ارزیابی و ارائه راهکار بهینه برای اصلاح بستر و روسازی معابر مناطق صنعتی (مطالعه موردی: بازار آهن شادآباد تهران)

مقاله علمی-پژوهشی

*رضوان باباگلی (نویسنده مسئول)، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران
محمد کاشانی نوین، دانش آموخته دکتری، مدیر عامل شرکت مهندسین مشاور آرا طرح رویان، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Rezvan.babagoli1987@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۴- پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۳۰
صفحه ۴۵۴-۴۲۹

چکیده

مناطق صنعتی با بارگذاری سنگین و شرایط ترافیکی ویژه، نیازمند روسازی‌های مستحکم و بادوام هستند. این پژوهش با هدف بررسی وضعیت موجود و ارائه راهکار بهینه جهت اصلاح بستر و روسازی معابر بازار آهن شادآباد تهران (با مساحت تقریبی ۴۹ هکتار) انجام شد. محدوده مورد مطالعه که شامل بلوارهای طاووس و بهاران می باشد. روش‌شناسی تحقیق شامل بازدیدهای میدانی، جلسات کارشناسی، آزمایشات میدانی (مانند CBR[1] و نقشه‌برداری)، بررسی تجارب بین‌المللی روسازی‌های صنعتی بتنی، و طراحی روسازی با روش‌های AASHTO[2]، PCA[3] و ACI[4] بود. با توجه با بازدید میدانی، خرابی‌های متعددی از قبیل ترک‌های پوست سوسماری، چاله‌ها، شن‌زدگی و زهکشی نامناسب در آن مشاهده گردید. با توجه به بارهای استاتیکی، دینامیکی و ضربه‌ای ناشی از فعالیت‌های صنعتی و تردد وسایل نقلیه سنگین، استفاده از روسازی‌های صلب (بتنی) به عنوان گزینه برتر شناسایی شد. در این راستا، انواع روسازی‌های بتنی شامل بتن غلتکی (RCC[5])، روسازی بتنی ساده درزدار (JPCP[6]) و بلوک بتنی صنعتی (CBP[7]) مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. طراحی روسازی با در نظرگیری پارامترهای ترافیکی، مقاومت خاک بستر و شرایط محیطی انجام و ضخامت‌های بهینه برای هر گزینه محاسبه گردید. نتایج نشان داد که روسازی بتن غلتکی با توجه به هزینه اولیه مناسب، دوام بالا و نیاز به نگهداری کمتر، به عنوان گزینه نهایی پیشنهاد شد. همچنین مقایسه اقتصادی گزینه‌ها بر اساس تحلیل چرخه عمر (LCCA[8]) صورت پذیرفت که برتری گزینه بتنی را از لحاظ هزینه‌های بلندمدت تأیید نمود. این مطالعه می‌تواند به عنوان الگویی برای بهسازی روسازی در سایر مناطق صنعتی کشور مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: روسازی صنعتی، بتن غلتکی، بازار آهن شادآباد، طراحی روسازی، تحلیل چرخه عمر، بهسازی معابر

۱-مقدمه

شبکه معابر و راه‌ها به عنوان شریان‌های اصلی حیات اقتصادی و اجتماعی هر جامعه، نقش انکارناپذیری در توسعه پایدار ایفا می‌کنند. عملکرد بهینه این شبکه، مستقیماً به کیفیت و دوام روسازی آن وابسته است. روسازی‌ها به طور کلی به دو دسته اصلی انعطاف‌پذیر (عمدتاً آسفالتی) و صلب (عمدتاً بتنی) تقسیم‌بندی می‌شوند. انتخاب نوع روسازی باید با در نظر گرفتن عوامل متعددی از جمله شرایط ترافیکی، نوع بارگذاری، مشخصات ژئوتکنیکی زمین، شرایط اقلیمی و ملاحظات اقتصادی صورت پذیرد (نشریه ۷۳۱ سازمان برنامه و بودجه; Mampearachchi et al, 2019). در ایران، به دلایل مختلفی از جمله دسترسی آسان به منابع قیری و هزینه اولیه پایین‌تر، استفاده از روسازی‌های آسفالتی برای دهه‌ها متداول بوده است. با این حال، این نوع روسازی‌ها در مواجهه با بارگذاری‌های سنگین و شرایط خاص، دارای معایب ذاتی هستند. آسیب‌پذیری در برابر تغییر شکل‌های دائمی (روتینگ)، حساسیت به دما، آسیب‌پذیری در برابر مواد نفتی، و نیاز به تعمیر

و نگهداری مکرر از جمله این چالش‌ها به شمار می‌روند. این موضوع به ویژه در مناطق صنعتی که معابر در معرض تردد وسایل نقلیه سنگین، بارهای استاتیکی ناشی از انبار کردن کالاها و بارهای ضربه‌ای هستند، تشدید می‌شود. در چنین محیط‌هایی، روسازی‌های آسفالتی معمولاً عمر خدمتی کوتاهی داشته و هزینه‌های تعمیر و نگهداری آن‌ها به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد. در مقابل، روسازی‌های بتنی به دلیل صلبیت و مدول الاستیسیته بالا، قادرند بارهای وارده را در سطح وسیع‌تری توزیع کرده و تنش‌های کمتری را به لایه‌های زیرین منتقل کنند. این ویژگی منجر به کاهش تغییر شکل‌های دائمی، مقاومت بیشتر در برابر بارهای استاتیکی و ضربه‌ای، و دوام بالاتر می‌گردد (FICE, 1997). اگرچه هزینه اولیه ساخت روسازی‌های بتنی در مقایسه با روسازی‌های آسفالتی ممکن است بالاتر باشد، اما تحلیل چرخه عمر نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن هزینه‌های تعمیر و نگهداری بسیار پایین‌تر و عمر خدمتی طولانی‌تر، این گزینه در درازمدت بسیار مقرون‌به‌صرفه‌تر خواهد بود (Mampearachchi et al, 2019). از این رو، در دو دهه اخیر، گرایش جهانی به سمت استفاده از روسازی‌های بتنی در محوطه‌های صنعتی، بنادر، ترمینال‌های کانتینری و راه‌های با ترافیک سنگین افزایش یافته است (FICE, 1997). روسازی‌های بتنی خود در انواع مختلفی از جمله روسازی بتنی ساده درزدار، روسازی بتنی مسلح درزدار(JRCP[9])، روسازی بتنی پیوسته (CRCP[10]) و روسازی بتن غلتکی اجرا می‌شوند. هر یک از این انواع، مزایا، معایب و زمینه‌های کاربرد خاص خود را دارند. برای مثال، روسازی بتن غلتکی به دلیل سرعت اجرای بالا، عدم نیاز به آرماتور، مقاومت فشاری و خمشی بالا و هزینه کمتر، گزینه‌ای ایده‌آل برای محوطه‌سازی‌های وسیع صنعتی شناخته می‌شود (Silfwerbrand, 2006). از سوی دیگر، روسازی بلوک بتنی به دلیل قابلیت تعمیرپذیری آسان، نفوذپذیری و جنبه‌های زیبایی‌شناختی، در فضاهای صنعتی با طرح‌های بارگذاری متفاوت مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای اولین بار انجمن بنادر بریتانیا، راهنما و دستورالعمل مربوط به طراحی روسازی صنعتی را در سال ۱۹۸۲ میلادی ارائه کردند. آنها معیارهایی را مبنای طراحی قرار داده و محدوده روسازی ای که به عنوان روسازی صنعتی قابل قبول است را تعیین نموده و حتی مصالح به کار رفته نیز در این دستورالعمل مشخص شد. در سال ۱۹۸۳ این دستورالعمل با تفصیل شرح داده شد و فصلی به آن اضافه گردید تا نبود بررسی این نوع روسازی را در دستورالعمل ۲۹"Road note"جبران نماید (۱۹۸۳). پروفسور Kraemer از کشور اسپانیا، مطالعه و تحقیق بر روی روسازی های بتنی صنعتی کشور اسپانیا داشته است. وی مبنای طراحی اش را بر راهنمای طراحی بنادر اسپانیا چاپ سال ۱۹۹٤ قرار داده که شامل روسازی‌های بتنی و صنعتی نیز می شد. در این راهنما روسازی‌ها بر اساس بار ترافیکی وارده، گروه بندی شده و به چهار گروه تقسیم شده‌اند که پروفسور Kraemer در طراحی اش نوع را در نظر گرفت. لازم به ذکر است وی با توجه به نوع کاربری مورد نظر از روی جداول طراحی ضخامت مورد نیاز را استخراج نمود (Kraemer, 2002). پروفسور Wellner از کشور آلمان، مطالعه و تحقیق بر روی روسازی‌های بتنی صنعتی کشور آلمان داشته است. وی با توجه به این که در این زمینه کشور آلمان راهنمایی در اختیار نداشته است، مبنای طراحی را بر اساس بار فشاری وارده بر یک سیستم چند لایه‌ای در نظر گرفته و محاسبات را با برنامه کامپیوتری BISAR انجام داده است. نهایتا مقادیر بار فشاری بدست آمده با آیین‌نامه روسازی آلمان مقایسه شده و به عدد ۱,۵ جهت معادل سازی رسید (Wellner, 2003). ریموند و رولینگ از کشور آمریکا، مطالعه و تحقیق بر روی روسازی‌های بتنی صنعتی کشور آمریکا داشته‌اند. بررسی‌های آنان نشان می‌دهد که مسیرهای بتنی بلوکی بارها را بیشتر از لایه‌های زیرین توزیع می‌کنند در حالی که توزیع بار در مسیرهای slab از طریق خم شدن انجام می‌شود در نتیجه آنها روش مطرح شده در : U. S. Army Corps of Engineers flexible airfield design را به عنوان روش طراحی برگزیدند (Rollings et al, 2003). در کل دو نوع شیوه طراحی مطرح می‌شود، یکی به روش سنتی طراحی روسازی‌های انعطاف پذیر با CBR و دیگری روش طراحی لایه‌ای انعطاف پذیر که آنان شیوه دوم را انتخاب کردند. آنان به طور کامل به مسائل مربوط به عمق یخ زدگی پرداخته و به این نتیجه رسیدند که عمق یخ زدگی کمتر از ضخامت روسازی است و به همین جهت نیازی به در نظر گرفتن عمق یخبندان نیست (شکل ۱).

