

# تحلیل حساسیت پارامتریک و برهم‌کنش‌ها در روش طراحی روسازی صلب آشتو ۱۹۹۳ در رده‌بندی‌های عملکردی مختلف راه

مقاله علمی - پژوهشی

\*شاهین شعبانی (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

شیما طاهری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

جاوید بهلول زاده، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: shabani@pnu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۸ - پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۲

صفحه ۴۷۰-۴۵۵

چکیده

این پژوهش یک تحلیل حساسیت جامع از روش طراحی روسازی صلب آشتو ۱۹۹۳ را ارائه می‌دهد که طی آن ۸۸۳۲۴۵۴۱۵ ترکیب طراحی معتبر (۹۱/۹ درصد از فضای طراحی اولیه) در چهار طبقه‌بندی راه شامل آزادراه، شریانی، جمع‌کننده و محلی مورد بررسی قرار گرفته است. سه روش مکمل شامل تحلیل همبستگی فاکتوریل کامل، غربالگری اثرات ابتدایی موریس و تجزیه واریانس سوبول برای کمی‌سازی تأثیرات پارامترها و برهم‌کنش‌های آن‌ها به کار گرفته شدند. برای روسازی‌های آزادراهی، قابلیت اطمینان ( $Z_R$ ) و بار ترافیکی ( $W_{18}$ ) تعیین‌کننده ضخامت بودند و در مجموع ۸۱/۶ درصد از واریانس را از طریق اثرات مرتبه اول توجیه کردند، در حالی که سهم برهم‌کنش‌ها ناچیز (۰/۷ درصد) بود. ضریب انتقال بار ( $J$ ) قوی‌ترین همبستگی ( $r = ۰/۵۴۵$ ) را نشان داد و پس از آن بار ترافیکی ( $r = ۰/۴۷۷$ ) قرار داشت. با کاهش حجم ترافیک، یک گذار رفتاری بنیادین پدیدار شد، راه‌های شریانی ۰/۳ درصد اثرات برهم‌کنش نشان دادند؛ راه‌های جمع‌کننده، نقطه گذار با ۲۴/۳ درصد واریانس ناشی از برهم‌کنش بودند و راه‌های محلی ۷۲/۹ درصد از واریانس را ناشی از برهم‌کنش پارامترها به جای اثرات مستقیم نشان دادند. روش موریس این الگوها را از طریق کاهش سیستماتیک نسبت‌های  $\mu^*/\sigma$  تأیید کرد (از مقادیر بالای ۲/۰ برای آزادراه‌ها به زیر ۰/۴ برای راه‌های محلی). برای راه‌های محلی، شاخص سوبول کل بار ترافیکی ( $ST = ۰/۹۲$ ) بسیار فراتر از شاخص مرتبه اول آن ( $SI = ۰/۳۰۸$ ) بود که نشان می‌دهد ۷۱/۲ درصد از تأثیر ترافیک از طریق ترکیب پارامترها عمل می‌کند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که رویکردهای ساده تک‌پارامتری برای تسهیلات پر حجم معتبر باقی می‌مانند. در حالی که راه‌های کم‌حجم نیازمند روش‌هایی هستند که صراحتاً برهم‌کنش پارامترها را در نظر بگیرند. این مطالعه استفاده همگانی از روسازی بتنی برای راه‌های کم‌حجم را توصیه نمی‌کند، بلکه تحلیل حساسیت روش آشتو ۱۹۹۳ را در محدوده مجاز کاربرد آن بررسی می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: آشتو ۱۹۹۳، تحلیل حساسیت، روش موریس، شاخص‌های سوبول، طراحی روسازی بتنی

## ۱- مقدمه

بلندمدت، الزامات نگهداری و هزینه‌های چرخه عمر تأثیر می‌گذارند (Huang, 2004; Yoder and Witczak, 1975). انتخاب پارامترهای طراحی مناسب مستقیماً بر کفایت

روسازی‌های بتنی صلب اجزای مهمی از زیرساخت‌های حمل‌ونقل در سراسر جهان را تشکیل می‌دهند و روش‌شناسی‌های طراحی آن‌ها به طور قابل توجهی بر عملکرد

درک عمیق‌تر حساسیت روش آشتو ۱۹۹۳ به پارامترهای ورودی را برجسته می‌سازند.

اگرچه روش‌شناسی‌های طراحی مکانیستی-تجربی روسازی، که نمونه بارز آن راهنمای طراحی مکانیستی-تجربی روسازی است، از طریق در نظر گرفتن صریح مکانیک مصالح و عوامل محیطی مزایای نظری ارائه می‌دهند (ARA, 2004; NCHRP, 2004)، اما اجرای آن‌ها نیازمند داده‌های ورودی، زیرساخت محاسباتی و تخصص فنی به مراتب بیشتری است (Pierce and McGovern, 2014; Schwartz et al., 2013). کاروالیو و شوارتز (Carvalho and Schwartz, 2006)

در مقایسه طراحی روسازی انعطاف‌پذیر با روش تجربی آشتو و روش مکانیستی-تجربی NCHRP 1-37A نشان دادند که دو روش در برخی شرایط نتایج متفاوتی ارائه می‌دهند و انتخاب روش طراحی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر ضخامت نهایی داشته باشد. روش آشتو ۱۹۹۳ به پارامترهای ورودی کمتری نیاز دارد، بر روابط کالیبره تجربی که از طریق داده‌های عملکرد میدانی گسترده اعتبارسنجی شده‌اند تکیه دارد و می‌تواند با منابع محاسباتی محدود اجرا شود؛ ویژگی‌هایی که آن را به‌ویژه برای سازمان‌هایی با دسترسی محدود به داده‌ها مناسب می‌سازد (Tighe et al., 2008; Li et al., 2019). در نتیجه، روش آشتو ۱۹۹۳ همچنان به عنوان ابزار اصلی طراحی در حوزه‌های مدیریتی متعدد، از جمله مناطقی در سراسر خاورمیانه، جنوب آسیا، آمریکای جنوبی و ادارات بزرگراهی مختلف ایالتی در ایالات متحده که هنوز به طور کامل به اجرای MEPDG گذار نکرده‌اند، مورد استفاده قرار می‌گیرد (Kumar and Mathew, 2020; Rodriguez et al., 2018).

راهنمای آشتو ۱۹۹۳ صراحتاً توصیه‌های طراحی را برای راه‌های جمع‌کننده و محلی ارائه می‌دهد، از جمله سطوح قابلیت اطمینان پایین تا ۵۰ درصد و ضوابط ضخامت که از ۴ اینچ شروع می‌شوند (AASHTO, 1993; Packard, 1984). این گنجاندن رسمی کاربردهای کم‌حجم در راهنمای طراحی، انگیزه‌ای برای بررسی رفتار این روش در تمام طیف کاربردهای مورد نظر است. با این حال، محدودیت‌های روش آشتو ۱۹۹۳ به‌ویژه در کاربرد آن برای راه‌های کم‌حجم مشهود است. سوواجی و همکاران (Suwaji et al., 2023) در طراحی روسازی صلب یک جاده روستایی با حجم ترافیک پایین ( $ESAL = ۴۲۲۴$ ) با استفاده از روش آشتو ۱۹۹۳ نشان دادند

سازه‌ای، کارایی اقتصادی و پایداری سیستم‌های روسازی در طول عمر خدمت آن‌ها اثر می‌گذارد (NCHRP, 2004).

روش آشتو ۱۹۹۳ (AASHTO, 1993) که بر پایه روابط تجربی حاصل از آزمون جاده‌های شاخص آشتو (AASHTO Road Test) بین سال‌های ۱۹۵۸ تا ۱۹۶۰ توسعه یافته است، عوامل تأثیرگذار متعدد را در یک معادله تعیین ضخامت تکراری ادغام می‌کند که طی دهه‌ها کاربرد میدانی اعتبارسنجی شده است (Highway Research Board, 1962; Rahman et al., 2013). این روش همچنان یکی از پرکاربردترین رویکردهای تجربی برای طراحی روسازی صلب در سطح جهانی، به‌ویژه در مناطق در حال توسعه و کشورهایی با منابع محاسباتی محدود، به شمار می‌رود. تداوم رواج این روش ناشی از چندین مزیت عملی است: اجرای نسبتاً ساده، نیاز کمتر به داده‌های ورودی در مقایسه با جایگزین‌های مکانیستی-تجربی، اعتبارسنجی تاریخی گسترده و سادگی محاسباتی که امکان انجام محاسبات دستی را در صورت لزوم فراهم می‌کند (Darter et al., 1997; Hall et al., 1997).

