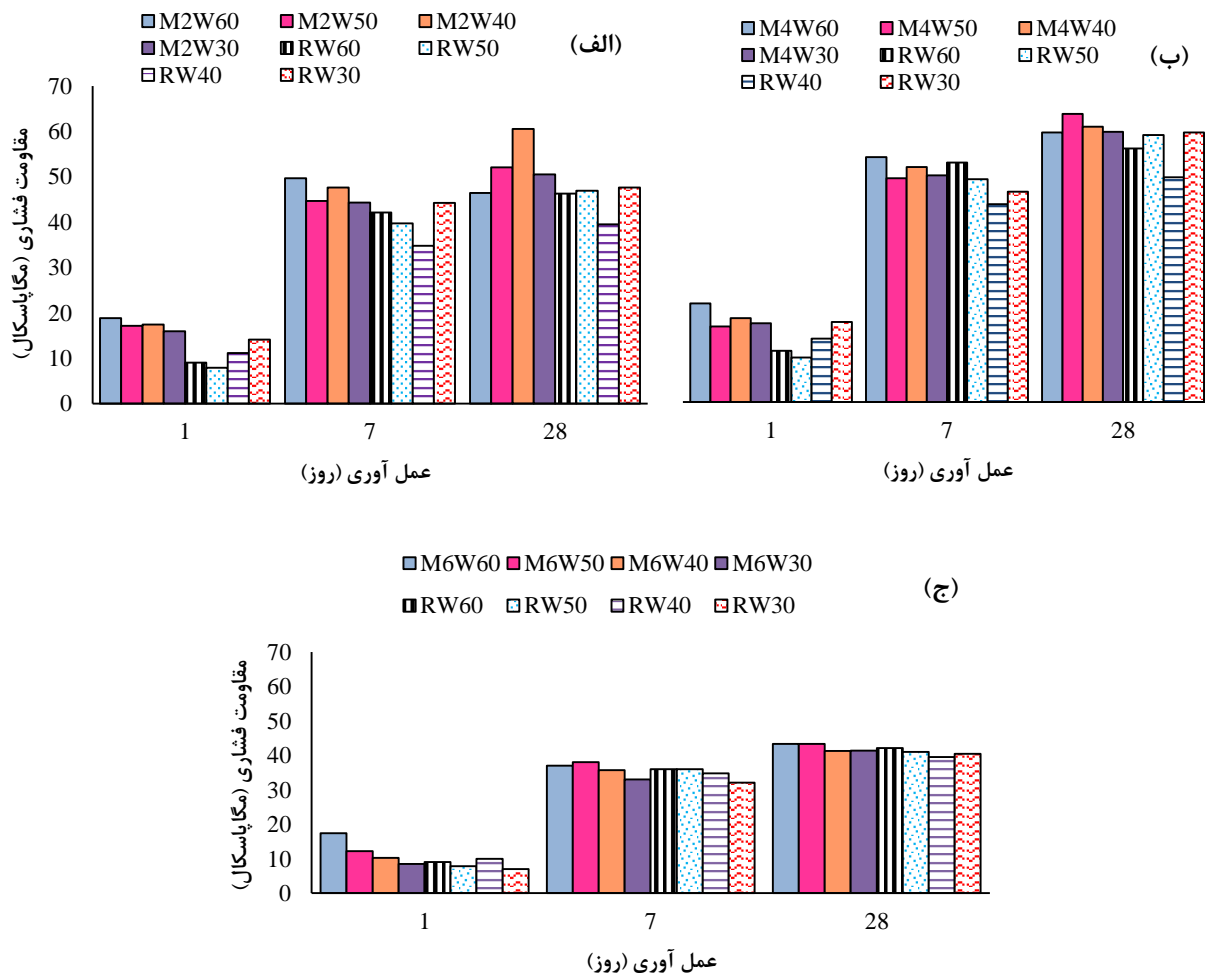
برای ارزیابی صحت عملکرد نسبت‌های مختلفی از ماسه به سیمان امتحان گردید، که بهترین آن برای نسبت ماسه به سیمان ۳ و ۲/۵ به ترتیب در فازهای ۱ و ۲ بوده است که این نتایج به‌عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شدند. جدول زیر طرح مخلوط بتن را برای این مطالعه نشان می‌دهد. در گام بعدی با در نظر گرفتن بهترین نتایج، اکسید منیزیم از ۲ تا ۶ درصد وزنی به نمونه‌ها اضافه گردید.

