بررسی ومدلسازی تاثیر ویژگی‌های اقلیمی بر میزان آب موردنیاز پاششی بر سطح بتن تازه در رویه‌ی راه‌ها

محمدمهدی خبیری[1]، محمدمهدی مجیدی شاد[2]

۱- عضوهیئت علمی دانشکده مهندسی عمران،دانشیار راه وترابری،پردیس فنی ومهندسی،دانشگاه یزد،یزد،ایران

۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران،راه وترابری، دانشکده مهندسی عمران،پردیس فنی ومهندسی،دانشگاه یزد،یزد،ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده رابط (mkhabiri@yazd.ac.ir)

چکیده

در شرایط محیطی و آب و هوایی مختلف عمل‌آوری بتن روش‌ها و مراحل بسیار دقیقی را نیاز دارد، به عنوان نمونه بتن‌ریزی در شرایط محیطی گرم و خشک، مدیران پروژه‌ها و مهندسین اجرایی را برای رسیدن به هدف کارآیی مطلوب و دوام مناسب با چالش‌هایی مواجه می‌کند. زمانی که بتن رطوبت سطحی خود را از دست می‌دهد، در صورتی که این رطوبت تامین نشود، دچار جمع‌شدگی و کاهش حجم شده و در نهایت باعث ایجاد ترک و افزایش تغییر شکل در بتن می‌شود. در این مطالعه با توجه به نیاز به محاسبه میزان تبخیر آب سطحی بتن و تامین آن توسط پاشش آب، از داده‌های اقلیمی مرتبط با مناطق گرم و خشک کشور استفاده شد. نتایج مدلسازی نشان می‌دهد، اگر دمای هوا بیش از ۲۰ درجه باشد متوسط آب موردنیاز سطحی بتن بیش از ۲لیتر در ساعت به ازاء هرمترمربع می‌شود. در مورد مهمترین متغیرهای مستقل تاثیرگذار بر میزان آب موردنیاز پاششی بر روی بتن نمایش دمای هوا، دمای بتن، سرعت وزش باد و میزان رطوبت هوا به ترتیب دارای اهمیت هستند. بنابراین پیشنهاد شده است، اجرا روسازی در ساعاتی از شبانه‌روز با تبخیر کمتر و یا کاهش دمای بتن در زمان اجراء و به کار بردن کاهنده‌های تبخیر است که تا ۵۰ درصد می‌توان تبخیر آب را کاهش داد.

کلمات کلیدی: **آب پاششی، عمل‌آوری، شرایط اقلیمی، روسازی راه، بتن تازه، مدلسازی آماری.**