شکل ۱. اجرای مکانیزه روسازی بلوکی در بندر اوکلنددر نزدیکی سانفرانسیسکو آمریکا

پروفسور Beaty از کشور کانادا، مطالعه و تحقیق بر روی روسازی‌های بتنی صنعتی بریتانیا داشته است. وی مساله اساسی در بحث طراحی را عامل مقدار بار محور جلو (۹۰۰ کیلو نیوتن) مطرح کرده است که بیش از ده برابر مقدار بار محور استاندارد (۸۰ کیلو نیوتن) است. وی روش طراحی مطرح شده در The British Port Association manual را برگزید که در آن روش نیمه تجربی مطرح شده است و ساختار روسازی به دو قسمت تقسیم می‌شود: یکی subbase که ضخامت آن بستگی به ضخامت زیراساس جاده دارد و دیگری roadbase که ضخامت آن بستگی به بار ترافیکی دارد. در راهنمای منتخب وی اثر بار ترافیکی به صورت دینامیکی و غیر دینامیکی مجزا در نظر گرفته می شود به عنوان مثال اثر بار ترمز و چرخش وسیله نقلیه به صورت مجزا لحاظ می شود به شکلی که در طراحی وی فرض بر این بوده که ترمز منجر به افزایش بار حدود ۳۰٪، چرخش ٤۰٪، و اعمال همزمان ترمز و چرخش ۷۰٪ باشد (Beaty et al, 2003).

پروفسور Cook از کشور انگلستان، مطالعه و تحقیق بر روی روسازی‌های بتنی صنعتی کشور برزیل داشته است. وی برای طراحی از راهنمای British Port Association manual The استفاده نموده است و در ادامه به بررسی روش طراحی در بندر Santos برزیل پرداخته است. مطالعه موردی وی در بندر Santos بسیار جالب بود چراکه مشخصات این بندر بسیار به بندر Helsingborg شباهت داشت. بندر Santos در وسعتی حدود ۱۳۲۰۰۰ مترمربع جهت حمل و نقل کانتینرها بود در حالی که خاک زیرین آن رسی بوده و این بندر برای بارمحوری چرخ بیش از ۵۰۰ کیلو نیوتن طراحی شده است. روسازی بتنی این بندر به خوبی اجرا و عمل می‌کند (Cook, 2003).

در Suffolk بریتانیا یکی از شلوغ ترین بنادر کانتینری و یکی از بزرگترین مراکز صنعتی دراروپا که در سال ۲۰۰۸ با مساحتی در حدود ۲۷۰۰۰۰متر مربع ساخت آن آغاز گردید. همچنین در بندر Shoreham در بخشی از جنوب انگلستان، این بندر و فضاهای اطراف آن همچون انبارها با توجه به افزایش ورود کالاهای وارداتی بسیار حائز اهمیت است لذا مطالعات روسازی آن در سال ۲۰۰٦. در فضایی به وسعت تقریبی ۲۰،۰۰۰ متر مربع با آغاز گردید. در سال ۲۰۰۷ فاز دوم آن آغاز شد، که شامل ساخت ٦۰۰۰ متر مربع روسازی جدید می شد و بعد از اجرای موفقیت آمیزآن برای اجرای مابقی روسازی تصمیماتی اتخاذ گردید که با سرعت بیشتری اجرای آن انجام شود (Interpave, 2008).

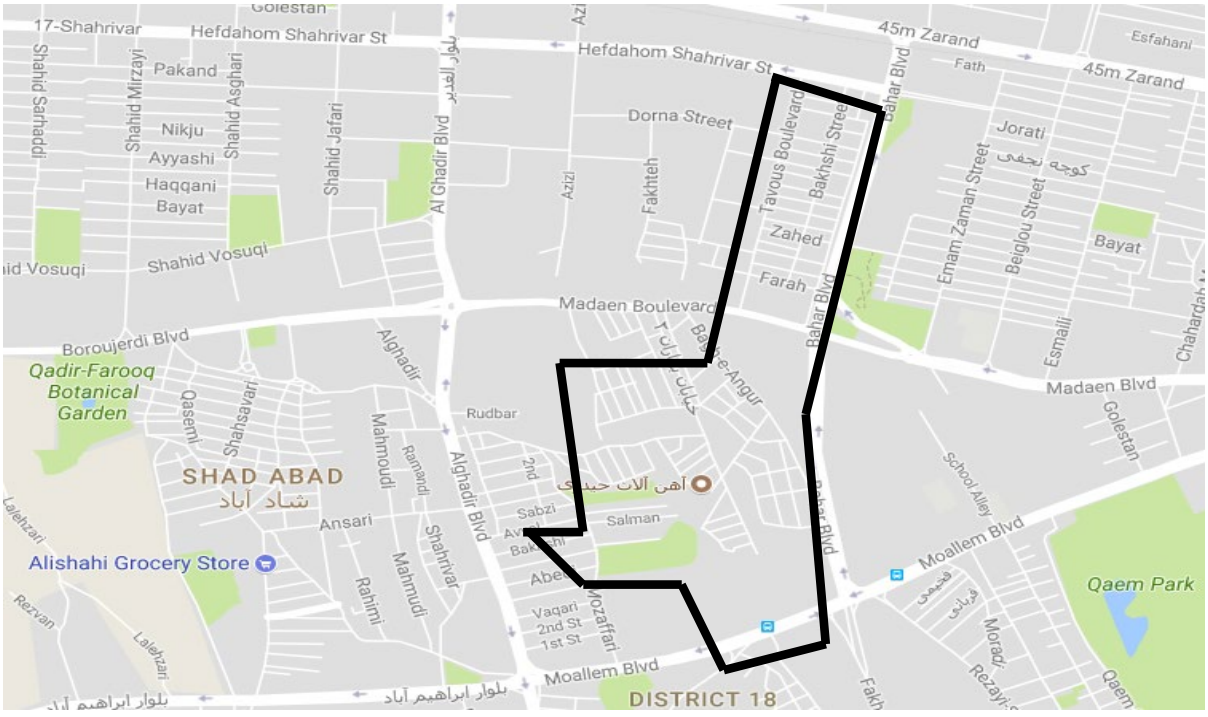
بازار آهن شادآباد تهران به عنوان یکی از کانون‌های مهم اقتصادی و صنعتی پایتخت، نمونه بارزی از یک منطقه با شرایط بارگذاری بسیار خاص است. این محدوده که میزبان فعالیت‌های سنگین آهن‌فروشی است، در معرض سه نوع بارگذاری استاتیک (ناشی از انبارش مقاطع فولادی)، دینامیک (ناشی از تردد کامیون‌ها و تریلی‌های سنگین) و ضربه‌ای (ناشی از تخلیه و بارگیری آهن‌آلات) قرار دارد. گزارش‌های میدانی و مشاهدات عینی حاکی از وضعیت نامناسب روسازی معابر این محدوده است که خود را در قالب خرابی‌های گسترده از جمله ترک‌های پوست سوسماری شدید، چاله‌های عمیق، شن‌زدگی و از بین رفتن کامل روکش در برخی معابر، همچنین تخریب جدول‌ها و سیستم

زهکشی نشان می‌دهد. این وضعیت نه تنها باعث کاهش شدید کارایی معابر و افزایش هزینه‌های حمل و نقل شده، بلکه منجر به ایجاد آلودگی صوتی و زیست‌محیطی (گرد و غبار) شده و رضایت ساکنین و فعالان اقتصادی را تحت تأثیر قرار داده است. با توجه به شکاف موجود بین عملکرد نامطلوب روسازی‌های سنتی و نیازهای فنی و عملیاتی یک منطقه صنعتی مانند بازار آهن شادآباد، انجام مطالعه‌ای نظام‌مند که بتواند با اتکا بر داده‌های میدانی، آزمایش‌های صحرایی و تجارب موفق بین‌المللی، به ارائه راهکار بهینه برای اصلاح بستر و روسازی این محدوده بپردازد، ضرورتی انکارناپذیر است. این پژوهش با این هدف کلان طراحی و اجرا گردیده است.

پژوهش حاضر با تدقیق محدوده مطالعاتی، شناسایی و تحلیل دقیق خرابی‌های موجود، بررسی انواع روسازی‌های بتنی مناسب و طراحی آن‌ها بر اساس شرایط خاص سایت (شامل ترافیک، مشخصات خاک بستر و الزامات کارفرما)، به مقایسه فنی-اقتصادی گزینه‌های پیش رو پرداخته و گزینه نهایی بهینه را برای اجرا پیشنهاد نماید. خروجی این تحقیق می‌تواند به عنوان یک الگوی کاربردی و بومی برای پروژه‌های مشابه بهسازی و نوسازی روسازی در سایر مناطق صنعتی کشور مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

۲-پیشینه تحقیق

پس از انجام بازدید میدانی معابری که جزء بازار آهن نبودند از محدوده مطالعات حذف شدند که شکل زیر، نقشه تدقیق شده محدوده مطالعات را نشان می دهد. مطابق شکل زیر محدوده مطالعات متشکل از دوبخش محدوده بلوار طاووس و محدوده بلوار بهاران می‌باشد. مساحت نهایی محدوده مطالعات ۴۹ هکتار است (شکل ۲).



شکل ۲. محدوده مطالعات در نقشه

عمده خرابی‌هایی که با بازدید میدانی از بازار آهن در محدوده‌های بلوار طاووس و بهاران و معابر اطراف آنها، مشاهده گردید عبارت بودند از: چاله، شن زدگی، ترک‌های پوست سوسماری و ترک‌های طولی و عرضی با شدت‌های متوسط و زیاد. همچنین خرابی‌های جداول و پرشدگی انها نیز کاملا مشهود بود که در عکس‌های ۳-۵ نمونه‌هایی از این خرابی‌ها نشان داده شده‌اند. البته با اقداماتی که شهرداری منطقه در زمان همکاری با دادستانی در سال گذشته انجام داده است، وضعیت بلوار میانی بلوار طاووس و بهاران مناسب بوده و در نقاط معدودی لکه گیری دستی و موضعی مانع از بوجود امدن چاله‌ها

در اثر ترک‌های پوست سوسماری شدید شده‌اند. همچنین معابری در محدوده‌های فوق الذکر فاقد رویه هستند یا رویه آنها در اثر بارگذاری و مرور زمان دچار اضمحلال کامل شده و نمی‌توان آنها را دارای رویه لحاظ نمود. این مسئله سبب شده که عبور ترافیک از این معابر با ایجاد گرد و خاک همراه باشد که موجب نارضایتی اهالی شده است.

