

ارزیابی مدل بلز در پیش‌بینی دمای عمق لایه آسفالتی در شرایط دمای گرم

امیر کاووسی (مسئول مکاتبات)، دانشیار، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

مجتبی عباس‌قربانی، دانشجوی دکتری، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

فریدون مقدس‌نژاد، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه امیر کبیر، تهران، ایران.

ابراهیم شورمیچ، کارشناس ارشد، مهندسین مشاور آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، تهران، ایران.

E-mail: kavussia@modares.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۱۴ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۶/۱۷

چکیده:

در ارزیابی سازه‌ای روسازی آسفالتی با استفاده از دستگاه FWD، دمای عمق لایه آسفالتی هنگام آزمایش اندازه‌گیری می‌شود تا تحلیل داده‌های افت و خیز، با استفاده از ضرایب اصلاحی در دمای مرجع انجام شود. علاوه بر اندازه‌گیری مستقیم دما در هنگام آزمایش روش‌هایی نیز برای پیش‌بینی دمای عمق لایه آسفالتی توسعه یافته‌اند که متداول‌ترین آنها گراف آشتو و مدل بلز می‌باشند. در این تحقیق، ارزیابی مدل بلز در پیش‌بینی دمای عمق لایه آسفالتی در شرایط دمای گرم به عنوان هدف اصلی در نظر گرفته شد. به این منظور ۱۰ قطعه روسازی در محورهای دو استان کرمان و خوزستان انتخاب شده و دما در نیمه و یک‌سوم عمق لایه آسفالتی و داده‌های مورد نیاز برای ارزیابی مدل بلز برداشت گردید. به منظور بررسی جامع مدل بلز، ضخامت‌های متفاوت از لایه آسفالتی روسازی‌های قدیمی و تازه ساخت و اندازه‌گیری دمای عمق در ساعات مختلف روز مد نظر قرار گرفت. تحلیل برازش خطی نتایج مدل بلز در مقابل دمای عمق اندازه‌گیری شده با ضریب تعیین ۰/۸۵ نشان داد که مدل بلز برای افزایش دقت نیاز به کالیبراسیون دارد. پس از انجام بررسی‌های بیشتر مشخص گردید که دلیل اصلی کاهش ضریب تعیین در قطعات انتخابی وجود روسازی‌های آسفالتی تازه ساخت بوده زیرا ضریب تعیین دمای عمق حاصل از مدل بلز و دمای عمق اندازه‌گیری شده در روسازی‌های قدیمی ۰/۹۶ می‌باشد. بنابراین با استفاده از داده‌های اخذ شده از روسازی‌های تازه ساخت مدل بلز برای این نوع روسازی‌ها کالیبره و مدل اصلاح شده آن ارائه گردید.

واژه‌های کلیدی: دمای عمق آسفالت، مدل بلز، افت و خیز روسازی، دستگاه DWF، دمای سطح آسفالت.

۱. مقدمه

به طور کلی انتقال حرارت یا گرما^۱ از سه طریق رسانش^۲، همرفتی^۳ و تابش^۴ انجام می‌شود. منبع اصلی انرژی گرمایی در روسازی از طریق مکانیزم تابش امواج کوتاه خورشید به دست می‌آید. بخشی از این امواج از طریق روسازی، جذب و بخشی دیگر به صورت امواج بلند به فضا منعکس می‌شود. درصد جذب امواج به خصوصیات سطح روسازی بستگی دارد. همرفتی، بین سطح روسازی و هوا انجام می‌شود که در صورت کمتر بودن دمای هوا، سطح روسازی خنک می‌شود که بستگی به اختلاف دما و سرعت وزش باد دارد. اما انتقال حرارت در روسازی به واسطه رسانش انجام می‌شود که تابعی از ضریب هدایت گرمایی^۵، ضریب نفوذ گرمایی^۶ و ظرفیت گرمایی ویژه^۷ روسازی است. سه پارامتر مذکور، خصوصیات حرارتی^۸ مخلوط آسفالتی نامیده می‌شوند که بستگی به نوع و میزان مصالح سنگی و قیر و خصوصیات حجمی مخلوط آسفالتی دارند [Yavuzturk and, Ksaibati, 2002].

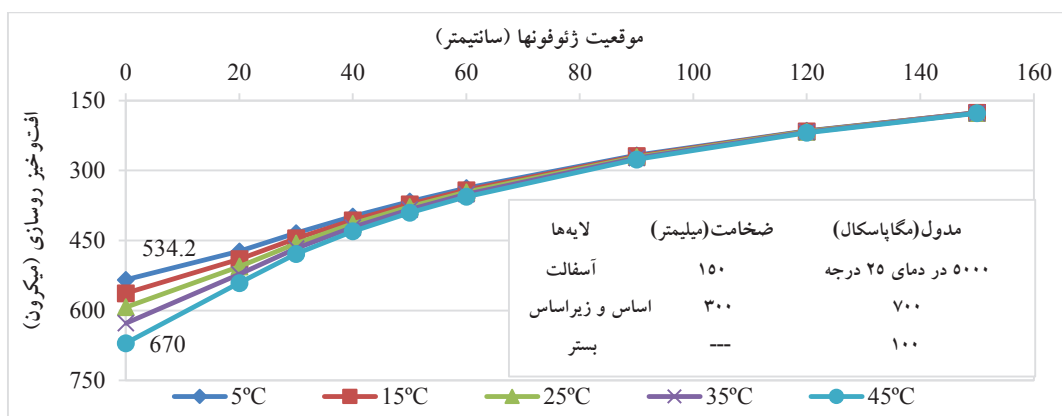
پیش‌بینی دمای سطح و عمق در لایه آسفالتی توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نخستین مرحله‌ای که دمای عمق لایه آسفالتی نیاز به پیش‌بینی دارد، هنگام پخش و تراکم لایه آسفالتی است که طی آن با استفاده از خصوصیات مخلوط، دمای اولیه و شرایط محیطی پروژه، نرخ خنک شدن عمق روسازی پیش‌بینی و زمان لازم برای تراکم مناسب تعیین می‌گردد [Vasenev, Hartmann and Doree, 2012]. دمای سطح روسازی معمولاً با استفاده از خصوصیات سطح آسفالت در جذب و انعکاس انرژی و خصوصیات گرمایی مخلوط آسفالتی تعیین می‌گردد [Petersen and Mahura, 2012]. در زمینه طراحی و آنالیز روسازی اطلاع از دمای حداقل و حداکثر عمق لایه آسفالتی در طول سال، به منظور فصل‌بندی و استفاده از قانون ماینر^۹ حائز اهمیت است. حداکثر دمای روسازی معمولاً با استفاده از دمای هوا، عرض جغرافیایی و ضخامت لایه آسفالتی در عمق $d/2$ یا $d/3$ (d ضخامت کل لایه‌های آسفالتی) تعیین می‌گردد. دمای حداقل در عمق روسازی نیز با داشتن دمای حداقل سطح (که عموماً معادل با دمای حداقل هوا فرض می‌شود) و عمق مورد

نظر، تعیین می‌گردد [Everitt, 2001, Korczak and Tighe, 2012].

افت و خیز اندازه‌گیری شده با دستگاه FWD در نزدیکی صفحه بارگذاری، معرف پاسخ لایه آسفالتی است که به دلیل رفتار ویسکوالاستیک آن همراه با دما تغییر می‌کند. برای یکسان‌سازی و امکان مقایسه نتایج، تحلیل داده‌های افت و خیز روسازی با استفاده از روش‌های مکانیستیک- تجربی (ELMOD^{۱۱}) و یا تجربی (AASHTO^{۱۲}) در یک دمای خاص (دمای مرجع^{۱۳}) انجام می‌شود. در شکل ۱ با استفاده از نرم‌افزار ELMOD، تغییرات کاسه انحنا افت و خیز دستگاه FWD^{۱۴} در یک نقطه از روسازی در دمای ۵ الی ۴۵ درجه سانتیگراد ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دما، افت و خیز مرکزی روسازی از ۵۳۴ به ۶۷۰ میکرون افزایش یافته است. این تغییرات با افزایش فاصله از مرکز بارگذاری به تدریج کاهش یافته و در ۶۰ سانتیمتری تقریباً به صفر می‌رسد. به عبارت دیگر از فاصله ۶۰ سانتیمتری صفحه بارگذاری، افت و خیز روسازی معرف پاسخ لایه‌های دانه‌ای اساس، زیراساس و بستر بوده و تحت تاثیر دما نیست.

با توجه به شکل ۱ مشخص می‌گردد که هنگام آزمایش با دستگاه FWD بایستی دمای عمق لایه آسفالتی با روشی مناسب تعیین شود. به طور کلی از سه روش اندازه‌گیری مستقیم دما در محل، گراف آشتو و مدل بلز می‌توان برای تعیین دمای عمق لایه آسفالتی استفاده نمود. در روش اندازه‌گیری مستقیم، هنگام انجام آزمایش با دستگاه FWD دمای عمق لایه آسفالتی در فاصله زمانی هر ۱ الی ۱/۵ ساعت با ایجاد سوراخ تا نصف عمق لایه آسفالتی و یا حداکثر ۱۰ سانتیمتر با استفاده از دماسنج اندازه‌گیری می‌شود. در صورت تغییر شرایط دمایی به دلیل ایجاد پوشش ابر یا قرارگیری روسازی در سایه به جهت موانع طبیعی، بایستی قرائت اضافه انجام شود [Inge and Kim, 2013]. در این روش سوراخ کردن روسازی موجب ایجاد گرما شده و حداقل ۲۰ دقیقه زمان برای فرآیند برداشت دما لازم است. توقفهای دستگاه FWD برای اندازه‌گیری دما موجب کاهش راندمان برداشت داده‌های افت و خیز در روز خواهد شد. همچنین دمای اندازه‌گیری شده در

