

بررسی آزمایشگاهی تاثیر افزودن دوده سیمان (Kiln) در بهبود خواص مکانیکی ملات های ترمیمی حاوی میکروسیلیس و الیاف



محمد کاظم شریب‌تدار
استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
عضو انجمن بتن ایران



حمیدرضا صادقی حقیقی
کارشناس ارشد سازه
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

چکیده

مهم‌ترین مسئله در بحث تعمیر و ترمیم، سازگاری مصالح تقویت کننده یا ماده ترمیم به بستر سخت موجود است. احیاء عملکرد سازه به همان شکل گذشته از هدف‌های مهم ترمیم می‌باشد، لذا برای رسیدن به عملکرد مطلوب سازه و اثرپذیری ماده ترمیم، آزمون مشخص و استاندارد باید انجام شود که نیاز به بررسی بیشتری در این زمینه دارد. همچنین توسعه روز افزون ملات‌های ترمیمی جدید با کمک بتن‌های نوین و مکمل‌های بتنی و استفاده از مواد سیمانی بازیافتی مانند دوده سیمان نیاز به توجه بیشتری از نظر توسعه پایدار و اقتصادی و فنی است. هدف این پژوهش، بررسی تاثیر اضافه کردن دوده سیمان (kiln)، بعنوان ضایعات صنعتی کارخانجات سیمان به ملات ترمیمی به‌مراه افزودن دوده سیلیس و الیاف بوده است. در این پژوهش، دوده سیمان از سه قسمت مختلف مراحل تولید و پخت سیمان شامل قسمت پیش از پخت (K1)، قسمت پخت کلینکر (K2) و قسمت انتهای تولید سیمان مخلوط شده با گچ (K3) تهیه شده است. ملات‌های ترمیمی از ترکیب دوده‌های مختلف سیمان با دوده سیلیس و ماکرو سینتتیک (PPS) ساخته شدند. دوده سیمان در سه مرحله با ۱۲، ۲۴ و ۳۶ درصد وزنی سیمان، دوده سیلیس با ۳/۵ و ۷/۵ درصد وزنی سیمان و الیاف با ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد حجمی بودند. نمونه‌های فشاری مکعبی به ابعاد ۱۰۰ میلیمتر و نمونه کششی استوانه ای به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلیمتر ساخته شدند و در ۲۸، ۷ و ۹۰ روز آزمایش شدند. نمونه‌ها برای ۱۰ طرح مخلوط در مرحله یک با بتن بدون الیاف و ۲۲ طرح مخلوط با بتن الیافی در مرحله ۲ با مقاومت‌های فشاری و کششی مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌های به دست آمده نشان داد که دوده سیمان (K1) تاثیر منفی بر مقاومت‌های فشاری و کششی گذاشت و منجر به کاهش قابل توجهی در این مقادیر شد، اما دوده سیمان (K2) تاثیر مثبت داشت و منجر به افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری و کششی گردید. میزان افزایش مقاومت فشاری ۷ روزه برای درصدهای ۱۲، ۲۴ و ۳۶ درصد دوده سیمان (K2) برابر به ترتیب ۱۶، ۲۲ و ۳۴ بودند و برای ۲۸ روزه افزایش ۹، ۱۲ و ۱۵ درصد و برای ۹۰ روزه افزایش ۶، ۸ و ۱۰ درصد بودند. میزان افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم ۷ روزه برابر به ترتیب ۲، ۱۱ و ۱۵ درصد و برای مقاومت ۲۸ روزه افزایش ۳، ۱۲ و ۱۶ درصد بودند. ضمناً استفاده از دوده سیمان (K3) منجر به کاهش مقاومت فشاری و کششی شد و مقادیر کمتری نسبت به دوده (K1) داشتند. در مرحله دوم آزمایش‌ها، استفاده از دوده سیلیس و الیاف علاوه بر دوده‌های سیمانی منجر به افزایش مقاومت‌های فشاری و کششی شدند.

کلمات کلیدی: دوده سیمان، الیاف PP، دوده سیلیس، مقاومت فشاری، مقاومت کششی

تقاضا برای استفاده از بتن و سیمان به عنوان مصالح ساختمانی با دوام رو به افزایش است و افزایش تولید سیمان منجر به افزایش گرد و غبارهای تولید سیمان (جمع شده در فیلترهای کارخانجات سیمان) می‌گردد. این گرد و غبارها حاصل سه بخش مختلف تولید سیمان هستند که بخش اول در آسیاب مواد خام هستند که چسبندگی خاصی ندارد و در بخش دوم دوده کوره سیمان (KILN) که یک ماده پودری مشابه سیمان می باشد وجود دارد که به مقدار قابل توجهی از سیستم های فیلتراسیون کارخانه ها بدست می آید و در بخش آخر نیز دوده حاصل از آسیاب گچ با کلینکر می باشد که از لحاظ شیمیایی خاصیت مشابه سیمان می باشد. دوده سیمان ماده ترکیبی نا همگن هم از نظر شیمیایی و هم از نظر اندازه ذرات می باشد که ترکیب شیمیایی آن بستگی زیادی به مواد اولیه، سوخت، نوع کوره، نوع سیمان و غیره دارد. علاوه بر این دغدغه دفع این ماده در طبیعت همواره به عنوان یک مشکل زیست محیطی مطرح بوده است. pH گرد و غبار مرطوب ۱۲ تا ۱۴ است و بسیار قلیایی است [۱-۲]. صدیق و همکاران (۲۰۱۴) گفتند که دوده سیمان کمی در آب محلول می شود [۳]. پس از افزودن آب، ممکن است گرما و بخار تولید کند. CKD با خواص فیزیکی زیر مشخص می شود: دانه بندی ۰.۰۳ میلی متر، حداکثر اندازه ذرات ۰.۳۰ میلی متر، سطح ویژه ۴۶۰۰ تا ۱۴۰۰۰ سانتی متر مربع بر گرم، وزن مخصوص ۲.۶ تا ۲.۸ گرم بر سانتی متر مکعب، حجم ظاهری ۵۰۰ تا ۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب [۴]. بر وفق مصلح الدین و همکاران ۲۰۰۸ وزن مخصوص برابر با ۲.۴ گرم بر سانتی متر مکعب

است [۲]، در حالی که مارکو و همکاران (۲۰۱۲) و پیتهمپاران و همکاران (۲۰۰۸) گزارش دادند که به ترتیب برابر با ۲.۹۶ گرم بر سانتی متر مکعب و ۲.۴۲ گرم بر سانتی متر مکعب است [۱، ۵]. مارکو و همکاران (۲۰۱۲) بیان می کند که وزن حجمی دوده سیمان به ۷۴۲ کیلوگرم بر متر مکعب می رسد [۵]. طبق تحقیقات دیگری که در سالم و همکاران (۲۰۱۵) ارائه شده است، به دلیل قلیائیت بالا (PH حدود ۱۲)، دوده سیمان پتانسیل بالایی برای استفاده برای حذف فلزات سنگین مانند روی، منگنز، آهن، نیکل یا سرب از آب آلوده دارد [۶]. دوده سیمان همچنین ماده ای است که می تواند در پایداری خاکها مورد استفاده قرار گیرد، که می تواند برای جاهای دفن زباله، جاده ها و ساختمان ها مهم باشد. این عمدتاً به دلیل شباهت آن به سیمان، آهک یا خاکستر بادی ایجاد می شود. کاربرد دوده سیمان همراه با خاکستر بادی در تحقیقات آداسکا و تابت (۲۰۰۸) تایید شده است [۷]. برای پایداری جاده ها و به ویژه خاک های رسی با موفقیت استفاده شد یونپات و همکاران (۲۰۱۷) [۸]. همچنین ثابت شده است که استفاده از دوده سیمان همانند آهک شکفته، برای پایداری خاک و مقاومت در برابر سرمای زیاد مناسب است. بر طبق میلر و آزاد (۲۰۰۰) استفاده از دوده سیمان برای رفتار خاک مفید است [۹]. انجام تحقیقات در مورد تأثیر این افزودن بر خصوصیات بتن کاملاً موجه است، به ویژه با توجه به اینکه ترکیب شیمیایی دوده سیمان به یک کارخانه سیمان مشخص بستگی دارد. با توجه به نتایج تحقیقات ارائه شده در ادبیات، مقدار دوده سیمان وارد شده به بتن با جایگزینی بخشی از سیمان پرتلند، خواص مکانیکی و دوام بتن را بدتر می کند. تعیین مقدار مرزی که با آن مقدار افزودنی تأثیر قابل توجهی بر

بهبود مقاومت به طور میانگین ۳۱٪ در مقاومت فشاری و ۱۷٪ در مقاومت کششی شده [۱۳].

۲. معرفی مصالح

برای ساخت طرح مخلوط‌های ملات ترمیمی از سیمان پرتلند نوع ۲ شاهرود استفاده شده که در آنالیز شیمیایی آن در جدول ۱ آورده شده است. در ساخت ملات تعمیراتی در این تحقیق از شن معدن شن سازان استفاده شده است که بزرگترین دانه‌بندی آن ۹/۵ میلی‌متر بود که مشخصات دانه بندی آن در جدول ۲ ارائه گردید است و در ساخت ملات تعمیراتی از ماسه سیلیسی با ابعاد ۰.۳۳۵ تا ۵ میلی‌متر استفاده شده که برای دستیابی به دانه بندی مناسب جهت استفاده در ملات ترمیمی با آزمایش این درصدها مطابق جدول ۳ حاصل شده است. درصد استفاده شده به همراه دانه‌بندی آن در جدول ۴ گردید.

کیفیت بتن ندارد، یک جنبه ضروری که در مطالعات انجام شده است. در نشریات متعدد بیان شده است که جایگزینی وزن کل سیمان با ۵٪ دوده سیمان خواص آن را بدتر نمی‌کند [۲، ۱۰]. بر اساس مطالعاتی که انجام شده است که فعالیت پوزولانی دوده سیمان کمتر از سیمان می‌باشد [۱۱]. دوده سیلیس به دلیل نرمی بسیار زیاد و محتوای سیلیس بالا، یک ماده پوزولانی بسیار موثر است. مشخصات استاندارد برای دوده سیلیس مورد استفاده در مخلوط‌های سیمانی EN 13263, ASTM C1240 است. تریپاتی و همکاران (۲۰۲۰) اثر اسید نیتریک بر بتن ساخته شده با استفاده از دود سیلیس مورد بررسی کردند [۱۲]، مشخص شد که مقاومت فشاری همه مخلوط‌های بتن در محیط اسیدی برای تمام دوره‌های مواجهه شده کاهش می‌یابد و نتیجه گیری شد که بتن دوده سیلیسی در محیط اسیدی از دوام بیشتری نسبت به بتن معمولی برخوردار است. افزودن دوده سیلیسی به بتن باعث مقدار

جدول ۱- آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی

Sio ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	ترکیب شیمیایی
۲۱.۱۱	۴.۴۸	۳.۹۱	۶۳.۳۶	۱.۴۸	۲.۵۸	۰.۴۳	۰.۴۸	درصد (%)

جدول ۲- درصد عبوری شن

اندازه الک (میلیمتر)	درصد عبوری شن (%)
۱۲/۵	۱۰۰
۹/۵	۹۷
۴/۷۵	۱۶
۲/۳۶	۲

جدول ۳- درصد اندازه‌های ماسه

دانه بندی						ماسه
۰.۳۳۵-۰.۰۹	۰.۱۲۵-۰.۳۳۵	۰.۵-۰.۱۲۵	۱-۰.۵	۳-۱	۵-۳	
۱۰	۲۰	۱۰	۲۰	۲۰	۲۰	درصد استفاده

فرآیند پخت کلینکر تولید می‌شود به علت دمای بالای آن توسط الکتروفیلتر جمع‌آوری می‌شود که مقداری خواص سیمان را دارا می‌باشد و در کارخانه و قسمت فیلتراسیون به خاک الکتریکی معروف است تقریباً سیمان خام بدون حضور گچ می‌باشد. نتایج تست XRF در جدول ۶ ارائه گردیده‌اند. دوده سوم (K3) آخر که توسط پک‌هوس جمع‌آوری می‌شود دوده‌ای است از آسیاب کلینکر به همراه گچ حاصل می‌شود این دوده خواص سیمان را داشته و نرمی بالا دارد و همچنین زودگیر می‌باشد که نتایج XRF دوده سیمان K3 در جدول ۷ آورده شده‌اند.

دوده‌های سیمان استفاده شده در این تحقیق از فرآیند تولید سیمان حاصل شده که در سه مرحله انتخاب شده‌اند. (۱) دوده آسیاب مواد اولیه، (۲) دوده حین پخت سیمان (kiln) و (۳) دوده انتهای و زمان اضافه شدن گچ و آسیاب شدن کلینکر. همه دوده‌ها از فرآیند فیلتراسیون حاصل شده از کارخانه سیمان تهران تهیه شدند. دوده اولیه که از آسیاب کردن مواد خام و در ابتدای فرآیند تولید ایجاد می‌شود این دوده را که در کارخانه سیمان به نام خاک گویند خواص سیمان را نداشته و چون دمای آن پایین است با پک هوس جمع‌آوری می‌گردد. نتایج تست XRF در جدول ۵ آورده شده‌اند. دوده K2 دوم که در

جدول ۴- درصد عبوری ماسه

اندازه الک (میلیمتر)	درصد عبوری ماسه (%)
۹/۵	۷۸.۹۹
۴/۷۴	۶۶.۶۰
۲/۳۶	۵۴.۸۷
۱/۸	۴۵.۰۳
۰/۶	۳۳.۵۵
۰/۳	۲۱.۹۴
۰/۱۵	۵.۶۰

جدول ۵- ترکیب شیمیایی دوده سیمان K1

ترکیب شیمیایی	cl	Na ₂ O ₃	K ₂ O ₃	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Tit
درصد (%)	0.007	0.31	0.41	0.29	1.05	42.25	2.68	2.99	14.15	77.4

جدول ۶- ترکیب شیمیایی دوده سیمان K2.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O ₃	Na ₂ O ₃	ترکیب شیمیایی
22.1	4.66	4.15	66.1	1.37	0.56	0.4	0.4	درصد دوده

جدول ۷- ترکیب شیمیایی دوده سیمان K3.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O ₃	Na ₂ O ₃	ترکیب شیمیایی
21.13	4.47	3.93	63.36	1.61	2.55	0.53	0.48	درصد(%)

ضمناً در این تحقیق از دوده سیلیس (میکروسیلیس) کم برای کنترل ترک و افزایش دوام بتن استفاده شده که کارخانه فروسیلیس ایران واقع در سمنان استفاده شده است. از الیاف ماکرو سینتتیک (PPS) در درصد حجمی

جدول ۸- مشخصات فیزیکی و شیمیایی الیاف

جنس الیاف : پلی اولفین (PPS)	مقاومت در برابر اسید و باز : عالی
شکل الیاف : رشته‌های تابیده	وزن مخصوص : ۰.۹۱ gr/cm ³
دمای ذوب: ۱۶۰-۱۸۰	مدول الاستیسته: ۶.۴ GPa
جذب آب : ندارد	مقاومت کششی : ۶۹۳ Mpa
در دمای ۱۸- شکننده می‌شود	طول الیاف : ۵ سانتی‌متر

۳. طرح اختلاط، نحوه ترکیب مصالح، عمل آوری و آزمایشات

ابتدا با توجه به جداول طرح مخلوط، مواد در مرحله اول توزین می‌شوند و سپس ماسه، شن، سیمان و دوده سیمان به مدت ۶۰ ثانیه به صورت خشک مخلوط می‌شوند. در مرحله ی بعدی ۷۰ درصد از آب به مخلوط خشک اضافه می‌شود و به مدت ۳۰ ثانیه ترکیب می‌شود. مرحله سوم اضافه کردن ۳۰ درصد از آب با فوق روان کننده توزین شده به مخلوط می‌باشد و به مدت ۶۰ ثانیه اختلاط ادامه می‌یابد. پس از مرحله ی سوم دستگاه

در ساخت ملات تعمیری از فوق روان کننده شرکت کپکو واقع در شهر سمنان استفاده شده است. افزودنی پلاستیت SPC ۱۰۰ یک فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اتر است که مناسب بتن‌های با نسبت آب به سیمان کمتر از ۴۰٪ در هوای معتدل می‌باشد. پلاستیت SPC ۱۰۰ با پخش‌شوندگی بالای سیمان، باعث یکنواختی بتن نهایی می‌شود این افزودنی با استانداردهای ASTM C494, ISIRI 2930 مطابقت دارد.

میکسر خاموش می شود و با ابزاری متناسب با ظرف میکسر به زیر و کردن ملات جهت اطمینان از مخلوط شدن کامل مصالح پرداخته می شود و سپس به مدت ۹۰ ثانیه میکسر روشن شده تا عمل اختلاط ادامه یابد و خمیر ملات تعمیراتی آماده ریختن در قالب ها می شود. همین مرحله ها در مرحله دوم تکرار می شود.

در این تحقیق طرح های اختلاط ملات ترمیمی استفاده شده در مرحله اول در جدول ۹ ارائه شده است که این طرح ترکیب سیمان، دوده سیمان، شن، ماسه، آب و فوق روان کننده می باشد. K0 بعنوان نمونه مرجع بدون دوده سیلیس است و نمونه های با K1 (دوده مرحله اول) و K2 (دوده مرحله دوم) و K3 (دوده مرحله سوم) با سه درصد ۱۲، ۲۴، ۳۶ درصد هستند که در نامگذاری مدنظر قرار گرفتند. با توجه به نتایج آزمایش های فاز اول، مشخص شد که مخلوط (K2-36) بهترین نتیجه را دارند، از این مخلوط ها به منظور ساخت نمونه های بتنی حاوی درصد های مختلف از دوده سیلیس و الیاف استفاده

گردید که مجموعاً ۱۱ طرح اختلاط در مرحله دوم مطابق جدول ۱۰ در نظر گرفته شدند. در این طرح مخلوط در مواردی فقط دوده سیلیس SF با درصد های ۳.۵ و ۷.۵ درصد از وزن سیمان استفاده شده و در مواردی الیاف PPS بصورت F با درصد های حجمی ۰.۲۵، ۰.۵ و ۰.۷۵ بودند و بعضی طرح ها هم ترکیب دوده سیلیس و الیاف هستند.

آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه های مکعبی با ابعاد ۱۰۰*۱۰۰*۱۰۰ mm و طبق استاندارد ASTM C39 انجام گرفت و روند آزمایش به این صورت است که نمونه های مکعبی زیر جک هیدرولیکی قرار داده می شوند و در جهت قائم، تحت فشار قرار می گیرند تا در آخر از هم گسیخته شد و بیشترین فشار یا تنشی که برای شکستن نمونه بر حسب MPa مورد نیاز بوده است، توسط دستگاه ثبت می شود. آزمایش تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم (برزیلی) بر روی نمونه های استوانه ای ۱۰۰*۲۰۰ میلیمتر براساس ASTM C293-79 انجام گردید.

جدول ۹- طرح های مخلوط ملات ترمیمی استفاده شده در مرحله اول

کد مخلوط	آب (kg)	سیمان (kg)	درصد دوده سیمان (%)	دوده سیمان (kg)	نوع دوده سیمان	شن (kg)	ماسه (kg)	فوق روان کننده (kg)
K0	۲۴۰	۵۸۵	۰	-	-	۳۸۴	۱۱۵۳	۳
K1-12	۲۴۰	۵۱۵	۱۲	۷۰	K1	۳۸۴	۱۱۵۳	۳
K1-24	۲۴۰	۴۴۴	۲۴	۱۴۰	K1	۳۸۴	۱۱۵۳	۳
K1-36	۲۴۰	۳۷۴	۳۶	۲۱۰	K1	۳۸۴	۱۱۵۳	۳
K2-12	۲۴۰	۵۱۵	۱۲	۷۰	K2	۳۸۴	۱۱۵۳	۳
K2-24	۲۴۰	۴۴۴	۲۴	۱۴۰	K2	۳۸۴	۱۱۵۳	۳
K2-36	۲۴۰	۳۷۴	۳۶	۲۱۰	K2	۳۸۴	۱۱۵۳	۳
K3-12	۲۴۰	۵۱۵	۱۲	۷۰	K3	۳۸۴	۱۱۵۳	۳
K3-24	۲۴۰	۴۴۴	۲۴	۱۴۰	K3	۳۸۴	۱۱۵۳	۳
K3-36	۲۴۰	۳۷۴	۳۶	۲۱۰	K3	۳۸۴	۱۱۵۳	۳

جدول ۱۰- مخلوط‌های بتنی حاوی دوده سیلیس و الیاف

کد مخلوط	آب (kg)	مقدار سیمان (kg)	سیمان (kg)	دوده سیلیس (kg)	الیاف پلی اولفین کامل (kg)
K2-36, SF-3.5	۲۴۰	۳۵۴.۱۵	۲۱۰.۷۳	۲۰.۴۹	۰
K2-36, SF-7.5	۲۴۰	۳۳۰.۷۳	۲۱۰.۷۳	۴۳.۹	۰
K2-36, F-0.25	۲۴۰	۳۷۴.۶۳	۲۱۰.۷۳	۰	۲.۲۸
K2-36, F-0.5	۲۴۰	۳۷۴.۶۳	۲۱۰.۷۳	۰	۴.۵۵
K2-36, F-0.75	۲۴۰	۳۷۴.۶۳	۲۱۰.۷۳	۰	۶.۸۳
K2-36, SF-3.5, F-0.25	۲۴۰	۳۵۴.۱۵	۲۱۰.۷۳	۲۰.۴۹	۲.۲۸
K2-36, SF-3.5, F-0.5	۲۴۰	۳۵۴.۱۵	۲۱۰.۷۳	۲۰.۴۹	۴.۵۵
K2-36, SF-3.5, F-0.75	۲۴۰	۳۵۴.۱۵	۲۱۰.۷۳	۲۰.۴۹	۶.۸۳
K2-36, SF-7.5, F-0.25	۲۴۰	۳۳۰.۷۳	۲۱۰.۷۳	۴۳.۹	۲.۲۸
K2-36, SF-7.5, F-0.5	۲۴۰	۳۳۰.۷۳	۲۱۰.۷۳	۴۳.۹	۴.۵۵
K2-36, SF-7.5, F-0.75	۲۴۰	۳۳۰.۷۳	۲۱۰.۷۳	۴۳.۹	۶.۸۳

۷.۵) و الیاف با درصد‌های حجمی (۰.۲۵، ۰.۵، ۰.۷۵) در جدول‌های ۱۳ و ۱۴ ارائه شدند.

بر اساس نتایج بدست آمده مرحله اول، با افزایش درصد دوده سیمان نوع K1 مقاومت فشاری ۹، ۲۸ و ۹۰ روزه کاهش یافت. میزان کاهش مقاومت ۷ روزه برای درصد‌های ۱۲، ۲۴ و ۳۶ درصد دوده سیمان برابر به ترتیب ۷، ۱۲ و ۱۷ درصد بود و برای ۲۸ روزه کاهش ۵، ۱۰ و ۱۸ درصد و برای ۹۰ روزه کاهش ۳، ۱۳ و ۲۴ درصد بودند. با افزایش درصد دوده سیمان نوع K2 مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه افزایش یافتند. میزان افزایش مقاومت ۷ روزه برای درصد‌های ۱۲، ۲۴ و ۳۶ دوده سیمان برابر به ترتیب ۱۶، ۲۲ و ۳۴ درصد و برای ۲۸ روزه افزایش ۹، ۱۲ و ۱۵ درصد و برای ۹۰ روزه افزایش ۶، ۸ و ۱۰ درصد بودند. با افزایش درصد دوده سیمان نوع K3 مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه کاهش یافت که میزان کاهش مقاومت ۷ روزه برای درصد‌های ۱۲، ۲۴ و ۲۹ درصد دوده سیمان برابر به ترتیب ۸، ۱ و ۳۳ درصد و برای ۲۸ روزه کاهش ۸، ۱۰ و ۳۶ درصد و برای ۹۰ روزه کاهش ۸، ۱۱ و ۳۴ درصد بودند.

۴. تحلیل نتایج

در مورد نتایج مرحله اول مقاومت‌های فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های مکعبی ۱۰۰ میلیمتری و مقاومت‌های کششی غیر مستقیم ۷، ۲۸ روزه نمونه‌های استوانه‌ای ۱۰۰*۲۰۰ میلیمتر مخلوط‌های بتنی شامل سه نوع دوده سیمان K1، K2، K3 با درصدهای (۱۲، ۲۴، ۳۶) در جدول‌های ۱۱ و ۱۲ ارائه شده‌اند. با توجه به نتایج آزمایش‌های مرحله اول، مشخص شد که مخلوط‌های K2-36 بهترین نتیجه را داشتند که از این مخلوط به منظور ساخت نمونه‌های بتنی حاوی درصد‌های مختلف از دوده سیلیس و الیاف استفاده گردید که مجموعاً ۱۱ طرح اختلاط در مرحله دوم در نظر گرفته شدند. مقاومت‌های فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های مکعب ۱۰۰ میلیمتری و مقاومت‌های کششی غیر مستقیم ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های استوانه‌ای قطر ۱۰۰ میلیمتر مخلوط‌های بتنی شامل دوده سیمانی (K2-36)، دوده سیلیس با درصدهای وزنی (۰.۳۵،

جدول ۱۱- مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مخلوط‌های بتنی شامل دوده سیمان مختلف.

۹۰ روزه (MPa)		۲۸ روزه (MPa)		۷ روزه (MPa)		کد مخلوط
متوسط	هر نمونه	متوسط	هر نمونه	متوسط	هر نمونه	
۶۲.۶	۵۹.۲	۵۴.۲	۵۳.۸	۴۱.۱	۴۳.۳	K0
	۶۳.۱		۵۱.۵		۴۰.۹	
	۶۵.۵		۵۷.۳		۳۹.۱	
۶۰.۸	۵۷.۰	۵۱.۳	۴۸.۲	۳۷.۶	۴۲.۱	K1-12
	۶۱.۱		۴۸.۶		۳۵.۲	
	۶۴.۳		۵۷.۰		۳۵.۵	
۵۴.۲	۴۹.۸	۴۸.۷	۴۵.۱	۳۶.۱	۳۹.۵	K1-24
	۵۷.۵		۴۷.۴		۳۳.۶	
	۵۵.۳		۵۳.۶		۳۵.۲	
۴۷.۸	۵۰.۱	۴۴.۶	۴۵.۳	۳۴.۲	۳۲.۹	K1-36
	۴۷.۲		۴۵.۹		۳۴.۶	
	۴۶.۱		۴۲.۶		۳۵.۱	
۶۶.۲	۶۸.۴	۵۹.۱	۵۷.۴	۴۷.۶	۴۵.۷	K2-12
	۶۸.۲		۶۳.۰		۴۶.۲	
	۶۲.۰		۵۶.۹		۵۰.۹	
۶۷.۶	۶۶.۷	۶۰.۸	۶۰.۵	۵۰.۲	۵۱.۷	K2-24
	۶۷.۹		۵۹.۶		۴۹.۸	
	۶۸.۲		۶۲.۳		۴۹.۱	
۶۹.۱	۶۶.۳	۶۲.۱	۶۱.۴	۵۵.۱	۵۷.۲	K2-36
	۶۹.۷		۶۰.۲		۵۴.۶	
	۷۱.۳		۶۴.۷		۵۳.۵	
۵۷.۳	۵۴.۷	۴۹.۹	۵۰.۱	۴۰.۷	۴۲.۹	K3-12
	۵۷.۲		۴۷.۳		۴۰.۸	
	۶۰.۰		۵۲.۳		۳۸.۴	
۵۵.۷	۵۱.۶	۴۸.۸	۴۶.۵	۳۷.۸	۴۰.۷	K3-24
	۵۸.۴		۴۷.۶		۳۵.۹	
	۵۷.۱		۵۲.۳		۳۶.۸	
۴۱.۳	۳۸.۶	۳۶.۵	۳۴.۹	۲۹.۳	۳۱.۴	K3-36
	۴۳.۲		۳۵.۸		۲۷.۷	
	۴۲.۱		۳۸.۸		۲۸.۸	

جدول ۱۲- مقاومت کششی غیر مستقیم ۷ و ۲۸ روزه مخلوط‌های بتنی شامل دوده سیمان مختلف.

