

بررسی آزمایشگاهی تأثیر افزودن دوده سیمان (Kiln) در بهبود خواص مکانیکی ملات‌های 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 تأثیر 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 استوانه‌ای 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) تأثیر منفی بر مقاومت‌های فشاری و کششی گذاشت و منجر به کاهش قابل توجهی در این مقادیر شد، اما دوده سیمان (K2) تأثیر 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

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 کنند 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 یوبنیات 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 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 نمی کند [۲].

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 ۰,۳ 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

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 تعمیری در این تحقیق از شن معدن شن سازان استفاده شده است که بزرگترین دانه بندی آن ۹/۵ میلی‌متر بود که مشخصات دانه بندی آن در جدول ۲ ارائه گردید است و در ساخت ملات تعمیری 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 دانه-بندی آن در جدول ۴ گردید.

۱۰. بر اساس مطالعاتی که انجام شده است که فعالیت پوزلانی دوده سیمان کمتر از سیمان می باشد [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 بهبود مقاومت به طور میانگین ۳۱٪ در مقاومت فشاری و ۱۷٪ در مقاومت کششی شده [۱۳].

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

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

جدول ۳- درصد اندازه‌های ماسه

دانه بندی						ماسه
۰,۰۹-۰,۳۳۵	۰,۳۳۵-۰,۱۲۵	۰,۱۲۵-۰,۰۵	۰,۰۵-۱	۱-۳	۳-۵	
۱۰	۲۰	۱۰	۲۰	۲۰	۲۰	درصد استفاده

پخت کیلنکر 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 فرآیند

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 (%)

Tit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O ₃	Na ₂ O ₃	cl
77.4	14.15	2.99	2.68	42.25	1.05	0.29	0.41	0.31	0.007

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
22.1	4.66	4.15	66.1	1.37	0.56	0.4	0.4

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
21.13	4.47	3.93	63.36	1.61	2.55	0.53	0.48

ضمناً در این تحقیق از دوده سیلیس (میکروسیلیس) کارخانه فروسیلیس ایران واقع در سمنان استفاده شده است. از الیاف ماکرو سینتتیک (PPS) در درصد حجمی کم برای کنترل ترک و افزایش دوام بتن استفاده شده که مشخصات فیزیکی آن در جدول ۸ توضیح داده شده است.

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 : $0,91 \text{ gr/cm}^3$
دمای ذوب : $160-180$	مدول الاستیسته : $6,4 \text{ GPa}$
جذب آب : ندارد	مقاومت کششی : 693 Mpa
در دمای 18 - شکننده می‌شود	طول الیاف : 5 سانتی‌متر

ملاط جهت اطمینان از مخلوط شدن کامل مصالح پرداخته می‌شود و سپس به مدت 90 ثانیه میکسر روشن شده تا عمل اختلاط ادامه یابد و خمیر ملاط تعمیراتی آماده ریختن در قالب‌ها می‌شود. همین مرحله‌ها در مرحله دوم تکرار می‌شود.

در این تحقیق طرح‌های اختلاط ملاط 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 می‌باشد. $K0$ بعنوان نمونه مرجع بدون دوده سیلیس است و نمونه‌های $K1$ (دوده مرحله اول) و $K2$ (دوده مرحله دوم) و $K3$ (دوده مرحله سوم) با سه درصد $12, 24, 36$ درصد هستند که در نامگذاری مدنظر قرار گرفتند. با توجه به نتایج آزمایش‌های فاز اول، مشخص شد که مخلوط $(K2-36)$ بهترین نتیجه را دارند، از این مخلوط‌ها به منظور ساخت نمونه‌های بتنی حاوی درصد‌های مختلف از دوده سیلیس و الیاف استفاده گردید که مجموعاً 11 طرح اختلاط در مرحله دوم مطابق جدول 10 در نظر گرفته شدند. در این طرح مخلوط در مواردی فقط دوده سیلیس SF با درصد‌های $3,5$ و $7,5$ درصد از

در ساخت ملاط تعمیری از فوق روان کننده شرکت کپکو واقع در شهر سمنان استفاده شده است. افزودنی پلاستیت 100 SPC یک فوق روان کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات اتر است که مناسب بتن‌های با نسبت آب به سیمان کمتر از 40% در هوای معتدل می‌باشد. پلاستیت 100 SPC با پخش‌شوندگی بالای سیمان، باعث یکنواختی بتن نهایی می‌شود این افزودنی با استانداردهای $ISIRI 2930$ و $ASTM C494$ مطابقت دارد.

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 60 ثانیه به صورت خشک مخلوط می‌شوند. در مرحله ی بعدی 70 درصد از آب به مخلوط خشک اضافه می‌شود و به مدت 30 ثانیه ترکیب می‌شود. مرحله سوم اضافه کردن 30 درصد از آب با فوق روان کننده توزین شده به مخلوط می‌باشد و به مدت 60 ثانیه اختلاط ادامه می‌یابد. پس از مرحله ی سوم دستگاه میکسر خاموش می‌شود و با ابزاری متناسب با ظرف میکسر به زیر و کردن

در جهت قائم، تحت فشار قرار می‌گیرند 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 می‌شود. آزمایش تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم (برزیلی) بر روی نمونه‌های استوانه‌ای 100×200 میلی‌متر براساس ASTM C293-79 انجام گردید.

وزن سیمان استفاده شده و در مواردی الیاف PPS بصورت F با درصدهای حجمی 0.25 ، 0.5 و 0.75 بودند و بعضی طرح‌ها هم ترکیب دوده سیلیس و الیاف هستند. آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد $100 \times 100 \times 100$ mm و طبق استاندارد ASTM C39 انجام گرفت و روند آزمایش به این صورت است که نمونه‌های مکعبی زیر جک هیدرولیکی قرار داده می‌شوند و

جدول ۹- طرح‌های مخلوط ملات ترمیمی استفاده شده در مرحله اول (۱ متر مکعب)

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 (۱ متر مکعب)

کد مخلوط	آب	مقدار سیمان (kg)	دوده سیمان	دوده سیلیس	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

۴. تحلیل نتایج

در مورد نتایج مرحله اول مقاومت‌های فشاری ۲۸،۷ و ۹۰ روزه نمونه‌های مکعبی ۱۰۰ میلیمتری و مقاومت‌های کششی غیر مستقیم ۲۸،۷ 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 (۵، ۳، ۷، ۵) و الیاف با درصدهای حجمی (۰، ۲۵، ۵۰، 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 ۱، ۸ و ۳۳ درصد و برای ۲۸ روزه کاهش ۸، ۱۰ و ۳۶ درصد و برای ۹۰ روزه کاهش ۸، ۱۱ و ۳۴ درصد بودند.

جدول ۱۱- مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹ روزه مخلوط‌های بتنی شامل دوده سیمان مختلف.

کد مخلوط	۷ روزه (MPa)		۲۸ روزه (MPa)		۹۰ روزه (MPa)	
	متوسط	هر نمونه	متوسط	هر نمونه	متوسط	هر نمونه
K0	۴۱.۱	۴۳.۳	۵۴.۲	۵۳.۸	۶۲.۶	۵۹.۲
		۴۰.۹		۵۱.۵		۶۲.۱
		۳۹.۱		۵۷.۳		۶۵.۵
K1-12	۳۷.۶	۴۲.۱	۵۱.۳	۴۸.۲	۶۰.۸	۵۷.۰
		۳۵.۲		۴۸.۶		۶۱.۱
		۳۵.۵		۵۷.۰		۶۴.۳
K1-24	۳۶.۱	۳۹.۵	۴۸.۷	۴۵.۱	۵۴.۲	۴۹.۸
		۳۳.۶		۴۷.۴		۵۷.۵
		۳۵.۲		۵۳.۶		۵۵.۳
K1-36	۳۴.۲	۳۲.۹	۴۴.۶	۴۵.۳	۴۷.۸	۵۰.۱
		۳۴.۶		۴۵.۹		۴۷.۲
		۳۵.۱		۴۲.۶		۴۶.۱
K2-12	۴۷.۶	۴۵.۷	۵۹.۱	۵۷.۴	۶۶.۲	۶۸.۴
		۴۶.۲		۶۲.۰		۶۸.۲
		۵۰.۹		۵۶.۹		۶۲.۰
K2-24	۵۰.۲	۵۱.۷	۶۰.۸	۶۰.۵	۶۷.۶	۶۶.۷
		۴۹.۸		۵۹.۶		۶۷.۹
		۴۹.۱		۶۲.۳		۶۸.۲
K2-36	۵۵.۱	۵۷.۲	۶۲.۱	۶۱.۴	۶۹.۱	۶۶.۳
		۵۴.۶		۶۰.۲		۶۹.۷
		۵۳.۵		۶۶.۷		۷۱.۳
K3-12	۴۰.۷	۴۲.۹	۴۹.۹	۵۰.۱	۵۷.۳	۵۴.۷
		۴۰.۸		۴۷.۳		۵۷.۲
		۳۸.۴		۵۳.۳		۶۰.۰
K3-24	۳۷.۸	۴۰.۷	۴۸.۸	۴۶.۵	۵۵.۷	۵۱.۶
		۳۵.۹		۴۷.۶		۵۸.۴
		۳۶.۸		۵۳.۳		۵۷.۱
K3-36	۲۹.۲	۳۱.۴	۳۶.۵	۳۴.۹	۴۱.۳	۳۸.۶
		۳۷.۷		۳۵.۸		۴۳.۲
		۳۸.۸		۳۸.۸		۴۲.۱

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

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

و ۳۶ درصد دوده سیمان برابر به ترتیب ۲، ۱۱ و ۱۵ درصد و برای مقاومت ۲۸ روزه افزایش ۳، ۱۲ و ۱۶ درصد بودند. با افزایش درصد دوده سیمان نوع K3 مقاومت کششی ۷، ۲۸ روزه کاهش یافتند که میزان کاهش مقاومت ۷ روزه برای درصدهای ۱۲، ۲۴ و ۲۹ درصد دوده سیمان برابر به ترتیب ۲۶، ۳۹ و ۴۶ درصد و برای مقاومت ۲۸ روزه کاهش ۳۱، ۴۳ و ۴۹ درصد بودند.

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 افزایش مقاومت ۷ روزه برای درصدهای ۱۲، ۲۴

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

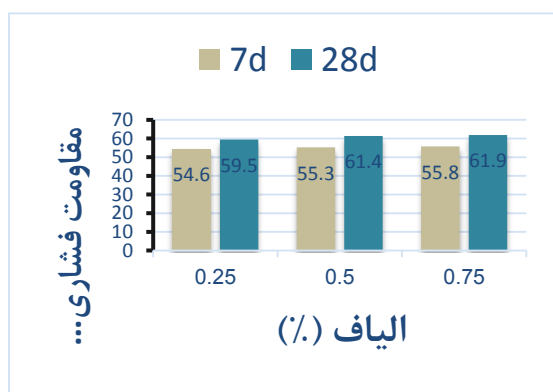
کد مخلوط	۷ روزه (MPa)		۲۸ روزه (MPa)	
	هر نمونه	متوسط	هر نمونه	متوسط
K0	۴۳.۳	۴۱.۱	۵۳.۸	۵۴.۲
	۴۰.۹			
	۳۹.۱			
K2-36, SF-3.5	۵۰.۶	۵۵.۰	۵۹.۷	۶۳
	۵۸.۸			
	۵۵.۶			
K2-36, SF-7.5	۵۳.۱	۵۷.۱	۶۴.۱	۶۵.۴
	۵۹.۳			
	۵۸.۸			
K2-36, F-0.25	۵۱.۲	۵۴.۶	۵۶.۲	۵۹.۵
	۵۳.۰			
	۵۹.۵			
K2-36, F-0.5	۵۴.۲	۵۵.۳	۶۰.۷	۶۱.۴
	۵۸.۵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

جدول ۱۴- مقاومت فشاری ۲۸، ۷ روزه مخلوط‌های بتنی شامل دوده سیمان، دوده سیلیس و الیاف.

