

بررسی فنی-اقتصادی به کارگیری انواع روسازی های بتنی در محوطه های صنعتی با توجه به افق بیست ساله ترافیک سنگین (مطالعه موردی: مهندسین مشاور ایمن پنام راه)

سیروس رادکیا^۱، نسیم وحیدپور^۲، محمدامین صراف^۳

۱- دکتری راه، مدیرعامل شرکت مهندسین مشاور ایمن پنام راه، خوزستان، اهواز

۲- کارشناسی ارشد راه، مدیر امور مطالعات شرکت مهندسین مشاور ایمن پنام راه، خوزستان، اهواز

۳- کارشناسی ارشد راه، کارشناس امور مطالعات شرکت مهندسین مشاور ایمن پنام راه، خوزستان، اهواز

چکیده

با توجه به مشکلات روسازی های آسفالتی در محورهای سنگین در مناطق گرمسیر که اغلب دارای ناهمواری، موج های بلند و متوالی و دیگر خرابی ها است، کاربرد دال بتنی به عنوان لایه مقاوم و بادوام، باعث رفع مشکلات مزبور و کاهش دوره تعمیرات خواهد شد. از طرفی بررسی روسازی های بتنی با توجه به مسئله حفظ محیط زیست و توسعه پایدار امری اجتناب ناپذیر به نظر می رسد.

هدف از انجام این پژوهش انتخاب بهترین گزینه روسازی مورد نیاز جاده های دسترسی به یکی از سایت های صنعتی جنوب کشور و ترافیک سنگین ایجاد شده بر روی آن، با توجه به افق بیست ساله می باشد که با طراحی انواع روسازی های بتنی از جمله روسازی بتنی ساده درزدار، روسازی بتنی مسلح درزدار، روسازی بتنی مسلح پیوسته، روسازی بتنی پیش تنیده و روسازی بتن غلتکی و بررسی هر کدام از نقطه نظر فنی- اقتصادی انجام می پذیرد. در نهایت روسازی بتن غلتکی از نقطه نظر فنی بهترین گزینه و در کل روسازی بتن غلتکی با اجرای کمتر از یک ساعت بهترین گزینه فنی- اقتصادی برای پروژه بررسی شده معرفی می گردد

واژه های کلیدی: روسازی بتنی، بتن مسلح، بتن پیش تنیده، بتن غلتکی، ترافیک سنگین

۱- مقدمه

روسازی بیشتر راه‌ها در ایران از نوع روسازی‌های آسفالتی است. یکی از بارزترین دلایل این امر، وجود منابع نفتی از جمله قیر فراوان در ایران است. با توجه به مشکلات روسازی‌های آسفالتی در محورهای سنگین بالاخص در مناطق گرمسیر که اغلب دارای ناهمواری، موج‌های بلند و متوالی و شکستگی است، کاربرد روسازی بتنی که مخلوطی از مصالح سنگی، سیمان و آب می باشد به عنوان لایه مقاوم و بادوام، باعث رفع مشکلات مزبور و کاهش دوره تعمیرات نیز خواهد شد. از طرفی بتن به علت دارا بودن خواص و ویژگی های ممتاز، در دسترس بودن مصالح آن و عدم نیاز به گرم کردن مصالح (سریع الحصول بودن آن)، پس از آب پرمصرف ترین ماده عمرانی به شمار می آید. با وجود قابلیت‌های فراوان روسازی بتنی، مشکلاتی نیز در بخش‌های مختلف طراحی و اجرایی آن وجود دارد. از طرفی ترافیک عبوری از مسیر نیز یکی از مهمترین پارامترها در طراحی روسازی است. ترافیک عبوری در دوره طراحی در راه‌های موجود بر مبنای آمارگیری و آگاهی از روند رشد ترافیک در سال‌های قبل و جذب ترافیک (پروژه‌های بهسازی) و در راه‌های جدید با انجام مطالعات حمل و نقل، تخمین رشد ناشی از توسعه آتی و برآورد قابلیت جذب، پیش بینی می‌گردد.

در پژوهشی که توسط والکس، (۲۰۰۳) انجام پذیرفت روسازی بتنی به عنوان گزینه ای بهینه جهت طراحی در مناطق سرد معرفی گردید. در نتایج این پژوهش آمده است که بررسی عدم وجود خاک های حساس به یخبندان در سابگرید مهمترین عامل جلوگیری از آسیب به این روسازی ها در مناطق سردسیر می باشد [۱].

همچنین کلانتری و همکارانش، (۲۰۰۹) در تحقیقات خویش بدین نتیجه رسیدند تشابهات فراوانی میان روسازی بتن غلتکی و روسازی بتنی ساده وجود داشته و بتن غلتکی به علت درصد آب به سیمان پایین دارای مقاومت برابر یا بیشتر از روسازی معمولی است. همچنین آنها نتیجه گرفته اند که، جهت جلوگیری از اضمحلال زودرس رویه بتن غلتکی ناشی از دوره های ذوب و یخبندان در مناطق سردسیر از ۵ سانتی متر روکش آسفالتی استفاده شود [۲].

در تحقیقات دیگری که توسط تینی، (۲۰۱۳) انجام پذیرفت، متدهای طراحی و تجارب ساخت روسازی های بتنی در کشور استرلیا ارائه شده و در پایان مزایا و معایب آن در مقایسه با روسازی آسفالتی، از جمله اینکه در صورت اجرای روسازی بتنی در پروژ های بزرگ از نظر اقتصادی مرغون به صرفه خواهد بود، اشاره شده است [۳].

روسازی‌های بتنی انواع مختلفی دارند که با توجه به شرایط طرح، اهداف و شرایط بارگذاری، می توان از مدل‌های مختلف آن استفاده کرد. این مدل ها در جدول شماره (۱) ارائه گشته است. هدف از انجام این پژوهش انتخاب بهترین گزینه روسازی مورد نیاز جاده های دسترسی به یکی از سایت های صنعتی جنوب کشور و ترافیک سنگین ایجاد شده بر روی آن، با توجه به افق بیست ساله می باشد که با طراحی انواع روسازی های بتنی از جمله روسازی بتنی ساده درزدار، روسازی بتنی مسلح درزدار، روسازی بتنی مسلح پیوسته، روسازی بتنی پیش تنیده و روسازی بتن غلتکی و بررسی هرکدام از نقطه نظر فنی- اقتصادی انجام می پذیرد.

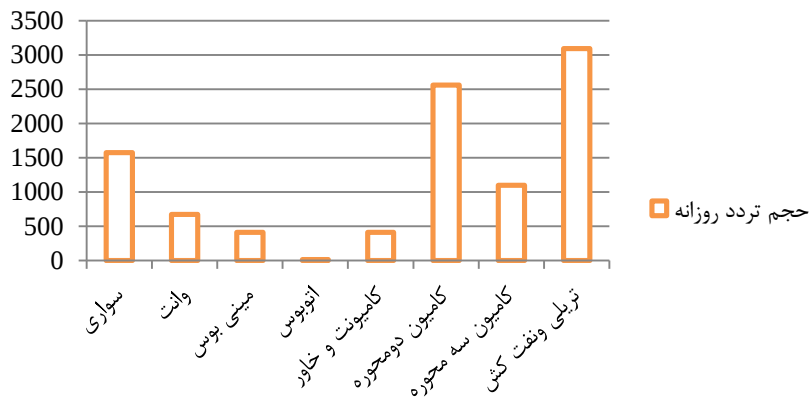
جدول (۱) معرفی انواع روسازی های بتنی

نوع روسازی	اختصار به لاتین	توضیحات
بتنی ساده درزدار	JPCP	(jointed plain concrete pavement)
بتنی مسلح درزدار	JRCP	(jointed reinforcement concrete pavement)
بتنی مسلح پیوسته	CRCP	(continuous reinforcement concrete pavement)
بتنی پیش تنیده	PCP	(Pre-Stress Concrete Pavement)
بتن غلتکی	RCCP	(Roller Compacted Concrete Pavement)