مطالعات تطبیقی اخیر نشان داده‌اند که روش آشتو ۱۹۹۳ در مقایسه با روش‌های ملی کشورهای مختلف، نتایج متفاوتی ارائه می‌دهد و حساسیت قابل توجهی به نحوه تعیین پارامترهای ورودی دارد. برای نمونه، فیرگیانسیا و همکاران (Firgiansyah et al., 2022) در مقایسه روش آشتو ۱۹۹۳ با روش راهنمای طراحی روسازی بینامارگای ۲۰۱۷ اندونزی نشان دادند که تفاوت در نتایج عمدتاً ناشی از نحوه لحاظ کردن پارامترهای ورودی، به‌ویژه مقدار CBR بستر و بار ترافیکی طراحی است. ویجایانتی و همکاران (Wijajanti et al., 2023) نیز در مقایسه روش آشتو ۱۹۹۳ با روش MDP 2017 برای طراحی روسازی صلب جاده تول سینره-جاگوراوی، ضخامت ۳۰۲ میلی‌متر با روش آشتو و ۲۸۵ میلی‌متر با روش MDP به دست آوردند (تفاوت ۶/۵ درصدی) و نشان دادند که این اختلاف عمدتاً ناشی از تفاوت در نحوه محاسبه بار ترافیکی و لحاظ کردن مشخصات بستر است. همچنین، ضیار و همکاران (Ziar et al., 2024) در تحلیل هزینه-اثربخشی سه روش طراحی آشتو، AI و PCA بر روی یک راه شهری ۸ کیلومتری در افغانستان، تأثیر قابل توجه پارامترهای طراحی بر ضخامت نهایی و هزینه ساخت را تأیید کردند. این مطالعات ضرورت

کردند و انتقال بار و خواص مصالح را به عنوان عوامل مهم شناسایی کردند. همانطور که مطالعات تطبیقی پیش‌گفته (Firgiansyah et al., 2022; Ziar et al., 2024; Wijajanti et al., 2023) نیز نشان داده‌اند، انتخاب پارامترهای ورودی تأثیر قابل توجهی بر نتایج طراحی دارد. با این حال، هیچ‌یک از این مطالعات تحلیل حساسیت سیستماتیک و جامعی بر روی تمام پارامترهای ورودی معادله آشتو ۱۹۹۳ انجام نداده‌اند و سهم نسبی هر پارامتر و برهم‌کنش‌های آن‌ها کمی‌سازی نشده است. این شکاف به‌ویژه با توجه به تفاوت‌های مشاهده‌شده در رفتار معادله در سطوح مختلف ترافیک اهمیت می‌یابد.

این مطالعه با به‌کارگیری سه روش تحلیل حساسیت مکمل برای ارزیابی جامع تأثیرات پارامتر در کل دامنه کاربردهای آشتو ۱۹۹۳، به این شکاف‌ها می‌پردازد. تحلیل عاملی کامل، پوشش سیستماتیک فضای پارامتر و غربالگری مبتنی بر همبستگی را فراهم می‌کند؛ روش اثرات ابتدایی مورس، رفتارهای خطی پارامتر را از غیرخطی متمایز می‌سازد؛ و تجزیه واریانس سوبول به صورت کمی اثرات مرتبه اول را از سهم برهم‌کنش‌ها جدا می‌کند. مدل‌های جایگزین چندجمله‌ای یا شبکه عصبی مصنوعی معمولاً برای شبیه‌سازی‌های محاسباتی سنگین سودمند هستند (Forrester et al., 2008)؛ با این حال، از آنجا که معادله آشتو ۱۹۹۳ از نظر تحلیلی صریح و از نظر محاسباتی ارزان است، مدل‌سازی جایگزین به جای شفاف‌سازی، ساختار حساسیت ذاتی فرمول‌بندی اصلی را پنهان می‌کند. هدف، بررسی حساسیت داخلی و ساختار برهم‌کنش معادله طراحی در چهار دسته‌بندی عملکردی راه (آزادراه، شریانی، جمع‌کننده و محلی) است، نه اعتبارسنجی عملکرد میدانی که خود تلاش پژوهشی جداگانه‌ای نیازمند داده‌های تجربی است.

## ۲- روش شناسی

### ۲-۱- معادله طراحی آشتو ۱۹۹۳

روش آشتو ۱۹۹۳ برای طراحی روسازی صلب از یک معادله تجربی استفاده می‌کند که از تحلیل رگرسیون داده‌های عملکرد جمع‌آوری شده در طول آزمون جاده‌ای آشتو (AASHTO Road Test) توسعه یافته است (Highway Research Board, 1962; AASHTO, 1993). طراحی، ضخامت روسازی را به تقاضای ترافیک، الزامات قابلیت اطمینان، خواص مصالح و شرایط تکیه‌گاه مرتبط می‌کند.

که ضخامت محاسباتی دال بتنی تنها ۹ سانتی‌متر به دست آمد، در حالی که برای رعایت حداقل استاندارد، ضخامت ۲۰ سانتی‌متر اجرا شد. این تفاوت بیش از دو برابری بین ضخامت محاسباتی و اجرایی نشان می‌دهد که معادله آشتو ۱۹۹۳ در دامنه ترافیک بسیار پایین، ضخامت‌هایی تولید می‌کند که از نظر عملی و سازه‌ای قابل قبول نیستند و حداقل ضخامت‌های ساختاری بر محاسبات غلبه می‌کنند. این مشاهده ضرورت بررسی رفتار پارامتری معادله طراحی در طیف کامل حجم ترافیک را تأیید می‌کند. لازم به تأکید است که این مطالعه استفاده همگانی از روسازی بتنی برای راه‌های کم‌حجم را توصیه نمی‌کند؛ بلکه رفتار حساسیت داخلی روش طراحی آشتو ۱۹۹۳ را در محدوده کاربرد رسمی مجاز آن بررسی می‌کند. بر این اساس، یافته‌ها باید به عنوان بینش‌های روش‌شناختی در مورد رفتار معادله طراحی تفسیر شوند، نه به عنوان دستورالعمل تجویزی در مورد انتخاب نوع روسازی برای راه‌های کم‌حجم. تحلیل حساسیت با کمی‌سازی چگونگی تأثیر تغییرات پارامتر ورودی بر پاسخ‌های خروجی، بینش‌های اساسی در مورد رفتار مدل فراهم می‌کند (Saltelli et al., 2008). در زمینه مهندسی روسازی، تحلیل حساسیت اهداف متعددی را دنبال می‌کند که شامل شناسایی پارامترهای حیاتی که نیازمند تعیین مشخصات دقیق هستند، درک استحکام طراحی، بهینه‌سازی تخصیص منابع برای بررسی‌های میدانی و آشکارسازی محدودیت‌های بالقوه مدل هست (Guo and Prozzi, 2008; Kim et al., 2015). مطالعات حساسیت پیشین در روش‌های طراحی روسازی از رویکردهای مختلفی با درجات گوناگون جامعیت استفاده کرده‌اند. سیلان و همکاران (Ceylan et al., 2013) تحلیل حساسیت یک‌به‌یک (OAT) را بر پیش‌بینی‌های روسازی صلب MEPDG اعمال کردند و بار ترافیکی و خواص بتن را به عنوان تعیین‌کنندگان اصلی ضخامت شناسایی کردند. کانکانتی و هاروی (Kannekanti and Harvey, 2006) رویه‌های طراحی تجربی کالیفرنیا را بررسی کردند و دریافته‌اند که تکیه‌گاه بستر و قابلیت اطمینان به طور قابل توجهی بر نتایج طراحی تأثیر می‌گذارند. شوارتز و همکاران (Schwartz et al., 2013) مطالعات حساسیت جامعی را بر روی مدل‌های روسازی انعطاف‌پذیر MEPDG انجام دادند و برهم‌کنش‌های قابل توجه پارامترها را تحت شرایط خاص نشان دادند. به طور خاص برای روش روسازی صلب آشتو ۱۹۹۳، اولتین و ماتی (Oltean and Matei, 2021) حساسیت را در شرایط رومانی بررسی

جدول ۱. دامنه‌های پارامتر برای تحلیل حساسیت

پارامتر	نماد	حداقل	حداکثر	واحد
بار ترافیکی	W18	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰۰	ESALs
قابلیت اطمینان	R	۵۰	۹۹/۹	درصد
خطای استاندارد	S0	۰/۳۰	۰/۵۰	—
افت خدمت‌دهی	ΔPSI	۱/۵	۳	—
مدول بستر	k	۵۰	۵۰۰	pci
مدول گسیختگی	Sc	۴۰۰	۸۰۰	psi
ضریب زهکشی	Cd	۰/۷	۱/۳	—
ضریب انتقال بار	J	۲/۵	۴/۵	—
خدمت‌دهی نهایی	pt	۱/۵	۳	—
مدول الاستیسیته	Ec	۲۰۰۰۰۰۰	۶۰۰۰۰۰۰	psi

## ۲-۲- دامنه‌های پارامتر و استراتژی نمونه‌برداری

دامنه‌های پارامتر بر اساس دستورالعمل‌های آشتو ۱۹۹۳، راهنمایی‌های طراحی تکمیلی و مستندات معمول اجرایی تعیین شدند (AASHTO, 1993; Huang, 2004; FHWA, 2019). جدول ۱ دامنه‌های پارامتر به کار رفته در این تحلیل را ارائه می‌دهد.

این تحلیل چهار دسته جاده با الزامات ترافیک و قابلیت اطمینان متمایز را در نظر گرفت که منعکس‌کننده توصیه‌های آشتو ۱۹۹۳ و رویه معمول طراحی است (جدول ۲). از بیش از ۹۶۰ میلیون ترکیب پارامتر اولیه، تعداد ۸۸۳،۲۴۵،۴۱۵ ترکیب (۹۱،۹٪ از کل) که منجر به ضخامت محاسبه شده بیشتر از ۴ اینچ می‌شدند، برای تحلیل دقیق انتخاب شدند. این آستانه حداقل ضخامت منعکس‌کننده ملاحظات اجرایی عملی و حداقل توصیه‌های آشتو برای روسازی‌های بتنی ساده در زردار (JPCP) است (AASHTO, 1993; Smith et al., 2014).