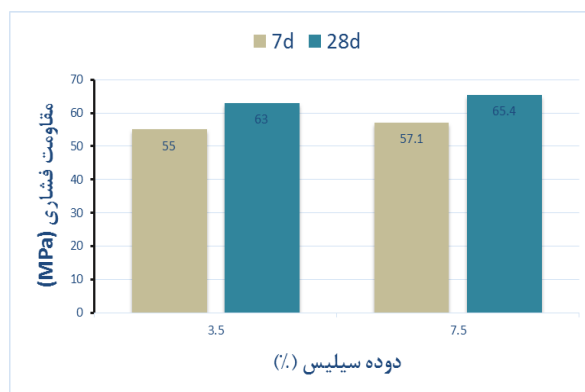
کد مخلوط	۷ روزه (MPa)		۲۸ روزه (MPa)	
	هر نمونه	متوسط	هر نمونه	متوسط
K2-36, SF-3.5	۱.۸۱	۱.۸۶	۲.۵۵	۲.۷۱
	۱.۹۱			
K2-36, SF-7.5	۱.۹۴	۱.۸۸	۲.۸۳	۲.۷۵
	۱.۸۱			
K2-36, F-0.25	۲.۳۹	۲.۴۲	۳.۴۷	۳.۵۲
	۲.۴۵			
K2-36, F-0.5	۲.۴۸	۲.۵۳	۳.۶۰	۳.۶۸
	۲.۵۸			
K2-36, F-0.75	۲.۴۸	۲.۵۵	۳.۶۳	۳.۷۱
	۲.۶۱			
K2-36, SF-3.5, F-0.25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

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

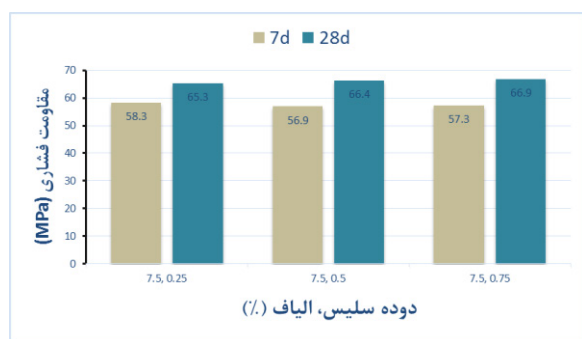
استفاده از الیاف با درصد‌های ۰،۲۵، ۰،۵ و ۰،۷۵ درصد، این نسبت افزایش نسبت به بتن مرجع برای ۷ روزه به ترتیب ۳۳، ۳۵ و ۳۶ درصد و برای ۲۸ روزه به ترتیب ۱۰، ۱۳ و ۱۴ درصد بودند. در حالت استفاده همزمان دوده سیلیس و الیاف، نسبت افزایش مقاومت فشاری نسبت به بتن مرجع برای ۷ روزه بین ۳۷ تا ۴۲ درصد و برای ۲۸ روزه بین ۱۵ تا ۲۳ درصد بودند. نتایج مربوطه در شکل‌های ۱ تا ۴ نشان داده شده‌اند.



شکل ۲- مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن‌های شامل دوده سیمان K2 ۳۶ درصد با فقط الیاف کامل.



شکل ۱- مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن‌های شامل دوده سیمان K2 ۳۶ درصد با فقط دوده سیلیس.



شکل ۴- مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن‌های شامل دوده سیمان K2 ۳۶ درصد با ترکیب دوده سیلیس با درصد ۷,۵ و الیاف کامل



شکل ۳- مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن‌های شامل دوده سیمان K2 ۳۶ 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 استفاده از روسازی بتنی غیر مسلح درزدار (JPCP) در ایستگاه های

BRT شهر تهران بوسیله تحلیل اجزای محدود

(مطالعه موردی ایستگاه BRT میدان امام حسین (ع) شهر تهران)



آرمان صفا

مدیر گروه آزمایشگاههای مرکز مطالعات
ژئوتکنیک و مقاومت مصالح سازمان
مشاور فنی و مهندسی شهر تهران



شهرام یزداندوست همدانی

مدیر فنی مرکز مطالعات ژئوتکنیک و
مقاومت مصالح سازمان مشاور فنی و
مهندسی شهر تهران



آرش گوهری

رییس مرکز مطالعات ژئوتکنیک و
مقاومت مصالح سازمان مشاور فنی و
مهندسی شهر تهران
عضو انجمن بتن ایران

چکیده

با عنایت به گسترش روزافزون استفاده از تسهیلات ترافیکی و عزم شهرداری تهران در ایجاد شرایط پاسخگویی به حجم بالای تقاضای سفر از تسهیلات عمومی حمل و نقل، همواره بحث تعمیر و نگهداری تجهیزات مرتبط و روسازی راه ها که اصلی ترین بستر ایجاد این تسهیلات می باشند، مطرح می باشد. در این راستا با توجه به تعداد افراد جا به جا شده توسط اتوبوس های BRT، همواره با ترافیکی بسیار سنگین در مسیرهای اختصاصی این خطوط مواجه هستیم. این موضوع همواره باعث بروز خرابی هایی در سطح روسازی مسیر و ایستگاه های BRT می شود که علاوه بر تحمیل هزینه های گزاف بهسازی مجدد، موجب بوجود آمدن احساس عدم آرامش در افراد سوار بر اتوبوس و همچنین خرابی زودرس قطعات اتوبوس های تندرو می شود که با توجه به پرخرج بودن تعمیر و نگهداری این اتوبوس ها، هزینه های تعمیر و نگهداری این وسائل نقلیه را نیز بایستی به فهرست هزینه های این موضوع اضافه کرد. به علاوه بستن مسیرهای اختصاصی برای عملیات ترمیم و بهسازی موجب بروز ترافیک سنگین و بروز عدم رضایت در مسیرهای اصلی می گردد. چنانچه مشاهده شده است اکثر خرابی های رخ داده در مدت زمان کوتاهی پس از اجرای روسازی بروز کرده است. خرابی هایی نظیر پدیده شیارشدگی، ترکهای انعکاسی و ... که همگی باعث کاهش دوره بهره برداری خطوط اتوبوس تندرو در تهران می شود. در این مقاله ایستگاهی از خطوط اتوبوس تندروی خط شماره ۱ تهران که یکی از خطوط پر ترافیک می باشد، انتخاب شده است و پس از ارزیابی چشمی و استخراج مشخصات هندسی و مقاومتی لایه های روسازی بوسیله سونداز عمقی و با در نظرگیری ۳ حالت از روسازی شامل روسازی بتن آسفالتی قدیمی، روسازی بتن آسفالتی جدید و روسازی بتنی درزدار غیر مسلح یا JPCP، با استفاده از روش تحلیل اجزای محدود، ارزیابی، تحلیل و نتایج آن تفسیر گردیده است. در نهایت نتایج تحلیل نشان می دهد استفاده از روسازی بتنی درزدار غیر مسلح یا JPCP دارای عملکرد بسیار مناسبی در برابر بارهای محوری سنگین اتوبوس های BRT خواهد داشت.

کلمات کلیدی: روسازی بتنی درزدار غیر مسلح، روسازی بتن آسفالتی، تحلیل اجزای محدود، اتوبوس تندرو

سریع السیر ، روسازی مسیر متناسب با بارهای ترافیکی وارده و تعمیر و نگهداری آن از جمله ی این دشواری ها می باشد. برای حل این مشکلات، جای تحلیل دقیق نیروهای وارده برای لایه های روسازی وضع موجود احساس می شود. در این مقاله ایستگاهی از خطوط اتوبوس تندروی خط شماره ۱ تهران که یکی از خطوط پر ترافیک می باشد، انتخاب شده است و پس از ارزیابی چشمی و استخراج مشخصات هندسی و مقاومتی لایه های روسازی بوسیله سونداژ عمقی و با در نظرگیری ۳ حالت از روسازی شامل روسازی بتن آسفالتی قدیمی، روسازی بتن آسفالتی جدید و روسازی بتنی درزدار غیر مسلح یا JPCP، با استفاده از روش تحلیل اجزای محدود، ارزیابی، تحلیل و نتایج آن تفسیر گردیده است.

۲- بیان مسئله

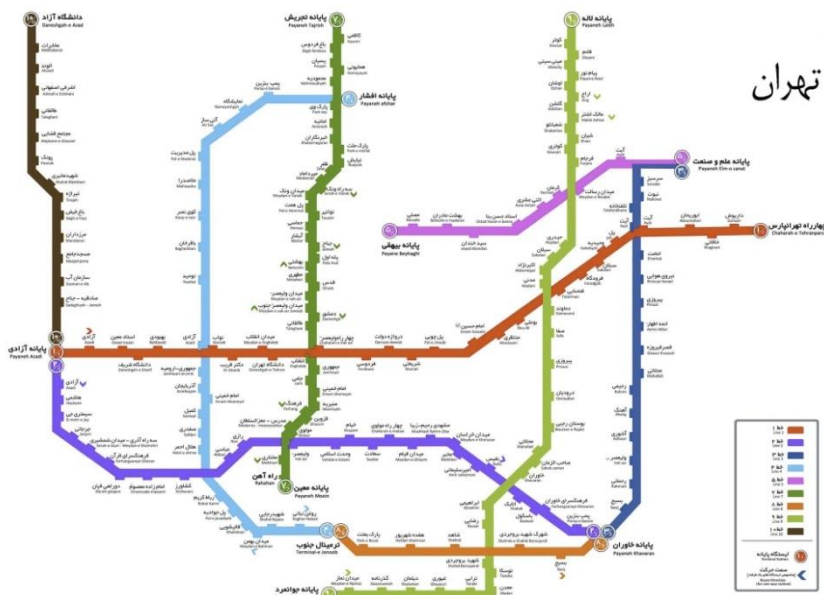
پس از بازگشایی مسیرهای BRT در سال ۱۳۸۷ و گذشت چند سال از بهره برداری از این خطوط، مشکلاتی از قبیل موج دار شدن روسازی این مسیرها ، شیارشدگی مسیر چرخ ها ، ایجاد چاله و جمع شدن آب در بعضی نقاط ، ایجاد ترکهای موزاییکی در بعضی نقاط ، ایجاد ترک های لغزشی و ... بروز کردند. در مواجهه با هرکدام از این مشکلات شهرداری تهران بعنوان متولی تعمیر و نگهداری این مسیرها اقدام به بازسازی این مسیرها و رفع عیوب آنها می کرد. عموم خرابی های ایجاد شده در ایستگاه های BRT بعلت بارگذاری سنگین ترافیکی، خستگی ناشی از تکرار بسیار زیاد بارگذاری به همراه سرعت پایین حرکت و در نتیجه خستگی بیش از حد لایه ی رویه آسفالتی در اثر بارهای وارده بر آن است. با توجه روند رو به رشد سفرهای درون شهری در کلانشهری همچون تهران نیاز روز افزون به مسیرهای اتوبوس تندرو هر روزه احساس می گردد. بنابراین بحث نگهداری از این مسیرها بسیار پر اهمیت جلوه می کند. ساخت و توسعه ی خطوط BRT تا سال ۱۳۹۰ با سرعت بالایی ادامه پیدا کرد. عموم این خطوط در مناطق با جذب بالای سفر احداث شده اند. در شکل شماره ۱ نقشه ی خطوط BRT شهر تهران آورده شده است. همانطور که مشاهده

ناوگان حمل و نقل عمومی تهران شامل اتوبوس های شهری ، تاکسی های شخصی و عمومی و مترو می باشد که در این بین با ورود اتوبوسهای تندرو در مناطق با جذب سفر بالا در شهر تهران ، که دارای مسیرهای اختصاصی هستند و زمان سفر را به شدت کاهش می دهند، تاثیر بسزایی در رضایتمندی عمومی شهروندان تهرانی، کاهش میزان تصادفات، کمک به حفظ محیط زیست و ... داشته است. با توجه به توسعه ی روزافزون سفرهای درون شهری و در نتیجه استفاده ی بیشتر از ناوگان حمل و نقل شهری به خصوص خطوط اتوبوس تندرو، لزوم بیش از پیش توجه به تعمیر و نگهداری روسازی های این خطوط بیشتر اهمیت می یابد.

