

ارائه طرح اختلاط بهینه بتن خود تراکم سازگار با محیط زیست با استفاده از سنگدانه بازیافتی به روش تاگوچی

سیاوش سکینه پور^{۱*}، چیا پاک نهاد^۲

۱- کارشناسی مهندسی عمران ، دانشگاه پیام نور سندانج

siavashsakinehpour@yahoo.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سندانج

chiapaknahad@gmail.com

چکیده :

حفظ محیط زیست از مهمترین فاکتورهای توسعه پایدار به شمار می آید که به عوامل مختلفی وابسته است . بتن به عنوان یکی از پرمصرف ترین محصولات در سراسر جهان سهم به سزایی در آلودگی محیط زیست دارد که این امر نشأت گرفته از اجزای آن میباشد . بتن به صورت عمده از سه جزء آب ، سنگدانه و سیمان تشکیل میشود ، سیمان به عنوان یکی از اجزای اصلی تولید گاز های گلخانه ای بیشترین سهم را در آلودگی محیط زیست دارد و استفاده حداقل و بهینه با حفظ کیفیت از آن در بتن این مشکل را به شکل چشمگیری کاهش میدهد از طرف دیگر با توجه به تولید بیش از حد ضایعات بتنی و مطرح شدن موضوع مصالح و سنگدانه های بازیافتی و جایگزینی آن با سنگدانه های معمول فکر کرد .در این تحقیق به دلیل علاقه مندی محققان به بتن خود تراکم با استفاده از روش تاگوچی سعی در تولید بتن خود تراکم با عیار سیمان حداقل و استفاده از سیمان های آمیخته و همچنین سنگدانه های بازیافتی شد و در این راستا خواص بتن تازه با استفاده از آزمایشات اسلایپ، جعبه U، جعبه L، حلقه L و قیف V بررسی و همچنین مقاومت فشاری ، کششی مورد بررسی قرار گرفت.

واژه های کلیدی : محیط زیست ، توسعه پایدار ، سیمان ، سنگدانه بازیافتی ، بتن خود تراکم ، روش تاگوچی

مقدمه

با توجه به معضلات زیست محیطی فراوان مانند نازک شدن لایه‌ی اوزن، امروزه، نیاز به کاهش آلاینده‌های زیست محیطی در تولید و ارائه خدمات انواع صنایع مختلف، احساس میشود. توجهات جهانی نیز در سالهای اخیر با رشد چشمگیری رو به فزونی است؛ به نحوی که کنوانسیون‌های بین‌المللی زیادی تشکیل شده و منجر به تصویب و تدوین اعلامیه‌های جهانی در این مورد شده است. یکی از مهمترین این کنوانسیونها که در سال ۱۹۹۴ به تصویب و تأیید ۱۷۹ کشور جهان رسید، کنوانسیون ريو نام دارد. این کنوانسیون برای پایداری توسعه جوامع انسانی ایجاب مینماید که:

- حداقل دخالت در منابع طبیعی زمین به عمل آید؛

- مواد آلاینده کمتری وارد آب، هوا و خاک گردد؛

- انرژی منابع طبیعی بالاخص منابع تجدیدناپذیر، با حداکثر صرفه جویی ممکن استفاده شود.

با توجه به تأیید این کنوانسیون توسط ایران، رعایت معیارهای این اعلامیه جهانی در تمام مراحل بهره‌گیری، نگهداری، بهسازی و تخریب، الزامی به نظر میرسد [۱]. طبق آمار حدود ۳۰ الی ۴۰ درصد تولید گازهای گلخانه‌ای و ۴۰ تا ۵۰ درصد زباله‌ها و نخلات تولید شده در جهان به صورت مستقیم یا غیر مستقیم، به صنعت ساختمان مربوط میشود [۲]. آلاینده‌های زیست محیطی در صنعت عمران نیز که یکی از مهمترین صنایع را به خود اختصاص داده مورد توجه قرار گرفته؛ چرا که استفاده از انواع مصالح با حداقل شاخص آلاینده‌گی، الزامیست. در کشور ما با توجه به میزان تولید و مصرف سیمان (حدود ۴۵ میلیون تن در سال) و با فرض مصرف متوسط ۳۰۰ کیلوگرم سیمان در مترمکعب بتن، تولید بتن بالغ بر ۱۵۰ میلیون مترمکعب در سال و مصرف سرانه بالغ بر دو مترمکعب برآورد میشود که از متوسط مصرف سرانه در جهان زیادتر است [۳]. بنابراین، بررسی اثرات زیست محیطی این حجم بالای تولید، مفید به نظر میرسد. بدین منظور صادقی روش و خراسانی (۱۳۸۸)، آثار گرد و غبار ناشی از صنایع سیمان را بر تنوع و تراکم پوشش گیاهی، بررسی کردند. مطالعه موردی آنها که در کارخانه سیمان آبیک صورت گرفته بود نشان داد، بین تنوع و تراکم پوشش گیاهی با رسوب ذرات گرد و غبار خروجی از دودکش‌های کارخانه، یک همبستگی معکوس برقرار است. بدین صورت که هر قدر از منبع انتشار ذرات دورتر میشویم میزان رسوب ذرات کاهش و تنوع و تراکم پوشش گیاهی افزایش مییابد. همچنین در اطراف کارخانه که میزان رسوب ذرات بیشتر و تنوع گونه‌ها کمتر میشد، تعدادی از گونه‌های مقاوم مثل ورک و درمنه، جایگزین شده بودند [۴]. صبور و همکاران (۱۳۹۳)، نقش مصرف نانوسیلیس را در عملکرد زیست محیطی و اقتصادی بتن بررسی کردند. آن‌ها تأثیر این مواد را در بتن مثبت ارزیابی کرده؛ اما به دلیل ماهیت کمتر شناخته شده علم نانو مواد، قطعیت این بررسی را نپذیرفتند [۵].