با توجه به شدت محاسباتی تحلیل فضای کامل پارامتر، رویکرد نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌ای در SQLite با هسته‌های ثابت برای تکرارپذیری اجرا شد.

$$\begin{aligned} & \log_{10}(W_{18}) \\ &= Z_R \times S_0 + 7.35 \log_{10}(D + 1) - 0.06 \\ &+ \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32p_t) \\ &\times \log_{10}\left[\frac{S_c \cdot C_d \cdot D^{0.75} - 1.132}{215.63 \cdot J \cdot \left(D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k}\right)^{0.25}}\right)}\right] \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن W<sub>18</sub> نشان‌دهنده بارهای هم‌ارز محور تک (ESALs) به عنوان ترافیک طراحی جمع‌ی است؛ Z<sub>R</sub> انحراف نرمال استاندارد متناظر با سطح قابلیت اطمینان انتخاب شده است؛ S<sub>0</sub> نشان‌دهنده خطای استاندارد ترکیبی پیش‌بینی‌های ترافیک و عملکرد است؛ D ضخامت مورد نیاز روسازی به اینچ (خروجی طراحی) است؛ ΔPSI نشان‌دهنده افت خدمت‌دهی طراحی است؛ P<sub>t</sub> شاخص خدمت‌دهی نهایی است؛ S<sub>c</sub> مدول گسیختگی بتن به psi است که نشان‌دهنده پارامتر کلیدی مقاومت مصالح می‌باشد؛ C<sub>d</sub> ضریب زهکشی است که کیفیت شرایط زهکشی و زمانی را نشان می‌دهد که سازه روسازی در معرض سطوح رطوبت نزدیک به اشباع قرار دارد یک پارامتر مرتبط با دوام به جای خاصیت مقاومت مصالح (AASHTO, 1993; Rodden et al., 2021)؛ J ضریب انتقال بار است که توانایی درزهای روسازی برای انتقال بارهای چرخ به دال‌های مجاور را کمی‌سازی می‌کند، به طوری که مقادیر کمتر نشان‌دهنده انتقال بار مؤثرتر از طریق دال‌ها (میلگردهای انتقال بار)، قفل و بست سنگدانه‌ای یا شانه‌های مهار شده است (Huang, 2004; Ioannides and Korovesis, 1990)؛ E<sub>c</sub> نشان‌دهنده مدول الاستیسیته (ارتجاعی) بتن به psi به عنوان پارامتر اصلی سختی مصالح است؛ و k نشان‌دهنده مدول واکنش بستر به pci است که شرایط بستر را مشخص می‌کند. ماهیت غیرخطی این معادله که شامل تبدیلات لگاریتمی، توان‌های کسری و جملات ضربی است پتانسیلی برای برهم‌کنش‌های (تعاملات) قابل توجه پارامتر ایجاد می‌کند که نمی‌توان آن‌ها را تنها از طریق تحلیل همبستگی ساده شناسایی کرد (Saltelli et al., 2008; Haider and Dwaikat, 2011).

جدول ۲. معیارهای فیلتر کردن دسته‌بندی جاده

دسته	دامنه W18 (ESALs)	قابلیت اطمینان (درصد)	ترکیبات معتبر	اندازه نمونه
آزادراه	-۱۰۰۰۰۰۰۰ ۱۰۰۰۰۰۰۰	۹۹/۹-۸۰	۶۰۴۵۰۹۱۱۱	۴۴۱۶۲۲۷
شیرانی	-۳۰۰۰۰۰۰۰ ۱۰۰۰۰۰۰۰	۹۹-۷۵	۹۲۶۸۸۱۵۷	۴۴۱۶۲۲۷
جمع‌کننده	-۱۰۰۰۰۰۰ ۳۰۰۰۰۰۰	۹۵-۷۵	۲۷۵۱۹۰۴۰	۴۴۱۶۲۲۷
محلی	-۱۰۰۰۰۰ ۱۰۰۰۰۰۰	۸۰-۵۰	۴۳۶۶۶۵۲	۴۳۶۶۶۵۲

### ۲-۳- روش‌های تحلیل حساسیت

سه روش تحلیل حساسیت مکمل برای ارائه توصیف جامع تأثیرات پارامتر به کار گرفته شدند. هر روش مزایای متمایزی ارائه می‌دهد: تحلیل فاکتوریل کامل پوشش سیستماتیک را فراهم می‌کند و الگوهای همبستگی را شناسایی می‌نماید؛ روش مورس به طور کارآمد پارامترها را غربالگری می‌کند در حالی که رفتارهای غیرخطی را آشکار می‌سازد؛ و تجزیه واریانس سوبول به صورت کمی اثرات مستقیم را از سهم برهم‌کنش‌ها جدا می‌کند (Saltelli et al., 2008; Iooss and Lemaître, 2015).

پایگاه داده فاکتوریل کامل، ارزیابی سیستماتیک روابط پارامتر-ضخامت را از طریق ضرایب همبستگی پیرسون که روابط خطی بین پارامترهای منفرد و ضخامت محاسبه شده را کمی‌سازی می‌کند، امکان‌پذیر ساخت. با توجه به حجم نمونه‌های بسیار زیاد به کار رفته در این مطالعه (بیش از ۴ میلیون نمونه برای هر دسته جاده)، تمام همبستگی‌های گزارش شده از نظر آماری به سطح معناداری در سطوح معمول ( $p < 0.001$ ) دست می‌یابند؛ در نتیجه، مطابق با توصیه‌های تحلیل نمونه‌های بزرگ، تأکید بر تفسیر اندازه اثر به جای مقادیر (p-values) قرار می‌گیرد (Sullivan and Feinn, 2012).

روش مورس (Morris, 1991; Campolongo et al., 2007) از یک طرح یک‌به‌یک برای محاسبه کارآمد اثرات ابتدایی در فضای پارامتر استفاده می‌کند. برای هر پارامتر  $i$ ، اثرات ابتدایی به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$EE_i = \frac{[f(x_1, \dots, x_i + \Delta, \dots, x_p) - f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_p)]}{\Delta} \quad (2)$$

معیارهای کلیدی شامل  $\mu^*$  (میانگین قدر مطلق EE) که نشان‌دهنده بزرگی متوسط حساسیت و اهمیت کلی پارامتر است؛  $\sigma$  (انحراف معیار EE) به عنوان نشانگر اثرات برهم‌کنش و یا رفتار غیرخطی؛ و نسبت  $\frac{\mu^*}{\sigma}$  به عنوان معیار خطی بودن است که در آن مقادیر بزرگتر از ۱ نشان‌دهنده اثرات عمدتاً خطی است در حالی که مقادیر کمتر از ۱ نشان‌دهنده رفتار غیرخطی یا تحت اثر برهم‌کنش می‌باشد. مطالعه برای پیاده‌سازی این روش از ۲۰۰ مسیر و ۱۰ سطح شبکه استفاده کرد که منجر به ۲۰۰۰ ارزیابی برای هر دسته جاده شد.

روش سوبول (Sobol, 2001; Saltelli et al., 2010) تحلیل حساسیت مبتنی بر واریانس جامع را با تجزیه واریانس کل خروجی به سهم پارامترهای منفرد و برهم‌کنش‌های آن‌ها فراهم می‌کند.

$$V(Y) = \sum_i V_i + \sum_{i < j} V_{ij} + \dots + V_{12\dots n} \quad (3)$$

شاخص مرتبه اول  $S1_i = \frac{V_i}{V(Y)}$  نشان‌دهنده سهم مستقیم پارامتر  $i$  مستقل از سایر پارامترها است؛ شاخص مرتبه کل  $ST_i$  نشان‌دهنده سهم کل شامل تمام برهم‌کنش‌های درگیر کننده پارامتر  $i$  است. تفاوت  $(ST_i - S1_i)$  سهم برهم‌کنش‌ها را کمی‌سازی می‌کند. شاخص‌های سوبول با استفاده از طرح نمونه‌برداری سالتلی (Saltelli, 2002) با نمونه‌های پایه  $N = ۱۶۳۸۴$  محاسبه شدند که منجر به ۳۲۷۶۸۰ ارزیابی برای هر دسته شد. در این مطالعه اثرات برهم‌کنش با استفاده از شاخص‌های مرتبه کل سوبول کمی‌سازی شدند نه معیارهای هم‌خطی چندگانه مبتنی بر رگرسیون نظیر عامل تورم واریانس (VIF). در این روشها تجزیه واریانس اندازه‌گیری مستقیم سهم برهم‌کنش فارغ از فرضیات خطی بودن فراهم می‌شود پس شاخص‌های سوبول برای ارزیابی برهم‌کنش غیرخطی بر VIF ارجحیت دارند (Saltelli et al., 2008).

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- تحلیل همبستگی فاکتوریل کامل

تحلیل همبستگی الگوهای حساسیت متمایزی را در دسته‌های مختلف جاده آشکار کرد، به طوری که سلسله‌مراتب اهمیت پارامتر بر اساس طبقه‌بندی حجم ترافیک به طور قابل توجهی تغییر می‌کند. جدول ۳ ضرایب همبستگی پیرسون بین پارامترهای طراحی و ضخامت محاسبه شده روسازی را خلاصه

می‌کند. شکل ۱ نمودار حرارتی این ضرایب همبستگی را برای مقایسهٔ بصری الگوهای حساسیت در دسته‌های مختلف راه نشان می‌دهد.