در این راستا با توجه به تعداد افراد جا به جا شده توسط اتوبوس های BRT ، همواره با ترافیکی بسیار سنگین در مسیرهای اختصاصی این خطوط مواجه هستیم. این موضوع همواره باعث بروز خرابی هایی در سطح روسازی مسیر و ایستگاه های BRT می شود که علاوه بر تحمیل هزینه های گزاف بهسازی مجدد، موجب بوجود آمدن احساس عدم آرامش در افراد سوار بر اتوبوس و همچنین خرابی زودرس قطعات اتوبوس های تندرو می شود که با توجه به پرخرج بودن تعمیر و نگهداری این اتوبوس ها، هزینه های تعمیر و نگهداری این وسائل نقلیه را نیز بایستی به فهرست هزینه های این موضوع اضافه کرد. به علاوه بستن مسیرهای اختصاصی برای عملیات ترمیم و بهسازی موجب بروز ترافیک سنگین و بروز عدم رضایت در مسیرهای اصلی می گردد. چنانچه مشاهده شده است اکثر خرابی های رخ داده در مدت زمان کوتاهی پس از اجرای روسازی بروز کرده است. خرابی هایی نظیر پدیده ی شیارشدگی ، ترکهای انعکاسی و ... که همگی باعث کاهش دوره ی بهره برداری خطوط اتوبوس تندرو در تهران می شود. در این بین فراهم آوردن تسهیلات مورد نیاز حمل و نقل سریع السیر و در صدر آنها ساخت خطوط BRT کاری بس دشوار و پر هزینه می باشد. مواردی از قبیل تخصیص فضا به خطوط

می شود خطوط BRT از تمامی نقاط شهر تهران در حال گذر هستند، در این بین خطوطی که فاقد شرایط زهکشی مناسب هستند، مانند خطوط غربی-شرقی و بالعکس بیشتر تحت خرابی هایی نظیر شیارشدگی قرار می گیرند.

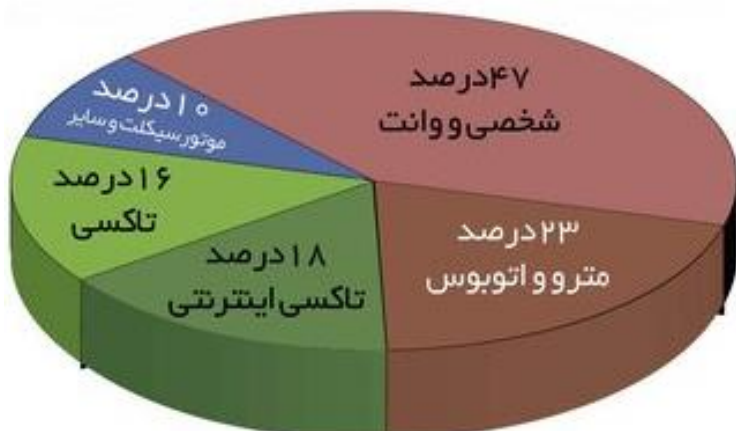
خطوط سامانه اتوبوس تندور تهران



شکل شماره ۱: نقشه خطوط BRT [۱]

طور که در نمودار شماره ۱ نشان داده شده است استفاده از خطوط اتوبوسرانی در شهر تهران در ساعات مختلف روز رتبه دوم را از بین دیگر تسهیلات موجود در شهر تهران را دارا می باشد. [۱]

براساس آمارهای رسمی، تعداد سفر روزانه شهر تهران تا سال ۱۳۹۶ از مرز ۱۸,۳ میلیون سفر در روز گذر کرده است که با توجه به نمودار زیر، به معنی سفر بیش از چهار میلیون نفر در روز با استفاده از این خطوط می باشد. همان



نمودار شماره ۱: دیاگرام سهم انواع مدهای حمل و نقل در سفرهای درون شهری تهران [۱]

و ... موجب شده است تا خرابی‌هایی نظیر شیارشدگی، ترک‌های انعکاسی، چاله و ... در ایستگاه‌های BRT ایجاد شود. تجربه در شهر تهران نشان داده است که پدیده‌ی شیارشدگی یکی از خرابی‌هایی است که در مدت زمان کوتاهی پس از اجرای روکش جدید در سطح آسفالت رخ می‌دهد. در شکل شماره ۲ این پدیده در یکی از ایستگاه‌های اتوبوس تندرو نشان داده شده است.

یکی از موضوعاتی که باعث گردیده است تا خطوط و ایستگاه‌های BRT پس از گذشت مدت زمان کوتاه از ساخت و بهره‌برداری دچار خرابی گردد، عدم شناخت از وضعیت حال حاضر روسازی راه اعم از لایه بندی، پارامترهای مقاومتی لایه‌های روسازی راه، عدم شناخت رفتار هر کدام از انواع روسازی‌ها با مصالح در دسترس در تهران در مقابل بارهای ترافیکی سنگین اتوبوس‌های تندرو



شکل شماره ۲: خرابی rutting یا شیارشدگی در خط شماره یک BRT (عکس از نگارندگان)

بهسازی اساسی برای روسازی ایستگاه BRT گزینه‌ی تخریب رویه موجود و پخش مجدد بتن آسفالتی گرم^۲ و گزینه روسازی بتنی درزدار غیر مسلح یا JPCP^۳ مورد ارزیابی بوسیله روش‌های عددی قرار گرفته‌اند و نتایج آن‌ها با نتایج وضع موجود روسازی ایستگاه مذکور که دارای روسازی بتنی آسفالتی گرم قدیمی است، مقایسه گردیده است.

با استفاده از برداشت مکانیزه و تحلیل وضع موجود روسازی خطوط BRT جهت تخصیص عادلانه بودجه تعمیر و نگهداری، یکی از ایستگاه‌های دارای خرابی زیاد به عنوان ایستگاه مورد مطالعه انتخاب گردید. در شکل شماره ۳ دیاگرام وضعیت مسیر و ایستگاه BRT میدان امام حسین (ع) خط یک اتوبوس تندروی شهر تهران نشان داده شده است. همان‌طور که از رنگ دیاگرام یاد شده بر می‌آید، ایستگاه مذکور بر طبق سیستم نمره دهی و طبقه بندی PCI^۱ دارای وضعیت نامناسب بوده است (محل دارای رنگ قرمز در دیاگرام) که نیاز به گزینه ترمیم و بهسازی اساسی برای آن مطرح گردیده است. از بین گزینه‌های ترمیم و

² Hot Mix Asphalt

³ Jointed Plain Concrete Pavement

¹ Pavement Condition Index

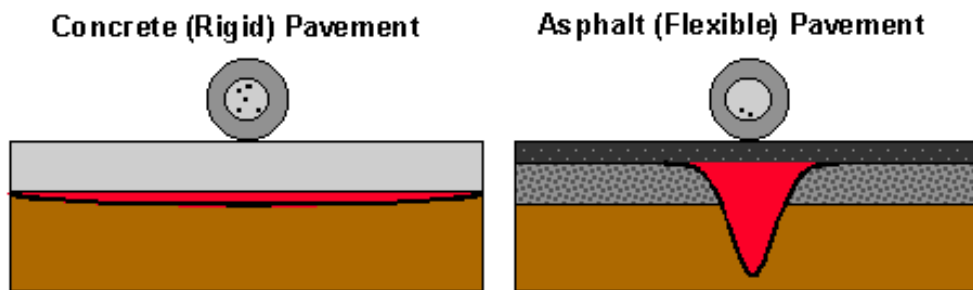


شکل شماره ۳: دیاگرام وضعیت مسیر و ایستگاه خط شماره یک BRT مورد مطالعه در شهر تهران (گزارش از نگارندگان با همکاری دانشگاه صنعتی امیرکبیر)

از لایه های تشکیل دهنده آن و کیفیت مصالح مصرفی این ساختار است. این طراحی به گونه ای انجام می شود که روسازی آسفالتی در دوره طرح با قابلیت اطمینان معینی، آمد و شد راحت، مطمئن و ایمن در یک سطح هموار را تامین نماید. سازه روسازی صلب یا بتن سیمانی، یک سیستم دال - بستر خاکی است که در مقابل نیروهای وارده از طرف بارگذاری فیزیکی و گرادیان حرارتی طراحی می گردد. تفاوت اساسی روسازی بتن آسفالتی با روسازی بتن سیمانی در نحوه پخش نیروهای وارده به لایه های بعدی می باشد. در شکل شماره ۴ مقایسه این پخش نیرو بین دو نوع روسازی نشان داده شده است.

۳- شرح گزینه های ترمیم و بهسازی ایستگاه BRT مورد مطالعه

بر طبق یک تقسیم بندی اولیه بر اساس رفتار سازه ای روسازی راه ها، آن ها را به انواع روسازی صلب، روسازی انعطاف پذیر و روسازی مختلط تقسیم بندی می نمایند. به طور کلی و در یک نگاه گذرا روسازی صلب را به روسازی بتن سیمانی، روسازی انعطاف پذیر را به روسازی بتن آسفالتی و روسازی مختلط را به ترکیبی از این دو نوع روسازی مرتبط می نمایند. سازه روسازی انعطاف پذیر یا بتن آسفالتی، یک سیستم چند لایه ای است که برای توزیع و انتقال بار متمرکز ترافیک به بستر روسازی طرح می شود. طراحی، شامل تعیین ضخامت کل سازه و هر یک



شکل شماره ۴: مقایسه پخش نیرو در روسازی بتنی (صلب) و روسازی آسفالتی (انعطاف پذیر) [۷]

این تنش ها و تداوم آن ها با عواملی همچون سرعت پایین ترافیک عبوری و دمای بالای هوا باعث بوجود آمدن خرابی هایی از قبیل شیارشدگی و انواع ترک ها می باشد.

نکته اساسی در روسازی بتن آسفالتی بروز تنش های فشاری در زیر و کناره های چرخ یا محل بارگذاری و تنش های کششی در مرز لایه های روسازی و طرفین چرخ است. همان طور که در شکل شماره ۵ نشان داده شده است بروز



شکل شماره ۵: افت و خیز ناشی از تنش های فشاری و کششی در روسازی آسفالتی [۲]

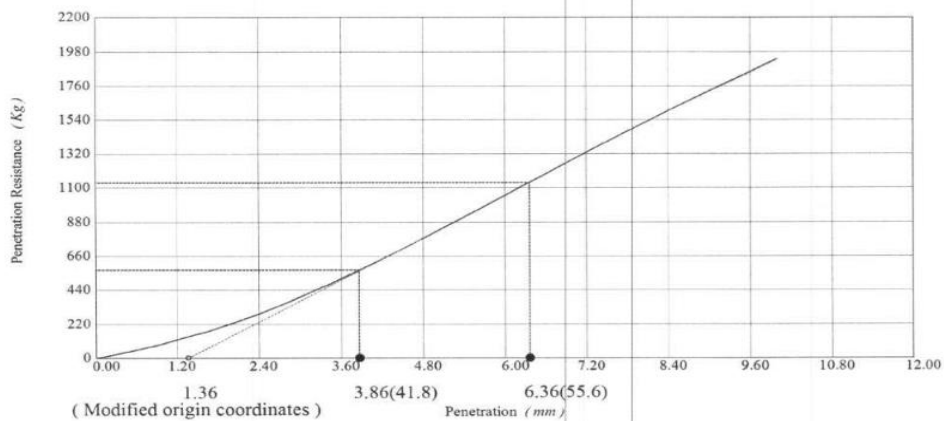
امام حسین (ع) کمک گرفته شده است. در این ایستگاه به جهت تدقیق نتایج طراحی از سونداژ عمقی جهت شناسایی وضعیت خاک موجود نیز بهره گیری شده است. از جمله آزمایشات مورد نیاز جهت شناسایی وضعیت مقاومتی خاک موجود در ایستگاه BRT مذکور، آزمایش CBR به روش اشباع می باشد، که در شکل شماره ۶ نمونه ای از برگه آزمایشگاهی مذکور آورده شده است.

در پژوهش حاضر پس از مدلسازی راهکارهای مد نظر ترمیم و بهسازی ایستگاه BRT نسبت به تحلیل آن در مقابل نیروهای وارده از طرف یک اتوبوس BRT و سپس مقایسه آن ها می پردازیم.

