Archive of SID

استفاده از روش تاگوچی در بهینه‌سازی مخلوط بتن غلتکی(RCC) با افزودنی‌های بازیافتی

مقاله پژوهشی

امین چوبدار، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
علیرضا عاملی*، مربی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
سید روح اله معافی مدنی، مربی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول:Amelii@gmail.com

دریافت: ۹۸/۰۳/۱۲- پذیرش: ۹۸/۰۸/۲۰
صفحه ۱۸۵-۱۷۱

چکیده

استفاده از انواع مصالح بازیافتی در بتن غلتکی به تازگی در صنعت ساختمان مورد توجه قرار گرفته است. مشکل عمده استفاده از مصالح بازیافتی در بتن افت مشخصات مکانیکی آن می‌باشد. به این ترتیب استفاده از افزودنی‌های مختلف جهت بهبود خصوصیات مکانیکی مخلوط‌ها به نحوی که اجرایی و مقرون به صرفه باشد، توصیه شده است. در این مقاله از خرده لاستیک بازیافتی در ساخت نمونه‌های بتن استفاده شده و تاثیر خاکستر بادی و نانوسیلیس در اصلاح مشخصات مکانیکی بتن مورد بررسی قرار گرفته است. جهت برنامه ساخت نمونه‌ها از روش تاگوچی در طراحی آزمایشات استفاده گردیده و بهینه سازی مخلوط نهایی با استفاده از این روش انجام پذیرفته است. در ساخت نمونه‌ها از ۴۰٪تا ۷۰٪ خاکستر بادی (جایگزین سیمان)، ۰تا ۳۰٪ خرده لاستیک (جایگزین مصالح سنگی) و ۰تا ۳ ٪ نانو سیلیس (جایگزین سیمان) استفاده شده است. همچنین برای طرح آزمایشات از آرایه متعامد L16 و ترکیب سطوح و نسبت S/N بزرگتر بهتر است، استفاده شده است. روش تاگوچی روش مناسبی برای بهینه سازی مخلوط و طرح است و برای تعیین مخلوط بهینه مورد استفاده قرار گرفته است. هدف از بهینه سازی ماکزیمم سازی مقاومت فشاری و خمشی نمونه است. بایستی در نظر داشت که افزودن خرده لاستیک در بتن باعث کاهش مشخصات مکانیکی مخلوط خواهد شد. جهت دستیابی به مخلوط مناسب و برطرف ساختن افت مشخصات بتن از از نانوسیلیس در ترکیب مخلوطها استفاده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده از ماکسیمم سازی مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه ها و مقاومت فشاری و کششی آنها و با استفاده از روش بهینه سازی به روش تاگوچی تحلیل ها انجام پذیرفته است. در نهایت نتایج حاکی از این بود که میزان بهینه جایگزینی ۲۷٪ حجمی خرده لاستیک بازیافتی، جایگزینی ۵۰ ٪ سیمان با خاکستر بادی و افزودن ۲ ٪ نانوسیلیس در مصالح سیمانی میتواند بیان کننده خصوصیات مخلوط بهینه باشد

واژه‌های کلیدی: بتن غلتکی، خاکستر بادی، نانو سیلیس، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، بهینه سازی به روش تاگوچی

۱-مقدمه

در دنیا سالا میلیون‌ها تن لاستیک فرسوده ماشین تولید میشود. مقادیر بالایی از این لاستیک‌های فرسوده در مناطق غیر قانونی و یا جنگل‌ها، رودخانه‌ها، حومه شهرها، بیابان‌ها و نواحی متروک رها شده‌اند. انباشته شدن این لاستیکها در محیط زیست باعث ایجاد ناراحتی‌های تنفسی و مشکلات زیست محیطی می‌گردد (Li *et al.* 2004). لذا، روش‌های جدید جهت استفاده مجدد از این ضایعات بایستی مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد. صنعت ساخت بزرگراه‌ها پتانسیل مناسبی جهت استفاده از لاستیک‌ها را بوجود آورده است. در برخی از ایالتهای آمریکا استفاده از خرده لاستیک یا پودر لاستیک در آسفالت یا بتن در ساخت بخشی از راه‌ها و بزرگراههایی که توسط دولت سرمایه گذاری شده اند، الزامی شده است. دولت فدرال آمریکا از سال ۱۹۹۸ استفاده از لاستیک در حداقل ۲۰٪ پروژه های تحت سرمایه گذاری خود را الزامی نموده است. اگرچه به علت قیمت بالای تولید خرده لاستیک و هزینه بالای اختلاط آن با قیر اجرای آن به حالت تعلیق در آمده است (Amirkhanian 1997). مشکلات موجود در راه استفاده از خرده لاستیک در آسفالت

www.SID.ir

Archive of SID

باعث شده تا تمرکز بیشتری بر استفاده از آن در ساخت بتن صورت گیرد. برخلاف نحوه اختلاط لاستیک با قیر در روسازیهای آسفالتی، این مساله در روسازی های بتنی آسانتر و کم هزینه تر و بصورت جایگزینی خردخ لاستیکها با مصالح سنگی میباشد. بکارگیری لاستیک در بتن باعث افزایش انعطافپذیری و مقاومت ترک خوردگی آن در برابر خستگی و بارگذاریهای تکراری خواهد شد. یکی از مزایای استفاده از بتن غلتکی در راهسازی اینست که این بتن به علت میزان سیمان پایین تر دوستار محیط زیست است. ولیکن بزرگترین معضل اینگونه بتنها صلبیت بالای آنها و ترک خوردگی آنها در اثر مقاومت کششی پایینتر و خزش پلاستیک آنهاست (Mohammed and Adamu 2018). بعلاوه به دلیل روش پخش و تراکم آنها، بکارگیری آرماتور و داول بار ها در آنها غیر ممکن است. از آنجا که اینگونه روسازیها در معرض تنشهای کششی–خمشی و خستگی ناشی از بارگذاری سنگین میباشند، تنها باربری از طریق خود بتن بدون هرگونه تسلیح در آن صورت پذیرفته و این انتقال بار بواسطه تماس و قفل و بست سنگدانه ای و خمیر سیمان ایجاد خواهد شد. نیروهای اعمالی از سوی وسایل نقلیه باعث ایجاد تنش خستگی و ترک خوردگی شده و در نهایت باعث کاهش طول عمر و افزایش هزینه نگهداری می‌شود (Adamu *et al.* 2017). اثر خستگی بر بتن غلتکی با افزایش انعطاف‌پذیری بتن غلتکی بهبود خواهد یافت. این موضوع با بکارگیری الیافها، پلیمرها یا خرده لاستیک ها در بتن غلتکی حاصل خواهد شد. وجود افزودنیهای ذکر شده باعث جذب انرژی کرنشی و تغییرشکل ناشی از بارهای ترافیکی می شود(Moghaddam *et al.* 2011). طی مطالعات گسترده ای که بر روی استفاده از خرده لاستیک در بتن غلتکی صورت گرفته است، نتیجه اینگونه بدست آمده که نرمی و جذب انرژی مخلوط افزایش یافته و تردی آن کاهش می‌یابد. همچنین خمر خستگی، هدایت گرمایی، جذب صدا نیز افزایش یافته و در برابر سرعت انتشار ترک در برابر تنشهای کششی و خمشی کاهش خواهد یافت. ولیکن تنها نقطه ضعف بکارگیری خرده لاستیک در بتن، کاهش مشخصات مکانیکی و دوام آن می‌باشد(Rashad 2016). در مطالعه‌ای با استفاده از خرده لاستیک بازیافتی جایگزین مصالح سنگی مشاهده گردید که مقاوت فشاری و خمشی مخلوط کاهش یافته و مقاومت ترکخوردگی آن بطور قابل ملاحظه ای افزایش یافته است (Eldin and Senouci 1993). مطالعه مشابهی توسط تاپکو انجام شده و نتایج یکسانی گزارش گردیده است (Güneyisi *et al.* 2004). بایستی در نظر داشت که مقاومت فشاری و کششی مخلوطهای بتنی در روسازیهای بتنی از فاکتورهای بسیار مهم و تاثیرگذار در آن می باشند. همچنین تامین حداقل مقاومت فشاری کنترل کننده میزان استفاده از خرده لاستیک در بتن است. چنانچه کاهش مقاومت دراثر بکارگیری خرده لاستیک در بتن، استفاده از آن را در اعضای سازه ای محدود نموده است، چگالی کمتر، مقاومت بیشتر در برابر آتشسوزی، ترکخوردگی، عایق صوتی استفاده از خرده لاستیک را در راهسازی مطلوب ساخته است. اثرات منفی بکارگیری خرده لاستیک در بتن با افزایش میزان لاستیک افزایش خواهد یافت بنابراین بدست آوردن میزان بهینه استفاده از لاستیک در بتن درکنار استفاده از مزایای آن مورد توجه قرار گرفته است. در برخی مطالعات سعی برآن شده تا با بکارگیری افزودنیهای مختلف و روشهای خلاقانه از آثار منفی آن بکاهند. محمدی و همکاران تاثیر خیساندن ذرات لاستیک و کاهش حباب‌های سطحی آنها با استفاده از محلولهای مختلف قبل از بکارگیری در بتن را مورد مطالعه قرار دادند. آنان دریافتند که این روش باعث افزایش ۲۲ درصدی مقاومت فشاری نمونه‌ها خواهد شد (Mohammadi *et al.* 2014).