در این مطالعه از چند طرح اختلاط با درصد پودر سنگ، مصالح بازیافتی و سربار کوره آهن‌گری بعنوان مواد جایگزین سیمان مصرفی و سنگدانه استفاده شده است. کارایی بتن تازه با آزمایش جریان اسلامپ، حلقه له قیف V، جعبه L مورد بررسی قرارگرفتند و همچنین مقاومت فشاری و کششی مورد بررسی قرار گرفت. از روش تاگوچی برای تخمین طرح اختلاط بهینه بتن استفاده شده است.

تأثیر مصالح موجود در بتن در تولید آلاینده‌های زیست محیطی

۱- مواد سیمانی

سیمان و انواع مواد سیمانی موجود در بتن همانند میکروسیلیس، از جمله مواد به کار رفته در بتن بوده که تأثیر بسیار زیادی در تولید انواع آلاینده‌گی‌های زیست محیطی از قبیل تولید گاز CO₂ (دی اکسید کربن) دارند. به طور کلی ۷ درصد کل دی اکسید کربن تولید شده در جو را صنعت سیمان به خود اختصاص میدهد. به ازای هر تن کلینکر سیمان، یک تن دی اکسید کربن و سه کیلوگرم اکسید نیتروژن، تولید میشود. از دیگر معایب تولید سیمان می‌توان به مصرف انرژی بالای این صنعت اشاره نمود. برای تولید هر تن سیمان به طور متوسط ۴ گیگاژول انرژی مورد نیاز است که در بخش‌های مختلف الکتریکی، گرم کردن و حمل و نقل، مصرف شده و معادل مصرف ۱۳۱ مترمکعب گاز طبیعی است [۶]. استخراج مواد خام نظیر سنگ آهک و سنگ رس

نیز برای تولید سیمان و همچنین زغال سنگ برای تأمین سوخت، موجب تشدید جنگل زدایی و از بین رفتن لایه رویی خاکها میشود [۳]. بنابراین استفاده کمتر از مواد سیمانی به منظور کاهش آلاینده ها، مفید به نظر میرسد. لازم به ذکر است، کاهش این مواد می تواند اثرات قابل توجهی در مقاومت بتن داشته باشد که نباید نادیده گرفته شود. میتوان گفت درصد بسیار بالایی مطالعات در ارتباط با آلاینده های زیست محیطی ناشی از تولید بتن، به سیمان بر میگردد. برای مثال؛ بوداق پور و جدیدی (۲۰۰۹)، بررسی هایی جهت کنترل و تخمین آلاینده های خروجی از صنعت تولید سیمان در شهر بزرگ تهران و اطراف آن، انجام دادند. آن ها پس از تخمین آلاینده ها در شهر و حومه آن توسط نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی، راهکارهایی برای کاهش آلاینده ها از جمله استفاده از فیلترهای خشک و چسبان را پیشنهاد دادند که به طور قابل ملاحظه ای ذرات ریز جامد خروجی از کارخانجات سیمان را کاهش میدهد [۷]. Priyanka و همکاران (۲۰۱۳) نیز، تأثیر آلودگی هوا ناشی از سیمان را در سلامتی مردمان شهر مایههار هند، بررسی کردند. آنها حداکثر ریزمواد باقیمانده از کارخانجات سیمان همانند دی اکسید سولفور و اکسید نیتروژن را در طول ماه های زمستان، تعادل آنها را در تابستان و حداقل این مواد را در فصول بارانی، مشاهده کردند [۸]. Ramesh و همکاران (۲۰۱۴) هم اثر گرد و غبار خروجی از صنعت سیمان را بر روی گیاهان سبز، بررسی کرده و به تأثیر بسیار بالای این مواد در نابودی گیاهان، پی بردند [۹]. در یکی دیگر از جدیدترین بررسی ها Scrivener (۲۰۱۴)، برای کاهش آلاینده های ناشی از سیمان تلاش هایی در جهت تغییر ترکیبات سیمان، انجام داد. نتایج آزمایشات او نشان داد، جایگزین نمودن مقداری از کلینکر سیمان با انواع سولفیدهای فلزی میتواند به کاهش گاز CO₂ تولید شده از سیمان، کمک کند [۱۰].