۲- عوامل موثر در طرح روسازی

۱-۲ ترافیک عبوری

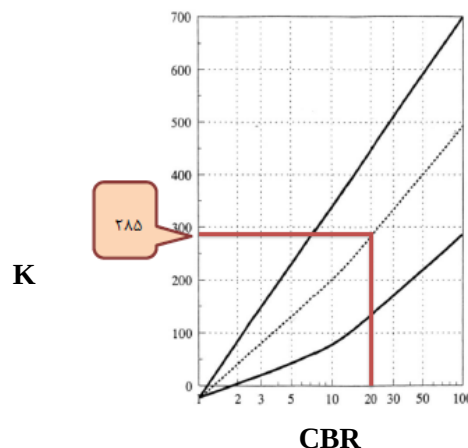
متوسط حجم تردد روزانه محدود مورد مطالعه براساس آمار برداشت شده در نمودار ارائه شده است. با توجه به نمودار تواتر حجم تردد خودورهای سنگین نسبت به سبک، با توجه به احداث سایت صنایع سنگین کاملاً مشخص می باشد.



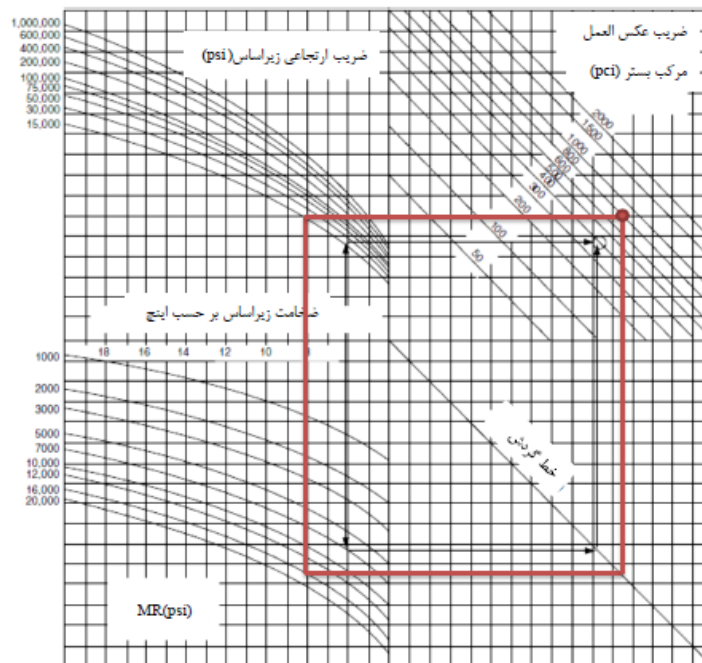
نمودار (۱) حجم تردد روزانه محور مورد نظر

۲-۲ ضریب عکس العمل بستر

در صورت استفاده از زیرساخت سنگدانه‌ای، بهتر است ضخامت زیرساخت سنگدانه‌ای به حدود ۱۰ سانتی متر محدود شود زیرا ضخامت‌های بیشتر از حدود ۱۰ سانتی‌متر احتمال عملکرد نامطلوب روسازی را در اثر تحکیم پس از ساخت و ناشی از بار ترافیک سنگین را به همراه خواهد داشت. در ادامه با توجه به مشکلات مربوط به فرسایش مصالح زیرساخت روسازی‌های بتنی در محل درزها و در لبه روسازی، در طراحی، ۲۰ سانتی متر (۸ اینچ) زیرساخت تثبیت شده با سیمان در نظر گرفته می شود. بدین منظور ضریب عکس العمل بستر اصلاح می گردد. جهت اعمال این تغییرات ابتدا از نمودار شماره (۲) مقدار K تقریبی خاک جهت مطالعات اولیه و با توجه به مقدار CBR برابر با ۲۰ (استفاده از دو لایه ۱۵ سانتی متری مصالح A1 تا A3 و در صورت لزوم استفاده از مواد تثبیت کننده، جهت افزایش مقاومت خاک و رسیدن به مقدار موردنظر) تعیین شده، سپس با استفاده از نمودار شماره (۳) مقدار ضریب عکس العمل مرکب بستر 800 psi تعیین می گردد. لازم به ذکر است که پس از مطالعات مرحله اول جهت تدقیق محاسبات، مقدار دقیق پارامتر K از آزمایش بارگذاری صفحه بدست آمده و مجدداً مراحل طراحی تکرار می شود.



نمودار (۲) تعیین مقدار K (بر حسب psi/in) با توجه به CBR بستر



نمودار ۳) تعیین ضریب عکس العمل مرکب بستر

۳-۲ دیگر پارامترهای طرح روسازی

اصلی ترین پارامترهای طرح روسازی بتنی در مسیر موردنظر (آزادراهی) در جدول ارائه شده است :

جدول ۲) پارامترهای طرح روسازی های بتنی

محدوده مورد تایید	مقدار	نام عامل مورد نظر	محدوده مورد تایید	مقدار	نام عامل مورد نظر
-	۳/۰۰٪	نرخ رشد سالیانه (I)	۲۰-۵۰	۲۰	دوره طرح (n)
۸۰-۱۰۰	۹۰	درصد عبوری از خط طرح	-	۴/۵	خدمت دهی اولیه (Pi)
-	۰/۵۰	ضریب توزیع جهتی ترافیک	-	۳/۰۰	خدمت دهی نهایی (Pt)
-	۴۸۰۹۸/۰۹۲۰	محور معادل سنگین	-	۳/۱۶۸۶	محور معادل سبک
-	۲۱۳×۱۰ ^۶	مجموع تردد هم ارز	-	۲۶/۸۷	ضریب رشد ترافیکی
-	-۱/۲۸۲	انحراف معیار (Z _R)	۸۰-۹۹/۹	۹۰	سطح قابلیت اطمینان (R)
-	۱/۵	افت نشانه خدمت دهی	-	۰/۳۹	انحراف معیار کلی (Sc)
-	۲۸۵	ضریب عکس العمل بستر (k)	-	۲۰	CBR خاک و توونان
-	۸۰۰	ضریب عکس العمل مرکب بستر	-	۲۰	ضخامت زیراساس تثبیت شده با سیمان
-	۳/۷۶×۱۰ ^۶	ضریب الاستیسیته بتن (psi)	-	۳۰	حداقل مقاومت فشاری بتن (مگا پاسکال)

۱/۱۰ ۱/۰۰	۱/۰۵	ضریب زهکشی (C_d)	$8\sqrt{f_{cm}} \sim 10\sqrt{f_{cm}}$	۶۷۰	ضریب گسیختگی بتن (psi)
-	۱/۸	ضریب میانگین اصطکاک بین دال و لایه زیرین (f_a)	-	۳۸/۳	مقاومت فشاری متوسط بتن (f_{cm}) (مگاپاسکال)
-	۴۰۰	تنش تسلیم میلگرد (مگاپاسکال)	۲/۵-۳/۱	۲/۸	ضریب انتقال بار روسازی بتنی ساده (J) (همراه با شانه بتنی متصل و دارای داول بار)
-	۳۰۰	تنش مجاز میلگرد (f_s) (مگاپاسکال)	۲/۳-۲/۹	۲/۶	ضریب انتقال بار روسازی بتنی مسلح (J) (همراه با شانه بتنی متصل و دارای داول بار)