در جهانی که سعی بسیاری بر کاهش هرچه بیشتر میزان دی اکسید کربن در اثر تولیدات کارخانه ای قرارگرفته است، استفاده از افزودنی‌هایی همچون خمیر سیلیس، خاکستر سبوس برنج، خاکستر آتشفشانی، سرباره کوره ذوب آهن بعنوان جایگزین بخشی ازسیمان داخل بتن حین اختلاط بتن یا در هنگام تولید سیمان پوزولانی، مورد توجه قرار گرفته است(Juenger and Siddique 2015). استفاده از مواد پوزولانی همانند خاکستر بادی و سرباره به عنوان جایگزین سیمان یا فیلر در بتن غلتکی بسیار متداول گردیده است. وجود این افزودنی‌ها ضمن پر کردن حفرات موجود در مخلوط باعث ایجاد روانی بیشتر و درنتیجه کارایی بالاتر مخلوط میگردد. همچنین میزان تراکم بالاتری نیز بدست خواهند داد که در میزان مقاومت بتن غلتکی نقش بسزایی ایفا خواهد نمود. خاکستر بادی نوع F باعث بهبود کارایی و افزایش زمان پخش شده و تا بالای ۵۰٪ حجمی بتن غلتکی استفاده میشوند(Fuhrman 2000). خاکستر بادی ضمن کاهش هزینه های تولید بتن غلتکی، دوام و مقاومت دراز مدت را افزایش داده و دمای هیدراسیون در حین اختلاط را کاهش می‌دهد(Rao *et al.* 2016). رائو و همکاران با بکارگیری مقادیر مختلف خاکستر بادی (۰تا ۶۰ درصد) در بتن غلتکی، مشخصات مکانیکی آن نظیر مقاومت فشاری و کششی و ... را مورد بررسی قرار دادند و کاهش مشخصات طی۹۰ روز با افزایش میزان خاکستر بادی را گزارش نمودند. آنها کاهش میزان ترکیب C-S-H در بتن در اثر واکنش کند

www.SID.ir

Archive of SID

مواد پوزولانی طی سنین اولیه بتن را عامل اصلی کاهش مقاومت بتن گزارش نموده اند. مردانی و آقاباقلو نیز طی بکارگیری ترکیب مشابهی در بتن، نتایج مشابهی گزارش نموده اند(Mardani-Aghabaglou *et al.* 2013). نتایج مطالعات دیگر حاکی از این بود که با افزایش سن بتن (پس از ۱۸۰ روز) روند کاهش مقاومت نمونه‌های حاوی خاکستر بادی متوقف می شود. بابو و همکاران با بکارگیری ۸۵٪ خاکستر بادی بجای سیمان دریافتند که پایداری بتن غلتکی تحت تاثیر افزایش میزان خاکستر بادی، بهبود یافته است(Yerramala and Babu 2011). آنها در نهایت استفاده از خاکستر بادی را تا میزان ۷۰٪ محدودنموده و گزارش کردند که این میزان باعث بهبود نفوذپذیری بتن خواهد گردید. با توجه به کاهش مقاومت اولیه مشاهده شده در نمونه‌های بتن غلتکی پس از بکارگیری خاکستر بادی، مواد نانو سیلیس و خمیر سیلیس برای جبران این نقیصه مورد توجه قرار گرفت. در یک تحقیق تاثیر نانو سیلیس و خاکستر بادی بر مقاومت فشاری بتن مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق از مقادیر بالای خاکستر بادی (از ٤٠ تا ۷۰ درصد وزنی جایگزین سیمان)استفاده و بررسی شد. مقاومت فشاری بتن در سنین ۳،۷،۲۸،۵٦و ۹۰ روز اندازه گیری گردید. در ارزیابی مشخصات بتن و میزان پیوند پوزولانی خمیری سیمان از عکسهای الکترونیکی (BSE) و آنالیز تفکیک اشعه ایکس (XRD) استفاده شد. نتایج حاکی از این بود که با افزودن تا ٦٪ نانوسیلیس به بتن، مقدار ۲٪ نانو سیلیس بیشترین مقاومت ۷ و ۲۸ روزه را نشان داده است. محققین با ثابت در نظر گرفتن میزان ۲٪ نانو سیلیس تاثیر افزودن خاکستر بادی را مورد بررسی قرار دادند. این میزان نانو سیلیس مقاومت فشاری ۷ روزه بتن حاوی ٤٠ و ۵۰ درصد خاکستر بادی را به ترتیب به میزان ۵و ۷ درصد بهبود داد. قابل توجه است که این افزایش مقاومت در مقادیر بالاتر خاکستر بادی مشاهده نشد. با بررسی مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌ها مشاهده گردید که افزایش مقاومت در نمونه های حاوی مقادیر بیشتر از ۵۰درصد خاکستر بادی، قابل توجه تر است (Shaikh *et al.* 2014). ارحان و همکاران استفاده از حداکثر ۲۵٪ خرده لاستیک جایگزین مصالح سنگی را جهت ساخت نمونه های بتن غلتکی حاوی خمیر سیلیس پیشنهاد نمودند (Güneyisi *et al*). نتایج حاصل از مطالعات انجام پذیرفته موید این واقعیت است که در اثر بکارگیری خاکستر بادی در بتن مقاومت اولیه و دوام روسازی بتنی کاهش می‌یابد. بنابراین از نانوسیلیس برای بهبود شرایط استفاده شده است(Singh *et al.* 2013). با استفاده از مقادیر ۲و٤٪ مواد نانو سیلیس به همراه ٤٠ و ٦٠ درصد خاکستر بادی بعنوان جایگزین سیمان در بتن، بهبود مقاومت فشاری کوتاه مدت بتن غلتکی گزارش شده است. مقاومت فشاری ۳ روزه و ۷ روزه بتن حاوی ٤٠٪ خاکستر بادی و ۲٪ نانو سیلیس به میزان ۲۵و۱۵٪ افزایش داشت ولی برای مخلوط حاوی ٦٠٪ خاکستر بادی و ۲٪ نانو سیلیس تنها مقاومت فشاری ۳ روزه افزایش یافت. نتایج مشابهی برای نمونه های حاوی ٦٠٪ خاکستر بادی و ٤٪ نانوسیلیس گزارش شده است. این به دلیل واکنش پوزولانی بالاتر خمیر سیلیس نسبت به خاکستر بادی در سنین اولیه است زیرا دارای ذرات کوچکتر و سطح مخصوص بالاتر است (Supit and Shaikh 2015). بررسی و امکانسنجی تولید بتن دوستار محیط زیست از طریق بکارگیری خرده لاستیک در ترکیب بتن از اهداف اصلی این مطالعه بوده است. همچنین جهت رفع معضلات استفاده از مواد بازیافتی در بتن، از مواد نانوسیلیس و خاکستر بادی بهرگرفته شده است. تعیین ترکیب بهینه استفاده از این افزودنیها از جمله مواردی است که ذهن محققین را به خود مشغول داشته و در این مقاله با استفاده از تکنیک بهینه سازی و طرح آزمایشات تاگوچی سعی شده است تا گزینه مناسب استفاده از این افزودنی‌ها را بررسی نماید. با افزودن مقادیر مناسب خرده لاستیک به مصالح سنگی و خاکستر بادی بعنوان جایگزین بخشی از سیمان، از هزینه‌های کاسته شده و آلودگی‌های محیط زیست تا حد مناسبی رفع می‌گردد.