۲۸ روزه (MPa)		۷ روزه (MPa)		کد مخلوط
متوسط	هر نمونه	متوسط	هر نمونه	
۲.۱۶	۲.۱۵	۱.۴۶	۱.۵۴	K0
	۲.۰۶		۱.۴۶	
	۲.۲۹		۱.۳۹	
۱.۷۸	۱.۶۷	۱.۱۱	۱.۲۵	K1-12
	۱.۶۹		۱.۰۴	
	۱.۹۸		۱.۰۵	
۱.۷۲	۱.۵۹	۰.۹۹	۱.۰۸	K1-24
	۱.۶۷		۰.۹۲	
	۱.۸۹		۰.۹۶	
۱.۴۶	۱.۴۹	۰.۸۳	۰.۸	K1-36
	۱.۵۱		۰.۸۴	
	۱.۴۰		۰.۸۵	
۲.۲۳	۲.۱۶	۱.۵۰	۱.۴۴	K2-12
	۲.۳۸		۱.۴۵	
	۲.۱۶		۱.۶	
۲.۴۲	۲.۴۱	۱.۶۲	۱.۶۷	K2-24
	۲.۳۷		۱.۶۱	
	۲.۴۸		۱.۵۹	
۲.۵۱	۲.۴۹	۱.۶۹	۱.۷۵	K2-36
	۲.۴۴		۱.۶۷	
	۲.۶۲		۱.۶۴	
۱.۵۰	۱.۵۰	۱.۰۸	۱.۱۴	K3-12
	۱.۴۲		۱.۰۸	
	۱.۵۷		۱.۰۲	
۱.۲۴	۱.۱۹	۰.۸۹	۰.۹۶	K3-24
	۱.۲۱		۰.۸۵	
	۱.۳۳		۰.۸۷	
۱.۱۱	۱.۰۶	۰.۸۰	۰.۸۹	K3-36
	۱.۰۹		۰.۷۵	
	۱.۱۹		۰.۷۷	

با افزایش درصد دوده سیمان نوع K1 مقاومت کششی ۷، ۲۸ روزه کاهش یافت که میزان کاهش مقاومت ۷ روزه برای درصدهای ۱۲، ۲۴ و ۳۶ درصد دوده سیمان برابر به ترتیب ۲۴، ۳۳ و ۴۳ درصد و برای مقاومت ۲۸ روزه کاهش ۸، ۲۱ و ۳۲ درصد بودند. با افزایش درصد دوده سیمان نوع K2 مقاومت کششی ۷، ۲۸ روزه افزایش یافتند که میزان کاهش مقاومت ۷ روزه برای درصدهای ۱۲، ۲۴ و ۳۹ درصد و برای مقاومت ۲۸ روزه کاهش ۳۱، ۴۳ و ۴۹ درصد بودند.

جدول ۱۳- مقاومت فشاری ۷، ۲۸ روزه مخلوط‌های بتنی شامل دوده سیمان، دوده سیلیس و الیاف

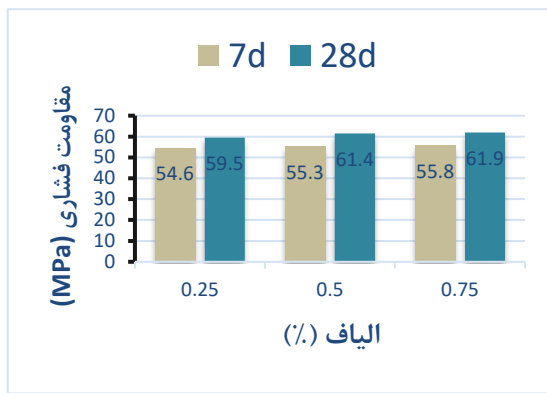
۲۸ روزه (MPa)		۷ روزه (MPa)		کد مخلوط
متوسط	هر نمونه	متوسط	هر نمونه	
۵۴.۲	۵۳.۸	۴۱.۱	۴۳.۳	K0
	۵۱.۵		۴۰.۹	
	۵۷.۳		۳۹.۱	
۶۳	۵۹.۷	۵۵.۰	۵۰.۶	K2-36, SF-3.5
	۶۷.۴		۵۸.۸	
	۶۱.۷		۵۵.۶	
۶۵.۴	۶۴.۱	۵۷.۱	۵۳.۱	K2-36, SF-7.5
	۷۰.۰		۵۹.۳	
	۶۲.۱		۵۸.۸	
۵۹.۵	۵۶.۵	۵۴.۶	۵۱.۲	K2-36, F-0.25
	۵۸.۳		۵۳.۰	
	۶۳.۷		۵۹.۵	
۶۱.۴	۶۰.۷	۵۵.۳	۵۴.۲	K2-36, F-0.5
	۶۵.۱		۵۸.۵	
	۵۸.۳		۵۳.۱	
۶۱.۹	۶۳.۱	۵۵.۸	۵۶.۲	K2-36, F-0.75
	۶۴.۴		۵۸.۰	
	۵۸.۲		۵۳.۰	
۶۲.۶	۶۴.۵	۵۶.۲	۵۸.۴	K2-36, SF-3.5, F-0.25
	۶۵.۶		۵۷.۲	
	۵۷.۶		۵۲.۸	
۶۴.۳	۶۵.۶	۵۷.۱	۵۳.۷	K2-36, SF-3.5, F-0.5
	۶۱.۱		۵۸.۲	
	۶۶.۲		۵۹.۳	
۶۳.۷	۶۱.۸	۵۶.۶	۵۶.۰	K2-36, SF-3.5, F-0.75
	۶۶.۲		۵۸.۸	
	۶۳.۱		۵۴.۹	
۶۵.۳	۶۹.۹	۵۸.۳	۶۱.۷	K2-36, SF-7.5, F-0.25
	۶۶.۰		۵۸.۹	
	۶۰.۱		۵۴.۲	
۶۶.۴	۶۵.۱	۵۶.۹	۵۵.۱	K2-36, SF-7.5, F-0.5
	۶۸.۳		۵۹.۱	
	۶۵.۷		۵۶.۳	
۶۶.۹	۶۴.۸	۵۷.۳	۵۵.۰	K2-36, SF-7.5, F-0.75
	۷۰.۲		۶۰.۲	
	۶۵.۶		۵۶.۶	

جدول ۱۴- مقاومت فشاری ۰.۷، ۲۸ روزه مخلوط‌های بتنی شامل دوده سیمان، دوده سیلیس و الیاف.

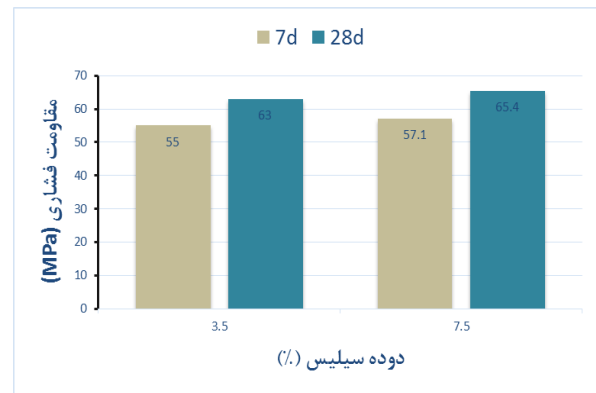
کد مخلوط		۷ روزه (MPa)		۲۸ روزه (MPa)	
		متوسط	هر نمونه	متوسط	هر نمونه
K2-36, SF-3.5	۱.۸۱	۱.۸۶	۲.۵۵	۲.۷۱	۱.۹۱
	۱.۹۱		۲.۸۶		۲.۸۳
K2-36, SF-7.5	۱.۹۴	۱.۸۸	۲.۶۷	۲.۷۵	۱.۸۱
	۱.۸۱		۳.۴۷		۲.۳۹
K2-36, F-0.25	۲.۳۹	۲.۴۲	۳.۵۷	۳.۵۲	۲.۴۵
	۲.۴۵		۳.۶۰		۲.۴۸
K2-36, F-0.5	۲.۴۸	۲.۵۳	۳.۷۶	۳.۶۸	۲.۵۸
	۲.۵۸		۳.۶۳		۲.۴۸
K2-36, F-0.75	۲.۴۸	۲.۵۵	۳.۷۹	۳.۷۱	۲.۶۱
	۲.۶۱		۳.۶۰		۲.۴۸
K2-36, SF-3.5, F-0.25	۲.۴۸	۲.۴۷	۳.۵۷	۳.۵۸	۲.۴۵
	۲.۴۵		۳.۶۳		۲.۴۸
K2-36, SF-3.5, F-0.5	۲.۴۸	۲.۵۵	۳.۷۶	۳.۶۹	۲.۶۱
	۲.۶۱		۳.۶۰		۲.۴۸
K2-36, SF-3.5, F-0.75	۲.۴۸	۲.۵۹	۳.۹۲	۳.۷۶	۲.۷۱
	۲.۷۱		۳.۶۶		۲.۵۱
K2-36, SF-7.5, F-0.25	۲.۵۱	۲.۵۰	۳.۶۳	۳.۶۴	۲.۴۸
	۲.۴۸		۳.۵۷		۲.۴۵
K2-36, SF-7.5, F-0.5	۲.۴۵	۲.۵۸	۳.۹۵	۳.۷۶	۲.۷۱
	۲.۷۱		۳.۵۳		۲.۴۲
K2-36, SF-7.5, F-0.75	۲.۴۲	۲.۵۹	۴.۰۱	۳.۷۷	۲.۷۷
	۲.۷۷				

درصدهای ۰.۲۵، ۰.۵ و ۰.۷۵ درصد، این نسبت افزایش سیلیس به بتن مرجع برای ۷ روزه به ترتیب ۳۳، ۳۵ و ۳۶ درصد و برای ۲۸ روزه به ترتیب ۱۰، ۱۳ و ۱۴ درصد بودند. در حالت استفاده همزمان دوده سیلیس و الیاف، نسبت افزایش مقاومت فشاری نسبت به بتن مرجع برای ۷ روزه بین ۳۷ تا ۴۲ درصد و برای ۲۸ روزه بین ۱۵ تا ۲۳ درصد بودند. نتایج مربوطه در شکل‌های ۱ تا ۴ نشان داده شده اند.

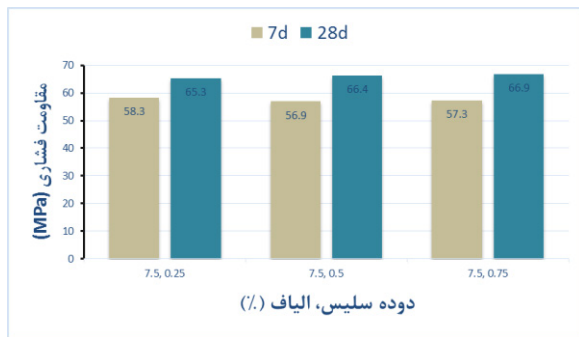
بر اساس نتایج بدست آمده در مرحله دوم، افزودن دوده سیلیس با درصدهای ۳.۵ و ۷.۵ درصد و الیاف با درصدهای ۰.۲۵، ۰.۵ و ۰.۷۵ درصد به صورت جداگانه یا با هم باعث افزایش مقاومت فشاری و کششی غیر مستقیم شدند. مقاومت فشاری بتن حاوی دوده سیلیس با درصدهای ۳.۵ و ۷.۵ درصد نسبت به مقاومت بتن مرجع برای ۷ روزه به ترتیب ۳۴ و ۳۹ درصد و برای ۲۸ روزه به ترتیب ۱۶ و ۲۱ درصد افزایش نشان دادند. در صورت استفاده از الیاف با



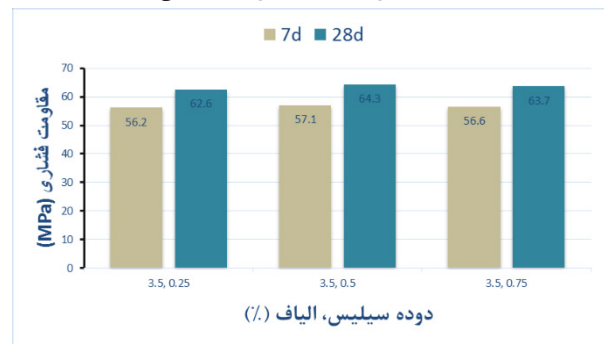
شکل ۲- مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن‌های شامل دوده سیمان ۳۶K۲ درصد با فقط الیاف کامل.



شکل ۱- مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن‌های شامل دوده سیمان ۳۶K۲ درصد با فقط دوده سیلیس.



شکل ۴- مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن‌های شامل دوده سیمان ۳۶K۲ درصد با ترکیب دوده سیلیس با درصد ۷.۵ و الیاف کامل



شکل ۳- مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن‌های شامل دوده سیمان ۳۶K۲ درصد با ترکیب دوده سیلیس درصد ۳.۵ و الیاف کامل

۵. نتیجه گیری

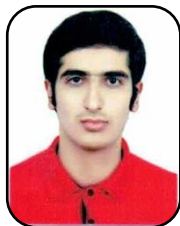
بعد از بررسی و آنالیز نتایج آزمایشگاهی بدست آمده مشخص شد که دوده‌های سیمانی K1 و K3 تاثیر منفی بر مقاومت فشاری و کششی غیر مستقیم تاثیر دارد و هر چه میزان دوده‌های سیمانی K1 و K3 بیشتر باشد هر چه مقاومت‌های فشاری و کششی غیر مستقیم ی‌ر تمام عمرها با مقایسه با بتن مرجع کمتر می‌شود. برخلاف دوده سیمانی K2 که دارای تاثیری مثبت بر مقاومت‌های فشاری و کششی با افزایش درصد آن مقاومت را افزایش می‌دهد. به همین ترتیب، مقاومت فشاری و کششی با افزودن دوده سیلیس و الیاف بهبود یافتند، مقاومت فشاری تا ۴۲ درصد برای ۷ روزه و تا ۲۳ درصد برای ۲۸ روزه و مقاومت کششی تا ۷۸ درصد برای ۷ روزه و تا ۷۵ درصد برای ۲۸ روزه افزایش یافته است.

مقاومت کششی غیر مستقیم بتن‌های مورد نظر در مقایسه با نتایج مقاومت بتن مرجع افزایش داشتند بطوری‌که در حالت استفاده از دوده سیلیس با درصدهای ۳.۵ و ۷.۵ درصد، این افزایش برای ۷ روزه به ترتیب ۲۸ و ۲۹ درصد و برای ۲۸ روزه به ترتیب ۲۵ و ۲۷ درصد بودند. در حالت استفاده از الیاف با درصدهای ۰.۲۵، ۰.۵ و ۰.۷۵ درصد، افزایش مقاومت کششی برای ۷ روزه به ترتیب ۶۶، ۷۳ و ۷۴ درصد و برای ۲۸ روزه به ترتیب ۶۳، ۷۰ و ۷۲ درصد بودند. در حالت استفاده از همزمان دوده سیلیس و الیاف، افزایش مقاومت کششی بتن‌های مورد نظر در مقایسه با نتایج مقاومت بتن مرجع برای ۷ روزه بین ۶۹ تا ۷۸ درصد و برای ۲۸ روزه بین ۶۶ تا ۷۵ درصد بودند.

1. Peethamparan, S., Olek, J., Lovell, J. (2008). *Influence of chemical and physical characteristics of cement kiln dusts (CKDs) on their hydration behavior and potential suitability for soil stabilization. Cement and concrete research*, 2008. 38(6): p. 803-815.
 2. Maslehuddin, M., Al-Amoudi, S.B., Shameem, M., Rehman, M.K. (2008), *Usage of cement kiln dust in cement products—research review and preliminary investigations. Construction and Building Materials*, 2008. 22(12): p. 2369-2375.
 3. Siddique, R. (2014). *Utilization of industrial by-products in concrete. Procedia Engineering*, 2014. 95: p. 335-347.
 4. Siddique, R., Rajor, A. (2012). *Use of cement kiln dust in cement concrete and its leachate characteristics. Resources, Conservation and Recycling*, 2012. 61: p. 59-68.
 5. Marku, J., DUMI, I., LIÇO, E., DILO, T. (2012). *The characterization and the utilization of cement kiln dust (CKD) as partial replacement of Portland cement in mortar and concrete production. Zaštita materijala*, 2012. 53: p. 334-344.
 6. Salem, W., Sayed, W.F., Halawy, S.A., Elamary, R.B. (2015) *et al., Physicochemical and microbiological characterization of cement kiln dust for potential reuse in wastewater treatment. Ecotoxicology and environmental safety*, 2015. 119: p. 155-161.
 7. Adaska, W.S., Taubert, D.H. (2008). *Beneficial uses of cement kiln dust. in 2008 IEEE Cement Industry Technical Conference Record. 2008. IEEE.*
 8. Yoobanpot, N., Jamsawang, P., Horpibulsuk, S. (2017). *Strength behavior and microstructural characteristics of soft clay stabilized with cement kiln dust and fly ash residue. Applied Clay Science*, 2017. 141: p. 146-156.
 9. Miller, G.A., Azad, S. (2000). *Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust. Construction and building materials*, 2000. 14(2): p. 89-97.
 10. Batis, G., Rakanta, E., Sideri, E., Chaniotakis, E. (2002). *Advantages of simultaneous use of cement kiln dust and blast furnace slag. in Challenges of Concrete Construction: Volume 5, Sustainable Concrete Construction: Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 9–11 September 2002. 2002. Thomas Telford Publishing.*
 11. Abdel-Gawwad, H.A., Heikal, M., Mohammed, M.S., El-Aleem, S.A., SoltanHassan, H. (2019) *Sustainable disposal of cement kiln dust in the production of cementitious materials. Journal of Cleaner Production*, 2019. 232: p. 1218-1229.
 12. Tripathi, D., (2020) *Silica fume mixed concrete in acidic environment. Materials Today: Proceedings*, 2020. 27: p. 1001-1005
۱۳. سلطانی، مرضیه، آرزومندی، مهدی، حاج مهدی، مجتبی، یعقوبی، محمدعلی (۱۳۹۵). "مشخصات بتن حاوی سنگدانه ریزدانه آسفالت بازیافتی و دوده سیلیسی"، *مجله پژوهش های تجربی در مهندسی عمران*، دوره ۳، صفحه ۱۲۹ تا ۱۴۲.

ارزیابی بهبود عملکرد خمشی، قابلیت جذب انرژی استاتیکی و ظرفیت باربری پس از ترک خوردگی روسازی های بتنی درزدار مسلح شده به الیاف فلزی در

مقادیر مصرف مختلف



سید جواد وزیر کنگ علیانی

دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد، مهندسی راه و ترابری،

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

عضوانجمن بتن ایران



محمد رضا حاجی زاده

دانش آموخته‌ی کارشناسی مهندسی عمران

گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و محیط زیست،

دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران)

عضوانجمن بتن ایران

چکیده

روسازی های بتنی درزدار ساده، یکی از انواع پر کاربرد روسازی بتنی مورد استفاده در جاده ها و سطوح پروازی محسوب می شود. بهبود عملکرد سازه ای و قابلیت جذب انرژی این روسازی ها در افزایش دوام و حفظ سطح عملکردی آن در طول عمر خدمت دهی جاده، از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به اهمیت این موضوع و همچنین وجود بیشتر تنش های خمشی نسبت به دیگر انواع تنش در روسازی بتنی، نیاز است تا بهبود عملکرد و رفتار آن تحت بارگذاری خمشی با استفاده از رویکرد های موثر بررسی گردد. بدین منظور تحقیق حاضر به ارزیابی بهبود عملکرد خمشی، قابلیت جذب انرژی استاتیکی و ظرفیت باربری پس از ترک خوردگی روسازی های بتنی درزدار مسلح شده به الیاف فلزی در مقادیر مصرف مختلف می پردازد. الیاف فلزی از نوع الیاف فلزی با انتهای دو سرقلاب، در مقادیر مصرف مختلف شامل ۰، ۱۵ و ۲۵ کیلوگرم در متر مکعب بتن بود. در ابتدا، نسبت های اختلاط بتن روسازی بتنی درزدار مطابق با ضابطه‌ی ۷۳۱ تعیین شده و سپس کارایی مخلوط های بتن روسازی بتنی درزدار ساده (با میزان الیاف صفر) و مسلح به الیاف فلزی مطابق با استاندارد ASTM C143 ارزیابی شد. سپس، مقاومت خمشی، قابلیت جذب انرژی استاتیکی تحت بار خمشی و باربری پس از ترک خوردگی روسازی بتنی درزدار ساده و الیافی به ترتیب مطابق با استاندارد ASTM C78 و ASTM C1609 تعیین شد. نتایج نشان داد که افزودن الیاف فلزی باعث افزایش چشمگیر مقاومت خمشی، تا مقدار ۴۴ درصد با مصرف ۲۵ کیلوگرم در متر مکعب، گردید. میزان افزایش نسبی مقاومت خمشی در بازه‌ی مصرف ۱۵-۰ (۲۷ درصد)، بیشتر از بازه‌ی مصرف ۲۵-۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب (۱۴ درصد) بود. این موضوع نشان داد که با افزودن بیشتر الیاف از میزان ۱۵ کیلوگرم در متر مکعب، روند افزایشی مقاومت خمشی، کاهش می یابد. همچنین، دیده شد که با افزودن الیاف فلزی به میزان ۲۵ کیلوگرم در متر مکعب، قابلیت جذب انرژی استاتیکی تحت بار خمشی تا میزان ۳۸ برابر افزایش یافت. نتایج نشان داد که تغییر جذب انرژی بعد از شکست روسازی اثر چشمگیر تری بر تغییرات جذب انرژی کل آن دارد. همچنین، مشاهده شد که اثر الیاف، بر بهبود جذب انرژی بعد از شکست روسازی محسوس تر بود. این موضوع نشان دهنده‌ی عملکرد مناسب الیاف در افزایش چشمگیر قابلیت باربری پس از ترک خوردگی روسازی بود. افزایش نسبی جذب انرژی استاتیکی در میزان مصرف ۱۵-۰ (۲۷ برابر) بیشتر از میزان مصرف ۲۵-۱۵ کیلوگرم در متر مکعب (۱.۳۹ برابر) بود. همچنین، دیده شد که با افزودن بیشتر الیاف از مقدار ۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب، روند افزایشی جذب انرژی پس از ترک خوردگی روسازی، کاهش بیشتری نسبت به روند افزایشی جذب انرژی قبل از شکست آن پیدا می کند. در انتها نتیجه شد که با مسلح سازی روسازی های بتنی درزدار با الیاف فلزی، می توان عملکرد خمشی، قابلیت جذب انرژی استاتیکی و ظرفیت باربری پس از ترک خوردگی روسازی را به میزان قابل توجهی بهبود بخشید. کلمات کلیدی: روسازی بتنی درزدار، مقاومت خمشی، جذب انرژی استاتیکی، قابلیت باربری پس از ترک خوردگی، الیاف فلزی.

روسازی بتنی می گردند. میزان تنش های فشاری در روسازی های بتنی نسبت به تنش های خمشی در آن، بسیار ناچیز است [6]. به همین دلیل، تنش خمشی در روسازی های بتنی در طراحی، عملکرد و دوام این سازه ها از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین تغییرات دما و رطوبت در ضخامت روسازی که منجر به وقوع تابیدگی دال بتنی شده، باعث ایجاد تنش های خمشی در بتن می گردد. بنابراین، تنش های خمشی در ایجاد خرابی یا کاهش دوام و سطح عملکردی جاده، نقش مهمی بازی می کند. از این جهت، بهبود عملکرد و رفتار خمشی، افزایش جذب انرژی و افزایش مقاومت پس از ترک خوردگی روسازی های بتنی در برابر این نوع تنش ها اهمیت بیشتری یافته و همواره سعی بر استفاده از راهکارها و رویکردهای موثر در دستیابی به این امر بوده است [7,8].

ایده های مسلح سازی روسازی های بتنی با الیاف های مختلف به منظور بهبود رفتار و عملکرد این سازه ها، در سال های اخیر توجه محققان را به خود جلب کرده است [9-23]. الیاف در مخلوط های بتنی باعث افزایش مقاومت کششی و ضربه ای بتن می گردد. همچنین، الیاف با قرار گرفتن در محل ترک خوردگی و عمل پل زدن، از گسترش دهانه ی ترک جلوگیری می کند [24,25]. در بین الیاف با مصالح مختلف، الیاف فلزی به دلیل خصوصیات مقاومتی بالا و دوام مناسب در محیط قلیایی سیمان از اهمیت بیشتری برخوردار است. همچنین، به دلیل نزدیک بودن ضریب انبساط حرارتی فولاد و بتن، این الیاف رفتار نسبتاً مشابهی با رفتار مخلوط بتنی در تغییرات حرارتی دارد. برخی از انواع الیاف فولادی از قطعات فلزی با آلیاژ های فولادی ضد زنگ ساخته شده است. به جهت درگیری بهتر این الیاف با مخلوط بتنی، تغییر شکلی در قطعات الیاف فولادی ایجاد می گردد. از این نظر، الیاف فولادی در شکل های متفاوت تولید و عرضه می گردد.