۳- طراحی روسازی بتنی ساده در زردار

جهت تعیین ضخامت دال روسازی بتنی ساده در زردار با توجه به آیین نامه آشتو از رابطه (۱) استفاده می شود. پس از طرح روسازی ضخامت دال بتنی، ۳۶ سانتی متر به دست می آید. در نهایت با توجه به اینکه به ازای هر ۲ سانتی متر لایه آسفالتی، ۱ سانتی متر از دال بتنی کم می شود، دال بتنی به ضخامت ۳۴ سانتی متر همراه با ۵ سانتی متر میان لایه آسفالتی مورد استفاده قرار می گیرد.

$$\log W_{18} = Z_R S_0 + 7.35 \times \log(D + 1) - 0.06 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.5-1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 \times P_t) \times \log\left[\frac{S_c \times C_d [D^{0.75} - 1.132]}{215.63 \times J [D^{0.75} - \frac{18.42}{(E_c/K)^{0.25}}]}\right] \quad (1)$$

حداکثر طول دال های بتنی غیر مسلح ۵ متر می باشد که در این طراحی ۴/۵ متر در نظر گرفته می شود. با استفاده از آرماتورهای انتقال بار می توان خرابی روسازی را به حداقل رساند که این مطلب توسط انجمن سیمان پرتلند (PCA, ۱۹۸۴) به عنوان یک فاکتور برای طراحی ضخامت در نظر گرفته شده است. طراحی Dowel ها و درزهای اتصال، اساساً بر حسب تجربه است و سائز آن به ضخامت دال بستگی دارد به طور کلی از میلگرد انتقال بار (داول بارها) در محل درزهای عرضی و در میانه ضخامت دال استفاده شده که از نوع میلگردهای ساده (بدون آج) با قطر ۳۰ تا ۴۰ میلی متر، به فواصل ۳۰۰ میلی متری و به طول ۴۵۰ میلی متر که به طور کامل روغن کاری شده و نیمی از آن ها در یکی از دال ها و دیگری در دال بعدی است، می باشند. به طور کلی براساس آیین نامه آشتو، قطر آرماتور درز عرضی (Dowel Bar)، یک هشتم ضخامت دال است. با توجه به ضخامت دال استفاده از میلگرد نمره ۴۰ کافی به نظر می رسد.

همچنین در محل درزهای طولی و در جهت عمود بر این درزها، از میلگردهای دوخت (تای بارها) استفاده می شود. این میلگردها در ارتفاعی برابر نصف ضخامت دال قرار می گیرند. جنس آن ها از فولاد دارای تنش تسلیم ۴۰۰ مگاپاسکال (S 400) بوده و دارای قطر ۱۶ میلی متر، به طول ۷۵۰ میلی متر و به فاصله مرکز به مرکز ۷۵۰ میلی متر می باشند. لازم به ذکر است که در فاصله ۴۰ سانتی متری از درز عرضی از میلگرد دوخت استفاده نمی شود. خلاصه نتایج آرماتورگذاری روسازی بتنی ساده در زردار در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳) خلاصه نتایج آرماتورگذاری روسازی بتنی ساده درزدار (برحسب میلی متر)

نوع آرماتور	قطر میلگرد	نوع میلگرد	طول میلگرد	فواصل آرماتور گذاری	توضیحات
داول بار	۴۰	ساده	۴۵۰	۳۰۰	روغن کاری شود
تای بار	۱۶	آجدار	۷۵۰	۷۵۰	در ۴۰ cm محل درز عرضی استفاده نشود

۴- طراحی روسازی بتنی مسلح درزدار

تعیین ضخامت روسازی بتنی مسلح درزدار همانند روسازی بتنی ساده درزدار می باشد و از آنجا که میلگردهای فولادی تقریباً در محل تار خنثی (در نیمه ارتفاع دال) نصب می شوند، بنابراین، این فولادها تاثیری بر مقاومت خمشی بتن ندارند و فقط به منظور مقاومت دال در برابر تنش های حرارتی (ترک های حرارتی) تعبیه می شوند. درصد فولاد طولی مورد استفاده در دال های این نوع از روسازی بتنی بین ۰/۱ تا ۰/۲۵ درصد سطح مقطع دال در جهت طولی است و درصد فولاد عرضی از مقادیر ذکر شده کمتر می باشد. لازم به ذکر است که امروزه به دلیل عملکرد نسبتاً نامطلوب روسازی بتنی مسلح درزدار در مقایسه با روسازی های بتنی ساده درزدار و روسازی های بتنی مسلح پیوسته، این نوع روسازی کمتر مورد استفاده قرار می گیرد. با توجه به دلایل زیر از طرح روسازی بتنی مسلح درزدار صرف نظر می شود :

- ۱- روسازی های بتنی ساده درزدار دارای عملکردی مشابه یا حتی بهتر از روسازی های مسلح درزدار هستند.
- ۲- کاهش هزینه ایجاد درزهای عرضی در روسازی بتنی مسلح درزدار نسبت به روسازی بتنی ساده درزدار در مقابل افزایش هزینه آرماتورگذاری بسیار ناچیز بوده و روسازی بتنی ساده درزدار اقتصادی تر است.
- ۳- افزایش آرماتورگذاری در این نوع روسازی نسبت به روسازی ساده درزدار منجر به افزایش پارامترهای مقاومتی و کاهش ضخامت دال نمی گردد.
- ۴- درخصوص استفاده از این نوع روسازی رضایت کلی وجود ندارد.

۵- طراحی روسازی بتنی مسلح پیوسته

تفاوت طرح ضخامت روسازی بتنی مسلح پیوسته با روسازی بتنی ساده درزدار در ضریب انتقال بار می باشد که مقدار ۲/۶ در نظر گرفته می شود. پس از طرح روسازی ضخامت دال بتنی، ۳۴/۵ سانتی متر به دست می آید. در نهایت با توجه به اینکه به ازای هر ۲ سانتی متر لایه آسفالتی، ۱ سانتی متر از دال بتنی کم می شود، دال بتنی به ضخامت ۳۲ سانتی متر همراه با ۵ سانتی متر لایه روکش آسفالتی مورد استفاده قرار گیرد.

در روسازی های بتنی مسلح پیوسته از میلگردهای طولی به منظور کنترل ترک های ناشی از تغییر حجم بتن و از میلگردهای عرضی برای کنترل عرض ترک های احتمالی طولی، به عنوان جایگزینی برای آرماتورهای دوخت و تکیه گاهی برای میلگردهای طولی استفاده می شود. برای تعیین مقدار میلگرد عرضی لازم برای روسازی بتنی مسلح پیوسته از رابطه (۲) استفاده می شود :

$$P_t = \frac{\gamma_c \times L \times f_a}{2f_s} \times 100 \quad (2)$$

P_t : درصد میلگرد عرضی

γ_c : وزن واحد حجم بتن

L : فاصله بین لبه های طولی آزاد

f_a : ضریب میانگین اصطکاک بین دال و لایه زیرین

f_s : تنش مجاز میلگرد (۷۵ درصد تنش تسلیم)

با توجه به اینکه معمولاً میلگردهای عرضی تکیه گاه میلگردهای طولی هستند؛ بنابراین میلگردهای عرضی در زیر میلگردهای طولی قرار می گیرند. فاصله مرکز به مرکز میلگردهای عرضی حداقل ۶۰ و حداکثر ۱۲۰ سانتی متر در نظر گرفته می شود. میلگردهای عرضی نباید به میلگردهای طولی جوش داده شوند. فاصله بین میلگردهای عرضی را می توان از رابطه (۳) بدست آورد.

$$Y = \frac{A_s}{P_t D} \times 100 \quad (3)$$

که در آن:

P_t : درصد میلگرد عرضی

A_s : مساحت سطح مقطع هر میلگرد عرضی

D : ضخامت دال بتنی

لازم به ذکر است که، در محل درزهای طولی و در جهت عمود بر این درزها، علیرغم استفاده از میلگرد عرضی از میلگردهای دوخت و از نوع آجدار نیز استفاده می شود. میلگردهای دوخت از فولاد رده S۴۰۰، دارای قطر ۱۶ میلی متر و طول ۷۵ سانتی متر بوده و فواصل مرکز به مرکز آن ها نیز برابر ۷۵ سانتی متر می باشد. همچنین برای تعیین درصد فولاد طولی سه معیار حدی در نظر گرفته می شود که عبارتند از:

۱. معیار فاصله ترک

۲. معیار عرض ترک

۳. معیار تنش فولاد

همچنین الگوریتم محاسبه درصد فولاد طولی در شکل (۱) نشان داده شده است. که در آن:

P_{max} : حداکثر فولاد طولی (براساس معیار حداقل فاصله ترک ۳/۵ فوت)

P_{min1} : حداقل فولاد طولی (براساس معیار حداکثر فاصله ترک ۸ فوت)

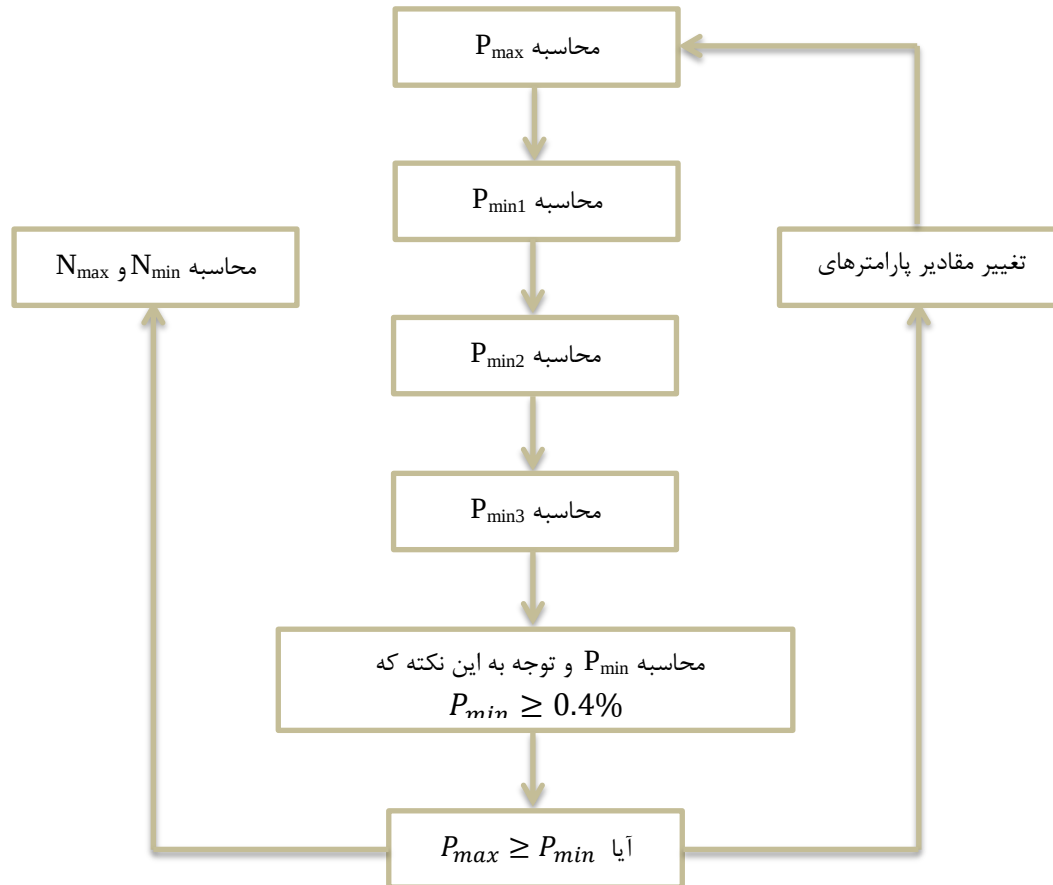
P_{min2} : حداقل فولاد طولی (براساس معیار حداکثر عرض ترک ۱ میلی متر)

P_{min3} : حداقل فولاد طولی (براساس معیار تنش فولاد)

P_{min} : حداقل فولاد طولی $(P_{min1}, P_{min2}, P_{min3})$

N_{min} : حداقل تعداد میلگرد طولی

N_{max} : حداکثر تعداد میلگرد طولی



شکل ۱) روند محاسبه درصد فولاد طولی در روسازی بتنی مسلح پیوسته

براساس معیار فاصله ترک حداکثر فاصله بین ترک های متوالی جهت جلوگیری از خردشدگی ترک نباید از ۸ فوت (۲/۴۳ متر) بیشتر باشد. همچنین برای به حداقل رساندن سوراخ شدگی نیز حداقل مطلوب فاصله ترک ها باید ۳/۵ فوت (۱/۰۷ متر) در نظر گرفته شود. نهایتاً جهت تعیین درصد فولاد طولی با توجه به محدودیت فاصله ترک از رابطه (۴) استفاده می شود.

$$P_{max,min1} = \frac{1.062 \left(1 + \frac{f_t}{1000}\right)^{1.457} \left(1 + \frac{\alpha_s}{2\alpha_c}\right)^{0.25} (1+\phi)^{0.476}}{(\bar{x}_{max,min})^{0.217} \left(1 + \frac{\sigma_w}{1000}\right)^{1.13} (1+1000Z)^{0.389}} - 1 \quad (4)$$

که در آن:

P : درصد میلگرد طولی

f_t : مقاومت کششی غیر مستقیم ۲۸ روزه بر حسب psi (۸۶ درصد ضریب گسیختگی بتن)

α_s : ضریب انبساط حرارتی فولاد ($9 \times 10^{-6} \frac{1}{^\circ C}$)

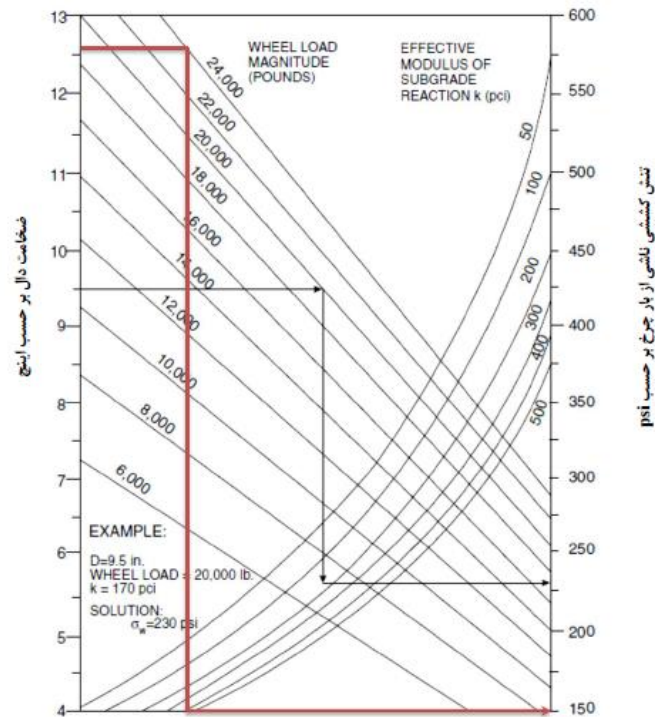
α_c : ضریب انبساط حرارتی بتن با توجه به جدول (۴) تعیین می گردد.