۲-مصالح و طرح اختلاط

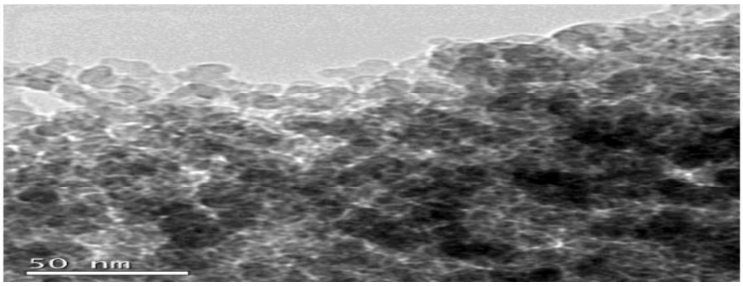
۲-۱- مصالح سیمانی

معمولا استفاده از سیمان تیپ I در ساخت نمونه‌های بتن توصیه می‌شود. ولیکن به دلیل اینکه در تهران بیشتر سیمان تیپ II تولید شده و عمده مصرف سیمان شهر تهران نیز از کارخانه سیمان تهران تامین می‌شود، لذا، در ساخت نمونه‌ها از سیمان تیپ II بر اساس مشخصات ذکر شده در ASTM C150M استفاده شد. وزن مخصوص سیمان ۳/۱۵ و آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی در جدول ۱ آورده شده است. خاکستر بادی ماده‌ای است که از سوختن زغال‌سنگ حاصل می‌گردد و توسط فیلترهای مخصوص، به صورت غبار جمع‌آوری می‌شود. حدود ۸۵ درصد ذرات این ماده از اکسیدهای سیلیسیم، آلومینیم، آهن، کلسیم ومنیزیم تشکیل می‌شود. آثار مطلوب این ماده در بهبود خواص بتن تازه و سخت شده باعث مصرف روزافزون آن در دنیا شده است.خاکستر بادی به دلیل فرایند تولید جز محصولات سبز به حساب می‌رود به طوری که به دلیل کاهش مصرف سیمان باعث جلوگیری از آلودگی‌های ناشی از فرایند تولید سیمان می‌شود. مصرف این ماده باعث افزایش کارایی بتن تازه می‌گردد. همچنین افزایش دمای اولیه بتن به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. لذا، مصرف آن در بتن ریزیهای حجیم رایج است. همچنین عملکرد این ماده در افزایش دوام بتن درمقابل محیط‌های مهاجم اثبات شده است. نفوذپذیری کمتر، عملکرد مناسب در برابر پدیده کربناتاسیون، مقاومت در برابر سولفات و کلرید و نیز کنترل واکنش قلیایی سنگدانه‌ها از مزایای استفاده از این ماده به جای سیمان است. گر چه تمام مزایای ذکر شده تحت تأثیر انتخاب مناسب

www.SID.ir

Archive of SID

نسبت آب به سیمان، عمل آوری کافی، کیفیت مطلوب خاکستر بادی و میزان مناسب جایگزین این ماده به جای سیمان است. در صورت انطباق مشخصات این ماده با الزامات استاندارد مقدار جایگزینی ۲۰ تا ۵۰ درصد انتخاب مناسبی است، گرچه در بعضی موارد جایگزینی با مقادیر بیشتر نیز بکار میرود. از خاکستر بادی کلاس F با مشخصات مندرج در جدول ۱ و ۲ استفاده شده است. در مقایسه با میکروسیلیس، نانو سیلیس دارای خلوص بیشتر اکسید سیلیس و همچنین سطح ویژه ی بالاتری می باشد این دو خصوصیت اصلی باعث به وجود آمدن تفاوت های عمده بین این دو ماده می شود .از نقطه نظر خواص فیزیکی، میزان سطح ویژه نانو سیلیس معمولاً ۶۰-۶۰۰ مترمربع بر گرم است. همچنین مقدار چگالی ویژه بین ۳۰-۴۰ گرم بر لیتر می باشد. اندازه ذرات نانو سیلیس همانطور که در شکل ۱ قابل مشاهده است نیز بایستی از ۱۰۰ نانومتر کوچکتر باشند. از نقطه نظر شیمیایی نیز مقدار خلوص SiO_2 در نانو سیلیس بالاتر از ۹۹/۵ درصد است و مقدارهر کدام از اکسیدهای Al_2O_3, Fe_2O_3 و TiO_2 کمتر از ۰/۱ درصد می باشد سایر اکسیدها در نانو سیلیس یا وجود ندارد یا مقدار کمتر از ۰/۰۱ درصد به خود اختصاص می‌دهند. فزودن نانوسیلیس به مخلوط بتن باعث می‌گردد SiO_2 فعال آن با محلول هیدروکسید کلسیم $Ca(OH)_2$ آزاد موجود در منافذ موئین بتن ترکیب گردد و کریستال سیلیکات کلسیم نامحلول تولید نماید و در نهایت باعث تراکم ساختار خمیر سیمان و کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت بتن گردد. از جمله این مزایا می توان به افزایش مقاومت فشاری و خمشی و کششی بتن، افزایش مقاومت بتن در برابر فرسایش، کاهش قابل توجه نفوذپذیری بتن، جلوگیری از نفوذ یون کلر و سولفاتها و سایر مواد شیمیایی مخرب به داخل بتن اشاره کرد. تصاویر ظاهری خاکستر بادی، نانوسیلیس و سیمان در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۱. تصویر ذرات نانو سیلیس توسط TEM

شکل ۲. تصاویر نانوسیلیس، سیمان و خاکستر بادی استفاده شده در مخلوط

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱. آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی و خاکستر بادی