در بین انواع روسازی های بتنی، روسازی بتنی درزدار ساده به دلیل عدم نیاز به میلگرد های مسلح کننده، از اهمیت کاربرد بالاتری برخوردار است [1]. در این نوع روسازی، با استفاده از درز های عرضی، شدت ترک خوردگی در سطح دال بتنی کنترل می گردد [2,3]. در محل درز ها، از میلگرد های انتقال بار (داول بار) به جهت انتقال بار مناسب استفاده می شود [4]. با توجه به ماهیت ترد و شکننده ی مصالح بتنی، روسازی های بتنی درزدار تحت عوامل جوی، بارگذاری و تنش های مختلف، با چالش هایی به همراه هستند. مقاومت کششی پایین مصالح بتنی باعث می شود تا علی رغم وجود درز های عرضی، روسازی بتنی تحت تنش های کششی دچار ترک خوردگی شود. همچنین، قابلیت جذب انرژی این روسازی ها پایین بوده و رفتار آن تحت بارگذاری های مختلف از انعطاف پذیری کمتری برخوردار است که این موضوع باعث شکست ناگهانی سازه بتنی می گردد. پس از ایجاد ترک در بتن نیز، مقاومت پس از ترک خوردگی روسازی در محل ایجاد ترک پایین بوده که این مورد باعث افزایش دهانه ی ترک خوردگی و گسترش ترک، در سازه ی بتنی تحت بارگذاری می شود [5]. روسازی های بتنی درزدار که فاقد میلگرد های مسلح کننده بوده، بیشتر با مشکلات ناشی از چالش های مرتبط با ماهیت تردی مصالح بتنی رو به رو بوده چرا که عوامل ایجاد تنش در این سازه ها، تنها بارگذاری های ناشی از ترافیک نبوده، بلکه عوامل جوی، مانند تغییرات دما و رطوبت محیطی و سیکل های ذوب و یخبندان، باعث ایجاد تنش در آنان می گردند. مجموع این عوامل می توانند از ضعف بتن در قابلیت جذب انرژی و باربری پس از ترک خوردگی استفاده کرده و دوام و عملکرد روسازی بتنی درزدار را دستخوش تغییر کنند.

بارهای وارده به روسازی های بتنی درزدار از طرف جریان ترافیکی، بیشتر باعث ایجاد های خمشی و فشاری در

برخی از تحقیقات، تمرکز خود را بر روی مطالعه ی بررسی خصوصیات و مشخصات مقاومتی و عملکرد سازه ای روسازی های بتنی مسلح به الیاف فلزی قرار دادند. به عنوان مثال، مدح خوان و همکاران¹ [26] به بررسی اثر مواد پوزولانی با الیاف فلزی با انتهای دوسر قلاب^۲ و الیاف پلی پروپیلن بر خصوصیات مقاومتی روسازی های بتنی غلتکی پرداختند. نتایج کار آنان حاکی از تاثیر چشمگیر الیاف فلزی بر افزایش مقاومت فشاری روسازی نسبت به الیاف پلی پروپیلن بود. با این حال دیده شد که هیچ یک از دو الیاف مورد بررسی به تنهایی (بدون افزودن مواد پوزولانی) باعث بهبود چشمگیر مقاومت خمشی روسازی نگردید. همچنین، مشاهده شد که مشخصه های طاقت خمشی روسازی مسلح به الیاف فلزی افزایش یافت. با این حال در این تحقیق، رفتار خمشی و مشخصه های انرژی روسازی بتنی معمولی مسلح به الیاف فلزی مورد بررسی قرار نگرفت. در تحقیقی دیگر، سوکونتاساکول و همکاران^۳ [27] در یک مطالعه ی موردی به ارزیابی بهبود خصوصیات مقاومتی روسازی های بتنی غلتکی حاوی الیاف فلزی با انتهای دو سر قلاب پرداختند. برخلاف تحقیق مدح خوان و همکاران [26]، در این، تحقیق مقاومت فشاری روسازی با افزودن الیاف فلزی کاهش یافت. همچنین، مقاومت خمشی، طاقت و مقاومت پسماند روسازی مسلح به الیاف فلزی افزایش یافت. بهبود مقاومت خمشی با افزودن الیاف فلزی در این تحقیق، مورد دیگری است که با نتایج حاصل از تحقیق مدح خوان و همکاران اختلاف دارد. همچنین در این تحقیق، روسازی بتنی مد نظر از نوع روسازی غلتکی بود. لائو و همکاران^۴ [28]، بهبود عمر

خستگی روسازی های بتنی مسلح به الیاف فلزی را گزارش کردند. اما، آنان پارامتر های جذب انرژی و بررسی عملکرد خمشی را مورد بررسی قرار ندادند. علی و همکاران^۵ [29]، تاثیر مسلح سازی روسازی های بتنی درزدار با الیاف فلزی، شیشه ای و پلی پروپیلن بر اثرات اقتصادی و زیست محیطی این روسازی را مورد بررسی قرار دادند. دیده شده که الیاف فلزی در بهبود مقاومت خمشی و مقاومت خمشی پسماند روسازی، اثر بهتری نسبت به الیاف شیشه ای و پلی پروپیلن، از خود نشان می دهد. با این حال، این الیاف در کاهش اثرات اقتصادی و زیست محیطی روسازی بتنی درزدار موثر واقع نشد. یکی از دلایل این موضوع میزان مصرف بالای این الیاف (۳۹ و ۷۸ کیلوگرم در متر مکعب بتن تازه) است. همچنین، این میزان الیاف فلزی، می تواند با مشکلاتی شامل اختلاط ناهمگن و کاهش چشمگیر کارایی بتن در شرایط واقعی و اجرایی به همراه باشد. همچنین، مشخصه ی جذب انرژی استاتیکی، در این تحقیق مورد بررسی واقع نگردید.

بررسی پیشینه ی پژوهش نشان داد که بهبود عملکرد سازه ای، جذب انرژی استاتیکی و قابلیت باربری پس از ترک خوردگی در روسازی های بتنی به جهت افزایش دوام و حفظ سطح عملکردی جاده در طول عمر خدمت دهی روسازی، از اهمیت بالایی برخوردار است. از آن جا که بیشتر تنش های به وجود آمده در روسازی های بتنی درزدار، تنش های خمشی بوده، در نتیجه، افزایش عملکرد، جذب انرژی و قابلیت باربری پس از ترک خوردگی روسازی های بتنی درزدار تحت بارگذاری خمشی، نسبت به دیگر انواع بارگذاری، اهمیت بیشتری دارد. دیده شد که مسلح

1 Madhkhan et al.

2 Hooked-end steel fibers

3 Sukontasukkul et al.

4 Lau et al.

5 Ali et al.

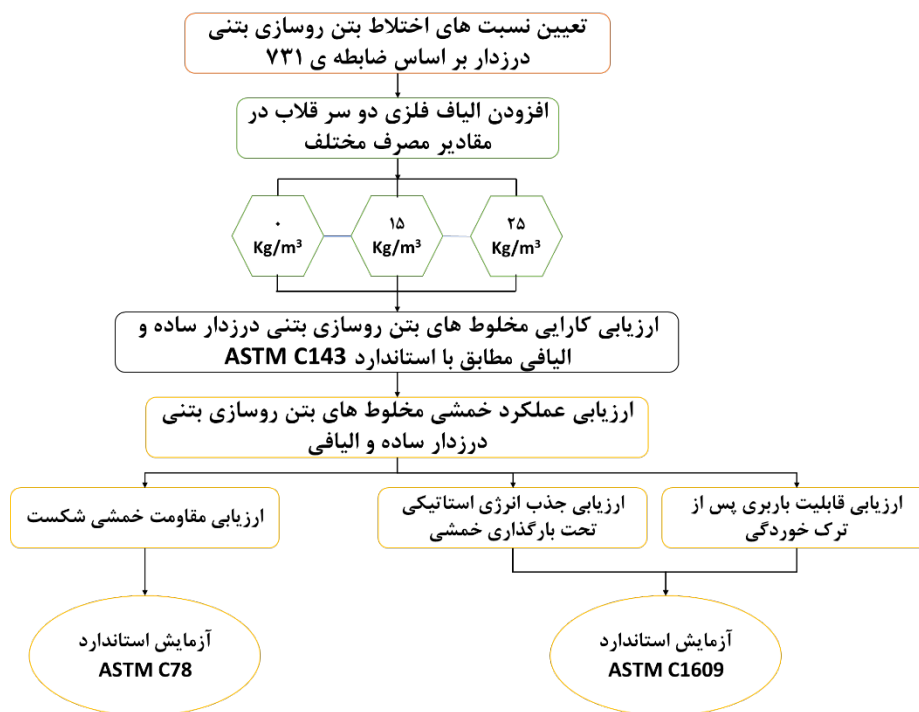
سازی روسازی با الیاف مختلف می تواند در دستیابی به این هدف موثر واقع شود. با توجه به عملکرد مناسب الیاف فلزی در بهبود خصوصیات مقاومتی روسازی بتنی، نیاز است تا اثر افزودن این الیاف بیشتر مورد بررسی واقع شود. با وجود انجام برخی از مطالعات، تحقیق کمتری به بررسی کامل تر اثر الیاف فلزی در بهبود عملکرد خمشی، جذب انرژی استاتیکی و قابلیت باربری پس از ترک خوردگی روسازی بتنی درزدار پرداخته است. همچنین، تاثیر بررسی مقادیر مصرفی که باعث ایجاد مشکلات در شرایط اجرایی نشده، بر رفتار قبل و بعد از ترک خوردگی و قابلیت جذب انرژی استاتیکی روسازی بتنی درزدار تحت بارگذاری خمشی، کمتر مورد توجه واقع شده است. بررسی این موارد می تواند علاوه بر پوشش گپ تحقیقاتی ذکر شده، در استفاده از الیاف فلزی در مقدار مصرف مناسب در بتن به جهت ساخت روسازی های بتنی درزدار با دوام و عملکرد بالا، کمک کند. بدین منظور، تحقیق حاضر به ارزیابی بهبود عملکرد خمشی، قابلیت جذب انرژی استاتیکی و ظرفیت باربری پس از ترک خوردگی روسازی بتنی مسلح شده به الیاف فلزی در مقادیر مصرف مختلف می پردازد. در ابتدا، جزئیات مصالح و روش تحقیق به کار گرفته شده، تشریح می شود. سپس، نتایج به دست آمده از تحقیق، تجزیه و تحلیل شده و سپس مورد بحث واقع می شود.

۲. روش تحقیق و مصالح

۱.۲. متغیر های مورد بررسی و برنامه ی آزمایشگاهی

هدف اصلی این تحقیق بررسی بهبود عملکرد خمشی، جذب انرژی استاتیکی تحت بارگذاری خمشی و ظرفیت

باربری خمشی پس از ترک خوردگی در روسازی های بتنی درزدار مسلح به الیاف فلزی در مقادیر مصرف مختلف است. بدین منظور، در ابتدا نسبت های اختلاط بتن مورد استفاده در روسازی های بتنی درزدار، مطابق با دستور العمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راه ها، ضابطه ی ۲۳۱ [3] تعیین می گردد. متغیر مستقل تحقیق، شامل الیاف فلزی در مقادیر مصرف مختلف است. الیاف فلزی مورد نظر در این تحقیق جهت مسلح سازی روسازی بتنی درزدار، از نوع الیاف فلزی با انتهای دو سر قلاب و در مقادیر مصرف مختلف شامل ۰، ۱۵ و ۲۵ کیلوگرم در متر مکعب بتن تازه است. متغیر های وابسته ی مورد بررسی در این تحقیق به جهت بررسی عملکرد خمشی روسازی بتنی درزدار، شامل مقاومت خمشی و جذب انرژی استاتیکی (طاقات) روسازی تحت بارگذاری خمشی است. در ابتدا، کارایی مخلوط های بتن روسازی بتنی درزدار ساده و مسلح به الیاف فلزی مطابق با استاندارد ASTM C143 ارزیابی می شود. سپس، مقاومت خمشی مخلوط های بتنی شاهد و الیافی، با استفاده از آزمایش ASTM C78 تعیین می گردد. آزمایش تعیین عملکرد خمشی مطابق با استاندارد ASTM C1609 بر روی مخلوط های بتنی شاهد و الیافی به منظور تعیین میزان جذب انرژی استاتیکی تحت بارگذاری خمشی و ارزیابی ظرفیت باربری پس از ترک خوردگی روسازی انجام می گیرد. سپس نتایج به دست آمده از آزمایش های انجام شده، مورد تجزیه و تحلیل واقع شده و بحث می گردد. در شکل ۱، برنامه ی آزمایشگاهی و متغیر های مورد بررسی در این تحقیق را نشان می دهد.



شکل ۱. برنامه ی آزمایشگاهی و متغیر های مورد بررسی در این تحقیق

جدول ۱. مشخصات مقاومتی و مکانیکی الیاف فلزی با انتهای دو سر قلاب

نام تجاری الیاف	DRAMIX
شکل ظاهری	دو سر قلاب
طول (mm)	۶۰
قطر (mm)	۰.۹۰
مقاومت کششی (Mpa)	۱۱۶۰
مدول الاستیسیته (Gpa)	۲۱۰
وزن مخصوص (gr/cm ³)	۷.۸۵

۲.۲. مصالغ

۲.۲.۲ الیاف

الیاف فلزی مورد استفاده در این تحقیق، از نوع الیاف فلزی با انتهای دو سر قلاب، مطابق با استاندارد ASTM A820 و C1116 بود. انتخاب این نوع الیاف، به دلیل خصوصیات مقاومتی، مکانیکی و دوامی مناسب و همچنین، درگیری مناسب با مخلوط بتنی، به دلیل وجود قلاب های انتهایی، صورت گرفت. شکل ۲، الیاف فلزی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می دهد. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی این الیاف در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۲. الیاف فلزی با انتهای دو سر قلاب مورد استفاده در این تحقیق

۲.۲.۲ سیمان

در این تحقیق، از سیمان پرتلند تیپ دو مطابق با استاندارد ASTM C150 و با وزن مخصوص ۳۱۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده گردید. مشخصات تحلیل شیمیایی این سیمان و الزامات استاندارد ملی ایران شماره ی ۳۸۹ برای سیمان تیپ دو در جدول ۲، مشاهده می شود.

جدول ۲. نتایج تحلیل شیمیایی سیمان پرتلند تیپ دو مورد استفاده در این تحقیق

اکسید	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
سیمان (%)	۲۱.۸۴	۴.۵۶	۳.۵۲	۶۳.۰۱	۳.۶	۱.۷۵	۰.۱۸	۰.۵۳
الزامات استاندارد ایران (۳۸۹)	>۲۰	۶>	۶>	-	۵>	۳>	-	-

۳.۲.۲. مصالح سنگی

از فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اتر مطابق با استاندارد ASTM C494 در ساخت مخلوط های بتنی به جهت دستیابی به میزان کارایی مورد نظر استفاده گردید.

۳.۲.۲. طرح اختلاط بتن روسازی بتنی درزدار

مطابق با دستور العمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راه ها، ضابطه ی شماره ی ۷۳۱، در تعیین نسبت های اختلاط بتن مورد استفاده در روسازی بتنی درزدار باید از ضوابط و حدود ذکر شده در این ضابطه پیروی کرد. بدین ترتیب، در تعیین نسبت های اختلاط بتن روسازی بتنی درزدار، معیار های ذکر شده در این ضابطه، مندرج در جدول ۳، در نظر گرفته شد. سهم مصالح سنگی ریزدانه و درشت دانه به گونه ای در نظر گرفته شده تا نمودار دانه بندی ترکیب مصالح سنگی در بین حدود مجاز دانه بندی، مطابق با ضابطه ی ۷۳۱، قرار گیرد. بدین ترتیب، سهم مصالح سنگی ریزدانه ۵-۰ میلیمتر، مصالح سنگی درشت دانه ۵-۱۲ میلیمتر و مصالح سنگی درشت دانه ۱۲-۱۹ میلیمتر به ترتیب به میزان ۶۰٪، ۳۰٪ و ۱۰٪ انتخاب گردید. در شکل ۳، نمودار دانه بندی انتخابی ترکیب مصالح سنگی به همراه حدود دانه بندی مجاز، دیده می شود.

از مصالح سنگی رودخانه ای مطابق با استاندارد ASTM C33 شامل مصالح سنگی ریزدانه با ابعاد ۵-۰ میلیمتر و مصالح سنگی درشت دانه با ابعاد ۱۲-۵ میلیمتر و ۱۹-۱۲ میلیمتر استفاده گردید. مصالح سنگی ریزدانه دارای مدول نرمی، چگالی نسبی و جذب آب به ترتیب به میزان ۲.۸، ۲.۶٪ و ۲.۹٪ مطابق با استاندارد های ASTM C33 و ASTM C128 بود. مصالح سنگی درشت دانه ۱۲-۵ میلیمتر دارای چگالی نسبی و جذب آب به ترتیب به میزان ۲.۵ و ۲.۵٪ و مصالح سنگی درشت دانه ۱۲-۱۹ میلیمتر با چگالی نسبی و جذب آب به ترتیب به میزان ۲.۶ و ۲.۰٪، مطابق با استاندارد ASTM C127 بود.

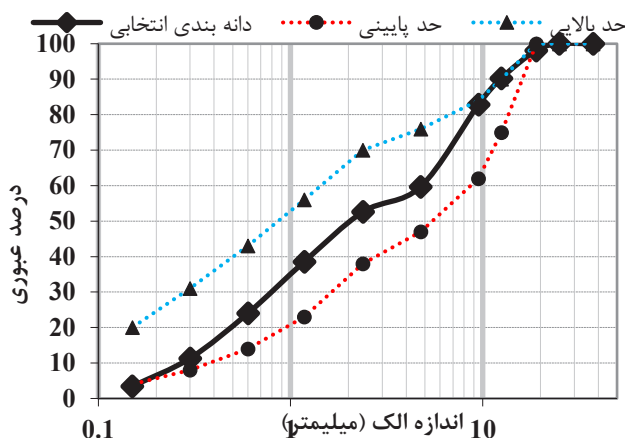
۴.۲.۲. آب

آب مورد استفاده جهت ساخت مخلوط های بتنی مورد استفاده در روسازی باید مطابق با استاندارد ASTM C1602 بوده و به طور کلی صاف و عاری از مقادیر زیاد مواد روغنی، اسیدی و دیگر مواد مضر باشد. در این تحقیق، از آب آشامیدنی سیستم لوله کشی شبکه ی شهری، جهت ساخت مخلوط های بتنی استفاده گردید.

۵.۲.۲. مواد افزودنی

جدول ۳. معیار های تعیین نسبت های اختلاط بتن روسازی بتنی درزدار مطابق با ضابطه ی ۷۳۱

روش انجام آزمایش	مقدار	معیار
ASTM C39	حداقل ۳۰ مگاپاسکال	مقاومت فشاری (نمونه استوانه ای)
ASTM C78	حداقل ۴ مگاپاسکال	مقاومت خمشی (به روش تیر ساده با بارگذاری در یک سوم دهانه)
ASTM C143	۷۰-۱۰ میلیمتر	اسلامپ
-	حداقل ۳۳۵ کیلوگرم بر متر مکعب	عیار سیمان
-	حداکثر ۰.۵۳	نسبت آب به مواد سیمانی (W/C)



شکل ۳. حدود دانه بندی مجاز و انتخابی ترکیب مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق

با توجه به بازه ی اسلامپ در نظر گرفته شده، میزان عیار مواد سیمانی به مقدار ۳۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب انتخاب گردید. این میزان عیار مواد سیمانی در نظر گرفته شده، از حداقل میزان عیار سیمان بتن روسازی بتنی درزدار (جدول ۳) بیشتر است.

مقدار مصرف الیاف فلزی به ترتیب به میزان ۰، ۱۵ و ۲۵ کیلوگرم در هر متر مکعب بتن تازه، در نظر گرفته شد. انتخاب این مقادیر با هدف بررسی تاثیر مقدار مصرف بر متغیرهای وابسته ی مورد نظر در این تحقیق بود. همچنین، با توجه به مشکلات اجرایی مرتبط با مقادیر مصرف بالای الیاف، حداکثر میزان مصرف طوری انتخاب گردید که مخلوط های بتنی مورد بررسی در این تحقیق کمتر با مشکلات ذکر شده، مانند اختلاط ناممکن و کاهش شدید کارایی بتن، مواجه باشد. به جهت دستیابی به میزان کارایی مشخص و هدف در مخلوط های بتنی شاهد و الیافی (اسلامپ 60 ± 20 میلیمتر) میزان مصرف ماده ی افزودنی فوق روان کننده طوری انتخاب گردید تا اسلامپ مخلوط های بتنی شاهد و الیافی در محدوده ی ذکر شده قرار گیرد. این مورد با ساخت مخلوط های آزمایشی حاوی ماده ی افزودنی فوق روان کننده، ارزیابی میزان اسلامپ هر مخلوط مطابق با استاندارد ASTM C143 و تکرار این روند به صورت آزمون و خطا، صورت

با توجه به رابطه ی مقاومت فشاری و نسبت آب به مواد سیمانی مخلوط های بتنی مطابق با ضابطه ی ۷۳۱، نسبت آب به مواد سیمانی مخلوط بتن روسازی بتنی درزدار، به میزان ۰.۵ انتخاب گردید. انتخاب این مقدار نسبت آب به مواد سیمانی به دلیل کاهش خصوصیات مقاومتی مخلوط های بتنی نسبت به مخلوط های با نسبت آب به مواد سیمانی پایین تر، به منظور بررسی بهتر اثر الیاف صورت گرفت. با وجود این که ممکن است مقادیر نسبت آب به مواد سیمانی مورد استفاده در شرایط اجرایی، از مقدار انتخابی در این تحقیق کمتر بوده، اما مقدار نسبت آب به مواد سیمانی انتخابی در این تحقیق، با هدف ذکر شده و در شرایط آزمایشگاهی انتخاب گردید. با این وجود، مقدار انتخابی از حداکثر نسبت آب به مواد سیمانی مجاز روسازی های بتنی (مندرج در جدول ۳) کمتر بوده و از این نظر در حدود ضابطه ی ۷۳۱ قرار دارد. از آنجا که حفظ اسلامپ مخلوط های بتنی شاهد و الیافی در یک بازه ی مشخص و استاندارد، از تغییرات هوای ناخواسته در این مخلوط ها جلوگیری کرده و در نتیجه خطای ناشی از این هوا بر نتایج تحقیق را به حداقل می رساند، از این جهت میزان اسلامپ هدف مخلوط های بتنی روسازی در بازه ی 60 ± 20 میلیمتر در نظر گرفته شد. بازه ی در نظر گرفته شده در حدود مجاز اسلامپ روسازی بتنی درزدار (جدول ۳) است.

گرفت. در شکل ۴، ارزیابی اسلامپ مخلوط های بتنی به منظور تعیین میزان مصرف لازم ماده ی افزودنی فوق روان کننده را نشان می دهد.



شکل ۴. ارزیابی کارایی مخلوط های بتن روسازی بتنی درزدار مطابق با استاندارد ASTM C143

در جدول ۴، اطلاعات مربوط به طرح های اختلاط بتنی روسازی بتنی درزدار ساده (شاهد) و مسلح به الیاف فلزی (الیافی) مورد بررسی در این تحقیق را نشان می دهد. در این تحقیق، طرح اختلاط روسازی بتنی درزدار ساده با علامت SF0 و طرح اختلاط بتن روسازی بتنی درزدار مسلح به الیاف در مقدار مصرف ۱۵ و ۲۵ کیلوگرم در متر

مکعب به ترتیب با علامت SF15 و SF25 نمایش داده میشود. مراحل ساخت مخلوط های بتنی بدین ترتیب انجام گرفت: در ابتدا، مصالح سنگی و سیمان به صورت خشک و به مدت ۲ دقیقه اختلاط شدند. سپس، نیمی از آب طرح اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه ی دیگر، عملیات اختلاط ادامه یافت. سپس نیم دیگر آب طرح به همراه ماده ی افزودنی حل شده در آن، به مخلوط اضافه شده و عملیات اختلاط برای ۴ دقیقه انجام شد. در انتها، الیاف فلزی به مخلوط بتنی اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه عملیات اختلاط انجام شد. پس از اتمام عملیات اختلاط، تا پایان مراحل ساخت نمونه های آزمایش، عملیات اختلاط ادامه یافته تا از کاهش کارایی مخلوط بتنی و شروع فرآیند هیدراتاسیون سیمان جلوگیری شود. در ساخت تمامی مخلوط های بتنی، سعی بر آن بود تا مراحل ذکر شده به طور مشابه انجام شود تا از خطای ناشی از اختلاط متفاوت بر نتایج تحقیق به حداقل میزان خود برسد.

جدول ۴. نسبت های اختلاط بتن روسازی بتنی درزدار ساده و الیافی

نام طرح اختلاط	معرف طرح اختلاط	آب (Kg/m ³)	سیمان (Kg/m ³)	سنگدانه ریز (Kg/m ³)	سنگدانه درشت (Kg/m ³)	سنگدانه درشت (Kg/m ³)	فوق روان کننده (Kg/m ³)	الیاف فلزی (Kg/m ³)
شاهد	SF0	۱۷۵	۳۵۰	۱۰۵۷	۵۶۴	۱۴۱	۰	۰
الیافی	SF15	۱۷۵	۳۵۰	۱۰۵۷	۵۶۴	۱۴۱	۱۵	۱۵
الیافی	SF25	۱۷۵	۳۵۰	۱۰۵۷	۵۶۴	۱۴۱	۲۵	۲۵

۴.۲. روش های آزمایشگاهی

جهت ارزیابی مقاومت و رفتار شکست خمشی روسازی های بتنی درزدار ساده (شاهد) و مسلح به الیاف فلزی (الیافی)، از روش های آزمایشگاهی استفاده گردید. در ادامه، جزئیات روش های آزمایشگاهی به کار گرفته شده در این تحقیق، ارائه می گردد.

۱.۲. آزمایش تعیین مقاومت خمشی روسازی بتنی

درزدار

مقاومت خمشی روسازی بتنی درزدار ساده و مسلح به الیاف فلزی با استفاده از روش آزمایش استاندارد ASTM C78 با استفاده از تیر های بتنی انجام گرفت. در ابتدا، تیر های بتنی به ابعاد ۱۵۰*۱۵۰*۵۰ میلیمتر و با دهانه ی موثر (L) ۴۵۰ میلیمتر مطابق با استاندارد ساخته شده و

سپس تا زمان رسیدن به سن ۲۸ روزه، در حوضچه های نگهداری در شرایط استاندارد نگهداری شدند.

پس از رسیدن سن تیر های بتنی به سن ۲۸ روزه، محل بارگذاری و تکیه گاهی در هر تیر بتنی با ابزار نشانه گذاری مشخص شده و سپس در دستگاه بارگذاری خمشی قرار داده شد. سرعت بارگذاری دستگاه مطابق با استاندارد تنظیم شده و بارگذاری تا زمان شکست تیر بتنی ادامه یافت.

مدول گسیختگی خمشی (مقاومت خمشی) هر طرح اختلاط بتن روسازی بتنی درزدار، با استفاده از رابطه ی (۱) تعیین گردید:

$$MR = \frac{P.L}{b.d^2} \quad (1)$$

که در آن، MR مدول گسیختگی خمشی بر حسب مگاپاسکال، P حداکثر نیروی وارد شده به تیر بتنی توسط دستگاه بارگذاری بر حسب نیوتن، L طول موثر تیر بتنی بر حسب میلیمتر، b عرض تیر بتنی بر حسب میلیمتر و d ارتفاع تیر بتنی بر حسب میلیمتر است. تعداد ۳ تیر از هر طرح اختلاط بتن روسازی بتنی درزدار، ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفت. شکل ۵، آزمایش ارزیابی مقاومت خمشی روسازی بتنی درزدار مورد بررسی در این تحقیق را نشان می دهد.