۲- مصالح سنگی

با توجه به اینکه حدود ۸۰ درصد حجم بتن را سنگدانه ها تشکیل میدهند، میزان مصرف این مواد با احتساب مصرف سالانه ۶۵ میلیون مترمکعب بتن با چگالی ۲،۶۵، به ۱۳۷۸۰۰۰۰۰ تن خواهد رسید [۱]. در عملیات استخراج، تولید و حمل این مقدار عظیم مصالح، انرژی قابل ملاحظه ای صرف می گردد و به نوبه خود بر اکولوژی مناطق جنگلی و بستر رودخانه ها اثر میگذارد [۳]. استفاده از محصولات جانبی سایر صنایع مانند سرباره کوره آهن گدازی، ماسه های حاصل از لایروبی حوضچه ای و یا استفاده دوباره از مصالح بازیافتی علاوه بر صرفه جویی اقتصادی، باعث کاهش اثرات زیست محیطی نیز میشود [۱۱].

۳- افزودنی های روان کننده

استفاده از انواع مواد افزودنی شامل روان کننده ها و فوق روان کننده ها، به دلیل کاهش نسبت آب به سیمان، باعث افزایش مقاومت و پایداری بتن میگردد. این مواد که به صورت آلی تولید میشوند، تنها در ابتدای اختلاط باعث تولید گازهای فرار شده و پس از مدتی اثرات آن ها از بین میرود؛ لذا اثرات تخریبی زیست محیطی قابل توجهی از آنها گزارش نشده است [۱].

مصالح مورد استفاده

در تمام طرح ها از سیمان پرتلند تیپ I ۴۲۵ کرمانشاه استفاده شده است که مشخصات آن طبق اطلاعات دریافتی از آن کارخانه در جدول ۱ داده شده است. پودر سنگ - آهک مصرفی کارخانه سندانج بوده و سربار کوره آهنگری مصرفی از کارخانه فتلاد سپاهان اصفهان تهیه گردید. فوق روان کننده مصرفی جهت تنظیم کارایی و ایجاد همگنی مناسب مخلوط، از نسل سوم فوق روان کننده ها با نام تجاری Glenium110P بود که از شرکت BASF تهیه گردیده است.

جدول ۱: مشخصات سیمان

ترکیبات شیمیایی (%)									مشخصات فیزیکی	
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	چگالی نسبی (gr/cm ³)	سطح ویژه (cm ² /gr)
۲۱/۴۰	۴/۹۰	۳/۸۰	۶۳/۷۰	۱/۵۵	۵۱/۶۰	۲۲/۵۰	۶/۵۰	۱۱/۶۰	۳/۱۰	۲۹۵۰

برای تهیه خرده بتن جهت انجام آزمایش ها، از خرده بتن با کیفیت اولیه معلوم مربوط به تیرهای تحت بارگذاری قرار گرفته با مقاومت میانگین ۳۰۰ kg/cm² استفاده شد. بتن خرد شده بوسیله سنگ شکن به دانه های کوچکتر از ۲۵ میلیمتر تبدیل گردید.



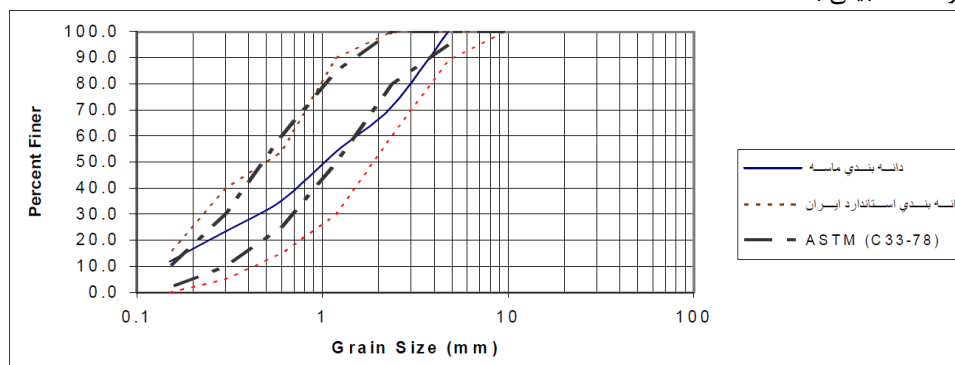
شکل ۱: خرده بتن بازیافتی

بر روی خرده بتن ها آزمایش های دانه بندی، جذب آب، چگالی و وزن مخصوص طبق استانداردهای ASTM C127, C128, C33-84, انجام گرفت. که نتایج آن در جدول ۲ آمده است. اسلامپ تمام طرح اختلاط ها در محدوده ۸۰-۱۰۰ mm ثابت نگه داشته شد.