ارزیابی مدل بلز در پیش‌بینی دمای عمق لایه آسفالتی در شرایط دمای گرم



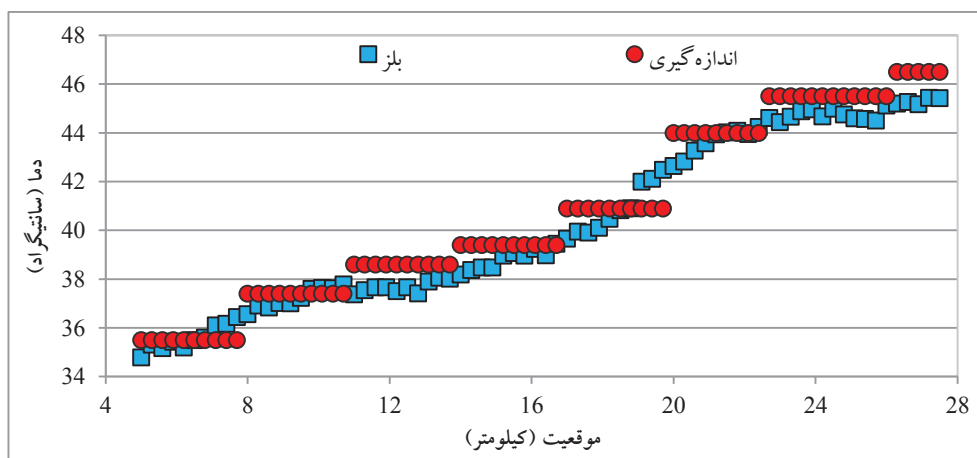
شکل ۱. تغییرات کاسه انحنا افت‌وخیز در اثر تغییرات دما در عمق لایه آسفالتی

اهمیت دوچندان می‌یابد. عیب قابل ذکر برای این روش، تغییرات آب هوایی در ۵ روز متوالی قبل از آزمایش با دستگاه FWD است که می‌تواند روی دمای عمق لایه آسفالتی تاثیر گذار باشد. همچنین در روش آشتو تفاوتی بین شیب دمایی مثبت (دمای سطح بیشتر از عمق) در ابتدای روز و شیب دمایی منفی (دمای عمق بیشتر از سطح) در انتهای روز برای محاسبه دمای عمق لایه آسفالتی نیست و در صورت یکسان بودن دمای سطح، دمای عمق مشابه به دست می‌آید [Emmanuel et al. 2001].

مدل بلز نیز به منظور پیش‌بینی دمای عمق لایه آسفالتی استفاده می‌شود و تمام مزایای روش استفاده از گراف آشتو را دارد. در این روش از میانگین دمای هوا در یک روز قبل از آزمایش FWD به جای میانگین ۵ روز دمای هوا، استفاده می‌شود که از این جهت خطای روش آشتو را برطرف می‌کند. در شکل، دما در نیمه عمق لایه آسفالتی با استفاده از مدل بلز و اندازه‌گیری مستقیم در محل، در محور رامهرمز- بهبهان با یکدیگر مقایسه گردیده است. از آنجایی که امکان اندازه‌گیری دمای عمق لایه آسفالتی در هر نقطه بارگذاری شده با دستگاه FWD وجود ندارد، دمای ثبت شده تا نقطه بعدی اندازه‌گیری دما به تمام نقاط تعمیم داده می‌شود. اما با استفاده از مدل بلز به دلیل تغییرات دمای سطح روسازی و ثبت خودکار آن در دستگاه FWD می‌توان به هر نقطه بارگذاری شده، یک دمای عمق منحصر به فرد اختصاص و با توجه به صرفه‌جویی در زمان، طول بیشتری از راه را مورد ارزیابی سازه‌ای قرار داد.

یک نقطه از روسازی به تمام نقاط تا اندازه‌گیری بعدی دما تعمیم داده می‌شود که این مساله باعث ایجاد خطا می‌گردد [Bazi, 2010]. از طرف دیگر در هنگام برداشت داده‌های افت‌وخیز با دستگاه FWD، ضخامت لایه‌های روسازی نامعلوم است، بنابراین ایجاد سوراخ برای اندازه‌گیری دما در نیمه عمق لایه آسفالتی با خطا همراه است. البته این مورد را می‌توان با اندازه‌گیری دما در چند عمق مختلف و اختصاص دمای مناسب بعد از تعیین ضخامت روسازی رفع نمود.

در روش آشتو برای تعیین دمای عمق لایه آسفالتی پارامترهای دمای سطح روسازی (دما در عمق ۲/۵ سانتیمتری و یا استفاده از دامسنج مادون قرمز دستگاه FWD)، میانگین دمای ۵ روزه هوا در روز قبل از انجام آزمایش با دستگاه FWD و ضخامت کل لایه‌های آسفالتی مورد نیاز است. در این روش دمای سطح آسفالت اندازه‌گیری شده و دماهای نیمه عمق و انتهای عمق لایه آسفالتی با استفاده از گراف تعیین می‌گردد. دمای عمق لایه آسفالتی در روش آشتو به صورت میانگین سه دمای مذکور تعریف می‌شود [AASHTO, 1993]. در این روش می‌توان بدون وقفه آزمایش بارگذاری با دستگاه FWD را در طول پروژه انجام داد و وقفه‌های ۲۰ دقیقه‌ای در هر ۱ الی ۱/۵ ساعت برای برداشت دمای عمق روسازی وجود نداشته و نسبت به روش اندازه‌گیری مستقیم، طول بیشتری از راه مورد ارزیابی سازه‌ای قرار می‌گیرد. این مساله با توجه به محدودیت زمانی برای انجام آزمایش به دلیل هماهنگی با پلیس راه و همچنین تامین ایمنی و اسکورت دستگاه



شکل ۲. مقایسه دمای نیمه عمق لایه آسفالتی با استفاده از مدل بلز و اندازه‌گیری مستقیم در محور راهرمز- بهبهان

مقدار دمای سطح وارد شده ناسازگار است بنابراین توصیه می‌شود دما در عمقی کمتر از ۲۵ میلیمتر از طریق روابط تعیین نشود. این مدل ممکن است برای پیش‌بینی دمای عمق لایه آسفالتی بیشتر از ۱۵۰ میلیمتر هم مورد استفاده قرار گیرد، اما برای آن کالیبره نشده و مورد تایید قرار نگرفته است.

۲- دمای سطح روسازی در داده‌های مورد استفاده از ۰ تا ۴۰ متغیر بوده و برای دماهای بیشتر، از برونیابی استفاده می‌شود.
۳- در پایگاه داده زمان اندازه‌گیری دمای سطح روسازی با سنسور مادون قرمز دستگاه FWD، از ساعت ۶ صبح تا ۶ عصر متغیر بوده است.

۴- دمای عمق موجود در پایگاه داده متعلق به عمق $d/2$ و $d/3$ از ضخامت لایه آسفالتی بوده است.

در این مدل به منظور تخمین دما در عمق روسازی از چهار پارامتر، دمای سطح روسازی، ساعت انجام آزمایش FWD در طول روز، میانگین دمای هوا در ۲۴ ساعت قبل از روز انجام آزمایش و عمق مورد نظر مطابق رابطه ۱ استفاده می‌شود.

$$T_d = \beta_0 + \beta_1 IR + [\log(d) - 1.25][\beta_2 IR + \beta_3 T_{(1-day)} + \beta_4 \sin(hr_{18} - 15.5)] + \beta_5 IR \sin(hr_{18} - 13.5) \quad (1)$$

T_d - دمای لایه آسفالتی در عمق d بر حسب درجه سانتیگراد

IR - دمای سطح روسازی بر حسب درجه سانتیگراد

d - عمق تعیین دمای لایه آسفالتی بر حسب میلیمتر

$T_{(1-day)}$ - میانگین دمای هوا در روز قبل از آزمایش FWD

مدل بلز یک برازش خطی با ۴ پارامتر مستقل است که در این تحقیق مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در صورت استفاده از این مدل در پیش‌بینی دمای عمق لایه آسفالتی فرآیند زمان بر برداشت دستی دمای عمق از آزمایش با دستگاه FWD حذف شده و ضمن افزایش راندمان کار دستگاه در روز، دمای عمق منحصر به فرد به هر نقطه بارگذاری شده، اختصاص می‌یابد.

۲. مدل بلز

این مدل توسط اداره بزرگراه‌های فدرال آمریکا (FHWA)^{۱۴} و بر اساس داده‌های فصلی برداشت شده در پروژه LTPP^{۱۵} توسعه یافته است. نام مدل بلز (Bells) از ابتدای نام ۵ محقق (Baltzer, Ertman, Larsen, Lukanen and Stubstad) توسعه دهنده آن، اخذ شده است. این روش در استاندارد ASTM D7228^{۱۶} و AASHTO T317 به تفصیل تشریح گردیده است. برای توسعه این روش ابتدا دو مدل برازش خطی برای تخمین دما در یک‌سوم و نیمه عمق لایه آسفالتی ارائه گردید اما به دلیل یکسان شدن ضرایب دو مدل، روابط با هم ترکیب شدند. خصوصیات داده‌های مورد استفاده در توسعه مدل بلز بر اساس استانداردهای مذکور به شرح زیر است.

۱- ضخامت لایه آسفالتی در مدل از ۵ تا ۳۰ سانتیمتر بوده است، بنابراین پیش‌بینی دمای عمق از ۲/۵ تا ۱۵ سانتیمتر امکان پذیر است. از آنجایی که شرایط مرزی معادله در عمق صفر با توجه به

ارزیابی مدل بلز در پیش‌بینی دمای عمق لایه آسفالتی در شرایط دمای گرم

گرفته می‌شود. همچنین برای زمانهای بین نیمه شب تا ساعت ۰۵:۰۰ قبل از محاسبه بایستی ۲۴ ساعت به آن اضافه نمود و بعد، از تابع سینوس استفاده کرد. همچنین تابع $\text{Sin}(hr_{18} - 13.5)$ فقط برای زمان‌های بین ۰۹:۰۰ صبح تا ۰۳:۰۰ صبح روز بعد (۱۸ ساعت) مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر زمان خارج از محدوده مذکور باشد (یعنی ۶ ساعت بین ۳ صبح تا ۹ صبح) جواب تابع سینوسی برابر ۱- در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای زمانهای بین نیمه شب تا ساعت ۳ قبل از محاسبه بایستی ۲۴ ساعت به آن اضافه نمود.