ϕ : قطر میلگرد بر حسب اینچ

$\bar{x}$: فاصله ترک ها بر حسب فوت

σ_w : تنش کششی ناشی از بار چرخ بر حسب psi با توجه به نمودار (۴) تعیین می گردد.

Z : انقباض ۲۸ روزه بتن بر حسب اینچ/اینچ با توجه به جدول (۵) تعیین می گردد.



نمودار (۴) تعیین تین کششی ناشی از بار چرخ

جدول (۴) تعیین ضریب انقباض/انبساط حرارتی بتن

ضریب انقباض/انبساط حرارتی بتن	نوع سنگدانه (درشت دانه)
$10^{-6} \frac{1}{^{\circ}\text{C}}$	
۱۱/۹	کوارتز
۱۱/۷	ماسه سنگ
۹/۵	گرانیت
۸/۶	بازالت
۶/۸	سنگ آهک

جدول (۵) ارتباط بین انقباض ناشی از خشک شدن بتن و مقاومت کششی غیر مستقیم بتن

انقباض	مقاومت کششی غیر مستقیم	
	psi	MPa
۰/۰۰۰۸	۳۰۰ یا کمتر	۲/۱ یا کمتر
۰/۰۰۰۶	۴۰۰	۲/۸
۰/۰۰۰۴۵	۵۰۰	۳/۵
۰/۰۰۰۳	۶۰۰	۴/۲
۰/۰۰۰۲	۷۰۰ یا بیشتر	۴/۹ یا بیشتر

براساس معیار عرض ترک حداکثر عرض ترک جهت جلوگیری از خردشدگی و نفوذ آب نباید از ۱ میلی متر (۰/۰۴ اینچ) بیشتر باشد. نهایتاً جهت تعیین درصد فولاد طولی با توجه به محدودیت عرض ترک از رابطه (۵) استفاده می شود.

$$P_{min2} = \frac{0.358 \left(1 + \frac{f_t}{1000}\right)^{1.435} (1 + \phi)^{0.484}}{(CW)^{0.22} \left(1 + \frac{\sigma_w}{1000}\right)^{1.079}} - 1 \quad (6)$$

که در آن:

CW: عرض ترک بر حسب اینچ

براساس معیار تنش فولاد برای اطمینان از عدم شکست و تغییر شکل دائمی زیاد فولاد از ۷۵ درصد مقاومت کششی نهایی فولاد استفاده می شود. مقادیر متوسط تنش مجاز فولاد بر حسب اندازه میلگرد و مقاومت بتن برای فولاد S۴۰۰ در جدول (۶) آورده شده است. نهایتاً جهت تعیین درصد فولاد طولی با توجه به محدودیت تنش فولاد از رابطه (۶) استفاده می شود.

جدول (۶) تنش مجاز فولاد برای فولاد رده S۴۰۰

مقاومت کششی غیر مستقیم			قطر میلگرد (mm)	
			۱۴	۱۶
			۲۰	
			تنش مجاز (MPa)	
			psi	MPa
			۳۰۰ یا کمتر	۲/۱ یا کمتر
			۴۰۰	۲/۸
			۵۰۰	۳/۵
			۶۰۰	۴/۲
			۷۰۰	۴/۹
			۸۰۰ یا بیشتر	۵/۶ یا بیشتر

$$P_{min3} = \frac{50.834 \left(1 + \frac{1.8DT_D}{100}\right)^{0.155} \left(1 + \frac{f_t}{1000}\right)^{1.493}}{(\sigma_s)^{0.365} \left(1 + \frac{\sigma_w}{1000}\right)^{1.146} (1 + 1000Z)^{0.18}} - 1 \quad (6)$$

که در آن:

DTD: افت دمای طراحی بر حسب درجه فارنهایت

σ_s : تنش مجاز فولاد بر حسب psi

منظور از افت دمای طراحی بتن مسلح، اختلاف بین دمای متوسط عمل آوری بتن و حداقل دمای طراحی است. افت دمای طراحی به صورت رابطه (۷) تعریف می شود.

$$DT_D = T_H - T_L \quad (7)$$

که در آن:

T_H : متوسط بیشترین دمای روزانه در طی ماهی که روسازی ساخته می شود

T_L : کمترین دمای روزانه در سردترین ماه سال در عمر روسازی

در نهایت با استفاده از روابط (۸) و (۹) حداقل و حداکثر تعداد میلگرد مورد نیاز بدست می آید.

$$N_{min} = 0.01273 P_{min} W_s \frac{D}{\phi^2} \quad (۸)$$

$$N_{max} = 0.01273 P_{max} W_s \frac{D}{\phi^2} \quad (۹)$$

که در آن:

W_s : عرض کل روسازی

D : ضخامت دال بتنی

با فرض حداقل مقاومت مشخصه بتن روسازی و استفاده از میلگرد به قطر ۲۰ (۰/۷۹ اینچ) مقدار انقباض ناشی از خشک شدگی بتن (Z) مقدار ۰/۰۰۰۴۵ می باشد. با فرض حداکثر بار چرخ ناشی از ترافیک حین ساخت (۲۴۰۰۰ پوند) و با داشتن ضخامت دال و مقدار ضریب موثر بستر با توجه به نمودار حداکثر تنش کششی ناشی از بار چرخ که می توان در نظر گرفت، مقدار psi ۱۵۰ می باشد. با فرض نوع مصالح سنگی موجود در بتن (سنگ آهک) ضریب انبساط حرارتی بتن با توجه به جدول مقدار α_c برابر ۶/۸ اختیار می شود. همچنین میزان افت دمای طراحی به میزان ۸۰ درجه سانتی گراد یا ۱۴۴ درجه فارنهایت و تنش مجاز فولاد با توجه به جدول و با در نظر گرفتن مقاومت کششی غیر مستقیم ۵۰۰ و قطر میلگرد ۲۰ میلی متر، تنش مجاز فولاد مقدار ۴۶۹ مگاپاسکال یا psi ۶۸۰۰۰ در نظر گرفته می شود. در نهایت خلاصه نتایج آرماتورگذاری روسازی بتنی مسلح پیوسته با توجه به تعریف سه تیپ مقطع در جدول شماره (۷) آورده شده است.

لازم به ذکر است که نکات زیر را در طراحی می بایست در نظر گرفت:

(۱) میلگرد به قطر ۲۰ میلی متر، بزرگترین میلگردی است که برای ایجاد چسبندگی و کنترل عرض ترک ها در روسازی بتن مسلح پیوسته استفاده می شود.

(۲) فاصله بین میلگردهای طولی نباید از ۱۰ سانتی متر یا ۲/۵ برابر بزرگترین سنگدانه کمتر باشد.

(۳) فاصله بین میلگردهای طولی نباید از ۲۳ سانتی متر بیشتر باشد.

(۴) مقدار همپوشانی میلگردها در محل قطع آن ها باید حداقل ۳۳ برابر قطر میلگرد باشد.