شکل ۵. ارزیابی مقاومت خمشی روسازی بتنی درزدار مطابق با استاندارد ASTM C78

۲.۲. آزمایش ارزیابی عملکرد و رفتار خمشی روسازی بتنی درزدار

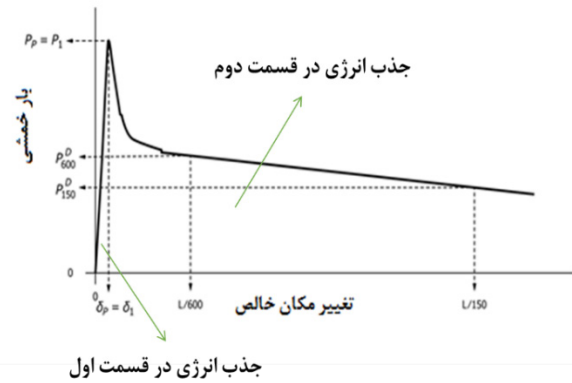
عملکرد و رفتار روسازی های بتنی درزدار ساده و مسلح به الیاف فلزی تحت بارگذاری خمشی با استفاده از آزمایش استاندارد ASTM C1609 با استفاده از تیر های بتنی انجام گرفت. در این آزمایش، رفتار هر تیر بتنی تحت بارگذاری خمشی، قبل و بعد از شکست تیر بتنی مورد ارزیابی قرار می گیرد. مشخصات تیر های بتنی مورد استفاده در این آزمایش مشابه با تیر های بتنی در آزمایش تعیین مقاومت خمشی در قسمت ۱.۲ است. پس از ساخت تیر های بتنی، این تیر ها تا زمان رسیدن به سن ۲۸ روزه، در حوضچه های نگهداری در شرایط استاندارد نگهداری شدند.

پس از رسیدن سن تیر های بتنی به ۲۸ روز و مشخص نمودن محل بارگذاری و تکیه گاهی بر روی هر تیر با ابزار نشانه گذاری، سرعت بارگذاری دستگاه آزمایش تعیین عملکرد خمشی مطابق با استاندارد تنظیم گردید. سیستم بارگذاری دستگاه آزمایش تعیین عملکرد خمشی بتن مشابه با سیستم بارگذاری تعیین مقاومت خمشی بتن است. در این دستگاه، یک حسگر جهت ثبت تغییر مکان خالص تیر در هنگام آزمایش وجود دارد. مقدار بار و تغییر مکان متناظر با آن در هنگام آزمایش در رایانه ی متصل به دستگاه آزمایش ثبت می گردد.

پس از قرار دادن تیر بتنی در دستگاه و شروع بارگذاری، تغییرات نیرو- تغییر مکان خالص تیر بتنی، توسط دستگاه ثبت می شود. پس از رسیدن به میزان بار شکست تیر، بارگذاری ادامه یافته و مقادیر بار متناظر با تغییر مکان های خالص ۰.۵، ۰.۷۵، ۱ و ۱.۲۵ میلیمتر ثبت می گردد. بارگذاری تیر بتنی تا رسیدن تغییر مکان خالص آن به میزان ۳ میلیمتر، ادامه می یابد. شکل ۶، نمای شماتیک نمودار نیرو- تغییر مکان خالص به دست آمده از آزمایش تعیین عملکرد خمشی بتن را نشان می دهد.



شکل ۶. دستگاه آزمایش ارزیابی عملکرد خمشی بتن مطابق با استاندارد ASTM C1609 به همراه نمونه ی تحت آزمایش



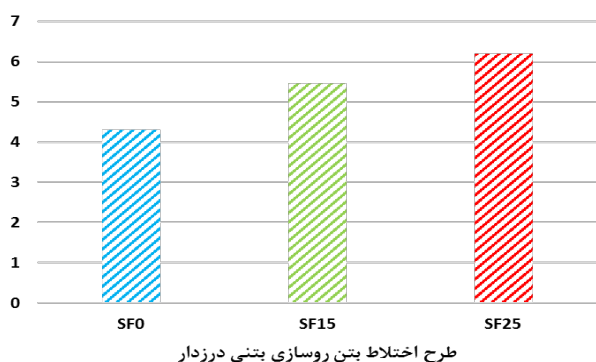
شکل ۶. نمای شماتیک نمودار نیرو- تغییر مکان در آزمایش تعیین عملکرد خمشی مطابق با استاندارد [30] ASTM C1609

با توجه به شکل ۶، جذب انرژی استاتیکی و قابلیت باربری پس از ترک خوردگی تیر بتنی تحت بارگذاری خمشی با استفاده از متغیر طاقت خمشی^۱ ارزیابی شده و به صورت سطح زیر نمودار بار-تغییر مکان خالص، از تغییر مکان خالص ۰ تا ۳ میلیمتر، تعریف می گردد. این متغیر توسط دستگاه آزمایش محاسبه و تعیین می شود. مطابق با شکل ۶، انرژی جذب شده توسط تیر بتنی، مجموع انرژی جذب شده در دو قسمت متفاوت است. قسمت اول جذب انرژی قبل از شکست بوده که شامل انرژی جذب شده از لحظه ای بارگذاری (تغییر مکان خالص صفر) تا رسیدن تغییر مکان خالص تیر به مقدار متناظر با بار حداکثر (δ_p) است. قسمت دوم شامل جذب انرژی پس از شکست بتن بوده که نشان دهنده ی قابلیت باربری پس از ترک خوردگی آن است و شامل انرژی جذب شده از تغییر مکان خالص بار حداکثر تا تغییر مکان ۳ میلیمتر (۱/۱۵۰ دهانه ی موثر) است. شکل ۷، دستگاه آزمایش ارزیابی عملکرد خمشی بتن به همراه نمونه ی تحت آزمایش را نشان می دهد.

۳. نتایج و بحث

در این قسمت نتایج به دست آمده از آزمایش های تعیین مقاومت خمشی و عملکرد خمشی طرح های اختلاط بتن روسازی بتنی ساده و ییافی، تجزیه و تحلیل شده و سپس مورد بحث واقع می گردد. شکل ۸ مقادیر مقاومت خمشی روسازی های بتنی درزدار ساده و مسلح به الیاف فلزی در مقادیر مختلف الیاف را نشان می دهد. با توجه به نتایج این نمودار، مشاهده می شود که استفاده از الیاف فلزی باعث افزایش محسوس مقاومت خمشی روسازی بتنی درزدار، می شود. با افزودن الیاف فلزی در مقدار مصرف ۱۵ و ۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب، مقاومت خمشی به ترتیب به میزان ۲۷ و ۴۴ درصد نسبت به روسازی بتنی درزدار شاهد افزایش می یابد. علت این موضوع می تواند به این دلیل باشد که افزودن الیاف در مخلوط بتنی باعث مسلح سازی ماتریس سیمانی می گردد. این مورد باعث می شود تا در هنگام بارگذاری خمشی، سختی ماتریس سیمان افزایش یافته و در نتیجه میزان بار قابل تحمل مخلوط بتنی افزایش یابد. همچنین، الیاف فلزی با قرار گیری در محل

تعدادل رسیده و پس از آن، کاهش مقاومت خمشی روسازی بتنی درزدار رخ دهد. این موضوع که در انتخاب مصرف مناسب الیاف اهمیت داشته، نیازمند بررسی و تحقیق بیشتر است.



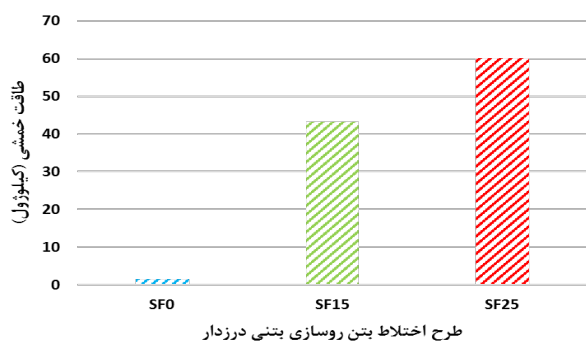
شکل ۸. مقاومت خمشی طرح های اختلاط بتن روسازی بتنی ساده و الیاف در مقادیر مختلف الیاف

شکل ۹ مقادیر سختی خمشی طرح های اختلاط بتن روسازی بتنی درزدار ساده و مسلح به الیاف فلزی در مقادیر مختلف الیاف را نشان می دهد. با توجه به نتایج این نمودار، مشاهده می شود که مسلح سازی روسازی بتنی درزدار به الیاف فلزی باعث افزایش چشمگیر جذب انرژی استاتیکی آن تحت بارگذاری خمشی می گردد. با افزودن الیاف در مقادیر مصرف ۱۵ و ۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب، جذب انرژی استاتیکی روسازی بتنی درزدار الیافی تحت بارگذاری خمشی نسبت به روسازی بتنی درزدار ساده به ترتیب به میزان ۲۷ و ۳۸ برابر، افزایش می یابد. جذب انرژی استاتیکی روسازی بتنی درزدار تحت بار خمشی را می تواند در دو قسمت (مطابق با شکل ۶) تجزیه و تحلیل کرد. قسمت اول، جذب انرژی استاتیکی از لحظه ی شروع بارگذاری تا رسیدن به حداکثر میزان بار خمشی (بار شکست) و ایجاد شکست در بتن است. تاثیر افزودن الیاف در تغییرات بهبود جذب انرژی قسمت اول در روسازی بتنی درزدار الیافی، مشابه با اثرات افزودن الیاف در تغییرات مقاومت خمشی آن (شکل ۸) است. با توجه به این موضوع می توان عنوان کرد که با افزودن الیاف فلزی،

میکرو ترک های به وجود آمده در هنگام اعمال بار خمشی، از بازشدگی سریع تر این ترک ها و تشکیل ماکرو ترک ها که منجر به شکست کلی بتن شده، جلوگیری می کند. به بیان دیگر، با مسلح سازی مخلوط بتنی به الیاف فلزی، زمان تشکیل میکرو و ماکرو ترک در محل بارگذاری خمشی، نسبت به بتن ساده، به تاخیر افتاده و این امر منجر به تحمل بار بیشتر قطعه ی بتنی می گردد. در نتیجه مقاومت خمشی بتن مسلح به الیاف فلزی افزایش می یابد.

با توجه به نتایج شکل ۸، دیده می شود که تغییرات نسبی مقاومت خمشی روسازی بتنی درزدار، در بازه های مختلف مصرف الیاف با یکدیگر متفاوت است. با افزودن الیاف در بازه ی ۰ تا ۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب، مقاومت خمشی به میزان ۲۷ درصد افزایش داشته، در حالی که با مصرف الیاف در بازه ی ۱۵ تا ۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب، افزایش نسبی مقاومت خمشی به میزان ۱۴ درصد رخ می دهد. این موضوع حاکی از آن است که روند افزایشی مقاومت خمشی روسازی بتنی درزدار با مصرف بیشتر الیاف، کاهش می یابد. افزودن بیشتر الیاف، به معنی افزایش تعداد الیاف در مخلوط بتنی است. با افزایش تعداد الیاف در ماتریس سیمانی، نواحی انتقال بین سطحی بیشتری در آن تشکیل شده که این مورد می تواند باعث کاهش خصوصیات مقاومتی مخلوط بتنی گردد. همچنین، افزایش تعداد الیاف در مخلوط بتنی، باعث افزایش تخلخل در بتن می شود. در نتیجه مقاومت مخلوط بتنی می تواند تحت تاثیر این موضوع، کاهش یابد. با استفاده از این نتایج می توان این گونه عنوان کرد که با افزایش تعداد الیاف از یک میزان مشخص (در اینجا ۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب)، اثر منفی الیاف در کاهش خصوصیات مقاومتی شروع به کاهش اثر مثبت آن در افزایش سختی ماتریس سیمان و مقاومت خمشی می کند. انتظار می رود که با افزودن بیشتر الیاف، اثرات مثبت و منفی مسلح سازی مخلوط بتنی با الیاف به

موضوع را بیان کرد. اول این که قابلیت باربری پس از ترک خوردگی روسازی بتنی درزدار با مسلح سازی به الیاف فلزی، نسبت به روسازی بتنی ساده افزایش چشمگیری پیدا می کند. دوم این که اثر الیاف در بهبود رفتار پس از ترک خوردگی روسازی بتنی درزدار نسبت به رفتار پیش از ترک خوردگی آن بیشتر و چشمگیر تر است. بنابراین، الیاف فلزی تاثیر بیشتری در افزایش مقاومت پس از ترک خوردگی روسازی بتنی درزدار تحت بار خمشی، نسبت به افزایش مقاومت قبل از ترک خوردگی آن دارد. موضوع سوم عملکرد خوب الیاف فلزی در انجام عمل پل زدن در دهانه ی ترک خوردگی و انتقال بار مناسب در دو طرف دهانه بوده به طوری که باعث شده تا افزایش جذب انرژی استاتیکی روسازی در قسمت دوم چشمگیر تر از جذب انرژی در قسمت اول باشد.



شکل ۹. جذب انرژی استاتیکی طرح های اختلاط بتن روسازی بتنی ساده و الیاف در مقادیر مختلف الیاف

با توجه به شکل ۹ دیده می شود که میزان تغییرات جذب انرژی استاتیکی در بازه های مصرف مختلف الیاف فلزی، با یکدیگر متفاوت است. با افزایش میزان الیاف فلزی از مقدار ۰ تا ۱۵ و از ۱۵ تا ۲۵ کیلو گرم در متر مکعب، میزان نسبی جذب انرژی استاتیکی به ترتیب ۲۷ و ۱.۳۹ برابر می شود. این موضوع نشان می دهد که افزایش تعداد الیاف در بازه ی مصرف اول (۱۵-۰)، تاثیر بسیار چشمگیر تری در افزایش جذب انرژی استاتیکی روسازی بتنی درزدار تحت بارگذاری خمشی دارد. این موضوع را می توان ناشی از دو علت در نظر گرفت. علت اول شامل افزایش تاثیر منفی

میزان انرژی قابل جذب روسازی بتنی درزدار در قسمت اول، افزایش می یابد. قسمت دوم قابلیت جذب انرژی استاتیکی روسازی بتنی درزدار، شامل جذب انرژی از لحظه ی شکست خمشی تا زمان رسیدن تغییر مکان خالص روسازی به یک مقدار مشخص (که در این تحقیق، به میزان ۳ میلیمتر بوده) است. جذب انرژی استاتیکی روسازی در قسمت دوم، بیانگر قابلیت باربری پس از ترک خوردگی روسازی است. جذب انرژی استاتیکی در این قسمت با انجام عمل پل زدن الیاف فلزی در دهانه ی ترک ایجاد شده در بتن و انتقال بار خمشی در دو طرف دهانه ی ترک، به وجود می آید. الیاف فلزی پس از ایجاد شکست در روسازی، با قرار گیری در دهانه ی ترک از گسترش سریع ترک خوردگی جلوگیری کرده و در نتیجه یک قابلیت باربری پس از ترک خوردگی در روسازی به وجود می آورد. با در نظر گرفتن مجموع قابلیت جذب انرژی استاتیکی در قسمت اول و دوم، می توان این طور بیان کرد که قابلیت جذب انرژی استاتیکی روسازی بتنی درزدار با افزودن الیاف فلزی به طور چشمگیری افزایش می یابد.

با توجه به اختلاف بین مقادیر مقاومت خمشی بتن ساده و الیافی مطابق با شکل ۸، با مقادیر جذب انرژی استاتیکی بتن ساده و الیافی مطابق با شکل ۹، می توان عنوان کرد که با افزودن الیاف فلزی، قابلیت جذب انرژی در قسمت دوم افزایش بیشتری نسبت به قسمت اول پیدا می کند. به بیان دیگر، قابلیت جذب انرژی استاتیکی در قسمت دوم سهم محسوس تری در تغییرات جذب انرژی کل (طاقب خمشی) نسبت به سهم قابلیت جذب انرژی در قسمت اول دارد. به همین علت، میزان جذب انرژی کل یا طاقب خمشی (مجموع جذب انرژی قسمت اول و دوم) روسازی بتنی ساده در مقایسه با روسازی بتنی درزدار مسلح به الیاف فلزی به میزان محسوسی تفاوت دارد. از آن جا که قابلیت جذب انرژی در قسمت دوم، نشان دهنده ی قابلیت باربری پس از ترک خوردگی روسازی بوده، می توان سه

۴. نتیجه گیری

- در این تحقیق به ارزیابی بهبود عملکرد خمشی، قابلیت جذب انرژی استاتیکی و ظرفیت باربری پس از ترک خوردگی روسازی های بتنی درزدار مسلح شده به الیاف فلزی در مقادیر مصرف مختلف، شامل ۰، ۱۵ و ۲۵ کیلوگرم در متر مکعب، پرداخته شد. مهم ترین نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر به شرح زیر است:
- دیده شد که با افزودن الیاف به مقدار ۲۵ کیلوگرم در متر مکعب، مقاومت خمشی روسازی بتنی ساده به میزان ۴۴ درصد افزایش یافت (شکل ۸). این موضوع نشان داد که مقاومت خمشی روسازی بتنی درزدار مسلح به الیاف فلزی به میزان قابل توجهی افزایش می یابد.
- نتایج نشان داد که میزان افزایش نسبی مقاومت خمشی روسازی بتنی درزدار در بازه ی مصرف الیاف ۱۵-۰ و ۲۵-۱۵ کیلوگرم به ترتیب به میزان ۲۷ و ۱۴ درصد رخ داد (شکل ۸). این موضوع بیانگر کاهش روند افزایشی مقاومت خمشی روسازی بتنی درزدار مسلح به الیاف فلزی، پس از مصرف بیشتر الیاف از یک میزان مشخص بود. این میزان مشخص الیاف در این تحقیق به مقدار ۱۵ کیلوگرم در متر مکعب به دست آمد.
- مشاهده شد که با مصرف الیاف فلزی به میزان ۲۵ کیلوگرم در متر مکعب، جذب انرژی استاتیکی روسازی بتنی ساده تحت بارگذاری خمشی به میزان ۳۸ برابر، افزایش یافت (شکل ۹) که این موضوع حاکی از اثر چشمگیر الیاف فلزی در افزایش جذب انرژی استاتیکی روسازی بتنی درزدار تحت بارگذاری خمشی بود.
- با بررسی نتایج دیده شد که با افزودن الیاف فلزی، افزایش قابلیت جذب انرژی پس از ترک خوردگی روسازی های بتنی درزدار، چشمگیر تر از افزایش قابلیت جذب انرژی قبل از شکست آن اتفاق افتاد (شکل ۸ و ۹). این موضوع افزایش محسوس قابلیت باربری پس از ترک

افزودن الیاف در ایجاد نواحی انتقال بین سطحی بیشتر و افزایش تخلخل در ماتریس سیمان بوده که باعث کاهش خصوصیات مقاومتی بتن می گردد. در نتیجه، این موضوع بر اثر مثبت الیاف در افزایش جذب انرژی استاتیکی تاثیر منفی گذاشته و از اثر افزایشی آن می کاهد. علت دوم، می تواند این موضوع باشد که پس از افزایش تعداد الیاف از یک میزان مشخص در مخلوط بتنی، نقش تعداد الیاف در افزایش جذب انرژی قبل و بعد از شکست بتن، کم رنگ می شود. به بیان دیگر، پس از مصرف یک مقدار مشخص الیاف، اثر مثبت الیاف به حد نهایی خود رسیده و نیاز است تا رویکرد دیگری در کنار الیاف به منظور افزایش بیشتر جذب انرژی استاتیکی بیشتر در بتن، به کار گرفته شود. همانطور که در قسمت قبل عنوان شد، رفتار جذب انرژی قبل از شکست (قسمت اول) روسازی بتنی درزدار ساده با افزودن الیاف مشابه با رفتار تغییر مقاومت خمشی آن است. دیده می شود که اختلاف بین میزان افزایشی نسبی مقاومت خمشی روسازی در بازه ی ۱۵-۰ (۲۷ درصد) با بازه ی ۲۵-۱۵ (۱۴ درصد) است. همچنین اختلاف بین میزان افزایش نسبی جذب انرژی استاتیکی در بازه ی ۱۵-۰ (۲۷ برابر) با بازه ی ۲۵-۱۵ (۱.۳۹ برابر). با توجه به این مقادیر می توان این طور استنباط کرد که پس از افزودن بیشتر الیاف از یک حد مشخص (در اینجا ۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب)، افت اثر مثبت افزودن الیاف فلزی بیشتر در جذب انرژی پس از ترک خوردگی بتن، نسبت به جذب انرژی قبل از ترک آن رخ می دهد. به بیان دیگر، با افزودن تعداد الیاف از یک مقدار مشخص، کاهش روند افزایشی جذب انرژی استاتیکی پس از ترک خوردگی روسازی به میزان بیشتر و چشمگیر تری نسبت به کاهش روند افزایشی جذب انرژی قبل از شکست، اتفاق می افتد. لازم به ذکر است که بررسی بیشتر این موضوع نیاز به انجام تحقیقات آتی در این زمینه دارد.

• بررسی نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می دهد که با مسلح سازی روسازی های بتنی درزدار با الیاف فلزی در مقدار مصرف مناسب، می توان عملکرد خمشی، قابلیت جذب انرژی استاتیکی تحت بارگذاری خمشی و ظرفیت باربری پس از ترک خوردگی این روسازی ها را به میزان قابل توجهی بهبود بخشید.

• با وجود عملکرد مناسب الیاف فلزی در این تحقیق، نگرانی هایی مانند حفظ عملکرد این نوع الیاف در بهبود عملکرد پس از ترک خوردگی بتن در میان و بلند مدت، به ویژه برای سازه های بتنی که در معرض هوای آزاد و محیط های خورنده قرار میگیرند، وجود دارد. بنابراین نیاز است تا بررسی ها و تمهیدات لازم قبل از به کارگیری این الیاف در این سازه ها انجام گیرد.

خوردگی روسازی بتنی درزدار با مسلح سازی به الیاف فلزی را نشان داد.

• مشاهده شد که قابلیت جذب انرژی استاتیکی روسازی بتنی درزدار در بازه ی مصرف الیاف ۰-۱۵ و ۱۵-۲۵ کیلوگرم در متر مکعب به طور نسبی به ترتیب به میزان ۲۷ و ۱۰۳۹ برابر افزایش یافت (شکل ۹). این مورد، بیانگر کاهش چشمگیر روند افزایشی قابلیت جذب انرژی استاتیکی روسازی بتنی درزدار مسلح به الیاف فلزی، پس از افزودن یک مقدار مشخص الیاف بود.

• بررسی نتایج نشان داد که با مصرف بیشتر الیاف از یک مقدار مشخص، که در اینجا ۱۵ کیلوگرم در متر مکعب به دست آمد، کاهش روند افزایشی قابلیت جذب انرژی پس از ترک خوردگی روسازی بتنی درزدار بیشتر از کاهش روند افزایشی قابلیت جذب انرژی قبل از ترک خوردگی آن رخ می دهد.

منابع

- [1] R. Salameh, Y. (James) Tsai, *Enhancing Decision-Making on Maintenance, Rehabilitation, and Reconstruction of Jointed Plain Concrete Pavements using Slab-Based Cracking Data and Life-Cycle Cost Analysis*, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board.* 2674 (2020) 511–522. <https://doi.org/10.1177/0361198120925068>.
- [2] G.A. Arce, H. Noorvand, M.M. Hassan, T. Rupnow, N. Dhakal, *Feasibility of low fiber content PVA-ECC for jointless pavement application*, *Constr. Build. Mater.* 268 (2021) 121131. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121131>.
- [3] وزارت راه و شهرسازی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، (۱۳۹۶). "دستورالعمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راهه ها، ضابطه ی شماره ۷۳۱". معاونت فنی، امور زیربنایی و تولیدی
- [4] P. V. Vijay, H. Li, V.H. GangaRao, *Laboratory testing, field construction, and decade long performance evaluation of jointed plain concrete pavement with FRP dowels*, *Int. J. Pavement Eng.* 21 (2020) 713–724. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1508841>.
- [5] M.S. Eisa, M.E. Basiouny, A.M. Youssef, *Improvement of load carrying capacity of concrete pavement slabs using macro synthetic fibers*, *Coatings.* 11 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11070833>.
- [6] M. Khan, M. Ali, *Effectiveness of hair and wave polypropylene fibers for concrete roads*, *Constr. Build. Mater.* 166 (2018) 581–591. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.167>.
- [7] B. Alam, İ.Ö. Yaman, *Fatigue performance of PVA fibre reinforced cementitious composite overlays*, *Int. J. Pavement Eng.* 22 (2021) 822–828. <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1647341>.
- [8] Y. Paluri, V. Noolu, H. Mudavath, R. Kumar Pancharathi, *Flexural Fatigue Behavior of Steel Fiber-*

- Reinforced Reclaimed Asphalt Pavement–Based Concrete: An Experimental Study, Pract. Period. Struct. Des. Constr.* 26 (2021) 04020053. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)sc.1943-5576.0000540](https://doi.org/10.1061/(asce)sc.1943-5576.0000540).
- [9] N. Salemi, K. Behfarnia, *Effect of nano-particles on durability of fiber-reinforced concrete pavement, Constr. Build. Mater.* 48 (2013) 934–941. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.037>.
- [10] P.S. S.A Kanalli, Ramu Palankar, Bharath Kumar, Praveen Kumar, *Comparative Study of Polymer Fibre Reinforced Concrete With Conventional Concrete Pavement, Int. J. Res. Eng. Technol.* 03 (2014) 139–143. <https://doi.org/10.15623/ijret.2014.0301022>.
- [11] S. Wtaife, A. Alsabbagh, *Analysis of Flexural Capacity of Fiber Reinforced Concrete Pavements, Int. J. Technol. Eng. Stud.* 4 (2018) 203–210. <https://doi.org/10.20469/ijtes.4.10001-6>.
- [12] Q. Xiaochun, L. Xiaoming, C. Xiaopei, *The applicability of alkaline-resistant glass fiber in cement mortar of road pavement: Corrosion mechanism and performance analysis, Int. J. Pavement Res. Technol.* 10 (2017) 536–544. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.06.003>.
- [13] J. LaHucik, S. Dahal, J. Roesler, A.N. Amirkhani, *Mechanical properties of roller-compacted concrete with macro-fibers, Constr. Build. Mater.* 135 (2017) 440–446. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.212>.
- [14] M.O. Kim, A.C. Bordelon, *Age-dependent properties of fiber-reinforced concrete for thin concrete overlays, Constr. Build. Mater.* 137 (2017) 288–299. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.097>.
- [15] M. Ahmadi, S. Farzin, A. Hassani, M. Motamedi, *Mechanical properties of the concrete containing recycled fibers and aggregates, Constr. Build. Mater.* 144 (2017) 392–398.
- [16] R. Chan, M.A. Santana, A.M. Oda, R.C. Paniguel, L.B. Vieira, A.D. Figueiredo, I. Galobardes, *Analysis of potential use of fibre reinforced recycled aggregate concrete for sustainable pavements, J. Clean. Prod.* 218 (2019) 183–191.
- [17] M. Khan, A. Rehman, M. Ali, *Efficiency of silica-fume content in plain and natural fiber reinforced concrete for concrete road, Constr. Build. Mater.* 244 (2020) 118382. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118382>.
- [18] N. Suksawang, A. Alsabbagh, A. Shaban, S. Wtaife, *Using post-cracking strength to determine flexural capacity of ultra-thin whitetopping (UTW) pavements, Constr. Build. Mater.* 240 (2020) 117831. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117831>.
- [19] B.K. Shukla, A.R. Bhowmik, P.K. Sharma, Abhimanyu, *Use of waste synthetic fiber reinforcement in environmental friendly and economic pavement construction, J. Green Eng.* 10 (2020) 62–75.
- [20] S. Fiber, R. Concrete, M. Karakouzian, *Application of Ultrasonic Measurements for the Evaluation of Steel Fiber Reinforced Concrete, (2021)*.
- [21] V. Ortega-López, J.A. Fuente-Alonso, A. Santamaría, J.T. San-José, Á. Aragón, *Durability studies on fiber-reinforced EAF slag concrete for pavements, Constr. Build. Mater.* 163 (2018) 471–481. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.121>.
- [22] W. Kim, J.C. Jeon, B.H. An, J.H. Lee, H. Do Kim, C.G. Park, *Effects of Reinforcing Fiber and Microsilica on the Mechanical and Chloride Ion Penetration Properties of Latex-Modified Fiber-Reinforced Rapid-Set Cement Concrete for Pavement Repair, Adv. Mater. Sci. Eng.* 2018 (2018). <https://doi.org/10.1155/2018/6839350>.
- [23] H. Rooholamini, A. Hassani, M.R.M. Aliha, *Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology, Constr. Build. Mater.* 159 (2018) 517–529. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.002>.

