



بررسی تاثیر مقادیر مختلف ماسه بادی بر سطوح و برخی خواص مکانیکی بتن نمایان

امیرحسین محرز*^۱، سیدعظیم حسینی^۲، محمد جهانی^۳، فتاح پیرویان^۴

۱- هیئت علمی گروه عمران، دانشگاه ملی مهارت تهران، مشاور عالی واحد بتن و کامپوزیت کارخانه فناوری پیش ساخته

شیراز اسکان، شیراز

۲- دانشیار گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب، تهران

۳- کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان، کارشناس ارشد بتن و کامپوزیت کارخانه فناوری پیش ساخته شیراز

اسکان، شیراز

۴- دکترای عمران، رئیس هیئت مدیره کارخانه فناوری بتن پیش ساخته شیراز اسکان و شرکت مهندسی سازان، شیراز

amoharrer@nus.ac.ir

چکیده

بتن نمایان، یکی از مصالح پر کاربرد در معماری مدرن است که از نظر سازه‌ای و دوام عملکرد بالایی دارد و با سطوح صاف و یکنواخت، نیازهای زیبایی‌شناسی پروژه‌های عمرانی را برآورده می‌کند. در این تحقیق، ماسه بادی به‌عنوان پرکننده‌ای با دانه‌بندی یکنواخت و توسعه‌دهنده سطوح بتن، تأثیر چشمگیری بر وزن مخصوص، کارایی، مقاومت فشاری، نفوذپذیری و وزن مخصوص کامپوزیت سیمانی دارد. مقادیر مختلف ماسه بادی جایگزین ماسه معدن شد و علاوه بر کیفیت سطح بتن نمایان، پارامترهای فوق نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد استفاده از ۷ درصد ماسه بادی، علاوه بر ایجاد سطحی نمایان، بیشترین مقاومت فشاری و وزن مخصوص و کمترین عمق نفوذپذیری را نسبت به طرح‌های دیگر ارائه می‌دهد، درحالی‌که هر دو مقادیر ۷ و ۹ درصد ماسه بادی در کارایی نتایج مشابهی داشتند. در نهایت، بررسی کلی نتایج نشان داد طرح حاوی ۷ درصد ماسه بادی از نظر مقاومت فشاری و عمق نفوذ بهینه‌تر بود و هر دو مقدار ماسه بادی، روانی بتن فلو را تا قطر ۶۵ سانتی افزایش دادند. بنابراین، برای دستیابی به بهترین کیفیت سطح و بالاترین خواص مکانیکی، استفاده از حداکثر ۷ درصد ماسه بادی توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی: بتن نمایان، خواص مکانیکی، ماسه بادی، نفوذپذیری، مقاومت فشاری

۱ - مقدمه

ماسه بادی، که در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک به‌واسطه فرسایش بادی و رسوب‌گذاری طبیعی تشکیل می‌شود، یکی از انواع ماسه‌هایی است که به‌دلیل ریزدانه بودن و توزیع یکنواخت اندازه ذرات، به‌طور ویژه برای تولید بتن نمایان پیشنهاد می‌شود [۱ و ۲]. این نوع ماسه، برخلاف ماسه‌های معدنی یا رودخانه‌ای، ساختاری نرم‌تر، دانه‌بندی منظم‌تر و درصد سیلیس پایین‌تری دارد که این ویژگی‌ها آن را برای دستیابی به سطوح صاف و صیقلی ایده‌آل می‌سازد. تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از ماسه بادی می‌تواند به بهبود تراکم خمیر سیمان، کاهش حفره‌های سطحی و افزایش یکنواختی سطح بتن کمک کند که این ویژگی‌ها نه تنها کیفیت ظاهری بتن نمایان را ارتقا می‌بخشند، بلکه از نظر عملکردی نیز مزایای متعددی همچون کاهش نفوذپذیری آب و افزایش مقاومت در برابر عوامل مخرب محیطی فراهم می‌آورند [۳-۵].

از طرفی، ماسه‌های رودخانه‌ای و معدنی، که به‌طور گسترده در بتن ریزی استفاده می‌شوند، دارای محدودیت‌هایی همچون دانه‌بندی نامنظم، درصد بالای سیلیس و حضور ناخالصی‌هایی مانند مواد آلی یا معدنی هستند که می‌توانند منجر به کاهش کیفیت سطح بتن نمایان شوند. به‌عنوان مثال، ذرات با اندازه‌های غیرمتوازن در این نوع ماسه‌ها می‌توانند موجب تشکیل حفره‌ها و ترک‌های ریز در سطح بتن شوند که این عیوب، نه تنها ظاهر بصری را تحت تأثیر قرار می‌دهند، بلکه دوام و طول عمر سازه را نیز کاهش می‌دهند [۵ و ۶]. در مقابل، ماسه بادی با دارا بودن دانه‌های بسیار ریزتر (عموماً کمتر از ۰/۲ میلی‌متر) و