سیمان	خواص فیزیکی	درصد وزنی ترکیبات شیمیایی (٪)								
	افت ناشی از سوزاندن	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	Cl
	٪ ۳/۳	۲۰/۰۶	٤/٤۲	۲/٦۷	٦٤/۰٤	۱/۱۹	۳/۱	۰/۷۱	۰/۲۱	۰/۰۵
خاکستر بادی		نرمی		SO_3	CaO	MgO	K_2O	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2
	٪ ٤/۸	٪۲۵/۱		۰/۷۷	۲/۸	۱/۵	۳/۱	۲٤/۷	۸/۸	۵۱/۲

جدول ۲. مشخصات شیمیایی خاکستر بادی طبق استاندارد ASTM C618-91

مشخصات	ملزومات کلاس خاکستر بادی		
	N	F	C
Silicon dioxide (SiO_2) + **Aluminium oxide** (Al_2O_3) + **Iron oxide** (Fe_2O_3), **in percent by mass, Min.**	70	70	50
Sulfur trioxide (SO_3), **max. Percent**	4	5	5
Moisture content, max. , percent	3	3	3
Loss on ignition, max., percent	10	6	6

۲-۲- مصالح سنگی

انتخاب مصالح سنگی مناسب در ساخت بتن از اهمیت ویژه ای برخوردار است. مصالح مصرفی باید به گونه ای باشد که توانایی تامین دانه بندی مناسب مطابق با آیین نامه‌های مربوطه را دارا باشد. در ساخت بتن معمولا از مصالح ماسه‌ای شسته شده استفاده می‌شود. شستشوی مصالح باعث جداسازی مصالح ریزدانه و فیلر از ماسه می‌شود. از آنجاکه در آیین نامه تا ۸٪ فیلر در ساخت بتن توصیه گردیده است، تولید کنندگان بتن تا حدودی برای ایجاد دانه بندی با مشکل مواجه خواهند شد و از پودر سنگ بجای فیلر استفاده می نمایند. در این تحقیق با در نظر گرفتن مطالب فوق الذکر سعی گردیده تا از مصالح کوهی شکسته شده آبیک برای ساخت نمونه ها استفاده گردد. مشخصات مصالح سنگی در جدول ۳ آورده شده و در جدول ٤ دانه بندی مورد استفاده با درنظر گرفتن حدود پیشنهادی ACI ارایه شده است. همچنین تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند که استفاده از پوزولان‌ها خصوصاً دوده سیلیس و فیلر (ریزتر از الک ۲۰۰#) در صورتی که خاصیت خمیری نداشته باشند، جهت ارتقاء کیفی روسازی با استفاده از بتن غلتکی مناسب خواهد بود (صادق ۱۳۸٦).

جدول ۳. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی ASTM C-127 و AASHTO T84-85

مشخصات	ماسه	مصالح درشت دانه ۶-۱۲	مصالح درشت دانه ۱۲-۱۹	خرده لاستیک
وزن مخصوص مصالح سنگی (حالت اشباع با سطح خشک)	۲/٦۵	۲/۵۵	۲/٦٦	۱/۲۱
مدول نرمی	۲/۸٦	–	–	
جذب آب	٪ ۱/۲٤	٪ ۲/۵۵	٪ ۰/٤۸	

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ٤. دانه بندی مصالح مصرفی و دانه بندی‌های مورد استفاده (Association 1987)

شماره الک	حدود دانه بندی پیشنهادی PCA و دانه بندی استفاده شده		دانه بندی لاستیک
	حد بالا	حد پایین	دانه بندی مصالح	
1	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
3/4	۱۰۰	۹۰	۹۸	۱۰۰
1/2	۹۰	۷۰	۸۵	۹۷
3/8	۸۵	۷۰	۷۵	۷۹/۵
#4	٦۰	٤۰	٤٦/۷	۲٦
#8	-	-	-	٦/۵
#16	٤۰	۲۰	۲۰	٦
#30	-	-	-	۵/۵
#50	-	-	-	۱/۵
#100	۱٦	٦	۷	۱
#200	۸	۲	۲	۰

۳- طرح اختلاط

دو روش کلی آزمون‌های روانی و تراکم خاک برای طرح اختلاط بتن غلتکی در حال حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرند. برمبنای روش تراکم خاک، رطوبت بهینه بر اساس روش تراکم پروکتور اصلاح شده و حداکثر دانسیته مخلوط بر اساس استاندارد ACI 211.3R و ASTM D1557، تعیین میشود(Soil and Rock 2009). در روش روانی، روانی مطلوب مخلوط با استفاده از دستگاه وی بی‌طبق استاندارد ASTM C1170 تعیین می‌شود. در این روش در نهایت وزن مصرفی مصالح درشت دانه و ریزدانه با توجه به وزن مخصوص مربوطه تعیین شده و میزان آب بدست می‌آید. زمان وی بی بصورت چشمی بدست آمد و میزان آب لازم به صورت چشمی و بر اساس زمان وی بی (زمان بالا آمدن خمیر سیمان به سطح وزنه) تعیین می‌شود. در این تحقیق ابتدا میزان رطوبت به روش تراکم خاک تعیین گردیده و سپس میزان سیمان بر اساس میزان مقاومت فشاری مورد نظر به شرح زیر بدست آمد: دانه بندی مطابق جدول شماره ٤ با درصد اختلاط ٦۰٪ ریزدانه، ۲۰٪ مصالح ۱۲-۱۹ میلیمتر و ۲۰٪ مصالح ٦-۱۲ میلیمتر انتخاب گردید. برای ساخت نمونه‌ها از ۱۳٪ سیمان (وزن خشک مصالح سنگی) استفاده شده است که پس از ساخت نمونه‌هایی با درصد سیمان‌های متفاوت و ترسیم منحنی وزن مخصوص-درصد رطوبت به دست آمده است. میزان مقاومت فشاری حداقل ۳۰ MPa برای نمونه نهایی جهت تعیین میزان سیمان در نظر گرفته شد. میزان رطوبت مخلوط در هنگام تراکم نمونه‌ها به روش وی بی محاسبه و مورد استفاده قرار گرفت. این درصد رطوبت از ۰/۳٦ تا ۰/٤ نسبت به وزن سیمان در نظر گرفته شد. مخلوط‌های بتن غلتکی، نسبت به بتن معمولی دارای میزان سیمان کمتری می‌باشند و سیمان نقش چسباننده مصالح و یکپارچگی و استحکام مخلوط را ایفا می‌نماید. درصد سیمان با توجه به نیاز پروژه و مشخصات طرح تعیین می‌گردد. این کمیت دارای اثر مستقیم بر مشخصه‌های مکانیکی مخلوط بوده، لذا میزان سیمان مخلوط با دقت تعیین می‌گردد.