۳. روش تحقیق

در این تحقیق به منظور بررسی نتایج مدل بلز ۳ در پیش‌بینی دمای عمق لایه آسفالتی و مقایسه آن با روش اندازه‌گیری مستقیم، ۱۰ قطعه از روسازی در دو استان کرمان و خوزستان انتخاب شدند. در این قطعات دما در نیمه و یک‌سوم عمق لایه آسفالتی به صورت دستی و دمای سطح با استفاده از سنسور مادون قرمز دستگاه FWD در هر نیم ساعت از روز اندازه‌گیری و ثبت شد. با استفاده از دستگاه FWD دمای هوا و سطح آسفالت به صورت خودکار همراه با داده‌های افت‌وخیز روسازی در یک فایل با فرمت Access ذخیره می‌شدند. بنابراین تنها دمای عمق با ایجاد سوراخ در لایه آسفالتی تا نیمه و یک‌سوم عمق با استفاده از دماسنج اندازه‌گیری گردید. در انتخاب قطعات سعی بر آن بود که تنوع در ضخامت لایه آسفالتی برای استفاده از رابطه بلز و کالیبراسیون آن رعایت گردد به صورتی که ضخامت قشر آسفالتی در روسازی قطعات از ۷۵ میلیمتر تا ۴۰۰ میلیمتر متغیر بود. ضخامتهای کم، مربوط به محورهای تازه ساخت (از ۲ هفته تا ۲ سال) و ضخامتهای زیاد مربوط به محورهای قدیمی

Sin- تابع سینوس در سیستم ۱۸ ساعته که در آن 2π رادیان معادل ۱۸ ساعت است.

hr_{18} - زمان در سیستم ۲۴ ساعته که بر اساس سیستم ۱۸ ساعته محاسبه شده است.

در این روش با توجه به ضرایب مورد استفاده در مدل که در جدول ۱ ارائه گردیده است دو رابطه بلز ۲ و بلز ۳ برای پیش‌بینی دمای عمق لایه آسفالتی پیشنهاد شده است [AASHTO, 2012]. رابطه بلز ۳ در آزمایشهای معمول با دستگاه (۳) FWD یا ۴ مرتبه بارگذاری در هر نقطه) مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آن بارگذاری هر نقطه از روسازی در کمتر از ۳۰ ثانیه انجام می‌شود و اثر سایه ایجاد شده توسط دستگاه قابل چشم‌پوشی است. از آنجایی که LTPP، به منظور ارزیابی دوره‌ای با دستگاه FWD، در هر نقطه ۱۹ مرتبه بارگذاری انجام می‌دهد بنابراین توقف دستگاه در هر نقطه بیشتر از ۳ دقیقه خواهد شد، بنابراین رابطه بلز ۲ برای وارد نمودن اثر سایه ایجاد شده و خنک شدن سطح روسازی ارائه شده است.

همان طور که در جدول ۱ نیز دیده می‌شود، ضریب ثابت β_0 در رابطه بلز ۲ (۲/۷۸) سه برابر ضریب رابطه بلز ۳ (۰/۹۵) است، زیرا سطح روسازی به دلیل وجود سایه خنک شده، اما تاثیر سایه در دمای عمق بسیار کمتر بوده و این مساله موجب استفاده از ضریب ثابت بزرگ‌تر می‌گردد. در روابط بلز تغییرات دما در طول روز به صورت تابع سینوسی در نظر گرفته شده است که در آن ۱۸ ساعت از روز معادل ۳۶۰ درجه است. ساعت انجام آزمایش با دستگاه FWD برای زمانهای بین ۱۱:۰۰ تا ۰۵:۰۰ (۱۸ ساعت) به صورت رادیان در تابع $\text{Sin}(hr_{18} - 15.5)$ وارد می‌شود. اگر زمان، خارج از محدوده مذکور باشد (یعنی ۶ ساعت بین ۵ صبح تا ۱۱ صبح) جواب تابع سینوسی برابر ۱- در نظر

جدول ۱. ضرایب رابطه بلز ۲ و بلز ۳

رابطه	ضریب (β_0)	ضریب (β_1)	ضریب (β_2)	ضریب (β_3)	ضریب (β_4)	ضریب (β_5)
بلز ۲	۲/۷۸۰	۰/۹۱۲	-۰/۴۲۸	۰/۵۵۳	۲/۶۳۰	۰/۰۲۷
بلز ۳	۰/۹۵	۰/۸۹۲	-۰/۴۴۸	۰/۶۲۱	۱/۸۳۰	۰/۰۴۲

سایه افزایش یافته و در ساعت ۱۴:۳۰ به حداکثر مقدار خود برابر ۷ درجه می‌رسید. پس از این ساعت با کاهش تابش خورشید اختلاف دمای سطح آسفالت در سایه و آفتاب مجدداً کاهش می‌یافت. از آنجایی که مدل بلز ۳ از دمای سطح آسفالت در آفتاب و یا حداکثر ۳۰ ثانیه در سایه استفاده می‌کند طرح عملیاتی برداشت داده‌ها به ترتیب تشریح شده در بالا اصلاح شد.

۴. ارزیابی تغییرات دما در عمق لایه آسفالتی

در شکل‌های ۴ الی ۶ نمودار تغییرات دمای هوا، دمای سطح آسفالت و دما در نیمه عمق لایه آسفالتی به ترتیب در سه محور اهواز- حمیدیه (قطعه ۱)، سیرجان- بندرعباس (قطعه ۱) و اهواز- شیرین‌شهر ارائه شده است. در شکل ۴ دمای لایه آسفالتی در عمق ۶ سانتیمتری به همراه دمای هوا و دمای سطح آسفالت برای محور اهواز- حمیدیه (قطعه ۱) با ضخامت لایه آسفالتی برابر ۱۱۵ میلیمتر ارائه گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دمای هوا در تمام ساعات روز از دو دمای دیگر کمتر بوده و دمای سطح در ساعات ابتدایی و پایانی روز از دمای عمق آسفالت کمتر است. در این محور میانگین دمای روزانه هوا ۳۷/۷ درجه بوده و دمای عمق روسازی در ابتدای روز بیشتر از دمای هوا و سطح آسفالت است (دمای هوا در ساعت ۸ صبح ۲۸/۶ درجه و دمای عمق ۳۴/۹ درجه است که اختلاف ۶/۳ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد). با افزایش دمای هوا و تابش خورشید در ساعت ۱۰ صبح دمای سطح و عمق آسفالت برابر شده و پس از آن دمای سطح به دلیل جذب انرژی خورشید مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد. شیب مثبت دمایی (دمای سطح بیشتر از دمای عمق روسازی) تا ساعت ۱۴:۳۰ ادامه یافته و پس از آن به دلیل کاهش تابش خورشید دمای سطح آسفالت کاهش یافته (شیب دمایی منفی) و دمای عمق آسفالت بیشتر از آن می‌گردد. با توجه به شکل ۴، مشخص می‌شود که حداکثر دما برای سطح و عمق لایه آسفالتی در یک زمان اتفاق نمی‌افتد و به عبارت دیگر همان‌طور که انتظار می‌رود عمق لایه آسفالتی دیرتر گرم و دیرتر سرد می‌شود.

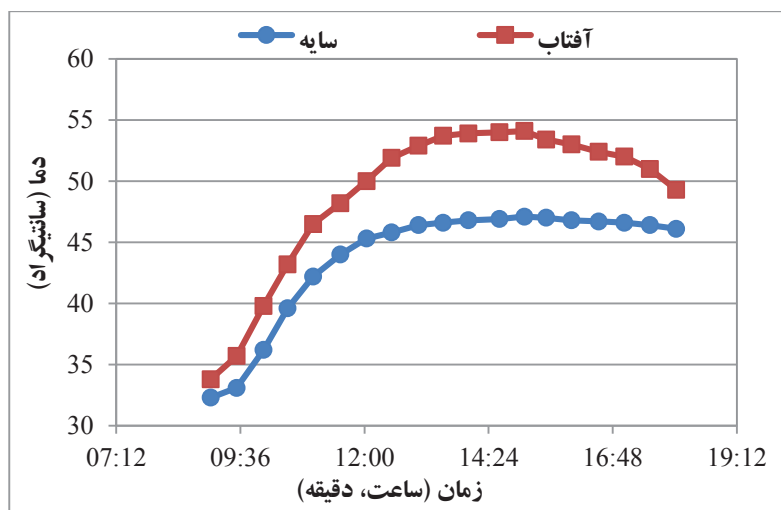
بودند که در سالهای مختلف روکش شده بودند. برای در نظر گرفتن تغییرات شیب دمایی در طول روز و کارایی مدل بلز در پیش‌بینی دقیق دمای عمق لایه آسفالتی، اندازه‌گیری دمای سطح و عمق لایه آسفالتی در قطعات در طول یک روز کامل (صبح تا غروب در هر نیم ساعت) انجام شد. حداقل و حداکثر دمای هوا در روز قبل از انجام آزمایش برای تعیین میانگین دمای هوا که در رابطه بلز مورد نیاز است، از اداره کل هواشناسی اهواز و اداره هواشناسی سیرجان اخذ گردید. تعداد کل داده‌های مورد استفاده در تحقیق ۵۷۷ مورد است که ۲۹۱ مورد مربوط به روسازی‌های تازه ساخت و ۲۸۶ مورد مربوط به روسازی‌های قدیمی بوده است. این داده‌های دمایی مربوط به قطعات آزمایش شده در تحقیق (در نیمه و یک‌سوم عمق لایه آسفالتی) و داده‌های مورد اطمینان موجود در آزمایشگاه فنی مکانیک خاک بوده است. در جدول ۲ نام محورهای انتخاب شده در دو استان، مشخصه قطعه، ضخامت کل لایه‌های آسفالتی، تاریخ انجام آزمایش و میانگین دمای هوا در یک روز قبل از آزمایش برای انجام مطالعه موردی، ارائه شده است. در هر یک از محورها بر اساس شرایط محیطی و ترافیکی معمولاً از ساعت ۷ الی ۸ صبح تا ساعت ۶ الی ۷ بعد از ظهر در هر نیم ساعت اندازه‌گیری داده‌های دما انجام شده است بنابراین در هر محور بین ۲۰ تا ۲۶ زوج داده دما (دمای سطح و عمق آسفالت) حاصل شد.