- [24] L. Lanzoni, A. Nobili, A.M. Tarantino, *Performance evaluation of a polypropylene-based draw-wired fibre for concrete structures*, *Constr. Build. Mater.* 28 (2012) 798–806. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.017>.
- [25] J.R. Roesler, S.A. Altoubat, D.A. Lange, K.A. Rieder, G.R. Ulreich, *Effect of synthetic fibers on structural behavior of concrete slabs-on-ground*, *ACI Mater. J.* 103 (2006) 3–10. <https://doi.org/10.14359/15121>.
- [26] M. Madhkhan, R. Azizkhani, M.E. Torki Harchegani, *Effects of pozzolans together with steel and polypropylene fibers on mechanical properties of RCC pavements*, *Constr. Build. Mater.* 26 (2012) 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.009>.
- [27] P. Sukontasukkul, U. Chaisakulkiet, P. Jamsawang, S. Horpibulsuk, C. Jaturapitakkul, P. Chindapasirt, *Case investigation on application of steel fibers in roller compacted concrete pavement in Thailand*, *Case Stud. Constr. Mater.* 11 (2019) e00271. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00271>.
- [28] C.K. Lau, A. Chegenizadeh, T.N.S. Htut, H. Nikraz, *Performance of the steel fibre reinforced rigid concrete pavement in fatigue*, *Buildings.* 10 (2020) 1–18. <https://doi.org/10.3390/buildings10100186>.
- [29] B. Ali, L.A. Qureshi, R. Kurda, *Environmental and economic benefits of steel, glass, and polypropylene fiber reinforced cement composite application in jointed plain concrete pavement*, *Compos. Commun.* (2020) 100437.
- [30] ASTM, *ASTM C1609 / C1609M-19a, Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org, (2019). https://doi.org/10.1520/C1609_C1609M-19A.

بررسی موردی تاثیر کانی‌شناسی بر پخت کلینکر سیمان پرتلند نوع ۲ و بتن

با استفاده از مطالعات میکروسکوپی مقطع نازک



بهار میرزازاده

رئیس سابق تنظیم مواد، آزمایشگاه شیمی و X-Ray
مجتمع صنعتی سیمان تهران



علی اکبر کفاش بازاری

رئیس مرکز تحقیق و توسعه
مجتمع صنعتی سیمان تهران
عضوانجمن بتن ایران

چکیده

پر واضح است که سیمان نقش بسیار مهمی در رئولوژی بتن تازه و سخت شده دارد که معمولاً به مشخصات ریزساختاری کلینکر آن توجه کمتری می‌شود. تولیدکنندگان سیمان به کمک آنالیز شیمیائی XRF مواد خام و روابط بوگ، مقادیر فازهای کلینکر را تخمین و محاسبه می‌نمایند، اما ممکن است بطور عملیاتی حاصل نشود. گاه دو سالن سنگ با آنالیز شیمیائی مشابه، شرایط پخت کلینکر متفاوتی در کوره را نشان می‌دهد. علت اصلی این موضوع تفاوت در کانی‌شناسی سالن سنگ است. در این مطالعه بومی، ۸ سری نمونه خوراک کوره و کلینکر از ۸ سالن سنگ مختلف تهیه شدند. شرایط تولید در نمونه برداری‌ها ثبت گردید. مطالعات میکروسکوپی به روش اوتو و آنالیز شیمیائی و XRD آنها انجام شدند. مطالعات میکروسکوپی کلینکر و تعیین فازها نیز انجام گردید. در مرحله بعدی مخلوطهای بتن آزمایشگاهی با اسلامپ ثابت ساخته شدند و مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه تعیین گردید. سپس ارتباط کیفیت کلینکر به کمک شاخص مقادیر فازها به دو روش مذکور و شرایط پخت مقایسه شدند. طبق نتایج مشخص گردید در مواردی که کانی‌های کوارتز، فلدسپات‌های قلیائی، آهن دار و رسی کمتر بودند، شرایط بهره‌برداری کوره و پخت پذیری نسبتاً بهتر بود. بالاترین مقاومت فشاری در مخلوطهای بتنی از بهترین کلینکر از منظر میکروسکوپی و نه صرفاً از نظر آنالیز شیمی حاصل شد. لذا با رصد دقیق کانی‌شناسی، می‌توان به شرایط مطلوب پخت کوره (از نظر بهره‌برداری)، کیفیت بهتر در کلینکر و سیمان دست یافت.

کلمات کلیدی: کلینکر، آلیت، مینرالوژی، پخت پذیری.

شد. اما در عمل علیرغم کنترل دقیق در تنظیم مواد در هر سالن سنگ انباشتی، مشاهده می‌شود که برخی اوقات شرایط پخت از حالت عادی خارج می‌گردد و تصور بر آنست که علت این موضوع، تغییرات در مواد خام می‌باشد.

۱- مقدمه

بر اساس تجربیات مختلف، تامین مواد خام مناسب و یکنواخت منجر به پخت کلینکر با شرایط مطلوب خواهد

بطور مثال طی مصرف مواد خام یکسان سالن سنگ^۱ برای تولید کلینکر، علیرغم یکنواختی در آنالیز شیمیائی، شرایط پخت بطور ناگهانی تغییر می‌یابد... هدف اصلی مطالعه آنست که روشن شود تغییرات اندک در آنالیز شیمیائی و کانی‌شناسی مواد خام تا چه حد منجر به تغییرات در شرایط پخت می‌شود. در این راستا، ارتباط نتایج میکروسکوپی به روش اونو در فرآیند کنترل تولید سیمان جستجو شده است.

۲- مبانی علمی و تحقیقات قبلی

از مهمترین عوامل موثر بر کیفیت سیمان، میزان فازهای کلینکر آن می‌باشد. پر واضح است که فازهای کلینکر (یا خوراک کوره) در آنالیز شیمی بر طبق روابط بوگ محاسبه می‌شوند، اما در مطالعات میکروسکوپی بطور مستقیم مشاهده می‌گردند. روش‌های میکروسکوپی برای تعیین کمی درصد فازهای کلینکر سیمان پرتلند و سایر مواد ترکیبی، اگرچه زمان‌بر است، اما از معتبرترین تکنیک‌های موجود می‌باشد [۱].

در تولید سیمان، جهت دستیابی به یک محصول با کیفیت، باید در تمامی فرآیند از جمله شناسائی و تنظیم مواد، سایش آنها، پخت کلینکر و سایش سیمان پایش‌های منظمی صورت پذیرد. در این زمینه حتی کیفیت سایش مواد خام بر کیفیت کلینکر حاصل از پخت آن، تاثیرگذار می‌باشد [۲-۳]. آنچنان‌که حداکثر مجاز ابعاد دانه‌های مواد خام در تولید سیمان پرتلند معمولی ۲۰۰-۱۰۰ میکرون و در سیمان با مقاومت بالا ۶۰-۵۰ میکرون است [۴].

از دیدار مقدار سیلیس آزاد و کانی‌های مزاحم با ابعاد درشت‌تر از ۴۵ میکرون در مواد خام موجب پخت‌پذیری نامناسب و افزایش مقدار انرژی مصرفی در کوره می‌گردد. حضور این کانی‌ها باعث افزایش درصد آهک آزاد در کلینکر سیمان پرتلند می‌شود که می‌تواند باعث بروز اثرات مخربی

در سیمان شود. اگر با تغییر شرایط آسیای مواد، توزیع دانه‌بندی مواد تغییر یابد بطوریکه درصد باقی‌مانده روی الک ۴۵ میکرون آن مثلاً از ۳۸٪ به ۳۲٪ کاهش یابد؛ با افزایش نرمی مواد و کاهش درصد کانی‌های مزاحم روی الک ۴۵ میکرون مواد خام، قابلیت پخت‌پذیری مواد خام افزایش یافته و سطح انرژی مصرفی پخت و درصد آهک آزاد کلینکر نیز کاهش می‌یابد. باید دقت داشت که همواره کاهش نرمی مواد خام مطلوب نمی‌باشد؛ زیرا که با افزایش نرمی مواد، ذرات ریز (اصطلاحاً غباری) باعث مشکلات شرایط بهره‌برداری در کوره می‌گردد. مطابق پروژه مطالعاتی گسترده صورت گرفته به کمک پروفیسور کمپل در کارخانه سیمان گابز (تونس-لیبی) پیشنهاد شده است که نرمی مواد خام برای ذرات مانده روی ۱۰۰ میکرون در تولیدی مذکور حدود ۱۳٪ تا ۱۵٪ باشد (نوامبر ۲۰۱۵) [۵]. البته اندازه کانی‌های گروه سیلیس آزاد (شامل کوارتز، چرت، فلینت و غیره) و کانی‌های مزاحم (AK شامل فلدسپات‌ها، فرومنیزین‌ها و غیره) در مواد خام باید تا حد امکان کوچکتر از ۴۵ میکرون (در حد سیلت) و دانه‌های کلیست ریزتر از ۱۲۵ میکرون باشند، زیرا منجر به ایجاد آهک آزاد در کلینکر [۶] و افت کیفیت محصول نهائی خواهد شد.

یکی از مهمترین عوامل کنترل کیفی کلینکر سیمان پرتلند، آهک آزاد می‌باشد. آهک آزاد یا CaO آزاد همان اکسید کلسیمی است که یا با سایر اکسیدها که در محیط کوره وجود دارند، وارد واکنش نشده است و به صورت آزاد در کلینکر باقی می‌ماند و یا حین خنک شدن کلینکر از تجزیه آلیت به بلیت ایجاد می‌شود. این مقدار آهک آزاد، اثرات مخربی را در سیمان به وجود می‌آورد که از بین آنها می‌توان به افزایش حجم سیمان در هنگام هیدراته شدن آن، افزایش زمان گیرش، افزایش روند افت اسلامپ بتن و

کاهش مقاومت سیمان اشاره کرد. آهک آزاد کلینکر یکی از مهمترین پارامترهای راهبری کوره می‌باشد. قابلیت پخت‌پذیری مواد خام، اصلی‌ترین عامل ارتباط بین مشخصات مواد خام و هدایت کوره است. ارزیابی پخت‌پذیری مواد خام به دو صورت انجام می‌شود: ۱- به کمک کوره آزمایشگاهی؛ ۲- با استفاده از روابط تجربی. پارامترهای مهم و موثر در قابلیت پخت‌پذیری مواد خام دارند، عبارتند از:

الف- تاثیر ذرات زبر کوارتز در قابلیت پخت‌پذیری مواد خام: آمادگی و پتانسیل مواد خام برای انتقالات فازی و تشکیل فازهای کلینکر به واسطه واکنش در دمای بالا توسط عواملی نظیر: ترکیب شیمیایی مواد خام، ترکیب مینرالوژی و توزیع دانه‌بندی آن تعیین می‌شود. استعداد و توانایی مواد خام برای انتقال اکسید عناصر از مواد خام به فازهای مینرالی کلینکر، پخت‌پذیری نامیده می‌شود. قابلیت پخت‌پذیری مواد خام در آزمایشگاه با قرار دادن نمونه‌های مواد خام در دماهای مختلف به ویژه ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد طی مدت مشخص (۳۰ دقیقه) انجام می‌شود. پس از سرد شدن، درصد آهک آزاد نمونه‌ها اندازه‌گیری و درصد آهک آزاد تفسیر می‌شوند. تئوری‌ها و نتایج آزمایشگاهی متعدد، نشان‌دهنده این است که پخت‌پذیری ضعیف مواد خام ناشی از وجود ذرات زبر دو نوع کانی است: ۱- گروه سیلیس آزاد؛ ۲- کلسیت ($CaCO_3$).

تشکیل فاز آلایت به عنوان اصلی‌ترین فاز کلینکر، از دمای ۱۲۸۰ درجه سانتی‌گراد شروع می‌شود. این فاز در اثر واکنش فاز بلیت با آهک آزاد در فاز مذاب می‌باشد. تاثیر ذرات زبر مواد در پخت را می‌توان با مطالعات میکروسکوپی و مشاهده توزیع فازها در کلینکر توصیف کرد. بر این اساس، اگر توزیع فازهای تشکیل دهنده کلینکر به طور کاملا یکنواخت مشاهده شود، به علت عدم وجود ذرات زبر در مواد خام است که در نتیجه آهک آزاد کاهش می‌یابد. وجود ذرات زبر کوارتز و کلسیت با ایجاد ناهمگنی موضعی

در مواد خام، باعث نقص واکنش آلایت، کاهش قابلیت پخت، افزایش آهک آزاد و نهایتاً افزایش مصرف انرژی در تولید کلینکر می‌شود.

ب- تاثیر ترکیب شیمیایی مواد خام در قابلیت پخت‌پذیری: علاوه بر تاثیر ذرات درشت مواد خام در پخت‌پذیری، ترکیب شیمیایی و درصد عناصر تشکیل دهنده مواد خام نیز در پخت اثر می‌گذارند و قابلیت پخت‌پذیری مواد خام با تغییر ترکیب شیمیایی مواد تغییر می‌کند. تفسیر اطلاعات آماری حاصل از تعداد زیادی نمونه مواد خام متفاوت، بیانگر آنست که از بین پارامترهای مختلف شیمیایی، فاکتور اشباع آهک (LSF)، مدول سیلیس (SIM) و درصد فاز مایع (LP) بیشترین تاثیر را در فرآیند پخت مواد دارند. (مدول سیلیس با درصد فاز مایع نسبت عکس دارد) [۷].

استارک و همکاران با مطالعات میکروسکوپی نشان دادند که در شرایط ثابت (آهک آزاد کمتر از ۲٪ برای کلینکر و مانده روی الک ۹۰ میکرون ۱۰٪ برای خوراک کوره) با افزایش LSF، مقدار C_3S افزایش، اما میزان C_2S کاهش می‌یابد [۸].

بطور خلاصه و بر اساس منابع علمی مختلف [۹-۲۴] موارد زیر باید برای تولید کلینکر و سیمان باشد که غالباً از اطلاعات حاصل از مطالعات میکروسکوپی قابل پایش است:

(۱) افزایش سریع دمای کوره تا حدود ۱۴۰۰-۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد توسط ابعاد و اندازه فاز آلایت مشخص می‌گردد؛ بلورهای ریز آلایت بیانگر این شرایط مطلوب است. بر این اساس سرعت گرم شدن ۷۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه و سرعت سرد شدن ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه می‌تواند الگوی مناسبی باشد (منحنی شکل ۱)؛

(۲) بی‌فررژانس (انکسار نور قرمز و آبی) یا دو شکستگی فاز آلایت، به حداکثر درجه حرارت پخت بستگی دارد؛

۶) طبق مطالعات Ono رابطه تخمین شاخص بلین در مطالعات میکروسکوپی مقطع نازک کلینکر به صورت: (رابطه ۱۳)

$$Blaine (cm^2/gr) = 1251 + 218AS + 239AB + 2.1BC$$

فاز آلایت؛ AB (Alite Birefringence): دوشکستگی یا بیرفرزانس فاز آلایت؛ BC (Belite Color): رنگ فاز بلیت بوده و به هر پارامتر بر اساس مطالعه ضریب ۴-۱ تعلق می‌گیرد؛

۷) بر اساس رابطه ONO مقاومت فشاری ۲۸ روزه بر اساس فاکتورهای میکروسکوپی کلینکر به صورت زیر تعریف می‌شود: (رابطه ۱۲)

$$\text{Compressive strength 28 days} = 258.1 + 5.23 AS + 20.7 AB + 3.41 BS + 22.2 BC$$

۳) ابعاد فاز بلیت بیانگر زمان ماندگاری مواد در منطقه پخت در دمای بالاتر از ۱۴۰۰ درجه است. بلورهای درشت بیانگر این شرایط مطلوب است؛

۴) رنگ فاز بلیت به سرعت خنک کردن اولیه کلینکر (خنک شدن کلینکر در داخل کوره و قبل از ورود آن به خنک‌کن) ارتباط دارد. خنک کردن سریع کلینکر ضروری است و رنگ روشن بلیت بیانگر این موضوع می‌باشد (جدول ۱)؛

۵) پخت آرام از طریق شعله بلند، تولید بلورهای آلایت با ابعاد بزرگ و بالعکس، پخت سریع از طریق شعله کوتاه، تولید بلورهای آلایت با ابعاد کوچک‌تر می‌نماید؛

شکل ۱- منحنی شماتیک رابطه حرارت-زمان پخت کلینکر (اونو، ۱۹۸۰)	جدول ۱- شرایط پخت و شاخصه‌های میکروسکوپی فازهای آلایت و بلیت کلینکر و تاثیر آن بر فعالیت هیدرولیکی کلینکر و سیمان-اونو، ۱۹۸۱				
	Burning condition	Hydraulic activity			
	4 Excellent (+)	3 Good (vv)	2 Average (v)	1 Poor (-)	
Heating Rate Size of alite (μm)	Quick 15-20	— 20-30	— (25) 30-40	Slow 40-60 (120)	
Maximum Temperature Birefringence of alite	High 0.010-0.008	— 0.007-0.006	— 0.006-0.005	Low 0.005-0.002	
Burning Time Size of belite (μm)	Long (20) 25-40 (60)	— (15) 20-25	— (10) 15-20	Short 5-10	
Cooling Rate Color of belite	Quick Clear (C)	— Faint yellow (FY)	— Yellow (Y)	Slow Amber (A)	
Birefringence of belite	0.012	0.015	0.017	0.018	
Content of alpha	Abundant (40%)	Medium (20%)	Few (10%)	Nil (0%)	

بالا (۲<) نبوده است. آهک آزاد پائین باعث کاهش مقاومت فشاری ۵ تا ۱۰ MPa در مقاومت فشاری ۲۸ روزه می‌گردد؛

۱۰) وجود سیلیس آزاد و کربنات درشت باعث ایجاد آشیانه بلیتی و تجمع آنها موجب خوشه بلیتی می‌شود؛

۱۱) کلینکر با آهک آزاد کم می‌تواند سایش‌پذیری در آسیا را به دنبال داشته باشد؛

۸) به نظر می‌رسد نوع کانی آهن (هماتیت، مگنتیت، گوتیت، لیمونیت و غیره) موجود در خوراک کوره نیز در شرایط پخت بد کلینکر در کوره، احیا شدن و تشکیل رینگ موثر باشد.

۹) آهک آزاد ۱/۵-۱٪ به عنوان مقدار بهینه پخت کلینکر پیشنهاد شده است، اما در هر خط تولید باید بطور بومی تعریف شود. مشکلات مطروحه در منابع برای تولید کلینکر با آهک آزاد پائین (>۵/۰) کمتر از تولید کلینکر با آهک آزاد

۱۲) وجود خوشه‌های بلیتی بیانگر کمبود یکنواختی، سایش نامناسب و سیلیس آزاد در مواد خام است و مطلوب نمی‌باشد؛

۱۳) نوسانات در ترکیب خوراک کوره (به ویژه در SIM)، منجر به گرد و خاک کردن کوره، سرد و گرم شدن آن و افزایش نرمه کلینکر (عبوری از الک ۱۵۰ میکرون) می‌شود. یکی از عارضه‌های این نوع کار کردن، بالا رفتن آهک آزاد کلینکر و افت شدید تولید و کیفیت می‌باشد؛

۱۴) با افزایش ماند مواد خام در کوره، پخت بسیار طولانی و اصطلاحاً بیش از حد^۲ اتفاق می‌افتد که احتمالاً علاوه بر تشکیل نامناسب فازها (ازدیاد آلیت با ابعاد بیش از ۵۰ میکرون و بیرفرژانس کم، کمبود فاز بلیت، ازدیاد فریت و رنگ زرد در کلینکر) به افزایش خاصیت جذب آب سیمان در بتن می‌انجامد. در نهایت برای رسیدن به کارائی و اسلامپ آب به بتن افزوده و از مقاومت بتن کاسته می‌شود.

همگن بودن ترکیب شیمیایی خوراک با مصرف سوخت، عملکرد کوره، تشکیل کلینکر و عملکرد سیمان رابطه مهمی دارد. کیفیت سیمان معمولاً با توسعه مقاومت فشاری آن در ملات و بتن ارزیابی می‌شود. برای اطمینان از کیفیت ثابت محصول و حفظ عملکرد پایدار و مداوم کوره، باید به ذخیره‌سازی و همگن‌سازی (هموژناسیون) مواد اولیه و خوراک کوره توجه شود. الادیب و ابراهیم (۲۰۱۰) تنوع ترکیب شیمیایی خوراک و تأثیر آن بر روند شبیه‌سازی تشکیل کلینکر را به کمک شبیه‌سازی و محاسبه در نرم‌افزار (Fortran 90) مطالعه نمودند. این محاسبات بر اساس داده‌های میدانی حاصل از کارخانه

سیمان مرغوب کشور لیبی با موفقیت انجام شده است [۲۵].

کوکماز (۲۰۱۹) ارزیابی خصوصیات شیمیایی، کانی‌شناسی و قابلیت پخت‌پذیری کلینکر (سنگ) مادستون (جایگزین خاک رس) را به عنوان مواد خام سیمان بررسی نمود. وی با مطالعات میکروسکوپی نتیجه گرفت که کیفیت کلینکر تهیه شده با مادستون نسبت به کلینکر تولید شده با خاک رس نسبتاً بهتر است [۲۶].

کاکعلی و همکاران (۲۰۰۵) یک مطالعه موردی از سنگ معدن ولفرامیت - استبنیت برای استفاده از مواد اولیه معدنی ثانویه در تولید سیمان را انجام دادند. این محققان امکان ورود مقادیر کمی مواد معدنی حاوی عناصر گوگرد، آنتیموان و تنگستن به مخلوط خام سیمان را به کمک مطالعات SEM³ بررسی و نتیجه‌گیری نمودند که مجموعه ولفرامیت - استبنیت باعث بهبود آهک آزاد و قابلیت پخت‌پذیری کلینکر می‌شود [۲۷].

اگرچه طیف گسترده‌ای از مواد اولیه در صنعت سیمان مورد استفاده قرار می‌گیرد، لیکن به نظر می‌رسد روند آینده استفاده از ضایعات صنعتی و ایجاد مجتمع‌های صنعتی برای تامین مواد خامی است که در آن از زباله یا محصولات جانبی یک واحد صنعتی دیگر تبدیل به ماده اولیه سیمان می‌شود. البته رفتار حرارتی مواد اولیه در وهله اول به ماهیت معدنی آنها وابسته است. دما، و انرژی موردنیاز برای تجزیه سنگ آهک، به کانی‌شناسی و ریزساختار آن بستگی دارد. میزان واکنش‌های تشکیل کلینکر نیز به فرم بلوری معدنی اجزای آلومینوفروسیلیکات خوراک کوره بستگی دارد. همزمانی تفکیک کربنات و تجزیه حرارتی کانی‌های آلومینوفروسیلیکات یک

2-Over Burning

3-Scanning electron microscope (SEM)

نیاز اساسی برای پخت مناسب کلینکر محسوب می‌شود [۲۸-۲۹].

هیل و همکاران (۲۰۰۲) راه حل چالش‌های مواد اولیه صنعت سیمان را مطالعه نمودند. به زعم آنها درک جامع از جنبه‌های شیمیایی و فیزیکی تبدیل مواد خام به کلینکر پایه مهمی در افزایش تولید، کاهش هزینه‌ها و بهبود کیفیت در کارخانه سیمان است. تشکیل کلینکر به خصوصیات خوراک کوره‌های متعدد و شرایط تولید متکی است. درک خصوصیات تأثیرگذار خوراک (شیمی، نرمی، یکنواختی و کانی‌شناسی) می‌تواند منجر به بهبود پخت آن، ویژگی‌های سیمان و در نتیجه بهره‌وری کارخانه شود. آنها دریافتند که ترکیبات حاوی فلوراید موثرترین مواد معدنی در واکنش‌های کلینکر سیمان است. با این حال، مقدار زیاد فلوراید ممکن است زمان گیرش سیمان را به تأخیر بیندازد [۳۰].