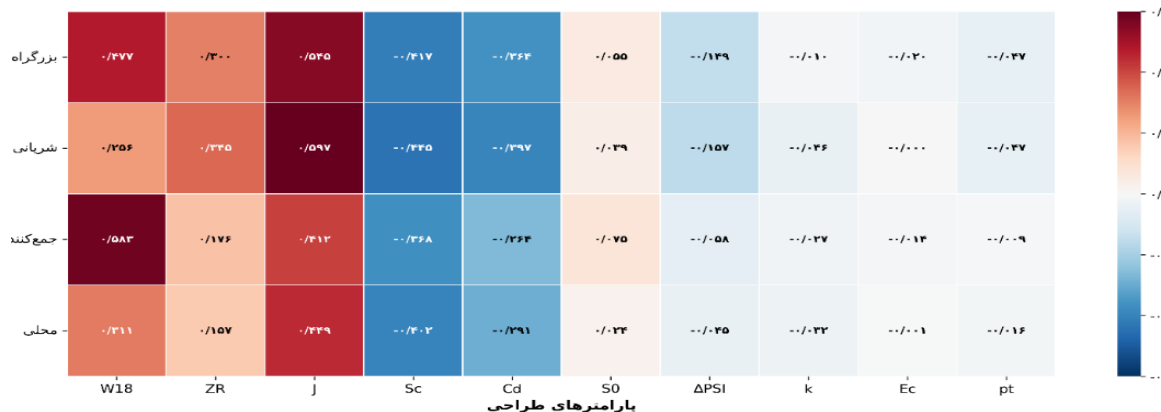
جدول ۳. ضرایب همبستگی پیرسون بین پارامترهای طراحی و ضخامت روسازی

پارامتر	آزادراه	شریانی	جمع‌کننده	محلی
W18	۰/۴۷۷	۰/۲۵۶	۰/۵۸۳	۰/۳۱۱
ZR	۰/۳۰۰	۰/۳۴۵	۰/۱۷۶	۰/۱۵۷
J	۰/۵۴۵	۰/۵۹۷	۰/۴۱۲	۰/۴۴۹
Sc	-۰/۴۱۷	-۰/۴۴۵	-۰/۳۶۸	-۰/۴۰۲
Cd	-۰/۳۶۴	-۰/۳۹۷	-۰/۲۶۴	-۰/۲۹۱
S0	۰/۰۵۵	۰/۰۳۹	۰/۰۷۵	۰/۰۲۴
ΔPSI	۰/۱۴۹	۰/۱۵۷	۰/۰۵۸	۰/۰۴۵
k	-۰/۰۱۰	-۰/۰۴۶	-۰/۰۲۷	-۰/۰۳۲
Ec	-۰/۰۲۰	۰/۰۰۰	-۰/۰۱۴	-۰/۰۰۱
pt	-۰/۰۴۷	-۰/۰۴۷	-۰/۰۰۹	-۰/۰۱۶

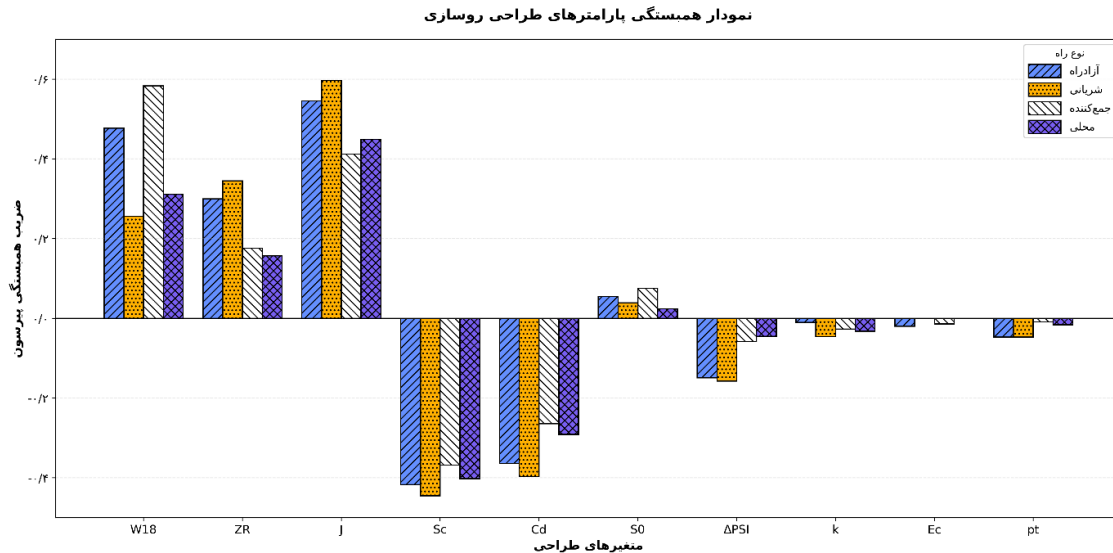
رابطه مثبت ضریب انتقال بار-ضخامت منعکس‌کننده این است که مقادیر بالاتر J نشان‌دهنده کارایی انتقال بار ضعیف‌تر است که نیازمند ضخامت بیشتر روسازی برای جبران تنش‌های افزایش‌یافته بارگذاری لبه می‌باشد. بارگذاری ترافیکی (W18) همبستگی مثبت قوی ( $r = 0.477$ ) را نشان داد، همان‌طور که از رابطه بنیادی ترافیک-ضخامت در طراحی تجربی انتظار می‌رفت (Huang, 2004). پارامترهای مقاومت مصالح و زهکشی همبستگی‌های منفی قابل توجهی را نشان دادند: مدول گسیختگی ( $S_c: r = -0.417$ ) و ضریب زهکشی ( $C_d: r = -0.364$ )، این یافته تأیید می‌کند مصالح قوی‌تر و شرایط زهکشی بهتر امکان طراحی‌های نازک‌تر را فراهم می‌کنند. راه‌های شریانی سلسله‌مراتب مشابهی را با تغییرات قابل توجه در بزرگی نشان دادند. پارامتر J قوی‌ترین همبستگی را حفظ کرد ( $r = 0.597$ )، در حالی که تأثیر W18 به طور قابل توجهی کاهش یافت ( $r = 0.256$ ). این کاهش در همبستگی ترافیک منعکس‌کننده دامنه قابلیت اطمینان محدودتر (۷۵-۹۹ درصد) است که سهم واریانس ناشی از جملات مرتبط با ترافیک در معادله طراحی را محدود می‌کند. راه‌های جمع‌کننده نشان دادند که W18 مجدداً شدت تأثیر خود را به دست می‌آورد ( $r = 0.583$ ) که به دلیل دامنه ترافیکی وسیع‌تر است که ۱,۵ مرتبه بزرگی را در فضای لگاریتمی پوشش می‌دهد و سهم واریانس بیشتری ایجاد می‌کند. راه‌های محلی متعادل‌ترین تأثیرات پارامتر را نشان دادند، به طوری که J ( $r = 0.449$ ) و Sc ( $r = -0.402$ ) به مقادیر مشابهی نزدیک شدند که نشان می‌دهد هیچ پارامتر واحدی بر طراحی راه محلی غالب نیست. شکل ۲ مقایسهٔ ضرایب همبستگی پیرسون را برای پارامترهای کلیدی در چهار دسته‌بندی راه به تصویر می‌کشد.

روسازی‌های آزادراهی سلسله‌مراتب پارامتری واضحی را تحت تأثیر عوامل سازه‌ای و ترافیکی نشان دادند. ضریب انتقال بار (J) قوی‌ترین همبستگی مثبت ( $r = 0.545$ ) را نشان داد، که حاکی از آن است که شرایط انتقال بار ضعیف‌تر (مقادیر J بالاتر) نیازمند روسازی‌های به مراتب ضخیم‌تر هستند، یافته‌ای که با انتظارات مکانیستی و تحقیقات پیشین که نشان می‌دهند انتقال بار ناکارآمد تنش‌های لبه را افزایش داده و خرابی خستگی را تسریع می‌کند، سازگار است (Hall et al., 1997; Ioannides and Korovesis, 1990).

نمودار حرارتی همبستگی پارامترها



شکل ۱. نمودار حرارتی همبستگی پارامترها برای همه دسته‌های راه

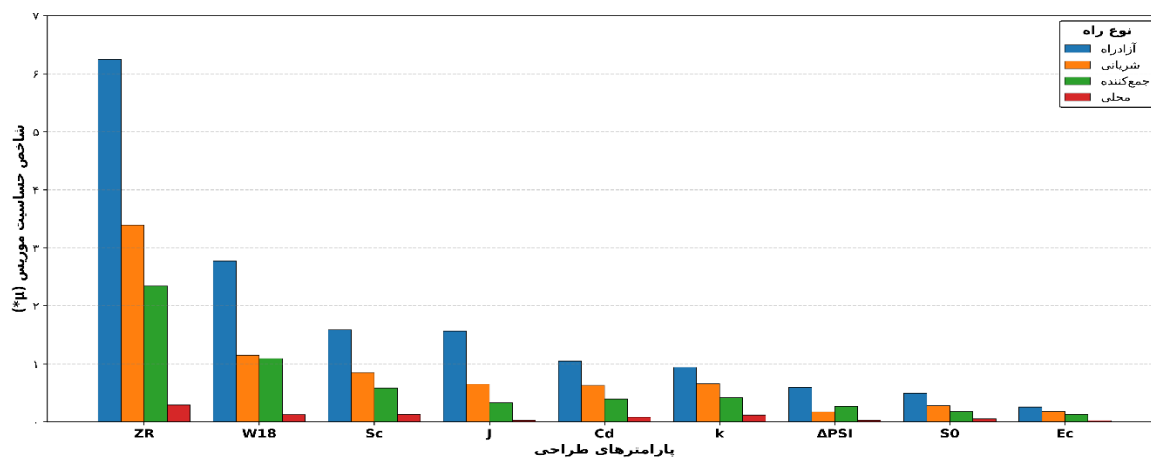


شکل ۲. مقایسه ضرایب همبستگی پیرسون در انواع راه

### یافته‌های روش مورس

کمتری نشان دادند اما رتبه‌بندی‌های مشابهی را حفظ کردند. پارامتر ZR غالب باقی ماند ( $\mu = 3/39 = 2/6$  درصد)، با W18 با سهم ۱۴/۴ درصد. با این حال، نسبت‌های  $\mu^*/\sigma$  به دامنه ۰/۹۸ تا ۱/۵۶ کاهش یافتند که نشان‌دهنده ظهور اثرات غیرخطی است و هشدار اولیه‌ای از گذار رفتاری را فراهم می‌کند. راه‌های جمع‌کننده آغاز غیرخطی بودن قابل توجه را نشان دادند، به طوری که تمام نسبت‌های  $\mu^*/\sigma$  به زیر ۱،۰ افت کردند (دامنه ۰/۴۲ تا ۰/۸۷). راه‌های محلی یک تغییر پارادایم بنیادی را نشان دادند، بزرگی حساسیت‌ها به شدت کاهش یافت، تمام نسبت‌های  $\mu^*/\sigma$  به زیر ۰،۴ رسیدند و رتبه‌بندی پارامترها به طور اساسی تغییر کرد، به طوری که پارامترهای مصالح (Sc, k) بالاتر از بار ترافیکی (W18) و انتقال بار (J) قرار گرفتند. شکل ۳ مقایسه شاخص‌های حساسیت مورس ( $\mu^*$ ) را برای تمام پارامترها در انواع راه نمایش می‌دهد.