۴-مدلسازی و تحلیل اجزای محدود

در این پژوهش در سه حالت، روسازی یک ایستگاه BRT مدلسازی و تحلیل اجزای محدود شده است. در تعریف مشخصات مقاومتی مصالح و مشخصات هندسی بکار رفته در مدلسازی، از مشخصات وضع موجود ایستگاه BRT

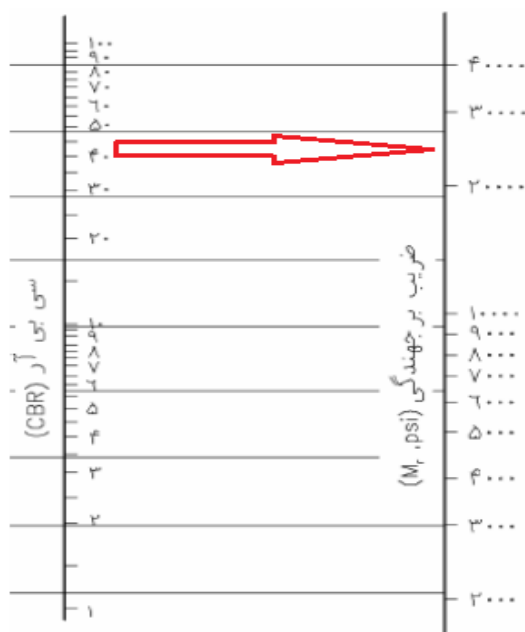
شماره گمانه: T.P.1	نوع لایه:		
شماره نمونه: 24289-2	شماره لایه: مخلوط	الی ۱/۰۰	عمق نمونه (متر): ۰/۲۵
تاریخ آزمایش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۸	موقعیت: ایستگاه BRT بعد از میدان امام حسین (ع) به سمت پل چوبی زیر		نوع آزمایش: اشباع
روش تراکم: AASHTO T180-D	درصد رطوبت بهینه: (۷/۷۴)	حداکثر وزن مخصوص خشک: ۲/۱۴ (g/cm ³)	



تورم	رطوبت پس از انجام آزمایش	نسبت پاریری کالیفرنیا ، CBR (%)		وزن مخصوص خشک	تعداد	مشخصات فنی
		در ۵ میلیمتر (2040 kg)	در ۲/۵ میلیمتر (1360 kg)			
(%)	(%)	(%)	(%)	(g/cm ³)	۵۶	واحد
*	۷/۷۴	۵۵/۴	۴۱/۸	۲/۱۳	۵۶	نتایج

شکل شماره ۶: برگه آزمایشگاهی نتایج CBR اشباع مربوط به ایستگاه مورد مطالعه (گزارش از نگارندگان)

با استفاده از عدد بدست آمده برای آزمایش CBR اشباع و تبدیل آن با استفاده از نمودار شماره ۲، مقدار تقریبی مدول برجهندگی خاک را خواهیم داشت.



نمودار شماره ۲: تعیین ضریب برجهندگی خاک با استفاده از مقادیر CBR [۸]

استفاده در مدلسازی ذکر گردیده است. برای مدلسازی سعی در استفاده از اعداد واقعی بوده است، بنابراین برای مدول الاستیسیته بتن از رابطه پیشنهادی نشریه ۷۳۱ (دستورالعمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راهها) استفاده شده است. [۸]

سه مدل ساخته شده شامل: مدلسازی وضع موجود لایه های خاکی به همراه بتن آسفالتی قدیمی، مدلسازی وضع موجود لایه های خاکی و تخریب و روکش بتن آسفالتی جدید و در نهایت مدلسازی وضع موجود لایه های خاکی به همراه روسازی بتنی غیر مسلح درزدار یا JPCP می باشد. در جدول شماره ۱ مشخصات مصالح مورد

جدول شماره ۱: مشخصات مقاومتی لایه های روسازی مدل شده

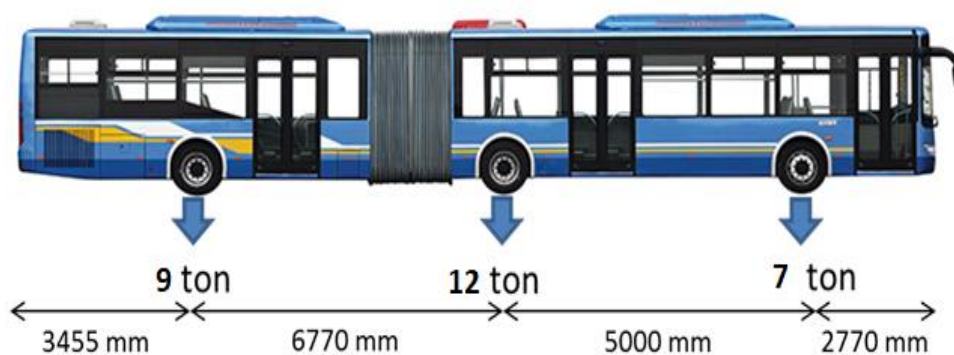
مشخصات مدل روسازی		
نام لایه	مدول الاستیسیته (kg/cm ²)	ضریب پواسون
بتن سیمانی C30	۲۶۶۴۱۱	۰/۳۵
بتن آسفالتی قدیمی	۲۱۰۰۰	۰/۳۵
بتن آسفالتی قدیمی	۱۴۰۰۰	۰/۳۵
اساس	۱۹۶۰	۰/۳۵
زیر اساس	۱۷۵۰	۰/۳
بستر	۱۰۵۰	۰/۴

در خصوص شرایط مرزی نیز در این تحقیق برای سطوح موازی با مسیر حرکت اتوبوس از تکیه گاه های مفصلی، برای سطوح عمود بر مسیر اتوبوس و رویه ی روسازی از شرایط گره آزاد و برای سطوح زیرین روسازی از شرایط گیرداری استفاده شده است. [۵] برای مش بندی مدل و افزایش دقت تحلیل در تمامی نواحی از مش های مستطیلی با ابعاد متغیر بسته به موقعیت مدل استفاده گردیده است. طبیعتا در زیر بار چرخ از مش های ریزتری استفاده گردیده است. مرز شکل دایره ی تماس چرخ با سطح روسازی نیز بعنوان یکی از مرزهای مش بندی در نظر گرفته شده است. در باقی نقاط به جهت کاهش تنش در آن نقاط از مش با فواصل بزرگتر یعنی ۵۰ سانتی متر استفاده گردیده است. [۵]

ضخامت های لایه های روسازی مدل شده با توجه به وضع موجود و همچنین جزئیات استخراج شده از آزمایش مغزه گیری از محل ایستگاه امام حسین(ع) برای بتن آسفالتی قدیمی در مدل ۱ برابر ۲۵ سانتی متر، برای بتن آسفالتی جدید در مدل ۲ برابر ۲۵ سانتی متر، برای بتن غیرمسلح درزدار در مدل ۳ برابر ۲۵ سانتی متر در نظر گرفته شده است. ضخامت لایه ی اساس وضع موجود برابر ۳۰ سانتی متر، لایه زیر اساس ۴۰ سانتی متر و برای لایه ی بستر ضخامت بی نهایت در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است با توجه به نظریه ی سیستم چند لایه ای الاستیک مطرح شده توسط تیموشنکو و گودی در سال ۱۹۵۲ [۳] بایستی لایه ی بستر به صورت یک لایه با عمق بی نهایت در نظر گرفته شود که البته در نرم افزار با عمق زیاد برابر ۲۰۰ سانتی متر مدل شده است.

جهت محور Xها برابر ۳۵۰ سانتی متر، در جهت محور Zها برابر ضخامت لایه ها (که در بالا شرح داده شد) و در جهت محور Yها برابر نصف فاصله ی محور به محور اتوبوس معادل تقریبی ۶۰۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. در شکل شماره ۷ شمای کلی اتوبوس های تندرو به همراه بارهای وارده آن ها نشان داده شده است.

با توجه به تحقیقات صورت گرفته در مدلسازی اجزای محدود مقاطع روسازی بتن آسفالتی و همسان سازی آن با شرایط واقعی و آزمایشگاهی و همچنین مشخصات هندسی و فنی اتوبوس های مورد استفاده در خطوط BRT که در جدول شماره ۲ ذکر گردیده است، ابعاد مدل های ساخته شده برای محور عقب اتوبوس شامل یک محور منفرد با ۴ چرخ در نظر گرفته شده است. ابعاد مدل در



شکل شماره ۷: محل بارگذاری محورهای تیپ اتوبوس BRT [۴]

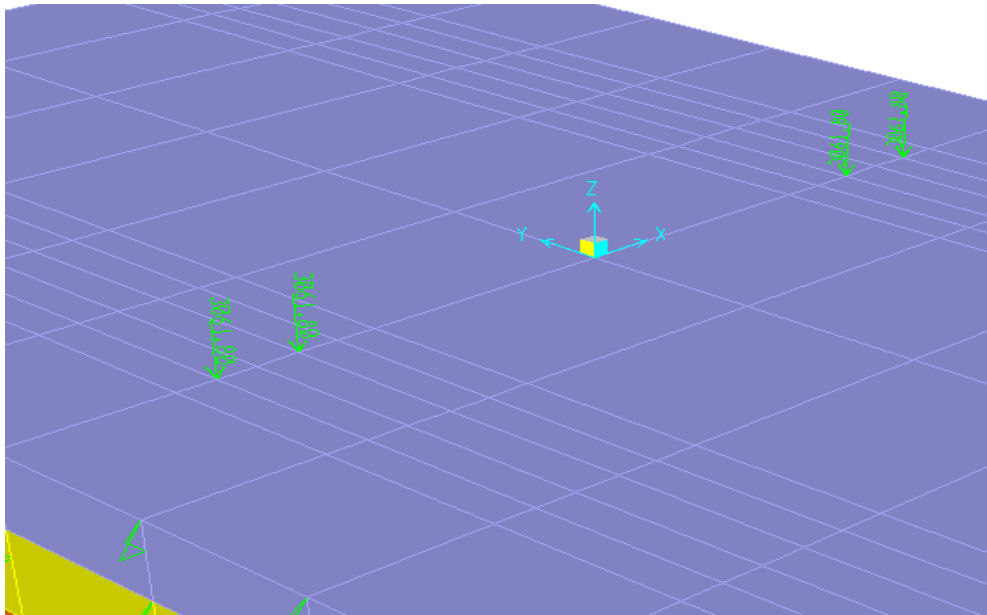
جدول شماره ۲: مشخصات اتوبوس های BRT اخذ شده از شرکت سازنده [۴]

مشخصات اتوبوس های BRT										
طول (cm)	عرض (cm)	ارتفاع (cm)	اندازه چرخ	تعداد صندلی	تعداد ایستاده	جرم خالص	جرم کل (kg)	فاصله محوری (cm)	بار محوری محور جلو (kg)	بار محوری محور عقب (kg)
۱۷۹۰	۲۵۵	۳۱۵	275/70R22/5	۳۵	۱۰۰-۱۲۰	۱۷۱۸۰	۳۱۰۰۰ ۲۸۰۰۰	۶۰۰۰	۷۰۰۰	۱۲۰۰۰

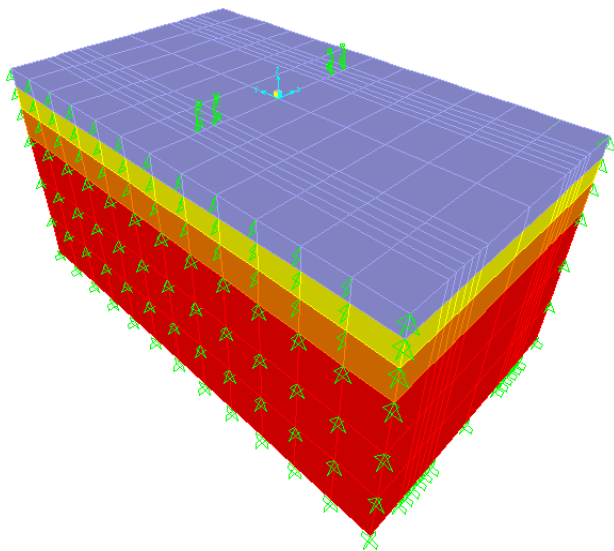
است. لکن با توجه به اینکه اندازه ی سطح تماس به فشار تماسی بستگی دارد، واقعی ترین سطح تماس در روسازی عبارتست از یک مستطیل و دو نیم دایره در دو انتهای آن، در تحلیل اجزای محدود بعلت ایجاد ناهمگونی در تحلیل المان ها معمولا به صورت یک مستطیل با مساحت برابر فرض می گردد. در سال ۱۹۷۸ فرضیه ی سطح دایره ای تماس توسط موسسه ی آسفالت مطرح گردید که در نرم افزار تحلیل روسازی VESYS مورد استفاده قرار

برای مدلسازی از محور وسط اتوبوس استفاده گردیده است که بحرانی ترین میزان بار را دارا است. با توجه به ظرفیت بار محوری اعلام شده توسط کارخانه ی سازنده، مقدار بار محوری برابر ۲۷۰۰۰ پوند در نظر گرفته شده است که پس از تبدیل به بار نقطه ای سهم هر چرخ ۳۰۶۱/۸ کیلوگرم می باشد. در طراحی به روش مکانیستی، اطلاع از سطح تماس چرخ و روسازی ضروری است و فرض می شود که بار محوری به صورت یکنواخت روی سطح تماس پخش شده

گرفت. [۳] در این تحقیق به جهت کاهش ناهمگونی در نتایج و تسریع در کار از بار نقطه ای معادل برای هر چرخ استفاده شد. [۵] مختصات محل وارد شدن بار چرخ با توجه به فاصله ی زوج چرخ از یکدیگر برابر ۲۴ سانتی متر در نظر گرفته شد. در شکل شماره ۸ محل بارگذاری و هندسه ی کلی مدل نشان داده شده است.