شکل ۳. بلوار طاووس: ترک‌های عرضی با شدت زیاد

شکل ٤. بلوار طاووس: ترک‌های پوست سوسماری با شدت متوسط و زیاد

شکل ۵. بلوار بهاران: وضعیت جداول مناسب است ابتدا و انتهای آبرو بسته می‌باشد

یکی از مهمترین مسائلی که در طراحی و بررسی روسازی معابر بازار آهن شادآباد می‌بایست در نظر گرفت، نحوه بارگذاری روی سطح معابر است. در این محدوده سه نوع بارگذاری وجود دارد:

-بارگذاری دینامیکی

-بارگذاری استاتیکی

-بارگذاری ضربه‌ای

-بارگذاری دینامیکی

این نوع بارگذاری، ناشی از عبور ترافیک بوده و به طور معمول برای طراحی‌ها از همین بارگذاری و محاسبات مربوطه استفاده می‌شود. لیکن تفاوت آن با طراحی‌های معمول آن است که در محدوده مورد نظر تعدد ترافیک کامیون‌ها و تریلی‌های با بار آهن آلات که معمولا بار غیرمجاز دارند و بیشترین تاثیر را در افزایش تعداد بار محوری هم ارز ۸ تنی دارند، زیاد می‌باشد. همچنین سرعت وسایل نقلیه با خرابی که به روسازی تحمیل می‌کنند رابطه عکس دارد. به این معنی که هر چه سرعت وسیله نقلیه کمتر باشد، خرابی روسازی ناشی از عبور آن بیشتر می‌باشد. بنابراین در این محدوده با توجه به اینکه همان تعداد کامیون‌ها و تریلیهای عبوری نیز با سرعت کمی عبور می‌کنند، خرابی که ایجاد می‌شود تشدید خواهد شد (شکل ٦).

شکل ٦. عبور خودروهای سنگین وزن

-بارگذاری استاتیکی

بارگذاری استاتیکی، بارگذاری است خاص مناطق صنعتی، لنگرگاه‌ها، باراندازها، پارکینگ‌ها و ایپرون فرودگاه‌ها و ... . به دلیل استفاده کسبه از سطح معابر به عنوان بارانداز و انبار آهن آلات، این نوع بارگذاری نیز در کل معابر بازار آهن مشاهده می‌شود در حدی که از ۳ خط عبور در بلوار طاووس و بلوار بهاران، فقط یک خط باز و ترافیک در آن جریان دارد و بقیه سطح به عنوان انبار استفاده می‌شود. حتی در بعضی از فرعی‌ها کل معبر به عنوان انبار استفاده شده و فضایی برای عبور خودروها وجود ندارد (شکل ۷). در بارگذاری استاتیکی علاوه بر وزن، مدت زمان بارگذاری نیز در خرابی روسازی موثر است. مخصوصا در روسازی انعطاف‌پذیر یا آسفالتی هر چه زمان بیشتری از انبار وسایل بگذرد، تغییرشکل‌های پلاستیک بیشتری در روسازی رخ می‌دهد که در فصل گرما به دلیل نرمتر شدن قیر و افزایش دمای آسفالت، این مسئله تشدید می‌شود. تصاویر زیر نمونه ای از استفاده از معابر به عنوان انبار است.

شکل ۷. وضعیت انبار آهن آلات و بارگذاری استاتیکی

-بارگذاری ضربه‌ای

علاوه بر دو نوع بارگذاری که در بخش‌های پیشین به صورت خلا توضیح داده شد، نوع خاصی از بارگذاری در محدوده بازار آهن مشاهده می شود که به عنوان بارگذاری ضربه‌ای می‌توان از آن یاد کرد. تخلیه بارهای سنگین از روی تریلی یا کامیون و جابجا کردن آهن آلات در این محدوده، سبب اعمال بار ضربه ای شدیدی به روسازی و تغییر شکل‌های پلاستیک یا ماندگار در روسازی آسفالتی و یا شکستگی و ترک در روسازی بتنی می‌شود. علاوه بر وزن، دو عامل ارتفاع سقوط و سطح مقطع برخورد، از دیگر عوامل مهم و تاثیرگذار بر خرابی‌های وارد شده به روسازی بر اثر بار ضربه‌ای می‌باشد. انرژی وارده در اثر سقوط یک جسم با وزن ثابت از ارتفاع ۲ متری، ۲ برابر انرژی است که همان جسم از ارتفاع ۱ متری سقوط کند. همچنین هر چه سطح مقطع برخورد کمتر باشد، آسیب یا تنش وارده بیشتر می‌گردد. لذا از آنجاکه اکثر بارهای موجود در بازار آهن تیزگوشه بوده و در اثر سقوط، آسیب شدیدی به روسازی وارد می‌کنند، استفاده از روسازی آسفالتی را در این محدوده توجیه ناپذیر می‌کند (شکل ۸ و ۹). البته باید پذیرفت که هیچ روسازی برای بارگذاری به این شکل حتی در مناطق صنعتی، طراحی نمی‌گردد. لیکن می‌توان از گزینه‌هایی استفاده نمود که در برابر بارگذاری با شرایط توضیح داده شده، آسیب پذیری کمتری داشته باشد.

شکل ۸ وضعیت انبار آهن آلات تیز مانند شاخ گوزنی و بارگذاری ضربه‌ای

شکل ۹. وضعیت جرثقیل‌ها و تخلیه آهن آلات و بارگذاری ضربه‌ای

وضعیت زهکشی معابر

در بازدید میدانی انجام شده علاوه بر خرابیهای روسازی، وضعیت زهکشی معابر نیز به عنوان یکی از عوامل موثر در خرابی‌های روسازی مورد ارزیابی قرارگرفت. وضعیت زهکشی در محدوده مورد مطالعه چنان وخیم است که می‌توان ادعا نمود هیچ آبرو سالم و شیب مناسبی برای هدایت آبهای سطحی و آب ناشی از بارش باران وجود ندارد. تصاویر زیر خرابی‌های آبروها، پرشدگی آنها و در کل عدم وجود یک سیستم زهکشی مناسب را نشان می‌دهد (شکل ۱۰ و ۱۱). برای حل مشکل زهکشی وضع موجود، پس از نهایی شدن گزینه روسازی، در مقاطع عرضی و طولی آبروهای مناسب منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته خواهد شد.

شکل ۱۰. عدم وجود آبرو در اکثر معابر فرعی

شکل ۱۱. بلوار بهار: از بین رفتن جداول

۳- نتایج و بحث

از جمله مهمترین پارامترهای انتخاب بین انواع روسازی‌ها برای استفاده در منطقه مورد مطالعه، می‌توان به هزینه اولیه و چرخه عمر، شرایط بارگذاری و ترافیک، نحوه و امکان اجرا و تعمیر و نگهداری نام برد. در بیشتر تحقیقات صورت گرفته در مورد مقایسه بین روسازی‌های بتنی و آسفالتی، بیشتر بودن هزینه اولیه روسازی‌های بتنی نسبت به آسفالتی و همچنین کمتر بودن هزینه چرخه عمر روسازی‌های بتنی نسبت به روسازی آسفالتی خصوصا در مناطق با ترافیک با بار سنگین، تصریح شده است. همچنین استاتیک بودن بارگذاری منطقه مورد مطالعه و استفاده از ماشین آلات صنعتی مثل لیفتراک و جرثقیل که همراه با نشت روغن و مواد حلال قیر می‌باشند، دلایل دیگری است که استفاده از روسازی آسفالتی را از بین گزینه‌های مختلف روسازی‌ها، در محدوده مورد بحث، حذف می‌نماید. بنابراین یکی از انواع روسازی‌های بتنی می‌بایست برای این محدوده طراحی و مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۱- نتایج آزمایشات میدانی

با هماهنگی کارفرمای محترم، درخواست حفاری و انجام آزمایشات CBR و PLT داده شد. در بازدیدی به همراه کارشناسان مرکز ژئوتکنیک و مقاومت مصالح شهرداری که از محدوده مورد مطالعه انجام شد، ۱۳ نقطه جهت انجام حفاری و نمونه برداری مشخص گردید. نتایج گمانه‌های حفاری شده در جدول ۱ أورده شده است.

جدول ۲ تعداد تردد در یک سال را نشان می‌دهد که بر اساس ترددشماری انجام شده در طول یک هفته محاسبه شده است. همچنین پارامترهای ترافیکی دیگر مورد نیاز برای طراحی انواع روسازی بتنی در بخش‌های مربوطه جداگانه محاسبه و ارائه شده است.

جدول ۱. خلاصه نتایج آزمایشات روی نمونه‌های صحرایی

شماره نمونه	عمق نمونه	طبقه بندی	حد روانی	دامنه خمیری	عبوری الک ۲۰۰	ارزش ماسه	$CBR_{2.5}$	CBR_5
۲	۲٫۲–۲٫۸	A-1-a	19	4	14	28	11.7	28.1
۳	۲٫۲–۳٫۰	A-1-a	20	4	9	33	17.1	26.3
٤	۲٫۰–۲٫۸	A-1-a	NP	NP	8	46	24.4	38.3
٥	۲٫٥–۳٫۰	A-1-a	NP	NP	8	41	25.8	39.9
٦	۲٫۲–۳٫۰	A-1-b	22	5	13	38	33.2	47.8
۷	۲٫٤–۲٫۹	A-2-4	25	6	28	16	10.7	19.5
۸	۰٫۸–۱٫۳	A-1-b	21	4	16	20	15.1	23.5
۸	۱٫۳–۲٫۳	A-6	34	12	48	10	7.4	9.7
۹	۰٫۹–۱٫٦	A-2-6	31	11	13	23	19.9	34.3
۹	۱٫٦–۲٫٦	A-1-a	21	4	8	37	21	35.6
۱۰	۰٫۸–۱٫٤	A-1-a	NP	NP	4	37	22.8	37.6
۱۰	۱٫٤–۲٫٤	A-1-a	NP	NP	4	54	32.1	46.2
۱۱	۰٫۷–۱٫٤	A-1-a	NP	NP	3	48	11	18.6
۱۱	۱٫٤–۲٫٤	A-1-a	NP	NP	4	61	18.5	33.4
۱۲	۰٫٦–۱٫۲	A-1-b	NP	NP	15	23	7.4	17
۱۲	۱٫۲–۲٫٤	A-1-a	NP	NP	5	48	10.7	21.5
۱۳	۰٫۹–۱٫٤	A-1-a	23	6	13	31	13.1	30.9
۱۳	۱٫٤–۲٫٤	A-1-a	NP	NP	3	65	11	19.2
۱٤	۰٫۹–۱٫٦	A-2-4	19	5	34	10	12.9	19.5
۱٤	۱٫٦–۲٫٦	A-1-b	22	4	16	24	18.1	31.8