توزیع یکنواخت، امکان پر شدن بهتر حفره‌های میکروسکوپی در ماتریس بتن را فراهم کرده و با کاهش اصطکاک در حین مخلوط شدن، فرآیند بتن‌ریزی و پرداخت سطحی را تسهیل می‌کند. این ویژگی‌ها باعث می‌شود سطح بتن نهایی صاف‌تر و یکدست‌تر باشد، که برای پروژه‌های بتن نمایان با حساسیت‌های بالا در طراحی و اجرا بسیار اهمیت دارد [۷ و ۶]. از منظر ترکیب شیمیایی، ماسه بادی به دلیل دارا بودن مقدار کمتر سیلیس، سختی پایین‌تری نسبت به ماسه‌های معدنی دارد که این امر به بهبود قابلیت کارپذیری بتن کمک شایانی می‌کند. نرم‌تر بودن ذرات ماسه بادی، توزیع یکنواخت‌تر آن‌ها در خمیر سیمان و اتصال بهتر این ذرات به ماتریس سیمانی را تسهیل می‌کند. این ویژگی‌ها منجر به کاهش بروز ترک‌های ریز و حفره‌های سطحی می‌شوند که یکی از مهم‌ترین مشکلات در تولید بتن نمایان به شمار می‌رود. علاوه بر این، دانه‌های ماسه بادی به دلیل شکل گردتر و سطح نرم‌تر خود، مقاومت کمتری در برابر حرکت خمیر سیمان ایجاد کرده و این امر می‌تواند به کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش چگالی و مقاومت بتن کمک کند [۸-۱۱]. اهمیت انتخاب نوع ماسه در بتن نمایان تنها به عوامل فیزیکی و شیمیایی محدود نمی‌شود، بلکه از جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی نیز حائز توجه است. ماسه بادی، به دلیل استخراج آسان‌تر در مناطق کویری و نیمه‌خشک، هزینه‌های حمل‌ونقل و آماده‌سازی کمتری نسبت به ماسه‌های معدنی دارد و این امر می‌تواند در کاهش هزینه‌های تولید بتن نمایان مؤثر باشد. همچنین، استفاده از ماسه بادی به جای ماسه‌های معدنی، که اغلب استخراج آن‌ها منجر به تخریب زیست‌محیطی و تغییر اکوسیستم رودخانه‌ها می‌شود، می‌تواند گامی در جهت حفاظت از محیط زیست و نزدیک شدن به اهداف توسعه‌ی پایدار تلقی گردد [۱۲ و ۱۳]. در نهایت، با توجه به رشد روزافزون تقاضا برای بتن‌های نمایان با کیفیت بالا در پروژه‌های ساختمانی، بررسی علمی و آزمایشگاهی تأثیر استفاده از ماسه بادی به‌عنوان جایگزینی برای ماسه‌های سنتی، ضرورتی انکارناپذیر است. این تحقیق، با هدف ارائه داده‌های دقیق در مورد خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی ماسه بادی و مقایسه عملکرد آن با ماسه‌های معدنی یا رودخانه‌ای، می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های آگاهانه‌تر در انتخاب مواد اولیه و بهینه‌سازی فرآیند تولید بتن نمایان کمک کند.

