تحقیقات بتن
سال چهاردهم، شمارهٔ دوم
تابستان ۱۴۰۰
ص ۱۰۵ – ۸۳
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۰

بررسی مطلوبیت فنی و اقتصادی بتن‌های خودتراکم توانمند حاوی متاکائولین، میکروسیلیس و خاکستربادی

میلاد اورک
دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت، گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.
سیدفتح اله ساجدی *
دانشیار گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.
شهریار طاوسی تفرشی
استادیار گروه عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده
بتن خودتراکم به سبب استفاده از مقادیر بیش‌تر پرکننده و فوق روان‌کننده، لزجت خمیری بیش‌تر و تنش جاری‌شدن کم‌تر دارد. برای ساخت بتن خودتراکم توانمند، لازم است علاوه بر رئولوژی، خواص مکانیکی و دوام بتن نیز بهبود یابند. به این منظور باید مقدار سیمان افزایش یابد یا از مواد جایگزین سیمان استفاده شود. این موضوع سبب بالارفتن قیمت تمام‌شده یک مترمکعب بتن و بنابراین کاهش تمایل به استفاده از آن می‌شود. در این تحقیق با ساخت ۲۰ طرح بتن خودتراکم توانمند، خواص مکانیکی با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی دونیم‌شدن و ضریب ارتجاعی استاتیکی، و خواص دوام با آزمایش‌های تعیین عمق نفوذ آب، نفوذ تسریع‌شده یون کلراید و مقاومت در برابر سولفات، تعیین شده و بر این اساس، میزان مطلوبیت فنی بتن‌های ساخته شده، مشخص شدند. همچنین با بررسی قیمت تمام‌شده یک متر مکعب بتن، میزان مطلوبیت اقتصادی و مطلوبیت فنی و اقتصادی بتن‌ها محاسبه شدند. نتایج نشان داد که کاربرد پوزولان‌ها در بتن خودتراکم توانمند، مطلوبیت فنی ناشی از خواص مکانیکی را تا حدود ٪۴۰ کم کرده، ولی مطلوبیت فنی متأثر از دوام به‌طور چشم‌گیری افزایش یافت، تا جایی که در سن ۹۱ روزه، حدود ۵ برابر بیشتر شده است. بر این اساس، عامل نهایی مطلوبیت فنی در مخلوط‌های خودتراکم تحقیق حداقل ٪۲۶ و حداکثر ٪۲۵۰ بیشتر از بتن مرجع نتیجه شد. به‌دلیل قیمت بیشتر مواد پوزولانی نسبت به سیمان، با افزایش میزان جایگزینی پوزولان‌ها، عامل مطلوبیت اقتصادی تا بیش از ٪۵۰ کاهش یافت، ولی عامل مطلوبیت فنی و اقتصادی تا حدود ٪۶۰ بهبود پیدا نمود.

واژه‌های کلیدی: بتن خودتراکم توانمند، پوزولان، خواص مکانیکی، دوام، مطلوبیت فنی و اقتصادی.

* نویسنده مسئول: sajedi@iauahvaz.ac.ir

۱- مقدمه

بتن از زمان‌های گذشته به‌عنوان یک ماده ساختمانی مهم در ساخت سازه‌ها کاربرد داشته است. در گذشته‌ای نه چندان دور، دیدگاه کلی نسبت به بتن به‌صورت ماده‌ای مقاوم در برابر نیروهای فشاری بوده است؛ بر این اساس متخصصین به‌دنبال افزایش نسبی مقاومت بتن، به‌ویژه برای کاربرد در ساختمان‌های بلندمرتبه بوده‌اند و در این مسیر، موفق به ساخت بتن‌هایی با مقاومت زیاد شدند و کاربرد آن در مواردی سبب دست‌یابی به مزایای فراوانی فنی و اقتصادی گردید [۱]. با این حال بروز برخی خرابی‌های شدید ناشی از عوامل محیطی، محققین را به این نتیجه رسانید که مقاومت بتن نمی‌تواند تنها عامل تعیین‌کننده کیفیت بتن باشد، بلکه کارایی و دوام سازه‌های بتنی در برابر عوامل مهاجم و مخرب نیز اهمیت ویژه‌ای دارد [۲]. این مسأله در نهایت منجر به پیدایش انواعی از بتن با عنوان بتن خودتراکم توانمند شد. ویژگی اصلی این نوع بتن بر اساس دو جنبه خودتراکمی و عملکرد بالای آن می‌باشد.

بتن خودتراکم یک بتن نوآورانه است که نیازی به ارتعاش برای جایدهی و تراکم ندارد. این بتن قادر است حتی باوجود تراکم آرماتورها، تحت اثر وزن خود جاری شده، به طور کامل قالب را پر کرده و به تراکم کامل دست پیدا کند. بتن سخت‌شده آن چگال، همگن و دارای خواص مهندسی و دوام مشابه بتن سنتی ارتعاشی می‌باشد [۳]. بتن خودتراکم در مقایسه با بتن معمولی مقادیر ذرات ریز و میزان افزودنی بیشتری داشته و چگالی ذرات آن یکنواخت‌تر است که این خواص، لزجت و روانی مورد نیاز را فراهم می‌آورند. برای دست‌یابی به خودتراکمی لازم است تا حجم مواد درشت‌دانه محدود شده، نسبت آب به سیمان کاهش یافته و از فوق روان‌کننده استفاده شود [۴]. اثبات شده که اصلاح بتن با ذرات بسیار ریز خواص مکانیکی و دوام بتن را ارتقاء می‌بخشد [۵]. مواد پرکننده فعال تأثیر مثبتی بر تأخیر در فرایند تخریب بتن و افزایش چقرمگی ترکیب سیمانی دارند [۷-۶]. باوجود مزایای بی‌شمار، از آنجایی که کاربرد این نوع بتن نیازمند نیروی انسانی ماهر، مصالح خاص و در نتیجه هزینه‌های بیش‌تر می‌باشد، توسعه آن در ابتدا با محدودیت مواجه گردید و صرفا در ساخت ساختمان‌های بلندمرتبه، پل‌ها و سازه‌های خاص به‌کار گرفته شد. با این وجود در سال‌های اخیر نگرش نسبت به این مساله تغییر یافته و تلاش‌های بسیاری برای مرتفع نمودن مشکلات طراحی، مواد و مصالح، اجراء و اقتصاد بتن توانمند انجام شده تا از این طریق کاربرد آن گسترش یابد [۱].

از نظر زیست‌محیطی انتشار گاز دی‌اکسید کربن ناشی از کارخانه‌های تولید سیمان یکی از موضوعات اصلی توسعه پایدار در مواجهه با صنعت بتن است. انتشار سالیانه گاز دی‌اکسید کربن ناشی از تولید سیمان در جهان بیش از ۲/۳ میلیارد تن است که این مقدار حدود ٪۷ از گاز دی‌اکسید کربن تولید شده در جهان بوده و حدود ٪۱۳ از انرژی صنعتی جهان را مصرف می‌کند [۹-۸].

برای دستیابی به صنعت ساخت‌وساز دوستدار طبیعت[1]، روش‌های مختلفی از جمله استفاده مجدد از زباله‌های صنعتی[2]، مواد بازیافتی[3] و زباله‌های صنعت ساخت‌وساز[4] پیشنهاد شده‌اند. به هر حال، کاهش مصرف سیمان یکی از مؤثرترین راه‌حل‌ها برای کاهش انتشار گاز دی‌اکسید کربن می‌باشد و برای دستیابی به این مهم، استفاده از مواد جایگزین سیمان بسیار متداول است؛ زیرا در حالی‌که میزان سیمان مصرفی را کاهش می‌دهد، می‌تواند خواص بتن را بهبود بخشد [۱۰]. مواد جایگزین سیمان، مواد طبیعی یا محصولات جانبی صنعتی هستند که وقتی همراه با آب و سیمان به کار برده می‌شوند، رفتار سیمانی از خود نشان می‌دهند. علاوه بر این، مواد جایگزین سیمان مخلوط بتن را بسیار اقتصادی کرده، مقاومت را بهبود داده و نفوذپذیری بتن را کم می‌کنند [۱۴-۱۲]. مواد جایگزین سیمان با هیدروکسید کلسیم که در اثر هیدراسیون سیمان آزاد می‌شود، واکنش داده و به سیلیکات کلسیم هیدراته[5] تبدیل می‌شوند. این واکنش را واکنش پوزولانی می‌نامند. از آنجا که واکنش پوزولانی با هیدروکسید کلسیم که جزء ضعیف خمیر سیمان می‌باشد واکنش داده و آن‌ها را مصرف می‌نماید و هم‌چنین ریزساختار بتن را بهبود می‌بخشد، باعث افزایش دوام بتن در برابر عوامل مخرب می‌گردد. سرعت واکنش پوزولانی عموما کند بوده و به تبع آن سرعت حرارت‌زایی نیز کند خواهد بود که این خاصیت باعث می‌گردد این محصولات معمولا انتخاب مناسبی

[1] Eco-friendly civil construction
[2] Industrial wastes
[3] Recycled materials
[4] Wastes from construction
[5] Calcium Silicate Hydrate (CSH)

برای بتن‌ریزی‌های حجیم باشند [۱۵]. با توجه به اینکه مواد مکمل سیمانی متفاوت هستند بنابراین اثرات آن‌ها بر روی سیمان و بتن نیز متفاوت خواهد بود. بنابراین بهترین راه برای کسب نتایج مطلوب استفاده از نسبت‌های مخلوط مختلف در انجام آزمایش‌های بتن در حالات تازه و سخت‌شده است [۱۶].

دراین تحقیق تلاش شده برخی خواص رئولوژی، مکانیکی و دوام بتن‌های خودتراکم توانمند حاوی پوزولان بررسی شوند. به‌همین منظور متاکائولین، میکروسیلیس و خاکستربادی به‌صورت جداگانه و یا ترکیبات دوتایی و سه‌تایی و با درصدهای مختلف، جایگزین بخشی از سیمان شدند. در پایان، مخلوط‌های ساخته‌شده از نظر فنی و اقتصادی رتبه‌بندی شده و طرح‌های بهینه معرفی شدند.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی

در این تحقیق برای ساخت مخلوط‌های بتن خودتراکم از سیمان پرتلند نوع ۲ تولید کارخانه سیمان خوزستان با سطح ویژه m^2/g ۰/۳۲۶ استفاده شده است. پودر سنگ آهک با نرمی زیاد[1] (عبوری از الک شماره ۱۴۰) و وزن مخصوص ظاهری g/cm^3 ۲/۵۶۱ نیز به عنوان عامل اصلاح کننده لزجت[2] به کار گرفته شد. مواد پوزولانی استفاده شده در تحقیق عبارتند از متاکائولین، میکروسیلیس و خاکستربادی که دارای متوسط اندازه ذرات µm ۳۷ (معادل مش ۴۰۰) بوده و محصول گروه کارخانجات جهان پودر دلیجان هستند. ترکیبات شیمیایی سیمان، پودر سنگ آهک و مواد پوزولانی به کار برده شده در تحقیق، با استفاده از طیف‌نگاری فلوئورسانس اشعه ایکس[3] تعیین گردیده و در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

در ساخت مخلوط‌های مورد نظر از ماسه رودخانه‌ای دوبار شسته شده اندیمشک با مدول نرمی ۴/۸ و شن شکسته در دو اندازه متفاوت استفاده گردید. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی استفاده شده در تحقیق در جدول ۲ ارائه شده و منحنی دانه‌بندی آن‌ها نیز در اشکال ۱ و ۲ ترسیم شده است. همچنین به منظور تأمین روانی مورد نیاز در ساخت مخلوط‌ها از فوق روان‌کننده بر پایه پلی-کربوکسیلات اتر قهوه‌ای رنگ با وزن مخصوص g/cm^3 ۱/۰۷ تولید شده توسط شرکت فابیر[4] استفاده گردید.

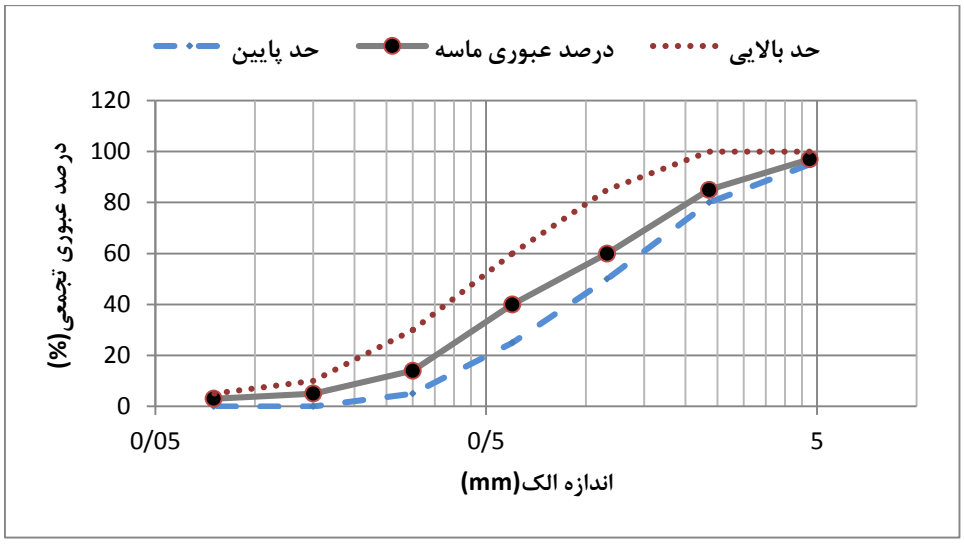
جدول ۱- ترکیبات شیمیایی پودر سنگ آهک و مواد سیمانی استفاده شده در تحقیق

مواد مصرفی	درصد رطوبت	آلومینا	اکسید کلسیم	اکسید سدیم	اکسید پتاسیم	سیلیس	سولفیت	اکسید آهن	اکسید منیزیم	افت جرم حرارتی
	%	Al_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	SiO_2	SO_3	Fe_2O_3	MgO	LOI
سیمان	–	٤/٦٠	٦٣/٤٤	٠/٢٤	٠/٧٩	٢١	٢/٥٦	٣/٥٤	٢/٤٢	١/٣٦
متاکائولین	٠/٤٥	١٥/٦٩	١/٤٦	٠/٠١	٠/٠٤	٨٠/٧٦	٠/١٢	٠/٠٤	٠/٠٥	–
میکروسیلیس	–	٠/٤١	٣/١٥	٠/٠١	٠/١٠	٩٤/٦٨	٠/٠١	–	٠/٠٩	–
خاکستربادی	–	١٨/٠٨	٣٩/٣٥	٠/٠٥	٠/١١	٣٨/٢٨	–	٣/٠٦	٠/٢١	٣/٠٠٧
پودر سنگ آهک	١/٢٤	٤/٠٥	١٠/٠٥	٠/٢٥	٠/٠٢٣	١٥/٤٧	٠/٥	٢/٣	١٧/٦٣	٤٢/١٣