جدول (۷) خلاصه نتایج آرماتورگذاری روسازی بتنی مسلح پیوسته (بر حسب میلی متر)

نوع آرماتور	قطر میلگرد	نوع میلگرد	طول/تعداد میلگرد	فواصل آرماتور گذاری	توضیحات
تای بار	۱۶	آجدار	۷۵۰	۷۵۰	در ۴۰ cm محل درز عرضی استفاده نشود
آرماتور عرضی	۲۰	آجدار	$25/4 \times 10^3$	۵۰۰	در زیر آرماتور طولی
	۲۰	آجدار	$29/55 \times 10^3$	۴۵۰	
	۲۰	آجدار	$33/70 \times 10^3$	۴۰۰	
آرماتور طولی	۱۶	آجدار	۱۵۵ عدد	۱۶۰	در زیر محل برش برای ایجاد درز انقباض طولی نباید میلگرد طولی قرار بگیرد
	۱۶	آجدار	۱۸۱ عدد	۱۶۰	
	۱۶	آجدار	۲۰۶ عدد	۱۶۰	

۶- طراحی روسازی بتنی پیش تنیده

برای طراحی روسازی بتنی پیش تنیده ابتدا ضخامت روسازی بتنی ساده محاسبه گشته سپس ۴۰ تا ۵۰ درصد آن به عنوان ضخامت روسازی بتنی پیش تنیده مد نظر قرار می گیرد. با توجه به طرح ضخامت روسازی بتنی ساده در بخش های قبلی، مقدار ۱۷ سانتی متر (۵۰ درصد ضخامت روسازی بتنی ساده در زردار) به عنوان ضخامت روسازی بتنی پیش تنیده بدست می آید. پیش تنیدگی در روسازی ها میتواند فقط در جهت طولی یا در دو جهت طولی و عرضی انجام شود. طول دال های پیش تنیده معمولاً خیلی بیشتر از طول دال های روسازی های بتنی در زردار است، بنابراین، کیفیت رانندگی در این نوع روسازی ها افزایش می یابد. فاصله میلگردها و رشته کابل ها در روسازی بتنی پیش تنیده از ۲ تا ۸ برابر ضخامت دال (۳۴ تا ۱۳۶ سانتی متر) متغیر می باشد با این حال بهتر است مقادیر زیر را در نظر گرفت :

(۱) فاصله بین کابل های طولی ۲ تا ۴ برابر ضخامت دال پیش تنیده که با توجه به ضخامت ۱۷ سانتی متری دال موجود، می توان ۳۴ تا ۶۸ سانتی متر در نظر گرفته شود.

(۲) فاصله بین کابل های عرضی ۳ تا ۶ برابر ضخامت دال پیش تنیده که با توجه به ضخامت ۱۷ سانتی متری دال موجود، می توان ۵۱ تا ۱۰۲ سانتی متر در نظر گرفته شود

مقدار پیش تنیدگی طولی و عرضی باید به اندازه ای باشد که تنش فشاری لازم در وسط طول و عرض دال ایجاد شود تا بدین ترتیب دال پیش تنیده بتواند تنش های ناشی از عبور بارهای ترافیکی را تحمل نماید. بر این اساس دو پیش تنیدگی طولی و عرضی در میانه دال تعریف می گردد که عبارتند از:

- پیش تنیدگی طولی ۰/۶۸۹ تا ۲/۰۷۰ مگاپاسکال که ۱/۵۰۰ مگاپاسکال فرض می گردد.
- پیش تنیدگی عرضی ۰ تا ۱/۳۸۰ مگاپاسکال که ۱/۰۰ مگاپاسکال فرض می گردد.

طول دال ها در این نوع روسازی می تواند به حدود ۱۲۲ متر برسد، اگرچه از طول های تا ۳۰۰ متر نیز در اروپا استفاده شده است. با توجه به مرجع هوآنگ نیز این طول می تواند ۹۰ تا ۲۱۰ متر اختیار گردد. در نهایت مقدار طول دال با توجه به تکرار عملیات طراحی ۷۰ متر اختیار می گردد.

برای اطمینان از اینکه در طول عمر روسازی، مقدار تنش مورد نیاز در یک سطح قابل قبولی باقی بماند، لازم است افت تنشی بین ۱۵ تا ۲۰ درصد در میزان پیش تنیدگی در هنگام طراحی روسازی لحاظ شود. با در نظر گرفتن ۲۰ درصد افت تنش، اِفتی به میزان ۰/۳ مگاپاسکال در کابل های طولی و ۰/۲ مگاپاسکال در کابل های عرضی مدنظر قرار گرفته می شود.

حداکثر تنش ناشی از اصطکاک بین دال و لایه زیر آن از رابطه (۱۰) محاسبه می گردد:

$$f_{SR} = \frac{\gamma_c f_a L}{2} \quad (10)$$

که در آن:

f_{SR} : حداکثر تنش اصطکاک بین دال و لایه زیر آن

γ_c : وزن مخصوص بتن

f_a : ضریب اصطکاک لایه زیر دال (براساس جدول ۴)

L : طول دال بتنی

همچنین جهت تعیین فاصله بین کابل ها از رابطه (۱۱) استفاده می شود.

$$Y_t = \frac{f_t A_f}{\sigma_p D} \quad (11)$$

که در آن:

Y_t : فاصله بین کابل ها

f_t : تنش مجاز در کابل (برابر ۰/۸ تنش تسلیم)

A_f : سطح مقطع کابل (ضخامت رشته کابل ها ۱۵ میلی متر)

σ_p : پیش تنیدگی در انتهای دال

D : ضخامت دال بتنی

خلاصه نتایج آرماتورگذاری روسازی بتنی پیش تنیده در جدول (۸) آورده شده است. لازم به ذکر است در صورت امکان بهتر است کابل های عرضی در فواصل ۸۰ سانتی متری از یکدیگر اجرا شوند که بدلیل عدم صرفه اقتصادی مد نظر قرار نمی گیرد.

جدول (۸) خلاصه نتایج آرماتورگذاری روسازی بتنی پیش تنیده

نوع کابل	قطر کابل (mm)	نوع کابل	فواصل کابل ها (cm)
کابل طولی	۱۵	رده ۲۵۰	۳۵
کابل عرضی	۱۵	رده ۲۵۰	۶۰
	۱۵	رده ۲۵۰	۶۰
	۱۵	رده ۲۵۰	۶۰

۷- طراحی روسازی بتن غلتکی

تاکنون روش های متفاوتی برای طراحی روسازی بتن غلتکی پیشنهاد شده است که از آن جمله می توان به روش آشتو، گروه مهندسان ارتش ایالات متحده امریکا، انجمن بتن امریکا، انجمن سیمان پرتلند و ... اشاره نمود. محدودیت های پیش رو در طراحی عبارتند از :

(۱) در روش طراحی مهندسان ارتش ایالات متحده امریکا حداکثر وزن مجاز محور منفرد و مرکب به ترتیب ۸/۲ و ۱۴/۵ تن می باشد. با توجه به شرایط ترافیک محور مورد نظر و عبور تریلی و کامیون سه محور با وزن محوری ۱۶، ۱۸ و ۲۰ تن استفاده از این روش امکان پذیر نیست.

(۲) روش طراحی مهندسان ارتش ایالات متحده امریکا گزینه ای برای سرعت های کمتر از ۵۰ کیلومتر بر ساعت است.

(۳) روش آشتو نسبت به روش انجمن سیمان پرتلند ارجحیت دارد. لازم به ذکر است که روش انجمن سیمان پرتلند بیشتر برای روسازی نواحی صنعتی مورد استفاده قرار می -گیرد.

(۴) جداول طراحی انجمن بتن امریکا بهترین گزینه جهت طراحی محوطه های صنعتی با بار سبک و محوطه های با سرعت عملکردی پایین می باشد و برای آزادراه، بزرگراه و راه های اصلی توصیه نمی شود.

در نهایت از راهنمای طراحی روسازی آشتو جهت تعیین ضخامت روسازی بتن غلتکی همراه با میان لایه آسفالتی گرم بهره برده می شود.

طرح روسازی بتنی غلتکی (از آنجائیکه این نوع روسازی را می توان از نوع روسازی های بتنی ساده درزدار به حساب آورد)، همانند بخش طراحی روسازی بتنی ساده می باشد، با این تفاوت که در محاسبه ضریب گسیختگی خواهیم داشت :

مقدار متوسط مقاومت طرح را براساس رابطه (۱۲) تعیین می کنیم :

$$S_c = 9\sqrt{f_c} \sim 11\sqrt{f_c} \quad (12)$$

که در آن:

S_c : ضریب گسیختگی بتن بر حسب psi

F_c : مقاومت فشاری بتن بر حسب psi

بنابراین ضخامت دال بتنی، 36.5 سانتی متر به دست می آید. لازم به ذکر است که، کمترین و بیشترین ضخامت ممکن لایه های بتنی غلتکی ۱۰ تا ۲۵ سانتی متر بوده و ضخامت های بالاتر از ۲۵ سانتی متر می بایست در چند لایه اجرا شوند.