توقف دستگاه در طول روز روی نقطه آزمایش می‌تواند موجب ایجاد سایه و قرائت دمای کمتر برای سطح آسفالت گردد. برای حل این مشکل با علامت گذاری نقطه آزمایش، دستگاه FWD پس از هر بارگذاری به میزان ۱/۵ متر جابجا شده و مجدداً نیم ساعت بعد، برای اندازه‌گیری دما به نقطه مورد نظر منتقل می‌شود. در شکل ۳، به عنوان نمونه مقایسه دمای سطح آسفالت در آفتاب (لحظه آزمایش) و سایه (نیم ساعت توقف در فاصله ۱/۵ متری از نقطه آزمایش درست قبل از انتقال به نقطه آزمایش) در محور اهواز- حمیدیه (قطعه ۱) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با گذشت زمان از ابتدای روز و افزایش دمای هوا و تابش خورشید، میزان اختلاف دمای سطح در آفتاب و

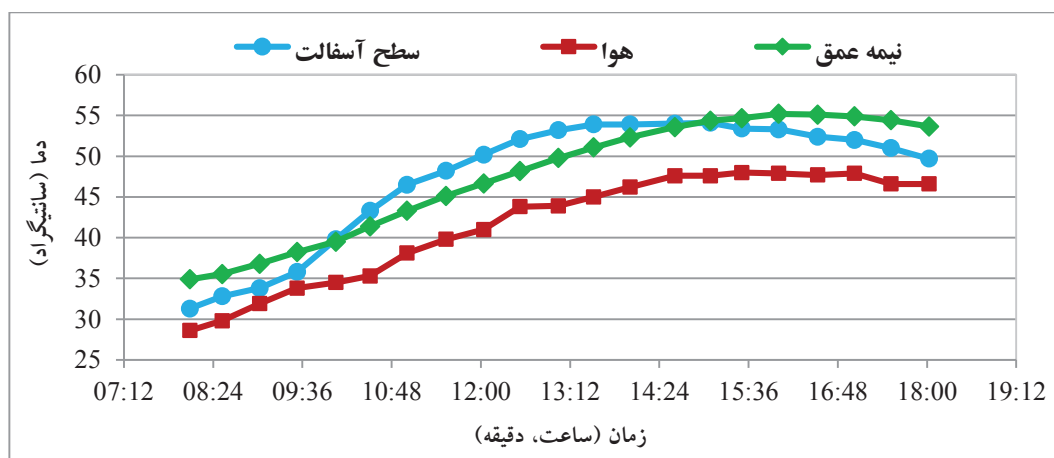
ارزیابی مدل بلز در پیش‌بینی دمای عمق لایه آسفالتی در شرایط دمای گرم

جدول ۲. مشخصات قطعات انتخابی در ارزیابی مدل بلز ۳

محل	نام قطعه	مشخصه قطعه	سن روسازی (سال و ماه)	ضخامت لایه آسفالتی (میلی‌متر)	تاریخ انجام آزمایش	میانگین دمای هوا در یک روز قبل (سانتیگراد)
خوزستان	اهواز- شوش	روسازی جدید	۱ سال و ۶ ماه	۹۵	۹۲/۰۶/۲	۳۸
	اهواز- حمیدیه (قطعه ۱)	روسازی جدید	۲ سال و ۰ ماه	۱۱۵	۹۲/۰۶/۳	۳۷/۷
	اهواز- حمیدیه (قطعه ۲)	روسازی قدیمی	۲۱ سال و ۰ ماه	۱۹۰	۹۲/۰۶/۴	۳۷
	اهواز- خرمشهر	روسازی قدیمی	۳۴ سال و ۰ ماه	۲۲۰	۹۲/۰۶/۵	۳۶
	اهواز- شیرین شهر	روسازی جدید	۰ سال و ۱ ماه	۷۵	۹۲/۰۶/۶	۳۶/۵
کرمان	سیرجان- شهر بابک	روسازی جدید	۰ سال و ۲ ماه	۱۴۴	۹۲/۰۵/۱۳	۳۳
	سیرجان- بندر عباس (قطعه ۱)	روسازی قدیمی	۲۰ سال و ۰ ماه	۳۰۰	۹۲/۰۵/۱۴	۳۳
	سیرجان- بندر عباس (قطعه ۲)	روسازی قدیمی	۲۰ سال و ۰ ماه	۴۰۰	۹۲/۰۵/۱۵	۳۱
	کمربندی سیرجان	روسازی جدید	۲ سال و ۰ ماه	۱۲۰	۹۲/۰۵/۱۶	۳۲
	سیرجان- بافت	روسازی جدید	۱ سال و ۰ ماه	۱۲۰	۹۲/۰۵/۱۷	۳۱/۵



شکل ۳. دمای سطح روسازی در آفتاب و سایه در محور اهواز- حمیدیه (قطعه ۱)

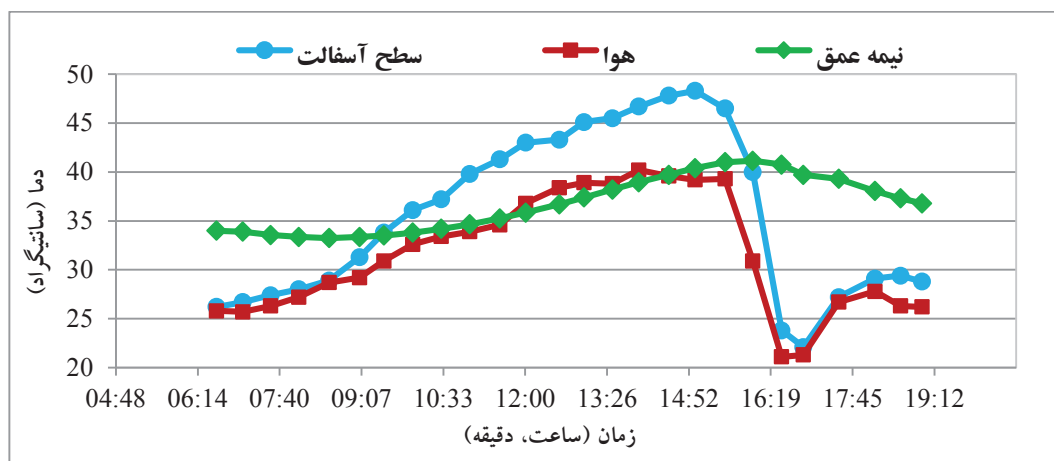


شکل ۴. نمودار تغییرات دمای هوا، دمای سطح و دمای عمق لایه آسفالتی در محور اهواز- حمیدیه (قطعه ۱) (۹۲/۶/۳)

۱۵ بعد از ظهر به صورت ناگهانی تغییر کرد و برای ۳۰ دقیقه رگبار و باد شدید را تجربه نمود. در این مدت و پس از آن تا ساعت ۱۹ دماهای سه گانه اندازه گیری شد که در شکل ۵ مشاهده می شود. دمای هوا و سطح آسفالت به دلیل اینکه در معرض مستقیم تغییرات هستند به سرعت کاهش یافته ولی دمای عمق لایه آسفالتی به دلیل ضخامت زیاد دیرتر و به مقدار کمتر خنک شده است.

لازم به ذکر است که تغییرات دمایی نظیر آنچه در شکل ۵ مشاهده می شود، نمی تواند در مدل های پیش بینی دما گنجانده شود، بنابراین داده های این محور از ساعت ۱۵ به بعد در تحلیل نهایی حذف گردیده است. به منظور بررسی تغییرات دمایی در لایه آسفالتی با ضخامت کم، محور اهواز- شیرین شهر با ضخامت ۷۵ میلیمتر

در شکل ۵، نمودار تغییرات دمای هوا، دمای سطح و دمای عمق لایه آسفالتی در محور سیرجان- بندر عباس (قطعه ۱) با ضخامت زیاد برای لایه آسفالتی (۳۰۰ میلیمتر) ارائه شده است. دمای لایه آسفالتی در این محور در عمق ۱۵ سانتیمتری اندازه گیری شده است که نسبت به محور اهواز- حمیدیه تقریباً ۲/۵ برابر است. در این محور مشابه محور حمیدیه دمای عمق لایه آسفالتی در ابتدای روز بیشتر از دمای سطح بوده و از ساعت ۹:۳۰ این روند معکوس می گردد. همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود با افزایش ضخامت لایه آسفالتی شیب تغییرات دما در نیمه عمق کاهش می یابد، به عبارت دیگر مدت زمان بیشتری (انرژی دریافتی بیشتر) برای گرم شدن لایه آسفالتی لازم است. شرایط هوایی محور مذکور در روز آزمایش (۹۲/۰۵/۱۴) و در ساعت



شکل ۵. نمودار دمای هوا، دمای سطح و دمای عمق لایه آسفالتی در محور سیرجان- بندر عباس (قطعه ۱) و تغییرات ناشی از بارش باران (۹۲/۰۵/۱۴)

ارزیابی مدل بلز در پیش‌بینی دمای عمق لایه آسفالتی در شرایط دمای گرم

در عمق‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ سانتیمتری با یکدیگر متفاوت بوده و به ترتیب در ساعت‌های ۷:۳۱، ۸:۰۱ و ۹:۳۰ از ابتدای روز اتفاق افتاده است. بدیهی است که با افزایش ضخامت، زمان بیشتری برای رسیدن دما به عمق‌های پایین لازم است و همچنین کاهش دما در طول شب نیز با شدت کمتری انجام می‌شود به همین دلیل در ابتدای روز دمای عمق‌های پایین بیشتر است.