جدول ۲: ویژگی های فیزیکی سنگدانه مصرفی

سنگدانه طبیعی	خرده بتن	خصوصیات سنگدانه ها
۲/۸۵	۲/۳۰	وزن مخصوص ظاهری شن در حالت SSD (gr/cm^3)
۲/۴۵	۱/۹۵	وزن مخصوص ظاهری ماسه در حالت SSD (gr/cm^3)
۰/۶۰ %	۶/۸۰ %	جذب آب درشت دانه
۴/۱۵ %	۱۴/۰۵ %	جذب آب ریزدانه
۱۲۰۰	۴۰۰	مقاومت سنگدانه (Kg/cm^2)
۱۶۵۰	۱۳۱۴	وزن مخصوص توده ای (Kg/m^3)

همانطور که انتظار می رود دانه های خرده بتن در حین اختلاط تا حدی به دانه های ریزتر از خود تبدیل می شود که این امر باعث افزایش درصد ریزدانه بتن و افت اسلامپ آن می گردد. به همین خاطر مقدار جزئی آب و یا فوق روان کننده به مخلوط های بتن با ۱۰۰٪ مصالح بازیافتی اضافه شد که میزان آن در جدول ۴ ارائه شده است. برای یکسان بودن عملکرد و مقایسه بهتر، در ساخت بتن بازیافتی به ساخت نمونه های شاهد با همان مصالح طبیعی که بتن بازیافت شده از آن ساخته شده بود مبادرت گردید. با توجه به اینکه حداکثر اندازه سنگدانه در بتن بازیافت شده اولیه رد شده از الک ۱۲/۵ میلیمتر بود، شن طبیعی و نیز درشت دانه بازیافتی از الک ۱۲/۵ میلیمتر عبور داده شد و فقط از الک های زیر ۱۲/۵ میلیمتر برای طرح بتن مبنا و بازیافتی استفاده گردید. همچنین ماسه از الک نمره ۴ عبور داده شده بود پس در بتن از ماسه عبور کرده از الک نمره ۴ استفاده شد. اما برای ریزدانه دریافتی دانه بندی شده، دانه بندی مطابق ماسه طبیعی استفاده گردید، به طوری که نمودار شن و ماسه بازیافتی منطبق بر نمودار شن و ماسه طبیعی باشد.



شکل ۲: نمودار دانه بندی ماسه براساس استاندارد ایران و ASTM C33-78

طراحی آزمایش به روش تاگوچی

یکی از اهداف طراحی آزمایش این است که با تغییراتی آگاهانه در متغیرهای ورودی فرآیند، بتوان تغییرات خروجی را مشاهده و شناسایی کرد. روش های مختلفی برای طراحی آزمایش وجود دارد؛ یکی از اولین روش هایی که در این زمینه ارائه شد روش فاکتوریل بود. که تعداد آزمایش ها را به وسیله رابطه $N=L^m$ بدست می آوردند. اشکال عمده این روش این بود که در صورت وجود متغیر های زیاد تعداد آزمایش ها خیلی زیاد میشود و این مسئله از نظر زمان و هزینه به صرفه نیست. بنابر این به فکر پیدا کردن راه هایی افتادند که تعداد آزمایش ها را کم کنند. یکی از این اصلاحات ایجاد شده روش تاگوچی بود که در این روش سه عامل زیر مورد توجه است، و به طور کلی در این روش مبنا بر این است که بهترین راه بهبود کیفیت این است که آن را طراحی کنیم و در محصول ایجاد کنیم.

- کیفیت مورد نظر را هنگام تولید محصول طراحی کرده و در آن ایجاد کنیم
- تاثیر عواملی را که نمیتوانیم کنترل کنیم را کم کرده و در صورت ممکن تاثیر آنها را از بین ببریم
- میزان ضرر و زیان به انحراف از حالت استاندارد (کیفیتی که برای ما مطلوب است) بستگی دارد.

این روش را میتوان در ۴ گام کلی خلاصه کرد :

۱. معرفی عوامل موثر در واکنش
۲. تعداد آزمایشات مورد نیاز
۳. تحلیل جواب ها
۴. ارزیابی شرایط بهینه

در مرحله اول عوامل موثر را مشخص کرده و برای هر کدام چند حالت را در نظر میگیریم، با توجه به تعداد پارامتر های موثر و تعداد سطوح هر کدام از آنها (مقادیر مختلفی که در طول آزمایش برای هر کدام در نظر میگیریم) تعداد آزمایش ها توسط روابط و احتمالات ریاضی مشخص میشود . پس از معین کردن تعداد آزمایش ها یک ماتریس تشکیل میدهم که سطر های این ماتریس مشخص کننده شرایط آزمایش میباشد. برای ایجاد این ماتریس ها راه های پیچیده ای وجود دارد ولی میتوان از تحقیق ها و یا سایر منابع نیز آنها را به صورت آماده پیدا کرده و از آن استفاده کرد.