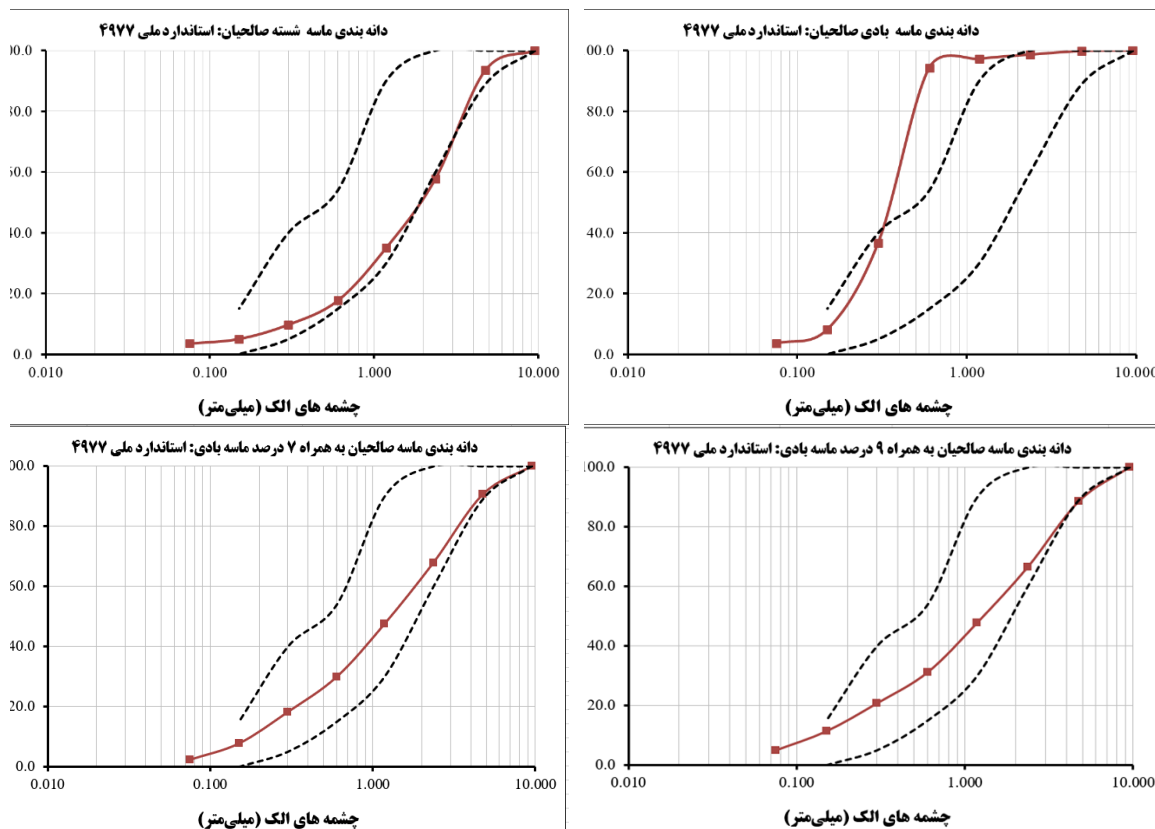
تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که استفاده از ماسه‌بادی (یا هر نوع ماسه ریزدانه یا فیلر) به دلیل برخورداری از مدول نرمی بسیار پایین، منجر به افزایش کیفیت سطح نمایان بتن و ایجاد بافتی یکدست در مقایسه با بتن‌های معمولی می‌شود [۱۴-۱۶]. این ویژگی موجب شده است که ماسه‌بادی به‌عنوان یک گزینه بالقوه در تولید بتن‌های اکسپوز و معماری مورد توجه قرار گیرد. با این حال، یکی از کاستی‌های عمده در پژوهش‌های گذشته، عدم ارائه‌ی یک چارچوب مشخص برای تعیین محدوده بهینه مصرف ماسه‌بادی است؛ به‌گونه‌ای که علاوه بر تأمین ویژگی‌های ظاهری و معماری مطلوب، بتواند خواص مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری، کششی و دوام را نیز در سطح قابل قبول حفظ نماید. در شرایط فعلی، اغلب مطالعات صرفاً بر جنبه‌ی بصری و سطح نمایان بتن تأکید داشته‌اند و کمتر به بررسی همزمان الزامات فنی و مکانیکی پرداخته‌اند. از این رو، خلأ مهمی در زمینه دستیابی به یک نسبت جایگزینی مناسب ماسه‌بادی که تعادلی میان زیبایی بصری و عملکرد مکانیکی برقرار کند، مشاهده می‌شود. نوآوری اصلی این تحقیق در آن است که این بار با رویکردی جامع، به بررسی مقادیر بهینه جایگزینی ماسه‌بادی پرداخته و بتن‌های حاصل از این جایگزینی نه تنها از منظر شاخص‌های نمایان بودن و کیفیت سطح، بلکه از نظر پارامترهای مکانیکی نیز مورد تحلیل و مقایسه قرار می‌گیرند. بدین ترتیب، این پژوهش تلاش دارد ضمن پوشش دادن خلأ موجود در ادبیات، مبنایی علمی و کاربردی برای استفاده هدفمند از ماسه‌بادی در تولید بتن‌های اکسپوز ارائه دهد.

۲- مصالح مصرفی و برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

۲-۱-۱- سنگدانه

سنگدانه مصرفی در این تحقیق شامل بادامی، نخودی، ماسه بادی و ماسه شسته که همگی از معدن صالحیا واقع در استان فارس استخراج شده است. نمودار دانه بندی کلیه سنگدانه‌های مصرفی در شکل شماره ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. منحنی دانه بندی سنگدانه‌های ریز مصرفی

شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مخلوط ماسه شسته و به ترتیب ۷ و ۹ درصد وزنی ماسه بادی

۲-۱-۲-سیمان

سیمان پرتلند مصرفی در این تحقیق سیمان پرتلند تپ ۲ کارخانه فارس نو بوده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی و فیزیکی این نوع سیمان مصرفی به ترتیب در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی سیمانهای مصرفی

	CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Ti ₂ O (%)	MgO (%)
OPC II	64.38	21.46	5.14	3.96		1.38
IRC 40	< 41	< 6	> 35	< 19	< 5	< 1.5
IRC 50	36-39	< 8	49-53	< 2	< 2	

۲-۱-۳-آب

آب اختلاط در این تحقیق آب شرب شهر شیراز بوده است که مطابق با استاندارد ASTM1602 [۱۷] می‌باشد.

۲-۱-۴-مواد افزودنی

فوق روان کننده مورد استفاده در این تحقیق PC-۵۰۰۰، بصورت مایع و قهوه‌ای رنگ، با دانسیته ۱/۲ کیلوگرم بر لیتر، و تهیه شده از شرکت رزین سازان فارس میباشد که بر پایه پلیمرهای نفتالین‌های سولفات تولید شده است. مشخصات ژل میکروسلیس نیز شامل: حالت ژله‌ای، به رنگ خاکستری روشن، فاقد یون کلر، با وزن مخصوص ۱/۲.

۳- برنامه‌ی آزمایشگاهی

در این تحقیق نمونه‌های بتنی در عیارهای مختلف سیمانی، نمونه‌های شامل نخودی و بادامی، حذف بادامی و یا نخودی و ماسه بادی ساخته شدند. در این تحقیق آزمایش‌های اسلامپ، وزن مخصوص و مقاومت فشاری و تعیین عمق نفوذ تحت فشار آب انجام شد تا علاوه بر سطوح، برخی خواص مکانیکی این نمونه‌ها نیز بررسی گردد. در ادامه به بررسی و تشریح این نتایج می‌پردازیم. در این پژوهش نمونه‌های آزمایشگاهی تحت تاثیر آزمون اسلامپ، مقاومت فشاری و سپس بررسی چشمی کیفیت سطح قرار می‌گیرند.