۳-۱- ساخت نمونه‌ها و روش آزمایشات

جهت متراکم کردن نمونه‌ها از میز لرزه‌ای وی بی‌مطابق با استاندارد ASTM C1176-92 استفاده می‌شود. ارتعاش این میز بصورت سینوسی و با فرکانس ٦۰ HZ و دامنه ۰/٤۳ میلیمتر می‌باشد. همچنین برای متراکم کردن نمونه‌ها از سربار معادل ۹ کیلوگرم طبق استاندارد ASTM C1176 بر روی نمونه استفاده می‌شود. وزن سربار طبق استانداردهای مختلف، متفاوت بوده و استاندارد ASTM D1170 سربار معادل ۲۲/۷ کیلوگرم را پیشنهاد نموده است. نمونه‌ها به مدت ۳۰ تا ٤۵ ثانیه تحت تراکم و ارتعاش قرار می‌گیرند. شکرچی زاده و همکاران در سال ۱۳۹۰ ضمن ساخت نمونه‌های بتن غلطکی به روش مذکور، مطالعاتی در مورد میزان نفوذپذیری آنها با درصد سیمان متفاوت نیز ارایه نمودند (رامی ۱۳۹۰). مشخصات طرح اختلاط مصالح در جدول ۵ آورده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۵. مشخصات طرح اختلاط مورد استفاده

RUN	خاکستر بادی	نانوسیلیس	خرده لاستیک	سیمان	خاکستر بادی	نانوسیلیس	فیلر	ماسه	درشت دانه	آب	خرده لاستیک
	(%)	(%)	(%)	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg
1	40	0	0	161.46	82	0	104	1250.08	833.34	97.02	0
2	40	1	10	161.46	82	2.42	104	1135.07	833.34	97.02	114.89
3	40	2	20	161.46	82	4.84	104	920.06	833.34	97.02	229.78
4	40	3	30	161.46	82	7.26	104	805.05	833.34	96.87	344.67
5	50	0	10	134.58	102.54	0	104	1135.07	833.34	96.87	114.89
6	50	1	0	134.58	102.54	2.37	104	1250.08	833.34	96.59	0
7	50	2	30	134.58	102.54	4.74	104	805.05	833.34	96.87	344.67
8	50	3	20	134.58	102.54	7.11	104	920.06	833.34	96.87	229.78
9	60	0	20	107.7	123.09	0	104	920.06	833.34	96.87	229.78
10	60	1	30	107.7	123.09	2.31	104	805.05	833.63	96.87	344.67
11	60	2	0	107.7	123.09	4.62	104	1250.08	833.34	96.59	0
12	60	3	10	107.7	123.09	6.93	104	1135.07	833.34	96.87	114.89
13	70	0	30	80.81	143.66	0	104	805.05	833.34	96.59	344.67
14	70	1	20	80.81	143.66	2.24	104	920.06	833.93	96.87	229.78
15	70	2	10	80.81	143.66	4.49	104	1135.07	833.93	96.31	114.89
16	70	3	0	80.81	143.66	6.74	104	1250.08	833.34	96.87	0

گام بعدی در راستای انجام آزمایشات، تعیین مقاومت مونه‌های بتن غلتکی می‌باشد. برای تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها از نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلیمتر استفاده شد. پس از عمل آوری مقاوت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها به دست آمد. مقاومت کششی نمونه‌ها بر اساس استاندارد BS 12390 از طریق نمونه های استوانه ای ۲۸ روزه به قطر ۱۵۰ میلیمتر و ارتفاع ۳۰۰ میلیمتر اندازه‌گیری شد. در نهایت مقاومت خمشی نمونه‌ها با استفاده از نمونه‌های تیرچه به ابعاد ۵۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلیمتر و طبق استاندارد ASTM C293 تعیین گردید. نتایج آزمایشات و روش انجام آنالیزهای مربوطه در ادامه ذکر گردیده است.

٤- روش طراحی آزمایشات تاگوچی

روش تاگوچی یک روش آماری است که توسط محقق ژاپنی در دهه ۱۹۵۰ به عنوان یک تکنیک بهینه سازی ابداع گردید. روش طرح تاگوچی از آرایه‌های متعامد برای طرح تعداد آزمایشات و جهت آنالیز بهینه سازی نتایج بکار برده میشود. تعداد فاکتورهای کنترل و سطوح آنها در انتخاب آرایه‌های مناسب موثر است. برخی از متغیرها که مستقیما بر عملکرد تاثیرگذار می‌باشند را می‌توان با استفاده از طرح تاگوچی تخمین زد. برای طرح با ۳ پارامتر و ٤ سطح، تعداد آزمایشات لازم ٦٤ خواهد بود که این تعداد آزمایش با بکارگیری L16 OA به ١٦ عدد کاهش خواهد یافت. در این قسمت با توجه به تعداد زیاد طرح‌ها و حجم بالای ساخت نمونه‌ها، برای بهینه سازی مقاومت فشاری،کششی و خمشی از روش تاگوچی استفاده شده است. استفاده از روش طراحی آزمایشات رویکرد موثری برای تعیین شرایط بهینه ایجاد می‌آورد (Reyhani *et al.* 2013).

جدول ٦. فاکتورها وسطوح بکارگرفته شده در DOE

شماره متغیر	فاکتورها	سطوح			
		١	٢	٣	٤
١	درصد خرده لاستیک	٠	١٠	٢٠	٣٠
٢	درصد خاکستر بادی (٪)	٤٠	٥٠	٦٠	٧٠
٣	درصد نانوسیلیس (٪)	٠	١	٢	٣

www.SID.ir

Archive of SID

٤-۲-۱- نسبت S/N

مفهوم فاکتور اغتشاش که توسط تاگوچی بیان شده است، بعنوان دلیل تفاوت در عملکرد شناخته شده و پاسخی جهت چرایی شکست محاسبات می باشد. نسبت S/N بصورت نسبت میانگین به انحراف استاندارد تعریف می‌شود. این تعریف آماری، در آمار صنعتی کاربرد داشته و در آزمایشات برای جلوگیری از بوجودآمدن هرگونه تغییرات تصادفی استفاده می‌گردد. همچنین نسبت S/N در ارزیابی کیفیت نتایج استفاده میشود. این نسبت سطح عملکرد و اثر فاکتور اغتشاش بر عملکرد را اندازه‌گیری کرده و بصورت ارزیابی ثبات یک خروجی می‌باشد. معیارهای مختلفی برای ارزیابی پاسخ وجود دارد که در اینجا از معیار "بزرگ‌تر بهتر" استفاده شده است و معنای آن ماکزیمم سازی هدف است. این معیار از طریق رابطه رابطه ١٤ بیان می‌گردد (Nuruddin and Bayuaji 2009).

$$S/N = -10 \times \log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{Y_i^2}\right) \quad (1)$$

n تعداد مشاهدات در نمونه خاص و Y خصوصیت متناظر آنست. میزان متوسط نسبت S/N در جدول نتایج با استفاده از نرم افزار Minitab و با استفاده از تابع آنالیز طراحی تاگوچی محاسبه شده است. حساسیت پارامترهای مختلف نظیر مقاومت فشاری و کششی و شاخص چقرمگی نمونه‌های بتن غلتکی بر فاکتور اغتشاش از طریق نسبت S/N اندازه‌گیری شده‌اند. مقادیر بالاتر S/N بیانگر تغییرات کمتر مقادیر پاسخ و اثر تصادفی کمتر فاکتور اغتشاش می‌باشد.

جدول ۷. جدول استاندارد L16 برای طرح آزمایشات

شماره نمونه	سطوح متغیرهای مستقل						
	متغیر ۱	متغیر ۲	متغیر ۳	خاکستر بادی	نانو سیلیس	خرده لاستیک
۱	۱	۱	۱	40	0	0
۲	۱	۲	۲	40	1	10
۳	۱	۳	۳	40	2	20
٤	۱	٤	٤	40	3	30
٥	۲	۱	۲	50	0	10
٦	۲	۲	۱	50	1	0
۷	۲	۳	٤	50	2	30
۸	۲	٤	۳	50	3	20
۹	۳	۱	۳	60	0	20
۱۰	۳	۲	٤	60	1	30
۱۱	۳	۳	۱	60	2	0
۱۲	۳	٤	۲	60	3	10
۱۳	٤	۱	٤	70	0	30
۱٤	٤	۲	۳	70	1	20
۱٥	٤	۳	۲	70	2	10
۱٦	٤	٤	۱	70	3	0

٥-نتایج و بحث

٥-۱- روش تاگوچی

ماتریس طرح آزمایشات و طرح اختلاط نمونه‌ها در جدول ۸ آورده شده است.