جدول ۲. ترافیک عبوری در سال پایه

نوع معبر	حجم تردد ترافیک سبک		حجم تردد ترافیک سنگین			کل تردد	ADT
	سواری و وانت	کامیونت و مینی بوس	کامیون کمتر از ۱۰ متر و سه محور	اتوبوس	تریلرها و کامیون‌های بالاتر از سه محور و لیفتراک		
اصلی	1572480	38740	33124	104	65520	1709968	4685
فرعی درجه ۱	406224	13104	8736	52	11648	439764	1205
فرعی درجه ۲	148512	5460	3276	52	4628	161928	444

در این روش به طور محافظه کارانه ای و با در نظر گرفتن عدم انتقال بار در درزها از نمودارها و ضوابط طراحی بتن معمولی استفاده می‌شود. تنش های کششی طراحی با استفاده از معادلات تنش وسترگارد برای لبه آزاد محاسبه می‌شود. در این روش حداقل ضخامت روسازی RCC، ٤ اینچ و حداکثر آن برای تراکم پذیری بهتر ۱۰ اینچ است. برای طراحی به روش گروه مهندسین ارتش آمریکا، ابتدا گروه ترافیکی مشخص می شود و سپس برای تأثیر دادن تکرار بارها از جدول مربوطه، یک نشانه طراحی انتخاب می‌شود، ضخامت لایه RCC از نمودار زیر با توجه به نشانه طراحی و مقاومت خمشی RCC بدست می‌آید. ضخامت روسازی، باید به نحوی طراحی شود که روسازی بتواند ترافیک پیشبینی شده در طول عمر روسازی را تحمل کند. در این روش ترافیک بر حسب نوع و وزن وسایل نقلیه طبقه بندی شده و به صورت متوسط حجم روزانه برای هر یک از وسایل نقلیه عبوری در دوره عمر روسازی بیان می‌شود. در این روش کلیه بارهای وارده به روسازی بر حسب تعداد تکرار محور منفرد هم ارز ۸,۲ تنی بیان می‌گردد. در این روش ترافیک ترکیبی مدنظر قرار می‌گیرد. به این صورت که نوع ترافیک به سه گروه زیر تقسیم می‌شود.

گروه۱) وسایل نقلیه مسافری

گروه ۲) کامیون ۲ محوره

گروه ۳) کامیون ۳،٤ و ۵ محوره

همچنین ترکیب ترافیک نیز به پنج دسته شامل ترکیبی از سه گروه بالا مطابق ترکیبات زیر تقسیم می‌گردد.

ترکیب آ: ترافیک عبوری شامل گروه ۱ و گروه ۲ کمتر از ۱ درصد.

ترکیب ب: ترافیک عبوری شامل گروه ۱ و گروه ۲ کمتر از ۱۰ درصد، بدون ترافیک گروه ۳

ترکیب ج: ترافیک عبوری شامل بیش از ۱۵ درصد ترافیک کامیون، ولی نه بیشتر از ۱ درصد کل ترافیک گروه ۳

ترکیب د: ترافیک شامل کامیون بیش از ۲۵ درصد ولی نه بیشتر از ۱۰ درصد کل ترافیک گروه ۳

ترکیب ه: ترافیک عبوری بیش از ۲۵ درصد کامیون

با توجه به نوع ترافیک این پروژه، ترکیب ه مناسب می‌باشد.

سپس بر اساس نوع راه و حجم ساعت طرح راه به ٦ طبقه به شرح جدول ۳ تقسیم بندی می‌شود. با توجه به اینکه اعداد مندرج در این جدول بر حسب تعداد سواری است بنابراین به ازای هر وسیله نقلیه سنگین (اتوبوس، کامیون یا تریلی) با استفاده از جدول ٤ معادلسازی وسایل نقلیه سنگین انجام می‌شود.

جدول ۳. انتخاب کلاس ترافیکی بر مبنای حجم ترافیک ساعت طرح بر حسب تعداد سواری

کلاس ترافیکی	خیابان درون شهری (DHV)	جاده برون شهری (DHV)
A	≤۱۲۰۰	≤۹۰۰
B	۱۱۹۹-۱۰۰۰	۸۹۹-۷۲۰
C	۹۹۹-۷۵۰	۷۱۹-۴۵۰
D	۷۴۹-۲۵۰	۴۹۹-۱۵۰
E	۲۴۹-۲۵	۱۴۹-۱۰
F	≤۲۵	≤۱۰

جدول ٤. تعداد وسیله نقلیه سواری معادل با یک وسیله نقلیه سنگین (اتوبوس، کامیون و تریلی)

نوع توپوگرافی محل احداث راه	هموار	تپه‌ماهور	کوهستانی
عدد معادل سواری	۲	۴	۸

یکی دیگر از پارامترهای این روش اندیس طراحی است که به منظور اعمال تاثیر حجم ترافیک در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از جدول ۵ بدست می‌آید. جدول ٦ کلیه پارامترهای ترافیکی مورد نیاز برای تیپ های مختلف معابر را نشان می‌دهد.

جدول ۵. انتخاب اندیس طراحی بر اساس طبقه راه و کلاس ترافیکی

طبقه بندی ترافیکی	اندیس طراحی					
	A	B	C	D	E	F
آ	۲	۲	۲	۱	۱	۱
ب	۳	۲	۲	۲	۲	۱
ج	۴	۴	۴	۳	۳	۲
ذ	۵	۵	۵	۴	۴	۳
ه	۶	۶	۶	۵	۵	۴

جدول ٦. محاسبه پارامترهای ترافیکی مورد نیاز برای تیپ های مختلف معابر

تیپ معبر	سال طرح ADT	DHV	کلاس ترافیکی	اندیس طراحی
۱	۲٦٤۹٥	۳۱۷۹	A	٦
۲	٦۷۸۹	۸۱٥	C	٦
۳	۲٥۱٥	۳۰۲	D	٥

یکی دیگر از پارامترهای طراحی، خصوصیات خاک بستر و ضخامت زیراساس مورد استفاده می‌باشد. خصوصیات بستر و لایه زیراساس سنگدانه‌ای یا تثبیت شده که در اجرای روسازی بتن غلتکی استفاده می‌شود، مانند خصوصیات متناظر در روسازی‌های بتنی متداول است. چنانچه در ساختار روسازی از لایه زیراساس استفاده شود، در طراحی ضخامت روسازی از K افزایش یافته استفاده می‌گردد. در صورتی که زیراساس از نوع مصالح سنگ دانه‌ای (تثبیت نشده) باشد، مقدار تقریبی K افزایش یافته را می‌توان از جدول ۷ به دست آورد. بنابراین با توجه به مقدار CBR=۱۱ و K=۱٤٥ و زیراساس با ضخامت ۱٥ سانتیمتر، مقدار K طراحی برابر ۱۸۰ pci خواهد شد.

جدول ۷. مقدار طراحی، در صورتی که از زیراساس سنگدانه‌ای (تثبیت نشده) استفاده شود

مقدار K بستر (Pci)	ضخامت زیراساس (in)			
	۴	۶	۹	۱۲
	K طراحی (Pci)			
۵۰	۶۵	۷۵	۸۵	۱۱۰
۱۰۰	۱۳۰	۱۴۰	۱۶۰	۱۹۰
۲۰۰	۲۲۰	۲۳۰	۲۷۰	۳۲۰
۳۰۰	۳۲۰	۳۳۰	۳۷۰	۴۳۰

(۱in=۲٥/۴ mm ،۱pci=۱lb/in^3=./۲۷۱MN/m^3)

ضخامت روسازی بتن غلتکی با استفاده از نمودارهای طراحی به دست می‌آید. این ضخامت تابعی از مقدار ترافیک، مقاومت خمشی بتن (ضریب گسیختگی بتن) و خصوصیات خاک بستر است. با توجه به تمام پارامترهای بدست آمده و با استفاده از گاف‌های طراحی، ضخامت RCC برای تیپ‌های سه گانه معابر مطابق جدول ۸ است.

جدول ۸. محاسبه ضخامت بتن غلتکی برای تیپ‌های مختلف معابر

تیپ معبر	مقاومت خمشی (psi)	K بستر (pci)	اندیس طراحی	ضخامت RCC (cm)
۱	٦۰۰	۱۸۰	٦	۲۱
۲			٦	۲۱
۳			٥	۱۹

طراحی بتن غلتکی با روش PCA

یکی دیگر از روش‌های توصیه شده برای طراحی روسازی‌های صنعتی، روش طراحی روسازی PCA می‌باشد. این روش از محاسبات تنش داخلی وسترگارد (ناشی از بار چرخ) برای پیدا کردن تنش‌های بحرانی استفاده میکند, لذا از هر گونه انتقال بار در ترک‌های طبیعی و یا درزهای اجرایی صرف نظر می‌کند. به خاطر مقدار کم آب مصرفی RCC معمولا مقاومت مشابه یا بالاتری نسبت به بتن‌های متداول دارد. بسته به مقدار سیمان مصرفی، مقاومت فشاری ۲۸ روزه می تواند در محدوده ۳۵۰۰ تا ۵۰۰۰ پوند بر اینچ مربع (۲۴ تا ۳۵ مگاپاسکال) و مقاومت خمشی در محدوده ۵۰۰ تا ۷۰۰ پوند بر اینچ مربع (۳,۵ تا ۴,۸ مگاپاسکال) تغییر کند. رابطه بین مقاومت خمشی و مقاومت فشاری ۲۸ روزه به صورت زیر بیان می‌شود. توصیه می‌شود که از مقاومت خمشی ۹۰ روزه استفاده شود که معمولاً حدود ۱۰ درصد بیشتر از مقاومت ۲۸ روزه است. در این پروژه مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۴۰۰۰ پوند بر اینچ مربع (حدود ۲۷,۵ مگاپاسکال) فرض و مقاومت ۹۰ روزه ۴۴۰۰ پوند بر اینچ مربع در نظر گرفته می‌شود.

مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته بتن‌های غلتکی روسازی مشابه یا قدری بالاتر از مدول الاستیسیته بتن‌های معمولی با مقدار سیمان مشابه می‌باشد.
ارتباط بین مقاومت فشاری با مدول الاستیسیته به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$E = C\sqrt{f_c'} \qquad (۱)$$

مقدار C بسته به مخلوط RCC از ۵۹۰۰۰ تا ۶۷۰۰۰ تغییر می‌کند که این ضرایب از تعداد محدودی آزمایش بدست آمده است و در عمل برای طراحی از روابط زیر استفاده می‌شود.

$$f_r = 9\sqrt{f_c'} \quad \text{و} \quad E=57000\sqrt{f_c'} \qquad (۲)$$

در این روابط پارامترها برحسب پوند بر اینچ مربع میباشند. بنابراین با توجه به فرض مقاومت فشاری ۹۰ روزه برابر ۴۴۰۰ پوند بر اینچ مربع خواهیم داشت.

$$f_r = 9\sqrt{f_c} = 9\sqrt{4400} = 600 \text{ پوند بر اینچ مربع} \qquad (۳)$$

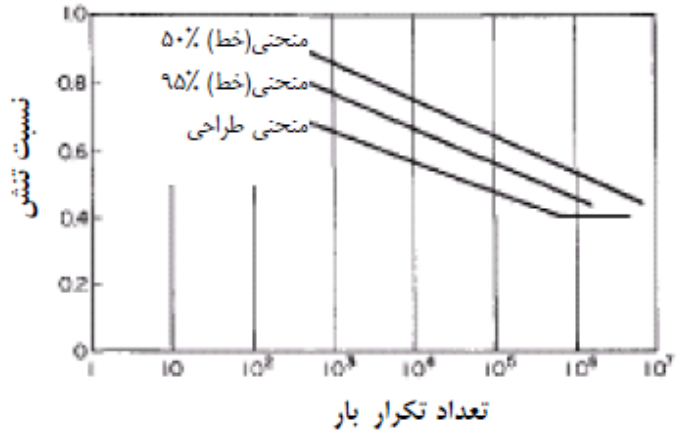
$$E = 57000\sqrt{f_c} = 57000\sqrt{4400} = 3.8 \times 10^6 \text{ پوند بر اینچ مربع}$$

رفتار خستگی

خستگی هنگامی اتفاق می‌افتد که در اثر تکرار بار تنش وارده بیشتر از مقاومت گسیختگی مصالح باشد. با توجه به اینکه تنش بحرانی در RCC تنش خمشی است، لذا از خستگی ناشی از تنش خمشی برای طراحی ضخامت RCC استفاده می‌کنیم. در این حالت برای آنالیز عمر خستگی، از اصطلاحی به نام نسبت تنش استفاده می‌شود.

نسبت تنش عبارت است از نسبت تنش بار طراحی به مقاومت خمشی بتن RCC مورد استفاده در روسازی. با توجه به شکل ۱۲ و ترافیک بدست آمده (2.2×10^6 و 5.5×10^6 و 2.6×10^7) در بخش‌های قبلی، نسبت تنش برای هر سه تیپ معبر برابر است با:

$$SR = 0.4$$



شکل ۱۲. رابطه بین نسبت تنش و تعداد تکرار بار تا نقطه گسیختگی

در این پروژه با وجود زیراساس به ضخامت ۱۵ سانتیمتر و مقدار CBR بستر برابر ۱۱ ، با استفاده از شکل ٤-٤، مقدار اولیه مدول بستر برابر ۱٤٥ psi بدست می‌آید و مقدار اصلاح شده آن طبق آیین نامه برابر ۱۸۰ psi خواهد بود.

مقاومت خمشی طراحی

مقاومت خمشی ۹۰ روزه که در طراحی روسازی فرودگاه‌ها و نواحی صنعتی، استفاده می شود برای روسازی RCC نیز توصیه می‌شود. مقاومت ۹۰ روزه از آن جهت پیشنهاد می‌شود که تکرار بار در ماه های اول بارگذاری در مقایسه با کل تکرار باری که روسازی در دوره عمر خود تحمل خواهد کرد، مقدار قابل توجهی نیست. مقاومت RCC مانند بتن معمولی به مرور زمان افزایش می‌یابد، بطوری که مقاومت آن در درازمدت به مقاومت ۹۰روزه رسیده و افزایش نیز می یابد. همانطور که در بخش‌های پیشین محاسبه شد، با فرض مقاومت فشاری ۲۸ روزه برابر ٤۰۰۰ پوند بر اینچ مربع، مقاومت خمشی ۹۰ روزه برابر خواهد بود با:

$$f_r = 9\sqrt{f_c} = 9\sqrt{1.1 \times 4000} = 600 \text{ پوند بر اینچ مربع}$$

تنش مجاز روسازی

ضخامت انتخاب شده برای طراحی باید طوری باشد که تنش ایجاد شده در روسازی کمتر از تنش مجاز روسازی شود. تنش مجاز روسازی به تعداد تکرار بار وارده بر روسازی در دوره عمر روسازی بستگی دارد. با داشتن تعداد تکرار بار در دوره عمر روسازی نسبت تنش مجاز (SR) را از جدول ذکر شده می‌توان بدست آورد. سپس تنش مجاز را از رابطه زیر می‌توان محاسبه کرد:

تنش مجاز = نسبت تنش * مقاومت ۹۰ روزه

$$\sigma = SR \times \text{مقاومت ۹۰ روزه} = 0.4 \times 600 = 240 \text{ پوند بر اینچ مربع}$$

ضخامت نهایی

موارد زیر خلاصه آنچه تا کنون حساب شده می باشد و جدول ۹ نتایج نهایی طراحی ضخامت لایه‌های روسازی را با توجه به موارد زیر نشان می‌دهد.

-مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن : ٤۰۰۰ پوند بر اینچ مربع (۲۷,۵ مگاپاسکال)

-مقاومت فشاری ۹۰ روزه بتن : ٤٤۰۰ پوند بر اینچ مربع (۳۰,٤ مگاپاسکال)

-مقاومت خمشی ۹۰ روزه بتن : ٦۰۰ پوند بر اینچ مربع (٤,۲ مگاپاسکال)

-مدول الاستیسیته بتن: 3.8×10^6 پوند بر اینچ مربع

-ضخامت زیراساس: ۱۵ سانتیمتر
-مقاومت بستر: CBR=۱۱
-مدول عکس العمل بستر (□): ۱٤٥ پوند بر اینچ مکعب
-مدول عکس العمل بستر اصلاح شده: ۱۸۰ پوند بر اینچ مکعب
-نسبت تنش (SR): ۰,٤
-تنش مجاز (σ) : ۲٤۰ پوند بر اینچ مربع
-دوره طراحی: ۳۰ ساله
-تعداد و وزن ترافیک عبوری تیپ ۱: ۲٦ میلیون بار محوری ۸,۲ تن (۱۸۰۰۰ پوند)
-تعداد و وزن ترافیک عبوری تیپ ۲: ۵,۵ میلیون بار محوری ۸,۲ تن (۱۸۰۰۰ پوند)
-تعداد و وزن ترافیک عبوری تیپ ۳: ۲,۲ میلیون بار محوری ۸,۲ تن (۱۸۰۰۰ پوند)
-فشار تایر: ۱۰۰ پوند بر اینچ مربع
-مساحت تماسی تایر: ۲٦۰ اینچ مربع

$$\text{تنش مجاز در} 1000 \text{ پوند} = {}^{\sigma}\Big/_{(\frac{p}{1000})} = \frac{240}{18} = 13.3 \quad psi/kip$$

با استفاده از گراف های های طراحی، ضخامت بتن غلتکی برای تیپ‌های مختلف معبر برابر مطابق جدول ۹ خواهد بود.

جدول ۹. ضخامت RCC طراحی شده برای تیپ‌های مختلف معبر بر اساس روش PCA

تیپ معبر	ضخامت (سانتی‌متر)
۱	۲۵
۲	۲۵
۳	۲۵

طراحی بتن غلتکی با روشACI

برای طراحی روسازی بتن غلتکی راه‌ها به روش**ACI** ابتدا از جدول ۱۰ طبقه بندی ترافیک راه مشخص می‌گردد. سپس با استفاده از جدول طراحی، ضخامت طراحی می‌شود. در این جدول‌ها عمر طراحی برابر ۳۰ سال در نظر گرفته شده است.

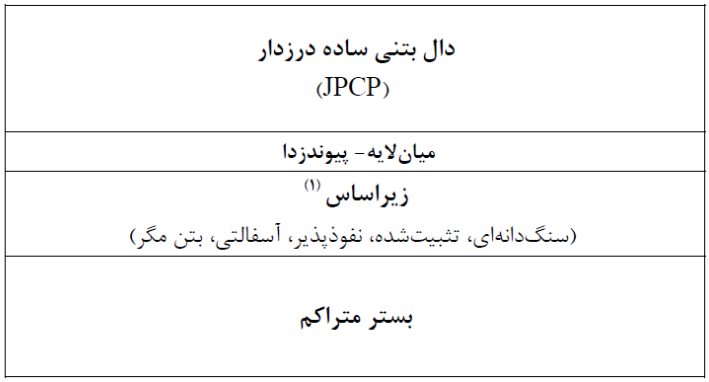
با توجه به جدول ۱۰ هر سه تیپ مقطع در دسته صنعتی قرار گرفته و با توجه به جدول طراحی ایین نامه، ضخامت بتن غلتکی برای هر سه تیپ معبر برابر ۹ اینچ یا ۲۳ سانتیمتر خواهد شد.

جدول ۱۰. طبقه بندی ترافیک در روش ACI

طبقه‌بندی ترافیک	تعداد وسیله نقلیه در روز یا ترافیک متوسط روزانه (در دوجهت)	وسایل نقلیه تجاری سنگین (دو محور، شش چرخ و بیشتر)	
		درصد	تعداد در روز
مسکونی سبک	۲۰۰	۱-۲	۲-۴
مسکونی	۲۰۰-۱۰۰۰	۱-۲	۲-۴
جمع کننده	۱۰۰۰-۸۰۰۰	۳-۵	۵۰-۵۰۰
شریانی فرعی	۴۰۰۰-۱۵۰۰۰	۱۰	۳۰۰-۶۰۰
شریانی اصلی	۴۰۰۰-۳۰۰۰۰	۱۵-۲۰	۷۰۰-۱۵۰۰
تجاری	۱۱۰۰۰-۱۷۰۰۰	۴-۷	۴۰۰-۷۰۰
صنعتی	۲۰۰۰-۴۰۰۰	۱۵-۲۰	۳۰۰-۸۰۰

طراحی روسازی بتنی ساده درزدار

روسازی بتنی ساده درزدار از دالهای بتنی غیر مسلح همراه با درزهای طولی و عرضی تشکیل می‌شود. طراحی روسا زی بتنی ساده درزدار، شامل تعیین ضخامت کل سازه و هر یک از لایه‌های تشکیل دهنده آن، طراحی درزهای موجود در این ساختار و طراحی ناحیه انتقال است. این طراحی به گونه‌ای انجام می‌شود که روسازی بتنی در دوره طرح با قابلیت اطمینان معینی، آمد و شد راحت، مطمئن و ایمن را در یک سطح هموار تأمین نماید. شکل ۱۳ انواع و ترتیب لایه‌های روسازی بتنی ساده درزدار را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. انواع و ترتیب لایه های روسازی بتنی ساده درزدار

عمر طراحی یا دوره تحلیل، مدت زمانی است که روسازی دچار خرابی‌های عمده نشود. در برخی از موارد ، طرح و اجرای روسازی به صورت مرحله ای از لحاظ اقتصادی، بیشتر مقرون به صرفه است. معمولاً عمر طراحی به گونه‌ای تعیین می‌گردد که در طی این مدت، اجرای یک تعمیر اساسی برای آن پیش بینی شود .انتخاب این گزینه با در نظر گرفتن هزینه‌های نگهداری در دوران بهره برداری و هزینه‌های تعمیر اساسی بعدی صورت می‌گیرد. عمر طراحی برحسب اهمیت راه تعیین می‌شود. با توجه به ایین نامه عمر طراحی برای این پروژه ۳۰ سال در نظر گرفته می‌شود.