در این روش ما انتظار داریم که از تحلیل جواب ها نتایج زیر را بدست آوریم

- شرایط بهینه ای که در آن کیفیت مطلوب بدست می آید
- میزانی که هر فاکتور روی عملکرد و کیفیت تاثیر گذار است و کدام فاکتور بیشترین تاثیر را دارد
- آیا در شرایط بهینه ای که پیدا کردیم پاسخ همان است که بدست آمد؟

آزمایشهای کارایی بتن

برای اندازه گیری کارایی بتن خودتراکم در حالت بتن تازه چند آزمایش توسط آیین نامه های مختلف بیان شده است که به امکانات آزمایشگاهی موجود، آزمایشهای زیر انجام شد:

۱- **آزمایش حلقه - J :** که از یک حلقه تشکیل شده است و زیر آن توسط میلگردهایی محاط شده است و بتن تازه در داخل یک مخروط ناقص در درون حلقه ریخته میشود و پس از برداشتن این مخروط بتن جریان یافته و با عبور از میلگردها ساکن میشود و پس از سکون دو قطر و همچنین ارتفاع بتن در داخل حلقه و خارج از آن برداشت میشود و نسبت ارتفاع خارج به ارتفاع داخل اندازه گیری شده و به عنوان یکی از پارامترهای آزمایش آورده میشود

۲- **آزمایش جریان اسلامپ :** همانند تست اسلامپ بتن معمولی، بتن در یک مخروط ناقص ریخته میشود و پس از برداشتن مخروط ناقص بتن جریان مییابد و بطور کامل در سینی اسلامپ پخش میشود، برخلاف بتن معمولی که شکل خود را تقریباً حفظ میکند، در این حالت دو قطر بتن پخش شده و زمان رسیدن بتن به قطر ۱۰ سانتیمتر اندازه گیری و بعنوان پارامترهای این آزمایش بدست میآید

۳- آزمایش V: در این آزمایش بتن تازه در یک قیف خاص ریخته میشود که کف آن بسته است و پس از پر شدن قیف و گذشت ۵۰ ثانیه دریاچه کف قیف باز میشود و مدت زمانی که طول میکشد تا بتن از قیف خارج شود اندازه گیری و بعنوان پارامتر این آزمایش معرفی میشود

۴- آزمایش L: در این آزمایش قسمت بالایی جعبه که پایین آن توسط دریاچه‌های بسته شده است با بتن پر میشود و پس از گذشت زمان یک دقیقه دریاچه پایینی باز شده و در حالی که جلو دریاچه چند میلگرد قرار گرفته است بتن جریان پیدا میکند و در قسمت افقی جعبه حرکت میکند تا ساکن شود و برای این آزمایش زمان برای رسیدن بتن به فاصله ۱۰ و ۴۰ سانتیمتری دریاچه در قسمت افقی و همچنین نسبت ارتفاع بتن در ابتدای جعبه به ارتفاع بتن در انتهای جعبه پس از ساکن شدن یادداشت میشود.

ساخت و نگهداری نمونه ها

تمامی گامهای اجرای تحقیق حاضر مانند ساخت نمونه ها، کلیه طرح اختلاط ها، قالبها و شرایط آزمایشگاهی با استاندارد ملی ایران به شماره ۳۹۳ مطابقت دارد. در این تحقیق از ۴ طرح اختلاط استفاده شده که نمونه های یکی از طرح اختلاطها به عنوان نمونه شاهد و در سه طرح اختلاط دیگر از پس از آماده شدن ملات بتن نمونه های استوانه ای (برای آزمایش مقاومت کششی و نمونه های تیر خمشی) برای آزمایش مقاومت) به تعداد سه عدد برای هر طرح اختلاط ریخته شدند. نمونه ها در محیط آزمایشگاه به مدت ۲۴ ساعت نگهداری و سپس نمونه ها از قالب خارج شدند. نمونه ها تا سن ۲۸ روزه در آب در شرایط استاندارد نگهداری شدند.

نتایج آزمایشها

۱- بتن تازه

برای بررسی ویژگی های رئولوژیکی نمونه های بتن آزمایش های جریان اسلامپ، L-Box (جعبه L شکل)، V-Funnel (قیف V شکل) و J-Ring (حلقه J) و ... صورت پذیرفت. نتایج حاصل از آزمایش های رئولوژیکی صورت گرفته در جدول ۱ آمده است.

جدول ۳: مشخصات رئولوژیکی بتن

آزمایشات		بتن با پودر سنگ	بتن با پوزولان خاش	بتن با سنگدانه بازیافتی	بتن با سنگدانه بازیافتی و پوزولان خاش	
اسم	C-N	C-P	C-R-1	C-R-2	C-P-R-1	C-P-R-2
درصد جایگزینی سنگدانه با خرده بتن	۰	۰	۵۰	۱۰۰	۵۰	۱۰۰
جریان اسلامپ (mm)	۶۱	۷۰	۸۶	۹۸	۷۲	۹۶
حلقه J (میلیمتر)	۵	۴	۸	۹	۷	۸
قیف V شکل (ثانیه)	۷	۳.۵	۶	۵	۵	۴.۲
جعبه L شکل (ثانیه)	۱	۰.۹	۱.۳	۰.۸۵	۱.۱	۱.۳
جعبه U شکل	۰.۵	۰.۶	۰.۷	۰.۷	۰.۷	۰.۷