استریگاج (۲۰۱۵) تأثیر سوخت‌های جایگزین و مواد اولیه انتخابی بر روی کیفیت کلینکر سیمان را مطالعه نمود. بر اساس آزمایش‌های این محقق، افزودن خاکستر بادی به مواد خام برای پخت کلینکر مطلوب نبود. [۳۱]

سوزا و همکاران (۲۰۰۸) تأثیر خواص معدنی، شیمیایی و فیزیکی بر قابلیت خرد شدن کلینکرهای تجاری با سطح منیزیم بالا را مطالعه نمودند. آنها سختی و مدول الاستیسته فازهای معدنی کلینکر و مقاومت خردشوندگی آنها طی مراحل خردایش ارزیابی نموده و نمونه‌هایی از کلینکر با سطح MgO پایین (۰.۵٪) و سطح MgO بالا (< ۵.۰٪) را مقایسه کردند. این مطالعه با استفاده از چندین روش تحلیلی مانند: میکروسکوپ نوری، XRD و XRF انجام شد. آزمایش‌های DWT و سایش‌پذیری با آسیاب گلوله‌ای باند برای توصیف خصوصیات مکانیکی کلینکرها و آزمایش‌های شناسایی نانو را انجام دادند. نتایج

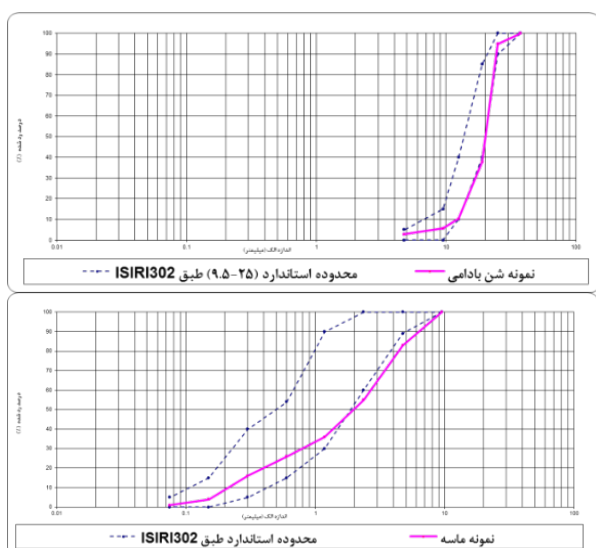
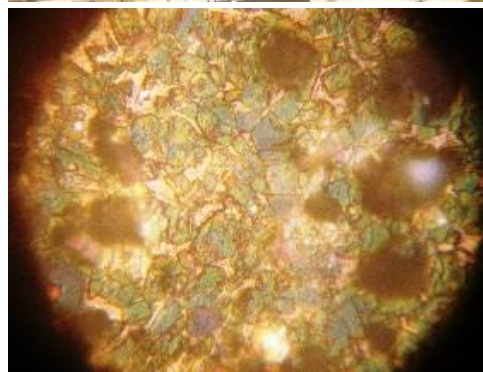
حاصل از آزمایش آسیاب گلوله‌ای باند مربوط به سختی فاز مواد معدنی و ویژگی‌های کانی‌شناسی از جمله نوع و مقدار اجزا در سیلیکات‌ها، شکل بلورهای بلیت و آلیت بوده است. نتایج بدست آمده توسط DWT به مشخصات کلی کلینکرها مانند تخلخل، سختی و خصوصیات معدنی بلورها مرتبط بود [۳۲].

۳- برنامه آزمایشگاهی

در این مطالعه، نمونه‌گیری از خوراک کوره و کلینکر و بررسی شرایط تولید طی دوره ۲ ماهه به صورت زیر انجام پذیرفت؛ بطوریکه پس از انباشت و برداشت سنگ در هر پایل، نمونه‌برداری از خوراک کوره طی آخرین روز برداشت از سالن، منهای ۵ ساعت آخر صورت گرفت. پس از سپری شدن زمان کامل پخت کلینکر، بلافاصله از کلینکر نمونه‌برداری شد. نمونه‌برداری از کلینکر به گونه‌ای انجام گرفت که اطمینان وجود داشت، نمونه کلینکر مربوطه به همان خوراک کوره نمونه‌برداری شده بوده است. آهک آزاد برای هر ۸ نمونه اندازه‌گیری شد و گزارش شرح حال زمان پخت و شرایط اجرائی کوره شامل: میزان مصرف سوخت، بارخور کوره، دور کوره، شرایط سیکلون، نرمه کلینکر، وضعیت غباری در کوره، میزان آهک آزاد، اظهارات کارشناس بهره‌بردار در مورد شرایط پخت و غیره تهیه گردید. همچنین وضعیت سنگ ورودی به سالن از نظر شیمیائی بررسی شد. در مرحله بعد آنالیز شیمیایی [۳۳]، مطالعات میکروسکوپی کلینکر و خوراک کوره به روش اونو (مقطع نازک و نور عبوری) و آنالیز XRD انجام شد (شکل ۲).

گام بعدی تهیه مخلوط‌های بتنی با استفاده از سیمان حاصله از سایش کلینکرهای مطالعه شده بود. شکل ۳ و جدول ۲ مشخصات سنگدانه‌های مصرفی در این مطالعه را نشان می‌دهد. استفاده بهینه از سنگدانه‌های درشت [۳۴-۳۵] مدنظر بود. در کلیه مخلوط‌های بتن آزمایشگاهی، کیفیت و مقادیر وزنی مصالح، شرایط فیزیکی همچون دما، ابزار مورد استفاده، آزمایشگرها و غیره تا حد امکان ثابت بوده‌اند تا با ایجاد شرایطی یکسان تنها متغیر سیمان مصرفی باشد. عیار سیمان مورد استفاده در کلیه طرح‌ها ۳۵۰ کیلوگرم در متر مکعب بوده است. طراحی مخلوط‌ها به روش ملی انجام شده است و توان متناظر در رابطه فولر-تامسون با استفاده از جدول پیشنهادی مربوطه حدود ۰/۳۵ (مابین ۰/۱ تا ۰/۶۷) در نظر گرفته شده است که کاربرد زیادی دارد [۳۶]. (۷۳٪ ماسه و ۲۷٪ شن)

(شکل ۴).



شکل ۳- نمودارهای دانه‌بندی شن و ماسه مورد استفاده در طرح‌های مخلوط بتن

شکل ۲- تهیه نمونه، انجام مطالعات میکروسکوپی و آنالیز شیمی بر روی نمونه‌ها

جدول ۲- مشخصات فنی مصالح مورد استفاده در طرح‌های مخلوط بتنی

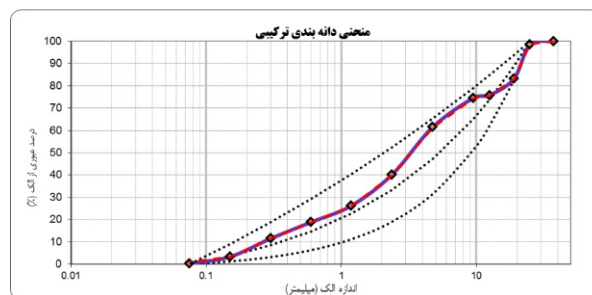
نوع مصالح	مدول نرمی (FM)	درصد جذب آب	وزن مخصوص (SSD)	درصد شکستگی	درصد گذشته از الک ۲۰۰
شن متوسط نیمه شکسته (بادامی)	۷/۵	۱/۴	۲/۵۵	۶۲	۰/۹
ماسه نیمه شکسته	۳/۸	۲/۴	۲/۵۸	*	۱/۱

شکل میکرایست نسبت به فرم اسپارایت ارجح می‌باشد. بر این اساس، نمونه‌های ۴، ۵ و ۸ برای پخت کلینکر نسبتاً مناسب و نمونه ۴ بهترین گزینه محسوب می‌گردد.

با توجه به نتایج آنالیز شیمی و مقادیر LSF، SIM، ALM، C₃S و C₃A می‌توان گفت که نمونه‌های ۳، ۴ و ۵ نسبت به سایر نمونه‌های خوراک کوره برای پخت و تولید کلینکر بهتر، مناسب هستند. البته باید توجه داشت که افزایش LSF و SIM کنترل شرایط پخت کلینکر را سخت می‌کند. بنابراین در نمونه ۳ احتمال صعوبت در شرایط پخت کلینکر پیش‌بینی می‌شود. جدول ۴ خلاصه‌ای از نتایج آنالیز شیمی نمونه‌های کلینکر را نمایش می‌دهد. در این نمونه‌ها نیز به نظر می‌رسد که نمونه ۳، ۱ و ۷ دارای شرایط نامساعد پخت بوده است. البته با توجه به محاسباتی بودن فازها در این نمونه‌ها، امکان رصد دقیق وجود ندارد.

جدول و شکل ۵ خلاصه نتایج XRD نمودارهای مربوطه را نشان می‌دهد. مطابق منابع علمی ارائه شده در بخش ۲، در نمونه‌های خوراک کوره ترجیح بر آنست که:

کانی‌های گروه کوارتز اندک باشد؛



شکل ۴- نمودار دانه‌بندی مخلوط سنگدانه‌های مورد استفاده در طرح‌های مخلوط بتن

۴. نتایج، بحث و تحلیل

جدول ۳ خلاصه‌ای از نتایج مطالعات میکروسکوپی و آنالیز شیمی نمونه‌های خوراک کوره را نشان می‌دهد. طبق مطالعات میکروسکوپی، نمونه‌های خوراک کوره دارای کوارتز بوده که در برخی از آنها این ذرات نسبتاً درشت است و طبق توضیحات ارائه شده در بخش ۲، علی‌القائده برای پخت کلینکر مشکل‌زا می‌باشند و مستعد تولید کلینکر با آهک آزاد بالا است. از این‌رو اپراتور کوره جهت تامین شرایط پخت مناسب، پایدار و پیشگیری از وقوع حوادثی چون کوتینگ‌ریزی، ناچار به افزایش سوخت کوره، کاهش بارخور، افزایش دور فن‌ها یا سرعت گردش کوره می‌شود که برآیند آن افزایش مصرف انرژی است. از سوئی دیگر برای سایش آسان‌تر مواد خام و پخت بهتر کلینکر، آهک به

اکسید کلسیم به صورت کلسیت باشد تا آنکریت؛

کانی‌های رسی کمی وجود داشته باشند؛

فلدسپات‌های قلیائی اندک باشند؛

کانی‌های آهن‌دار مانند هماتیت و گوتیت نیز اندک باشند.

بر اساس نتایج حاصله از XRD و موارد فوق، نمونه‌های ۴، ۵ و ۸ دارای شرایط نسبتاً بهتر، لیکن نمونه ۳ مستعد شرایط نامساعد برای پخت کلینکر است.

جدول ۶ شرایط بهره‌برداری و تولید نمونه‌های کلینکر را نشان می‌دهد. با توجه به تعدد پارامترها و اهمیت آنها، الویت‌بندی شرایط پخت در کوره برای این نمونه‌ها بسیار دشوار است. البته بدیهی است که بروز کوتینگ‌ریزی، چسبندگی در سیکلون، وجود غبار و نرمه، افزایش مصرف سوخت و کاهش بارخور کوره، مغز قهوه‌ای در کلینکر، افزایش آهک آزاد و وزن لیتیری کلینکر در شرایط بهره‌برداری کوره مطلوب نمی‌باشند. بنابراین می‌توان گفت که نمونه‌های ۳ و ۲ دارای شرایط نسبتاً نامناسبی هستند. بر اساس داده‌های جدول ۶ و موارد مذکور، به نظر می‌رسد نمونه‌های ۴، ۶ و ۷ نسبت به سایر نمونه‌ها شرایط پخت نسبتاً مطلوب‌تری داشته است.

در جدول ۷ خلاصه نتایج مطالعات میکروسکوپی کلینکرها دیده می‌شود. (توضیح اینکه فرم آلایت در همه نمونه‌ها گوشه‌دار بود). با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش ۲ و اصول ارائه شده توسط اونو،

بدیهی است که در نتایج مطالعات میکروسکوپی کلینکر ترجیح بر ازدیاد فاز آلایت، کاهش اندازه بلورهای آلایت، افزایش اندازه بلورهای بلیت، بی‌رنگ بودن فاز بلیت، کاهش آهک آزاد، کاهش فراوانی فاز فریت و زردی قسمت‌های میانی و کاهش خوشه و آشیانه‌های بلیتی است. از این‌رو و با توجه به نتایج حاصله، نمونه‌های ۷ و ۱ دارای پائین‌ترین اولویت و نمونه‌های ۲، ۴ و ۵ دارای بالاترین اولویت در کیفیت پخت محسوب می‌شوند. نتایج مطالعات میکروسکوپی نمونه ۵ را می‌توان به عنوان بهترین گزینه در میان ۸ نمونه بررسی شده، قلمداد کرد. تاکید می‌شود که غالباً با صرف انرژی بیشتر می‌توان به کلینکر با شرایط ایده‌آل رسید.

جدول ۳- خلاصه نتایج مطالعات میکروسکوپی و آنالیز شیمی نمونه‌های خوراک کوره

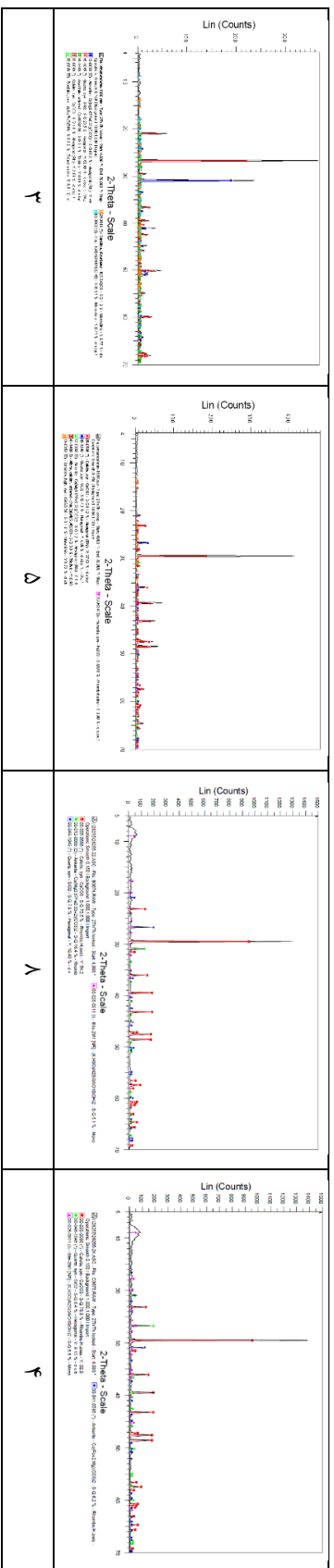
فازها	مدول‌ها										اکسیدها				مطالعات میکروسکوپی		کد نمونه
	C3A	C3S	ALM	SIM	LSF	K2O	SO3	Mgo	Cao	Fe2O3	Al2O3	SiO2	%	میلی‌متر	اسپارایت	%	
۷.۰	۴۴.۳	۱.۴	۲.۸۳	۸۶.۹۰	۰.۶۶	۰.۲۲	۲.۵۹	۴۰.۸۸	۲.۲۰	۳.۰۹	۱۴.۹۹	۱۰	۰.۳-۰.۴	*	۰.۵	۱	
۶.۱	۴۹.۵	۱.۲۶	۲.۷۳	۸۸.۸۰	۰.۶۱	۰.۲۰	۲.۶۸	۴۱.۱۰	۲.۳۹	۳.۰۰	۱۴.۷۱	۱۰	۰.۴	۰.۳	۰.۵	۲	
۶.۵	۵۶.۷	۱.۲۸	۲.۵۶	۹۲.۰۰	۰.۶۰	۰.۱۸	۲.۳۶	۴۱.۷۵	۲.۴۵	۳.۱۴	۱۴.۳۲	۳-۴	*	*	۲	۳	
۷.۰	۵۳.۶	۱.۳۷	۲.۶۳	۹۰.۹۰	۰.۵۷	۰.۱۰	۲.۴۲	۴۱.۳۸	۲.۳۱	۳.۱۶	۱۴.۳۹	۳	۰.۱-۰.۳	*	۰.۵	۴	
۶.۵	۴۹.۴	۱.۳۰	۲.۶۹	۸۸.۹۵	۰.۶۱	۰.۱۰	۲.۴۹	۴۱.۲۶	۲.۳۸	۳.۰۹	۱۴.۷۳	۲-۳	۰.۲	*	نادر	۵	
۶.۶	۴۲.۵	۱.۳۰	۲.۴۳	۸۶.۱۰	۰.۶۸	۰.۱۹	۲.۶۰	۴۱.۱۳	۲.۴۲	۳.۱۵	۱۵.۱۸	۴-۵	۰.۱-۰.۳	۰.۲-۰.۳	۲	۶	
۶.۰	۴۸.۲	۱.۳۷	۲.۸۶	۸۸.۱۰	۰.۶۶	۰.۲۱	۲.۷۳	۴۰.۹۳	۲.۲۹	۲.۹۰	۱۴.۸۴	۳-۴	*	*	۲	۷	
۷.۱	۴۶.۶	۱.۳۸	۲.۷۲	۸۷.۸۰	۰.۶۵	۰.۱۲	۲.۶۱	۴۱.۳۱	۲.۳۱	۳.۱۸	۱۴.۹۳	۵	۰.۱-۰.۴	*	۰.۵	۸	

جدول ۴- خلاصه نتایج آنالیز شیمی نمونه‌های کلیسکر

کد نمونه	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	Mgo	SO3	K2O	LSF	SIM	ALM	C3S	C3A	آهک آزاد
۱	۲۰.۹۷	۴.۵۵	۳.۲۶	۶۳.۳۰	۳.۰۲	۰.۴۷	۹۵.۶۰	۲.۶۹	۲.۶۹	۱.۴۰	۶۱.۷۰	۶.۵۰	۰.۸۴
۲	۲۱.۴۲	۴.۷۳	۳.۶۶	۶۵.۲۶	۳.۴۴	۰.۸۴	۹۶.۱۰	۲.۵۵	۲.۵۵	۱.۲۹	۶۳.۴۰	۶.۳۰	۰.۷۳
۳	۲۰.۹۵	۴.۷۲	۳.۶۶	۶۴.۹۹	۲.۸۲	۰.۴۶	۹۷.۶۰	۲.۵۰	۲.۵۰	۱.۲۹	۶۷.۰۰	۶.۳۰	۱.۰۹
۴	۱۸.۵۹	۳.۷۴	۳.۲۰	۶۰.۸۰	۲.۶۸	۰.۳۰	۱۰۳.۹۰	۲.۶۸	۲.۶۸	۱.۱۷	۶۱.۷۰	۶.۵۰	۰.۹۵
۶	۱۷.۳۴	۳.۳۹	۳.۲۹	۵۹.۳۳	۲.۵۶	۰.۵۳	۱۰۸.۵۰	۲.۶۰	۲.۶۰	۱.۰۳	۶۱.۰۰	۶.۳۰	۰.۸۴
۷	۲۰.۰۱	۴.۴۹	۳.۳۶	۶۳.۵۷	۳.۵۱	۱.۰۷	۹۵.۹۰	۲.۶۸	۲.۶۸	۱.۳۴	۶۱.۰۰	۶.۲۰	۰.۵۶
۸	۱۷.۵۷	۳.۵۱	۳.۱۳	۵۹.۴۰	۲.۷۵	۰.۷۳	۱۰۷.۳۰	۲.۶۵	۲.۶۵	۱.۱۲	۶۱.۰۰	۶.۲۰	۰.۵۶

جدول ۵- خلاصه نتایج مطالعات XRD نمونه‌های خوراک کوره

Clay mineral	Goethite, syn alpha-FeO(OH)	Hematite, syn Fe2O3	Alkali feldspar KAISi3O8	plagioclase (Na,Ca)Al(Si,Al)3O8	Illite K ₂ H ₃ O(Al ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂)	Ankerite Ca(Fe+2,Mg)(CO ₃) ₂	Quartz, syn SiO ₂	Calcite, syn CaCO ₃	Code
Monoclinic	Orthorhombic	Rhombohedral	Monoclinic	Triclinic	Monoclinic	Hexagonal (Rh)	Hexagonal	Hexagonal (Rh)	
۱/۱	۱/۱	*	۱/۲	۲/۱	*	۶/۳	۲۳/۵	۱/۶	۳
*	*	*	۱/۰	۲/۱	*	۶/۲	۷/۱	۸۱/۲	۵
*	*	*	*	*	۶/۶	۶/۲	۸/۴	۷۸/۸	۴
*	*	*	*	*	۵/۱	۱۶/۴	۷/۹	۷۰/۵	۸



شکل ۵- نمودارهای نتایج XRD نمونه‌های خوراک کوره

جدول ۶- شرایط بهره‌برداری نمونه‌ها

توضیحات	سخت	مقاومت تیار	شرایط خشک‌ساز	Mg	۲۰۰.کی	۹۰.کی	CBS	آهک‌آزاد	شرایط تالی بخت	کنترل	دانه بنای کنیکر	نرمه کنیکر (توب)	رنگ	مغز ریختگی کنیکر (توب)	وزن لیتری	شرایط سکلون	سخت (تیر)	دور کوره	تترا (با خوردن) Form/تر	شماره نمونه خوردن کوره
*	گاز	*	خوب	۲/۵۵	۳/۲	۱۵/۲	۴/۲	۰/۸۴	خوب	خوب	نداشته	نداشته	خاکستری تیره	خوب	۱۲۶۰	خوب	۱/۱۵	۲۵۰	۱	
*	گاز	نرمه داشته	*	۲/۴۴	۳/۲	۱۵/۲	۵/۲۰	۰/۷۳	معمولی	کمی درشت	داشته	داشته	خاکستری تیره	مغز قهوه‌ای بیشتر / کوئینگر بزرگ	۱۲۵۰	چسبندگی دان	۱/۳	۲۸۵	۲	
	گاز	نداشته	شدن بار روی گریت	۲/۳۷	۲/۸	۱۵/۶	۴/۸	۰/۹۵	کمی نازمانس	معمولی	معمولی	معمولی	خاکستری تیره حالت خمیری مو	کمی مغز قهوه‌ای / کوئینگر بزرگ	۱۲۸۰	چسبندگی دان	۱/۲۵	۲۷۵	۳	
*	گاز	نداشته	*	۲/۳۹	۲/۴	۱۴/۸	۵/۳	۰/۹۵	خوب	خوب	نداشته	نداشته	*	خوب	۱۳۰۰	کمی چسبندگی	۱/۲	۱۲۵	۴	
*	گاز	کم	*	۲/۵۵	۲/۸	۱۲/۰	۵/۳۱	۱/۰۶	مناسب	کمی درشت	مقداری	مقداری	خاکستری تیره	خوب	۱۲۹۰	کمی چسبندگی / سنگین بودن	۱/۲	۲۵۰	۵	
*	مازوت	نداشته	*	۲/۴۲	۲/۸	۱۳/۲	۴/۲	۰/۸۴	مناسب	معمولی	نداشته	نداشته	خاکستری تیره	خوب	۱۲۷۰	خوب	۱/۲	۲۶۰	۶	
*	مازوت	نداشته	*	۲/۴۶	۲/۴	۱۳/۲	۵/۱	۰/۵۶	مناسب	معمولی	نداشته	نداشته	خاکستری تیره	کمی مغز قهوه‌ای	۱۲۷۰	خوب	۱/۲	۲۶۵	۷	
	مازوت	نداشته	*	۲/۴۹	۲/۰	۱۳/۶	۴/۸/۹	۰/۵۶	خوب	درشت	کمی درشت	نداشته	خاکستری تیره	خوب	۱۳۴۰	کمی چسبندگی	۱/۲	۲۶۰	۸	

ن مقدار اندکی قطعات زرد رنگ
آبپوریتی

جدول ۷- خلاصه نتایج میکروسکوپی و تحلیل آنها به روش اوتو

تحلیل میکروسکوپی															
کد نمونه	بیت	بیت فاز	مقاومت	پیش‌بینی	درصد فاز البت	درصد فاز البت	درصد	بیت	بیت	درصد	کد				
	(BS)	(BQ)	بیت فاز	بیت فاز	بیت فاز	بیت فاز	بیت فاز	بیت فاز	بیت فاز	بیت فاز	نمونه				
۲۸۱۳	*	نسبتا	متوسط تا	طولانی	متوسط تا نسبتا	رنگ بیت در	۵-۸	۱۲	خوشه-آشپناه	۳-۲۰	زرد تا زرد	۴۰۷	۶۶۵	۱۳۵	۱
		نسبتا	متوسط	طولانی	نسبتا تا سریع	رنگ‌های درشت					کم‌رنگ				
۳۵۶۵	۱۲-	متوسط	نسبتا بالا	طولانی	نسبتا سریع	LSF احتمالاً بالا	۵	۱-۲	*	۲۵-۵۰	زرد	۴۱۲	۷۳۵	۶۵	۲
		۱۵									کم‌رنگ				
۳۰۲۶	۱۵	نسبتا	متوسط	متوسط	نسبتا سریع	*	۳-۵	*	خوشه-آشپناه	۲-۱۵	زرد	۴۱۶	۷۵	۶۵	۳
		سریع									کم‌رنگ				
۳۱۶۶	۱۰	نسبتا	نسبتا بالا	نسبتا	سریع	قسمت میانی زرد رنگ	۵	*	*	۵-۲۵	بزرگ	۴۲۶	۷۵	۸	۴
		سریع		طولانی		به علت ازدیاد فاز فریت					بزرگ				
۳۶۶۹	۱۲	نسبتا	نسبتا بالا	طولانی	سریع	قسمت میانی زرد رنگ	۵-۸	*	*	۲۵-۱۵	بزرگ	۴۲۳	۷۱	۸	۵
		سریع تا				به علت ازدیاد فاز فریت					بزرگ				
		سریع													
۳۹۱۳	۱۰	نسبتا	متوسط	نسبتا	سریع	قسمت میانی زرد رنگ	۵	*	خوشه-آشپناه	۵-۲۵	بزرگ	۴۱۹	۷۰	۱۳۵	۶
		آهسته		طولانی		به علت ازدیاد فاز فریت									
۳۳۱۷	۱۲-	متوسط	نسبتا بالا	نسبتا	متوسط	*	۵-۸	*	خوشه-آشپناه-پراکنده	۴-۲۵	زرد تا	۴۲۳	۶۵	۱۶۵	۷
		۱۵	تا بالا	طولانی							بزرگ				
۳۵۷۶	۱۲-	نسبتا	متوسط	طولانی	نسبتا سریع	آهک آزاد به نرت	۵	*	*	*	*	۴۱۸	۶۵	۱۳۵	۸
		۱۵	سریع												

میکروسکوپی کلینگر

همانگونه که اشاره شد، بر اساس نتایج مطالعات میکروسکوپی خوراک کوره، شیمی و XRD خوراک کوره، نمونه‌های ۴، ۵ و ۸ (به ویژه ۴) شرایط بهتری داشته و نمونه ۳ مشخصات نسبتاً نامطلوبی داشت. خلاصه نتایج مخلوط‌های بتن نیز نشان می‌دهد که بطور مشابه نمونه‌های ۴، ۵ و ۸ که خوراک کوره و کلینکر نسبتاً بهتری داشتند، بیشترین مقاومت ۷ و ۲۸ روزه بتن را کسب نموده‌اند (جدول ۸). به همین ترتیب نمونه‌های ۲ و ۳ که دارای خوراک کوره و کلینکر با شرایط کیفی پایین‌تر بود (با توجه به داده‌های تولید کلینکر و نتایج شیمی و مطالعات میکروسکوپی)، منتهی به مقاومت بتن پایین‌تر شد.