جدول ۲- طرح مخلوط بتن در فاز ۱ و ۲

نمونه	ماسه ضایعاتی	ماسه عادی	ابروان‌کننده (درصد)			
			نمونه شاهد	۲ درصد اکسید منیزیم	۴ درصد اکسید منیزیم	۶ درصد اکسید منیزیم
W100	۰	۱۰۰	۲	-	-	-
W90	۱۰	۹۰	۲	-	-	-
W80	۲۰	۸۰	۲	-	-	-
W70	۳۰	۷۰	۲	-	-	-
W60	۴۰	۶۰	۱/۷	۱/۷	۱/۹	۲/۱
W50	۵۰	۵۰	۱/۶	۱/۷	۱/۹	۲/۱
W40	۶۰	۴۰	۱/۴	۱/۷	۱/۹	۲/۱
W30	۷۰	۳۰	۱	۱/۷	۱/۹	۱/۸
W20	۸۰	۲۰	۰/۸	-	-	-
W10	۹۰	۱۰	۰/۷	-	-	-
W0	۱۰۰	۰	۰/۷	-	-	-

۴. تفسیر نتایج

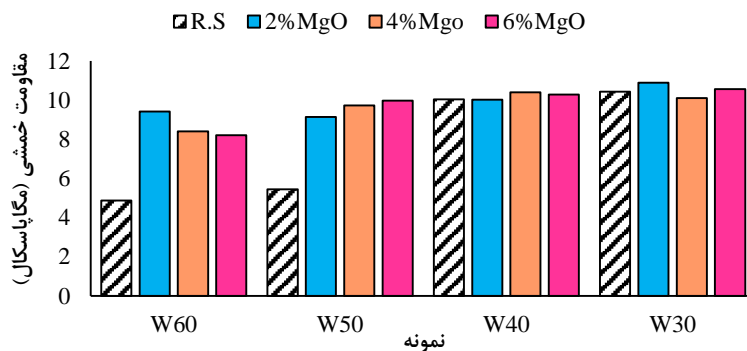
در بخش اول بررسی نتایج نمونه‌های شاهد نشان داد که مقاومت فشاری برای نمونه‌های حاوی ۰، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد ماسه ضایعاتی بهترین نتایج را داشته‌اند. لذا اکسید منیزیم به این طرح‌ها اضافه شد و اثر آن‌ها بررسی گردید. که نتایج برای نسبت ماسه به سیمان ۳ بهترین نتایج بوده که مشخصات آن بصورت زیر می‌باشد. لازم به ذکر است M2W30 یعنی نمونه حاوی ۲ درصد اکسید منیزیم و ۳۰ درصد ضایعات و RW30 یعنی نمونه شاهد حاوی ۳۰ درصد ضایعات.



شکل ۴- به ترتیب از الف تا ج: مقاومت فشاری ۱، ۷ و ۲۸ روزه برای نمونه‌های حاوی ۰، ۲، ۴ و ۶ درصد اکسید منیزیم

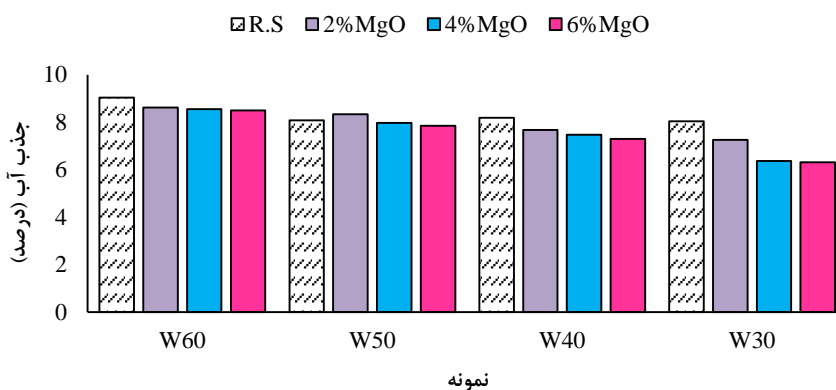
با بررسی نتایج همانطور که مشخص شده‌است، اکسید منیزیم کلسینه باعث افزایش مقاومت نسبت به طرح‌های شاهد گردیده که این میزان برای اکسید منیزیم ۲ درصد بیشینه مقدار بوده‌است. همچنین بیشترین مقاومت مربوط به طرح‌های حاوی ۴۰ درصد ضایعات با اکسید منیزیم ۲ درصد به میزان ۶۰/۵۶ بوده‌است. یکی از ملاک‌های بررسی صحت عملکرد اکسید منیزیم افزایش حداقلی مقاومت ۲۸ روزه نسبت به مقاومت ۷ روزه است. همانطور که از شکل بالا برمی‌آید این امر محقق شده-

است. برای مقاومت خمشی نیز از استاندارد ایران ۱۷۷۳۱ استفاده شد. نتایج این آزمایش بصورت شکل ۵ می‌باشد. لازم به ذکر است W50 یعنی نمونه حاوی ۵۰ درصد ضایعات و R.S نمونه شاهد می‌باشد.