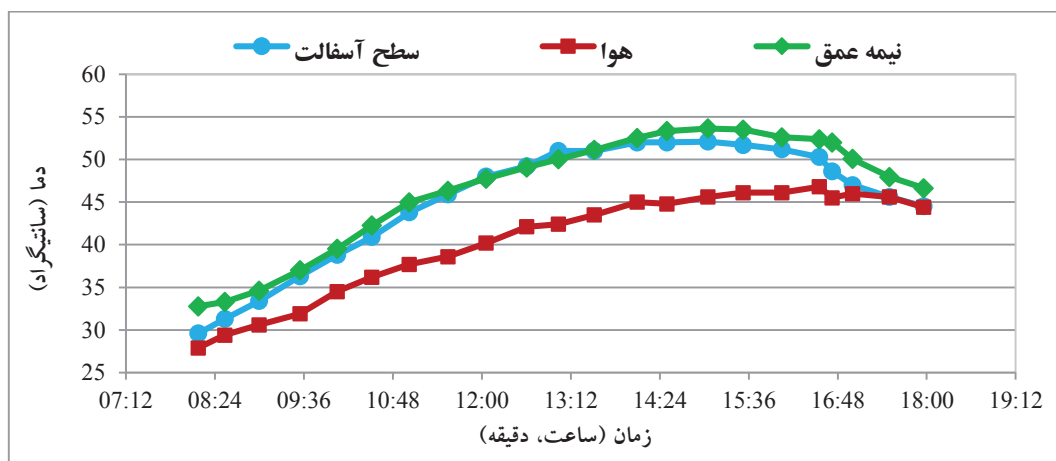
اکثر دستورالعمل‌های برداشت داده‌های افت و خیز با دستگاه FWD، عمق اندازه‌گیری دما را به نصف ضخامت لایه آسفالتی محدود می‌کنند که این مساله با توجه به نمودار شکل ۷ و کاهش محدوده تغییرات دما در عمق‌های پایین توجیه‌پذیر است. در واقع دما در نیمه عمق می‌تواند به عنوان میانگین دمای لایه آسفالتی مورد استفاده قرار گیرد. آگاهی از محدوده تغییرات دما در عمق‌های مختلف قشر آسفالتی می‌تواند به انتخاب نوع قیر و مصالح در لایه‌های مختلف آسفالتی برای مقابله با خرابی‌های ناشی از تغییرات دما (استفاده از قیر با مشخصات پایین‌تر در لایه آسفالتی قرار گرفته در عمق) کمک کند.

۵. ارزیابی مدل بلز در پیش‌بینی دمای عمق لایه آسفالتی

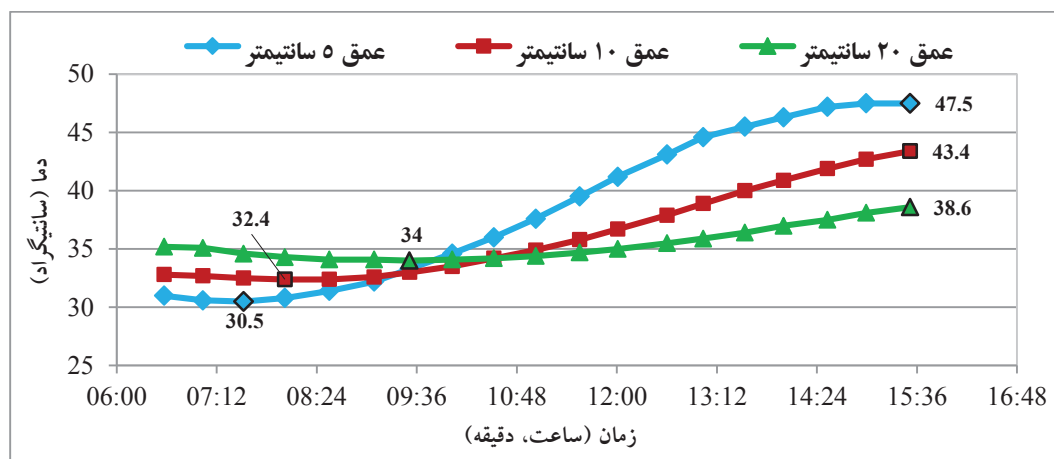
در این تحقیق منظور از مدل بلز استفاده از رابطه بلز ۳ (رابطه ۱) با ضرایب بلز ۳ در جدول ۱) است که به منظور آزمایش‌های معمول دستگاه ۳) FWD الی ۴ سقوط وزنه در هر نقطه) استفاده می‌شود.

انتخاب گردید که نمودار دماهای سه گانه آن در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود در ضخامت کم لایه آسفالتی تغییرات دمای عمق (در این محور تقریباً ۴ سانتیمتر) و دمای سطح لایه آسفالتی تقریباً مشابه یکدیگر است. اما دمای سطح به دلیل اینکه در معرض جریان هوا و وزش باد قرار دارد، در تمام ساعات روز مقداری کمتر از دمای عمق لایه آسفالتی است.

در نمودارهای ۴ الی ۶ تغییرات دمای عمق به همراه دمای سطح و هوا در سه محور با ضخامت متفاوت لایه آسفالتی ارائه گردید. همان طور که در شکلها دیده می‌شود، تغییرات دمای عمق لایه آسفالتی در طول روز تقریباً از تابع سینوس تبعیت می‌کند. اگر برداشت دما در ساعات بیشتری از شبانه‌روز انجام می‌شد شکل تابع سینوس آشکارتر می‌گردید، اما به دلیل رعایت مسائل ایمنی و ترافیک این کار میسر نبوده است. در شکل ۷، دما در سه عمق ۵، ۱۰ و ۲۰ سانتیمتری از محور سیرجان- بندر عباس با ضخامت کل ۳۰ سانتیمتر برای لایه آسفالتی به منظور بررسی تغییرات دما در عمق لایه آسفالتی ارائه گردیده است. با توجه به شکل ۷، محدوده تغییرات دما (اختلاف حداقل و حداکثر دما در کل زمان انجام آزمایش) در عمق‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ سانتیمتری به ترتیب برابر ۱۷/۵، ۱۱ و ۴/۶ درجه سانتیگراد بوده است. همان طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود با افزایش عمق لایه آسفالتی شیب تغییرات دما و محدوده تغییرات آن کاهش یافته است. همان طوری که در این شکل نشان داده شده است آستانه افزایش دما



شکل ۶. نمودار تغییرات دمای هوا، دمای سطح و دمای عمق لایه آسفالتی در محور اهواز- شیرین شهر (۹۲/۰۶/۰۶)



شکل ۷. تغییرات دما در عمق‌های مختلف لایه آسفالتی در محور سیرجان- بندر عباس

عبارت دیگر نقاطی که بر روی این خط قرار گیرند، دمای عمق حاصل از مدل بلز و اندازه‌گیری مستقیم در آنها برابر است. در حالت ایده‌آل بایستی تمام نقاط بر روی خط منقطع قرار گیرند که در این صورت شیب خط برازش برابر یک، عرض از مبدا برابر صفر و ضریب تعیین مدل برازش خطی یک خواهد بود. در صورتی که داده‌های نشان داده شده در نمودار از خط منقطع فاصله گرفته و به یکی از محورهای افقی و عمودی نزدیک شوند، مقادیر آن محور از محور مقابل بیشتر شده و پارامترهای برازش خطی بین مقادیر، ضعیف می‌شوند.

همان طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، در اغلب موارد دمای عمق حاصل از مدل بلز از مقادیر اندازه‌گیری شده کمتر است. هر چند قرار گرفتن بخشی از داده‌ها بر روی خط منقطع نشان می‌دهد که مدل بلز در بعضی از قطعات، دمای عمق را با دقت خوبی پیش‌بینی نموده است. شیب خط برازش رسم شده بین داده‌ها نزدیک به ۱ است که نشانگر روند تغییرات مشابه دمای اندازه‌گیری شده و دمای پیش‌بینی شده است. هر چند ضریب تعیین برازش با مقدار 0.85 بالاتر از حد متوسط است اما برای مدل بلز در پیش‌بینی دمای عمق لایه آسفالتی قابل قبول نیست. عرض از مبدا رابطه برازش در حالت ایده‌آل بایستی صفر باشد که در شکل ۸ مقدار ۱ به دست آمده است.

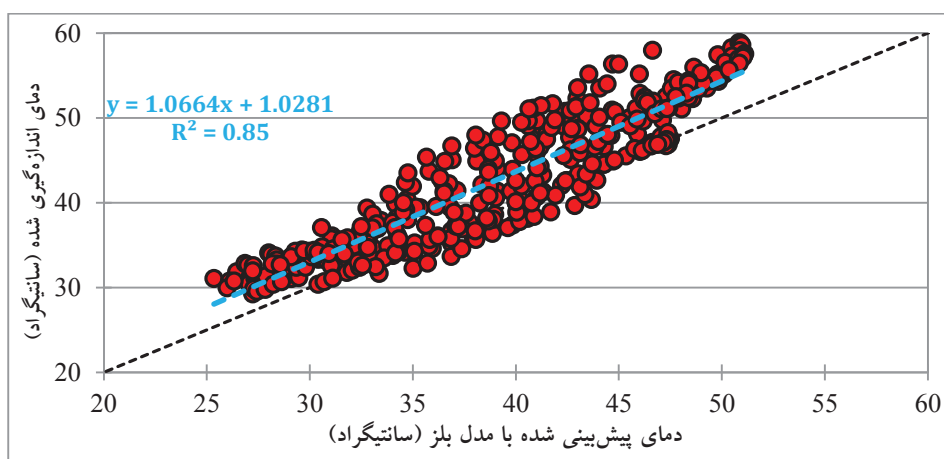
به منظور تحلیل نتایج و تعیین علت کاهش مقدار ضریب تعیین در رابطه بلز قطعات انتخابی بطور مجزا مورد بررسی قرار