تحلیل مورس معیارهای حساسیت نرمال‌سازی شده ( $\mu$ ) را فراهم کرد که امکان مقایسه مستقیم بین پارامترها و دسته‌های مختلف جاده را میسر می‌سازد، در حالی که نسبت‌های  $\mu^*/\sigma$  گذار از رفتارهای خطی به غیرخطی پارامتر را آشکار کردند. جدول ۴ نتایج کامل مورس شامل شاخص‌های خطی بودن را ارائه می‌دهد. برای روسازی‌های آزادراهی، پارامتر ZR با مقدار  $\mu^* = 6/24 = 40/3$  درصد از کل اثرات ابتدایی غالب بود و پس از آن W18 با مقدار  $\mu^* = 2/77 = 17/9$  درصد قرار داشت. سلسله‌مراتب پارامترها به صورت زیر بود:  $Sc < W18 < ZR$ . نکته مهم اینکه تمام پارامترها نسبت‌های  $\mu^*/\sigma$  فراتر از ۱/۸۵ را نشان دادند که حاکی از رفتار عمدتاً خطی با حداقل اثرات برهم‌کنش است، که کاربرد رویه‌های طراحی ساده‌شده برای تسهیلات پرحجم را تأیید می‌کند. راه‌های شریانی، بزرگی شاخص‌های حساسیت



شکل ۳. مقایسه شاخص‌های حساسیت مورس ( $\mu^*$ ) در انواع راه

جدول ۴. نتایج تحلیل حساسیت مورس

پارامتر	آزادراه $\mu^*/\sigma$	شیرانی $\mu^*$	شیرانی $\mu^*/\sigma$	جمع کننده $\mu^*$	جمع کننده $\mu^*/\sigma$	محل $\mu^*$	محل $\mu^*/\sigma$
ZR	۶/۲۴۴	۳/۳۹۳	۱/۵۶	۲/۳۴۱	۰/۸۷	۰/۲۹۱	۰/۳۲
W18	۲/۷۷۰	۱/۱۴۶	۱/۴۲	۱/۰۹۲	۰/۷۶	۰/۱۲۴	۰/۲۸
Sc	۱/۵۸۵	۰/۸۵۰	۱/۳۸	۰/۵۷۹	۰/۸۱	۰/۱۳۰	۰/۳۵
J	۱/۵۶۷	۰/۶۵۰	۱/۲۵	۰/۳۳۱	۰/۶۲	۰/۰۲۹	۰/۱۸
Cd	۱/۰۴۶	۰/۶۲۸	۱/۳۱	۰/۳۹۶	۰/۷۴	۰/۰۸۳	۰/۳۱
k	۰/۹۴۱	۰/۶۵۶	۱/۱۹	۰/۴۱۹	۰/۶۸	۰/۱۱۹	۰/۳۸
$\Delta PSI$	۰/۵۹۳	۰/۱۷۴	۰/۹۸	۰/۲۶۷	۰/۵۵	۰/۰۲۵	۰/۲۲
S0	۰/۴۹۲	۰/۲۸۲	۱/۱۲	۰/۱۸۲	۰/۴۸	۰/۰۵۰	۰/۲۶
Ec	۰/۲۵۷	۰/۱۸۱	۱/۰۸	۰/۱۲۶	۰/۴۲	۰/۰۲۲	۰/۱۹

یادداشت:  $\mu^*/\sigma > 1/0$  نشان دهنده اثرات عمدتاً خطی؛  $\mu^*/\sigma < 1/0$  نشان دهنده غیرخطی بودن قابل توجه ویا اثرات برهم کنش است.

### تجزیه واریانس سوپول

تحلیل سوپول کمی سازی قطعی اثرات مرتبه اول در مقابل برهم کنش های پارامتر را فراهم کرد. جدول ۵ شاخص های کامل سوپول را ارائه می دهد.

برای روسازی های آزادراهی، اثرات مرتبه اول بر تجزیه واریانس مسلط بودند. ZR مقدار  $S1 = 0/450$  و  $ST = 0/455$  را نشان داد که حاکی از اثرات برهم کنش حداقل است ( $ST = 0/005$ ). پارامتر W18 مقادیر  $S1 = 0/366$  و  $ST = 0/370$  را نشان داد. در مجموع، این پارامترها ۸۱/۶ درصد از واریانس خروجی را از طریق اثرات مستقیم توضیح دادند.

تفاوت ناچیز بین مقادیر S1 و ST تأییدکننده اثرات برهم کنش ناچیز در این نوع راه است، به طوری که مجموع سهم های مرتبه اول به ۹۹،۳٪ می رسد.

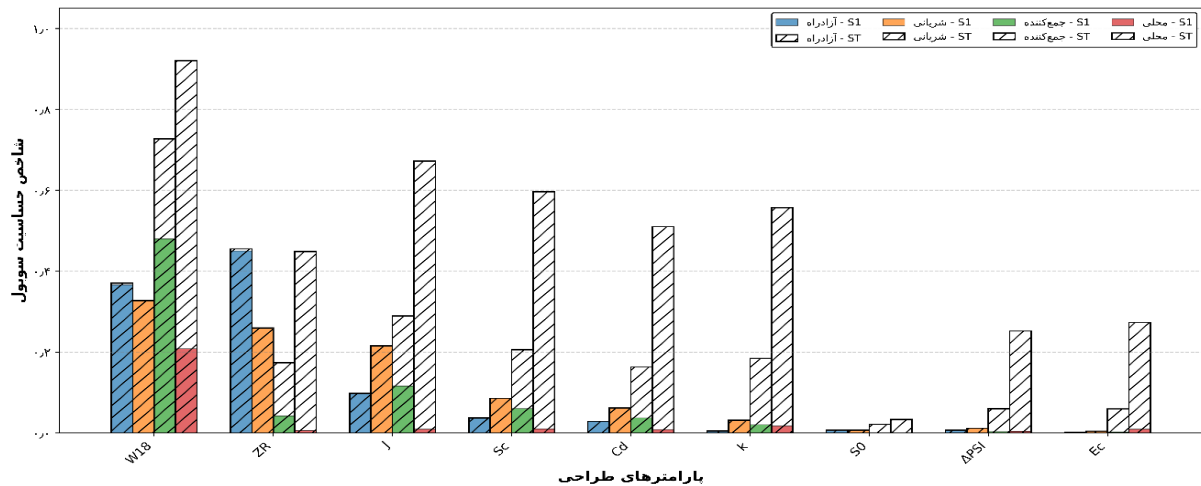
راه های شیرانی رفتار افزایشی مشابهی را نشان دادند، به طوری که اثرات مرتبه اول ۹۹،۷٪ از واریانس را شامل می شدند. W18 (با  $S1 = 0/326$  و  $ST = 0/327$ ) و ZR (با  $S1 = 0/258$  و  $ST = 0/260$ ) غالب باقی ماندند. در حالی که J اهمیت بیشتری یافت ( $S1 = 0/214$  و  $ST = 0/215$ ).

راه های جمع کننده نقطه گذار بحرانی به رفتار تحت سلطه برهم کنش را نشان دادند. W18 بالاترین شاخص مرتبه اول را حفظ کرد ( $S1 = 0/480$ )، اما شاخص مرتبه کل آن ( $ST = 0/727$ ) به طور قابل توجهی از این مقدار فراتر رفت، یعنی ۲۴/۷ درصد از تأثیر W18 از طریق برهم کنش ها عمل می کند. الگوهای مشابهی نیز پدیدار شدند، J (با  $S1 = 0/116$  و  $ST = 0/289$ ؛ ۵۹/۹ درصد برهم کنش)؛ Sc (با  $S1 = 0/060$  و  $ST = 0/206$ ؛ ۷۰/۹ درصد برهم کنش)؛ k (با  $S1 = 0/020$  و  $ST = 0/184$ ؛ ۸۹/۱ درصد برهم کنش). مجموع مرتبه اول به ۷۵/۷ درصد کاهش یافت که تأیید می کند تقریباً یک چهارم واریانس ناشی از ترکیبات پارامتر است. شکل ۴ مقایسه شاخص های سوپول مرتبه اول (S1) و مرتبه کل (ST) را برای تمام پارامترها در انواع راه نشان می دهد و تفاوت فزاینده این دو شاخص با کاهش حجم ترافیک را به وضوح آشکار می سازد.