در این تحقیق تمامی نمونه‌های مکعبی بتن، به ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلیمتر ساخته شده و در شرایط ایده‌آل آزمایشگاهی در دمای 26°C و میانگین رطوبت محیطی 68% به دو صورت: ۱- مرطوب: با استفاده از پوشش کتانی خیس بر روی آزمونه‌های قالب‌گیری شده به مدت ۲۴ ساعت و ۲- غرقاب، در سنین ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری شدند. همچنین دمای بتن تازه حدود $27-30^\circ\text{C}$ اندازه‌گیری شد. در هر مرحله از ساخت نیز ابتدا درصد رطوبت نسبی سنگدانه‌ها، مطابق ASTM C56 و همچنین چگالی مصالح و میزان جذب آب آنها بر اساس ASTM C128 تعیین و پس از اصلاح طرح اختلاط، مصالح مجدداً توزین و مخلوط شدند. آزمایش اسلامپ بر روی تمامی طرح اختلاط‌های بتن تازه، طبق استاندارد ASTM C143 انجام گردید که در بخش نتایج آزمایش‌ها تشریح خواهد شد.

جدول ۲ جزئیات طرح‌های اختلاط ارائه شده را نشان می‌دهد.

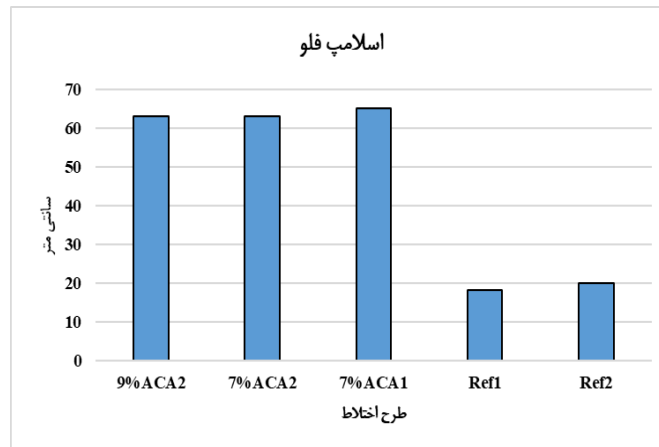
جدول ۲- نسبت‌های اختلاط مقادیر مصرفی مصالح در نمونه‌ها

نمونه	سیمان Kg/m3	سنگدانه Kg/m3				آب Kg/m3	فوق روانکننده Kg/m3	زل میکروسیلیس Kg/m3
		ماسه شسته	ماسه بادی	نخودی	بادامی			
9%ACA2	۳۷۰	۱۱۵۲	۱۷۰		۵۶۶	۱۱۶	۱/۶	۱۱
7%ACA2	۴۲۰	۱۱۳۶	۱۵۰		۵۴۸	۱۲۱	۱/۸	۱۱
7%ACA1	۴۰۰	۱۱۵۲	۱۵۰	۵۵۵		۱۱۸	۱/۷	۱۱
Ref1	۳۷۰	۱۳۷۰			۵۸۷	۱۰۰	۱/۶	۱۱
Ref2	۳۶۰	۱۰۹۴		۲۴۵	۵۷۴	۱۲۲	۱/۶	۱۱

۳- نتایج

۳-۱- آزمایش اسلامپ

نتایج این آزمایش در شکل شماره ۲ نشان داده شده است.



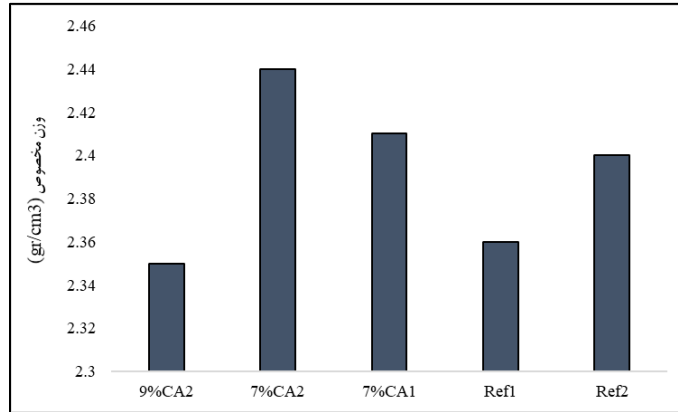
شکل ۲- وزن مخصوص ۲۸ روزه

در نگاه اول مشخص است که افزودن ماسه بادی به دلیل گرد گوشه‌تر بودن باعث روانی و حرکت‌پذیری بیشتر بتن تازه شده است. همانطور که شکل ۳ نشان می‌دهد، افزودن ۷ درصد ماسه بادی باعث افزایش چشمگیر کارایی بتن شده که منجر به افزایش روانی، حتی تبدیل بتن اسلامپ دار به بتن فلو شده

است. افزایش میزان ماسه بادی از ۷ درصد تا میزان ۹ درصد تفاوت چشمگیری در روانی و کارایی بتن ایجاد نکرده است و میتوان این حدود ۷ تا ۹ درصد ماسه بادی در بحث اسلامپ بتن را میزان بهینه‌ی اسلامپ بتن حاوی ماسه بادی در نظر گرفت. لازم به ذکر است هیچ یک از نمونه‌های اسلامپ فلو پدیده‌ی آب انداختگی نداشت.