تصویر ۱: آزمایش اسلامپ فلو



تصویر ۲: آزمایش L-BOX

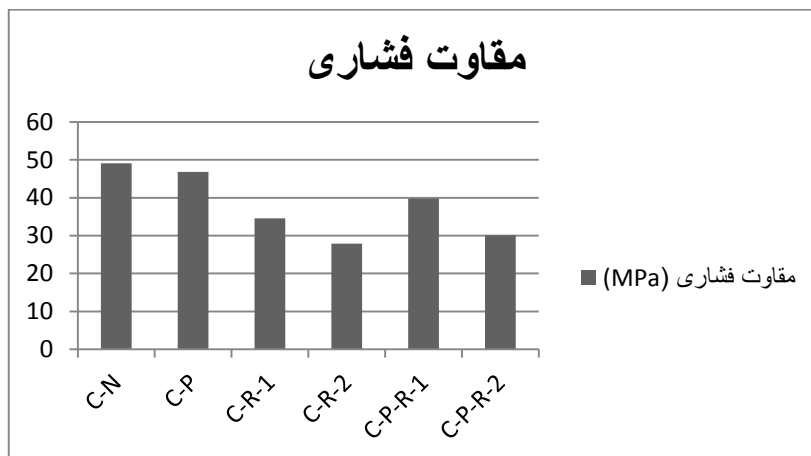
۲- نتایج بتن سخت شده

۲-۱- مقاومت فشاری

در این تحقیق، مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای پس از ساخت و عمل آوری در سن ۲۸ روز در آب، مطابق استاندارد ASTM-C39 اندازه گیری شد. برای هر یک از طرح های اختلاط سه نمونه ساخته شده و میانگین مقاومت فشاری این سه نمونه در ارائه نتایج استفاده شد. نتایج حاصل از مقاومت فشاری در جدول ۴ و شکل ۳ ارائه شده است. با توجه به شکل ۳ اختلاف مقاومت فشاری طرح های اختلاط مختلف نمایان است.

جدول ۴: نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نمونه	C-N	C-P	C-R-1	C-R-2	C-P-R-1	C-P-R-2
مقاومت فشاری (MPa)	۴۹.۱	۴۶.۸	۳۴.۶	۲۷.۹	۳۹.۸	۳۰.۱



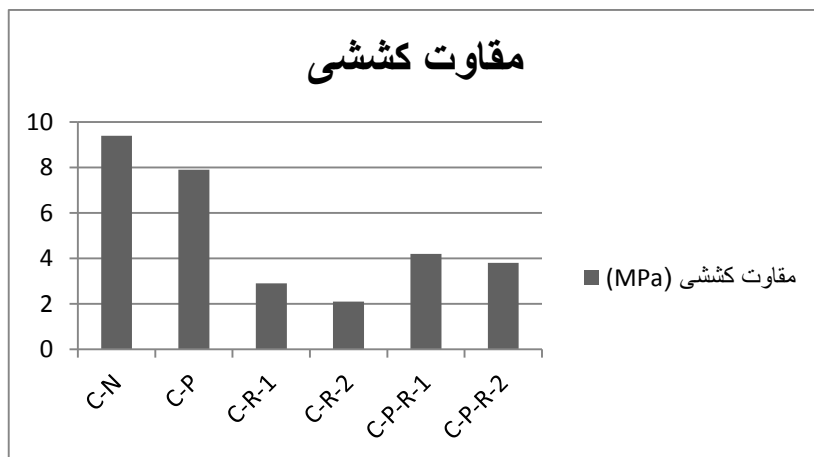
شکل ۳: نتایج آزمایش مقاومت فشاری نسبت به زمان

۲-۲- مقاومت کششی

مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای پس از ساخت و عمل آوری در سن ۲۸ روز در آب، مطابق استاندارد ASTM-C496 اندازه گیری شد. برای هر یک از طرح های اختلاط دو نمونه ساخته شده و میانگین مقاومت کششی این دو نمونه در ارائه نتایج استفاده شد. نتایج حاصل از مقاومت کششی در جدول ۵ و شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به شکل ۴ اختلاف مقاومت فشاری طرح های اختلاط مختلف نمایان است. این نتایج بیانگر رفتاری مشابه با نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری است.

جدول ۵: نتایج آزمایش مقاومت کششی

نمونه	C-N	C-P	C-R-1	C-R-2	C-P-R-1	C-P-R-2
مقاومت کششی (MPa)	۹.۴	۷.۹	۲.۹	۲.۱	۳.۷	۳.۰



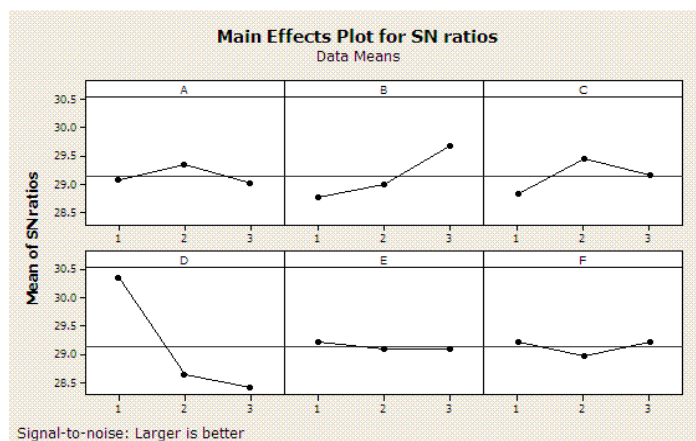
شکل ۴: نتایج آزمایش مقاومت کششی نسبت به زمان

تحلیل نتایج

مقاومت فشاری و کششی بتن بازیافتی با جایگزینی ماسه طبیعی به جای ریزدانه بازیافتی در محدوده (۰-۲mm) کمتر از مقاومت های مشابه بتن مینا بوده و با اضافه کردن مواد پوزولان به همان طرح اختلاط در حدود ۱۵ درصد مقاومت فشاری و ۲۵ درصد مقاومت کششی نمونه ها افزایش می یابد.