شکل ۵- نتایج مقاومت خمشی

همانطور که از شکل بالا بر می‌آید، افزودن اکسید منیزیم باعث بهبود مقاومت خمشی در نمونه‌ها می‌شود. برخلاف طرح حاوی ۶۰ درصد ضایعات، با کاهش مقدار ضایعات مقاومت خمشی افزایش می‌یابد. بیشینه مقاومت خمشی برای نمونه حاوی ۳۰ درصد ضایعات با ۲ درصد اکسید منیزیم به میزان ۱۰/۹ مگاپاسکال بوده‌است. جهت انجام آزمایش جذب آب نیز از استاندارد ASTM C 642 استفاده گردید. نتایج این آزمایش بصورت شکل ۶ می‌باشد. همانطور که مشخص است افزودن اکسید منیزیم باعث کاهش درصد جذب آب به نسبت نمونه شاهد گردیده که با افزایش مقدار اکسید منیزیم این مقدار کاهش بیشتر می‌گردد. دلیل این امر تبدیل شدن اکسید منیزیم به هیدروکسید منیزیم در طی فرآیند شیمیایی آن و افزایش حجم و پر شدن خلل و فرج بتن می‌باشد. کمترین جذب آب مربوط به نمونه حاوی ۳۰ درصد ضایعات و ۶ درصد اکسید منیزیم به میزان ۶/۳۱ درصد بوده‌است.



شکل ۶- نتایج درصد جذب آب

۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی اثر اکسید منیزیم واکنش‌پذیر بر روی خواص بتن ضایعاتی پرداخته شد که نتایج آن بصورت زیر بوده‌است:

- نتایج مقاومت فشاری نشان می‌دهد افزودن گاز کربن دی اکسید به شکل غیر مستقیم با استفاده از ضایعات بتنی در ساخت سنگدانه موفقیت آمیز بوده‌است.

- مقاومت فشاری ۲۸ روزه از مقاومت فشاری ۷ روزه در تمام نمونه‌ها بیشتر بوده که این امر عملکرد مناسب اکسید منیزیم واکنش‌پذیر را نشان می‌دهد.

- افزودن اکسید منیزیم واکنش‌پذیر باعث افزایش مقاومت فشاری در سنین بالا شده‌است که این میزان برای نمونه حاوی ۲ درصد اکسید منیزیم و ۴۰ درصد ضایعات بیشینه مقدار یعنی ۶۰/۵۶ مگاپاسکال بوده‌است.

- مقاومت خمشی نیز با افزودن اکسید منیزیم نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش داشته است که برای طرح حاوی ۳۰ درصد ضایعات و ۲ درصد اکسید منیزیم به بیشینه ۱۰/۹ مگاپاسکال رسیده‌است.

- افزودن اکسید منیزیم واکنش‌پذیر باعث کاهش تخلخل تا حد ممکن شده به گونه‌ای که افزودن آن باعث کاهش جذب آب به نسبت نمونه‌های شاهد شده‌است. همچنین با افزایش این ماده جذب آب به مقدار بیشتری کاهش می‌یابد که این امر به دلیل کاهش خلل و فرج از طریق تبدیل شدن اکسید منیزیم به فرآورده‌های جدید بوده‌است. لازم به ذکر است کمترین جذب آب مربوط به نمونه حاوی ۳۰ درصد ضایعات و ۶ درصد اکسید منیزیم به میزان ۶/۳۱ درصد بوده‌است.

۶. مراجع

- [۱] توکلی، د.، حیدری، ع.، بهفروز، ب.، (۱۳۹۱)، "استفاده مواد ضایعاتی در سیمان و بتن راهی به سوی توسعه پایدار"، اولین کنفرانس بین‌المللی صنعت سیمان، انرژی و محیط زیست.
- [2] Deng, M., Tang, M. (2008). "Expansion of light-burnt MgO concrete". *Sci Technol. rev*, 26, pp 61-64.
- [3] L. Vandeperre., M. Liska., A. Al-Tabbaa. (2008). "Hydration and mechanical properties of magnesia, pulverized fuel ash, and portland cement blends". *J. Mater. Civ. Eng*, Vol. 20 (5), pp 375-383.
- [4] C. Unluer., A. Al-Tabbaa. (2013). "Impact of hydrated magnesium carbonate additives on the carbonation of reactive MgO cements". *Cem. Concr. Res.* Vol. 54 (2013), pp 87-97.
- [5] Y. Yi., M. Liska., A. Al-Tabbaa. (2014). "Properties and microstructure of GGBSemagnesia pastes". *Adv. Cem. Res.* Vol. 26 (2), pp 114-122.
- [6] M.A. Shand. (2006). "The Chemistry and Technology of Magnesia". John Wiley & Sons, Hoboken NJ, USA.
- [7] Ruan, S., Unluer, C. (2017). "Influence of mix design on the carbonation, mechanical properties and microstructure of reactive MgO cement-based concrete". *Cement and Concrete Composites.* Vol. 80, pp 104-114.
- [8] C. Unluer, A. Al-Tabbaa, Enhancing the carbonation of MgO cement porous blocks through improved curing conditions, *Cem. Concr. Res.* Vol. 59, pp 55-65.
- [9] C. Unluer., A. Al-Tabbaa. (2014). "Characterization of light and heavy hydrated magnesium carbonates using thermal analysis". *J. Therm. Analysis Calorim.* Vol. 115 (1), pp 595-607.
- [10] J. Harrison. (2002). "The case for and ramifications of blending reactive magnesia with Portland cement". *Foundations* 175 (2351).