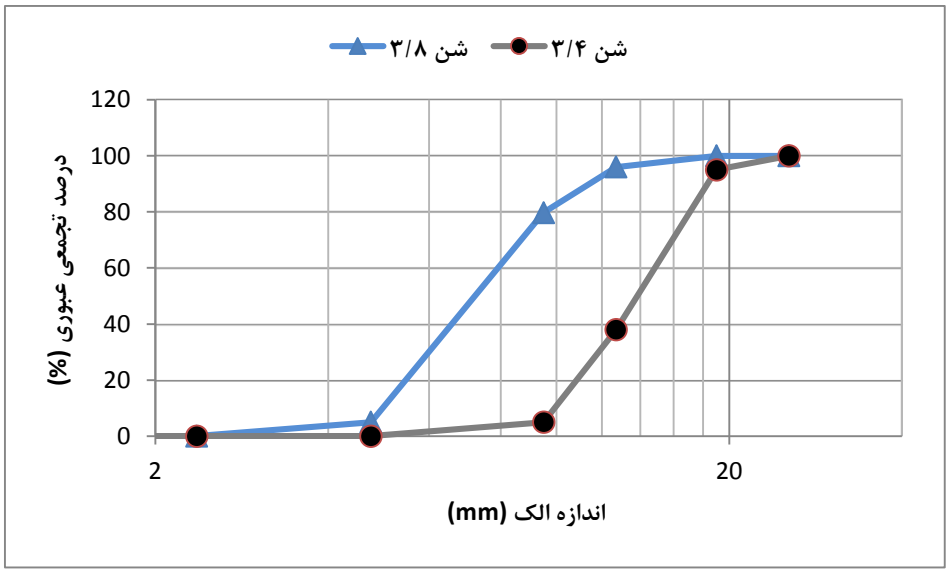
جدول ۲- مشخصات فیزیکی مصالح سنگی استفاده شده در تحقیق

نوع مصالح سنگی	حداکثر اندازه (mm)	جرم مخصوص (g/cm^3)	جذب آب (%)	رطوبت موجود (%)
ماسه	٥	٢/٦٥	٠/٦	٠
شن ریز	٩/٥	٢/٥٦	١	٠
شن درشت	١٩/٥	٢/٦٣	٠/٨	٠

[1] High fineness
[2] Viscosity Modifying Agent (VMA)
[3] X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)
[4] Fabir Company



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی ریزدانه مصرفی



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی درشت‌دانه مصرفی

۲-۲- جزئیات طرح اختلاط‌های تحقیق

در این تحقیق اقدام به ساخت و آزمایش ۲۰ مخلوط بتن خودتراکم (شامل یک مخلوط مرجع و ۱۹ مخلوط بتن خودتراکم حاوی پوزولان با درصدهای جایگزینی مختلف به‌صورت جداگانه و ترکیبات دوتایی و سه‌تایی) گردیده است. جزئیات طرح اختلاط‌های تحقیق در جدول ۳ داده شده‌اند. در مخلوط‌های بتن خودتراکم ساخته شده، ابتدا بتن خودتراکم مرجع با رعایت ضوابط مورد نیاز برای دست‌یابی به رئولوژی مورد نیاز ساخته شد، سپس در سایر مخلوط‌ها پوزولان‌های متاکائولین، میکروسیلیس و خاکستربادی با درصدهای مختلف به‌صورت جداگانه یا ترکیبات دوتایی و سه‌تایی) جایگزین بخشی از سیمان شدند. در همه مخلوط‌های ساخته شده، میزان ماسه، شن درشت، شن ریز، پودر سنگ آهک و نسبت آب به مواد چسباننده ثابت نگه داشته شدند. میزان فوق روان‌کننده پلی‌کربوکسیلاتی برای همه مخلوط‌ها به‌صورت چشمی با افزودن تدریجی تا رسیدن به روانی مورد نیاز تعیین گردیدند.

۲-۳- ساخت مخلوط‌ها

برای ساخت مخلوط‌های بتنی از مخلوط‌کن دوار با تیغه‌های ثابت و ظرفیت ۳۰۰ لیتر استفاده شده و روش مخلوط کردن برای همهٔ مخلوط‌ها به‌طور مشابه انجام گردید. ابتدا سنگدانه‌ها (کل ماسه و شن) به‌صورت خشک در مخلوط‌کنِ ساکن ریخته شده سپس ۱۰٪

آب اختلاط به آن‌ها اضافه گردید و برای مدت ۳۰ ثانیه مخلوط شدند؛ سپس ۳ دقیقه به حالت سکون درآمدند، پس از آن مخلوط‌کن شروع به کار کرده و پودر سنگ آهک به آرامی افزوده شده سپس پوزولانِ مخلوط شده با ٪۵۰ آب اختلاط، به‌تدریج افزوده گردید. ۳۰ ثانیه بعد، سیمان و بلافاصله فوق روان‌کننده ترکیب شده با باقیمانده آب اختلاط به مخلوط اضافه شدند. در نهایت بتن خودتراکم به‌مدت ۲ دقیقه دیگر مخلوط گردید. مخلوط‌ها در دمای متوسط $32\ ^{\circ}C$ و رطوبت نسبی ٪۵۰ ساخته شدند. قابل ذکر است که ترتیب و درصد افزودن مصالح به مخلوط بتن، بر اساس تجربیات محققین بوده است.

جدول ۳ – جزئیات طرح اختلاط‌های تحقیق (kg/m^3)

ردیف	نام طرح مخلوط	سیمان	آب	ماسه	شن ریز	شن درشت	پودرسنگ آهک	فوق روان‌کننده	متاکائولین	میکروسیلیس	خاکستر بادی
۱	Ctrl	٥٤٦/٤	٢١٨/٥٦	٩٤٨/٤	٢٣٣/٤	٣١١/٢	١٠٥/١	٨/١٩٧	–	–	–
۲	MK15	٤٦٤/٤	٢١٨/٥٦	٩٤٨/٤	٢٣٣/٤	٣١١/٢	١٠٥/١	٨/١٩٧	٨١/٩٦	–	–
۳	MK25	٤٠٩/٨	٢١٨/٥٦	٩٤٨/٤	٢٣٣/٤	٣١١/٢	١٠٥/١	٧/٦٥٠	١٣٦/٦	–	–
٤	MK35	٣٥٥/٢	٢١٨/٥٦	٩٤٨/٤	٢٣٣/٤	٣١١/٢	١٠٥/١	٦/٠١٠	١٩١/٢٤	–	–
٥	SF6	٥١٣/٧	٢١٨/٥٦	٩٤٨/٤	٢٣٣/٤	٣١١/٢	١٠٥/١	٨/١٩٧	–	٣٢/٧٨	–
٦	SF12	٤٠٨/٨	٢١٨/٥٦	٩٤٨/٤	٢٣٣/٤	٣١١/٢	١٠٥/١	٨/١٩٧	–	٦٥/٥٧	–
۷	SF18	٤٤٨/١	٢١٨/٥٦	٩٤٨/٤	٢٣٣/٤	٣١١/٢	١٠٥/١	٦/٥٥٦	–	٩٨/٣٥	–
۸	FA20	٤٣٧/١	٢١٨/٥٦	٩٤٨/٤	٢٣٣/٤	٣١١/٢	١٠٥/١	٨/١٩٧	–	–	١٠٩/٢٨
۹	FA35	٣٥٥/٢	٢١٨/٥٦	٩٤٨/٤	٢٣٣/٤	٣١١/٢	١٠٥/١	٦/٨٣٠	–	–	١٩١/٢٤
۱۰	FA50	٢٧٣/٢	٢١٨/٥٦	٩٤٨/٤	٢٣٣/٤	٣١١/٢	١٠٥/١	٥/٨٤٦	–	–	٢٧٣/٢
۱۱	MK15 SF12	٣٩٨/٩	٢١٨/٥٦	٩٤٨/٤	٢٣٣/٤	٣١١/٢	١٠٥/١	٧/١٠٣	٨١/٩٦	٦٥/٥٧	–
۱۲	MK25 SF12	٣٤٤/٣	٢١٨/٥٦	٩٤٨/٤	٢٣٣/٤	٣١١/٢	١٠٥/١	٧/٩٢٣	١٣٦/٦	٦٥/٥٧	–
۱۳	MK15 FA20	٣٥٥/٢	٢١٨/٥٦	٩٤٨/٤	٢٣٣/٤	٣١١/٢	١٠٥/١	٦/٧٢١	٨١/٩٦	–	١٠٩/٢٨
۱٤	MK25 FA20	٣٠٠/١	٢١٨/٥٦	٩٤٨/٤	٢٣٣/٤	٣١١/٢	١٠٥/١	٦/٧٧٠	١٣٦/٦	–	١٠٩/٢٨
۱٥	SF12 FA20	٣٧١/٥	٢١٨/٥٦	٩٤٨/٤	٢٣٣/٤	٣١١/٢	١٠٥/١	٦/٥٥٦	–	٦٥/٥٧	١٠٩/٢٨
۱٦	SF12 FA35	٢٨٩/٦	٢١٨/٥٦	٩٤٨/٤	٢٣٣/٤	٣١١/٢	١٠٥/١	٦/٥٥٦	–	٦٥/٥٧	١٩١/٢٤
۱۷	MK15 SF6 FA35	٢٤٠/٤	٢١٨/٥٦	٩٤٨/٤	٢٣٣/٤	٣١١/٢	١٠٥/١	٦/٦٦٦	٨١/٩٦	٣٢/٧٨	١٩١/٢٤
۱۸	MK25 SF6 FA35	١٨٥/٨	٢١٨/٥٦	٩٤٨/٤	٢٣٣/٤	٣١١/٢	١٠٥/١	٦/١٠٤	١٣٦/٦	٣٢/٧٨	١٩١/٢٤
۱۹	MK15 SF12 FA35	٢٠٧/٦	٢١٨/٥٦	٩٤٨/٤	٢٣٣/٤	٣١١/٢	١٠٥/١	٧/١٠٣	٨١/٩٦	٦٥/٥٧	١٩١/٢٤
۲۰	MK25 SF12 FA20	٢٣٤/٩	٢١٨/٥٦	٩٤٨/٤	٢٣٣/٤	٣١١/٢	١٠٥/١	٦/٧٢٠	١٣٦/٦	٦٥/٥٧	١٠٩/٢٨

۲-۳-۱- آزمایش‌های خودتراکمی بتن

برای هر مخلوط پنج آزمایش مختلف مربوط به رفتار رئولوژی بتن تازه انجام گرفت. کارایی با استفاده از آزمایش جریان اسلامپ مطابق استاندارد ASTM C1611 [۱۷]، آزمایش T_{50}، قابلیت عبور با انجام آزمون‌های جعبه L و حلقه J به ترتیب مطابق استانداردهای EN 12350 [۱۸] و ASTM C1621 [۱۹] و روانی با آزمایش جعبه U مطابق استاندارد EN 11044 [۲۰] ارزیابی شدند. مخلوط‌ها به لحاظ رئولوژی مطابق "راهنمای بتن خودتراکم اروپا[1]" [۲۱] طبقه‌بندی شدند. این راهنما محدوده‌های مجاز را برای آزمایش‌های مختلف بتن خودتراکم تعیین نموده که در جدول ۴ ارائه شده است.

۲-۳-۲- آزمون‌های بتن سخت‌شده

برای هر مخلوط ۹ نمونه مکعبی به بعد ۱۰ سانتی‌متر، ۹ نمونه استوانه‌ای استاندارد، ۹ نمونه استوانه‌ای ۱۵×۱۵ سانتی‌متر، ۶ نمونه استوانه‌ای ۱۰×۵ سانتی‌متر و ۶ نمونه منشوری ۱۱/۲۵×۱×۱ اینچ

[1] European Guidelines for self-compacting concrete (EFNAEC)

نمونه‌گیری شدند. در مجموع ۷۸۰ نمونه مختلف برای رسیدن به اهداف این تحقیق تهیه گردیدند. نمونه‌ها به‌مدت ۲۴ ساعت در قالب و در شرایط آزمایشگاه نگهداری شده و سپس قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها در مخزن آب با دمای ۲±۲۰ درجه سانتی‌گراد مطابق با آنچه در استاندارد EN 12390 [۲۲] شرح داده شده، عمل‌آوری گردیدند. در سن مورد نیاز برای انجام آزمایش، نمونه‌ها از یک ساعت قبل از شروع آزمایش از مخزن خارج شده و در محیط آزمایشگاه و بدون هیچ‌گونه رطوبت اضافی نگهداری شدند.

جدول ۴- محدوده‌های مجاز آزمایش‌های خودتراکمی بر اساس راهنمای بتن خودتراکم اروپا [۲۱]

روش آزمون	خاصیت مورد بررسی	واحد	مقدار محدوده مجاز	
			حداقل	حداکثر
جریان اسلامپ	قابلیت پرکنندگی	میلی‌متر	٦٥٠	٨٠٠
حلقه J	قابلیت عبور	میلی‌متر	۰	۱۰
جعبه L	قابلیت عبور	–	۰/۸	۱
جعبه U	روانی	میلی‌متر	۰	۳۰

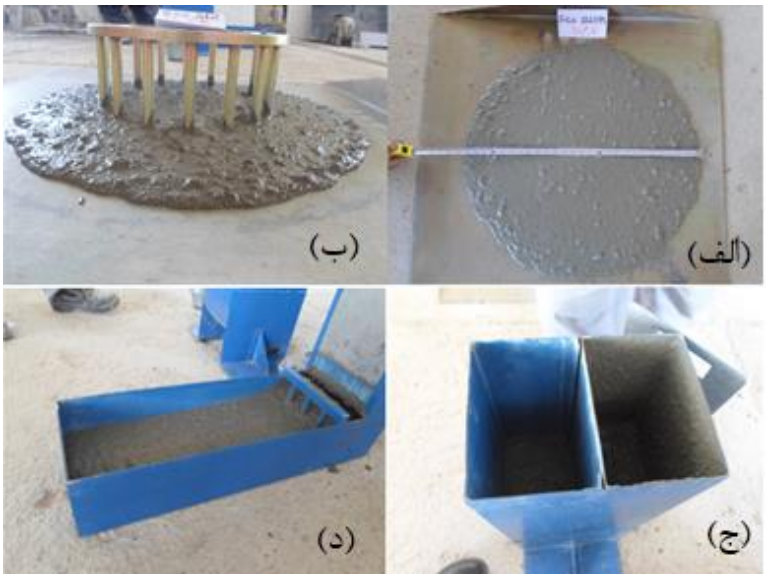
در پایان دورهٔ عمل‌آوری، نمونه‌ها مطابق استانداردهای مربوطه، آزمایش شدند. برای بررسی خواص مکانیکی، آزمایش‌های مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM C39 [۲۳] در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه، مقاومت کششی دونیم‌شدن مطابق با استاندارد ASTM C496 [۲۴] در سن ۲۸ روزه و ضریب ارتجاعی استاتیکی مطابق با استاندارد ASTM C469 [۲۵] در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه انجام شدند. هم‌چنین خواص دوام مخلوط‌ها از طریق آزمایش‌های عمق نفوذ آب مطابق با استاندارد EN 12390-8 [۲۶] در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه، نفوذ تسریع‌شده یون کلراید مطابق با استاندارد ASTM C1202 [۲۷] در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه و مقاومت در برابر سولفات مطابق با استاندارد ASTM C1012 [۲۸] تا سن ۱۵ هفتگی، انجام شدند.