دو دلیل برای کاهش مقاومت بتن بازیافتی نسبت به بتن مینا وجود دارد. اولاً در حین اختلاط قسمت های ضعیف بتن خرد شده، که معمولاً ملات سیمان سخت شده بر روی آنها می باشد به قطعات ریزتر خرد می شوند. این مساله باعث افزایش ریزدانه در مخلوط بتن می شود که خود باعث افت مقاومت بتن می گردد. دوماً به دلیل اینکه بتن خرد شده، به دلیل وجود ملات سیمان سخت شده بر روی آنها، ضعیف تر از سنگ شکسته می باشد، مقاومت بافت کریستالی بین دو قطعه ملات سخت شده و یا یک قطعه ملات سخت شده و سنگ شکسته کمتر از مقاومت بافت کریستالی بین دو قطعه سنگ شکسته می باشد که خود باعث کاهش مقاومت بتن بازیافتی می شود.

با وارد کردن نتایج به دست آمده در قسمت قبل به نرم افزار و پس از آنالیز، برای رسیدن به نسبت S/N بیشتر برای هر فاکتور میتوان خروجی آن را بررسی کرد. مزیت دیگر نتایج نرم افزار بیان کردن میزان اهمیت و تاثیر فاکتورها روی نتایج نهایی است، برای مثال در این تحقیق میتوان نتیجه گرفت که نتیجه نهایی به فاکتورهای "پودر سنگ" و "فوق روان کننده" زیاد بستگی ندارد و در طرف مقابل به میزان سیمان شدیداً بستگی دارد و با مقادیر مختلف این فاکتور نتیجه آزمایش شدیداً تغییر میکند.



شکل ۵: نتایج آنالیز توسط نرم افزار MINITAB

نتیجه گیری

- (۱) بتن خرد شده چگالی کمتر و تخلخل بیشتر و در نتیجه جذب آب بیشتری نسبت به سنگ شکسته دارد. درشت دانه خرد شده بتن ۱۱ برابر سنگ شکسته و ریزدانه خرد شده بتن ۳/۵ برابر ماسه طبیعی جذب آب دارد و وزن مخصوص توده‌ای خرد شده بتن حدوداً ۲۰ درصد سبکتر از سنگ شکسته می‌باشد.
- (۲) جایگزین کردن خرد شده بتن به جای قسمتی از سنگدانه و یا تمامی آن، باعث کاهش وزن مخصوص بتن می‌شود. مقدار این کاهش برای بتن بازیافتی با خرد شده بتن و بتن بازیافتی یا جایگزینی ماسه طبیعی به جای ریزدانه بازیافتی در محدوده (۰-۲mm) به ترتیب ۱۳ و ۸ درصد نسبت به بتن مینا می‌باشد. میانگین وزن مخصوص بتن بازیافتی 2140 Kg/m^3 می‌باشد.
- (۳) در سن ۲۸ روزه مقاومت میانگین نمونه‌های بتن بازیافتی ساخته شده از خرد شده بتن و بتن بازیافتی با جایگزین کردن ماسه طبیعی به جای ریزدانه بازیافتی در محدوده (۰-۲mm) به ترتیب ۰/۸۶ و ۰/۹۰ برابر مقاومت فشاری مینا، همچنین ۰/۷۱ و ۰/۸۰ برابر مقاومت کششی بتن مینا می‌باشد.
- (۴) نمودار تنش - کرنش در بتن های بازیافتی خیلی شبیه بتن بازیافتی با جایگزینی ماسه طبیعی به جای ریزدانه بازیافتی در محدوده (۰-۲mm) است. شیب مماس بر منحنی تنش - کرنش در فشار تک محوری (به مقدار ۲۵٪ تنش نهایی) برای بتن بازیافتی کمتر از بتن نرمال می‌باشد که نشان دهنده پائین بودن مدول الاستیسیته بتن بازیافتی نسبت به بتن نرمال است.
- (۵) مدول الاستیسیته بتن بازیافتی با جایگزینی ماسه طبیعی به جای ریزدانه بازیافتی، در حدود ۶۰ درصد بتن مینا می‌باشد.
- (۶) براساس نتایج بدست آمده، بتن بازیافتی در مقایسه با بتن معمولی جمع شدگی بیشتری از خود نشان می‌دهد. ولی با جایگزین کردن ماسه طبیعی به جای ریزدانه بازیافتی این روند افزایش جمع شدگی کمتر مشاهده می‌شود.
- (۷) در این تحقیق با استفاده از ماسه طبیعی به جای ریزدانه بازیافتی تاثیر چندان در مقاومت‌های فشاری و کششی بتن بازیافتی مشاهده نگردید.
- (۸) با اضافه نمودن مواد پوزولان به نمونه های بازیافتی مقاومت فشاری و کششی آن به ترتیب ۱۵ و ۲۵ درصد بهبود می یابد.