۳-۲- وزن مخصوص

نتایج وزن مخصوص نمونه‌های بتنی ساخته شده در این تحقیق در شکل ۳ نشان داده شده است.

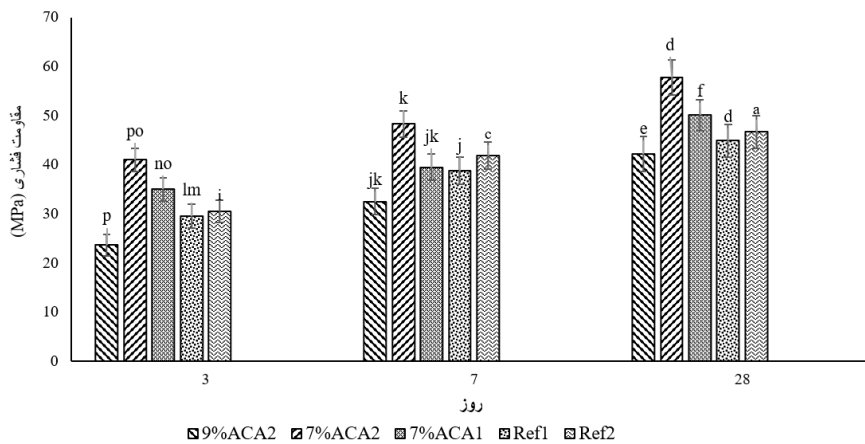


شکل ۳- وزن مخصوص ۲۸ روزه

همانطور که انتظار می‌رفت، وزن مخصوص بتن با عیار ۴۲۰ حاوی ۷ درصد ماسه بادی با اختلاف ناچیزی از طرح اختلاط مشابه با عیار ۴۰۰ بیشتر شده است. از طرفی، وزن مخصوص ۲۸ روزه بتن حاوی بیشترین مقدار ماسه بادی (۹٪) ۲/۳۵ شده که حدود ۴ درصد کمتر از طرح مشابه با ۷ درصد ماسه بادی شده است. در بتن‌های که ماسه بادی استفاده نشده است (Ref1, Ref2) وزن مخصوص بتن ۲۸ روزه اختلاف جزئی با یکدیگر داشته که به دلیل نسبت‌های اختلاط سنگدانه و تفاوت در وزن مخصوص هر یک بوده است.

۳-۳- مقاومت فشاری

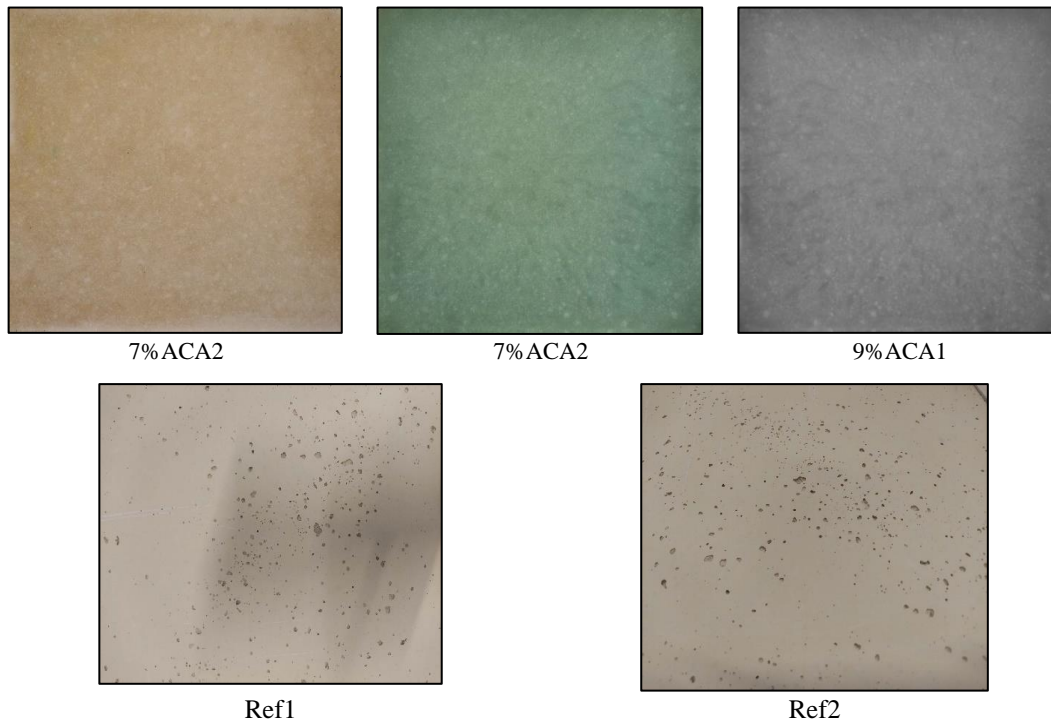
شکل شماره ۴ نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزگی را نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص است ماسه بادی تا حدودی باعث کاهش نسبی خلل و فرج بتن شده است [۱۸ و ۱۹] که تاثیر افزودن ماسه بادی در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزگی در نسبت جایگزینی ۷ درصد از کل مصالح سنگی ملموس تر بوده است؛ همانگونه که مشاهده می‌گردد، افزودن ۷ درصد ماسه بادی به طرح اختلاط باعث افزایش مقاومت فشاری در تمام سنین نسبت به بتن شاهد شده است. به علاوه این پارامتر، در بتن حاوی شن بادامی همانگونه که انتظار می‌رفت بیشتر شده است. بررسی کلی نتایج نشان می‌دهد که بهینه‌ترین مقدار برای استفاده از ماسه بادی حدود ۷ درصد می‌باشد. از طرفی افزایش جزئی مقدار ماسه بادی تا ۹٪، کاهش چشمگیر مقاومت فشاری بتن را در تمام سنین به دنبال داشته است، این موضوع در طرح اختلاطهایی مطرح است که تنها از شن بادامی استفاده شده است. لازم به ذکر است که برای هر آزمایش ۳ عدد آزمون مورد بررسی قرار گرفت که میانگین آنها به عنوان دبتای نهایی ثبت گردید.