۳- تحلیل نتایج آزمایش‌ها

۳-۱- آزمایش‌های بتن تازه

در این تحقیق برای ارزیابی خواص خودتراکمی بتن، پنج آزمایش شامل جریان اسلامپ، T_{50}، جعبه L، جعبه U و حلقه J بر مبنای راهنمای اروپایی بتن خودتراکم [۲۱] بر روی بتن تازه انجام گرفتند.

تصاویری از آزمایش‌های خودتراکمی انجام شده در شکل ۳ نمایش داده شده است. نتایج آزمایش‌های خودتراکمی به‌دست آمده در جدول ۵ ارائه شده است.



شکل ۳ - تصاویری از آزمایش‌های خود تراکمی انجام شده؛ (الف) آزمایش جریان اسلامپ (ب) آزمایش حلقه J (ج) آزمایش جعبه U (د) آزمایش جعبه L

جدول ۵ - نتایج آزمایش‌های خودتراکمی بتن‌های تحقیق

ردیف	نام مخلوط	جریان اسلامپ (میلی‌متر)	T_{500} (ثانیه)	جعبه U (میلی‌متر)	حلقه J (میلی‌متر)	جعبه L
۱	Ctrl	٦٩٥	۱/٥	۸	٦٦٥	۰/۹۱
۲	MK15	٦٤٠	۱/۸	۱۰	٦۱۰	۰/۸۸
۳	MK25	٦٥٠	۲	٥	٦۲۰	۰/۸۸
٤	MK35	۸۰۰	۱/۲٥	٥	۷۷۰	۰/۹٤
٥	SF6	٦۱۰	۱/٥	۱٦	٥۸۰	۰/۸٥
٦	SF12	٦٦۰	۱/۸	۲۰	٦۳۰	۰/۷٦
۷	SF18	٦۳۰	۲	۲۱	٦۰۰	۰/۸۷٥
۸	FA20	۷۷٥	۱/٥	٥	۷٤٥	۰/۹٥
۹	FA35	۷۲۰	۱/٥	٥	٦۹۰	۰/۸۹
۱۰	FA50	۷۱۰	۱/٥	۱۰	٦۸۰	۰/۹٤
۱۱	MK15 SF12	٦٤٥	۱/۸	۱۱	٦۱٥	۰/۸۹
۱۲	MK25 SF12	۸۱٥	۱/٥	۱	۷۸٥	۰/۹۸
۱۳	MK15 FA20	۷٦۰	۱/۲٥	٥	۷۳۰	۰/۹۱
۱٤	MK25 FA20	٦۹٥	۲	۱۳	٦٦٥	۰/۹٤
۱٥	SF12 FA20	۷۰۰	۱/٥	۷	٦۷۰	۰/۹٦
۱٦	SF12 FA35	۷۰۰	۱/۸	۱۰	٦۷۰	۰/۹۱
۱۷	MK15 SF6 FA35	۷٦۰	۱/٥	۲	۷۳۰	۰/۹٦
۱۸	MK25 SF6 FA35	٦٤٥	۱/۸	۹	٦۱٥	۰/۹
۱۹	MK15 SF12 FA35	٦۳۰	۱/۸	٥	٦۰۰	۰/۸٦
۲۰	MK25 SF12 FA20	٦۷٥	۱/۸	۱۰	٦٤٥	۰/۸۷

از مقایسه نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های بتن تازه با محدوده‌های تعیین شده در جدول ۵ مشخص شد که نتایج آزمایش‌های همه بتن‌های ساخته‌شده در محدوده‌های مجاز قرار دارند و می‌توان این مخلوط‌ها را بتن خودتراکم نامید و برای بررسی خواص مکانیکی و دوام آن‌ها، اقدام به نمونه‌برداری و انجام آزمایش‌های مربوطه کرد.

۳-۲- آزمایش‌های بتن سخت‌شده

نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های تعیین خواص مکانیکی بتن‌های خودتراکم تحقیق در سنین مختلف در جدول ۶ ارائه شده‌اند. اعداد ارائه شده متوسط نتایج حاصل شده از سه نمونه برای هر مخلوط می‌باشند.

۳-۲-۱- آزمایش مقاومت فشاری

اثر پوزولان‌های مختلف در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه بر مقاومت فشاری بتن خودتراکم در شکل ۴ نشان داده شده است. مشهود است که مقاومت فشاری همه مخلوط‌ها با افزایش سن رشد کرده است. در سن ۷ روزه، مقاومت فشاری همه مخلوط‌های حاوی پوزولان از بتن مرجع کم‌تر بوده است. در این میان مخلوط‌های حاوی میکروسیلیس و متاکائولین به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین افت مقاومت را داشته‌اند.

در سن ۲۸ روزه، بتن خودتراکم حاوی متاکائولین نسبت به دو پوزولان دیگر نرخ رشد مقاومت بالاتری داشته است. در این سن، با جایگزینی بخشی از سیمان با متاکائولین و میکروسیلیس مقاومت فشاری بیش‌تری نسبت به بتن مرجع در همان سن حاصل شده، در حالی که جایگزینی خاکستربادی، مقاومت فشاری کم‌تری را نسبت به بتن مرجع نشان داده است. وجملکووا و همکاران[1] در تحقیقی مشابه بهبود مقاومت فشاری در اثر جایگزینی متاکائولین در سنین اولیه را گزارش کرده و علت آن را واکنش‌پذیری زیاد متاکائولین بیان نمودند [۲۹]. فرناندز و همکاران[2] نیز گزارش کردند که جایگزین شدن سیمان با متاکائولین در سن بعد از ۷

[1] Vejmelkovaa et al.

[2] Fernandez et al.

روزه، منجر به بهبود مقاومت فشاری می‌گردد [۳۰]. قابل توجه است که متاکائولین مصرفی در تحقیقات وجملکووا و همکاران و فرناندز و همکاران، نسبت به متاکائولین مصرفی در این تحقیق، حاوی درصد بیش‌تری از آلومینا و درصد کمتری از سیلیس بوده ولی نتایج مشابه این تحقیق حاصل شده است. این در حالی است که مارش و دی[1] سهم خاکستربادی با مشخصات شیمیایی مشابه خاکستر بادی مصرفی در این تحقیق را در کسب مقاومت تا سن حدود ۱۴ روزه ناچیز بیان کردند [۳۱].

جدول ۶- نتایج آزمایش‌های خواص مکانیکی بتن‌های خودتراکم تحقیق

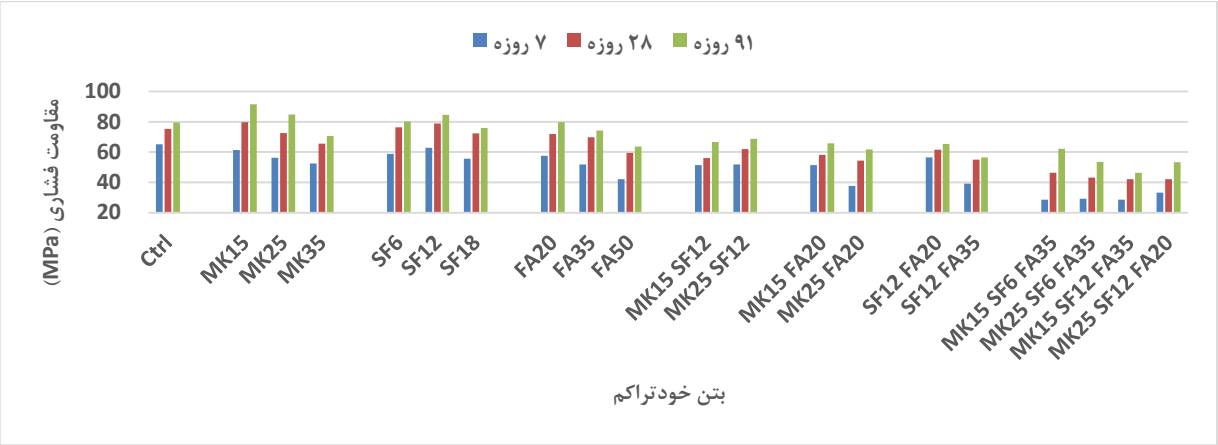
ردیف	نام مخلوط بتن خودتراکم	مقاومت فشاری (MPa)			مقاومت کششی دونیم‌شدن (MPa)		ضریب ارتجاعی استاتیکی (GPa)	
		۷ روزه	۲۸ روزه	۹۱ روزه	۲۸ روزه	۹۱ روزه	۲۸ روزه	۹۱ روزه
۱	Ctrl	٦٥/١	٧٥/٣	٧٩/٦	٥/٦٦		٣/٩	٤/١
۲	MK15	٦١/٣	٧٩/٧	٩١/٦	٤/٥٨		٣/٤	٣/٧
۳	MK25	٥٦/٣	٧٢/٦	٨٤/٩	٤/٧٣		٣/٣	٣/٨
٤	MK35	٥٢/٤	٦٥/٥	٧٠/٧	٤/٤٧		٣/٠	٣/٢
٥	SF6	٥٨/٧	٧٦/٤	٨٠/١	٥/٠٧		٤/٠	٤/١
٦	SF12	٦٢/٨	٧٨/٩	٨٤/٦	٤/٧٣		٣/٦	٤/٣
۷	SF18	٥٥/٦	٧٢/٣	٧٦	٤/٨٢		٢/٣	٣/١
۸	FA20	٥٧/٦	٧٢	٧٩/٨	٥/١٩		٢/٢	٣/٦
۹	FA35	٥١/٨	٦٩/٧	٧٤/٣	٤/٦٦		٣/٢	٣/٤
۱۰	FA50	٤٢/١	٥٩/٤	٦٣/٧	٤/٥٢		٢/٧	٢/٨
۱۱	MK15 SF12	٥١/٤	٥٦/١	٦٦/٧	٣/٩٦		٢/٨	٣/٣
۱۲	MK25 SF12	٥١/٩	٦٢	٦٨/٧	٤/١٦		٣/٢	٣/٢
۱۳	MK15 FA20	٥١/٣	٥٨/٢	٦٥/٧	٤/٣٦		٢/٧	٣/٦
١٤	MK25 FA20	٣٧/٧	٥٤/٣	٦١/٨	٤/٣٠		٢/٣	٣/٤
١٥	SF12 FA20	٥٦/٤	٦١/٥	٦٥/٤	٤/٦٤		٢/٨	٣/٣
١٦	SF12 FA35	٣٩/١	٥٤/٩	٥٦/٤	٤/٤٤		٢/٣	٢/٦
۱۷	MK15 SF6 FA35	٢٨/٥	٤٦/٣	٦٢/٢	٤/١٣		٢/٧	٣/٧
۱۸	MK25 SF6 FA35	٢٩/٣	٤٣/١	٥٣/٥	٣/٥٠		٢/٣	٢/٩
۱۹	MK15 SF12 FA35	٢٨/٥	٤٢/١	٤٦/٤	٣/٣٦		٣/٠	٢/٦
۲۰	MK25 SF12 FA20	٣٣/٣	٤٢	٥٣/٣	٣/٣٦		٢/٦	٣/٠

نتایج آزمایش‌های ۹۱ روزه نیز هم‌چنان نرخ رشد مقاومت فشاری مناسبی را برای همه مخلوط‌ها در تمام سطوح جایگزینی نشان دادند. جایگزینی ٪۱۵ متاکائولین موجب افزایش حدود ٪۱۵ مقاومت فشاری در سن ۹۱ روزه نسبت به نمونه بتن مرجع در همین سن شده که دلیل این افزایش را می‌توان بهبود ریز ساختار بتن با انجام واکنش‌های ثانویه متاکائولین بیان نمود. خدابخشیان و همکاران[2] تأثیر جایگزینی ٪۱۰ میکروسیلیس با مشخصات مشابه میکروسیلیس مصرفی در این تحقیق را باعث افزایش چشم‌گیر مقاومت فشاری نسبت به بتن مرجع بیان کردند [۳۲].

طبق شکل ۴ مشهود است که همه مخلوط‌های با جایگزینی‌های دوتایی و سه‌تایی، نسبت به مخلوط‌های با جایگزینی جداگانه در تمام سنین مقاومت فشاری کم‌تری داشته‌اند. قابل ذکر است که نرخ رشد مقاومت با افزایش سن، به‌خصوص در جایگزینی‌های سه‌تایی قابل ملاحظه بوده و با توجه به درصدهای جایگزینی بالا (٪۵۶ الی ٪۶۶)، مقاومت‌های فشاری قابل ملاحظه‌ای به دست آمده است. ضمنا مشهود است که با افزایش درصدهای جایگزینی متاکائولین و خاکستربادی، مقاومت فشاری در همه سنین با آهنگ‌های تقریبا ثابت کاهش یافت.

[1] Marsh & Day

[2] Khodabakhshian et al.



شکل ۴- نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن‌های خودتراکم تحقیق

رمضانیان‌پور و همکاران عملکرد بتن خودتراکم پوزولانی را نسبت به بتن معمولی پوزولانی به دلیل آنکه به طور متوسط حدود ٪۷ مقاومت فشاری بیش‌تری دارد، بهتر دانسته‌اند. آن‌ها شروع فعالیت پوزولانی سریع میکروسیلیس و تبدیل بلورهای هیدروکسیدکلسیم به ژل و نیز خاصیت پرکنندگی را سبب کسب مقاومت بیش‌تر بتن خودتراکم نسبت به بتن معمولی بیان کردند [۳۳]. در پژوهش حاضر این اثرات علاوه بر میکروسیلیس، در جایگزینی متاکائولین و خاکستربادی نیز مشاهده شده است. لازم به ذکر است که این اثرات به‌خصوص در مورد مخلوط‌های با جایگزینی دوتایی و سه‌تایی مشهودتر بوده و درصد افزایش مقاومت فشاری با افزایش سن نمونه‌ها برای این مخلوط‌ها از مخلوط مرجع یا با جایگزینی تکی بیش‌تر بوده است. گوئو و همکاران[1] نیز نتیجه مشابهی گرفتند و بیان کردند که با افزایش سن، درصد افزایش مقاومت فشاری در اثر جایگزینی‌های دوتایی و سه‌تایی (خاکستربادی، سرباره و میکروسیلیس) نسبت به بتن مرجع بدون پوزولان یا با جایگزینی تکی بیش‌تر است [۳۴]. اردلان و همکاران[2] نیز مشاهده کردند که در اثر جایگزینی تکی خاکستربادی و پومیس، مقاومت فشاری نسبت به بتن مرجع کاهش یافته، ولی با جایگزینی دوتایی همراه با میکروسیلیس مقاومت فشاری می‌تواند افزایش یابد [۳۵].