به منظور ارزیابی مدل بلز در پیش‌بینی دمای عمق لایه آسفالتی، دمای حاصل از اندازه‌گیری در نیمه و یک سوم ضخامت لایه آسفالتی با دمای به دست آمده از مدل بلز مقایسه گردید. داده‌های مورد نیاز برای مدل بلز شامل دمای سطح آسفالت (حاصل از قرائت دستگاه FWD)، زمان انجام آزمایش در روز (حاصل از دستگاه FWD)، میانگین دمای هوا در روز قبل از آزمایش (حاصل از سازمان هواشناسی استان) و عمق تعیین دما (حاصل از مغزه‌گیری) است که در جدول ۳ به عنوان نمونه برای محور اهواز- حمیدیه ۱ با ضخامت کل ۱۱۵ میلیمتر ارائه شده است. در این محور، دماهای عمق و سطح لایه آسفالتی در هر نیم ساعت از ۸ صبح تا ۶ بعد از ظهر اندازه‌گیری شده است. همچنین دمای عمق حاصل از اندازه‌گیری مستقیم و مدل بلز در دو عمق $d/3$ و $d/2$ با یکدیگر مقایسه گردیده است. همچنین مقدار دمای اندازه‌گیری شده در دو عمق $d/3$ و $d/2$ با استفاده از دماسنج نیز ارائه گردیده است. همان طور که ملاحظه می‌شود نتایج حاصل از مدل بلز در تمام ساعات روز کمتر از دمای واقعی اندازه‌گیری شده بود که این اختلاف در انتهای روز نیز بیشتر شد. علاوه بر محور اهواز- حمیدیه (قطعه ۱) که نتایج آن در جدول ۳ ارائه گردیده است، برای محورهای دیگر نیز دمای عمق لایه آسفالتی با استفاده از مدل پیش‌بینی بلز و دمای واقعی اندازه‌گیری شده در شکل ۸ مقایسه گردید. در این شکل خط منقطع (خط با زاویه 45° درجه) نشانگر نقاط دارای مقادیر X و Y برابر در نمودار است به

ارزیابی مدل بلز در پیش‌بینی دمای عمق لایه آسفالتی در شرایط دمای گرم

جدول ۳. مقایسه مدل بلز و اندازه‌گیری مستقیم در تعیین دمای عمق لایه آسفالتی در محور اهواز - حمیدیه (قطعه ۱) (۹۲/۰۶/۰۳)

دما در عمق d/2 (سانتیگراد)		دما در عمق d/3 (سانتیگراد)		میانگین دمای هوا در یک روز قبل (سانتیگراد)	دمای سطح آسفالت (سانتیگراد)	زمان اندازه‌گیری دما (دقیقه : ساعت)
اندازه‌گیری	بلز	اندازه‌گیری	بلز			
۳۴/۸	۳۱/۴	۳۳/۷	۳۰/۱	۳۷/۷	۳۱/۳	۸:۰۵
۳۷/۸	۳۲/۳	۳۴/۶	۳۱/۱	۳۷/۷	۳۲/۸	۸:۳۱
۳۷/۷	۳۳/۰	۳۵/۹	۳۱/۸	۳۷/۷	۳۳/۸	۹:۰۱
۳۸/۷	۳۴/۲	۳۷/۶	۳۳/۳	۳۷/۷	۳۵/۸	۹:۳۱
۳۹/۹	۳۶/۸	۳۹/۶	۳۶/۱	۳۷/۷	۳۹/۸	۱۰:۰۲
۴۱/۴	۳۹/۱	۴۲	۳۸/۷	۳۷/۷	۴۳/۳	۱۰:۳۰
۴۳/۳	۴۱/۳	۴۴/۴	۴۱/۲	۳۷/۷	۴۶/۳	۱۱:۰۰
۴۵/۱	۴۲/۷	۴۶/۳	۴۲/۷	۳۷/۷	۴۸/۲	۱۱:۳۱
۴۶/۷	۴۴/۳	۴۸	۴۴/۴	۳۷/۷	۵۰/۲	۱۲:۰۲
۴۸/۲	۴۵/۹	۴۹/۶	۴۶/۲	۳۷/۷	۵۲/۱	۱۲:۳۱
۴۹/۸	۴۷/۱	۵۱/۲	۴۷/۴	۳۷/۷	۵۳/۲	۱۳:۰۲
۵۱/۱	۴۸/۱	۵۲/۴	۴۸/۴	۳۷/۷	۵۳/۹	۱۳:۳۰
۵۲/۳	۴۸/۶	۵۳/۴	۴۸/۹	۳۷/۷	۵۳/۹	۱۴:۰۰
۵۳/۶	۴۹/۳	۵۴/۵	۴۹/۵	۳۷/۷	۵۴	۱۴:۳۶
۵۴/۴	۴۹/۸	۵۵/۱	۵۰	۳۷/۷	۵۴/۱	۱۵:۰۵
۵۴/۷	۴۹/۸	۵۵/۲	۴۹/۹	۳۷/۷	۵۳/۴	۱۵:۳۰
۵۵/۲	۵۰/۱	۵۵/۵	۵۰/۲	۳۷/۷	۵۳/۳	۱۶:۰۰
۵۵/۱	۴۹/۹	۵۵/۲	۴۹/۸	۳۷/۷	۵۲/۴	۱۶:۳۱
۵۴/۹	۴۹/۹	۵۴/۸	۴۹/۷	۳۷/۷	۵۲/۰	۱۷:۰۱
۵۴/۴	۴۹/۴	۵۴/۱	۴۹/۱	۳۷/۷	۵۱	۱۷:۳۰
۵۳/۶	۴۸/۷	۵۳/۲	۴۸/۲	۳۷/۷	۴۹/۷	۱۸:۰۱



شکل ۸. مقایسه نتایج حاصل از مدل بلز در مقابل اندازه‌گیری مستقیم دما در ۱۰ قطعه انتخابی

اندازه‌گیری و مدل بلز را در عمق $d/3$ از قطعه اهواز- حمیدیه ۲ (۶۳ میلیمتر) با عمق $d/2$ از قطعه کمربندی سیرجان و یا قطعه سیرجان- بافت (۶۰ میلیمتر) مقایسه کرد. همان طور که مشاهده می‌شود، اختلاف دو دما در قطعه اهواز- حمیدیه ۲ به عنوان روسازی قدیمی صفر بوده، در حالی که در دو قطعه دیگر میزان اختلاف $1/4$ و $6/6$ است. این مساله را می‌توان در مقایسه اختلاف دمایی در عمق $d/3$ از قطعه اهواز- خرمشهر (۷۳ میلیمتر) و عمق $d/2$ از قطعه سیرجان شهر- بابک (روسازی قدیمی ۲ درجه و روسازی جدید $6/5$ درجه سانتیگراد) مشاهده نمود. همان طور که ملاحظه می‌شود، در عمقهای یکسان نیز مدل بلز تخمین دقیق‌تری از دما در روسازیهای قدیمی ارائه می‌کند.

از طرف دیگر در تمام روسازیهای تازه‌ساخت مورد مطالعه در هر دو عمق $d/2$ و $d/3$ دمای واقعی اندازه‌گیری شده، بیشتر

گرفتند. در جدول ۴ میانگین دمای حاصل از مدل بلز و دمای اندازه‌گیری شده در دو عمق $d/2$ و $d/3$ در قطعات انتخابی تعیین و با یکدیگر مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، بیشترین اختلاف بین دمای حاصل از مدل بلز و دمای اندازه‌گیری شده در ۶ قطعه اتفاق افتاده که روسازی آنها تازه‌ساخت بوده است. روسازی‌های آسفالتی تازه‌ساخت رنگ تیره‌تری نسبت به روسازی‌های قدیمی داشتند و ضخامت آنها نیز اغلب کمتر از ۱۵ سانتیمتر بود.

در جدول ۴ ضخامت کل آسفالت در قطعات مختلف و همچنین عمق مورد نظر برای اندازه‌گیری و پیش‌بینی دما (عمقهای $d/2$ و $d/3$) ارائه گردیده است. در این جدول می‌توان اختلافات دمایی را در عمقهای یکسان از روسازی‌های قدیمی و جدید مورد بررسی قرار داد. به این ترتیب می‌توان اختلاف دمای

جدول ۴. مقایسه میانگین دمای حاصل از مدل بلز و اندازه‌گیری مستقیم در قطعات انتخابی

محل	نام قطعه	مشخصه قطعه	ضخامت کل آسفالت (میلی‌متر)	میانگین دما در عمق $d/3$ (سانتیگراد)		میانگین دما در عمق $d/2$ (سانتیگراد)		اختلاف
				عمق (میلی‌متر)	اندازه	عمق (میلی‌متر)	اندازه	
بلزستان	اهواز- شوش	روسازی جدید	۹۵	۳۲	۴۸/۵	۴۳/۱	۵/۴	۶
	اهواز- حمیدیه ۱	روسازی جدید	۱۱۵	۳۸	۴۷/۹	۴۳/۷	۴/۳	۳/۷
	اهواز- حمیدیه ۲	روسازی قدیمی	۱۹۰	۶۳	۴۰/۶	۴۰/۶	۰	۰/۱
	اهواز- خرمشهر	روسازی قدیمی	۲۲۰	۷۳	۴۳	۴۱	۲	۰/۶
	اهواز- شیرین شهر	روسازی جدید	۷۵	۲۵	۴۶/۶	۴۱/۶	۵/۳	۴/۶
	سیرجان- شهر بابک	روسازی جدید	۱۴۴	۴۸	۴۲/۴	۳۴/۹	۷/۶	۶/۵
	سیرجان- بندر عباس ۱	روسازی قدیمی	۳۰۰	۱۰۰	۳۶/۳	۳۵/۷	۰/۶	۰/۲
	سیرجان- بندر عباس ۲	روسازی قدیمی	۴۰۰	۱۳۳	۳۵/۳	۳۴	۱/۳	۰/۷
	کمربندی سیرجان	روسازی جدید	۱۲۰	۴۰	۴۰/۶	۳۵/۴	۵/۱	۴/۱
	سیرجان- بافت	روسازی جدید	۱۲۰	۴۰	۴۴/۳	۳۶/۱	۸/۲	۶/۶

ارزیابی مدل بلز در پیش‌بینی دمای عمق لایه آسفالتی در شرایط دمای گرم

دستگاه در پایگاه داده آنها موجود است. در شکل ۹ برازش دمای عمق پیش‌بینی شده با مدل بلز در مقابل مقدار واقعی اندازه‌گیری شده در روسازی‌های قدیمی ترسیم گردیده است.