شکل ۴- مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی

۳-۴- بررسی چشمی کیفیت سطح

سطوح و نمایان بودن نمونه‌های ساخته شده در شکل شماره ۵ نشان داده شده است.

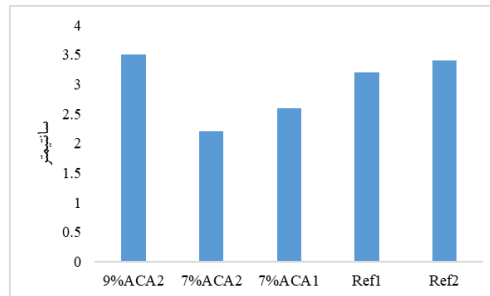


شکل ۵- بررسی سطوح نمونه‌های بتنی به لحاظ خواص ظاهری نمایان. تمامی این نمونه‌ها، همزمان و در شرایط کاملا یکسان روی میز ویبره قرار گرفته و ویبره شدند. از طرفی، روغن قالب به میزان وزنی مشخص برای هر نمونه اندازه‌گیری شد و به سطح قالب زده شد. میزان حفرات و خلل و فرج تشکیل شده در هر نمونه انعکاس کیفیت سطح نمایان و یکدستی سطح است.

تصاویر ارائه شده در شکل شماره ۵ نشان می‌دهد که ماسه بادی به عنوان فیلر نقش موثری در پر کردن فضای بین مخلوط سیمان و کاهش زبری سنگدانه‌ریز در بتن داشته است. از طرفی سنگدانه درشت (شن) تأثیری مشخص و قابل مشاهده‌ای بر روی صیقل بودن سطوح یا با اصطلاح نمایان بودن آنها نداشته است با اینکه به باور عموم ریزدانه تر بودن مصالح سنگی در ایجاد کردن سطح صاف و نمایان موثر می‌باشد [۲۰-۱۸]. لازم به ذکر است در بتن‌های شاهد نیز به دلیل استفاده از ماسه زبر صالحیان (حد نرمی: ۳/۸) نرمی لازم ایجاد نشده و تخلخل سطحی به طور کامل پوشش داده نشده است. موضوع حائز اهمیت در این بحث مقادیر افزودن ماسه بادی به مخلوط بتن است؛ همانگونه که مشاهده می‌شود ۹ درصد ماسه بادی در مخلوط بتن باعث صیقل شدن سطح بتن و پوشش تمام خلل و فرج‌های طرح شده است، این موضوع در رابطه با استفاده از ۷ درصد ماسه بادی نیز صادق است، لیکن، میبایست نتایج برخی آزمایشهای مکانیکی را مدنظر قرار داد تا نسبت به انتخاب مقدار استفاده از ماسه بادی تصمیم گرفت.

۳-۵- نتایج آزمون نفوذپذیری

نتایج عمق نفوذ نمونه‌های بتنی تحت فشار آب در شکل شماره ۶ نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است، مجدداً میزان بهینه استفاده از ماسه بادی در بتن نمایان حدود ۷ درصد وزن مصالح ریزدانه بوده است. این ترکیب به خوبی خلل و فرج را پر کرده و باعث مسدود شدن حفرات کامپوزیت سیمانی شده است. استفاده بیشتر از ۷ درصد ماسه بادی باعث افزایش سطح مخصوص در نمونه‌ی بتنی نمایان شده و در نهایت این موضوع باعث شده تا رطوبت بیشتری به باف بتن نفوذ کند. نمونه‌های شاهد نیز عمق نفوذی تقریباً برابر با بتن حاوی ۹ درصد ماسه بادی داشته‌اند. با توجه به زبری و مدول نرمی بالای ماسه مورد استفاده در این تحقیق، ۷ درصد ماسه بادی بهینه‌ترین میزان برای به حداقل رساندن نفوذ رطوبت و آب ثبت شده است [۲۴-۲۱]. لازم به ذکر است که برای هر آزمایش ۳ عدد آزمون مورد بررسی قرار گرفت که بیشترین مقدار آنها به عنوان دیتای نهایی ثبت گردید.