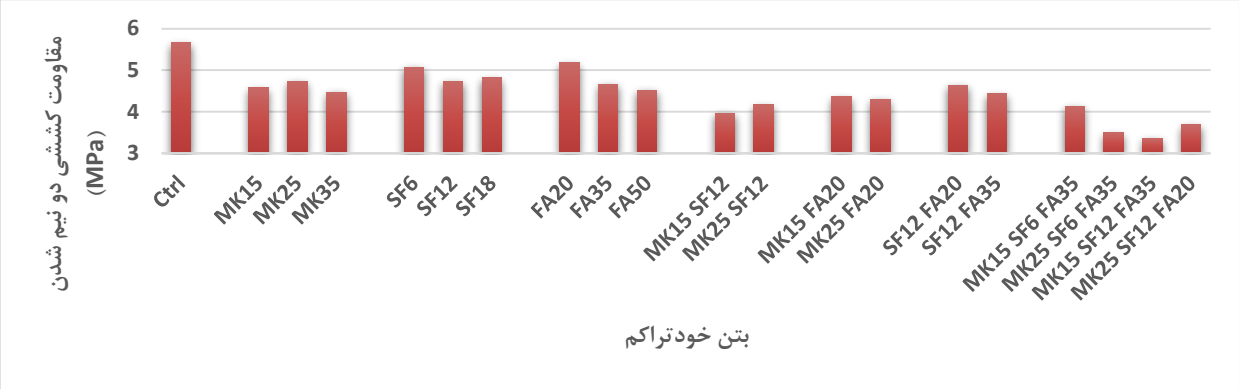
۳-۲-۲- آزمایش مقاومت کششی دونیم‌شدن

مقاومت کششی در بتن خودتراکم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شکل ۵ تأثیر کاربرد پوزولان‌های مختلف بر مقاومت کششی دو نیم‌شدن را در درصدهای جایگزینی مختلف نشان می‌دهد. کاربرد متاکائولین منجر به بهبود مقاومت کششی دونیم‌شدن نسبت به نمونه مرجع شده است. در جایگزینی ٪۱۵، مقاومت کششی دونیم‌شدن نسبت به نمونه مرجع ٪۱۰ افزایش یافته ولی با افزایش درصد جایگزینی، نرخ رشد کاهش یافته است، به‌گونه‌ای که با جایگزینی ٪۳۵، مقاومت کششی دو نیم‌شدن از نمونه مرجع کم‌تر شده است. با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس، مقاومت کششی دو نیم‌شدن بتن خودتراکم ابتدا تا حدود ٪۶ افزایش یافته، ولی در جایگزینی ٪۱۸، این مقاومت نسبت به نوع مرجع تا ٪۱۵ کم‌تر شده است. خاکستربادی در تمام درصدهای جایگزینی، موجب افت مقاومت کششی دو نیم‌شدن شده و با افزایش میزان جایگزینی، میزان افت مقاومت نیز افزایش یافته است. آیریس و همکاران[3] رفتار بتن خودتراکم را در مقاومت کششی دو نیم‌شدن شبیه به بتن معمولی بیان کردند [۳۶]. رنجبر و همکاران بیان کردند که مقاومت کششی بتن رفتاری شبیه به مقاومت فشاری دارد و با گذشت زمان افزایش می‌یابد؛ ولی روند افزایش آن با گذشت زمان، نسبت به مقاومت فشاری روند کندتر می‌شود. این موضوع در نتایج پژوهش حاضر نیز مشاهده می‌گردد [۳۷]

طبق شکل ۵ مشهود است که در همه جایگزینی‌های دوتایی و سه‌تایی مقاومت‌های کششی دونیم‌شدن نسبت به مقاومت نمونه‌های مرجع افت قابل‌توجهی داشته‌اند. این در حالی است که میزان افت مقاومت در ترکیبات سه‌تایی از ترکیبات دوتایی بیش‌تر بوده است. بیش‌ترین مقدار افت مقاومت مربوط به ترکیب سه‌تایی MK15

[1] Guo et al.
[2] Ardalan et al.
[3] Iris et al.

SF12 FA35 بوده که مقاومت کششی دو نیم‌شدن حدود ٪۴۸ کم‌تر شده و کم‌ترین مقدار افت مقاومت مربوط به طرح اختلاط دوتایی SF12 FA20 بوده که مقاومت کششی دو نیم‌شدن حدود ٪۲۸ افت کرده است. توجه به این نکته ضروری است که در مخلوط حاوی ترکیب سه‌تایی مذکور، میزان سیمان مصرفی نسبت به سیمان مخلوط مرجع ٪۶۲ کم‌تر بوده است.

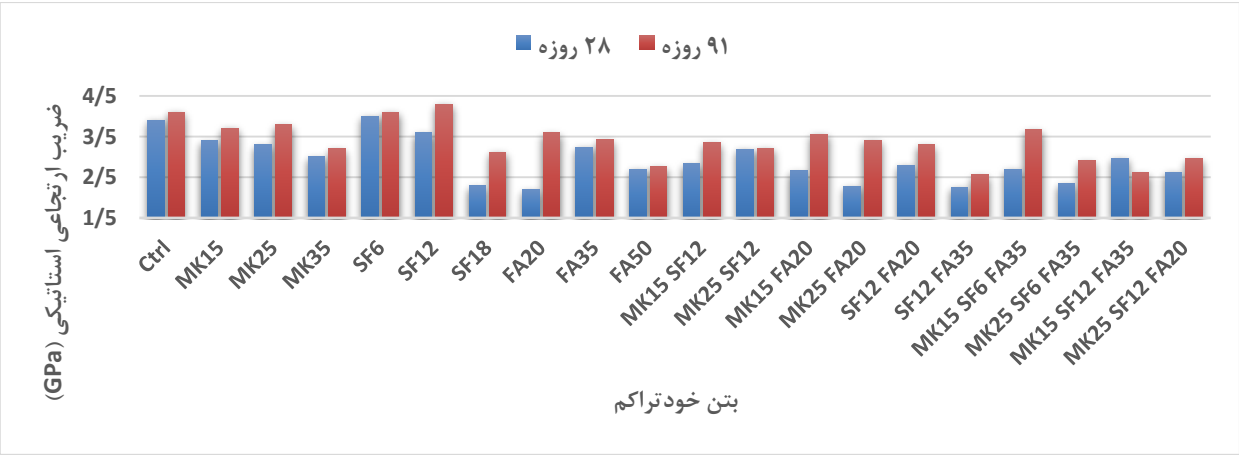


شکل ۵- نتایج آزمایش مقاومت کششی دو نیم‌شدن در سن ۲۸ روزه بتن‌های خودتراکم تحقیق

گوئو و همکاران در تحقیق خود مشاهده کردند که جایگزینی‌های تکی یا دوتایی مقاومت کششی دو نیم‌شدن را نسبت به بتن مرجع ٪۱۷/۲ تا ٪۸۹ کاهش داده، در حالی که در جایگزینی‌های سه‌تایی مقاومت کششی دو نیم‌شدن را در مقایسه با مخلوط بدون پوزولان به‌طور چشم‌گیری تا حدود ٪۱۰/۲ افزایش داده است [۳۴]. این موضوع در یافته‌های این تحقیق نیز مشاهده شده است.

۳-۲-۳- آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی

ضریب ارتجاعی بتن یک ویژگی سرنوشت‌ساز در تحلیل و طراحی سازه‌های بتنی خصوصا برای محاسبات خیز اعضاء، خدمت‌پذیری[1] موردنیاز، تحلیل لرزه‌ای، تغییرمکان‌ها[2]، کوتاه‌شدن ارتجاعی عضو بتنی[3] در طراحی بتن‌های پیش‌تنیده و خزش، محسوب می‌گردد [۳۸]. ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن خودتراکم مطابق آنچه در استاندارد ASTM C469 [۲۵] شرح داده شده، در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه بر روی استوانه‌های استاندارد انجام گرفت. نتایج حاصل از آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن به نسبت ضریب ارتجاعی اجزاء و درصد آن‌ها در حجم بتن وابسته است [۳۹]. ضریب ارتجاعی بتن تابعی از مقاومت فشاری آن می‌باشد [۴۰]. طبق شکل ۶، ضریب ارتجاعی استاتیکی تمام مخلوط‌های بتن خودتراکم حاوی پوزولان بجز SF6 و SF12 از بتن مرجع کم‌تر بوده است. روند بهبود ضریب ارتجاعی استاتیکی با افزایش سن برای بتن‌های حاوی پوزولان ملموس بوده و این بهبود با افزایش میزان جایگزینی پوزولان‌ها چشم‌گیرتر نیز شده است.



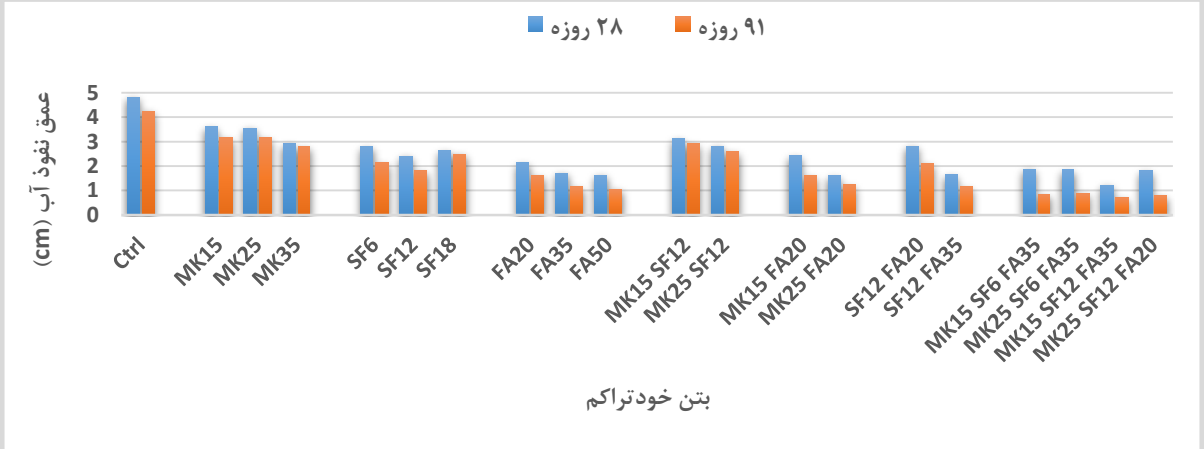
شکل ۶- نتایج آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد بتن‌های خودتراکم تحقیق

[1] Serviceability
[2] Drifts
[3] Elastic shortening of concrete

نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های تعیین خواص دوام بتن‌های خودتراکم تحقیق در جدول ۷ ارائه شده‌اند. برای تعیین عمق نفوذ آب، متوسط میزان نفوذ در سه نمونه، برای تعیین میزان نفوذ تسریع‌شده یون کلراید، متوسط جریان عبوری از ۲ نمونه و برای تعیین مقاومت در برابر سولفات، متوسط تغییر طول نسبی ۶ نمونه بتن خودتراکم در معرض سولفات سدیم، اندازه‌گیری شدند.

جدول ۷- نتایج آزمایش‌های خواص دوام بتن‌های خودتراکم تحقیق

ردیف	نام مخلوط بتن خودتراکم	عمق نفوذ آب (cm)		میزان جریان عبوری (کولمب)		تغییر طول نسبی اندازه‌گیری‌شده (٪)	
		۲۸ روزه	۹۱ روزه	۲۸ روزه	۹۱ روزه	۲۸ روزه	۹۱ روزه
۱	Ctrl	٤/۸۲	٤/۲۵	۳۹٦۱	۲۸۷۷	-۰/۰۱٦۷	۰/۰٦۷
۲	MK15	۳/٦۳	۳/۱۵	۳۱٦۹/۲	۱۳۸٤/۱	۰/۰۱٦۷	۰/۰٤۵۱
۳	MK25	۳/۵۵	۳/۱۵	۳۱۱۵/۱	۱۲۵٦/٤	۰/۰۱۳۳	۰/۰٤۱
٤	MK35	۲/۹۱	۲/۸	۲۳۰٦	۱۱٤۸	۰/۰۳٦۷	۰/۰٤٦۷
۵	SF6	۲/۸	۲/۱۵	۳۱۹٤/٤	۲۵۱٦/۹	۰/۰۸۳۳	۰/۰۸۳۳
٦	SF12	۲/٤	۱/۸۲	۳۰٦۷/۲	۲۳۲۵/۸	۰/۰۱٦۷	۰/۰۳٦
۷	SF18	۲/٦٤	۲/٤۸	۳۲۳۱/۷	۲۱۰۹/۵	۰/۰۰٦۷	۰/۰۳٤۲
۸	FA20	۲/۱۵	۱/٦۱	۱٦۳۸/۱	۱٤۲۰/۱	۰/۰۳	۰/۰٤۳
۹	FA35	۱/۷۱	۱/۱۵	۱۳٦٤/٦	۱۲۹۳/۲	۰/۱۳	۰/۱۳۸
۱۰	FA50	۱/٦۳	۱/۰۵	۱۱٦۷/۵	٦۱۸/۹	۰/۰۹٦۷	۰/۱۱۱۲
۱۱	MK15 SF12	۳/۱۱	۲/۹	۲۸۲۹/۵	۱۱۷٦/٦	۰/۰۵٦۷	۰/۰۵٦۹
۱۲	MK25 SF12	۲/۸۱	۲/٦	۲۳٤٤/٦	۱۲٦۲	۰/۰۳٦۷	۰/۰۵۸۷
۱۳	MK15 FA20	۲/٤۲	۱/۵۹	۲٤۳۲/۹	۱۳۳٦/۷	۰/۰۲۳۳	۰/۰۲٤۵
۱٤	MK25 FA20	۱/٦۱	۱/۲۲	۱۵۰۹/۸	۷۹۰/۲	۰/۰۱۳۳	۰/۰۱۸۷
۱۵	SF12 FA20	۲/۸۱	۲/۱	۲۱۹۹/٦	۱۱۳۸/۱	۰/۰٤٦۷	۰/۰۷۱۲
۱٦	SF12 FA35	۱/٦٤	۱/۱۵	۱۲۹٦	۹۸۵/۲	۰/۰٤۸۱	۰/۰۸۵٤
۱۷	MK15 SF6 FA35	۱/۸۷	۰/۸۵	۱۲۲٦/۳	٦۵۲	۰/۰۵٦۷	۰/۰۷۱۲
۱۸	MK25 SF6 FA35	۱/۸٦	۰/۸۸	۹۲۵	۵۸۳/۲	۰/۰۱۳۳	-۰/۰۱
۱۹	MK15 SF12 FA35	۱/۲۱	۰/۷	۹۰۸/۳	۵٤۳/٦	-۰/۰۱۳۳	-۰/۰۱
۲۰	MK25 SF12 FA20	۱/۸۱	۰/۸	۱۲٦۳/۸	۵۱۸/٤	۰/۰۱۳۳	۰/۰۹۳