ترافیک

ترافیک، یکی از مهمترین پارامترها در طراحی روسازی است. به همین دلیل مفصلا در بخشهای قبلی جداگانه به آن پرداخته شد. به طور خلاصه در جدول ۱۱ تعداد کل ترافیک هم ارز ۸,۲ تنی در طول دوره عمر ۳۰ ساله روسازی، برای سه تیپ مختلف معابر محدوده مورد مطالعه، نشان داده شده است.

جدول ۱۱. تعداد کل ترافیک هم ارز ۸,۲ تنی در طول دوره عمر ۳۰ ساله روسازی، برای سه تیپ مختلف معابر محدوده مورد مطالعه

نوع معبر	تیپ معبر	تعداد کل ترافیک هم ارز ۸,۲ تنی
اصلی	۱	۲۶۵۷۳۴۸۹
فرعی درجه ۱	۲	۵۴۹۱۵۱۱
فرعی درجه ۲	۳	۲۱۲۹۸۶۶

قابلیت اطمینان و انحراف معیار

در طراحی روسازی برای اطمینان از دوام آن و اعمال اثر تغییرات احتمالی تعداد ترافیک پیش بینی شده در عملکرد روسازی، سطح قابلیت اطمینان(R)، انحراف معیار کلی (So) و انحراف معیار نرمال(ZR) در محاسبات منظور می‌شود. سطح قابلیت اطمینان نشان میدهد که با چه درصد اطمینانی میتوان انتظار داشت که روسازی طرح شده عملا معادل عمر طراحی دوام می‌آورد. انتخاب صحیح سطح قابلیت اطمینان و انحراف معیارکلی، جبران کننده کلیه تغییرات احتمالی در دادههای مورد نظر برای طراحی است؛ بنابراین کاربرد ضرایب محافظه کارانه ضرورت ندارد و استفاده از مقادیر میانگین پارامترهای طراحی مانند ضریب عکس العمل بستر (k) و ضریب گسیختگی بتن (Sc) کفایت می‌کند. انتخاب سطح قابلیت اطمینان مناسب و انحراف معیار کلی به منزله در نظر گرفتن اثر تغییرات همه متغیرهای طراحی مربوط به پیشبینی ترافیک و عملکرد روسازی می‌باشد. با افزایش حجم ترافیک و انتظار عمومی از روسازی موجود، ریسک عملکرد نامناسب باید کاهش داده شود که این امر با استفاده از مقادیر بالای سطح قابلیت اطمینان، تحقق می‌یابد. در آیین نامه طراحی روسازی‌های بتنی (نشریه ۷۳۱) انحراف معیار کلی (□۰) برابر ۰,۳۹ توصیه شده است. بنابراین برای پروژه حاضر سطح قابلیت اطمینان ۹۵٪ و انحراف معیار کلی ۰,۳۹ درنظر گرفته می‌شود.

ضریب برجهندگی مصالح بستر و زیراساس و ضریب عکس العمل مؤثر بستر

با توجه به نتایج آزمایشات □□□ روی نمونه‌های گرفته شده که در بخش آزمایشات میدانی ارائه شد، پوش ۸۵ داده‌های CBR2.5 برابر خواهد شد با مقدار۱۱.

بنابراین بر اساس نمودارهای ایین نامه ضریب برجهندگی معادل آن ۱۰۰۰۰ □□□ و ضریب عکس العمل بستر □ برابر ۲۱۰ psi/in خواهد شد. همچنین با توجه به ایین نامه مقدار ضریب مرکب عکس العمل بستر با وجود یک لایه زیراساس ۱۵ سانتیمتری، برابر ۵۰۰ pci خواهد شد. ضریب عکس العمل موثر بستر برابر ۱۷۰ pci محاسبه گردید.

ضریب الاستیسیته بتن (Ec)

ضریب الاستیسیته بتن را می توان با انجام آزمایش مطابق استاندارد ASTM C ٤٦٩ یا روابط زیر بدست آورد.

$E_c = 57000\sqrt{f_c}$ (f_c و E_c برحسب psi)

$E_c = 4770\sqrt{f_c}$ (f_c و E_c برحسب MPa)

که در آن Ec ضریب الاستیسیته بتن و fc مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای بتن است . مقاومت فشاری بتن را می‌توان بر اساس استانداردهای AASHTO T22، ASTM C39 یا استاندارد ملی ایران شماره ٦٠٤٨ به دست آورد. حداقل مقاومت فشاری بتن (نمونه‌های استوانه‌ای) مورد استفاده در روسازی بتنی برابر ۳۰ مگاپاسکال (۳۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع) است.

ضریب گسیختگی بتن (S_c)

ضریب گسیختگی (مقاومت خمشی) بتن بر اساس متوسط مقاومت ۲۸ روزه بتن و با استفاده از آزمایش بارگذاری تیر ساده در نقاط یک سوم دهانه (AASHTO T97، ASTM C78 یا استاندارد ملی ایران شماره ۴۹۰) به دست می آید. به دلیل استفاده از پارامتر قابلیت اطمینان در طراحی، توصیه اکید می‌شود که از عدد مربوط به ضریب گسیختگی مشخصه بتن به طور مستقیم در طراحی استفاده نشود؛ بلکه ابتدا ضریب گسیختگی مشخصه بتن با استفاده از رابطه زیر تعدیل و سپس در طراحی استفاده شود.

$$S_c^{'} = S_c + z(SD_s) \quad (٤)$$

که در آن ’□□ متوسط ضریب گسیختگی بتن (psi)، Sc ضریب گسیختگی مشخصه بتن (psi) SD_s انحراف معیار ضریب گسیختگی بتن (□□□)، و □ متغیر انحراف معیار نرمال است. حداقل ضریب گسیختگی مشخصه (مقاومت خمشی) بتن مورد استفاده در روسازی بتنی برابر ٤ مگاپاسکال (٤٠ کیلوگرم بر سانتیمترمربع) است. با توجه به آب و هوای منطقه مورد مطالعه، ضریب زهکشی برابر ۰,۹ در نظر گرفته می‌شود.

ضریب انتقال بار (□)

در طراحی روسازی بتنی برای بیان قابلیت انتقال بار در محل درزها و ترک‌ها از پارامتر ضریب انتقال بار (□) استفاده می‌شود. نوع وسیله انتقال بار (میلگرد انتقال بار یا قفل و بست سنگدانه‌ای) نوع شانه و نوع روسازی بتنی بر مقدار این پارامتر تأثیرگذارند. جدول ۱۲ مقادیر J را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. به عنوان یک راهنمایی کلی می‌توان گفت هرچه ضریب عکس العمل بستر کمتر، ضریب انتقال حرارت بیشتر و تغییرات دمایی بیشتر باشد، باید از مقادیر بزرگتر J استفاده شود.

جدول ۱۲. مقادیر ضریب انتقال بار J در حالت های مختلف برای روسازی بتنی ساده درزدار

نوع شانه	میلگرد انتقال بار	ضریب انتقال بار (J)
آسفالتی	دارد	۳/۲
	ندارد	۳/۸–۴/۴
بتنی متصل (با میلگرد دوخت)	دارد	۲/۵–۳/۱
	ندارد	۳/۶–۴/۲

ضخامت روسازی (دال بتنی) ساده درزدار از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\log(W_{18}) = Z_R S_o + 7.35\log(D+1) - 0.06 + \frac{\log\left[\frac{\Delta PSI_T}{4.5-1.5}\right]}{1+\frac{1.624\times10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22-0.32p_t)\log\left[\frac{S_c^{'}C_d(D^{0.75}-1.132)}{215.63J\left[D^{0.75}-\frac{18.42}{\left(E_c/K\right)^{0.25}}\right]}\right]$$

که در آن W18 تعداد عبور محور هم ارز ۸,۲ تنی در دوره طراحی، ZR انحراف معیار نرمال، S0 انحراف معیار کلی، D ضخامت دال بتنی (اینچ)، ΔPSIT افت نشانه خدمت‌دهی ناشی از ترافیک، □□ نشانه خدمت دهی نهایی، ’□□ میانگین ضریب گسیختگی بتن (psi)، Cd ضریب

زهکشی، □ ضریب انتقال بار، □□ شریب الاستیسیته بتن (psi) و □ ضریب عکس العمل بستر (pci) است.
چنانچه از آسفالت گرم به عنوان میان لایه (پیوندزدا) استفاده گردد، می‌توان به ازای هر ۲ سانتیمتر لایه آسفالتی، ۱ سانتیمتر از ضخامت دال بتنی کم کرد.

جدول ۱۳ خلاصه‌ای از نتایج طراحی روسازی بتنی درزدار را نشان می‌دهد.

جدول ۱۳. خلاصه پارامترهای طراحی و ضخامت‌های نهایی دال‌های بتنی

پارامتر	واحد	تیپ ۱	تیپ ۲	تیپ ۳
عمر طراحی	سال	۳۰		
تعداد کل محورهای استاندارد در خط طرح	تعداد	۲۶۵۷۳۴۸۹	۵۴۹۱۵۱۱	۲۱۲۹۸۶۶
سطح قابلیت اطمینان(□)	٪	۹۵		
انحراف معیار کلی (□□)	-	۰,۳۹		
انحراف معیار نرمال(□□)	-	-۱,۶۴۵		
نشانه خدمت دهی اولیه	-	۴,۵		
نشانه خدمت دهی نهایی	-	۳	۲,۵	۲,۵
CBR خاک بستر (پوش ۸۵٪)	٪	۱۱		
ضریب برجهندگی خاک بستر	psi	۱۰۰۰۰		
ضریب عکس العمل بستر □	psi/in	۲۱۰		
ضریب عکس العمل موثر بستر □	pci	۱۷۰		
ضریب الاستیسیته بتن (□□)	Mpa	۲۴۰۰۰		
ضریب گسیختگی بتن (□□)	Mpa	۴		
ضریب زهکشی □□	-	۰,۹		
ضریب انتقال بار J	-	۲,۸		
افت شرایط تکیه گاهی LS	-	۱		
ضخامت نهایی دال	cm	۳۰	۲۳	۲۰

در محل درزهای طولی و در جهت عمود بر این درزها، از میلگردهای دوخت (تای بار) استفاده می‌شود. میلگردهای دوخت که در ارتفاعی برابر نصف ضخامت دال بتنی قرار می‌گیرند، از فولاد رده S ۴۰۰ (دارای تنش تسلیم ۴۰۰ مگاپاسکال)، دارای قطر ۱۶ میلیمتر و طول ۷۵ سانتیمتر بوده و فاصله مرکز به مرکز آنها نیز برابر ۷۵ سانتیمتر است.