شکل ۶- دستگاه آزمون نفوذپذیری آب مطابق BS EN 12390-8 و نحوه قرارگیری نمونه‌ها تحت فشار ثابت 0.5 N/mm^2 به مدت سه روز. پس از رهاسازی فشار و برش عمود بر سطح تماس، عمق نفوذ آب بر اساس بیشترین مقدار اندازه‌گیری‌شده در میان سه نمونه تعیین می‌شود.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در استان فارس مجموع هزینه تأمین ماسه بادی به‌طور میانگین حداکثر حدود ۱۵۰ هزار تومان به ازای هر تن برآورد می‌شود، در حالی که قیمت ماسه شسته معمولاً از ۵۰۰ هزار تومان به ازای هر تن کمتر نیست. دلیل اصلی این اختلاف قابل توجه در قیمت، به نحوه استخراج و آماده‌سازی این مصالح بازمی‌گردد؛ ماسه بادی به‌عنوان یک منبع طبیعی و فراوان غالباً بدون هزینه‌های فرآوری و شست‌وشو قابل استفاده است، در حالی که تولید ماسه شسته مستلزم انجام عملیات برداشت، شست‌وشو، جداسازی ناخالصی‌ها، دانه‌بندی و حمل‌ونقل است که همگی هزینه نهایی آن را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهند. از این رو، جایگزینی بخشی از ماسه شسته با ماسه بادی در مقیاس تولید صنعتی می‌تواند منجر به کاهش چشمگیر هزینه‌های تولید بتن گردد و از جنبه اقتصادی مزیتی قابل توجه به همراه داشته باشد. نتایج این تحقیق نیز نشان داد که استفاده از ماسه بادی در طرح اختلاط بتن نقش مهمی در بهبود کیفیت سطح و خواص مکانیکی بتن نمایان دارد. افزودن ۷ تا ۹ درصد ماسه بادی باعث ایجاد سطحی صاف، یکنواخت و صیقلی می‌شود، اما ترکیب ۷ درصد به دلیل ارائه بالاترین مقاومت فشاری و کمترین عمق نفوذ، به‌عنوان گزینه بهینه ارزیابی شد. افزایش ماسه بادی به بیش از ۷ درصد، هرچند ظاهر بتن را بهبود می‌بخشد، اما منجر به کاهش مقاومت فشاری و افزایش نفوذپذیری می‌شود که به افزایش سطح مخصوص و تغییر در نسبت آب به سیمان و تأثیرات منفی بر ماتریس بتن مرتبط است. بنابراین، برای دستیابی به تعادلی بین زیبایی‌شناسی سطح و خواص مکانیکی، استفاده از ۷ درصد ماسه بادی در طرح اختلاط بتن نمایان توصیه می‌شود. این یافته‌ها می‌توانند در طراحی بتن‌های معماری و سازه‌ای کاربردی باشند. به‌کارگیری مقادیر بهینه ماسه بادی یا فیلر، به‌واسطه افزایش سطح ویژه ذرات، تأثیر مستقیم بر رفتار ریزساختاری و در نتیجه بر ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن دارد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که محدوده بحرانی مصرف این ماده در بازه ۷ تا ۹ درصد وزنی قرار می‌گیرد. جایگزینی ۷ درصد ماسه بادی منجر به پرشدگی مؤثر حفرات خمیر سیمانی و کاهش محسوس تخلخل گردیده و در نتیجه سطحی یکنواخت، زیبا و با حداقل ناپیوستگی‌های سطحی ایجاد می‌کند که شرایط مطلوبی برای بتن‌های اکسپوز فراهم می‌سازد. در مقابل، استفاده از ۹ درصد ماسه بادی اگرچه با افزایش نسبی مقاومت فشاری همراه بوده است، اما به دلیل افزایش سطح ویژه ذرات، منجر به رشد قابل ملاحظه در میزان جذب آب و نفوذپذیری بتن می‌شود. این پدیده ناشی از آن است که افزایش بیش از حد فیلر، تقاضای بیشتری برای خمیر سیمان ایجاد کرده و چنانچه این نیاز به‌طور کامل تأمین نشود، ساختار خمیر دچار ناپیوستگی و تخلخل ثانویه خواهد شد.

بر این اساس، مقدار بهینه ماسه بادی برابر با ۷ درصد وزنی تعیین می‌شود؛ زیرا این میزان با پرکردن مناسب خلل و فرج، تعادلی میان بهبود نمای سطحی و حفظ خواص مکانیکی برقرار کرده و مانع از افزایش نامطلوب جذب آب و نفوذپذیری می‌گردد. در واقع، این سطح جایگزینی بهترین عملکرد را در ایجاد ریزساختاری متراکم‌تر و هم‌زمان تأمین ویژگی‌های معماری و دوام بتن ارائه می‌دهد.

مراجع

1. Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2010). *Concrete Technology*. Pearson Education.
2. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill Education.
3. Domone, P., & Illston, J. M. (2010). *Construction Materials: Their Nature and Behaviour*. CRC Press.
4. Ahmad, S., & Mahmood, H. (2021). "Effect of Fine Aggregates on the Surface Finish of Exposed Concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(2).
5. Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2002). *Concrete*. Prentice Hall.