شکل ۷- نتایج آزمایش عمق نفوذ آب بتن‌های خودتراکم تحقیق

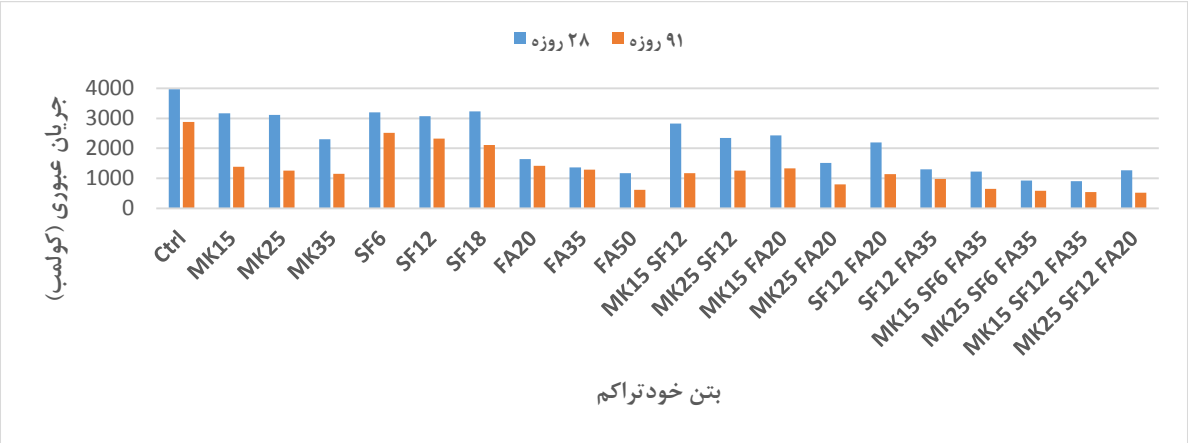
۳-۲-٤- آزمایش تعیین عمق نفوذ آب

برای بررسی نفوذپذیری بتن‌های خودتراکم تحقیق، آزمایش عمق نفوذ آب مطابق با استاندارد EN 12390-8 [۲۶] در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه بر روی نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵×۱۵ cm انجام گردید. بر این اساس نمونه‌های استوانه‌ای در دستگاه تعیین نفوذناپذیری بتن قرار داده شده و به‌مدت ۷۲ ساعت تحت فشار آب قرار گرفتند. بعد از ۷۲ ساعت، نمونه‌ها از دستگاه خارج شده و با کمک محفظه تعیین مقاومت فشاری دو نیم‌شدن از وسط به دو قسمت تقسیم شده و با توجه به خطِ آب، میزان عمق نفوذ آب در نمونه‌های بتنی اندازه‌گیری شدند. نتایج آزمایش عمق نفوذ آب برای نمونه‌های ساخته‌شده در تحقیق در سنین مختلف در شکل ۷ نشان داده شده‌اند.

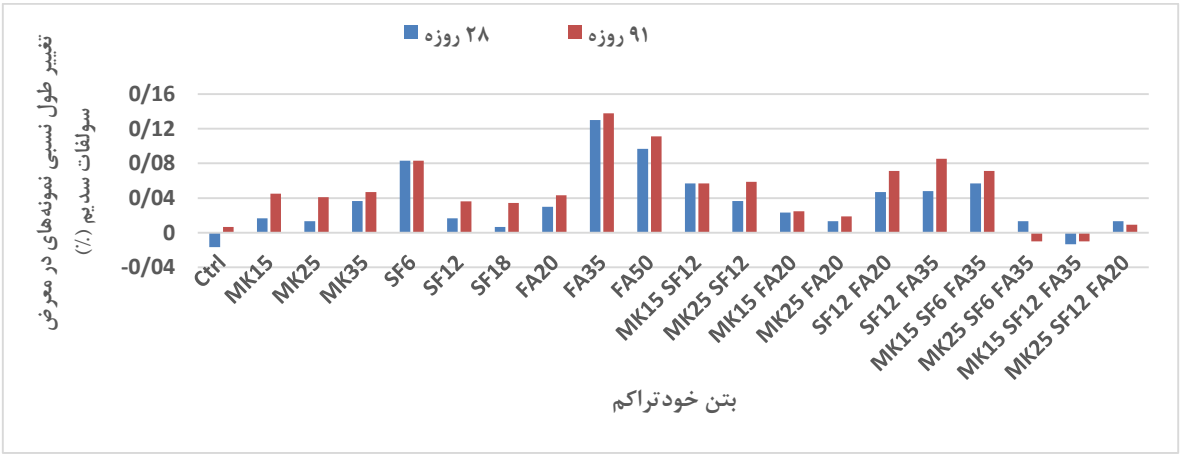
۳-۲-۵- آزمایش نفوذ تسریع‌شده یون کلراید

برای بررسی مقاومت بتن‌های خودتراکم در این تحقیق در برابر نفوذ یون کلراید، آزمایش نفوذ تسریع‌شده یون کلراید مطابق با استاندارد ASTM C1202 [۲۷] در سنین ۲۸، ۹۱ و ۱۸۰ روزه بر روی نمونه‌های استوانه‌ای ۵×۱۰ cm انجام گردید. بر این اساس نمونه‌های استوانه‌ای ابتدا در مخزن خلا قرار داده شده و به‌وسیله آب مقطر آزمایشگاهی اشباع شدند، سپس در دستگاه تعیین نفوذ تسریع‌شده یون کلراید گذاشته شدند و در حالی‌که نمونه بین محلول کلرید سدیم و هیدروکسید سدیم قرار دارد، اختلاف پتانسیل ۶ ولت از آن عبور داده می‌شود. مقدار جریان عبوری در مدت ۶ ساعت به‌عنوان شاخص تعیین مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید، لحاظ می‌شود.

برای انجام این آزمایش، از هر مخلوط در هر سن، دو نمونه ساخته شده و آزمایش شدند؛ میانگین مقاومت فشاری دو نمونه، به‌عنوان میزان نفوذپذیری تسریع‌شده یون کلراید در آن مخلوط در سن مورد نظر ثبت گردید. تغییرات نتایج میزان نفوذ تسریع‌شده یون کلراید در نمونه‌های ساخته‌شده در تحقیق در سنین مختلف در شکل ۸ نشان داده شده‌اند.



شکل ۸- نتایج آزمایش نفوذ تسریع‌شده یون کلراید بتن‌های خودتراکم تحقیق



شکل ۹- نتایج تغییر طول نسبی نمونه‌های در معرض محلول سولفات سدیم

۳-۲-٦- آزمایش مقاومت در برابر سولفات

برای بررسی میزان مقاومت مخلوط‌های بتن خودتراکم تحقیق در برابر سولفات‌ها، از آزمایش تغییر طول ملات ساخته شده با سیمان هیدرولیکی در معرض محلول سولفات مطابق استاندارد ASTM C1012 [۲۸] بر روی نمونه‌های ۱×۱×۱۱/۲۵ اینچ استفاده شد. برای این منظور از هر مخلوط شش نمونه ساخته شد که با توجه به شکل ظاهر، سه نمونه برای انجام آزمایش مطابق استاندارد انتخاب شدند. نمونه‌ها ۲۴ ساعت پس از بتن‌ریزی از قالب جدا شده و پس از اندازه‌گیری، به‌صورت جداگانه در مخازن حاوی سولفات سدیم ٪۵ قرار گرفتند (نمونه‌های هر مخلوط در یک مخزن). طبق استاندارد مذکور، در سنین ۱، ۲، ۳، ۴، ۸، ۱۳ و ۱۵ هفتگی از مخزن خارج شده و طول آن‌ها اندازه‌گیری شد و دوباره در مخزن قرار داده شدند. نتایج تغییر طول نسبی نمونه‌ها در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه حاصل از آزمایش، در شکل ۹ ارائه شده‌اند.

٤- تحلیل فنی و اقتصادی نتایج

در این بخش به تحلیل فنی و اقتصادی نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده بر روی بتن‌های خودتراکم ساخته‌شده، پرداخته می‌شود. توجه به این نکته ضروری است که برای تعیین نوع و روش ساخت هر سازه یا قطعه بتنی، باید تحلیل اقتصادی دقیقی صورت گیرد. این تحلیل اقتصادی صرفا محاسبه قیمت تمام‌شده هر متر مکعب بتن نیست، بلکه سایر عوامل مؤثر در این تحلیل نیز باید بررسی و ارزیابی شوند. مهم‌ترین عوامل مؤثر که بر اساس اهمیت و موقعیت محل به‌کارگیری بتن مشخص می‌شوند، خواص مکانیکی و دوام بتن هستند. اساس انتخاب یک طرح مخلوط بتنی، ممکن است گاهی فقط مقاومت (خاصیت مکانیکی) باشد، گاهی فقط دوام باشد و گاهی هم هر دو در نظر گرفته شوند؛ ولی در هر حالت باید طرح منتخب از نظر اقتصادی نیز توجیه مناسب را داشته باشد.

اگر معیار انتخاب فقط قیمت تمام‌شده باشد، این ارزیابی یک ارزیابی تک‌فازه محسوب شده و می‌تواند کیفیت ساخت را تحت‌تأثیر قرار داده و هزینه‌های ثانویه‌ای را برای پروژه به‌دنبال داشته باشد. در این بخش از تحقیق تلاش شده تا هر مترمکعب از مخلوط‌های ساخته‌شده را از نظر قیمت تمام‌شده، خواص مکانیکی و دوام ارزیابی کرده و بر اساس نتایج حاصله، بتن‌های خودتراکم بهینه معرفی شوند.

٤-١- مطلوبیت فنی مخلوط‌ها

انتخاب یک طرح مخلوط صرفا بر اساس قیمت تمام‌شده کم‌تر، نمی‌تواند معیار مناسبی برای انتخاب طرح بهینه باشد. لذا باید تلاش شود تا خواص فنی به‌دست آمده را در قالب یک سیستم ارزیابی واحد قرار داده و برای هر مخلوط یک عامل فنی مشخص را تعیین نمود، سپس بر اساس تحلیل عوامل فنی و اقتصادی، طرح بهینه شناسایی شود.

در بخش عوامل فنی، دو دسته عامل محاسبه می‌شوند؛ دسته اول عوامل متأثر از خواص مکانیکی و دسته دوم عوامل متأثر از دوام می‌باشند. برای تعیین عوامل متأثر از خواص مکانیکی مربوط به نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری (در سن ۹۱ روزه)، مقاومت کششی دو نیم‌شدن (در سن ۲۸ روزه) و ضریب ارتجاعی استاتیکی (در سن ۹۱ روزه) به‌عنوان مبنای محاسبات در نظر گرفته شدند.

بر این اساس، در هر آزمایش مقادیر به‌دست آمده برای بتن‌های خودتراکم پوزولانی بر مقدار به‌دست آمده برای بتن خودتراکم مرجع تقسیم شده و با محاسبه میانگین هندسی همه عوامل محاسبه‌شده برای هر مخلوط، عامل نهایی متأثر از خواص مکانیکی برای آن مخلوط به‌دست می‌آید. برای تعیین عامل نهایی متأثر از دوام، نتایج حاصل از آزمایش‌های عمق نفوذ آب (در سن ۹۱ روزه)، نفوذ تسریع‌شده یون کلراید (در سن ۹۱ روزه) و تغییرات طول نمونه در معرض سولفات (در سن ۹۱ روزه) به‌عنوان مبنای محاسبات منظور شدند. در این خصوص مشابه با محاسبات انجام شده برای تعیین عامل نهایی مرتبط با خواص مکانیکی، برای تعیین عامل نهایی مرتبط با خواص دوامی اقدام می‌شود. با توجه به اینکه در آزمایش‌های تعیین عمق نفوذ آب، نفوذ تسریع‌شده یون کلراید و تغییرات طول نمونه در معرض سولفات، مطلوبیت در کوچک‌تر بودن اعداد نتایج آزمایش‌ها می‌باشد، لذا جهت ایجاد سنخیت میان عوامل این آزمایش‌ها و سایر آزمایش‌ها، عوامل حاصل از این آزمایش‌ها معکوس شده و در تعیین عامل نهایی دوام استفاده خواهند شد. از ضرب عوامل مربوط به خواص مکانیکی و دوام، عامل مطلوبیت فنی مخلوط‌ها به‌دست می‌آید.

در جداول ۸، ۹ و ۱۰ به‌ترتیب عوامل فنی ناشی از خواص مکانیکی و دوام و عامل مطلوبیت فنی بتن‌های خودتراکم ساخته‌شده در تحقیق، ارائه شده‌اند.