در نهایت ۳ روش ارائه می گردد :

(۱) در صورتی که لایه ها ظرف مدت یک ساعت پخش و متراکم گردند دال بتنی در دو لایه (در حدود دو سوم لایه زیرین و یک سوم لایه بالایی و بیشتر از ۱۰ سانتی متر) به ضخامت لایه اول ۲۴ و لایه بالایی ۱۰ سانتی متر به همراه ۵ سانتی متر میان لایه آسفالتی بین دال بتنی و زیرساخت تثبیت شده به کار برده شود. ❖ لازم به ذکر است که در این روش می بایست تا زمان پخش لایه دوم (بالایی) سطح لایه اول (زیرین) تمیز و مرطوب نگه داشته شده و از غلتک چرخ لاستیکی به هیچ وجه استفاده نشود.

(۲) در صورتی که لایه ها در مدت زمانی بیش از یک ساعت پخش و متراکم گشته دال بتنی در دو لایه به ضخامت لایه اول ۲۵ و لایه بالایی ۱۵ سانتی متر به همراه ۵ سانتی متر میان لایه آسفالتی بین دال بتنی و زیرساخت تثبیت شده به کار برده شود.

(۳) در صورتی که از پیوند زدا (امولسیون قیر و ...) در بین لایه های بتن غلتکی استفاده شود دال بتنی در دو لایه به ضخامت لایه اول ۲۵ و لایه بالایی ۲۰ سانتی متر به همراه ۵ سانتی متر میان لایه آسفالتی بین دال بتنی و زیرساخت تثبیت شده به کار برده شود.

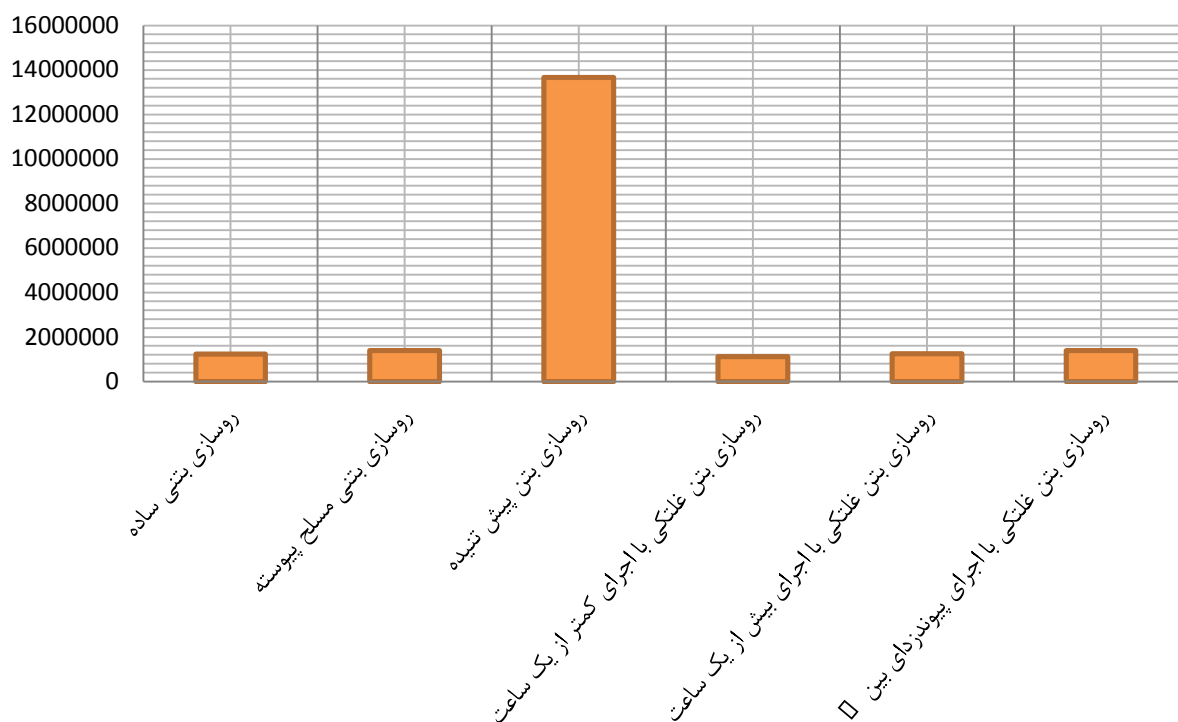
در نهایت نتایج طرح روسازی بتن غلتکی در جدول (۹) آورده شده است :

جدول (۹) نتایج طرح روسازی بتن غلتکی (بر حسب سانتی متر)

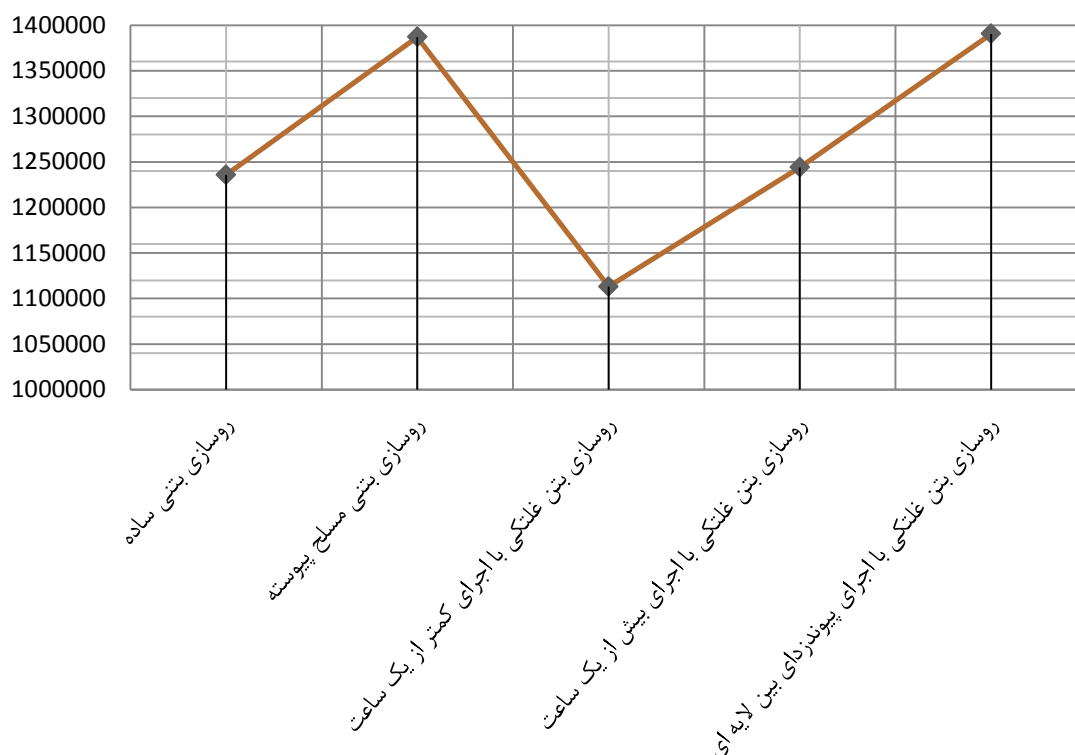
روش اجرای روسازی بتن غلتکی	ضخامت میان لایه آسفالتی	ضخامت دال بتنی زیرین	ضخامت دال بتنی بالایی
مدت زمان اجرای لایه ها بر روی یکدیگر، کمتر از یک ساعت باشد	۵	۲۴	۱۰
مدت زمان اجرای لایه ها بر روی یکدیگر، بیش تر از یک ساعت باشد	۵	۲۵	۱۵
در بین لایه ها از پیوندزدا استفاده شود	۵	۲۵	۲۰