جدول ۵. شاخص‌های حساسیت سوپول در دسته‌های مختلف جاده

پارامتر	آزادراه S1	آزادراه ST	شیرینای S1	شیرینای ST	جمع‌کننده S1	جمع‌کننده ST	محلی S1	محلی ST
W18	۰/۳۶۶	۰/۳۷۰	۰/۳۲۹	۰/۳۲۷	۰/۴۸۰	۰/۷۲۷	۰/۲۰۸	۰/۹۲۰
ZR	۰/۴۵۰	۰/۴۵۵	۰/۲۵۸	۰/۲۶۰	۰/۰۴۲	۰/۱۷۳	۰/۰۰۶	۰/۴۴۸
J	۰/۰۹۶	۰/۰۹۸	۰/۲۱۴	۰/۲۱۵	۰/۱۱۶	۰/۲۸۹	۰/۰۰۹	۰/۶۷۲
Sc	۰/۰۳۶	۰/۰۳۷	۰/۰۸۵	۰/۰۸۵	۰/۰۶۰	۰/۲۰۶	۰/۰۱۰	۰/۵۹۶
Cd	۰/۰۲۸	۰/۰۲۸	۰/۰۶۲	۰/۰۶۲	۰/۰۳۷	۰/۱۶۳	۰/۰۰۸	۰/۵۱۰
k	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰/۰۳۱	۰/۰۳۱	۰/۰۲۰	۰/۱۸۴	۰/۰۱۷	۰/۵۵۷
S0	۰/۰۰۵	۰/۰۰۷	۰/۰۰۶	۰/۰۰۷	۰/۰۰۱	۰/۰۲۱	۰/۰۰۰	۰/۰۳۳
$\Delta$ PSI	۰/۰۰۶	۰/۰۰۷	۰/۰۱۱	۰/۰۱۱	۰/۰۰۳	۰/۰۶۰	۰/۰۰۴	۰/۲۵۲
Ec	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲	۰/۰۵۹	۰/۰۰۹	۰/۲۷۳
مجموع S1	۰/۹۹۳		۰/۹۹۷		۰/۷۵۷		۰/۲۷۱	
برهم‌کنش‌ها	۰/۷ درصد		۰/۳ درصد		۲۴/۳ درصد		۷۲/۹ درصد	

تحلیل حساسیت سوپول (S1 در مقابل ST) برای انواع راه



شکل ۴. مقایسه شاخص‌های سوپول S1 در مقابل ST در انواع راه

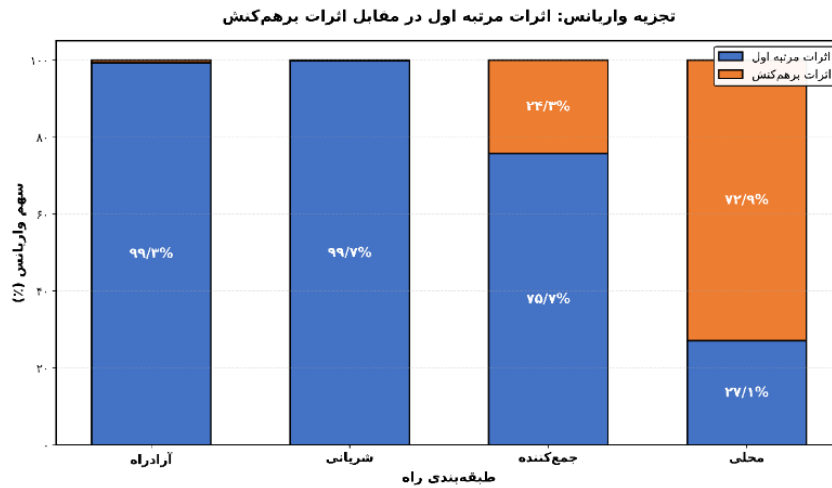
k ( $S1 = ۰/۰۱۷$  و  $ST = ۰/۵۵۷$  با  $۹۶/۹$  درصد برهم‌کنش).  
مجموع مرتبه اول تنها  $۲۷/۱$  درصد بود که نشان می‌دهد  $۷۲/۹$  درصد واریانس ناشی از برهم‌کنش‌ها است. شکل ۵ روند افزایش درصد واریانس ناشی از برهم‌کنش‌های پارامتر را با کاهش سطح ترافیک از آزادراه به راه محلی به تصویر می‌کشد.

راه‌های محلی تأثیر شدید برهم‌کنش را نشان دادند. W18 مقدار  $S1 = ۰/۲۰۸$  ولی  $ST = ۰/۹۲۰$  را نشان داد، یعنی  $۷۱/۲$  درصد از تأثیر ترافیک از طریق برهم‌کنش‌ها عمل می‌کند. به طور مشابه J ( $S1 = ۰/۰۰۹$  و  $ST = ۰/۶۷۲$  با  $۹۸/۷$  درصد برهم‌کنش)؛ Sc ( $S1 = ۰/۰۱۰$  و  $ST = ۰/۵۹۶$  با  $۹۸/۳$  درصد برهم‌کنش)؛ ZR ( $S1 = ۰/۰۰۶$  و  $ST = ۰/۴۴۸$  با  $۹۸/۷$  درصد برهم‌کنش)؛

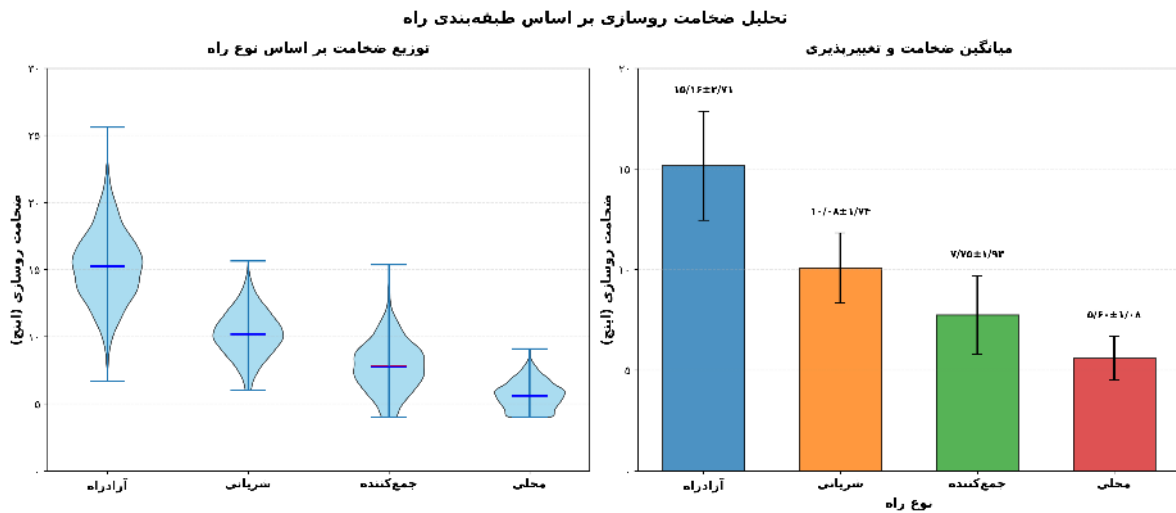
### تحلیل توزیع ضخامت

ضخامت میانگین ۵/۶۰ اینچ ( $\sigma = ۱/۰۸$ )،  $CV = ۱۹/۳$  درصد را نشان دادند. راه‌های جمع‌کننده بالاترین تغییرپذیری نسبی را نشان دادند که متناظر با منطقه گذار است، جایی که اثرات برهم‌کنش ظهور می‌کنند اما اثرات مرتبه اول همچنان قابل توجه باقی می‌مانند. این ترکیب عدم قطعیت حداکثری در ضخامت را ایجاد می‌کند. شکل ۶ توزیع‌های ضخامت محاسبه‌شده را برای تمام دسته‌های راه نمایش می‌دهد

تحلیل توزیع‌های ضخامت محاسبه شده الگوهای متمایزی را آشکار کرد. آزادراه‌ها میانگین ضخامت ۱۵/۱۶ اینچ ( $\sigma = ۲/۷۱$ )،  $CV = ۱۷/۹$  درصد، شریانی‌ها ضخامت میانگین ۱۰/۰۸ اینچ ( $\sigma = ۱/۷۴$ )،  $CV = ۱۷/۳$  درصد، جمع‌کننده‌ها ضخامت میانگین ۷/۷۵ اینچ ( $\sigma = ۱/۹۴$ )،  $CV = ۲۵$  درصد و راه‌های محلی



شکل ۵. درصد واریانس ناشی از برهم‌کنش‌های پارامتر در انواع راه



شکل ۶. توزیع‌های ضخامت برای تمام دسته‌های راه

### ۴-بحث و تفسیر

بر تعیین ضخامت غالب بودند. این روش‌ها بیش مکملی را فراهم کردند، تحلیل همبستگی جهت و بزرگی روابط را شناسایی کرد؛ تحلیل مورس گذار از خطی به غیرخطی را از طریق نسبت‌های  $\mu^*/\sigma$  آشکار ساخت و تحلیل سوبول سهم

ادغام سه روش تحلیل حساسیت، تصویر منسجمی از رفتار معادله طراحی آشتو ۱۹۹۳ با پیامدهای قابل توجه برای مهندسی عملی را آشکار می‌سازد. هر سه روش سلسله‌مراتب پارامتری سازگاری را برای تسهیلات پرحجم شناسایی کردند، به طوری که ترافیک (W18)، قابلیت اطمینان (ZR) و انتقال بار (J)

راستی‌آزمایی طراحی ارتقا یافته با در نظر گرفتن ترکیب پارامترها توصیه می‌شود. برای راه‌های محلی با ۷۳ درصد برهم‌کنش، رویکردهای جامع که صراحتاً برهم‌کنش پارامترها را مدل‌سازی می‌کنند برای طراحی قابل اطمینان ضروری هستند.

در مورد اولویت‌های تعیین مشخصات پارامتر، تسهیلات پر حجم بیشترین بهره را از پیش‌بینی‌های دقیق ترافیک و مشخصات قابلیت اطمینان می‌برند و این پارامترها بیشترین تفکیک طراحی را فراهم می‌کنند. راه‌های کم‌حجم نیازمند توجه بیشتر به خواص مصالح (Sc, Ec) و مشخصات بستر (k) هستند، زیرا این موارد به طور گسترده در اثرات برهم‌کنش شرکت می‌کنند. این نتایج با یافته‌های پیشین نیز همخوانی دارند (Khazanovich and Yu, 2005). همبستگی مثبت ضریب انتقال بار-ضخامت نشان می‌دهد که تاثیر عملکرد درز با کاهش ضخامت به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد؛ برای روسازی‌های نازک‌تر که برای راه‌های کم‌ترافیک بیشتر معمول هستند، پیامدهای انتقال بار ضعیف به طور متناسبی بزرگتر است، که طراحی داول بار (میلگرد انتقال بار) و فاصله درزها را به ملاحظات حیاتی تبدیل می‌کند. این نتایج نیز یافته‌های پیشین را تصدیق می‌کنند (FHWA, 2019; Smith et al., 2014).