جدول ۸- محاسبات تعیین عامل فنی ناشی از خواص مکانیکی بتن‌های خودتراکم تحقیق

ردیف	نام مخلوط بتن خودتراکم	مقاومت فشاری ۹۱ روزه (MPa)	نسبت مقاومت فشاری مخلوط به بتن مرجع	مقاومت کششی دونیم‌شدن ۲۸ روزه (MPa)	نسبت مقاومت کششی مخلوط به بتن مرجع	ضریب ارتجاعی استاتیکی ۹۱ روزه (GPa)	نسبت ضریب ارتجاعی مخلوط به بتن مرجع	عامل فنی ناشی از خواص مکانیکی
۱	Ctrl	۷۹/٦	۱	٥/٦٦	۱	٤/۱	۱	۱
۲	MK15	۹۱/٦	۱/۱٥۱	٤/٥۸	۰/۸۰۹	۳/۷	۰/۹۰۲	۰/۹٤٤
۳	MK25	۸٤/۹	۱/۰٦۷	٤/۷۳	۰/۸۳٦	۳/۸	۰/۹۲۷	۰/۹۳۸
٤	MK35	۷۰/۷	۱/۸۸۸	٤/٤۷	۰/۷۹۰	۳/۲	۰/۷۸۰	۰/۸۱۸
٥	SF6	۸۰/۱	۱/۰۰٦	٥/۰۷	۰/۸۹٦	٤/۱	۱	۰/۹٦٦
٦	SF12	۸٤/٦	۱/۰٦۳	٤/۷۳	۰/۸۳٦	٤/۳	۱/۰٤٦	۰/۹۷٦
۷	SF18	۷٦	۱/۹٥٥	٤/۸۲	۰/۸٥۲	۳/۱	۰/۷٥۹	۰/۸٥۱
۸	FA20	۷۹/۸	۱/۰۰۳	٥/۱۹	۰/۹۱۷	۳/٦	۰/۸۷۸	۰/۹۳۱
۹	FA35	۷٤/۳	۰/۹۳۳	٤/٦٦	۰/۸۲۳	۳/٤	۰/۸۳٤	۰/۸٦۲
۱۰	FA50	٦۳/۷	۰/۸	٤/٥۲	۰/۷۹۹	۲/۸	۰/٦۷٦	۰/۷٥٦
۱۱	MK15 SF12	٦٦/۷	۰/۸۳۸	۳/۹٦	۰/۷	۳/۳	۰/۸۱٥	۰/۷۸۲
۱۲	MK25 SF12	٦۸/۷	۰/۸٦۳	٤/۱٦	۰/۷۳٥	۳/۲	۰/۷۸٥	۰/۷۹۳
۱۳	MK15 FA20	٦٥/۷	۰/۸۲٥	٤/۳٦	۰/۷۷۰	۳/٦	۰/۸٦۸	۰/۸۲
۱٤	MK25 FA20	٦۱/۸	۰/۷۷٦	٤/۳۰	۰/۷٦۰	۳/٤	۰/۸۳۲	۰/۷۸۹
۱٥	SF12 FA20	٦٥/٤	۰/۸۲۲	٤/٦٤	۰/۸۲۰	۳/۳	۰/۸۰٥	۰/۸۱٥
۱٦	SF12 FA35	٥٦/٤	۰/۷۰۹	٤/٤٤	۰/۷٤۸	۲/٦	۰/٦۲٤	۰/۷۰۳
۱۷	MK15 SF6 FA35	٦۲/۲	۰/۷۸۱	٤/۱۳	۰/۷۳۰	۳/۷	۰/۸٥۹	۰/۷۹۹
۱۸	MK25 SF6 FA35	٥۳/٥	۰,٦۷۲	۳/٥	۰/٦۱۸	۲/۹	۰/۷۱۰	۰/٦٦٦
۱۹	MK15 SF12 FA35	٤٦/٤	۰/٥۸۳	۳/۳٦	۰/٥۹٤	۲/٦	۰/٦۳۷	۰/٦۰٤
۲۰	MK25 SF12 FA20	٥۳/۳	۰/٦۷۰	۳/٦۸	۰/٦٥۰	۳	۰/۷۲۲	۰/٦۸۰

از نتایج ارائه شده در ستون آخر جدول ۸ مشاهده می‌شود که بالاترین عامل فنی ناشی از خواص مکانیکی مربوط به بتن مرجع می‌باشد. افزایش میزان جایگزینی پوزولان‌ها، منجر به کاهش عامل فنی ناشی از خواص مکانیکی شده است. در مخلوط‌های حاوی پوزولان به‌صورت جداگانه، کم‌ترین مقادیر مربوط به طرح FA50 بوده و در مخلوط‌های حاوی دو یا سه پوزولان نیز با افزایش میزان خاکستربادی عامل فنی ناشی از خواص مکانیکی کاهش یافته است.

محاسبات ارائه شده در ستون آخر جدول ۹ نشان می‌دهند که کم‌ترین میزان عامل فنی متأثر از دوام مربوط به بتن مرجع بوده و با افزایش میزان پوزولان‌ها، عامل فنی متأثر از دوام افزایش یافته است و اثر مثبت جایگزینی خاکستربادی بسیار مشهود بوده و در صورت کاربرد همزمان با یک یا دو پوزولان دیگر، این اثر بسیار چشم‌گیرتر شده تا جایی که در مخلوط MK15 SF12 FA35، عامل فنی متأثر از خواص دوام، تا حدود ۵ برابر بیشتر از عامل متناظر در بتن مرجع شده است.

جدول ۹- محاسبات تعیین عامل فنی ناشی از دوام بتن‌های خودتراکم تحقیق

ردیف	نام مخلوط بتن خودتراکم	عمق نفوذ آب ۹۱ روزه (cm)	نسبت عمق نفوذ آب مخلوط پوزولانی به بتن مرجع	نفوذ تسریع‌شده یون کلراید ۹۱ روزه (کولمب)	نسبت نفوذ یون کلراید مخلوط پوزولانی به بتن مرجع	تغییرات طول نمونه در معرض سولفات در سن ۹۱ روزه (٪)	نسبت تغییرات طول نمونه در معرض سولفات مخلوط پوزولانی به بتن مرجع	عامل فنی متأثر از دوام
۱	Ctrl	٤/۲٥	۱	۲۸۷۷	۱	۰/۰٦۷	۱	۱
۲	MK15	۳/۱٥	۱/۳٤۹	۱۳۸٤/۱	۲/۰۷۹	۰/۰٤٥	۱/٤۸۹	۱/٦۱۰
۳	MK25	۳/۱٥	۱/۳٤۹	۱۲٥٦/٤	۲/۲۹۰	۰/۰٤۱	۱/٦۳٤	۱/۷۱٦
٤	MK35	۲/۸	۱/٥۱۸	۱۱٤۸	۲/٥۰٦	۰/۰٤۷	۱/٤۳٤	۱/۷٥۷
٥	SF6	۲/۱٥	۱/۹۷۷	۲٥۱٦/۹	۱/۱٤۳	۰/۰۸۳	۰/۸	۱/۲۲۲
٦	SF12	۱/۸۲	۲/۳۳٥	۲۳۲٥/۸	۱/۲۳۷	۰/۰۳٦	۱/۸٦۱	۱/۷٥۲
۷	SF18	۲/٤۸	۱/۷۱٤	۲۱۰۹/٥	۱/۳٦٤	۰/۰۳٤	۱/۹٦	۱/٦٦٤
۸	FA20	۱/٦۱	۲/٦٤	۱٤۲۰/۱	۲/۰۲٦	۰/۰٤۳	۱/٥٦	۲/۰۲۷
۹	FA35	۱/۱٥	۳/٦۹٦	۱۲۹۳/۲	۲/۲۲٥	۰/۱۳۸	۰/٤۸	۱/٥۸٦
۱۰	FA50	۱/۰٥	٤/۰٤۸	٦۱۸/۹	٤/٤٦۹	۰/۱۱۱	۰/٦	۲/۲٤۸
۱۱	MK15 SF12	۲/۹	۱/٤٦٦	۱۱۷٦/٦	۲/٤٤٥	۰/۰٥۷	۱/۱۸	۱/٦۱٥
۱۲	MK25 SF12	۲/٦	۱/٦۳٥	۱۲٦۲	۲/۲۸۰	۰/۰٥۹	۰/۱	۱/٦۱۷
۱۳	MK15 FA20	۱/٥۹	۲/٦۷۳	۱۳۳٦/۷	۲/۱٥۲	۰/۰۲٤	۲/۸	۲/٤۸۹
۱٤	MK25 FA20	۱/۲۲	۳/٤۸٤	۷۹۹/۲	۳/٦	۰/۰۱۹	۳/٥	۳/٥۳٦
۱٥	SF12 FA20	۲/۱	۲/۰۲٤	۱۱۳۸/۱	۲/٥۲۸	۰/۰۷۱	۰/۹٤	۱/٦۹۱
۱٦	SF12 FA35	۱/۱٥	۳/٦۹٦	۹۸٥/۲	۲/۹۲۰	۰/۰۸٥	۰/۷۸	۲/۰٤۱
۱۷	MK15 SF6 FA35	۰/۸٥	٥	٦٥۲	٤/٤۱۳	۰/۰۷۱	۰/۹٤	۲/۷٥۱
۱۸	MK25 SF6 FA35	۰/۸۸	٤/۸۳	٥۸۳/۲	٤/۹۳۳	-۰/۰۱	٦/۷	٥/٤۲٥
۱۹	MK15 SF12 FA35	۰/۷	٦/۰۷۱	٥٤۳/٦	٥/۲۹۲	-۰/۰۱	٦/۷	٥/۹۹۳
۲۰	MK25 SF12 FA20	۰/۸	٥/۳۱۳	٥۱۸/٤	٥/٥٥	۰/۰۹۳	۰/۷۲	۲/۷٦۹

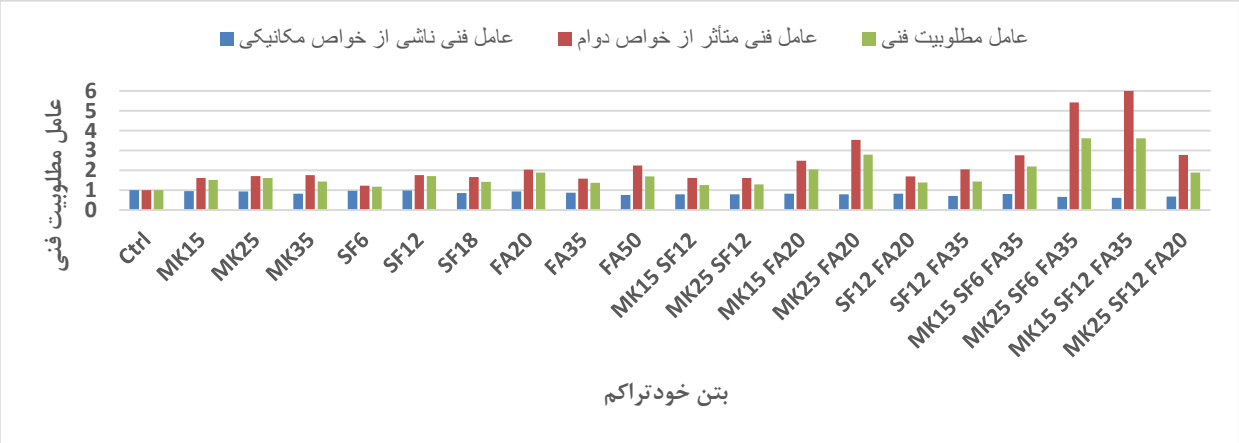
طبق نتایج جدول ۹ می‌توان دریافت که علی‌رغم کاهش عامل فنی ناشی از خواص مکانیکی، عامل نهایی مطلوبیت فنی در همه بتن‌های خودتراکم حاوی پوزولان از بتن مرجع بیش‌تر می‌باشد؛ علت مطلوبیت حاصله، اثر چشم‌گیر پوزولان‌ها بر خواص دوام در بتن‌های خودتراکم تحقیق است. عامل نهایی مطلوبیت فنی که ناشی از خواص مکانیکی و دوام هستند، در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

٤-۲- مطلوبیت اقتصادی مخلوط‌ها

در تحلیل اقتصادی هر محصول ابتدا باید فرایند طی شده قبل از تولید تا پس از مصرف آن را شناسایی کرده و اثرات اقتصادی آن را در هر مرحله ارزیابی نمود. به این روش ارزیابی چرخه حیات اقتصادی محصول گفته می‌شود. در این تحقیق، جهت ارزیابی چرخه حیات اقتصادی هر کدام از مصالح مصرفی، صرفا هزینه‌های ناشی از تولید محصول محاسبه شده‌اند و هزینه‌های متحمل ناشی از دوره بهره‌برداری بتن‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. در ساخت همه بتن‌های خودتراکم تحقیق، از مصالح مشترک استفاده شده و تنها عامل ایجاد اختلاف در آن‌ها میزان مصالح به‌کار رفته می‌باشد. هزینه تمام‌شده هر کدام از مصالح را می‌توان ناشی از مجموع هزینه‌های خرید مصالح از منبع تأمین‌کننده (معدن، کارخانه یا بازار) و حمل آن تا محل مصرف دانست.

جدول ۱۰- محاسبات تعیین عامل مطلوبیت فنی بتن‌های خودتراکم تحقیق

ردیف	نام مخلوط بتن خودتراکم	عامل فنی ناشی از خواص مکانیکی	عامل فنی ناشی از خواص دوامی	عامل نهایی مطلوبیت فنی
۱	Ctrl	۱	۱	۱
۲	MK15	۰/۹٤٤	۱/٦۱۰	۱/٥۲۰
۳	MK25	۰/۹۳۸	۱/۷۱٦	۱/٦۱۰
٤	MK35	۰/۸۱۸	۱/۷٥۷	۱/٤۳۷
٥	SF6	۰/۹٦٦	۱/۲۲۲	۱/۱۸۰
٦	SF12	۰/۹۷٦	۱/۷٥۲	۱/۷۱۰
۷	SF18	۰/۸٥۱	۱/٦٦٤	۱/٤۱٦
۸	FA20	۰/۹۳۱	۲/۰۲۷	۱/۸۸۸
۹	FA35	۰/۸٦۲	۱/٥۸٦	۱/۳٦۸
۱۰	FA50	۰/۷٥٦	۲/۲٤۸	۱/٦۹۹
۱۱	MK15 SF12	۰/۷۸۲	۱/٦۱٥	۱/۲٦۲
۱۲	MK25 SF12	۰/۷۹۳	۱/٦۱۷	۱/۲۸۲
۱۳	MK15 FA20	۰/۸۲	۲/٤۸۹	۲/۰٤۲
۱٤	MK25 FA20	۰/۷۸۹	۳/٥۳٦	۲/۷۸۹
۱٥	SF12 FA20	۰/۸۱٥	۱/٦۹۱	۱/۳۷۸
۱٦	SF12 FA35	۰/۷۰۳	۲/۰٤۱	۱/٤۳٥
۱۷	MK15 SF6 FA35	۰/۷۹۹	۲/۷٥۱	۲/۱۹۸
۱۸	MK25 SF6 FA35	۰/٦٦٦	٥/٤۲٥	۳/٦۱۱
۱۹	MK15 SF12 FA35	۰/٦۰٤	٥/۹۹۳	۳/٦۲۰
۲۰	MK25 SF12 FA20	۰/٦۸۰	۲/۷٦۹	۱/۸۸۳



شکل ۱۰ - عوامل فنی ناشی از خواص مکانیکی و دوام و میزان مطلوبیت فنی بتن‌های خودتراکم تحقیق

در جدول ۱۱ قیمت واحد هر کدام از مصالح استفاده شده در ساخت بتن‌های تحقیق با لحاظ هزینه‌های جانبی شامل حمل، مالیات بر ارزش افزوده، بارگیری و تخلیه ارائه شده‌اند. لازم به توضیح است که مصالح مورد نیاز در ساخت بتن‌های خودتراکم این تحقیق در بازه‌های زمانی متفاوت خریداری شده و استفاده شدند، اما برای انجام یک ارزیابی قابل استناد، مبنای محاسبه قیمت همه مصالح، استعلام قیمت انجام‌شده از بازارهای اهواز، تهران و دلیجان در مهرماه ۱۳۹۹ و در نظر گرفتن میانگین سه قیمت

اخذشده، به‌عنوان قیمت واحد مصالح مصرفی می‌باشد. در جدول ۱۲ هزینه تولید یک مترمکعب بتن خودتراکم مرجع بر حسب تومان ارائه شده است. برای این منظور ابتدا مقدار مصالح استفاده شده برای ساخت یک مترمکعب بتن مرجع از این جدول استخراج شده، و با در نظر گرفتن قیمت واحد ارائه‌شده در جدول ۱۱، قیمت تمام‌شده یک مترمکعب بتن خودتراکم مرجع محاسبه شد.