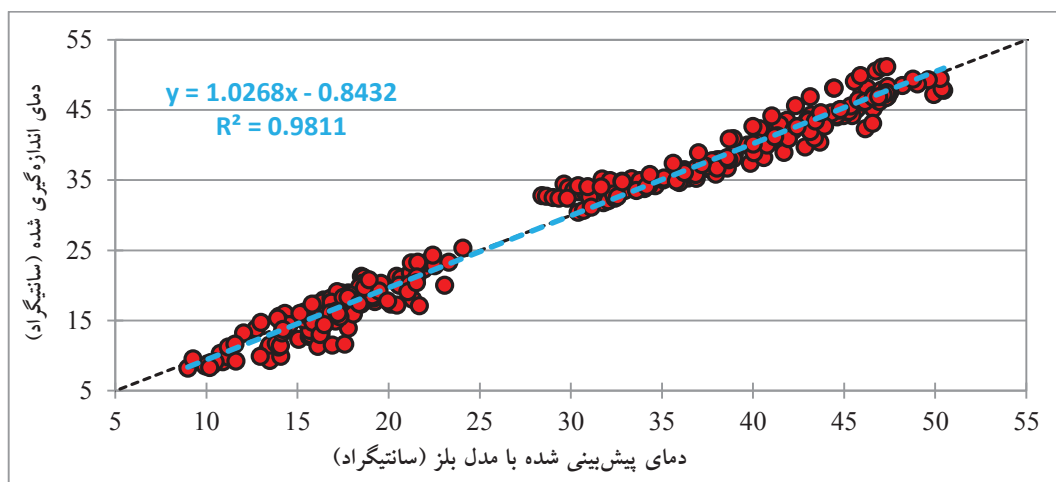
همان طور که مشاهده می‌شود ضریب تعیین به دست آمده ۹۸ درصد بوده که ۱۴ درصد بیشتر از مقدار ضریب تعیین در شکل ۸ (ترکیب داده‌های دما در روسازیهای قدیمی و جدید) است. تفاوت اصلی این دو نوع روسازی در خصوصیات حجمی مخلوط (که منجر به تفاوت در خصوصیات حرارتی آنها می‌شود) است. بنابراین می‌توان پارامترهای جدیدی از خصوصیات حرارتی مخلوط آسفالتی را در مدل بلز اضافه کرد، اما سهولت استفاده از این مدل کاهش یافته و قبل از بکارگیری آن در هر پروژه بایستی آزمایشهایی بر روی مخلوط آسفالتی انجام شود. این در حالی است که می‌توان با صرف زمان بیشتر دمای عمق لایه آسفالتی را در حین آزمایش FWD اندازه‌گیری نمود. بنابراین اصلاح مدل بلز در روسازی‌های تازه ساخت مد نظر قرار گرفت.

۶. اصلاح مدل بلز برای روسازی‌های آسفالتی جدید

همان طور که ملاحظه گردید، مدل بلز در روسازی‌های تازه ساخت، خطای نسبتاً زیادی را در پیش‌بینی دمای عمق لایه آسفالتی نشان داد، بنابراین برای بهبود عملکرد مدل در این نوع روسازی‌ها، استفاده از برازش خطی چند پارامتری در

از دمای پیش‌بینی شده با مدل بلز است. آنچه که مسلم است بر اساس مطالب بیان شده در روسازیهای تازه‌ساخت دما در عمقی مشخص از لایه آسفالتی، با سرعت بیشتری نسبت به روسازی‌های قدیمی افزایش می‌یابد. این مساله ناشی از خصوصیات سطحی و گرمایی این دو نوع روسازی است. روسازی‌های قدیمی عموماً دارای ضخامت زیاد بوده و این ضخامت حاصل روکشهای متوالی در طی سالیان مختلف است. در حالی که در روسازیهای جدید (بستگی به میزان ترافیک و مقاومت بستر روسازی بر اساس طرح)، به جهت مسائل اقتصادی تمایلی به اجرای بیش از سه لایه وجود ندارد. لایه‌های آسفالتی در روسازی‌های قدیمی که بعضاً ممکن است تعداد آنها به ۷ لایه هم برسد از نظر نوع مصالح و قیر، عمر و خصوصیات حجمی با یکدیگر متفاوت هستند که این مساله روی خصوصیات حرارتی لایه‌ها اثرگذار است. اما لایه‌های آسفالتی در روسازی‌های تازه ساخت حداقل از نظر نوع مصالح و قیر و همچنین عمر لایه‌ها یکسان هستند.

به منظور برازش دمای حاصل از مدل بلز و دمای اندازه‌گیری شده در محورهای قدیمی علاوه بر قطعات آزمایش شده در این تحقیق از داده‌های موجود در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک نیز استفاده گردید. مهندسین مشاور شرکت آزمایشگاه مکانیک خاک در تمام پروژه‌های طرح بهسازی از دستگاه FWD استفاده می‌کند بنابراین دمای اندازه‌گیری شده و دمای سطح قرائت شده از



شکل ۹. مقایسه نتایج حاصل از مدل بلز در مقابل اندازه‌گیری مستقیم دما در روسازی‌های با عمر زیاد (روسازی‌های قدیمی)

در مدل اول ۱/۰۹۶ محاسبه شد که خطای استاندارد ۰/۹۰۹ برای آن زیاد بوده و موجب کاهش مقدار t شده است. در این مدل ضریب β_4 با مقدار P-value برابر ۰/۲۲۹ نشان دهنده عدم وجود معنی‌داری با احتمال بالای ۹۵ درصد با مقدار پارامتر وابسته است. برای اصلاح این مورد، تحلیل برازش با حذف ضریب β_4 مجدداً انجام و نتایج آن در جدول ۵ در قالب مدل ۲ ارائه گردید. در این مدل که به عنوان مدل اصلاح شده بلز در روسازی‌های تازه ساخت پیشنهاد می‌شود ضرایب، نسبت به مدل ۱ اصلاح و مقدار پارامتر آماری t در تمام متغیرها افزایش یافته است که با توجه به مقدار P-value نشان می‌دهد سطح معنی‌داری تمام ضرایب در مدل بالای ۹۵ درصد است. بنابراین به منظور ارزیابی سازه‌ای روسازی‌های تازه ساخت پیشنهاد می‌گردد دمای عمق لایه آسفالتی با استفاده از مدل اصلاح شده بلز ۳ مطابق رابطه ۲ تعیین گردد.

$$T_d = 1.725 + 1.022 \times IR + [\log(d) - 1.25] \times [-0.419(2) \times IR + 0.491 \times T_{(1-day)} + 0.054 \times IR \sin(hr_{18} - 13.5)]$$

در شکل ۱۰ نمودار همبستگی دمای عمق حاصل از مدل بلز اصلاح شده و روش اندازه‌گیری مستقیم در روسازی‌های تازه‌ساخت ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود ضریب تعیین، بیشتر از ۹۶ درصد بوده و همچنین شیب خط برازش ۱ و عرض از مبدا آن نزدیک به صفر است. بنابراین دقت مدل بلز در پیش‌بینی دمای عمق لایه آسفالتی در روسازی‌های تازه‌ساخت به طور محسوسی افزایش یافته است.

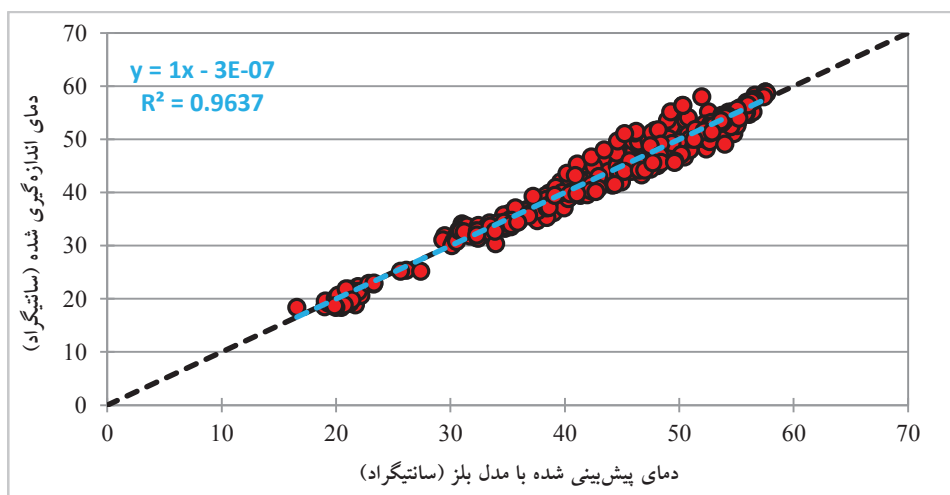
نرم‌افزار SPSS برای کالیبراسیون مدل در دستور کار قرار گرفت. در این تحلیل پارامتر وابسته، دمای اندازه‌گیری شده در عمقهای $d/2$ و $d/3$ از ضخامت لایه آسفالتی در نظر گرفته شد و سپس نسبت به اصلاح ضرایب مدل بلز موجود اقدام گردید. داده‌های مورد استفاده در کالیبراسیون مدل بلز تنها مربوط به روسازی‌های تازه ساخت شامل ۶ قطعه برداشت شده در این تحقیق و همچنین داده‌های موجود در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک در دو استان کرمان و خوزستان هستند. پارامترهای مستقل به ترتیب نشان داده شده در جدول ۵ از مدل بلز استخراج گردیده تا ضرایب مدل برازش مشابه تعریف استاندارد تعیین گردد. در این جدول، ۵ ضریب و یک عرض از مبدا (ضریب ثابت β_0) برای مدل بلز تعریف شده که در ستون سوم مقدار همبستگی پیرسون ضرایب با پارامتر وابسته مدل (دمای عمق اندازه‌گیری شده) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، تمام پارامترهای مستقل به صورت مستقیم با دمای عمق ارتباط داشته و در بین آنها دمای سطح روسازی ($R = 0.971$) بیشترین تاثیر را بر روی پارامتر وابسته مدل (دمای عمق اندازه‌گیری شده) دارد.