6. Thomas, M. D. A., & Wilson, M. L. (2002). "Influence of Aggregate Characteristics on Concrete Performance." *ACI Materials Journal*, 99(3), 178-185
7. A. P. M. Almeida, L. F. S. Oliveira, and V. S. Ferreira (2021). Effect of Aeolian Sand on the Performance of Concrete for Architectural and Exposed Surface Applications. *Journal of Concrete Science and Technology*, 10(4), 292-302.
8. F. F. Sousa, R. L. Lima, and D. M. Silva (2021). The Use of Aeolian Sand as a Partial Replacement for Natural Sand in Concrete for Exposed Finishes Applications. *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, 12(7), 153-161.
9. M. T. Shafiee, A. H. Salehi, and R. M. Nia (2021). Utilization of Aeolian Sand as Fine Aggregate in Concrete: A Study on Durability and Exposed Surface Finishes. *Construction and Building Materials*, 297, 123680.
10. S. M. Patel, M. S. Iyer, and N. V. Bhargava (2022). Application of Aeolian Sand in Concrete for Sustainable Exposed Surface Finishes. *Journal of Sustainable Building Materials and Construction*, 40, 105238.
11. J. H. H. Costa, R. S. R. Silva, and L. A. D. Santos (2023). Aeolian Sand in Concrete for Architectural Finishes: Mechanical and Aesthetic Performance. *Journal of Building Materials*, 56(2).
12. B. S. Rajput, P. D. Yadav, and A. M. Dhakal (2021). Sustainability and Surface Finishes of Concrete with Aeolian Sand: A Comprehensive Review. *Journal of Sustainable Construction*, 9(6), 152-160.
13. T. H. Mirzaei, A. S. Khorrami, and S. F. Ghasemi (2021). The Role of Aeolian Sand in Enhancing the Aesthetic Properties and Durability of Exposed Concrete Finishes. *Journal of Architectural Engineering Materials*, 5(3), 220-229.
14. M. A. Khan, A. I. Khan, and S. H. Hussain (2022). Experimental Investigation on Concrete with Aeolian Sand for Exposed Surface Finishes: Sustainability and Structural Performance. *Journal of Concrete Engineering and Technology*, 24(5), 771-781.
15. A. Al-Hadithi, R. N. Kadhim, and A. M. Hassan (2023). Performance of Concrete Incorporating Aeolian Sand as Fine Aggregate: Durability and Aesthetic Considerations for Exposed Surface Finishes. *Journal of Building and Construction Materials*, 101(1), 234-241.
16. Z. J. Akram, A. S. Alam, and S. N. Kazmi (2021). Investigating the Aesthetic and Durability Performance of Exposed Concrete Finishes with Aeolian Sand. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 15(6), 128-137.
17. ASTM C1602/C1602M-12: Standard specification for mixing water used in the production of hydraulic cement concrete. ASTM International.
18. Jahani, M., Moradi, S., & Shahnoori, S. (2023). 4-year monitoring of degradation mechanisms of seawater sea-sand concrete exposed to tidal conditions: development of chemical composition and micro-performance. *Construction and Building Materials*, 409, 133475.
19. Moharrer, A., Peiravian, F., & Jahani, M. (2025). Experimental Investigation of the Thermo-Mechanical and Chemical Behavior of Mixed Portland Cement–Calcium Sulfoaluminate Mortar Under Thermal Cycles. *Journal of Civil and Environmental Engineering*.
۲۰. امیرحسین جلالی، محسن یزدان‌پناه، و حسین فتح‌اللهی تحلیل کاربرد ماسه بادی در بتن‌های اکسپوز برای مصارف معماری و نمای ساختمان، مجله مهندسی و تکنولوژی بتن ایران، ۱۰(۳)، ۱۲۳-۱۳۰.
۲۱. محمود غفاری، یوسف احمدی، و علی کاظمی، بررسی تأثیر ماسه بادی بر ویژگی‌های سطحی و زیبایی‌شناسی بتن برای سطوح اکسپوز، نشریه تحقیقات بتن ایران، ۱۱(۱)، ۴۵-۵۳، ۱۳۹۸.
۲۲. سیدعلی موسوی، محمدرضا میرزایی، و سعید تاجیک بررسی استفاده از ماسه بادی در بتن‌های پیش‌ساخته با سطوح نمایان، نشریه مهندسی مواد و ساخت، ۳۵(۲)، ۹۲-۱۰۱، ۱۳۹۹.
23. Jahani, M., Shahnoori, S., Moradi, S., Yazdani, M., & Ershadi, C. (2023). The Impact of Tidal Conditions, Supplementary Cementitious Material and Marine's Material on Some of Concrete's Durability Parameters. *Ferdowsi Civil Engineering*, 36(3).
24. Jahani, M., Shahnoori, S., Moradi, S., & Ershadi, C. (2022). Cleaner Production Towards a Green Concrete: Multi-scale Experimental Study on Long-term Performance of a Sustainable Modified-SWSSC. *American Journal of Construction and Building Materials*, 6(1), 43-59.