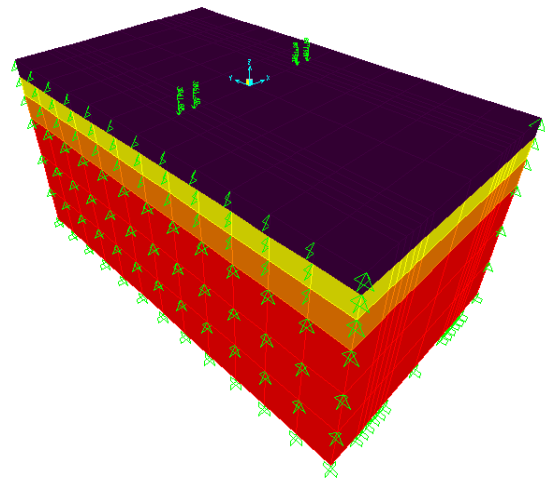
شکل شماره ۸: محل بارگذاری محور سنگین تیپ اتوبوس BRT



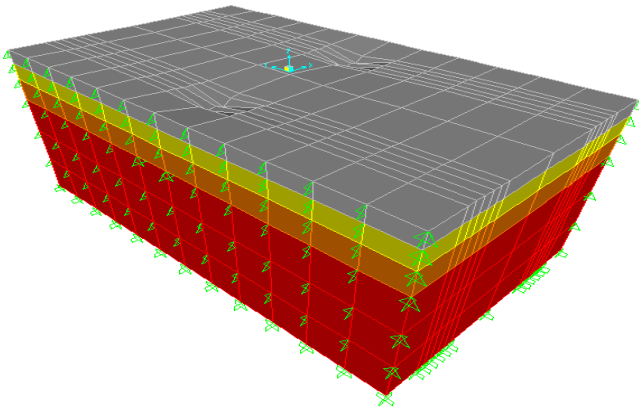
شکل شماره ۹: نمونه ای از هندسه مدل ساخته شده برای JPCP

برای تحلیل اجزای محدود مدل فوق از نرم افزار قدرتمند تحلیل سازه ها SAP2000 نسخه ی ۱۴,۲ استفاده گردیده است. این نرم افزار با داشتن قابلیت های منحصر به فرد تحلیلی و گرافیکی بعنوان یک نرم افزار بسیار دقیق تحقیقاتی و کاربردی در صنعت و دانشگاه شناخته شده است. این نرم افزار محصول کار تحقیقاتی دانشگاه برکلی آمریکا و با قدمتی در حدود ۴۰ سال است که هر سال بروز شده و قدرت عملیاتی آن بهبود پیدا می کند. [۶] در شکل های شماره ۹، ۱۰ و ۱۱ هندسه مدل ساخته شده در نرم افزار نشان داده شده است :

واقعیت کمی از دقت تحلیل می کاهد. تمامی مصالح در تحلیل به صورت خطی فرض شده اند و تحلیل به صورت الاستیک خطی انجام گردیده است. پس از تحلیل شکل تغییر یافته ی مدل تحت بارگذاری به شرح شکل شماره ۱۲ خواهد بود که البته ایجاد این شکل نشان از صحت مدلسازی دارد.

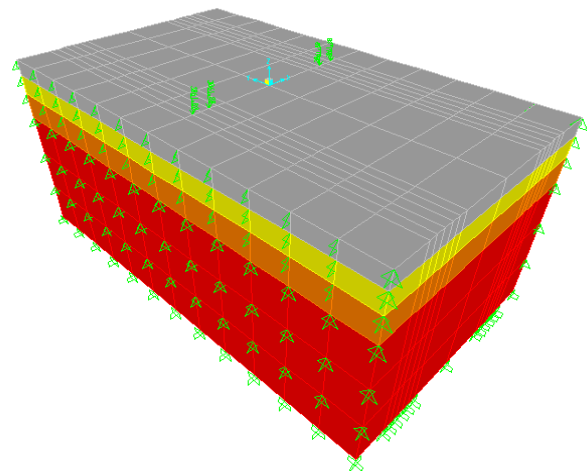


شکل شماره ۱۰: هندسه مدل ساخته شده برای روسازی بتن آسفالتی جدید



شکل شماره ۱۲: تغییر مکان مقیاس شده نمونه مدل ساخته شده در اثر بارگذاری محور سنگین اتوبوس BRT

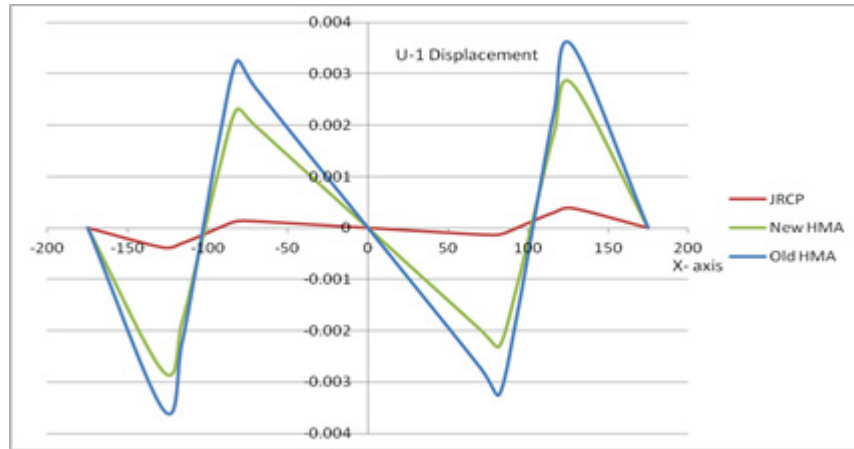
برای مقایسه نتایج هر سه مدل ساخته شده، نتایجی از جمله نتایج تغییر مکان در جهات محورهای ۱ و ۳ در جهت عرض مدل (عرض بارگذاری شده) خروجی گرفته شده است. در نمودار شماره ۳ تغییر مکان در جهت محور محلی شماره ۱، برای بارگذاری قسمت سمت چپ مدل به صورت خلاف جهت محور محلی بوده و برای بارگذاری قسمت سمت راست مدل به صورت هم راستای جهت محور محلی می باشد، به همین دلیل در قسمت سمت راست به صورت مثبت و در قسمت سمت چپ به صورت منفی نشان داده شده است.



شکل شماره ۱۱: هندسه مدل ساخته شده برای روسازی بتن آسفالتی قدیم

۵- تحلیل و نتایج حاصل از آن

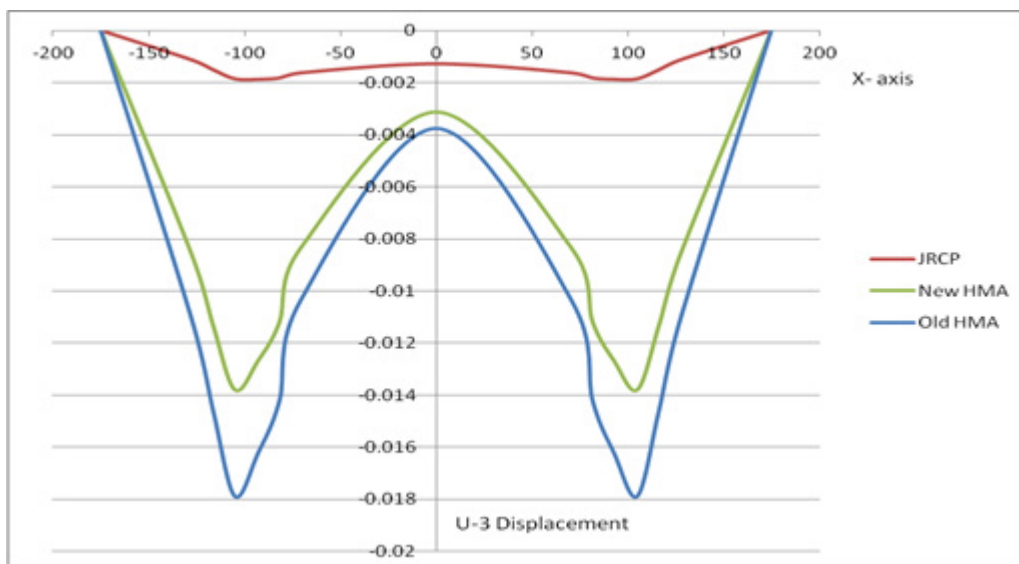
پس از اتمام مدلسازی، مش بندی و بارگذاری اقدام به تحلیل مدل ها گردید. در تحلیل نرم افزاری از وزن مصالح به جهت ایجاد پاسخ های مجزا از وزن مواد روسازی، صرف نظر گردیده است. تمامی لایه ها در اتصال کامل با یکدیگر تحلیل می شوند که البته این موضوع نسبت به



نمودار شماره ۳: مقایسه نتایج تغییر مکان در جهت محور ۱ المانهای مدل برای انواع روسازی ایستگاه BRT (cm)

JPCP نسبت به مدل دارای روسازی بتن آسفالتی جدید در حدود ۸۵٪ و از مدل دارای روسازی بتن آسفالتی قدیم در حدود ۸۹٪ کمتر می باشد. این مقدار اختلاف در تغییر مکان تحت بارگذاری سنگین محور اتوبوس تندرو برای مدل دارای روسازی بتنی مسلح درزدار یا JPCP، نشان از برتری این گزینه نسبت به گزینه های دیگر به جهت جلوگیری از بروز تغییر شکل های بحرانی و به دنبال آن خرابی های روسازی راه را دارد.