تیپ ۱: طول ۸ متر و عرض **۵,۵** متر
تیپ ۲: طول ۶ متر و عرض **۵** متر
تیپ ۳: طول **۵** متر و عرض **۴,۵** متر

در این پژوهش پس از ارائه ترددشماری و نتایج آزمایشات میدانی، با روش‌های مختلفی روسازی بتن غلتکی و روسازی بتنی ساده درزدار طراحی گردید که در جدول ۱۴ نتایج ضخامت‌ها بر اساس این روش‌های طراحی نشان داده شده است. در تمام این روش‌ها اجرای اساس تثبیت نشده با ضخامت ۱۵ سانتیمتر به عنوان لایه زیرین بتن، در نظر گرفته شده است.

در فاصله ۴۰ سانتیمتری از درز عرضی نباید از میلگرد دوخت استفاده شود. در محل درزهای اجرایی عرضی نیز در صورتی که منطبق بر محل درزهای عرضی انقباضی نباشند از میلگردهای دوخت استفاده می‌شود. بنابراین با توجه به عرض معابر در این پروژه، دالهای بتنی با ابعاد زیر پیشنهاد می‌گردد.

جدول ١٤. خلاصه طراحی‌های انجام شده

نوع روسازی بتنی	روش طراحی	ضخامت بتن (سانتیمتر)		
		تیپ ۱	تیپ ۲	تیپ ۳
روسازی بتنی غلتکی	مهندسین ارتش آمریکا	۲۱	۲۱	۱۹
	PCA	۲۵	۲۵	۲۵
	ACI	۲۳	۲۳	۲۳
روسازی بتنی ساده درزدار	نشریه ۷۳۱	۳۰	۲۳	۲۰

٤-ارزشیابی پیامدهای زیست محیطی

با توجه به مطالب گفته شده و ارزیابی پیامدهای زیست محیطی اصلاح بستر و روسازی محدوده مورد مطالعه، می‌توان این پیامدها را در طول چرخه عمر طرح در چهار مرحله مورد ارزیابی قرار داد: پیش از اجرای طرح، در مرحله اجرای طرح، هنگام بهره برداری از طرح و هنگام تعمیر و نگهداری انواع پیامدهای زیست محیطی در مراحل چرخه عمر طرح، با سه ارزش پیامد باقوه عمده، پیامد بالقوه جزیی و بدون پیامد، مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج آن در جدول ۱۵ نشان داده شده است.

جدول ۱۵. جدول ارزیابی پیامدهای زیست محیطی در مراحل چرخه عمرطرح

شرح پیامد	طرح عمر چرخه مراحل			
	پیش از اجرای طرح	در مرحله اجرای طرح	بهره برداری از طرح	تعمیر و نگهداری
آلودگی منابع آب	۱.	۲.	۱.	۱.
آلودگی خاک	۲.	۳.	٤.	٥.
آلودگی هوای محلی	٦.	۷.	۸.	۹.
آلودگی هوای منطقه	۱۰.	۱۱.	۱۲.	۱۳.
آسیب به چشم انداز، منابع طبیعی و زباله سازی	۱٤.	۱٥.	۱٦.	۱۷.
آسیب به اکو سیستم	۱۸.	۱۹.	۲۰.	۲۱.
آسیب به میراث فرهنگی	۲۲.	۲۳.	۲٤.	۲٥.
آلودگی صوتی	۲٦.	۲۷.	۲۸.	۲۹.
گسیختگی اجتماعی	۳۰.	۳۱.	۳۲.	۳۳.
-پیامد بالقوه عمده -پیامد بالقوه جزیی -بدون پیامد				

نتیجه این ارزیابی نشان می‌دهد علاوه بر اینکه اجرای طرح با توجه به شرایط کنونی و پیامدهای زیست محیطی در طول چرخه عمر طرح، توجیه زیست محیطی دارد، در کل شرایط زیست محیطی کنونی را نیز ارتقا می‌دهد.

مقایسه فنی اقتصادی گزینه‌های پیشنهادی

با توجه به پارامترهایی نظیر هزینه اجرا، سهولت اجرا و نگهداری، متداول بودن و موجود بودن پتانسیل اجرا در کشور، نوع و شرایط بارگذاری محدوده و... از میان روشهای فوق دو نوع روسازی بتن غلتکی و روسازی ساده درزدار با میلگردهای انتقال بار انتخاب شدند. در فصل چهارم برای طراحی روسازی بتنی ساده درزدار از روش نشریه ۷۳۱ (طراحی، اجرا و نگهداری رویه‌های بتنی راه) استفاده شد و برای طراحی روسازی بتن غلتکی از سه روش مختلف مهندسین ارتش آمریکا، PCA و ACI استفاده گردید که در جدول ۱۶ خلاصه ضخامت بتن طراحی شده از هر سه روش نشان داده شده است. جدول زیر سه روش فوق را بر اساس پارامترهای مختلف با یکدیگر مقایسه می کند. مطابق جدول زیر روش مهندسین ارتش آمریکا نسبت به روشهای دیگر از مزایای بیشتری برخوردار است.

جدول ۱۶. مقایسه روش‌های طراحی روسازی بتن غلتکی

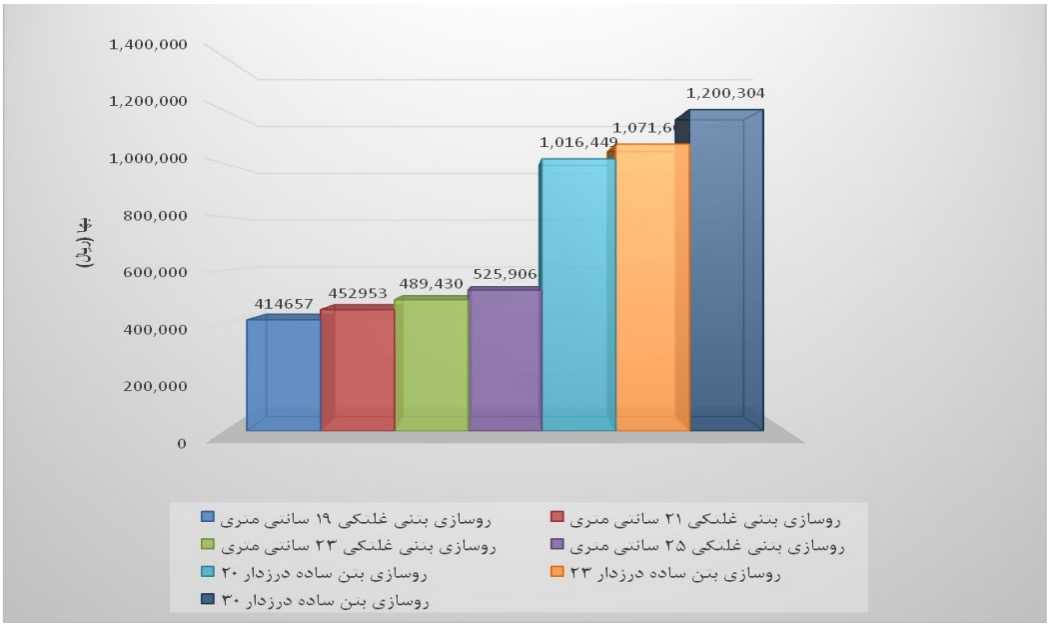
نوع استاندارد	مهندسین ارتش آمریکا	PCA	ACI
هزینه	۳	۱	۲
مناسب بودن برای مناطق صنعتی به پیشنهاد نشریه ۷۳۱	۳	۳	۱
مناسب بودن برای مناطق صنعتی با در نظرگیری سنگین‌ترین بار عبوری	۲	۳	۲
معیارهای ترافیکی	۲	۳	۲
در نظر گرفتن تیپ‌های مختلف معبر	۳	۱	۲
جمع امتیازات	**۱۳**	**۱۱**	**۹**
امتیاز بیشتر (خوب): ۳ امتیاز متوسط: ۲ امتیاز کمتر (ضعیف): ۱			

برآورد مالی و مقایسه هزینه اجرای گزینه‌ها

با توجه به طراحی گزینه‌های مختلف، برآورد هزینه اجرای هر یک از این گزینه‌ها بر اساس فهرست بهای راه و باند انجام شد که نتیجه آن در جدول ۱۷ و شکل ۶۱ ارائه شده است.

جدول ۱۷. مقایسه هزینه ۱ مترمربع گزینه‌های پیشنهادی

گزینه	بهای یک مترمربع (ریال)
روسازی بتنی غلتکی ۱۹ سانتی متری	۴۱۴,۶۵۷
روسازی بتنی غلتکی ۲۱ سانتی متری	۴۵۲,۹۵۳
روسازی بتنی غلتکی ۲۳ سانتی متری	۴۸۹,۴۳۰
روسازی بتنی غلتکی ۲۵ سانتی متری	۵۲۵,۹۰۶
روسازی بتن ساده درزدار ۲۰	۱,۰۱۶,۴۴۹
روسازی بتن ساده درزدار ۲۳	۱,۰۷۱,۶۰۶
روسازی بتن ساده درزدار ۳۰	۱,۲۰۰,۳۰۴



شکل ۱۳. نمودار مقایسه هزینه اجرای ۱ مترمربع از هر یک از گزینه‌های پیشنهادی

بنابراین با توجه به مساحت هر یک از تیپ‌های معابر اصلی (تیپ ۱)، فرعی درجه ۱ (تیپ ۲) و فرعی درجه ۲ (تیپ ۳) و نیز گزینه‌های پیشنهادی برای هر یک از آنها، می‌توان هزینه کل هر یک از گزینه‌های پیشنهادی را محاسبه و مقایسه نمود که در جدول ۱۸ نشان داده شده است.