جدول ۸- خلاصه نتایج مخلوط‌های بتنی

شماره نمونه	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)			مشخصات بتن تازه	اسلامپ
	۷ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه		
1	20.9	28.3	34.2	0.54	8.0
2	19.2	27.1	30.2	0.55	8.0
3	18.5	28.1	38.4	0.55	8.0
4	25.8	31.1	38.1	0.53	8.0
5	24.0	30.8	39.8	0.54	8.5
6	20.0	28.3	33.5	0.56	8.0
7	23.0	28.1	33.8	0.55	8.0
8	24.2	30.9	31.8	0.54	8.0

راندمان مصرف انرژی به کمک عوامل شاخص معرفی شده در بهره‌برداری، مقدار فازهای آلایت، بلیت، آلومینات، پری‌کلاژ و آهک آزاد در مطالعات میکروسکوپی کلینکر می‌باشند.

به عنوان نمونه، پخت‌پذیری ۸ مورد خوراک کوره و کلینکر به کمک نتایج آزمایش‌های مختلف و اطلاعات شرایط تولید مطالعه و مقایسه شدند. در پایش‌های صورت گرفته با توجه به نتایج حاصله طی ۳ مرحله آنالیز شیمی، مطالعه میکروسکوپی و XRD خوراک کوره می‌توان گفت که نمونه‌های ۴، ۵ و ۸ دارای شرایط بهتری برای پخت کلینکر بودند و نمونه ۳ شرایط نامطلوبی داشت. بر اساس از طرفی با توجه به مطالعات میکروسکوپی و آنالیز شیمی کلینکر نمونه‌های ۴ و ۵ دارای شرایط مطلوبی می‌باشد. شرایط بهره‌برداری نشان داد که نمونه‌های ۴، ۶ و ۷ بهترین موارد و نمونه‌های ۳ و ۲ دارای پایین‌ترین اولویت هستند. در مجموع مقایسه نتایج نشان داد که این بررسی نشان داد که نمونه‌های ۴، ۵ و ۸ دارای کلینکر با کیفیت نسبتاً بالاتر بوده و بیشترین مقاومت فشاری بتن ۷ و ۲۸ روزه را کسب نموده‌اند. بنابراین کانی‌شناسی مواد خام بر شرایط پخت کوره و تولید کلینکر با کیفیت مطلوب تاثیر زیادی دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه عوامل کیفی جهت مقایسه خوراک کوره و کلینکر جهت دستیابی به مخلوط بتنی مناسب معرفی شدند که مهمترین آنها شامل میزان کلیست‌های درشت و سیلیس آزاد در مطالعات میکروسکوپی، کانی‌های رسی، فلدسپات‌های قلیائی و آهن‌دار در مطالعات XRD،

۶- قدردانی

بر خود لازم می‌دانیم تشکر و قدردانی ویژه‌ای از مدیران، کارشناسان و تکنسین‌های محترم آزمایشگاه‌های کارخانه سیمان تهران و سایر پرسنل زحمتکش آن کارخانه داشته باشیم. همچنین از راهنمایی‌های آقای مهندس اسلامی و همکاری آقای مهندس کیا سپاسگزاریم.

- [1] D. Campbell and J. Galehouse, (1991) "Quantitative Clinker Microscopy with the Light Microscope," *Cement, Concrete and Aggregates* 13, no. 2 (0): 94-96
- [۲] احمدی خان فشلاقی، ن. (۱۳۸۹) "ارزیابی عوامل موثر بر واکنش پذیری مخلوط مواد خام سیمان". پایان نامه کارشناسی، دانشگاه علم و صنعت
- [۳] صبوری املشی، ع. (۱۳۷۶) "نقش دانه بندی بر کیفیت کلینکر". پایان نامه کارشناسی، دانشگاه علم و صنعت.
- [۴] بکائیان، م. (۱۳۷۶). "هندبوك مهندسی سیمان، مواد نسوز و مصالح ساختمانی". انتشارات مرکز آموزش نیروی انسانی مجتمع صنعتی سیمان آبیك. ص ۸۵.
- [5] Ibrahimi S, Jamaa N, Bagane M, Ammar M, Lecomte A, Diliberto C. (2015 Nov) "The Effect Of Raw Material's Fineness And Lime Saturation Factor On Clinker's Grindability And Energy Efficiency In The Gabes Cement Industry". *JMESTN42351178*. P 3149-54.
- [6] Campbell, D. (1999). "Microscopical Examination and Interpretation of Portland Cement and Clinker". *PCA SP030*. ISBN-0-89312-084-7. P145.
- [۷] وطنی، م. کفاش، ع. (۱۳۹۸) "بررسی موردی پخت پذیری خوراک کوره سیمان". ماهنامه علمی، فنی، اقتصادی سیمان، شماره ۲۵۸، خرداد ۹۹.
- [8] Moir, G. "Cements". *Booksite Elsevier*.
- [9] Duda, w. (1976). "Cement data book". Volume 2.
- [10] Neville AM, Brooks JJ (2002). "Concrete Properties". *Prentice Hall*
- [11] www.cemnet.com
- [۱۲] کفاش، ع. "بررسی اثر مشخصات فیزیکی کلینکر بر سیمان". ماهنامه علمی، فنی، اقتصادی سیمان، سال بیست و چهارم، فروردین ۹۷، شماره ۲۳۵، صفحات ۳۱-۲۵.
- [۱۳] تدین، ع. گلبهاری، ا. احمدی، ز. (۱۳۹۴). "هندبوك سیمان های جدید و خاص". انتشارات ناقوس. ص ۳۰۱.
- [۱۴] چهرگانی، ح. (اسفند ۹۴). "هندبوك فن آوری و بهره برداری از کارخانه سیمان" انتشارات ماهنامه علمی تخصصی فن آوری سیمان. ص ۱۶۵.
- [15] Neville AM, Brooks JJ (2002). "Concrete technology". *Prentice Hall*.
- [۱۶] بکائیان، م. (۱۳۸۵). "هندبوك جیبی مهندسی سیمانی". انتشارات مرکز آموزش نیروی انسانی مجتمع صنعتی سیمان آبیك. ص ۸۵.
- [17] Pavel martauz (2005). "Optimisation and stabiliation of clinker production". *WORLD CEMENT*, December 2005, p99-106.
- [18] Linda m Hills & F Macgregor. "Burning the mix". *International cement review*, September 2002, p 79-84.
- [19] Hebert Insley and Howard F. McMurdie. (1938). "Minor constituents in Portland cement clinker". *Part of journal of research of the national bureau of standard*, Vol. 12, February 1938.
- [20] -Y Ono. (1973). "Microscopic analysis of clinker". *Onoda Cement Co., Central Research Laboratory*.
- [21] Mehta, K. & Menterio, (2006). "Concrete Microstructure, Properties, and Materials.". P207-214.

- [22] Sanusi Nuhu. (2020) "Effect of Free Lime and Lime Saturation Factor on Grindability of Cement Clinker". *International Journal of Engineering Research and Reviews*, Vol. 7, Issue1, pp.: (61-66)
- [23] M. Vargas Mufioz, F. Gonzdzlez Garda, M. Gonz~lez Rodriguez and M. C. Gonzdzlez Vflchez. (1994). "INFLUENCE OF THE MINERALOGICAL COMPOSITION, SPECIFIC SURFACE AREA AND STRAINS - CRYSTALLITE SIZE OF ALITE ON THE COMPRESSIVE MECHANICAL STRENGTH OF PORTLAND MORTARS. I. CLINKERS OF LOW TRICALCIUM ALUMINATE CONTENTS". *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, No. 4, pp. 776-790, 1994.
- [24] M. Kristmann. (1977). "PORTLAND CEMENT CLINKER: MINERALOGICAL AND CHEMICAL INVESTIGATIONS PART I. MICROSCOPY. X-RAY FLUORESCENCE AND X-RAY DIFFRACTION". *CEMENT and CONCRETE RESEARCH*. Vol. 7, pp. 64g-658, 1977.
- [25] Mohamed A. Aldieb, H. Ibrahim (2010). "Variation of Feed Chemical Composition and Its Effect on Clinker Formation-Simulation Process". From: www.reaserchgate.com.
- [26] Korkmaz A. (2019). "Evaluation of chemical, mineralogical and clinker burnability properties of mudstones as cement raw materials" *Case Studies in Construction Materials*, Volume 11, December 2019.
- [27] G.Kakali & S. Tsvivilis & K. Kolovos & N. Voglis. & J. Aivaliotis & T. Perraki & E. Passialakou & M. Stamatakis. (2005). "Use of secondary mineralizing raw materials in cement production. A case study of a wolframite-stibnite ore". *Cement and Concrete Composites*, Volume 27, Issue 2, February 2005, Pages 155-161.
- [28] A.K.Chatterjee. (1983). "Chemico-Mineralogical Characteristics of Raw Materials". *The Associated Cement Companies Limited, Central Research Station, Thane, India*.
- [29] S. N. Ghosh (1983). "Advances in Cement Technology".
- [30] L.M. Hills ; V. Johansen ; F.M. Miller. (2002). "Solving raw material challenges [cement industry]". *IEEE-IAS/PCS 2002 Cement Industry Technical Conference. Conference Record (Cat. No.02CH37282)*
- [31] Július Strigáč (2015). "Effect of Selected Alternative Fuels and Raw Materials on the Cement Clinker Quality". *Journal of Civil Engineering*, Volume 10: Issue 2.
- [32] Vládio Cristina G.de Souza & Jair Carlos Koppe & João F.C.L.Costa & André Luís Marin Vargas & Eduardo Blando & Roberto Hüblerb (2008). "The influence of mineralogical, chemical and physical properties on grindability of commercial clinkers with high MgO level" *Cement and Concrete Research*, Volume 38, Issues 8-9, August 2008, Pages 1119-1125.
- [۳۳] ISIRI 1692 (۱۳۷۱). "سیمان‌های هیدرولیکی - روش‌های آزمون شیمیایی-اندازه گیری عناصر اصلی" موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی. .
- [34] ACI 211-1-91 (Reapproved 2002)" *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*".
- [35] Neville AM, Brooks JJ (2002). "Concrete technology". Prentice Hall, p20.
- [۳۶] "راهنمای روش ملی طرح مخلوط بتن" مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ص ۳۳.

بررسی عملکرد میدانی _ تحلیل نرم افزاری روسازی بتن بلوکی فرودگاهی تحت بارگذاری صفحه



وحید طاهری

گروه مهندسی عمران واحد سمنان
دانشگاه آزاد اسلامی سمنان، ایران
عضو انجمن بتن ایران



امیرابراهیم دهشپور

گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات،
دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران



پرهام حیاتی

استادیار دانشکده عمران، معماری و هنر
دانشگاه آزاد اسلامی
واحد علوم و تحقیقات تهران
عضو انجمن بتن ایران

چکیده

روسازی های بتنی به دلیل قدرت باربری بالاتر، طول عمر بیشتر و همچنین مقاومت در برابر ریزش سوخت نسبت به روسازی های آسفالتی، در سطوح پروازی فرودگاه ها مورد استفاده قرار گرفته اند. سطوح پروازی فرودگاه ها با توجه به اهمیت بالا نیازمند طراحی دقیق و اصولی است. از انواع روسازی های بتنی، روسازی بتن بلوکی با توجه به قدرت باربری بالا، انعطاف پذیری مناسب و دسترسی سریع به لایه های زیرین رویه جهت انجام تعمیرات به عنوان روسازی سطوح توقفگاه فرودگاه ها استفاده شده است. در این پژوهش، باکس روسازی بتن بلوکی متشکل از ۶ لایه خاک بستر متراکم شده، لایه زیراساس، لایه اساس سنگی شکسته و لایه CTB هریک به ضخامت ۱۵ سانتیمتر، لایه بستر ماسه ای به ضخامت ۳ سانتیمتر و بلوک های بتنی در ابعاد ۸×۱۱×۲۲ سانتی متر بر مبنای ضوابط FAA ساخته شد و بارگذاری صفحه جهت شبیه سازی فشار چرخ هواپیما بر روی نقاط مختلف آن بر اساس استاندارد ASTM D1194 انجام گرفته است. به منظور صحت سنجی میزان تغییر مکان روسازی که توسط گیج های سنجش جابه جایی اندازه گیری شده بود، از نرم افزار اجزاء محدود آباکوس استفاده گردید. بر اساس نتایج بدست آمده از خروجی تحلیل نرم افزار اجزاء محدود آباکوس و همچنین نتایج آزمایشات میدانی مشخص گردید که بیشترین نشست (۲/۴۷ میلیمتر) مربوط به محل بارگذاری در گوشه باکس روسازی بود. ظرفیت باربری روسازی به ازای بارگذاری در مرکز و لبه باکس روسازی به ترتیب ۲۰۰ و ۶۰ درصد بیشتر از گوشه آن بود. تنش و کرنش کششی در زیر لایه CTB هنگام بارگذاری در گوشه باکس روسازی بیشترین مقدار را نسبت به مرکز و لبه باکس داشت. بنابراین بحرانی ترین حالت بارگذاری در روسازی بتن بلوکی به ترتیب مربوط به گوشه، لبه و مرکز، آن است. هم چنین به ازای ورود چرخ عقب هواپیما ۸F-۷۴۷-B به روسازی، گوشه باکس ظرفیت پذیرش آن را نداشت. نشست لبه باکس روسازی ۲۴٪ بیشتر از مرکز آن هنگام عبور چرخ عقب هواپیما ۸F-۷۴۷-B بود. کلمات کلیدی: روسازی بتنی بلوکی، بارگذاری صفحه، نشست، مدلسازی آباکوس، سطوح پروازی فرودگاه

۱- مقدمه

شد [۱]. سطوح پروازی فرودگاه ها از جمله نقاط حساس محسوب شده است که در طراحی روسازی آن ها باید دقت بالا و همچنین حداقل ریسک مد نظر طراحان قرار گیرد [۲]. در قسمت اپرون فرودگاه ها استفاده از انواع

استفاده از انواع روسازی های بتنی به دلیل مقاومت بالا هنگامی که ترافیک عبوری و بار وارد شده به روسازی بالا باشد، به انواع روسازی های انعطاف پذیر ترجیح داده

روسازی های بتنی مرسوم است. استفاده از روسازی های بتنی در پارکینگ ها به دلیل مقاومت این نوع از روسازی در مقابل ریزش سوخت و روغن است در حالی که روسازی های آسفالتی مقاومت کمی در برابر ریزش سوخت دارند. با این حال استفاده از روسازی های بتنی براساس نوع خاص نگهداری و تعمیر آنها نیازمند صرف زمان است. بنابراین استفاده از مصالحی که در تسریع بازگشایی مجدد ترافیک با کاهش مدت زمان گیرش و عمل آوری موثر هستند، استفاده شد اما کیفیت نهایی سازه ای روسازی به مراتب کمتر از حالتی است که از مصالح معمول در نگهداری و تعمیر استفاده شود. استفاده از روسازی های بتنی بلوکی با فراهم آوردن دسترسی آسان به لایه های زیرین رویه امکان نگهداری و تعمیر با سرعت بالا را ممکن ساخت [۳، ۴]. استفاده از روسازی های بتن بلوکی به دلیل مقاومت بالا و همچنین انعطاف پذیری خوب، برای اپرون فرودگاه که بارهای استاتیک دارد یا سرعت حرکت بر روی آن در حد سرعت تاکسی کردن هواپیما است، مناسب میباشد [۵]. از آنجایی که اجرای صحیح روسازی سطوح پروازی فرودگاه ها از اهمیت بالایی برخوردار است، اجزاء اصلی روسازی بتن بلوکی برای استفاده در سطوح پروازی فرودگاه ها توسط سازمان Federal Aviation Administration (FAA) ارائه گردیده است. بر همین اساس اجزاء روسازی بتن بلوکی شامل بلوک های بتنی در شکل های مختلف و همینطور الگوهای گوناگون چیدمان است که در میان آن ها مصالحی همچون ماسه یا درزگیر های پلیمری قرار میگیرد و در زیر آن نیز یک لایه بستر ماسه ای به ضخامت ۳۰mm وجود دارد. به منظور جداسازی و قرار دادن یک پوشش بر روی لایه اساس که می تواند سنگی یا تثبیت شده باشد، می توان از مصالح ژئوتکستایل نیز استفاده کرد. در صورتی که بارهای موجود در طراحی فرودگاه بیشتر از ۱۰۰,۰۰۰lb (تردد هواپیماهای سنگین و پهن پیکر) باشد میبایست از لایه اساس تثبیتی با سیمان

در زیر بستر ماسه ای استفاده گردد [۶]. افزایش قفل و بست بین بلوک های بتنی که باعث حفظ پیوستگی روسازی نیز میگردد از نکات مهم سنجش عملکرد روسازی های بتن بلوکی در بین مطالعات پژوهشگران است. در مطالعه انجام شده توسط لین و همکاران [۷] مشخص گردید که الگوی چینش استخوانی (herringbone) بلوک های بتنی، پایداری سازه ای بالاتری نسبت سایر الگوهای چینش دارد. از نکات حائز اهمیت در بالا بردن مقاومت رویه بلوکی در برابر تغییر شکل های افقی می توان به سختی ماسه پرکننده درزها و همچنین پرکردن صحیح تمامی درزها اشاره کرد [۸]. تغییر در شکل بلوک های بتنی با ایجاد برجستگی و فرو رفتگی در جداره آن ها (نری و ماده گی) در افزایش قفل و بست رویه بتنی تاثیر دارد و با این تغییر پدیده FOD نیز قابل کاهش دادن است [۹]. علاوه بر مقاومت رویه روسازی بلوکی در برابر تغییر شکل های افقی، ظرفیت باربری این روسازی و عملکرد لایه های زیرین رویه بلوکی تحت بارگذاری های قائم نیز حائز اهمیت است. استفاده از لایه اساس تثبیت شده با سیمان (CTB) در بارگذاری های متوسط و سنگین، عملکرد بهتری نسبت به لایه اساس سنگدانه ای دارد [۱۰]. با بررسی سختی لایه CTB مشخص گردید که سختی این لایه با افزایش طول عمر روسازی افزایش یافته است [۱۱]. استفاده از نرم افزار های شبیه سازی نظیر آباکوس و انسیس همواره جزء جدایی ناپذیر از پژوهش های انجام شده بر روی انواع روسازی ها است [۱۲-۱۶]. یک باکس روسازی بتن بلوکی توسط طاهری و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۲۱ به مساحت ۴ متر مربع بر مبنای ضوابط FAA ساخته شد. پس از آن بارگذاری صفحه (PLT) بر روی روسازی انجام گرفت و با کمک شبیه سازی انجام شده در نرم افزار آباکوس، تنش کششی زیر لایه CTB تعیین و از آن برای محاسبه تعداد تکرار مجاز بارگذاری استفاده شد. همچنین نشست در محل اعمال بارگذاری ۱/۲۳

واحد سمنان انجام گرفته است. برای پیشبینی پاسخ لایه های روسازی تحت فشار چرخ هواپیما بوئینگ ۸F-۷۴۷ از نرم افزار اجزاء محدود آباکوس استفاده شد.



شکل ۱ تصویر روسازی ساخته شده در مرکز سامانه

میلیمتر محاسبه گردید. بر اساس مطالعات انجام شده در زمینه روسازی های بتن بلوکی فرودگاهی، تاثیرات جابه جایی محل اعمال بار بر رفتار لایه های زیرین رویه و همچنین تعداد تکرار مجاز بارگذاری، از مواردی است که کمتر به آن پرداخته شده است. همچنین مقایسه رفتار لایه های روسازی تحت شرایط فوق و با شبیه سازی فشار وارده از طرف چرخ هواپیما بوئینگ ۸F-۷۴۷ (هواپیما پهن پیکر) به روسازی میتواند مطالعات در این زمینه را گسترش دهد.

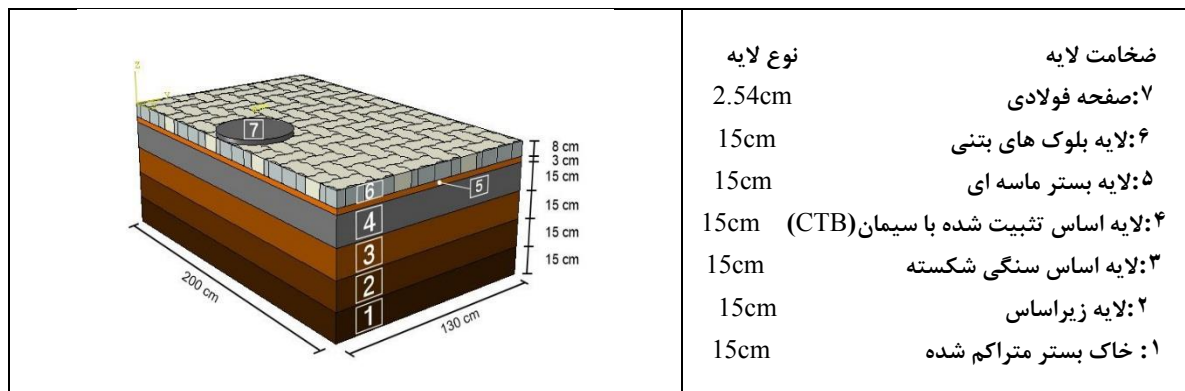
۲- روش آزمایش

۳-۱ ساختار سامانه آزمایش

به منظور ساخت و آزمایش بر روی روسازی بتن بلوکی فرودگاهی از یک سامانه به ابعاد $4m \times 4m$ استفاده گردید. روسازی بتن بلوکی فرودگاهی بر مبنای ضوابط FAA در مرکز این سامانه به مساحت $2/6$ مترمربع ساخته شد. به منظور انجام بارگذاری صفحه بر اساس استاندارد ASTM D1194 [۱۸] در این پژوهش، از Reaction beam کارگذاری شده در سامانه استفاده گردید. بارگذاری از مقدار کمینه ۲ تن تا بیشینه ۱۲ تن با افزایش دفعه ای ۲ تن در بازه های ۸ دقیقه ای بر روی روسازی اعمال گردید [۱۷]. تصویر سامانه آزمایش مطابق شکل ۱ ارائه گردیده است. تمامی آزمایش ها در دانشگاه آزاد اسلامی

۳-۲ ساختار روسازی ساخته شده

روسازی بتن بلوکی بر مبنای ضوابط FAA در ۶ لایه ساخته شد. لایه های روسازی به ترتیب شامل: خاک بستر متراکم شده و لایه های زیراساس و اساس سنگی شکسته و لایه اساس تثبیت شده با سیمان (CTB)، هریک به ضخامت ۱۵cm، لایه بستر ماسه ای به ضخامت ۳cm و در آخر رویه بلوکی به ضخامت ۸cm بود [۶]. تصویر لایه های روسازی مطابق با شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲ ساختار کلی روسازی بتن بلوکی فرودگاهی ساخته شده در مرکز سامانه آزمایش

۳-۳ دانه بندی ، پخش و تراکم لایه های روسازی

دانه بندی مصالح لایه های خاک بستر، زیراساس، اساس سنگی شکسته، CTB، بستر ماسه ای و ماسه درزبند مطابق با جدول ۱ ارائه گردیده است.

جدول ۱ دانه بندی مصالح لایه های روسازی

شماره الک	سایز الک (mm)	خاک	لایه	لایه اساس	لایه	لایه بستر	ماسه درز
		بستر	زیراساس	درصد عبوری	CTB	ماسه ای	بند
		درصد عبوری	درصد عبوری	درصد عبوری	درصد عبوری	درصد عبوری	درصد عبوری
2	50	90	95	100	100	-	-
1 1/2	37/5	85	90	100	98/5	-	-
1	25	75	83/5	82/5	95	-	-
3/4	19	70	80	73	91	-	-
1/2	12/5	58	73	63	84/5	-	-
3/8	9/5	50	66	58	80	100	-
4	4/75	38	50	45	70	97/5	-
8	2/36	32	32	38	61	90	100
10	2	30	27/5	36	58/5	85	100
16	1/18	25	22	30	48	67/5	98/4
30	0/6	18	17	24	38	42/5	63/7
40	0/425	15	15	20	32/5	30	34/5
50	0/3	14	13	18	25	20	15/1
100	0/15	11	10	12	13	5	1
200	0/075	10	8	5	7/5	0/5	0/5

تراکم لایه CTB اقدام به عمل آوری این لایه به مدت ۳۰ روز گردید. سپس لایه بستر ماسه ای به ضخامت ۳ سانتیمتر بر روی لایه CTB پخش و متراکم گردید. در نهایت بلوک های بتنی بر روی بستر ماسه ای و با الگوی استخوانی کنار یکدیگر چیده شدند و از ماسه و سیمان به نسبت وزنی ۵ به ۱/۵ به منظور پرکننده بین بلوک های بتنی استفاده شد. لایه بستر ماسه ای و همچنین ماسه درزبند بر اساس ضوابط دانه بندی گردید [۲۲]. جدول حدود رواداری دانه بندی مصالح لایه های روسازی مطابق با جدول ۲ ارائه شده است.

معیاری برای دانه بندی خاک بستر در نشریات و آیین نامه ها ارائه نشده است. دانه بندی لایه زیراساس بر اساس الزامات P-152 [۱۹] و P-154 [۲۰] آیین نامه FAA انجام و در رطوبت بهینه به ضخامت ۱۵cm پخش و متراکم گردید. لایه اساس سنگی شکسته نیز بر اساس ضوابط مندرج در آیین نامه FAA دانه بندی و در ضخامت ۱۵cm پخش و متراکم گردید. لایه CTB با سیمان عیار ۱۴۵ Kg/m² و با نسبت آب به سیمان ۰.۹، مطابق با اصول ساخت، دانه بندی و پخش آیتام P-209 [۲۱] از آیین نامه FAA ساخته و با ضخامت ۱۵cm متراکم شد. پس از

جدول ۲ حدود رواداری دانه بندی مصالح لایه های روسازی

شماره الک	سایز الک (mm)	لایه زیراساس	لایه اساس	لایه CTB	لایه بستر ماسه ای	ماسه درز بند
		درصد مجاز عبوری	درصد مجاز عبوری	درصد مجاز عبوری	درصد مجاز عبوری	درصد مجاز عبوری
2	50	-	-	-	-	-
1 1/2	37/5	-	(100-95)	-	-	-
1	25	-	(95-70)	(100-90)	-	-
3/4	19	(100-75)	(85-55)	-	-	-
1/2	12/5	-	-	-	-	-
3/8	9/5	-	-	-	-	-
4	4/75	-	(60-30)	(95-45)	(100-95)	-
8	2/36	-	-	-	(100-85)	(100-95)
10	2	(40-15)	-	(80-37)	-	(100-95)
16	1/18	-	-	-	(85-50)	(100-70)
30	0/6	-	-	-	(60-25)	(75-40)
40	0/425	(20-10)	(30-10)	(50-15)	-	-
50	0/3	-	-	-	(30-10)	(35-10)
100	0/15	-	-	-	(10-2)	(15-2)
200	0/075	(15-0)	(10-0)	(15-0)	(0/5-0)	(1-0)

تصاویر مربوط به لایه های روسازی پس از تراکم و به صورت گام به گام مطابق شکل ۳ ارائه شده است. این مراحل شامل اجرا لایه های زیراساس، اساس سنگی شکسته، CTB، بستر ماسه ای و بلوک های بتنی بوده و در آخر استفاده از ماسه و سیمان به عنوان درزبند و درزگیری نهایی بلوک های بتنی.