اثرات برهم‌کنش به مراتب بالاتر برای راه‌های کم‌حجم به عدم قطعیت طراحی افزایش یافته تبدیل می‌شود که نمی‌توان آن را از طریق بهبود تعیین مشخصات منحصر به یک پارامتر کاهش داد. پیشنهاد میشود ضرایب ایمنی فعلی ممکن است نیازمند بازنگری برای کاربردهای کم‌حجم باشند، جایی که تغییرپذیری ناشی از برهم‌کنش به منابع عدم قطعیت سنتی اضافه می‌شود. اگرچه تسلط برهم‌کنش نشان‌دهنده حساسیت سازه‌ای افزایش یافته است، کمی‌سازی رسمی عدم قطعیت و بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان، فراتر از اهداف مطالعه فعلی است و برای تحقیقات آتی توصیه می‌شود.

## ۵- نتیجه‌گیری

این تحلیل حساسیت جامع از روش طراحی روسازی صلب آشتو ۱۹۹۳، بر اساس ارزیابی سیستماتیک بیش از ۸۸۰ میلیون ترکیب طراحی معتبر در چهار طبقه‌بندی راه، گذارهای رفتاری بنیادین

برهم‌کنش‌ها را به صورت قطعی کمی‌سازی نمود. این همگرایی چندروشی اعتماد به یافته‌ها را تقویت می‌کند.

نتایج سوپول یک پارادوکس ظاهری در تحلیل همبستگی را حل می‌کند، جایی که W18 همبستگی پایین‌تری برای راه‌های شریانی ( $r=0/256$ ) نسبت به راه‌های محلی ( $r=0/311$ ) نشان داد، علی‌رغم اینکه راه‌های شریانی ترافیک بالاتری دارند. تحلیل آشکار می‌کند که همبستگی W18 با ضخامت در راه‌های محلی منعکس‌کننده برهم‌کنش‌های گسترده آن با سایر پارامترها (که از طریق  $ST=0/92$  آشکار می‌شود) است نه یک اثر مستقیم قوی ( $SI=0/208$ ). سه عامل در این امر دخیل هستند، واریانس محدود که در آن W18 شریانی تنها نیمی از یک مرتبه بزرگی در فضای لگاریتمی را پوشش می‌دهد در حالی که راه‌های محلی ۱/۷ مرتبه را پوشش می‌دهند؛ تبدیل لگاریتمی که اثرات را در سطوح ترافیک بالا فشرده می‌کند و ظهور برهم‌کنش که در آن تأثیر W18 به جای جملات مستقیم، از طریق ترکیبات پارامتر توزیع می‌شود. این نتایج یافته‌های پیشین را تصدیق می‌کند (Homma and Saltelli, 1996; Huang, 2004).

گذار از رفتار افزایشی به رفتار تحت سلطه برهم‌کنش به نظر می‌رسد با ساختار ریاضی معادله آشتو که در نزدیکی مرزهای محدودیت عمل می‌کند، مرتبط باشد. برای طراحی‌های پر حجم که نیازمند ضخامت قابل توجه هستند، پارامترها در نواحی عمل می‌کنند که جملات غیرخطی تأثیر کمتری دارند. برای طراحی‌های کم‌حجم که مقاطع نازک تولید می‌کنند، پارامترها از طریق توان‌های کسری و تبدیلات لگاریتمی به گونه‌ای برهم‌کنش می‌کنند که اثرات ترکیبی را تقویت می‌نمایند، که با تئوری تحلیل حساسیت در مورد رفتار مدل در نزدیکی مرزها سازگار است (Saltelli et al., 2008). این رفتار مشاهده شده نشان‌دهنده شکست معادله آشتو نیست، بلکه منعکس‌کننده ساختار تجربی غیرخطی آن هنگام اعمال بر دال‌های نازک و سطوح ترافیک پایین است؛ تحت چنین شرایطی، تغییرات کوچک در خواص مصالح، رفتار درز، یا شرایط تکیه‌گاه می‌تواند به صورت ضریب برهم‌کنش کنند و اثرات نامتناسبی بر ضخامت ایجاد نمایند.

برای انتخاب رویکرد طراحی، نتایج نشان می‌دهند که آزادراه‌ها و شریان‌ها با اثرات برهم‌کنش کمتر از ۱ درصد از رویه‌های ساده‌شده متمرکز بر پارامترهای کلیدی (W18, ZR, J) پشتیبانی می‌کنند. برای جمع‌کننده‌ها با ۲۴ درصد برهم‌کنش،

توصیه می‌شود. برای کاربردهای راه محلی، احتیاط شدید هنگام اعمال آشتو ۱۹۹۳ بدون اصلاحاتی که به اثرات برهم‌کنش بپردازند، توصیه می‌شود، زیرا اولویت‌بندی سنتی پارامترها بر اساس حساسیت‌های تک متغیری، زمانی که بیش از ۷۰ درصد واریانس طراحی از ترکیب پارامترها ناشی می‌شود، گمراه‌کننده است. استراتژی‌های متفاوت تعیین مشخصات پارامتر برای انواع مختلف تسهیلات مناسب است. راه‌های پر حجم بیشترین بهره را از تحلیل دقیق ترافیک می‌برند در حالی که راه‌های کم‌حجم نیازمند تعیین مشخصات جامع مصالح و بستر هستند.

در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود که نتایج پیش‌بینی تحلیل حساسیت با داده‌های عملکردی واقعی روسازی‌های در حال بهره‌برداری راستی‌آزمایی شود. همچنین، ضروری است تحلیل‌های جامع مشابهی بر روی روش‌های مکانیستی-تجربی صورت گیرد و چارچوب‌های طراحی نوینی برای راه‌های کم‌حجم توسعه یابد که صراحتاً برهم‌کنش پارامترها را لحاظ نمایند. علاوه بر این، مطالعات آینده می‌توانند با ادغام شرایط تحت حاکمیت برهم‌کنش با چارچوب‌های قابلیت اطمینان یا بهینه‌سازی، کارایی طراحی را در راه‌های کم‌ترافیک ارتقا دهند.

## ۶-مراجع

- AASHTO. (1993). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. *American Association of State Highway and Transportation Officials*, Washington, D.C.
- ARA, Inc. (2004). Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. NCHRP Report 1-37A, *Transportation Research Board*, Washington, D.C.
- Campiono, F., Cariboni, J. and Saltelli, A. (2007). An effective screening design for sensitivity analysis of large models. *Environmental Modelling & Software*, 22(10), 1509-1518.
- Carvalho, R. L. and Schwartz, C. W. (2006). Comparisons of flexible pavement designs: AASHTO empirical versus NCHRP project 1-37A mechanistic-empirical. *Transportation Research Record*, 1947(1), 167-174.
- Ceylan, H., Kim, S., Gopalakrishnan, K. and Ma, D. (2013). Sensitivity analysis of jointed plain concrete pavement mechanistic-empirical performance predictions. *Construction and Building Materials*, 43, 545-556.

با پیامدهای قابل توجه برای روش‌های طراحی را آشکار می‌سازد.

برای روسازی‌های آزادراهی، قابلیت اطمینان (ZR) و بار ترافیکی (W18) تعیین‌کننده ضخامت بودند و در مجموع ۸۱/۶ درصد از واریانس را از طریق اثرات مرتبه اول توجیه کردند، در حالی که اثرات برهم‌کنش تنها ۰/۷ درصد سهم داشتند. ضریب انتقال بار (J) قوی‌ترین همبستگی را نشان داد و تمام پارامترها نسبت‌های  $\mu^*/\sigma$  فراتر از ۱/۸۵ را نشان دادند که رفتار عمدتاً خطی را تأیید می‌کند و از اعتبار رویه‌های طراحی ساده‌شده که پارامترها را مستقل فرض می‌کنند، پشتیبانی می‌نماید. راه‌های شریانی رفتار افزایشی مشابهی را نشان دادند و اثرات مرتبه اول ۹۹/۷ درصد از واریانس را توضیح دادند، اگرچه نسبت‌های  $\mu^*/\sigma$  به ۱/۰ تا ۱/۶ کاهش یافتند که نشانه اولیه ظهور غیرخطی بودن را فراهم می‌کند.

یک گذار رفتاری در سطوح ترافیک راه جمع‌کننده رخ می‌دهد. تحلیل مورس نشان داد که نسبت‌های  $\mu^*/\sigma$  برای تمام پارامترها به زیر ۱/۰ افت کردند که نشان‌دهنده گذار از اثرات خطی به غیرخطی است. تحلیل سوپول تأیید کرد که راه‌های جمع‌کننده نقطه گذاری را نشان می‌دهند که در آن اثرات برهم‌کنش به ۲۴/۳ درصد از کل واریانس می‌رسد، به طوری که برای پارامتر W18 نشان داد ۲۴/۷ درصد از تأثیر آن از طریق ترکیبات پارامترها عمل می‌کند. این نشان‌دهنده آستانه‌ای است که در آن رویکردهای ساده ممکن است ناکافی شوند.