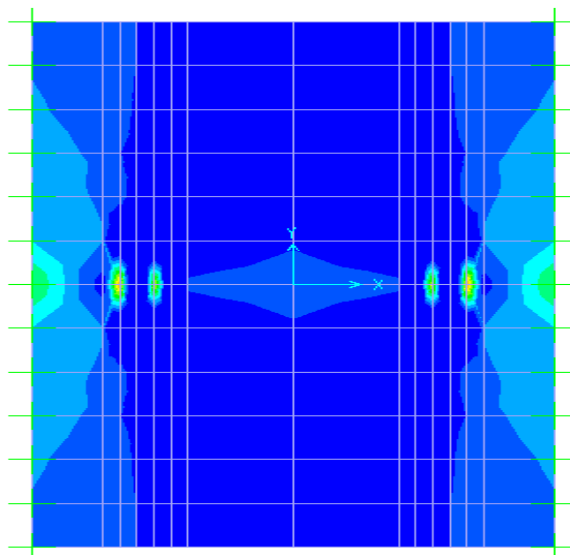
در ادامه نیز نمودار مقایسه نتایج تغییر مکان در جهت محور محلی شماره ۳ در نمودار شماره ۴ آورده شده است. همان طور که از نمودار شماره ۳ برای تغییر مکان در جهت محور شماره ۱ پیداست تغییر مکان روسازی بتنی مسلح درزدار یا JPCP از مدل دارای روسازی بتن آسفالتی جدید در حدود ۹۰٪ و از مدل دارای روسازی بتن آسفالتی قدیم در حدود ۹۳٪ کمتر می باشد. این موضوع در خصوص نمودار شماره ۴ برای تغییر مکان در جهت محور شماره ۳ برای مدل دارای روسازی بتنی مسلح درزدار یا



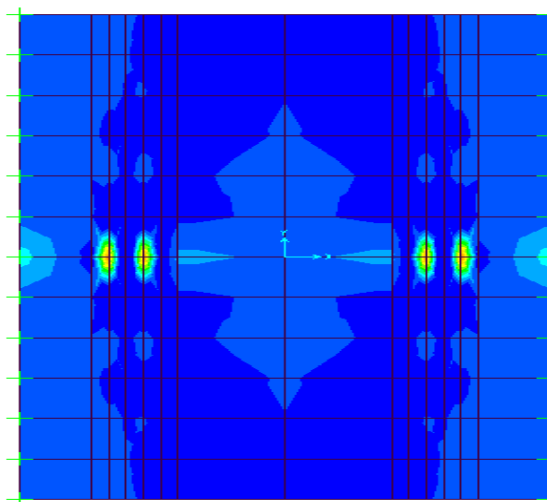
نمودار شماره ۴: مقایسه نتایج تغییر مکان در جهت محور ۳ المانهای مدل برای انواع روسازی ایستگاه BRT (cm)

قسمت های بیشتری از روسازی راه در انتقال نیروهای وارده به لایه های زیرین خواهد گردید. موضوع بعدی کاهش تنش حداکثر جهت محور شماره ۳ در مدل دارای روسازی بتنی غیرمسلح درزدار یا JPCP برابر با ۲۵٪ نسبت به مدل دارای روسازی بتن آسفالتی جدید و برابر با ۴۰٪ نسبت به مدل دارای روسازی بتن آسفالتی قدیمی می باشد. این موضوع در شکل های زیر برای هر سه مدل نشان داده شده است.

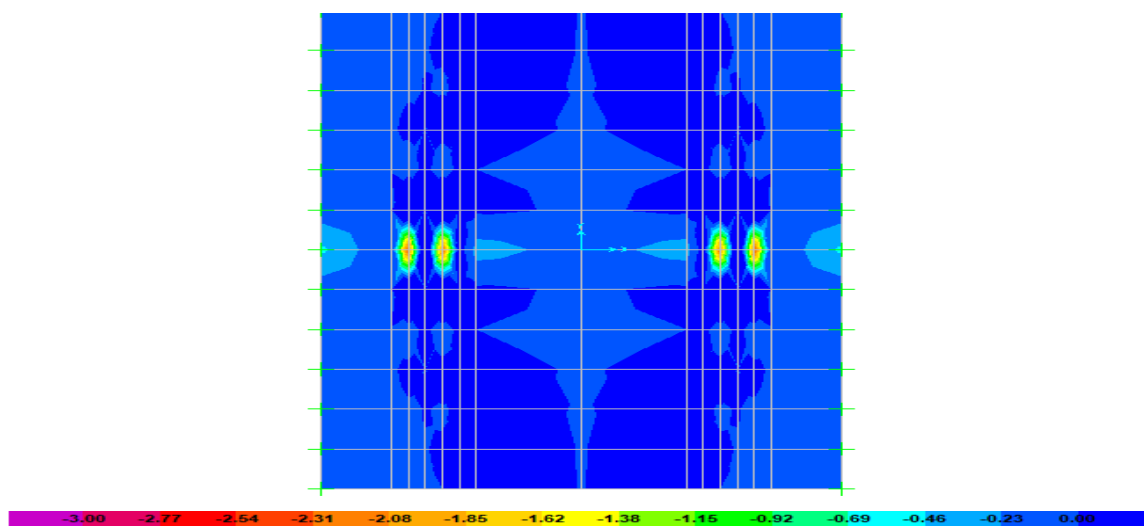
در شکل های شماره ۱۳، ۱۴ و ۱۵ خروجی های تنش در جهت محور شماره ۳ یا همان تنش قائم برای زیر لایه روسازی اصلی آورده شده است. همان طور که از نحوه پخش تنش برای مدل دارای روسازی بتنی غیر مسلح درزدار نسبت به دو مدل دیگر که از نوع روسازی انعطاف پذیر هستند، بر می آید، پخش تنش در مساحت بیشتری صورت گرفته است، که این موضوع منجر به کارکردن



شکل شماره ۱۳: پخش تنش S33 در زیر لایه JPCP (Kg/cm²)



شکل شماره ۱۴: پخش تنش S33 در زیر لایه ی بتن آسفالتی گرم تازه (Kg/cm²)



شکل شماره ۱۵: پخش تنش S33 در زیر لایه ی بتن آسفالتی گرم قدیمی (Kg/cm²)

در مساحت بسیار زیاد نسبت به سطح دال اشاره نمود. در استفاده از این نوع روسازی امکان به کار بردن انواع الیاف میکرو و ماکرو سنتتیک جهت کنترل ترک های ناشی از انقباض و بالا بردن مدول گسیختگی جهت رسیدن به ضخامت های بهینه در طراحی ضخامت نیز می توان اشاره نمود. ضمناً برای استفاده از این نوع روسازی در ایستگاه های BRT پیشنهاد می شود حتماً نسبت به بررسی محلی، انجام آزمایشات شناسایی لایه های موجود نیز توجهی ویژه گردد.

۷-قدردانی

از مجموعه مرکز مطالعات ژئوتکنیک و مقاومت مصالح سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران برای فراهم آوری امکانات انجام پژوهش فوق کمال تشکر و قدردانی را داریم.

۶-نتیجه گیری

با عنایت به مفاهیم مطرح شده در خصوص نحوه عملکرد سازه ای گزینه های روسازی راه جهت ترمیم و بهسازی ایستگاه BRT مورد نظر، استفاده از گزینه روسازی بتنی غیرمسلح درزدار یا JPCP دارای توجیه فنی می باشد. در خصوص این نوع روسازی، استفاده از پرسنل مجرب و آموزش دیده به همراه فراهم آوری شرایط اجرایی بر طبق نشریات و آیین نامه های بالادستی مزید امتنان خواهد بود. در استفاده از این گزینه بایستی به نکاتی از قبیل جانمایی لوله های تاسیساتی و ابنیه های زیر سطحی توجه خاصی مبذول نمود، چرا که با توجه به ضخامت بتن اجرا شده، امکان تخریب در حالت بسته شدن خط اتوبوس BRT بسیار مشکل خواهد بود. از مزایای این نوع روسازی می توان به کاهش تغییر شکل در برابر بارهای سنگین وارده و پخش نیروهای وارده

۸-مراجع

[1] Website: www.tctts.com

[۲] آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران (تجدید نظر اول)، نشریه ۲۳۴

[3] Huang, Y.H. (2004). "Pavement Analysis and Design". Pearson/Prentice Hall.

[4] Website: www.kinglong-bus.ir

[۵] طاحونی ، شاپور ، اجزای محدود برای تحلیل سازه ها ، چهارم ، انتشارات علم و ادب ، ۱۳۸۸ .

[۶] سرداری، هاتف. (۱۳۸۸). "کلید مدلسازی پیشرفته در sap2000". چاپ اول. انتشارات نشر علم عمران

[7] Website; <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/>

[۸] دستورالعمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راه ها ، نشریه ۷۳۱.

ارتباط مقاومت خمشی با مقاومت فشاری بتن (مطالعه موردی فرودگاههای مهر آباد و رامسر)



حامد خوشرو
کارشناس ارشد راه و ترابری
شرکت فرودگاهها و ناوبری هوایی ایران
عضو انجمن بتن ایران



سید علی رضویان امرئی
دانشیار گروه مهندسی عمران
دانشگاه پیام نور مرکز تهران شمال

چکیده

مقاومت خمشی و مقاومت فشاری بتن دو پارامتر بسیار تاثیرگذار در تایید یا پذیرش بتن می باشد و تبدیل این دو پارامتر به یکدیگر یکی از موارد ضروری در طراحی و اجراء می باشد. در برخی از منابع رابطه بین دو پارامتر را با ضریبی تخمینی بیان می کند. در این مقاله سعی شده است برای رابطه موجود ضریبی دقیق پیشنهاد گردد. همچنین بررسی ارتباط بین پارامترهای مقاومت خمشی با مقاومت خمشی فرودگاه رامسر مورد مطالعه ضمن اینکه بررسی بین مقاومت خمشی با درصد حباب هوا و اسلامپ انجام شده تا بررسی گردد، آیا رابطه معنا داری بین این مشخصات وجود دارد. ضریب بدست آمده برای تبدیل مقاومت فشاری به خمشی برابر روش اشتور برابر 0.7 در سیستم متریک محاسبه گردید. کلمات کلیدی: مقاومت خمشی، مقاومت فشاری، درصد حباب هوا، اسلامپ

۱- مقدمه

روسازی، بصورت بتن غلطکی تعریف شد، که یکی از پرچالش ترین نوع روسازی در دنیا محسوب می شود. روسازی بتنی در صنعت هوانوردی از سالها قبل مورد استفاده قرار گرفته است و در اکثر پرون فرودگاهها (پارکینگ های هواپیماها) استفاده می گردد و به دلیل اینکه در این صنعت از آیین نامه های بین المللی استفاده می شد روسازی بتنی بصورت دال تکی مورد توجه قرار

اخیرا به دلایل مختلف مانند افزایش تولید سیمان، افزایش قیمت قیر، امکان صادرات قیر و از طرفی کاهش صادرات سیمان سیاست گذاران کلان کشور را به سوی استفاده از روسازی بتنی ترغیب نمود. به دلیل آشنا نبودن صنعت راهسازی کشور با انواع مختلف روسازی بتنی و همچنین نبود فینشر مخصوص بتن در کشور، اکثر پروژه های

داشته است. اولین باند بتنی در فرودگاه بین المللی امام خمینی (ره) طراحی شد و لایه های زیرین براساس این طراحی اجرا گردید. هنگام اجرا رویه، مجری طرح یک فینشر بتن از کشور ایتالیا وارد کرد ولی به دلایلی هیچ وقت از این فینشر استفاده نشد و سالها در انبار فرودگاه امام خمینی (ره) بلااستفاده ماند و نهایتاً آسفالت جایگزین بتن شد. نزدیک به یک دهه بعد، احداث باند جدید رامسر در دستور کار قرار گرفت و با پیشنهاد پیمانکار و مشاور روسازی بتنی تصویب شد و پیمانکار با استفاده از یک دستگاه فینشر شش متری، اولین باند بتنی کشور را احداث نمود بعد از آن باند ۲۸ چپ فرودگاه تبریز و ۲۹ راست فرودگاه مهرآباد با استفاده از فینشر های مختلف دیگر احداث شد تا این روش در صنعت فرودگاهی نهادینه شود.

مهمترین عامل در پذیرش هر نوع روسازی بتنی، کسب مقاومت خمشی مورد نیاز می باشد، مقاومت خمشی مشخصه ابتدا در طراحی اولیه برای بدست آوردن ضخامت رویه بتنی مورد نیاز می باشد و در اکثر اوقات به دلیل نبود سوابق خمشی در مطالعات از مقاومت فشاری کمک گرفته می شود تا با استفاده از روابط ریاضی، مقاومت خمشی مشخصه بدست آید؛ عدد مقاومت خمشی به دلیل رابطه مستقیم با ضخامت دال بسیار مهم است و اگر در اجرا، مقاومت حاصله از مقاومت طراحی کمتر باشد امکان پذیرش لایه وجود ندارد. همچنین تنها مقاومت مورد پذیرش برای لایه بتنی اجرا شده مقاومت خمشی بوده ولی به دلایل مختلفی مانند نبود تجهیزات و عدم آشنایی با انواع مقاومت خمشی، مقاومت فشاری جایگزین مقاومت خمشی میگردد.