پس از تعیین ضریب همبستگی پارامترها، تحلیل برازش خطی روی داده‌ها انجام و نتایج آنها در قالب دو مدل با ضریب تعیین یکسان ($R^2 = 0.964$) در جدول ۵ ارائه گردید. در هر یک از مدلها ضرایب پارامترهای مستقل در ستون اول و سه پارامتر آماری خطای استاندارد ضرایب، مقدار t و معنی‌داری ضریب در سه ستون بعدی ارائه شده است. مقدار ضریب β_4

جدول ۵. پارامترهای آماری مدل اصلاح شده بلز برای روسازی‌های جدید

مدل ۲ ($R^2=0.964$)			مدل ۱ ($R^2=0.964$)			همبستگی		ضرایب		پارامترهای مستقل
P-value	t	Std. Error	ضرایب	P-value	t	Std. Error	ضرایب	پیرسون	برازش	
۰/۰۰۳	۲/۹۵۹	۰/۵۸۳	۱/۷۲۵	۰/۰۰۲	۳/۰۹۵	۰/۷۲۶	۲/۲۴۸	---	β_0	Constant
۰/۰۰۰	۷۸/۴۷۵	۰/۰۱۳	۱/۰۲۲	۰/۰۰۰	۶۱/۰۳۶	۰/۰۱۷	۱/۰۱۰	۰/۹۷۱	β_1	IR
۰/۰۰۰	-۱۱/۹۹۸	۰/۰۳۵	-۰/۴۱۹	۰/۰۰۰	-۹/۵۱۹	۰/۰۴۱	-۰/۳۹۲	۰/۲۶۰	β_2	$[\log_{10} d - 1.25]$ IR
۰/۰۰۰	۱۱/۷۹۳	۰/۰۴۲	۰/۴۹۱	۰/۰۰۰	۱۰/۵۰۹	۰/۰۴۵	۰/۴۷۱	۰/۱۹۶	β_3	$[\log_{10} d - 1.25]$ $T_{(1-day)}$
---	---	---	---	۰/۲۲۹	۱/۲۰۵	۰/۹۰۹	۱/۰۹۶	۰/۵۸۳	β_4	$[\log_{10} d - 1.25] \sin(hr_{18} - 15.5)$
۰/۰۰۰	۸/۸۹۵	۰/۰۰۶	۰/۰۵۴	۰/۰۰۰	۳/۸۵۲	۰/۰۱۱	۰/۰۴۲	۰/۳۵۴	β_5	IR $\sin(hr_{18} - 13.5)$

ارزیابی مدل بلز در پیش‌بینی دمای عمق لایه آسفالتی در شرایط دمای گرم



شکل ۱۰. مقایسه نتایج حاصل از مدل بلز اصلاح شده در مقابل اندازه‌گیری مستقیم دما روسازیهای تازه‌ساخت

۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از داده‌های برداشت شده در دو استان کرمان و خوزستان، تغییرات دمای هوا، دمای سطح و دمای عمق روسازی در طول یک روز مورد بررسی و در ادامه مدل بلز در پیش‌بینی دمای عمق لایه آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از ملاحظه اختلاف نتایج مدل بلز و دمای اندازه‌گیری شده در روسازی‌های تازه ساخت، اصلاح مدل در این نوع روسازی‌ها انجام و نتایج زیر حاصل گردید.

۱. اندازه‌گیری مستقیم دما با سوراخ کردن لایه آسفالتی در هنگام انجام آزمایش FWD زمانبر بوده و به علت عدم اطلاع از ضخامت لایه ممکن است در وسط عمق لایه قرائت نگردد. همچنین در این روش دمای عمق لایه آسفالتی به تمام نقاط بارگذاری شده تا نقطه بعدی اندازه‌گیری دما (۱ الی ۵/۱ ساعت بعد) تعمیم داده شده و از این جهت تغییرات دمای عمق در طول پروژه بدرستی مشخص نمی‌گردد.

۲. با استفاده از روشهای آشتو و بلز بدون ایجاد وقفه در آزمایش FWD به هر نقطه بارگذاری شده یک دمای عمق منحصر به فرد اختصاص می‌یابد و از این جهت نسبت به اندازه‌گیری مستقیم دما برتری دارند. خطای مدل بلز نسبت به روش آشتو به دلیل استفاده از میانگین دمای یک روز قبل از آزمایش FWD و همچنین در نظر گرفتن شیب دمایی در لایه آسفالتی، کمتر است.

۳. با افزایش عمق در لایه آسفالتی محدوده تغییرات دما کاهش می‌یابد در محور سیرجان- بندر عباس با ضخامت قشر آسفالتی برابر ۳۰۰ میلیمتر، در عمق ۵ سانتیمتری ۱۷/۵ درجه و در عمق ۲۰ سانتیمتر ۴/۶ درجه سانتیگراد اختلاف دما از ساعت ۸ صبح تا ۱۸ عصر (۱۰ ساعت) بوجود آمد. با شناخت محدوده تغییرات دمای عمق لایه آسفالتی می‌توان استفاده از نوع قیر و مصالح متفاوت را در هر لایه مورد بررسی قرار داد.

۴. مقایسه دمای عمق مدل بلز و دمای عمق اندازه‌گیری شده با استفاده از برازش تک پارامتری انجام و ضریب تعیین ۰/۸۵ حاصل شد. تحلیل برازش مشابه تنها بر روی قطعات با روسازی قدیمی، ضریب تعیین ۰/۹۸ را نتیجه داد که نشان می‌دهد مدل پیش‌بینی بلز در روسازی‌های قدیمی از دقت بالایی برخوردار بوده و علت کاهش ضریب تعیین در کل قطعات روسازی خطای پیش‌بینی دمای عمق در روسازی‌های تازه ساخت است.

۵. مقایسه اختلاف دمای عمق حاصل از بلز و اندازه‌گیری مستقیم در عمق یکسان از روسازیهای قدیمی و جدید، عدم دقت مدل بلز در روسازی‌های جدید را تایید کرد. در تمام روسازیهای تازه ساخت نتایج مدل بلز کمتر از دمای عمق اندازه‌گیری شده به دست آمد.

۶. به منظور افزایش دقت مدل بلز در روسازی‌های تازه ساخت، تحلیل برازش داده‌های دمایی در ۶ قطعه از این نوع روسازی

- ASTM (2012) "ASTM D7228: standard test method for prediction of asphalt-bound pavement layer temperatures", American Society For Testing and Materials, USA.

- Bazi, G. (2010) "Evaluation of layer moduli and overlay design software", Elmod6 Training Manual, Dynatest.

- Ding, K. (2005) "Effects of mix design factors on thermal behavior of hot mix asphalt", the University of New Brunswick.

- Emmanuel, G. Fernando, Wenting L. and Duchwan R. (2001) "Development of a procedure for temperature correction of backcalculated ac modulus", Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation Office, FHWA/TX-02/1863-1.

- Everitt, P. R. (2001) "Prediction of asphalt pavement temperatures in south Africa", 20th South African Transport Conference, University of Natal, Durban, pp. 16 – 20.

- Inge, E. H. and Kim, Y. R. (2013) "Prediction of effective asphaltic layer temperature", Transportation Research Record, No. 1473, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1995, pp. 93-100. HD 29/08, Volume 7, Section 3, Part 2, data for pavement assessment, design manual for roads and bridges, highway agency, UK government.

- Korczak, R. and Tighe, S. (2012) "Use of an automated temperature data logger (ATDL) during falling weight deflectometer (FWD) testing", Conference of Transportation Association of Canada Fredericton, Advances in Pavement Evaluation and Instrumentation Session, New Brunswick.

- Lukanen, E. and Stubstad, R. (2000) "Temperature predictions and adjustment factors for asphalt pavement", Office of Infrastructure Research And Development Federal Highway Administration, FHWA-RD-98-085.

- Petersen, C. and Mahura, A. (2012) "Influence of the pavement type on the road surface temperature", Danish Meteorological Institute, Copenhagen, Denmark.

انجام و ضرایب مدل بلز اصلاح گردید. در مدل اصلاح شده یکی از توابع سینوسی به دلیل مقدار P-value بالا معنی‌داری لازم با پارامتر وابسته را نداشته و از مدل کنار گذاشته شد. در نهایت مدل بلز اصلاح شده با ضریب تعیین ۹۶/۰ برای استفاده در روسازی‌های تازه ساخت پیشنهاد گردید.

۸. پی‌نوشتها

- 1- Heat Transfer
- 2- Conduction
- 3- Convection
- 4- Radiation
- 5- Conductivity
- 6- Diffusivity
- 7- Heat specific capacity
- 8- Thermal property
- 9- Miners Law
- 10- Falling Weight Deflectometer
- 11- Evaluation of Layer moduli and Overlay Design
- 12- American Association of State Highway and Transportation Official
- 13- Reference Temperature
- 14- Federal Highway Administration
- 15- Long Term Pavement Performance
- 16- American Society of Testing and Material
- 17- BELLS model
- 18- Pearson coefficient

۹. مراجع

- Austroads (2013) "Improved design procedures for asphalt pavements: pavement temperature and load frequency estimation", Austroads Project No. TT1826, Technical Report, AP-T248-13 September 2013, Australia.

- AASHTO (1993) "AASHTO guide for design of pavement structure", American Association of State Highway and Transportation Official, USA.

- AASHTO (2012) "prediction of asphalt-bound pavement layer temperatures", American Association of State Highway and Transportation Official, AASHTO T317, USA.

ارزیابی مدل بلز در پیش‌بینی دمای عمق لایه آسفالتی در شرایط دمای گرم

- Stubstad, R. N., Baltzer, S., Lukanen, E. O. and Ertman-Larsen, H. J. (1994) "Prediction of ac mat temperatures for routine load/deflection measurements. Proc.", 4th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, Vol. 1, Minneapolis, Minn.
- Vasenev, A., Hartmann, T. and Doree, A. (2012) "Prediction of the in-asphalt temperature for road construction operations" Computing in Civil Engineering (2012): pp. 469-476.
- Yavuzturk C. and Ksaibati, K (2002) "Assessment of temperature fluctuations in asphalt pavements due to thermal environmental conditions using a two-dimensional, transient finite difference approach", Department of Civil and Architectural Engineering, University of Wyoming.