برای کاربردهای راه محلی، تحلیل یک تغییر پارادایم بنیادی را آشکار کرد. اثرات مرتبه اول تنها ۲۷/۱ درصد از واریانس ضخامت را توضیح دادند در حالی که اثرات ناشی از برهم‌کنش پارامترها ۷۲/۹ درصد بود. جالب‌توجه‌تر اینکه، بار ترافیکی شاخص مرتبه کل ( $ST = 0.920$ ) بسیار فراتر از شاخص مرتبه اول خود ( $S1 = 0.208$ ) را نشان داد، که بیانگر این است که ۷۱/۲ درصد از تأثیر آن از طریق ترکیبات پارامتر عمل می‌کند. سلسله‌مراتب حساسیت روش به پارامترها به طور اساسی تغییر کرد، به طوری که خواص مصالح (Sc) و مشخصات بستر (k) از طریق مشارکت گسترده در جملات برهم‌کنش اهمیت یافتند. رویه‌های طراحی ساده‌شده برای آزادراه‌ها و راه‌های شریانی که اثرات برهم‌کنش ناچیز است، معتبر باقی می‌مانند. راه‌های جمع‌کننده یک منطقه گذار را نشان می‌دهند که در آن راستی‌آزمایی طراحی ارتقا یافته با در نظر گرفتن ترکیب پارامترها

- Kannekanti, V. and Harvey, J. (2006). "Sensitivity analysis of 2002 design guide distress prediction models for jointed plain concrete pavement. *Transportation Research Record*, 1947(1), 91-100.
- Khazanovich, L. and Yu, H. T. (2005). ISLAB2000: Finite element analysis program for rigid and composite pavements. *Transportation Research Record*, 1919(1), 20-28.
- Kim, S., Ceylan, H. and Gopalakrishnan, K. (2015). Sensitivity analysis of ME pavement design guide for jointed plain concrete pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 141(5), 04014107.
- Kumar, A. and Mathew, B. S. (2020). Implementation of empirical and mechanistic-empirical pavement design methods in India. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(14), 1715-1728.
- Li, J., Pierce, L. M. and Uhlmeier, J. (2019). Calibration of the AASHTO MEPDG for flexible pavement design in Washington State. *Transportation Research Record*, 2673(6), 427-439.
- Morris, M. D. (1991). Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometrics*, 33(2), 161-174.
- NCHRP. (2004). Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. NCHRP Report 1-37A, *Transportation Research Board*, Washington, D.C.
- Oltean, G. and Matei, A. (2021). Sensitivity analysis of rigid pavement design based on semi-empirical methods: Romanian case study. *Materials*, 14(2), 168.
- Packard, R. G. (1984). Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements. *Portland Cement Association*, Skokie, IL.
- Pierce, L. M. and McGovern, G. (2014). Implementation of the AASHTO Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide and Software. NCHRP Synthesis 457, *Transportation Research Board*, Washington, D.C.
- Rahman, M., Gassman, S. L. and Asi, I. M. (2013). Comparison of Ontario pavement designs using the AASHTO 1993 empirical method and the mechanistic-empirical pavement design guide method. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(9), 908-918.
- Darter, M. I., Smith, K. D. and Hall, K. T. (1995). Concrete Pavement Rehabilitation: Guide for Load Transfer Restoration. FHWA-RD-94-116, *Federal Highway Administration*, Washington, D.C.
- FHWA. (2019). Traffic Monitoring Guide. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.
- Firgiansyah, E., Prihantono and Daryati. (2022). Comparative study of rigid pavement planning using Bina Marga 2017 and AASHTO 1993 methods. *Jurnal Pensil: Pendidikan Teknik Sipil*, 11(1), 78-91.  
**doi: 10.21009/jpensil.v11i1.24199**
- Forrester, A., Sobester, A. and Keane, A. (2008). Engineering Design via Surrogate Modelling: A Practical Guide. *John Wiley & Sons*, Chichester, UK.
- Guo, R. and Prozzi, J. A. (2008). Probabilistic model for mechanistic-empirical flexible pavement design. *Transportation Research Record*, 2095(1), 129-138.
- Haider, S. W. and Dwaikat, M. B. (2011). Estimating optimum sample sizes for pavement performance curves. *International Journal of Pavement Engineering*, 12(4), 399-407.
- Hall, K. T., Darter, M. I., Hoerner, T. E. and Khazanovich, L. (1997). LTPP Data Analysis-Phase I: Validation of Guidelines for K-Value Selection and Concrete Pavement Performance Prediction. FHWA-RD-96-198, *Federal Highway Administration*, Washington, D.C.
- Highway Research Board. (1962). The AASHO Road Test: Report 5-Pavement Research. Special Report 61E, *National Academy of Sciences*, Washington, D.C.
- Homma, T. and Saltelli, A. (1996). Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models. *Reliability Engineering & System Safety*, 52(1), 1-17.
- Huang, Y. H. (2004). Pavement Analysis and Design (2nd ed.). Pearson Prentice Hall, *Upper Saddle River*, NJ.
- Ioannides, A. M. and Korovesis, G. T. (1990). Aggregate interlock: A pure-shear load transfer mechanism. *Transportation Research Record*, 1286, 14-24.
- Iooss, B. and Lemaître, P. (2015). A review on global sensitivity analysis methods. In *Uncertainty Management in Simulation-Optimization of Complex Systems*, Springer, 101-122.

- Sobol, I. M. (2001). Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation*, 55(1-3), 271-280.
- Sullivan, G. M. and Feinn, R. (2012). Using effect size—or why the P value is not enough. *Journal of Graduate Medical Education*, 4(3), 279-282.
- Suwaji, S., Anisari, R. and Adriyati, R. (2023). Rigid pavement thickness planning using the AASHTO 1993 method on the road section of Danau Rawah Village, Kapuas District, Central Kalimantan. *Asian Journal of Management Entrepreneurship and Social Science*, 3(4), 640-651.
- Tighe, S., Li, N., Falls, L. C. and Haas, R. (2008). Incorporating road safety into pavement management. *Transportation Research Record*, 2068(1), 1-10.
- Wijajanti, E., Kusmaryono, I. and Zakir, A. M. (2023). Analisis perencanaan tebal lapisan perkerasan kaku rigid pavement menggunakan metode MDP 2017 dan AASHTO 1993: Studi kasus proyek jalan tol Cinere Jagorawi. *C-Line Jurnal Teknik Sipil*, 12(2), 10-19.
- Yoder, E. J. and Witczak, M. W. (1975). Principles of Pavement Design (2nd ed.). *John Wiley & Sons*, New York.
- Ziar, A., Ulfat, S., Serat, Z. and Armal, M. A. (2024). Cost effectiveness analysis of design methods for rigid and flexible pavement: A case study of urban road." *Archives of Advanced Engineering Science*, 2(3), 134-141.
- doi:10.47852/bonviewAAES32021264**
- Rodden, R., Voigt, G. F. and Gieraltowski, J. (2021). Design and Construction of Metric Concrete Pavements. FHWA-HIF-21-015, *Federal Highway Administration*, Washington, D.C.
- Rodríguez, E., Pradena, M. A., Molina, F. and González, V. (2018). Comparison of AASHTO 1993 and mechanistic-empirical pavement design methods for Colombian conditions. *Ingeniería e Investigación*, 38(2), 112-119.
- Saltelli, A. (2002). Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices. *Computer Physics Communications*, 145(2), 280-297.
- Saltelli, A., Annoni, P., Azzini, I., Campolongo, F., Ratto, M. and Tarantola, S. (2010). Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index. *Computer Physics Communications*, 181(2), 259-270.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M. and Tarantola, S. (2008). *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. *John Wiley & Sons*, Chichester, UK.
- Schwartz, C. W., Li, R., Ceylan, H., Kim, S. and Gopalakrishnan, K. (2013). Global sensitivity analysis of mechanistic-empirical performance predictions for flexible pavements. *Transportation Research Record*, 2368(1), 12-23.
- Smith, K. D., Harrington, D., Pierce, L., Ram, P. and Smith, K. L. (2014). *Concrete Pavement Preservation Guide* (2nd ed.). National Concrete Pavement Technology Center, *Iowa State University*, Ames, IA.

# Parametric Sensitivity and Interaction Analysis of the AASHTO 1993 Rigid Pavement Design Method Across Road Functional Classifications

*Shahin Shabani, Civil Engineering Department, Payam-e-Noor University, Tehran, Iran.*

*Shima Taheri, Civil Engineering Department, Payam-e-Noor University, Tehran, Iran.*

*Javad Bahloolzade, Ph.D., Student, Civil Engineering Department, Payam-e-Noor University, Tehran, Iran.*

**E-mail: shabani@pnu.ac.ir**

Received: September 2025- Accepted: February 2026

## ABSTRACT

This study presents a comprehensive sensitivity analysis of the AASHTO 1993 rigid pavement design method, examining 883,245,415 valid design combinations (91.9% of the initial design space) across four road classifications: highway, arterial, collector, and local. Three complementary methods—full factorial correlation analysis, Morris elementary effects screening, and Sobol variance decomposition—were employed to quantify parameter influences and their interactions. For highway pavements, reliability (ZR) and traffic loading (W18) dominated thickness determination, collectively accounting for 81.6% of variance through first-order effects, with minimal interaction contributions (0.7%). The load transfer coefficient (J) exhibited the strongest correlation ( $r = 0.545$ ), followed by traffic loading ( $r = 0.477$ ). As traffic volumes decrease, a fundamental behavioral transition emerges: arterial roads showed 0.3% interaction effects; collector roads marked a transition point with 24.3% interaction-attributable variance; and local roads exhibited 72.9% of variance arising from parameter interactions rather than direct effects. The Morris method confirmed these patterns through systematically decreasing  $\mu^*/\sigma$  ratios—from values exceeding 2.0 for highways to below 0.4 for local roads. For local roads, W18's total-order Sobol index ( $ST = 0.920$ ) far exceeded its first-order index ( $S1 = 0.208$ ), demonstrating that 71.2% of traffic influence operates through parameter combinations. These findings indicate that simplified single-parameter approaches remain valid for high-volume facilities, while low-volume roads require methodologies explicitly accounting for parameter interactions. This study does not advocate universal concrete pavement use for low-volume roads; rather, it investigates the sensitivity behavior of the AASHTO 1993 method within its formally permitted application range, providing methodological insights rather than prescriptive guidance on pavement type selection.

**Keywords:** Rigid Pavement Design, AASHTO 1993, Sensitivity Analysis, Morris Method, Sobol Indices, Parameter Interactions, Variance Decomposition