مراجع

- [۱] دلنواز، م.؛ میرزا حسینی، م.ر. و. جان نثاری، ح (1385)، "بررسی اثرات زیست محیطی صنعت بتن در ایران"، سیزدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- [۲] قالیبافیان، م (1382)، "بتن و محیط زیست"، فصلنامه انجمن بتن ایران، سال سوم، شماره ۱۱
- [۳] شکرچی زاده، م. و. میرزایی، م (1387)، "آینده آموزش مهندسی بتن و سیمان با نگرش به محیط زیست"، کنفرانس آموزش مهندسی در ۱۴۰۴، دانشکده فنی دانشگاه تهران.
- [۴] صادقی روش، م. ح. و. خراسانی، ن (1388)، "بررسی آثار گرد و غبار ناشی از صنایع سیمان بر تنوع و تراکم پوشش گیاهی"، نشریه علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره دهم، شماره یک.
- [۵] صبور، م. ر.؛ یکه لر، م. و. نیکروان، م (1393)، "بررسی نقش مصرف نانوسیلیس در بتن بر عملکرد زیست محیطی و اقتصادی آن"، نشریه مهندسی عمران فردوسی، سال بیست و پنجم، شماره دو.
- [۶] حاجی غفاری، حسین "بتن بازیافتی - بررسی خواص بتن ساخته شده با خرد شده بتن به عنوان درشت دانه" مجموعه مقالات کنفرانس بین‌المللی بتن، دفتر تحقیقات و معیارهای فنی دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۹۰، صفحه ۱۴۰ - ۱۴۹.
- [7] Malhotra, V.M, Neville, A. "symposium on concrete technology in the use of demolition waste in concrete." By wain Wright, PJ 26, 1995, pp. 179-197.
- [8] Frondistion, K. Yannas, S. "Economics of concrete Recycling in the united states." Advanced Research institute problems in the Recycling concrete, France, Nov. 25-28, 1980, pp. 163-186.
- [9] Hansen, T.C, (Editor), "Recycling of Demolished concrete and Masonry" RILEM (The international union of testing and research laboratories for materials and structures), Reports, 1992.
- [10] Vazqnez, E. Bara, M. "Waste Management." Volume 16, Issues 1-3, 1996, pp. 113-117.

- [11] Katz, A. "properties of concrete made recycled aggregate from partially hydrated old concrete." *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, 2003, pp. 703-711.
- [12] Ajdukiewicz, A., Kliszczewicz, A. "influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC" *Cement and Concrete composites*, Vol. 24, 2002, pp. 269-279.
- [13] Sanchez F, Sobolev K. (2010). "*Nanotechnology in concrete – A review*". *Construction and Building Materials*, 24. pp 2060 –2071.
- [14] Ye, Q., (2001), "*Study and development of nanocomposite cement-based material*". *Gypsum and Cement for Building*, 11. pp 4–6.
- [15] Kong, Deyu, et al. (2012) "*Influence of nano-silica agglomeration on microstructure and properties of the hardened cement-based materials*." *Construction and Building Materials*, 3. PP 707-715.
- [۱۶] تکنولوژی و طرح اختلاط بتن، نوشته : داوود مستوفی نژاد، انتشارات : ارکان دانش، چاپ بیست و نهم ۱۳۹۱
- [۱۷] آشنایی با روش طراحی آزمایشات تاگوچی، نوشته : رانجیت.ر.روی ، ترجمه : داود مرادخانی ، انتشارات : دانشگاه زنجان ، چاپ اول ۱۳۸۶
- [۱۸] آزمایش های سیمان و بتن، نوشته : علی اکبر رمضانپور، نگین اعرابی، انتشارات : نگارنده دانش، چاپ اول ۱۳۹۲
- [۱۹] تحلیل آماری با Minitab 16، نوشته : ابراهیم بایزیدی، انتشارات: عابد، چاپ اول ۱۳۹۱
- [۲۰] راهنمای کاربردی بتن سبکدانه سازه ای، نوشته: محمد شکرچی زاده، انتشارات: علم و ادب ، چاپ اول ۱۳۹۰
- [۲۱] بهینه کردن طرح اختلاط بتن با استفاده از روش تاگوچی، محمد اسماعیل نیا عمران، محسن نوریان بهمند، ششمین کنگره مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ۱۳۹۰
- [22] Deborah J. Hochstein, Azmi Bin Ahmad, Robert E. Magowan.; *Teaching the Taguchi Method of Experimental Design: Design and Testing of Concrete Mixes*, Memphis conference 2012 , Season 3266
- [23] Ross, Phillip J.; *Taguchi Techniques for Quality Engineering: Loss Function Orthogonal Experiment, Parameter and Tolerance Design*; McGraw Hill; New York City, New York; 1988
- [24] Roy, Ranjit; *A Primer on the Taguchi Method*; Van Nostrand Reinhold; New York City, New York; 1990.