لایه اساس سنگی پس از تراکم به ضخامت ۱۵ سانتیمتر: (۲)



لایه زیراساس پس از تراکم به ضخامت ۱۵ سانتیمتر: (۱)



چینش بلوک های بتنی بر روی بستر ماسه ای: (۴)



لایه CTB پس از تراکم به ضخامت ۱۵ سانتیمتر: (۳)



تکمیل ساخت روسازی با درزگیری نهایی سطح رویه: (۶)



چینش کامل بلوک های بتنی: (۵)

شکل ۳ اجرای لایه های روسازی بتن بلوکی فرودگاهی

۳-۴ خلاصه ی نتایج آزمایشات بر روی مصالح سنگی

خلاصه ای از نتایج آزمایشات انجام شده بر روی مصالح سنگی لایه های روسازی مطابق جدول ۳ ارائه گردیده است.

جدول ۳ خلاصه نتایج آزمایشات انجام شده بر روی لایه های روسازی

روش آزمایش	لایه خاک بستر	لایه زیراساس	لایه اساس سنگی شکسته	لایه CTB	لایه بستر ماسه ای
[۲۳] تراکم(%)	۹۴/۲	۹۷/۳	۹۶	-	۹۸
[۲۴] سی بی آر(%)	۱۱۴	۱۲۹/۷	۱۰۷/۶	-	۸۱
[۲۵] ارزش ماسه ای(%)	۳۰	۴۴	۸۰	-	-
[۲۶] درصد شکستگی	-	۱۰۰ درصد در بیشتر از یک وجه شکستگی	۱۰۰ درصد در بیشتر از یک وجه شکستگی	۱۰۰ درصد در بیشتر از یک وجه شکستگی	-
[۲۷] زاویه اصطکاک داخلی	۳۸	۳۸	۴۴	-	۳۲
[۲۸] حد خمیری	۱۸	۱۸	-	۲۰	-



شکل ۴ نحوه انجام بارگذاری صفحه و محل فارگیری گنج های سنجش جا به جایی

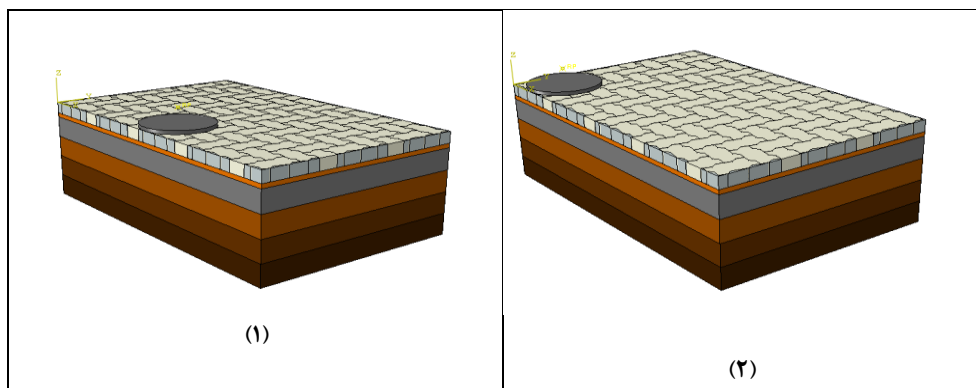
۳-۵ نحوه اعمال بارگذاری صفحه

به منظور بارگذاری بر روی روسازی از یک جک هیدرولیک و صفحه فولادی به قطر ۴۵ سانتیمتر و ضخامت ۲/۵۴ سانتیمتر استفاده شد. استفاده از جک هیدرولیک برای بارگذاری نیازمند یک تکیه گاه صلب در محل انجام آزمایش است. بنابراین در ساختار سامانه مطابق با شکل ۱، یک تیر کارگذاری شده بود (Reaction beam). به منظور اندازه گیری نشست روسازی در محل اعمال بار، از سه گنج سنجش جا به جایی استفاده شد که بر روی صفحه فولادی کارگذاری شده بودند. میانگین نشست نشان داده شده بر روی نشانگر گنج ها به عنوان نشست هر مرحله از بارگذاری ثبت گردید. گنج های سنجش جا به جایی از یک طرف به یک تکیه گاه ثابت وصل شده و سوزن قرائت نیز بر روی صفحه فولادی قرار گرفت. نحوه کارگذاری گنج ها و همچنین جزئیات انجام بارگذاری صفحه مطابق شکل ۴ ارائه شده است.

۳-۶ مدل سازی در نرم افزار آباکوس

۳-۶-۱ شبیه سازی اجزاء روسازی

اجزاء روسازی با اندازه های واقعی (۱.۳m×۲m) بر مبنای بارگذاری در لبه و گوشه باکس روسازی در نرم افزار آباکوس شبیه سازی شده است و تصاویر آن مطابق با شکل ۵ ارائه گردیده است.



شکل ۵ مدل سازی کامل روسازی در نرم افزار آباکوس

۳-۶-۲ تعریف خصوصیات مصالح

نتایج آزمایشات میدانی به عنوان ورودی اولیه برای نرم افزار آباکوس استفاده گردید. خلاصه ای از خصوصیات تعریف شده اجزاء روسازی در نرم افزار بر مبنای آزمایشات میدانی مطابق جدول ۴ ارائه شده است.

۴ خصوصیات تعریف شده مصالح روسازی در نرم افزار جدول

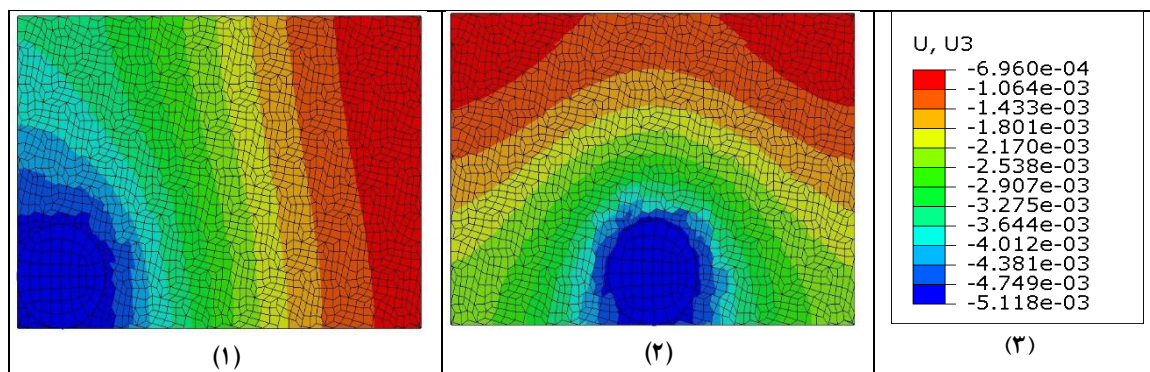
نوع مصالح	ضخامت (cm)	مدول الاستیک (Mpa)	چگالی (N/m^3)	زاویه اصطکاک داخلی
صفحه فولادی	۲/۵۴	۲۱۰۰۰۰	۷۸۵۰۰	-
بلوک های بتنی	۸	۲۰۰۰	۲۲۵۰۰	-
لایه بستر ماسه ای	۳	۷۰	۱۷۰۰۰	۳۲
لایه CTB	۱۵	۱۲۸۶۵	۲۱۹۵۰	-
لایه اساس سنگی شکسته	۱۵	۱۱۱۰	۲۲۹۰۰	۴۴
لایه زیراساس	۱۵	۱۳۳۸	۲۱۶۶۰	۳۸
خاک بستر متراکم شده	۱۵	۱۱۷۶	۲۲۶۹۰	۳۸

۳-۶-۴ نتایج تحلیل نرم افزار

بر اساس نقاط بارگذاری که شامل گوشه و لبه باکس روسازی بود، نتایج تحلیل نرم افزار پس از همگرایی گام های حل، مطابق شکل ۶ ارائه گردیده است.

۳-۶-۳ تعریف درجات آزادی

روسازی در راستای محور های X و Y (امتداد های افقی) بدون درجه آزادی تعریف شد. به منظور اجازه حرکت آزادانه روسازی تحت اعمال بارگذاری، در راستای محور Z (راستای قائم) درجه آزادی به میزان ۵ میلیمتر تعریف گردید.



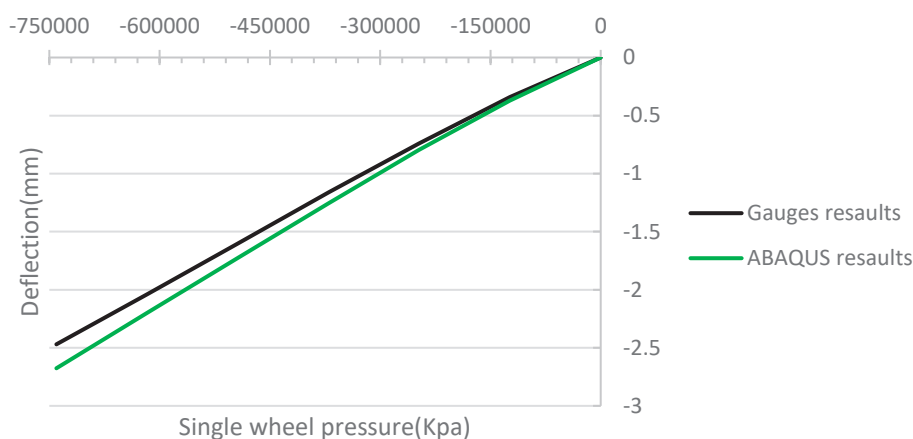
شکل ۶ شماتیک نحوه نشست روسازی بر طبق خروجی نرم افزار آباکوس

به منظور تحلیل دقیق پاسخ روسازی در مقابل بار وارد شده، از نتایج پژوهش طاهری و همکاران استفاده گردید. بنابراین تمامی اشکال و اطلاعاتی که شامل بارگذاری در مرکز روسازی است، از نتایج پژوهش فوق استخراج گردیده است. [۱۷]

۴-۱-۱ نشست روسازی در محل اعمال

بارگذاری (گوشه باکس روسازی)

براساس اعداد نشان داده شده بر روی سه گیج، میانگین اعداد محاسبه و به عنوان نشست روسازی در محل اعمال بارگذاری (گوشه باکس) گزارش گردید. نتایج خروجی تحلیل نرم افزار آباکوس و همچنین اعداد گیج های کارگذاری شده مطابق شکل ۱۷ ارائه شده است.



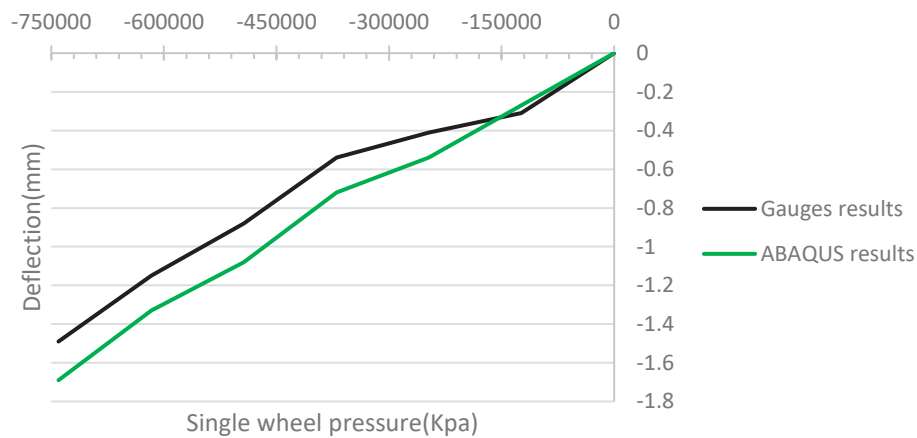
شکل ۷ نتایج نشست روسازی در گوشه باکس

۴-۲ نشست روسازی در محل اعمال بارگذاری (لبه

باکس روسازی)

براساس اعداد نشان داده شده بر روی سه گیج، میانگین اعداد محاسبه و به عنوان نشست روسازی در محل اعمال بارگذاری (لبه باکس) گزارش گردید. نتایج خروجی تحلیل نرم افزار آباکوس و همچنین اعداد گیج های کارگذاری شده مطابق شکل ۱۸ ارائه شده است.

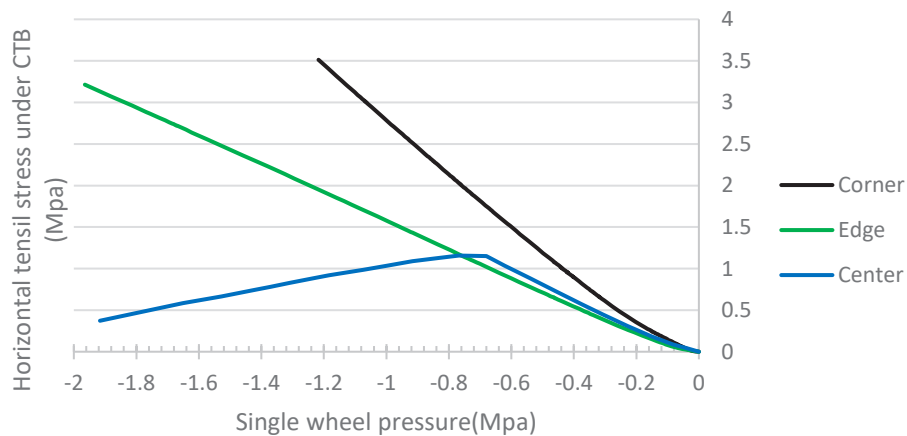
براساس شکل ۷ مشخص گردید که اختلاف نشست اندازه گیری شده توسط گیج ها و خروجی نرم افزار در حدود ۰/۲ میلیمتر بوده است. میزان اختلاف نتایج نرم افزار و گیج های سنجش جابه جایی میتواند ناشی از خطاهای میدانی (وزش باد) باشد که با توجه به کوچک بودن آن، قابل صرف نظر کردن است. براساس نتایج میدانی، نشست در محل اعمال بارگذاری ۲/۴۷ میلیمتر ثبت گردید.



شکل ۸ نتایج نشست روسازی در لبه باکس

۳-۴ تغییرات تنش کششی زیر لایه CTB با تغییر محل بارگذاری
تغییرات تنش کششی زیر لایه CTB با تغییر محل اعمال بارگذاری مطابق شکل ۹ ارائه شده است.

براساس شکل ۸ مشخص گردید که اختلاف نشست اندازه گیری شده توسط گیج ها و خروجی نرم افزار در حدود ۰/۲ میلیمتر بوده است. براساس نتایج میدانی، نشست در محل اعمال بار ۱/۴۹ میلیمتر ثبت شد.



شکل ۹ فشار چرخ در برابر تنش کششی زیر لایه CTB

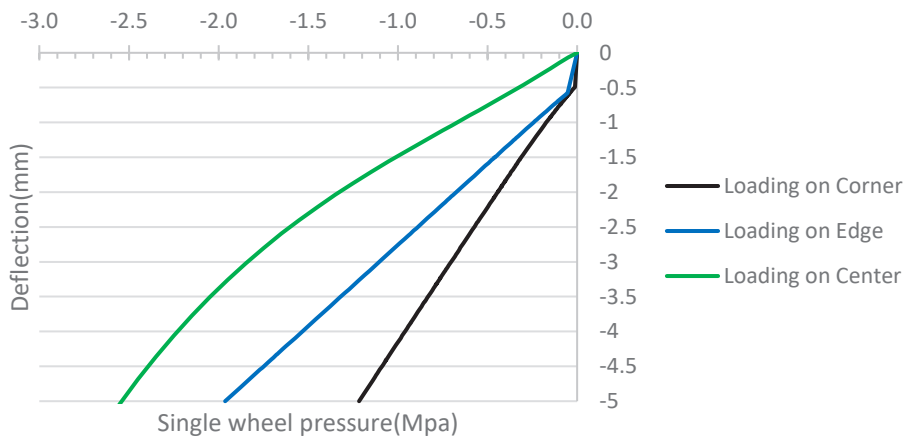
ضوابط FAA بوده و نقطه اکسترمم نمودار نیز کمتر از نصف فشار چرخ عقب بوئینگ ۷۴۷-۸۰ است [۲۹]. همچنین محدوده تنش تسلیم تا تنش نهایی فولاد که ماده ای منعطف تر از بتن است اندک بوده در حالی که در پژوهش طاهری و همکاران این محدوده بسیار بزرگ در نظر گرفته شده بود. [۳۰]

براساس نتایج مشخص گردید (شکل ۹)، بحرانی ترین حالت بارگذاری، بارگذاری در گوشه باکس روسازی بود. نمودار تنش کششی زیر لایه CTB هنگام بارگذاری در مرکز باکس روسازی دارای اکسترمم بوده که این مورد بیانگر رسیدن لایه CTB به تنش تسلیم خود است و از آنجا به بعد نمودار روند نزولی پیدا کرده است. اما این فرض با واقعیت دارای تناقض است چراکه معیار ساخت روسازی

۴-۴ تغییرات ظرفیت باربری روسازی با تغییر محل بارگذاری

باتوجه به پاسخ روسازی تحت اعمال بارگذاری مشخص گردید که ظرفیت باربری روسازی (کرنش قائم به اندازه $0.0005/31$) هنگامی که بار در مرکز آن وارد شود 200% بیشتر از زمانی است که بار در گوشه آن وارد شود و 30%

بیشتر از زمانی است که بارگذاری در لبه باکس روسازی اعمال گردد (شکل ۱۰). براساس نتایج حاصل شده مشخص گردید که گوشه باکس روسازی با عبور چرخ هواپیما B-۷۴۷-۸F دچار شکست خواهد شد همچنین نشست لبه باکس 24% درصد بیشتر از مرکز باکس بود.

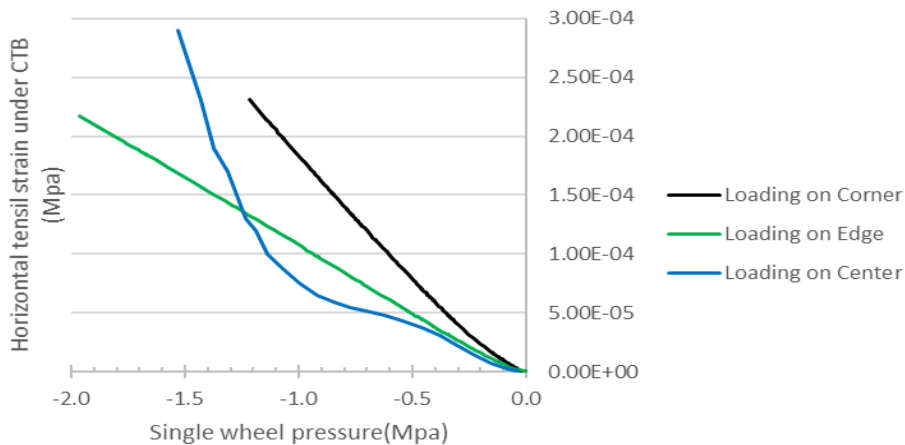


شکل ۱۰- نشست روسازی در برابر فشار چرخ

۴-۵ تغییرات کرنش کششی زیر لایه CTB با تغییر محل بارگذاری

با تغییر محل اعمال بارگذاری و نزدیک کردن آن به گوشه باکس روسازی، کرنش کششی در زیر لایه CTB 43% درصد در فشاری بیشتر از نصف چرخ جلو هواپیما B-۷۴۷-۸F (0.740 Mpa)

افزایش یافت. در فشارهای بیشتر از 1 Mpa روند کرنش کششی زیر لایه CTB در بارگذاری در مرکز باکس روسازی افزایش پیدا کرده (شکل ۱۱) و از مقادیر کرنش کششی در بارگذاری لبه باکس نیز بیشتر شد که این افزایش ناشی از مدول الاستیک کمتر لایه CTB در پژوهش طاهری و همکاران نسبت به پژوهش حاضر بود.



شکل ۱۱- کرنش کششی زیر لایه CTB در برابر فشار چرخ

- باکس روسازی بتن بلوکی فرودگاهی به مساحت 2.6m^2 بر مبنای ضوابط FAA ساخته و بارگذاری صفحه بر روی نقاط مختلف آن اعمال شد و صحت سنجی نتایج میدانی با استفاده از خروجی تحلیلی نرم افزار آباکوس انجام گردید.
- نتایج نشان داده شده توسط گیج های سنجش جابه جایی با خروجی تحلیلی نرم افزار آباکوس سازگار بود
 - با تغییر محل اعمال بارگذاری از مرکز باکس روسازی به گوشه آن هنگام وارد کردن فشاری بیشتر از نصف چرخ هواپیما طرح، نشست در محل اعمال بارگذاری به میزان $1/24$ میلیمتر (۲ برابر) افزایش پیدا کرد.
 - تنش کششی در زیر لایه CTB هنگام بارگذاری در گوشه باکس روسازی بیشتر از لبه و مرکز آن بود در حالی که بارگذاری در لبه میزان تنش کششی کمتری در زیر لایه CTB ایجاد کرد که این مسئله ناشی از افزایش مدول الاستیک لایه CTB در پژوهش حاضر نسبت به پژوهش طاهری و همکاران بود.
 - کرنش کششی در زیر لایه CTB هنگام بارگذاری در گوشه باکس روسازی از لبه و مرکز آن بیشتر بود.
 - با جابه جایی محل اعمال بارگذاری از مرکز باکس روسازی به گوشه باکس، ظرفیت باربری بیشتر از دوبرابر کاهش پیدا کرد. همچنین ظرفیت باربری لایه باکس روسازی نسبت به گوشه آن ۶۰ درصد بیشتر است.
 - هنگام ورود چرخ عقب هواپیما B-۷۴۷-۸F به محل لبه باکس روسازی، نزدیک به ۸۳ درصد از ظرفیت باربری روسازی استفاده شد در حالی که گوشه باکس ظرفیت پذیرش فشار این چرخ را نداشت.
 - نشست لبه باکس روسازی % ۲۴ بیشتر از مرکز آن هنگام عبور چرخ عقب هواپیما B-۷۴۷-۸F بود.

- 1- *Estates, D., A guide to airfield pavement design and evaluation. Design & Maintenance Guide, 2011. 27.*
- 2- *Gkyrtis, K., et al., Structural Performance Assessment of Airfield Concrete Pavements Based on Field and Laboratory Data. Infrastructures, 2021. 6.(۱۲)*
- 3- *Yeo, S.H., et al., Properties of Cementitious Repair Materials for Concrete Pavement. Advances in Materials Science and Engineering, 2022. 2022: p. 3057801.*
- 4- *Rollings, R.S., Concrete block pavements. 1983.*
- 5- *Emery, J.A., THE USE OF CONCRETE BLOCKS FOR AIRCRAFT PAVEMENTS. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1986. 80(2): p. 451-464.*
- 6- *FAA, Airport Pavement Design and Evaluation AC No:150/5320-6F, in Pavement Design. 2016, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration: USA.*
- 7- *Lin, W., et al., Evaluation of the Load Dissipation Behavior of Concrete Block Pavements with Various Block Shapes and Construction Patterns. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018. 30(2): p. 04017291.*
- 8- *Hengl, H., et al., Horizontal deformation resistance of paving block superstructures-Influence of paving block type, laying pattern, and joint behavior. International Journal of Pavement Research and Technology, 2018. 19(7): p. 1575-1594.*
- 9- *Emery, J., M. Lazar, and G. Burrows. A new paver system for airfields. in Transportation Systems Workshop, Fort Lauderdale USA. 2004.*
- 10- *Tajudin, A.N. and C.G.A. Winarko. Flexible Pavement Mechanistic Response to the 2017 Indonesian Road Pavement Manual with Cement-Treated Base (CTB). in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. IOP Publishing.*
- 11- *Dong, Q., et al., Long-term mechanical properties of in situ semi-rigid base materials. Road Materials and Pavement Design, 2021. 22(7): p. 1692-1707.*

- 12- Tang, F., et al., Parametric modeling and structure verification of asphalt pavement based on BIM-ABAQUS. *Automation in Construction*, 2020. 111: p. 103066.
- 13- Khodary, F., H. Akram, and N. Mashaan, Behaviour of different pavement types under traffic loads using finite element modelling. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2020. 11(11): p. 40-48.
- 14- Elkholy, S., B. El-Ariss, and S. Galal, Structural performance of jointed reinforced concrete pavement slab with subbase erosion. *Structures*, 2020. 26 :p. 982-995.
- 15- Shaban, A.M., et al. Effect of Pavement Foundation Materials on Rigid Pavement Response. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. IOP Publishing.
- 16- Sadeghi, V. and S. Hesami, Investigation of load transfer efficiency in jointed plain concrete pavements (JPCP) using FEM. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2018. 11(3): p. 245-252.
- 17- Taheri, V., M. Fakhri, and P. Hayati, Evaluation of airfield concrete block pavements based on 3-D modelling and plate loading test. *Construction and Building Materials*, 2021. 280: p. 122441.
- 18- D1194-94, A., Standard Test Method for Bearing Capacity of Soil for Static Load and Spread Footings (Withdrawn 2003). 2017, ASTM INTERNATIONAL: USA. p. 3.
- 19- FAA, Standard Specifications for Construction of Airports, in Item P-152 Excavation, Subgrade, and Embankmen. 2018, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration: USA. p. 103.
- 20- FAA, Standard Specifications for Construction of Airports, in Item P-154 Subbase Course. 2018, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration: USA. p. 121.
- 21- FAA, Standard Specifications for Construction of Airports, in Item P-209 Crushed Aggregate Base Course. 2018, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration: USA. p. 173.
- 22- McQueen, R.D., et al., Airfield pavement design with concrete pavers. 1993: National Concrete Masonry Association.
- 23- T180, A., Standard Method of Test for Moisture–Density Relations of Soils Using a 4.54-kg (10-lb) Rammer and a 457-mm (18-in.) Drop. 2020, AASHTO: USA. p. 14.
- 24- , ١٩٣٨ A.T., Standard Method of Test for The California Bearing Ratio. 2013, AASHTO: USA. p. 11.
- 25- ASTM-D2419-14, Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate. 2016, ASTM INTERNATIONAL: USA. p. 10.
- 26- ASTM-D5821-13, Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate. 2017, ASTM INTERNATIONAL: USA. p. 6.
- 27- ASTM-D3080-04, Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. 2012, ASTM INTERNATIONAL: USA. p. 7.
- 28- ASTM-D4318-17e1, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. 2018, ASTM INTERNATIONAL: USA. p. 20.
- 29- Shepson, O. Boeing and Airbus tire pressure test programs. in *ALACPA Airport Pavement Seminar and FAA Workshop*. 2009.
- 30- Beer, F., et al., *Mechanics of Materials*. 7th_Edition. New York. McGraw-Hill Education Ltd, 2015.
- 31- Hosford, W.F., *Mechanical behavior of materials*. 2010: Cambridge university press.