۸- بررسی اقتصادی طرح ها

پس از طراحی هر یک از روسازی های بتنی با مدنظر قرار دادن بهای پارامترهایی نظیر، زیرساخت تثبیت شده با سیمان، میان لایه آسفالتی، دال بتنی، ایجاد درز و پر کردن با مواد درزگیر، زبر کردن سطح روسازی، داول بار، تاي بار، آرماتور دوخت، کابل های پیش تنیدگی، پیوندزدا، امولسیون و برآورد اقتصادی هر یک از روسازی ها انجام پذیرفت. لازم به ذکر است که در برآورد مربوطه ضریب بالاسری، ضریب منطقه و فواصل حمل مدنظر قرار گرفته است. نتایج این برآورد در نمودار شماره (۵) آورده شده است. با توجه به نمودار کاملاً مشخص می باشد که طرح روسازی بتن پیش تنیده مقرون به صرفه نمی باشد. در نهایت با توجه به نمودار شماره (۶) طرح روسازی بتن غلتکی با اجرای کمتر از یک ساعت لایه ها بر روی یکدیگر مناسب ترین طرح از نظر اقتصادی می باشد.



نمودار ۵) برآورد اقتصادی طرح های روسازی بتنی برای یک متر مربع



نمودار ۶) برآورد اقتصادی طرح های روسازی بتنی برای یک متر مربع

۹- بررسی فنی طرح ها

در بررسی فنی طرح ها، با امتیاز دهی به عوامل موثر در طرح و اجرای هر یک از روسازی های بتنی بهینه ترین طرح فنی انتخاب می گردد. جدول وزنی شماره (۱۰) مزایا و جدول وزنی شماره (۱۱) معایب هر یک از طرح ها را نشان می دهد. در نهایت از نظر فنی روسازی بتن غلتکی بهینه ترین طرح فنی برشمرده می شود.

جدول (۱۰) وزن دهی مزایای طرح هر یک از روسازی های بتنی

وزن دهی	مزیت (نمره)				نوع روسازی بتنی
	عدم نیاز به میلگرد (۲)	اجرای راحت و سریع (۲)	عدم نیاز به ماشین آلات خاص (۳)	هزینه چرخه عمر کمتر (۳)	
۰/۴۰	*	*			روسازی بتنی ساده
۰/۱۰۰					روسازی بتنی مسلح درزدار
۰/۲۰				*	روسازی بتنی مسلح پیوسته
۰/۲۰				*	روسازی بتنی پیش تنیده
۰/۶۰	*	*	*		روسازی بتن غلتکی

جدول (۱۱) وزن دهی معایب طرح هر یک از روسازی های بتنی

وزن دهی	مزیت (نمره)				نوع روسازی بتنی
	بروز خرابی زودرس (۲)	میزان سرو صدای زیاد (۲)	وقت گیر بودن فرآیند تعمیر (۳)	لزوم دانش فنی بالای اجرایی (۳)	
۰/۴۰	*	*	*		روسازی بتنی ساده
۰/۶۰			*	*	روسازی بتنی مسلح درزدار
۰/۶۰			*	*	روسازی بتنی مسلح پیوسته
۰/۳۰				*	روسازی بتنی پیش تنیده
۰/۲۰		*			روسازی بتن غلتکی

۱۰- نتیجه گیری

هدف از انجام این پژوهش انتخاب بهترین گزینه روسازی مورد نیاز جاده های دسترسی به یکی از سایت های صنعتی جنوب کشور و ترافیک سنگین ایجاد شده بر روی آن، با توجه به افق بیست ساله بود که با طراحی انواع روسازی های بتنی از جمله روسازی بتنی ساده درزدار، روسازی بتنی مسلح درزدار، روسازی بتنی مسلح پیوسته، روسازی بتنی پیش تنیده و روسازی بتن غلتکی و بررسی هر کدام از نقطه نظر فنی- اقتصادی انجام پذیرفت. در نهایت موارد ارائه شده در زیر را می توان به عنوان نتایج کلی این پژوهش ذکر نمود :

- با توجه به نمودار شماره ۵، روسازی بتن پیش تنیده گران ترین نوع روسازی در این پروژه می باشد.
- با توجه به جدول شماره ۹، طراحی ضخامت روسازی بتن غلتکی با توجه به استفاده و یا عدم استفاده از پیوندزادی بین لایه ای و متناسب با مدت زمان اجرای لایه ها بر روی یکدیگر در کمتر و بیشتر از یک ساعت، به سه حالت تقسیم شده که در این بین کمترین ضخامت در شرایط اجرای لایه ها بر روی یکدیگر در کمتر از یک ساعت به دست می آید.

- (۳) با توجه به نمودار شماره ۶ و ۷، روسازی بتن غلتکی با اجرای کمتر از یک ساعت لایه ها بر روی یکدیگر کمترین هزینه ساخت را به همراه داشته و پس از آن روسازی بتنی ساده اقتصادی ترین گزینه می باشد.
- (۴) روسازی بتن غلتکی با اجرای کمتر از یک ساعت لایه ها بر روی یکدیگر، در حدود ۹۲ درصد از روسازی بتنی پیش تنیده و در حدود ۱۰ درصد از روسازی بتنی ساده ارزانتر می باشد.
- (۵) روسازی بتن غلتکی با اجرای بیش از یک ساعت لایه ها بر روی یکدیگر و روسازی بتن غلتکی با پیوندزادی بین لایه ای به ترتیب در حدود ۰/۶۷ و ۱۱ درصد از روسازی بتنی ساده گرانتر تمام می شود.
- (۶) با توجه به جدول ۱۰ و ۱۱ روسازی بتن غلتکی از نقطه نظر فنی بهترین گزینه و در کل روسازی بتن غلتکی با اجرای کمتر از یک ساعت بهترین گزینه فنی- اقتصادی برای پروژه بررسی شده معرفی می گردد.

مراجع

- [1] Waalkes. S. M. (2003), Cold Weather & Concrete Pavements: Troubleshooting & Tips to Assure a Long-Life Pavement, Annual Conference of the Transportation Association of Canada.
- [2] Kalantari. B. ,Mafian .S And Huat. B. B. K, (2009), RC Concrete versus Conventional Concrete in Pavement, Contemporary Engineering Sciences, Vol. 2, no. 3, 139 – 148.
- [3] Tinni. A., (2013), INTRODUCTION TO CONCRETE PAVEMENTS, Eesti Betooniühing.

- [۴] آیین نامه روسازی آسفالتی راههای ایران، نشریه ۲۳۴، (۱۳۹۰)، معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور.
- [۵] راهنمای طراحی و اجرای بتن غلتکی در روسازی راههای کشور، نشریه ۳۵۴، (۱۳۸۸)، پژوهشکده حمل و نقل.
- [۶] دستورالعمل تثبیت لایه های خاکریز و روسازی راهها، نشریه ۲۶۸، (۱۳۸۲)، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور.
- [۷] دستورالعمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راهها، ضابطه ۷۳۱، (۱۳۹۶)، سازمان برنامه و بودجه کشور.
- [8] AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), (2008), Guide specifications for highway construction, Washington, DC.
- [9] AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), (1993), Guide for Design of Pavement Structures, Washington, DC.