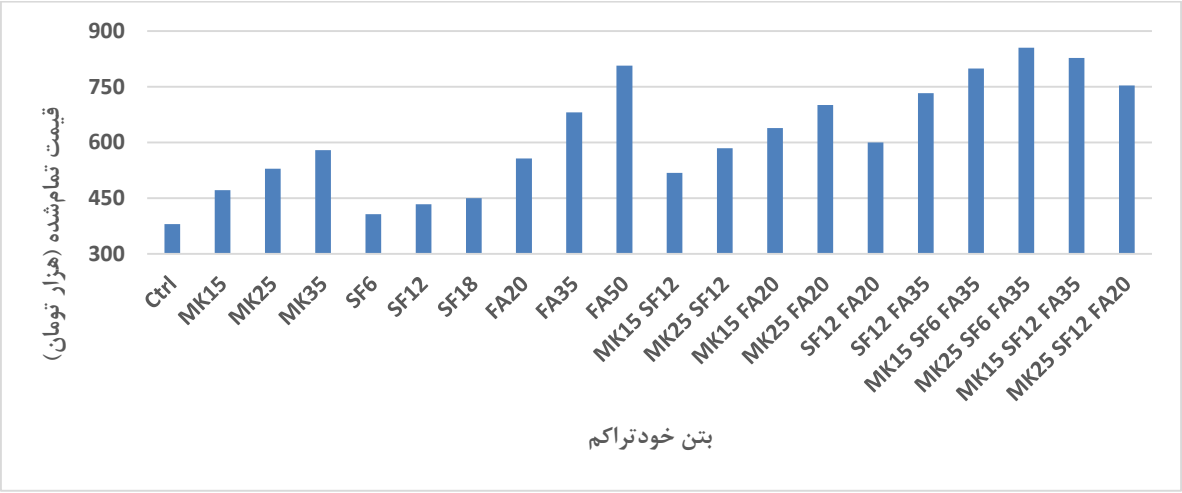
جدول ۱۱- قیمت واحد مصالح مصرفی در ساخت بتن‌های خودتراکم تحقیق (kg)

مصالح	سیمان	آب	ماسه	شن	پودرسنگ آهک	فوق‌روان‌کننده	متاکائولین	میکروسیلیس	خاکستربادی
قیمت (تومان)	۳۸۳	۳	۷۵	٦٥	۱۰۰	٦,٥۰۰	۱,٥۰۰	۱,۲۰۰	۲,۰۰۰

جدول ۱۲ - قیمت تمام‌شده یک متر مکعب بتن خودتراکم مرجع (تومان)

مصالح مصرفی	سیمان	آب	ماسه	شن (ریز و درشت)	پودرسنگ آهک	فوق‌روان-کننده
مقدار مصرف (kg)	٥٤٦/٤	۲۰٥/۰۳	۹٤۸/٤	٥٤٤/٦	۱۰٥/۱	۸/۱۹۷
مبلغ واحد	۳۸۳	۳	۷٥	٦٥	۱۰۰	٦,٥۰۰
مبلغ کل	۲۰۹,۲۷۱	٦۱٥	۷۱,۱۳۰	۳٥,۳۹۹	۱۰,٥۱۰	٥۳,۲۸۱
قیمت تمام‌شده				۳۸۰,۲۰٦		

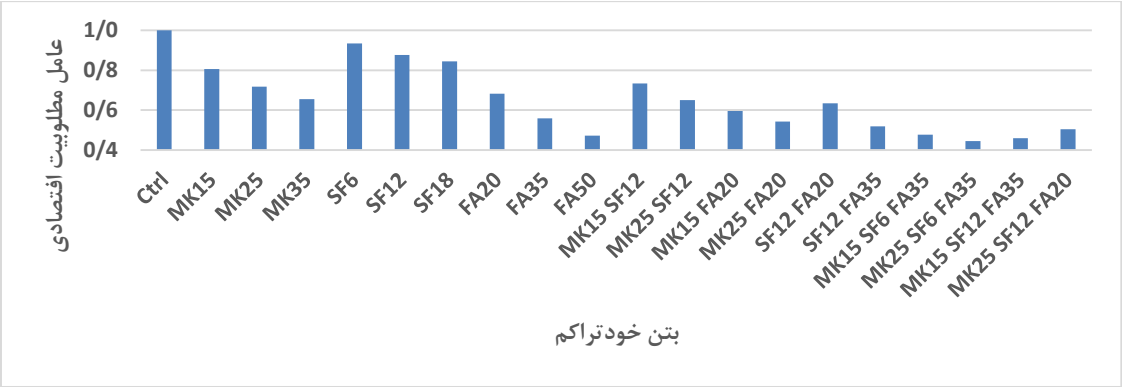
پس از ساخت بتن خودتراکم مرجع، اقدام به جایگزینی پوزولان-های مختلف به‌صورت جداگانه یا همزمان به‌جای بخشی از سیمان شده است. لذا در سایر مخلوط‌ها، علاوه بر مصالح محاسبه‌شده در جدول ۱۲، یک، دو یا سه پوزولان نیز اضافه شده است. قیمت تمام‌شده برای هر مخلوط مطابق با روش ذکرشده برای بتن مرجع (همانند جدول ۱۲)، محاسبه می‌شود. قیمت تمام‌شده مخلوط‌های بتن خودتراکم حاوی پوزولان در شکل ۱۱ ارائه شده است.



شکل ۱۱- قیمت تمام‌شده یک مترمکعب از بتن‌های خودتراکم تحقیق

عامل مطلوبیت اقتصادی بیانگر میزان صرفه اقتصادی هر مخلوط نسبت به بتن مرجع می‌باشد. این عامل از تقسیم قیمت تمام‌شده بتن مرجع به قیمت تمام‌شده هر مخلوط محاسبه می‌شود. بر این اساس، عامل مطلوبیت اقتصادی بتن مرجع، یک می‌باشد. برای سایر مخلوط‌ها، هر چه این عامل به‌دست آمده بزرگ‌تر باشد، میزان مطلوبیت بیش‌تر خواهد بود.

عامل مطلوبیت اقتصادی بتن‌های خودتراکم تحقیق در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲ – عامل مطلوبیت اقتصادی بتن‌های خودتراکم تحقیق

٤-۳- مطلوبیت فنی و اقتصادی مخلوط‌ها

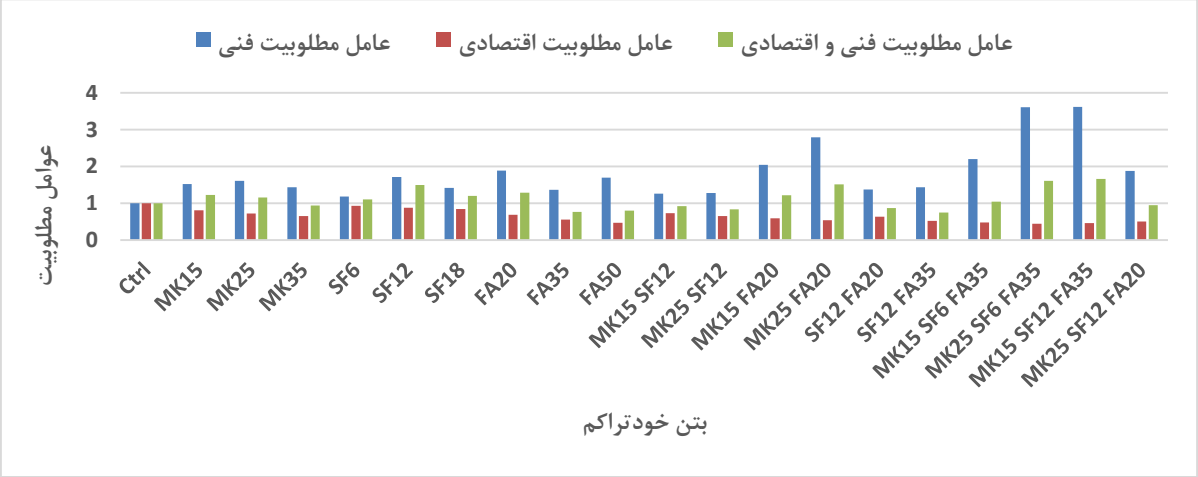
از محاسبات عامل نهایی مطلوبیت فنی و عامل مطلوبیت اقتصادی بتن‌های خودتراکم تحقیق می‌توان دریافت که طرح‌هایی که از نظر فنی مطلوب‌تر باشند، الزاما اقتصادی‌تر نیستند. همچنین نتیجه شده که اقتصادی‌ترین طرح‌ها، بهترین نتایج مطلوبیت فنی را کسب نکرده‌اند. بنابراین برای تعیین طرح بهینه که همزمان بیشترین مطلوبیت‌های فنی و اقتصادی را نسبت به بتن مرجع داشته باشد، عامل مطلوبیت فنی و اقتصادی طرح‌ها محاسبه شده است. این عامل حاصلضرب عامل نهایی مطلوبیت فنی و عامل مطلوبیت اقتصادی طرح‌ها می‌باشد.

عامل مطلوبیت فنی و اقتصادی بتن‌های خودتراکم تحقیق در جدول ۱۳ ارائه شده است.

جدول ۱۳- عامل مطلوبیت فنی و اقتصادی بتن‌های خودتراکم تحقیق

ردیف	نام مخلوط بتن خودتراکم	عامل مطلوبیت فنی	عامل مطلوبیت اقتصادی	عامل مطلوبیت فنی و اقتصادی
۱	Ctrl	۱	۱	۱
۲	MK15	۱/۵۲۰	۰/۸۰٦	۱/۲۲۵
۳	MK25	۱/٦۱۰	۰/۷۱۸	۱/۱۵٦
٤	MK35	۱/٤۳۷	۰/٦۵٦	۰/۹٤۳
۵	SF6	۱/۱۸۰	۰/۹۳٤	۱/۱۰۳
٦	SF12	۱/۷۱۰	۰/۸۷٦	۱/٤۹۸
۷	SF18	۱/٤۱٦	۰/۸٤۵	۱/۱۹۷
۸	FA20	۱/۸۸۸	۰/٦۸۳	۱/۲۸۹
۹	FA35	۱/۳٦۸	۰/۵۵۹	۰/۷٦٤
۱۰	FA50	۱/٦۹۹	۰/٤۷۱	۰/۸۰۱
۱۱	MK15 SF12	۱/۲٦۲	۰/۷۳٤	۰/۹۲٦
۱۲	MK25 SF12	۱/۲۸۲	۰/٦۵۰	۰/۸۳٤
۱۳	MK15 FA20	۲/۰٤۲	۰/۵۹۵	۱/۲۱۵
۱٤	MK25 FA20	۲/۷۸۹	۰/۵٤۳	۱/۵۱٤
۱۵	SF12 FA20	۱/۳۷۸	۰/٦۳٤	۰/۸۷۳
۱٦	SF12 FA35	۱/٤۳۵	۰/۵۱۹	۰/۷٤۵
۱۷	MK15 SF6 FA35	۲/۱۹۸	۰/٤۷٦	۱/۰٤۷
۱۸	MK25 SF6 FA35	۳/٦۱۱	۰/٤٤۵	۱/٦۰٦
۱۹	MK15 SF12 FA35	۳/٦۲۰	۰/٤۵۹	۱/٦٦۳
۲۰	MK25 SF12 FA20	۱/۸۸۳	۰/۵۰۵	۰/۹۵۰

طبق نتایج ارائه شده در جدول ۱۳ که از ویژگی‌های مثبت این روش محاسبه است، می‌توان دریافت بتنی که بیشترین مطلوبیت فنی را کسب کرده، الزاما طرح بهینه نیست و در مقابل، بتنی که با هزینه کمتری ساخته شده است، به‌علت نتایج پایین‌تر از حد مطلوب از نظر فنی، نمی‌تواند به‌عنوان طرح مخلوط بهینه معرفی شود. در شکل ۱۳ عوامل مطلوبیت بتن‌های خودتراکم تحقیق نشان داده شده است.



شکل ۱۳- عوامل مطلوبیت‌های فنی و اقتصادی بتن‌های خودتراکم تحقیق

طبق شکل ۱۳، با افزایش میزان جایگزینی پوزولان‌ها، قیمت تمام شده بتن‌های تحقیق (به‌خصوص بتن‌های حاوی سه پوزولان هم‌زمان) بیشتر شده، ولی به‌علت افزایش چشم‌گیر عامل مطلوبیت متأثر از دوام، عامل نهایی مطلوبیت فنی افزایش یافته و در نتیجه عامل مطلوبیت فنی و اقتصادی نیز نسبت به بتن مرجع بیشتر شده است. به‌عنوان مثال، در مخلوط‌های MK25 SF6 FA35 و MK15 SF12 FA35، باوجود کاهش عامل مطلوبیت اقتصادی تا بیش از ٪۵۰، عامل نهایی مطلوبیت فنی بیش از ٪۳۰۰ افزایش یافته و موجب بهبود عامل مطلوبیت فنی و اقتصادی در آن مخلوط‌ها تا بیش از ٪۶۰ نسبت به بتن مرجع شده است. مخلوط‌های بتن خودتراکم تحقیق براساس عامل مطلوبیت فنی و اقتصادی طبقه‌بندی شده و در جدول ۱۴ به ترتیب نزولی ارائه شده‌اند.

۵- نتایج

در این تحقیق خواص مکانیکی، دوام و قیمت تمام شده بتن‌های خودتراکم توانمند حاوی پوزولان بررسی شده و عامل مطلوبیت فنی و اقتصادی آن‌ها محاسبه گردید. لازم به ذکر است که نتایج به‌دست آمده منحصر به مواد و مصالح استفاده شده در این تحقیق بوده و دقیقا نمی‌توان گفت که قابلیت تعمیم به سایر مصالح دارند. نتایج کلیدی به‌دست آمده به شرح زیر می‌باشند:

- پوزولان‌های مصرفی در حالت جایگزینی جداگانه اغلب نیاز به فوق روان‌کننده را برای دستیابی به خواص خودتراکمی کاهش دادند. این نتیجه با افزایش درصد جایگزینی، مخصوصا در جایگزینی‌های دوتایی و سه‌تایی، مشهودتر بود.
- در مخلوط MK15 عامل مطلوبیت ناشی از خواص مکانیکی ٪۵ کمتر از بتن مرجع بوده، ولی با افزایش میزان جایگزینی این مقدار کاهش یافت، به‌طوری که در مخلوط MK35 حدود ٪۱۸ از بتن مرجع کمتر شد؛ در حالی‌که با افزایش میزان جایگزینی متاکائولین از ٪۱۵ تا ٪۳۵، عامل مطلوبیت متأثر از دوام حدود ٪۶۰ از بتن مرجع بیشتر شده و عامل نهایی مطلوبیت فنی نیز حدود ٪۵۰ افزایش یافت و کاهش ٪۲۰ در مطلوبیت اقتصادی را جبران نمود. عامل مطلوبیت فنی و اقتصادی مخلوط MK15 نسبت به عامل متناظر برای بتن مرجع، ٪۲۲ بیشتر شده است.
- با افزایش جایگزینی میکروسیلیس از ٪۶ تا ٪۱۸، عامل نهایی مطلوبیت فنی ابتدا زیاد شده و سپس کاهش یافت، ولی علی‌رغم کاهش عامل مطلوبیت اقتصادی، عامل مطلوبیت فنی و اقتصادی در همه مخلوط‌های حاوی میکروسیلیس از بتن مرجع بیشتر بوده و در مخلوط SF12 حدود ٪۵۰ بیشتر از بتن مرجع شده است.
- در مخلوط‌های بتن خودتراکم حاوی خاکستربادی به سبب اثر بسیار خوب خاکستر بر دوام بتن، عامل نهایی مطلوبیت فنی از بتن مرجع بیشتر شد، ولی با افزایش میزان جایگزینی، عامل مطلوبیت اقتصادی تا بیش از ٪۵۰ کاهش یافت. در مخلوط FA20 عامل

مطلوبیت فنی و اقتصادی حدود ٪۳۰ از بتن مرجع بیشتر شد، ولی با افزایش میزان جایگزینی تا ٪۵۰، این عامل تا حدود ٪۲۰ از بتن مرجع کمتر گردید.