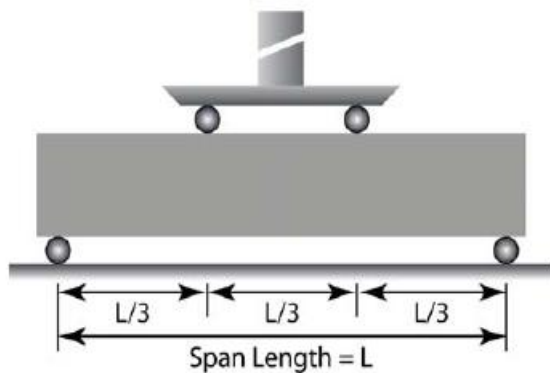
نکته مهم دیگر طرح مخلوط بتن در اکثر استانداردها به ویژه طرح مخلوط ملی ایران بر اساس مقاومت فشاری می باشد، در اکثر پروژه ها به دلیل عجله عوامل دخیل در

پروژه به ویژه کارفرما، قبل از اینکه طرح مخلوط برای مقاومت خمشی تهیه و تصویب شود و نمونه آزمایشی اجرا گردد. طرح مخلوط کارگاهی با در نظر گرفتن مقاومت فشاری تهیه و پروژه شروع می شود. لذا با توجه به جمیع دلایل فوق ارتباط بین مقاومت خمشی و مقامت فشاری بتن اهمیت بسزایی دارد [۱].

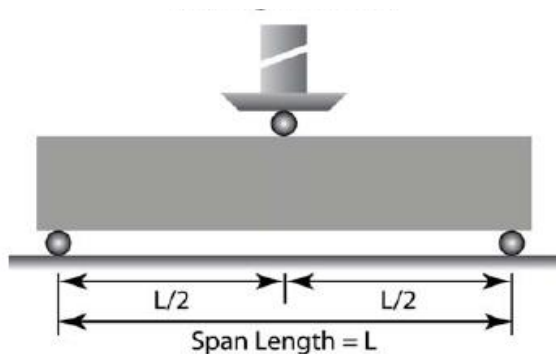
در این مقاله سعی شده باتوجه داده های واقعی بدست آمده از پروژه باند بتنی فرودگاه رامسر و فرودگاه مهرآباد رابطه ای با تخمین خوب بین مقاومت فشاری و خمشی بیان گردد

۲- انواع آزمایش های مقاومت خمشی

مقاومت بتنی که در طراحی روسازی بتنی استفاده شده بر مبنای روش آزمایش AASHTO T97 یا ASTM C78 می باشد، یعنی مقاومت خمشی بتن با استفاده از تیر ساده با بارگذاری چهار نقطه ای است. شانه بتنی، دالها و یا راههای تعریض شده، همه باید تحمل یکسانی را بر طبق اشتو داشته باشند. برای بارگذاری چهار نقطه ای طبق مقاومت خمشی ۲۸ روزه بتنی، از معادلات آیین نامه اشتو استفاده می شود. اگر مقدار مقاومت، با استفاده از برخی روش های دیگری آزمایش و اندازه گیری شده باشد باید برای تبدیل به مقاومت چهار نقطه ای ۲۸ روزه از ضرایب پیشنهادی اشتو استفاده شود [۳].



شکل ۱: مقاومت خمشی بتن در اثر بارگذاری چهار نقطه ای



شکل ۲: مقاومت خمشی بتن در اثر بارگذاری در نقطه مرکزی

۳- آنالیز داده ها

داده های بدست آمده از ۱۱۶ نقطه مختلف آزمایش در فرودگاه رامسر (جدول شماره یک) در آزمایش خمشی برابر ASTM C78 انجام شده است در همین نقاط آزمایش فشاری به روش مکعبی استاندارد ۱۵x۱۵x۱۵ (EN12390) انجام شده است [۲].

یکی دیگر از روشهای وارد کردن نیرو انجام آزمایش خمش بار متمرکز میانی برای تعیین مقاومت خمشی بتن طبق (ASTM C293 یا AASHTO T177) استفاده می شود (شکل ۲). در اثر بارگذاری مستقیم مقاومت مرکز تیر کافی نبوده و امکان دارد ضعیفترین نقطه در تیر باشد. در بارگذاری روی سه دهانه، قسمت یک سوم میانی تیر بطور کامل و یکدست در تنش بوده و در نتیجه ضعیف ترین نقطه در یک سوم میانی تیر واقع شده است. توان تیر در نزدیکی مرکز تیر کافی نیست و شکست در این ناحیه اتفاق می افتد. نتایج آزمایش خمشی بار متمرکز میانی نسبتاً بیشتر از نتایج آزمایش چهار نقطه ای نقطه ای می باشد. بطور معمول نتایج آزمایش نقطه مرکزی حدود ۱۵٪ بیشتر است. در هر حال این رابطه دقیق نیست و نمی شود یک برآورد منطقی از میانگین مقاومت بتن تهیه کرد. در تمامی پروژه های فرودگاهی از آزمایش خمشی چهار نقطه ای استفاده شده است و نتایج با استفاده از فرمول ارائه شده توسط اشتو ارائه گردیده است [۳].

جدول ۱: مقاومت های خمشی چهار نقطه ای ، مقاومت فشاری مکعبی و مقاومت استوانه ای تبدیل شده

C	مقاومت فشاری استوانه ای (MPa)	مقاومت فشاری مکعبی (MPa)	مقاومت خمشی (چهار نقطه ای) (MPa)	شماره	C	مقاومت فشاری استوانه ای (MPa)	مقاومت فشاری مکعبی (MPa)	مقاومت خمشی (سه نقطه ای) (MPa)	شماره
0.73	42.03	47.07	4.72	59	0.64	47.37	53.05	4.41	1
0.73	42.47	47.56	4.75	60	0.73	48.6	54.43	5.08	2
0.74	39.4	44.13	4.63	61	0.73	45.71	51.19	4.94	3
0.73	45.53	50.99	4.91	62	0.75	48.68	54.52	5.23	4
0.75	35.9	40.21	4.48	63	0.71	45.97	51.48	4.84	5
0.68	45.97	51.48	4.6	64	0.69	48.07	53.84	4.81	6
0.77	35.9	40.21	4.63	65	0.76	44.22	49.52	5.05	7
0.72	39.4	44.13	4.51	66	0.7	49.03	54.92	4.89	8
0.74	40.28	45.11	4.7	67	0.74	44.04	49.33	4.89	9
0.73	39.84	44.62	4.6	68	0.75	43.78	49.03	4.97	10
0.73	37.65	42.17	4.51	69	0.76	40.28	45.11	4.83	11
0.73	41.15	46.09	4.7	70	0.74	42.03	47.07	4.79	12
0.75	41.15	46.09	4.82	71	0.77	42.9	48.05	5.02	13
0.71	46.84	52.47	4.89	72	0.7	42.9	48.05	4.57	14

0.82	39.4	44.13	5.15	73	0.73	38.7	43.35	4.53	15
0.7	42.47	47.56	4.58	74	0.74	38.96	43.64	4.6	16
0.74	42.03	47.07	4.82	75	0.79	35.02	39.23	4.7	17
0.74	38.09	42.66	4.58	76	0.79	38.53	43.15	4.91	18
0.73	39.84	44.62	4.58	77	0.73	41.5	46.48	4.67	19
0.77	37.21	41.68	4.72	78	0.8	36.6	40.99	4.83	20
0.72	43.78	49.03	4.79	79	0.74	42.82	47.95	4.84	21
0.75	38.09	42.66	4.65	80	0.67	49.3	55.21	4.67	22
0.73	43.78	49.03	4.84	81	0.73	45.36	50.8	4.89	23
0.77	36.34	40.7	4.63	82	0.69	48.16	53.94	4.79	24
0.73	40.71	45.6	4.67	83	0.75	41.59	46.58	4.84	25
0.73	43.34	48.54	4.79	84	0.8	40.98	45.89	5.13	26
0.72	39.4	44.13	4.55	85	0.75	41.33	46.29	4.82	27
0.76	38.09	42.66	4.7	86	0.76	41.59	46.58	4.87	28
0.75	40.71	45.6	4.77	87	0.7	48.6	54.43	4.91	29
0.75	40.28	45.11	4.77	88	0.74	43.78	49.03	4.91	30
0.8	37.65	42.17	4.89	89	0.74	45.97	51.48	5.01	31
0.7	45.53	50.99	4.75	90	0.68	49.47	55.41	4.79	32
0.77	39.4	44.13	4.84	91	0.69	45.97	51.48	4.7	33
0.72	42.47	47.56	4.7	92	0.73	42.47	47.56	4.75	34
0.76	38.53	43.15	4.75	93	0.72	40.28	45.11	4.55	35
0.74	41.15	46.09	4.72	94	0.73	39.84	44.62	4.58	36
0.73	42.47	47.56	4.77	95	0.68	38.09	42.66	4.2	37
0.71	45.09	50.5	4.77	96	0.69	41.59	46.58	4.48	38
0.71	42.9	48.05	4.65	97	0.71	41.15	46.09	4.55	39
0.69	45.53	50.99	4.63	98	0.77	37.48	41.97	4.72	40
0.72	42.9	48.05	4.7	99	0.74	40.28	45.11	4.7	41
0.72	43.34	48.54	4.72	100	0.71	41.59	46.58	4.55	42
0.7	44.66	50.01	4.67	101	0.73	38.96	43.64	4.58	43
0.71	47.28	52.96	4.91	102	0.76	40.28	45.11	4.82	44
0.67	46.84	52.47	4.55	103	0.69	44.22	49.52	4.6	45
0.69	48.16	53.94	4.77	104	0.72	42.47	47.56	4.67	46
0.7	45.53	50.99	4.72	105	0.71	44.22	49.52	4.75	47
0.7	48.16	53.94	4.87	106	0.74	39.4	44.13	4.67	48
0.71	46.84	52.47	4.89	107	0.75	41.59	46.58	4.82	49
0.73	47.72	53.45	5.03	108	0.67	40.71	45.6	4.27	50
0.68	49.91	55.9	4.82	109	0.71	37.65	42.17	4.34	51
0.69	48.16	53.94	4.82	110	0.71	42.9	48.05	4.67	52
0.71	44.66	50.01	4.77	111	0.76	40.71	45.6	4.84	53
0.71	46.84	52.47	4.87	112	0.72	42.9	48.05	4.72	54
0.69	48.6	54.43	4.82	113	0.75	38.96	43.64	4.7	55
0.7	48.16	53.94	4.84	114	0.7	43.34	48.54	4.63	56
0.77	42.9	48.05	5.03	115	0.75	38.53	43.15	4.67	57
0.69	48.6	54.43	4.84	116	0.76	39.84	44.62	4.79	58

بعد از پردازش داده های حاصله از آزمایش های انجام شده و تبدیل مقاومت فشاری ۲۸ روزه مکعبی به مقاومت فشاری ۲۸ روزه استوانه‌ای بررسی فرمول پیشنهادی ACI برای تبدیل مقاومت خمشی به مقاومت فشاری بصورت ذیل است:

$$F_{se} = C\sqrt{f_c}$$

F_{se} : مقاومت خمشی ۲۸ روزه سه نقطه ای بر واحد MPa و PSI

f_c : مقاومت فشاری ۲۸ روزه استوانه ای برواحد MPa و PSI

C: ضریب تقریبی (برای واحد PSI بین ۸-۱۰ می باشد)

در این مقاله سعی شده است در ابتدا با تبدیل واحد داده های ارائه شده در جدول شماره یک به سیستم PSI ضریب C محاسبه گردد مقدار تعیین شده برای واحد امریکایی ۸٫۸ بدست آمده است که بدلیل تطویل مقاله از ارائه مقاومت ها در واحد انگلیسی خوداری شده است. محاسبات فرمول فوق برای تک تک داده ها محاسبه شده و میانگین ضریب بدست آمده برابر ۰٫۷ می باشد که می توان به عنوان ضریب قابل قبولی بین مقاومت خمشی چهار نقطه ای با مجذور مقاومت فشاری استوانه در سن ۲۸ روزه در نظر گرفته شود. با توجه به بومی سازی ارتباط بین مقاومت خمشی و فشاری ضریب ۰٫۷ می تواند کمک بسیاری به ویژه در طراحی و بدست آوردن ضخامت دال به جامعه مهندسی کشور ارائه نماید.