٥-۲- بهینه‌سازی مخلوط به روش تاگوچی

از روش تاگوچی می‌توان برای بهینه سازی فاکتورها استفاده نمود. در این راستا با استفاده از کمیت‌هایی نظیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی و خمشی نمونه‌های بتن

www.SID.ir

Archive of SID

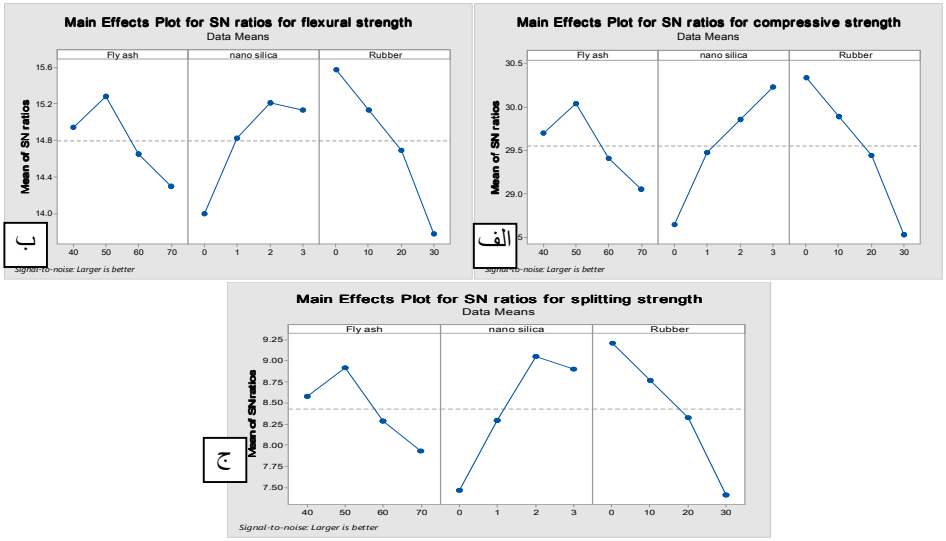
غلتکی و بر اساس آنالیز طرح آزمایشات به روش تاگوچی و سطوح مختلف آنان، اثر فاکتورهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. آنالیز مربوط با استفاده از نرم افزار Minitab انجام شده و نتایج در شکل ۳ برای مخلوط بتن غلتکی، آورده شده است. در آنالیزها از معیار " بزرگ‌تر–بهتر" استفاده شده است. بنابراین، مقدار درصد لاستیک، خاکستر بادی و نانوسیلیس با میزان نسبت S/N بزرگتر، بعنوان کمیت بهینه انتخاب خواهد شد.

۵-۲-۱- آنالیز واریانس ANOVA

برای تعیین اینکه کدامین فاکتورها تأثیر بیشتری بر خصوصیات بتن غلتکی دارند از آنالیز واریانس استفاده شده است. خلاصه نتایج درجه آزادی (DOF)، نسبت F و درصد مشارکت هر یک از فاکتورها در جدول ۹ برای مخلوطهای بتن غلتکی حاوی خرده لاستیک آورده شده است.

جدول ۸. جدول استاندارد L16 طرح آزمایشات برای تحلیل نتایج

RUN	خاکستر بادی (%)	نانوسیلیس (%)	خرده لاستیک (%)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت خمشی (MPa)	مقاومت کششی (MPa)
1	40	0	0	30.12	5.58	2.63
2	40	1	10	31.48	5.83	2.75
3	40	2	20	31.26	5.79	2.85
4	40	3	30	29.36	5.17	2.52
5	50	0	10	29.76	5.51	2.60
6	50	1	0	34.46	6.38	3.01
7	50	2	30	29.26	5.42	2.67
8	50	3	20	33.92	5.97	2.91
9	60	0	20	26.29	4.87	2.30
10	60	1	30	26.03	4.82	2.27
11	60	2	0	33.50	6.21	3.05
12	60	3	10	33.21	5.84	2.85
13	70	0	30	22.72	4.21	1.98
14	70	1	20	27.76	5.14	2.42
15	70	2	10	30.55	5.66	2.78
16	70	3	0	33.56	5.91	2.88



شکل۳. نتایج آنالیز نسبت S/N برای کمیت‌های مختلف مخلوطها بتن غلتکی

www.SID.ir

Archive of SID

میزان بالای F نشان دهنده اینست که اثر یک پارامتر در مقایسه با خطای واریانس بیشتر بوده و بیانگر میزان اهمیت یک پارامتر بر یک مشخصه خاص خواهد بود. در نهایت درصد مشارکت هر یک از پارامترها جهت تعیین سطح اهمیت آماری آن پارامتر در مدل محاسبه می‌گردد.

جدول ۹. نتایج آنالیز واریانس نسبت S/N برای مخلوط‌های بتن غلتکی

فاکتورها	پارامترهای آماری	مقاومت فشاری	مقاومت خمشی	مقاومت کششی
خاکستر بادی (%)	DF	3	3	3
	Seq. SS	21.802	0.751	0.164
	Adj. SS	21.802	0.751	0.164
	Adj. MS	7.267	0.250	0.055
	F	92.490	102.910	83.450
	P	0.000	0.000	0.000
	درصد مشارکت (%)	13	16	13
نانوسیلیس (%)	DF	3	3	3
	Seq. SS	60.745	1.326	0.524
	Adj. SS	60.745	1.326	0.524
	Adj. MS	20.248	0.442	0.175
	F	257.710	181.630	266.260
	P	0.000	0.000	0.000
	درصد مشارکت (%)	37	28	40
لاستیک (%)	DF	3	3	3
	Seq. SS	79.525	2.683	0.611
	Adj. SS	79.525	2.683	0.611
	Adj. MS	26.508	0.894	0.204
	F	337.380	367.640	310.190
	P	0.000	0.000	0.000
	درصد مشارکت (%)	49	56	47

هرچه درصد مشارکت یک فاکتور بیشتر باشد میزان اهمیت و تاثیرگذاری آن فاکتور بیشتر خواهد بود.