- در جایگزینی‌های دوتایی، بهترین عملکرد در مخلوط حاوی متاکائولین و خاکستربادی مشاهده شد. در مخلوط MK25 FA20 عامل مطلوبیت فنی و اقتصادی بیش از ٪۵۰ بیشتر از بتن مرجع به‌دست آمد؛ در حالی که در مخلوط‌های دوتایی حاوی "متاکائولین و میکروسیلیس" و "خاکستربادی و میکروسیلیس"، عامل مطلوبیت فنی و اقتصادی به‌دست آمده، از عامل متناظر در بتن مرجع کمتر بوده است.

- بیشترین عامل مطلوبیت فنی و اقتصادی در میان بتن‌های خودتراکم تحقیق، مربوط به مخلوط‌های بتن خودتراکم MK15 SF12 FA35 و MK25 SF6 FA35 بود که افزون بر ٪۶۰ بیش از بتن مرجع می‌باشد. در سایر مخلوط‌های سه‌تایی نیز بهبود مطلوبیت فنی و اقتصادی نیز مشهود بوده است.

- استفاده از مواد پوزولانی به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان، خواص مکانیکی و دوام بتن را بهبود بخشیده و می‌تواند منجر به افزایش عمر مفید سازه‌ها و کاهش هزینه‌های ثانویه در صنعت ساختمان گردد. لذا کاربرد آنها به‌ویژه به‌صورت جایگزینی‌های دوتایی و سه‌تایی در صنعت ساختمان، اکیداً توصیه می‌شود

جدول ۱۴- طبقه‌بندی بتن‌های خودتراکم تحقیق از نظر مطلوبیت فنی و اقتصادی

ردیف	نام مخلوط بتن خودتراکم	عامل مطلوبیت اقتصادی	عامل مطلوبیت فنی	عامل مطلوبیت فنی و اقتصادی
۱	MK15 SF12 FA35	۳/٦۲۰	۰/٤٥۹	۱/٦٦۳
۲	MK25 SF6 FA35	۳/٦۱۱	۰/٤٤٥	۱/٦۰٦
۳	MK25 FA20	۲/۷۸۹	۰/٥٤۳	۱/٥۱٤
٤	SF12	۱/۷۱۰	۰/۸۷٦	۱/٤۹۸
٥	FA20	۱/۸۸۸	۰/٦۸۳	۱/۲۸۹
٦	MK15	۱/٥۲۰	۰/۸۰٦	۱/۲۲٥
۷	MK15 FA20	۲/۰٤۲	۰/٥۹٥	۱/۲۱٥
۸	SF18	۱/٤۱٦	۰/۸٤٥	۱/۱۹۷
۹	MK25	۱/٦۱۰	۰/۷۱۸	۱/۱٥٦
۱۰	SF6	۱/۱۸۰	۰/۹۳٤	۱/۱۰۳
۱۱	MK15 SF6 FA35	۲/۱۹۸	۰/٤۷٦	۱/۰٤۷
۱۲	Ctrl	۱	۱	۱
۱۳	MK25 SF12 FA20	۱/۸۸۳	۰/٥۰٥	۰/۹٥۰
۱٤	MK35	۱/٤۳۷	۰/٦٥٦	۰/۹٤۳
۱٥	MK15 SF12	۱/۲٦۲	۰/۷۳٤	۰/۹۲٦
۱٦	SF12 FA20	۱/۳۷۸	۰/٦۳٤	۰/۸۷۳
۱۷	MK25 SF12	۱/۲۸۲	۰/٦٥۰	۰/۸۳٤
۱۸	FA50	۱/٦۹۹	۰/٤۷۱	۰/۸۰۱
۱۹	FA35	۱/۳٦۸	۰/٥٥۹	۰/۷٦٤
۲۰	SF12 FA35	۱/٤۳٥	۰/٥۱۹	۰/۷٤٥

٦- مراجع

[۱] رمضانیانپور ع. ا.، کاظمیان ع.، (۱۳۹۷). بتن خودتراکم: فناوری و کاربرد. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صص ۱۵۵-۱۵۳.

[2] Ramezanianpour, A. A., Kazemian, A., Nikravan, M., Mahpur, A., Moghaddam, M. A., (2013). Ivfluence of the low-activity slag and silica fume on the fresh properties and durability of high performance self-compacting concrete. International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT3), Kyoto, Japan.

[3] Dasarathy, A. K., Tamil Selvi, M., Leela, D., Kumar, S., (2018). Self-compacting concrete – an analysis of properties using Fly Ash. International Journal of Engineering & Technology, Vol. 7, No. 2, pp. 135-139.

[٤] مدندوست، ر.، رنجبرم. م.، محسنی، ا.، (١٣٩٢). تأثیر مواد نانو بر خواص مهندسی ملات خودتراکم حاوی خاکستربادی. مجله تحقیقات بتن. سال پنجم. شماره دوم. پاییز و زمستان ٩٢. صص ٦٧-٥٥.

[5] Niewiadomki, P., Hola, J., Cwirzen, A., (2018). Study on properties of self-compacting concrete modified with nanoparticles. Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 877-886.

[6] Golewski, G. L., Sadowski, T., (2014). An analysis of shear fracture toughness K IIc and microstructure in concretes containing fly-ash. Construction and Building Materials, Vol. 51, No. 2, pp. 207–214.

[7] Golewski, G. L., Sadowski, T., (2017). The fracture toughness the K IIIc of concretes with F fly ash (FA) additive. Construction and Building Materials, Vo.143 No. 10, pp. 444–454.

[٨] هدایتی‌نیا، ف.، دلنواز، م.، امامزاده س. ش.، (١٣٩٧). ارزیابی اثرات زیست‌محیطی چرخه عمر بتن خودتراکم دارای قابلیت اجرایی در سدهای ساخته‌شده با بتن سنگ‌ریزه‌ای. دهمین کنفرانس ملی بتن، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران.

[9] Ali, M. B., Saidur, R., Hossain, M. S., (2011). A review on emission analysis in cement industries. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, No. 1, pp. 2252–2261.

[10] Ricardo de Matos, P., Foiato, M., Prudêncio Jr, L. R., (2019). Ecological, fresh state and long-term mechanical properties of high-volume fly ash high-performance self-compacting concrete. Construction and Building Materials, Vol. 203, No. 2, pp. 282–293.

[11] BIBM, CEMBUREAU, EFCA, EFNARC, ERMCO. European guidelines for self-compacting concrete: specification. Production and use, 2005.

[١٢] احمدی، س. ا.، هوایی، غ.، (١٣٩٣). لزوم شناخت بیشتر بتن خود تراکم و اثرات آن بر اقتصاد طرح‌ها. اولین کنگره ملی مهندسی ساخت و ارزیابی پروژه های عمرانی. گرگان. اردیبهشت ١٣٩٣.

[١٣] رمضانیانپور، ع.ا.، ذوالفقارنسب، آ.، بهمن‌زاده، ف.، پور ابراهیمی، م.ر.، حسن‌پور، ص.، بوشهری، ر.، رمضانیانپور، ا.م.، (١٣٩٤). بررسی عملکرد بتن توانمند در برابر حمله سولفوریک اسید. هفتمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، تهران.

[14] Samimi, K., Kamali-Bernard, S., Maghsoudi, A.A., Maghsoudi, M., (2016). The influence of metakaolin and natural zeolite on the rheology, engineering and durability properties of high strength self-compacting concrete at early age. 2nd International Conference Sustainability ICCS16. Spain, Madrid, 13-15 June 2016.

[١٥] بهفرنیا، ک.، حسن‌زاده، م.، (١٣٩٣). مباحث پیشرفته در فناوری سیمان و پوزولان (به همراه آزمایش‌های استاندارد). انتشارات جهاد دانشگاهی واحد اصفهان، صص ١٨٤-١٨٣.

[16] Owaid, H. M., Hamid, R., Taha, M.R., (2012). A review of sustainable supplementary cementitious materials as an alternative to all-Portland cement mortar and concrete. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, Vol. 6. No. 9, pp. 287-303.

[17] ASTM C1611– 18. Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete. Annual Book of ASTM Standard.

[18] BS EN 12350: 2009. Testing fresh concrete, (London: British Standards Institution)

[19] ASTM C1621 – 16. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics. Annual Book of ASTM Standard.

[20] BS EN 11044. Testing fresh self-compacting concrete-determination of confined flow ability in 'U-SHAPE BOX', (London: British Standards Institution)

[21] BIBM, CEMBUREAU, EFCA, EFNARC, ERMCO. European guidelines for self-compacting concrete: specification. Production and use; 2005.

[22] BS EN 12390. Testing hardened concrete, (London: British Standards Institution).

[23] ASTM C39 / C39M - 20. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Annual Book of ASTM Standard.

[24] ASTM C496 / C496M - 17. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Annual Book of ASTM Standard.

[25] ASTM C469 – 02. Standard test method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression. Annual Book of ASTM Standard.

[26] BS EN 12350-8:2019, Testing hardened concrete. Depth of penetration of water under pressure. (London: British Standards Institution).

[27] ASTM C1202 – 19. Standard Test Method for

Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Annual Book of ASTM Standard.
[28] ASTM C1012 / C1012M - 18b. Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. Annual Book of ASTM Standard.
[29] Vejmelkovaa, E., Kepperta, M., Grzeszczykb, S., Skalin´ skib, B., C˘ erny´ a, B. (2011), Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag, Construction and Building Materials, Vol. 25, No. 4, pp. 1325-1331.
[30] Fernandez R., Martirena F., Scrivener K. L., (2011). The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. Cement and Concrete Research, Vol. 41, No. 1, pp. 113-122.
[31] Marsh B., Day R., (1988). Pozzolanic and cementitious reactions of fly ash in blended cement pastes. Cement and Concrete Research, Vol. 18, No. 2, pp. 301-310.
[32] Khodabakhshian A., Ghalehnovi M., Brito J., Asadi Shamsabadi E., (2018). Durability performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder. Journal of Cleaner Production, Vol. 170, No. 1, pp. 42-60.
[۳۳] رمضانیانپور ع. ا.، صمدیان م.، مهدی‌خانی م.، مودی ف.، (۱۳۹۰). بررسی آثار مواد پوزولانی بر دوام بتن‌های خود متراکم. مجله علمی- پژوهشی عمران مدرس، دوره یازدهم، شماره ۳.
[34] Guo Z., Jiang J., Zhang J., Kong X., Chen C., Lehman D. E., (2020). Mechanical and durability properties of sustainable SCC with recycled concrete aggregate and fly ash, slag and silica fume. Construction and Building Materials, Vol. 231, No. 1, pp. 133-141, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117115
[35] Ardalan R., Joshaghani A., Hootan R., (2017). Workability retention and compressive strength of self-compacting concrete incorporating pumice powder and silica fume. Construction and Building Materials. Vol. 134, No. 3, pp. 116-122.
[36] Iris G. T., Belen G. F., Juan Luis P. O., Javier E. L., (2017). Prediction of self-compacting recycled concrete mechanical properties using vibrated recycled concrete experience. Construction and Building Materials, Vol. 131, No. 1, pp. 641-654.
[۳۷] رنجبر م.م.، مدندوست ر.، قانع ف.، عیسی پور س.، کریمی م.، (۱۳۹۳). ارزیابی خواص مهندسی بتن خودتراکم توانمند حاوی سیمان آمیخته. تحقیقات بتن، سال هفتم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۳۹۳.
[38] Mohammadi Golafshani E., Ashour A., (2016). Prediction of self-compacting concrete elastic modulus using two symbolic regression techniques. Automation in Construction 64 (2016) 7–19.
[۳۹] محمدپور نیک‌بین ا.، اسلامی م.، (۱۳۸۷). مروری بر خواص مکانیکی بتن‌های خودتراکم معمولی و سبک. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
[40] ACI 318 – 95, Building Code Requirements for Structural Concrete.

Evaluation of technical and economic desirability of performance self-compacting concretes containing metakaolin, microsilica and fly ash

Milad Orak
Ph.D. student, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
Seyed Fathollah Sajedi *
Associate professor, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
Shahriar Tavoosi Tafreshi
A Assistant professor, Department of Civil Engineering, Tehran Markazi Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Abstract

Self-compacting concrete (SCC) has more plastic viscosity and less yield strength due to using more fillers and superplasticizers. In order to achieve performance SCC, in addition to rheology, it is necessary to improve the mechanical properties and durability of concrete. Therefore, the amount of cement should be increased or cement replacement materials should be used. This increases the cost of one cubic meter of concrete and reduces the tendency to use it. In this research, by making 20 mixes of performance SCC, mechanical properties were determined by performing tests of compressive strength, tensile strength and elasticity modulus, and durability properties by tests of water penetration depth, rapid chloride penetration and sulfate resistance. Basically, the degree of technical desirability of concretes was determined. Also, by examining the cost price of one cubic meter of concrete, the economic and technical-economic desirabilities of the concretes were calculated. The results showed that the application of pozzolans in performance SCC reduced the technical desirability due to mechanical properties about 40%, but the technical desirability due to durability increased significantly, so that at the age of 91 days, about 5 times has become more. Accordingly, the final factor of technical desirability in SC mixtures of research is at least 26% and at most 250% more than the reference concrete. Due to the higher price of pozzolanic materials than cement, with the increase in the replacement rate of pozzolans, the economic desirability factor decreased to more than 50%, but the technical-economic desirability factor improved to about 60%.

Keywords: Performance self-compacting concrete (PSCC), Pozzolan, Mechanical properties, Durability, Technical and economic desirability.

* Corresponding Author: sajedi@iauahvaz.ac.ir