۴- ارتباط بین داده های درصد هوا ، اسلامپ و مقاومت خمشی

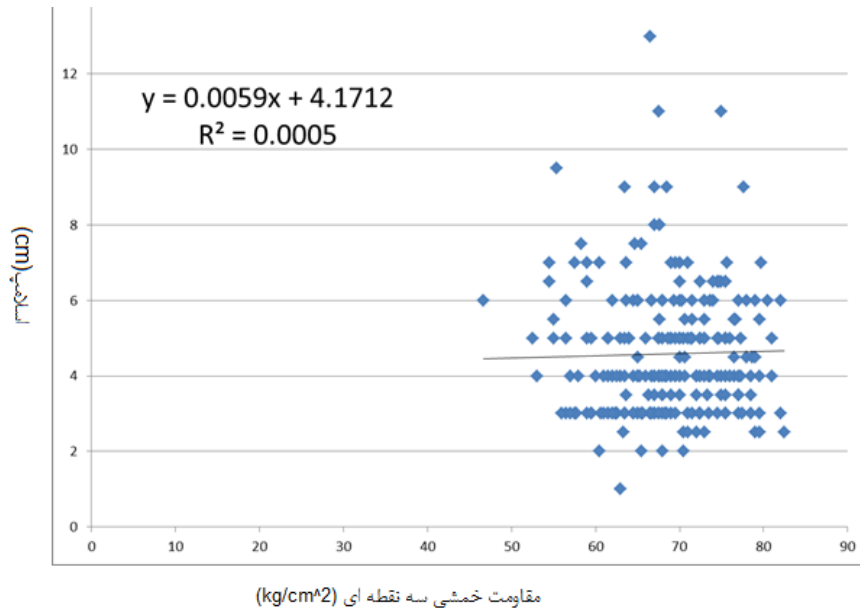
دو پارامتر درصد هوا و اسلامپ در پذیرش بتن تازه بسیار کاربرد دارند، فرایند بتن یک رابطه سخت شونده یک طرفه می باشد و این امر موجب شده تا در صورتی که مقاومت بتن سخت شده از مقاومت مشخصه پایین تر باشد راه حلی به جز تخریب پیش پای کارفرمایان قرار ندهد ضمن اینکه فرآیند تخریب ضمن زمان بر بودن تحمیل هزینه های

ثانویه بطور پیچیده ای بار روانی به پروژه تحمیل می کند اگر بتوان ارتباط معنی داری بین مقاومت بتن سفت شده و دو پارامتر بتن تازه (درصد هوا و اسلامپ) پیدا نمود میتوان مشکل بسیاری از کارگاههای راهسازی را برطرف نمود. [۲]

در این مقاله با توجه به آزمون رگرسیون در بین دویست داده آزمایش شده این ارتباط بررسی شده است در آزمون رگرسیون ضریب به عنوان R یا ضریب همبستگی معرفی می شود که نشان می دهد دو متغییر چقدر با یکدیگر ارتباط معناداری دارند بطور مثال اگر بین اسلامپ و مقاومت خمشی سه نقطه ای ضریب R برابر یک یا نزدیک به یک یک باشد بدین معنی است که دو پارامتر با یکدیگر ارتباط معناداری مستقیم دارند و افزایش اسلامپ باعث افزایش مقاومت خمشی سه نقطه ای شده و اگر پارامتر R برابر منفی یک شود به این معنی است که دو پارامتر با هم ارتباط معنایی داشته ولی رفتار آنها معکوس یکدیگر می باشد یعنی افزایش اسلامپ باعث کاهش مقاومت خمشی سه نقطه ای می گردد و در صورتی که R برابر صفر شود یعنی هیچ ارتباط معناداری بین این دو پارامتر وجود ندارد که در شکل سه ارتباط بین مقاومت خمشی سه نقطه ای سه اسلامپ و در شکل چهار ارتباط بین مقاومت خمشی سه نقطه ای با درصد هوا مورد برآزش قرار گرفته است با توجه به اینکه در اکثر اوقات تصور می شود افزایش اسلامپ باعث افزایش نسبت آب به سیمان و کاهش نسبت مقاومت بتن می گردد ولی باتوجه به طرح مخلوط بتن در فرودگاه بین المللی مهرآباد و استفاده از مواد افزودنی روان کننده کروکسیلاتی این فرآیند تغییر کرده است. با توجه به ضریب همبستگی بین دو متغییر نمودار R برابر ۰٫۲۲ می باشد که تقریباً برابر صفر است یعنی ارتباط معناداری بین این دو پارامتر وجود ندارد. که علت این امر می تواند به دلیل مواد افزودنی استفاده در طرح مخلوط دانست.

خود را حفظ نمایند وجود حباب هوا در بتن جهت افزایش پارامتر دوام موضوعی مهم لحاظ می گردد که در بتن روسازی فرودگاه مهرآباد نیز به امر توجه شده است.

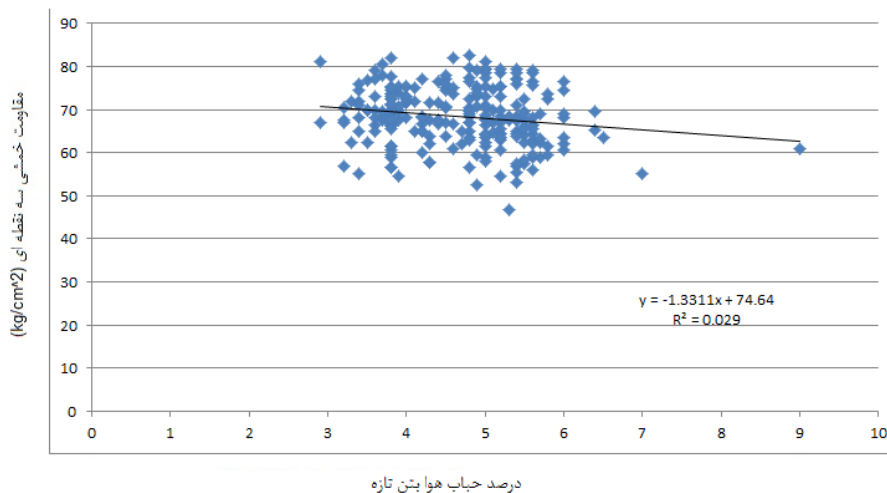
بتن های روسازی به دلیل مجاورت در شرایط آب و هوایی احتمال یخ زدن و آب شدن در زمستانها باید از افزودنی حباب زا استفاده نمایند تا در شرایط طبیعی بتواند دوام



شکل ۳- رگرسیون خطی بین مقاومت خمشی سه نقطه ای - اسلامپ

پارامتر درصد حباب هوا و مقاومت خمشی بتن سخت شده وجود ندارد.

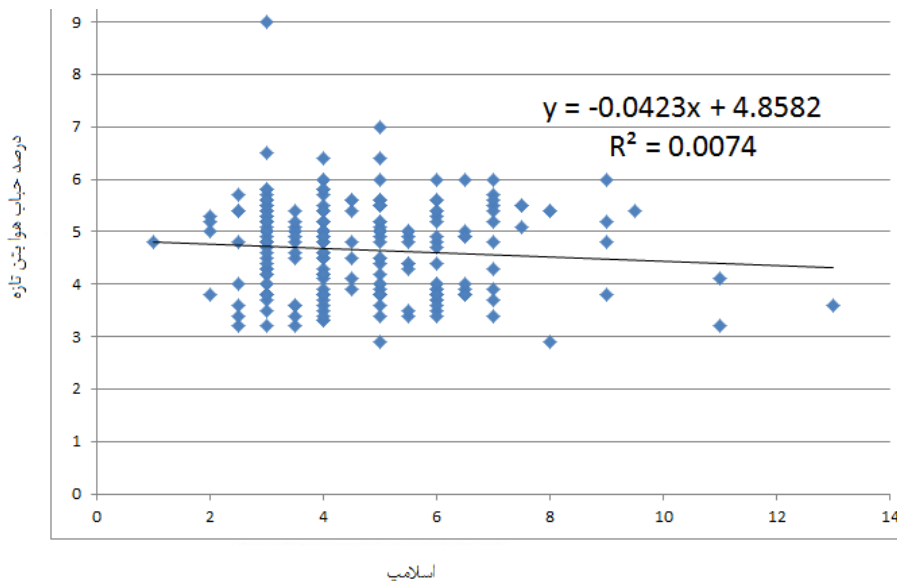
همانطور که در شکل چهار ملاحظه گردید ضریب همبستگی بین دو متغییر نمودار R برابر ۰/۱۷ می باشد که تقریبا برابر صفر است یعنی ارتباط معناداری بین این دو



شکل ۴- رگرسیون خطی بین مقاومت خمشی سه نقطه ای -درصد حباب هوا بتن تازه

رگرسیون میزان ضریب همبستگی بین دو پارامتر R برابر ۰/۰۹ محاسبه گردید که نشان دهنده آن است هیچ ارتباط معنی داری بین دو پارامتر درصد حباب هوا و میزان اسلامپ وجود ندارد. این در شکل شماره پنج قابل مشاهده می باشد.

به منظور شناخت بهتر رفتاری رئولوژی بتن و اینکه آیا با افزایش درصد حباب هوا میزان اسلامپ نیز افزایش می یابد به بررسی ارتباط بین دو پارامتر درصد حباب هوا و اسلامپ در بتن تازه پرداخت شد و از با استفاده از داده‌های جمع آوری شده در فرودگاه مهرآباد و آزمون



شکل ۵- رگرسیون خطی بین میزان اسلامپ -درصد حباب هوا بتن تازه

۵- نتیجه گیری

با توجه به بررسی انجام شده و اهمیت بدست آمدن رابطه بین مقاومت خمشی بتن سخت شده با مقاومت فشاری ۲۸ روزه در فرمول اشتو و ACI بطور دقیق ضمن بومی سازی فرمول ارائه شده در دو سیستم متریک و انگلیسی فرمول بطور صورت زیر می باشد $F_{se}=0.7\sqrt{f_c}$ (C=0.7) در سیستم متریک (مگاپاسکال) و $F_{se}=8.8\sqrt{f_c}$ در سیستم انگلیسی (psi) ارائه می گردد همچنین با توجه به بررسی بدست آمده نمی توان از مشخصات بتن مقاومت خمشی سه نقطه ای بتن سخت شده را پیش یابی نمود یا ارتباطی بین این پارامترها بدست آورد.

همچنین بین پارامترهای اسلامپ، حباب هوا و مقاومت خمشی ارتباط معناداری موجود نبوده و هر یک بطور مستقل از دیگری بر رفتار بتن تاثیرگذار هستند.

در انتها پیشنهاد می گردد تا ضمن بررسی ضریب C در پروژه مشابه در شرایط اقلیمی و کارگاهی مختلف بررسی های بیشتری صورت پذیرد. همچنین تحقیقاتی در خصوص نحوه ارائه طرح مخلوط بتن برای نمونه خمشی افزودن آن به آیین نامه طرح مخلوط ملی اقدام گردد.

۶- قدردانی

در انتهای از جناب آقای دکتر تدین و دکتر چینی از مرکز تحقیقات راه ، مسکن و شهرسازی که نقش مشاور کارفرما را در پروژه داشتن و آقای مهندس پرشاد از مشاور ایمن راه که مشاور پیمانکار بودن جهت جمع آوری مستند سازی اطلاعات پروژه کمال تشکر را داشته و امید است با مستندات تمام پروژه ها اطلاعات فنی لازم در اختیار پژوهشگران و صنعتگران قرار گیرد.

۷- منابع

[۱] *Airport Pavement Design and Evaluation, Advisory Circular AC 150/5320-6D includes changes 1 through 4, Federal Aviation Administration, Washington, D.C., 2006.*

[۲] مبحث نهم مقررات ملی ساختمان (۱۳۹۲) " طرح اجرای ساختمان بتن آرمه " ویرایش چهارم

[۳] خوشرو ، حامد، (۱۳۹۱) ، " روسازی " چاپ اول ، انتشارات تمدن پارس

[4] "Influence Charts for Rigid Pavements," G. Pickett and G. K. Ray, *Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol. 116, pp. 49–73, New York, N.Y., 1951.*

[5] " Standard Method of Test for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third- Point Loading)," AASHTO T 97, 1 January 2018

[6] " Standard Method of Test for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)," AASHTO T 177, 1 January 2017