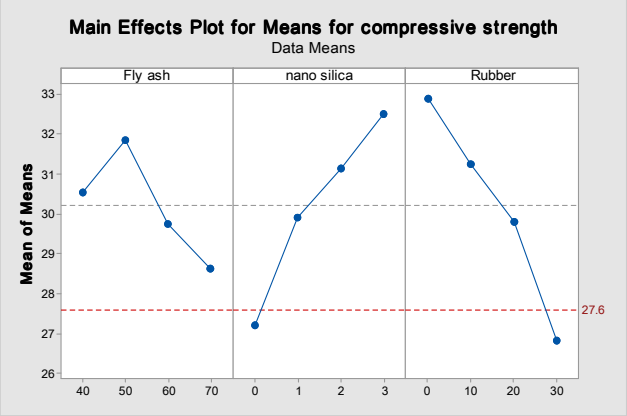
۵-۲-۲- بحث و بررسی نتایج

براساس نتایج شکل ۳ (الف) برای مقاومت فشاری، مقدار ٤٠٪ خاکستر بادی، ۰٪ خرده لاستیک بازیافتی و ۳٪ نانوسیلیس بیشترین مقدار S/N برای نمونه‌های بتن غلتکی خواهند داشت. براساس جدول ۹، پارامتر خرده لاستیک با ٤٩ ٪ مشارکت بیشترین سهم در کاهش مقاومت فشاری و پارامتر نانو سیلیس با ۳۷٪ بیشترین تاثیر را در افزایش مقاومت فشاری را دارا می‌باشند. همچنین با ٥٦ ٪ مشارکت، موثرترین فاکتور در کاهش مقاومت خمشی مخلوط بتن غلتکی می‌باشد. براساس شکل ۳ (الف) مقادیر ۵۰٪ خاکستر بادی، ۳٪ نانو سیلیس و مصالح غیر بازیافتی ترکیب بهینه مخلوط را تشکیل خواهند داد. شکل ۳ (ب) مقادیر بهینه نسبت اختلاط را برای متغیرمقاومت خمشی در ۵۰٪ خاکستر بادی، مصالح غیربازیافتی با ۲٪ نانوسیلیس مشخص می‌کند. این مقادیر نسبت بهینه مخلوط در شکل ۳ (ج) برای متغیرمقاومت کششی، مقدار ۵۰٪ خاکستر بادی، مصالح غیربازیافتی با ۲٪ نانوسیلیس را مشخص می‌نماید. در این میان پارامتر خرده لاستیک با ٤٧ ٪ مشارکت، موثرترین فاکتور در کاهش مقاومت کششی و نانوسیلیس با ٤٠٪ مشارکت بیشترین تاثیر را در افزایش مقاومت کششی خواهد داشت. همچنین پارامتر خاکستر بادی به نسبت دو پارامتر دیگر تاثیر کمتری در میزان مقاومت بتن غلتکی گذاشته است و به ازای ۵۰٪ بکارگیری خاکستری، مقادیر مقاومت به

www.SID.ir

Archive of SID

بیشترین مقدار خواهد رسید. تفسیر اینکه کدامیک از متغیرها و پارامترهای فوق الذکر میتوانند در تعیین مخلوط بهینه تاثیرگذارتر باشد، به طراح و شرایط طراحی و سایر پارامترهای موثر بستگی دارد. از آنجاییکه مقاومت فشاری بیانگر ظرفیت باربری مخلوط تحت تاثیر بارگذاری ترافیک خواهد بود و این متغیرتاثیر بسزایی در عملکرد مخلوط و رویه بتنی دارد، بنابراین بایستی بعنوان متغیرتعیین کننده در طراحی مورد استفاده قرارگیرد. و بر این اساس مخلوط حاوی ۰٪ خرده لاستیک از عملکرد مطلوب تری برخوردار خواهد بود. ولی از آنجاکه هدف از این تحقیق ساخت بتن دوستار محیط زیست بوده نقیصه بارگیری خرده لاستیک با افزودن نانوسیلیس برطرف گردیده و طبق نتایج ارائه شده برای مقاومت فشاری، مقادیر ۳٪ نانوسیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری تا حد بسیار مطلوبی گردیده و اثر منفی استفاده از خرده لاستیک را برطرف نموده است. همچنین براساس معیار ACI حداقل مقاومت فشاری لازم برای رویه‌های بتن غلتکی ۲۷/۶ MPa گزارش گردیده است(Committee 2001)، بنابراین بایستی اثر همزمان متغیرهای مقاومت فشاری و استفاده از خرده لاستیک مورد بررسی قرار گیرد. بر اساس گراف شکل ٤ حداقل مشخصه از طریق ۲۷ درصد خرده لاستیک به همراه ۰/۳ درصد نانوسیلیس برآورده خواهدگردید. بنابراین طبق آنالیزهای انجام شده بوسیله روش تاگوچی و با استفاده از معیار حداقل مقاومت فشاری طرح، میتوان به مخلوط بهینه حاوی ۲۷٪ خرده لاستیک و ۰/۳ درصد نانوسیلیس به مخلوط مطلوب جهت روسازی بتنی دست یافت. درصورتیکه سایر پارامترهای مقاومتی بتن نیز در نظر گرفته شوند به مخلوط بهینه با مقادیر ۲۷٪ خرده لاستیک، ۲٪ نانوسیلیس و ۵۰٪ خاکستر بادی خواهیم رسید.



شکل ٤. میزان درصد بهینه خرده لاستیک براساس معیار حداقل مقاومت فشاری و روش تحلیل تاگوچی

مقادیر مخلوط بهینه برای کمیت‌های مختلف در جدول ۱۰ آورده شده است.

جدول۱۰. آنالیز مخلوط بهینه برای مخلوط‌های حاوی خرده لاستیک بازیافتی

نوع مصالح بازیافتی	فاکتور	خصوصیات بتن غلتکی		
		مقاومت فشاری	مقاومت کششی	مقاومت کششی
خرده لاستیک بازیافتی	میزان خاکستر بادی	۵۰	۵۰	۵۰
	درصد خرده لاستیک (٪)	۰	۰	۰
	درصد نانو سیلیس (٪)	۳	۲	۲

۵-۳- مدلسازی آماری نتایج

www.SID.ir

Archive of SID

خلاصه نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) برای پاسخ مقاومت فشاری، خمشی و کششی در جدول ۱۱ آورده شده است. معناداری مدل و کلیه عناصرش را در بازه اطمینان ۹۵٪ مورد بررسی قرار می‌دهیم. بنابراین با پذیرش مقادیر دارای $P<0.05$ نتایج مدل به شکل روابط ۲تا ٤ ارایه می‌گردد.

جدول ۱۱. نتایج آنالیز واریانس روابط موجود برای پاسخ مقاومت فشاری، خمشی و کششی

	SS	DF	MS	F	R
Model	206.60	5	41.32	71.02	< 0.0001
A-Fly Ash	19.42	1	19.42	33.37	< 0.0001
B-nono Silica	78.80	1	78.80	135.43	< 0.0001
C-Rubber	96.31	1	96.31	165.53	< 0.0001
A²	7.96	1	7.96	13.69	0.0024
B²	2.79	1	2.79	4.79	0.0460
Residual	8.15	14	0.5818		
Cor Total	214.75	19			
Model	6.27	5	1.25	80.23	< 0.0001
A-Fly Ash	0.5804	1	0.5804	37.14	< 0.0001
B-nono Silica	1.43	1	1.43	91.21	< 0.0001
C-Rubber	3.05	1	3.05	195.16	< 0.0001
A²	0.2645	1	0.2645	16.93	0.0011
B²	0.3385	1	0.3385	21.66	0.0004
Residual	0.2188	14	0.0156		
Cor Total	6.49	19			
Model	1.61	5	0.3220	78.70	< 0.0001
A-Fly Ash	0.1100	1	0.1100	26.89	0.0001
B-nono Silica	0.5745	1	0.5745	140.43	< 0.0001
C-Rubber	0.6476	1	0.6476	158.30	< 0.0001
A²	0.0622	1	0.0622	15.20	0.0016
B²	0.0849	1	0.0849	20.76	0.0004
Residual	0.0573	14	0.0041		
Cor Total	1.67	19			

$$F_C=31.89 -1.33\ FA +2.67\ NS -2.97\ R -1.78\ FA^2 -1.05\ NS^2 \qquad R^2= 0.9621 \qquad (۲)$$

$$F_T=5.92 -0.2291\ FA +0.3594\ NS -0.5278\ R -0.3235\ FA^2 -0.3660\ NS^2 \qquad R^2= 0.9663 \qquad (۳)$$

$$F_s=2.85 -0.0998\ FA +0.2282\ NS -0.2432\ R -0.1569\ FA^2 -0.1833\ NS^2 \qquad R^2= 0.9656 \qquad (٤)$$

که در این رابطه F_C مقاومت فشاری، F_T مقاومت خمشی، F_S مقاومت کششی در واحد MPa، R : درصد خرده لاستیک. FA: درصد خاکستر بادی و NS: درصد نانو سیلیس می‌باشد.