جدول ۱۸. مقایسه هزینه گزینه‌های پیشنهادی

نوع روسازی بتنی	روش طراحی	ضخامت بتن انواع معبر		هزینه هر مترمربع	مساحت هر تیپ	هزینه هر تیپ	جمع هزینه کل
		(سانتیمتر)		(ریال)	(مترمربع)	(میلیون ریال)	(میلیون ریال)
روسازی بتنی غلتکی	مهندسین ارتش آمریکا	تیپ ۱	۲۱	٤٥٢,٩٥٣	٧٤٧٥٣	٣٤٣١٣	٦٦٠٤١
		تیپ ۲	۲۱	٤٥٢,٩٥٣	٣٧٩٦٥	١٧١٩٦	
		تیپ ۳	۱۹	٤١٤,٦٥٧	٣٥٠٤٧	١٤٥٣٢	
	PCA	تیپ ۱	۲۵	٥٢٥,٩٠٦	٧٤٧٥٣	٣٩٣١٣	٧٧٧١٠
		تیپ ۲	۲۵	٥٢٥,٩٠٦	٣٧٩٦٥	١٩٩٦٦	
		تیپ ۳	۲۵	٥٢٥,٩٠٦	٣٥٠٤٧	١٨٤٣١	
	ACI	تیپ ۱	۲۳	٤٨٩,٤٣٠	٧٤٧٥٣	٣٦٥٨٦	٧٢٣٢٠
		تیپ ۲	۲۳	٤٨٩,٤٣٠	٣٧٩٦٥	١٨٥٨١	
		تیپ ۳	۲۳	٤٨٩,٤٣٠	٣٥٠٤٧	١٧١٥٣	
روسازی بتنی ساده درزدار	نشریه ۷۳۱	تیپ ۱	۳۰	١,٢٠٠,٣٠٤	٧٤٧٥٣	٨٩٧٢٦	١٦٦٠٣٣
		تیپ ۲	۲۳	١,٠٧١,٦٠٦	٣٧٩٦٥	٤٠٦٨٤	
		تیپ ۳	۲۰	١,٠١٦,٤٤٩	٣٥٠٤٧	٣٥٦٢٣	

۵- نتیجه‌گیری

این مطالعه به منظور ارائه راهکاری بهینه برای ساماندهی و بهسازی روسازی معابر بازار آهن شادآباد، با در نظرگیری شرایط پیچیده بارگذاری و کاربری خاص این محدوده، انجام شد. یافته‌های حاصل از بازدیدهای میدانی، بررسی‌های صحرایی و تحلیل‌های طراحی، به وضوح نشان می‌دهد که روسازی‌های آسفالتی موجود، به دلیل ماهیت انعطاف‌پذیر خود، پاسخگوی بارهای استاتیک سنگین (ناشی از انبارش آهن‌آلات)، بارهای دینامیک (ترافیک سنگین) و به ویژه بارهای ضربه‌ای (تخلیه و بارگیری) نبوده و منجر به بروز خرابی‌های گسترده و کاهش شدید عمر خدمتی شده‌اند. در این راستا، با اتکا بر تجارب موفق بین‌المللی و تحلیل‌های مهندسی، روسازی‌های بتنی به عنوان گزینه برتر شناسایی و سه گزینه شاخص روسازی بتن غلتکی، روسازی بتنی ساده درزدار و روسازی بلوک بتنی به طور جدی مورد مطالعه و طراحی قرار گرفت.

مقایسه فنی-اقتصادی این گزینه‌ها بر مبنای تحلیل چرخه عمر نشان داد که اگرچه هزینه اولیه روسازی‌های بتنی ممکن است بالاتر از گزینه بهسازی با آسفالت باشد، اما با در نظرگیری عمر طولانی‌تر (حدود ۳۰ سال)، هزینه نگهداری ناچیز و کاهش اختلالات ناشی از تعمیرات مکرر، این گزینه‌ها در بلندمدت به مراتب مقرون‌به‌صرفه‌تر هستند. در نهایت، با توجه به مجموعه معیارهای فنی، اقتصادی و اجرایی از جمله سرعت اجرا، دوام استثنایی در برابر بارهای ضربه‌ای و استاتیکی، هزینه بهینه و سهولت نسبی اجرا در مقیاس بزرگ، روسازی بتن غلتکی به عنوان گزینه نهایی پیشنهادی برای معابر اصلی و فرعی این محدوده صنعتی معرفی می‌گردد.

اجرای این طرح نه تنها مشکل خرابی‌های موجود را به صورت ریشه‌ای حل خواهد کرد، بلکه با ایجاد زیرساختی مستحکم و پایدار، به ارتقای بهره‌وری، کاهش هزینه‌های لجستیکی، بهبود ایمنی و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی (نظیر گرد و غبار) در این قطب مهم اقتصادی خواهد انجامید. به عنوان توصیه نهایی، موفقیت این پروژه در گرو اجرای دقیق و با کیفیت، نظارت مستمر فنی بر مراحل اجرا و مدیریت یکپارچه برای جلوگیری از تجاوز به حریم معابر و بازگشت به شرایط پیشین است. الگوی طراحی و بهسازی ارائه‌شده در این مطالعه می‌تواند به عنوان راهنمایی برای پروژه‌های مشابه در سایر مناطق صنعتی کشور با شرایط بارگذاری سنگین مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به مجموع مواردی که در بخش‌های پیشین گفته شد و مقایسه فنی و اقتصادی گزینه‌های پیشنهادی و موارد مطرح شده در جلسات هیات قیر و آسفالت معاونت فنی و عمرانی شهرداری تهران، گزینه "تراش لایه آسفالت موجود، اساس تثبیت شده با سیمان به ضخامت ۱۵ سانتیمتر، بتن غلتکی به ضخامت ۲۵ سانتیمتر و یک لایه روکش آسفالتی به ضخامت ۷ سانتیمتر" با حفظ تراز موجود، جهت اصلاح بستر و روسازی معابر تیپ ۱ (بلوارهای اصلی شامل بلوار طاووس و بلوار بهاران) بازار آهن شادآباد در نظر گرفته شد. همچنین در خصوص معابر تیپ ۲ و ۳ (خیابان‌ها و کوچه‌های فرعی) به دلیل استفاده آنها به عنوان انبار و بارانداز آهن آلات و عدم امکان بهسازی در حال حاضر، استفاده از شن ریزی و یا رویه بتنی و عدم استفاده از آسفالت در آینده توصیه شده است.

٦- پی‌نوشت‌ها

1.California bearing ratio
2- American Association of State Highway and Transportation Officials
3- Portland Cement Association
4- American Concrete Institute
5- Roller compacted concrete
6-Jointed plain concrete pavement
7-Concrete Block pavement
8- Life-Cycle Cost Analysis
9- Jointed Reinforced Concrete Pavement
10-Continuously Reinforced Concrete Pavement
11-Design Hour Volume

۷- مراجع

-دستورالعمل طراحی، اجرا و نگهداری رویه‌های بتنی راه (نشریه ۷۳۱ سازمان برنامه و بودجه)

-Beaty, A. (2003). Contribution title (Prof. Beaty's summary). In J. L. Silfwerbrand (Ed.), Design of industrial concrete block pavement: Summary of an international workshop (pp. x–y). Proceedings of the 7th International Conference on Concrete Block Paving.

-Cook, I.D., (2003). Case study: Port of Santos, Brazil. In: J.L. Silfwerbrand (ed.), Design of industrial concrete block pavement: Summary of an international workshop, Proc. 7th Int. Conf. on Concrete Block Paving, *Southeastern Pavement Technology (SEPT).*

-FICE, John Knapton and David R. Smith (1997). Port and Industrial Pavement Design with Concrete Pavers.

-Interpave (2008). Concrete block paving in ports and industrial areas: Case studies of Felixstowe and Shoreham ports, UK. Interpave (The Precast Concrete Paving and Kerb Association), Leicester, United Kingdom.

-Ireland, Bruce, and B. Eng. (2009). Design for Load Transfer in Industrial Concrete Pavement Joints.

-Kraemer, C. (2002). A practical method of concrete pavement design for ports. In Proceedings of the 8th International Symposium on Concrete Roads, *International Society for Concrete Pavements (ISCP) / SEPT,* 1–10.

-Mampearachchi, Wasantha (2019). Handbook on concrete block paving. S*pringer Singapore.*

-Silfwerbrand, Johan (2006). Design of Industrial Concrete Block Pavements. In *8th International Conference of Concrete Block Paving, San Francisco, USA, Nov. 5-8*.

-The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries, 1982 (and revised 1983). *Published by the British Ports Association.*

-Wellner, (2003). Design of industrial concrete block pavement – Germany: Multi-layer analysis with BISAR and comparison with German pavement design guidelines.

Evaluation and presentation of an optimal solution for improving the subgrade and pavement of industrial areas (Case Study: Shadabad Iron Market, Tehran)

Rezvan Babagoli, *Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran.*

Mohammad Kashani Novin, Ph.D., Grad., of Transportation Engineering,

Chief Executive Officer of Ara Tarh Royan company, Tehran, Iran.

E-mail: Rezvan.babagoli1987@gmail.com

Received: December 2025- Accepted: February 2026

ABSTRACT

Industrial areas with heavy loads and special traffic conditions require strong and durable pavements. This study was conducted with the aim of investigating the current situation and providing an optimal solution for improving the subgrade and pavement of the Shadabad Iron Market in Tehran (with an area of approximately 49 hectares). The study area, which includes Tavous and Baharan Boulevards, was examined in conjunction with the Tehran Technical and Engineering Consulting Organization. The research methodology included field visits, expert meetings, field tests (such as CBR and mapping), reviewing international experiences of concrete industrial pavements, and pavement design using AASHTO, PCA, and ACI methods. According to the field visit, numerous damages such as lizard skin cracks, potholes, sanding, and improper drainage were observed. Considering the static, dynamic, and impact loads resulting from industrial activities and heavy vehicle traffic, the use of rigid (concrete) pavements was identified as the superior option. In this regard, types of concrete pavements including roller compacted concrete (RCC), jointed concrete pavement (JPCP) and industrial concrete block (CBP) were investigated and compared. Pavement design was carried out considering traffic parameters, subgrade soil strength and environmental conditions and optimal thicknesses were calculated for each option. The results showed that roller compacted concrete pavement is recommended as the final option due to its reasonable initial cost, high durability and low maintenance requirement. Also, an economic comparison of the options was carried out based on life cycle analysis (LCCA) which confirmed the superiority of the concrete option in terms of long-term costs. This study can be used as a model for pavement improvement in other industrial areas of the country.

Keywords: Industrial Pavement, Roller-Cast Concrete, Shadabad Iron Market, Pavement Design, Life Cycle Analysis, Road Improvement