۵-نتیجه‌گیری

استفاده از مصالح بازیافتی در ساخت بتن کمک شایانی به حفظ محیط زیست و کاهش تولید آلودگی محیطی خواهد داشت. دراین تحقیق تاثیر استفاده از خرده لاستیک در بتن غلتکی به همراه خاکستر بادی و نانوسیلیس مورد بررسی قرار گرفت. آزمایشات مقاومت فشاری، خمشی و کششی بر روی نمونه‌ها انجام پذیرفته و بر اساس نتایج بدست آمده مدلهایی متناسب با ترکیب مخلوط‌های بتن غلتکی حاوی مقادیر مختلف خرده لاستیک بازیافتی، خاکستر بادی و نانوسیلیس برازش شده و مورد بررسی قرار گرفته است. ترکیب آزمایشات با استفاده از روش تاگوچی طراحی شده و

www.SID.ir

Archive of SID

سپس با استفاده از همین روش بهینه سازی گردید. نتایج زیر بر اساس ارزیابی‌های انجام شده حاصل گردید: درصد خطای صحت سنجی مدل‌ها کمتر از ۵٪ بوده که بیانگر پذیرش مدل‌های برازش شده می‌باشد. مخلوط بهینه بتن غلتکی مطالعه شده با در نظر گرفتن محدودیت حداقل مقاومت فشاری طرح نمونه‌ها، به صورت ۵۰ ٪ خاکستر بادی،۲۷٪ خرده لاستیک بازیافتی و ۲ ٪ نانو سیلیس گزارش می‌شود. اگرچه در برخی منابع میزان افزایش ناچیزی در مقاومت فشاری و خمشی بتن در اثر استفاده از خرده لاستیک در آن گزارش گردیده است، ولی با این وجود افزودن خرده لاستیک بازیافتی و خاکستر بادی به نمونه های بتن غلتکی باعث کاهش مقاومت مخلوط بتن غلتکی گردید. بکارگیری نانو سیلیس باعث بهبود مشخصات مکانیکی مخلوط بتن غلتکی گردید و برای بهینه‌سازی مصرف مصالح بازیافتی در بتن قابل استفاده خواهد بود.

٦-مراجع

-رامی، ش.ز.ف.ا.ز.، (۱۳۹۰)، "بررسی میزان نفوذپذیری بتن غلتکی و مقایسه آن با دیگر خصوصیات بتن"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، (دانشگاه سمنان).

-صادق، ا.، (۱۳۸٦)، "مطالعه رفتار مکانیکی بتن غلتکی با مصالح ریزدانه غیرخمیری برای کاربرد در روسازی‌های بتنی".

-Adamu, M., Mohammed, B.S. & Shafiq, N., (2017), "Flexural performance of nano silica modified roller compacted rubbercrete". International Journal of Advanced and Applied Sciences, 4 (9), pp.6-18.

-Amirkhanian, S., (1997), "Utilization of waste materials in highway industry: A literature review. Journal of solid waste technology and management", 24 (2), pp.94-103.

-Association, P.C., (1987), "Structural design of roller-compacted concrete for industrial pavements: Portland Cement Association".

-Committee, A., (2001), Comittee 3. 25 -95. Report on Roller-Compacted Concrete Pavements.

-Eldin, N.N. & Senouci, A.B., (1993), "Rubber-tire particles as concrete aggregate". Journal of materials in civil engineering, 5 (4), pp.478-496.

-Fuhrman, R.L., (2000), "Engineering and design roller compacted concrete, department of the army us army corps of engineers". US Department of the Army, Corps of Engineers, Washington DC, USA2000.

-Güneyisi, E., Gesoğlu, M. & Özturan, T., (2004), "Properties of rubberized concretes containing silica fume". Cement and Concrete Research, 34 (12), pp.2309-2317.

-Juenger, M.C. & Siddique, R., (2015), "Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete". Cement and Concrete Research, 78, pp.71-80.

-Li, G., Stubblefield, M.A., Garrick, G., Eggers, J., Abadie, C. & Huang, B., (2004), "Development of waste tire modified concrete". Cement and Concrete Research, 34 (12), pp.2283-2289.

-Mardani-Aghabaglou, A., Andiç-Çakir, Ö. & Ramyar, K., (2013), "Freeze–thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method". Cement and Concrete Composites, 37, pp.259-266.

-Moghaddam, T.B., Karim, M.R. & Abdelaziz, M., (2011), "A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes". Scientific Research and Essays, 6 (4), pp.670-682.

-Mohammadi, I., Khabbaz, H. & Vessalas, K., (2014), "In-depth assessment of crumb rubber concrete (crc) prepared by water-soaking treatment method for rigid pavements". Construction and Building Materials, 71, pp.456-471.

www.SID.ir

Archive of SID

-Shaikh, F., Supit, S. & Sarker, P., (2014), "A study on the effect of nano silica on compressive strength of high volume fly ash mortars and concretes". Materials & Design, 60, pp.433-442.

-Singh, L., Karade, S., Bhattacharyya, S., Yousuf, M. & Ahalawat, S., (2013), "Beneficial role of nanosilica in cement based materials–a review". Construction and Building Materials, 47, pp.1069-1077.

-Soil, A.C.D.-O. & Rock, (2009), Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft3 (2,700 kn-m/m3)) 1: ASTM international.

Supit, S.W.M. & Shaikh, F.U.A., (2015), "Durability properties of high volume fly ash concrete containing nano-silica. Materials and structures, 48 (8), pp.2431-2445.

-Taguchi, G., Chowdhury, S. & Taguchi, S., (2000), "Robust engineering: McGraw-Hill Professional."

-Yerramala, A. & Babu, K.G., (2011), "Transport properties of high volume fly ash roller compacted concrete. Cement and Concrete composites, 33 (10), pp.1057-1062.

-Mohammed, B.S. & Adamu, M., (2018), "Mechanical performance of roller compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano silica. Construction and Building Materials, 159, pp.234-251.

-Nuruddin, M. & Bayuaji, R., (2009), "Application of taguchi's approach in the optimization of mix proportion for microwave incinerated rice husk ash foamed concrete. IJCEE, 9, pp.121-129.

-Rao, S.K., Sravana, P. & Rao, T.C., (2016), "Experimental studies in ultrasonic pulse velocity of roller compacted concrete pavement containing fly ash and m-sand". International Journal of Pavement Research and Technology, 9 (4), pp.289-301.

-Rashad, A.M., (2016), "A comprehensive overview about recycling rubber as fine aggregate replacement in traditional cementitious materials". International Journal of Sustainable Built Environment, 5 (1), pp.46-82.

-Reyhani, A., Rekabdar, F., Hemmati, M., Safekordi, A.A. & Ahmadi, M., (2013), "Optimization of conditions in ultrafiltration treatment of produced water by polymeric membrane using taguchi approach". Desalination and Water Treatment, 51 (40-42), pp.7499-7508.

www.SID.ir