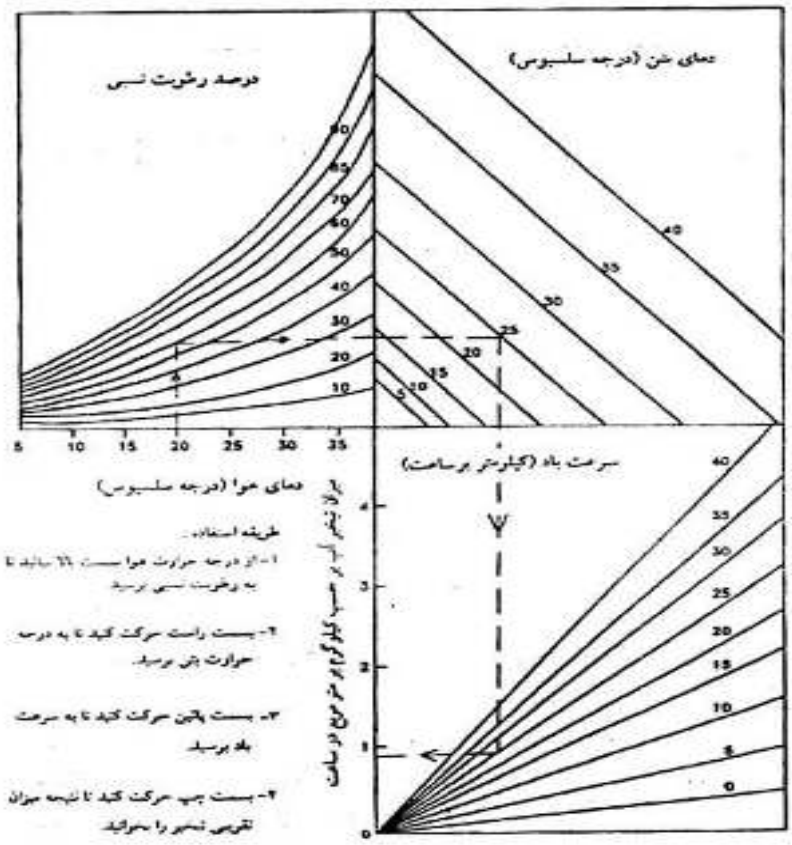
۱. مقدمه

مجموعه عملیاتی که بلافاصله بعد از بتن‌ریزی برای حفظ رطوبت و دمای بتن می‌شود عمل‌آوری بیان می‌شود. در شرایط محیطی و آب و هوایی مختلف عمل‌آوری بتن روش‌ها و مراحل بسیار دقیقی را نیاز دارد، به عنوان نمونه بتن‌ریزی در شرایط محیطی گرم و خشک، مدیران پروژه‌ها و مهندسین اجرایی را برای رسیدن به هدف کارآیی مطلوب و دوام مناسب با چالش‌هایی مواجه می‌کند. آیئن‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های بین‌المللی و داخلی معیارهای حداقلی را برای عمل‌آوری بتن مبتنی بر مراقبت و تأمین شرایط لازم بر تکمیل واکنش‌های درونی پیش‌بینی نموده‌اند. دمای زیاد یا وزش تندباد می‌تواند بروز مشکلاتی را در عمل‌آوری بتن به وجود آورد. بنابراین اهمیت عمل‌آوری صحیح و رعایت آن در طی زمان مشخص‌شده از افت کیفیت بتن جلوگیری بعمل می‌آورد و لذا ضروری است عوامل مؤثر در عمل‌آوری بتن و نگهداری آن در شرایط آب و هوایی گوناگون بررسی نمود و راهکارهای عملیاتی برای رعایت حداقل شرایط استاندارد پیشنهاد نمود. راهکارهایی برای کاهش صدمات ناشی از عمل‌آوری نامناسب پیشنهاد شده است از قبیل استفاده از ضدیخ‌ها، مواد افزودنی زودگیر، فومهای حرارتی عایق‌بندی بتن تازه از اشعه فروسرخ برای بتن‌ریزی در شرایط دمایی سرد و برای محدوده‌های گرم استفاده از واکس و رزین‌ها، صفحات پلاستیکی نگهدارنده‌ی رطوبت، نم‌پاشی خودکار بتن معرفی شده‌اند [۱].

با توجه به تاثیر عوامل مختلف در کاهش رطوبت سطحی بتن به ویژه در بتن‌ریزی‌های با سطح تماس محیطی زیاد نظیر جاده‌ها و رویه‌های بتنی، در این مطالعه به موضوع عدم عمل‌آوری مناسب بتن‌های سطح پرداخته می‌شود. تبخیر آب نفوذکرده موجود در سطح در رویه‌های بتنی به چهار عامل سرعت باد، دمای هوا و رطوبت نسبی آن و نیز دمای بتن دارد. برای متغیرهای مختلف موجود از طریق دستورالعمل‌های موجود در نمودار و روابط توصیه‌شده در آئین‌نامه‌های استاندارد بین‌المللی میزان تبخیر رطوبت سطحی بتن محاسبه شود و براساس نتایج آن راهکارهایی جهت تامین رطوبت سطحی پیشنهاد گردد یا روش‌هایی برای کاهش میزان تبخیر ارائه گردد.

۲. مبانی علمی محاسبه میزان تبخیر سطحی رطوبت در رویه‌های بتنی

تبخیر از سطح بتن لازمست با آب‌های اضافی سطحی که بر روی آن پاشیده می‌شود تامین شود. در فرآیند عمل‌آوری کارگاهی، محاسبه میزان این رطوبت اضافی اهمیت پیدا می‌کند، به ویژه هنگامی که ملاحظه می‌شود تعداد متغیرهای اثرگذار بر روی آن زیاد است، این متغیرها شامل دمای هوا، دمای بتن، رطوبت نسبی هوا، سرعت وزش باد، میزان تابش آفتاب و حتی رنگ بتن و ارتفاع از سطح دریا می‌باشد. در شکل (۱) چهار عامل مهم در کاهش رطوبت سطحی ارائه شده است[۲].



شکل ۱- تاثیر چهار عامل مهم در کاهش رطوبت سطحی دال بتنی [۳ و۴].

زمانی که بتن رطوبت سطحی خود را از دست می‌دهد، در صورتی که این رطوبت تامین نشود، دچار جمع‌شدگی و کاهش حجم شده و در نهایت باعث ایجاد ترک و افزایش تغییر شکل در بتن می‌شود. بیشتر این تغییر شکل در ساعات اولیه پس از بتن‌ریزی اتفاق می‌افتد. هنگامی که آب از خمیر سیمان به دلیل تبخیر سطحی خارج می‌شود، فشار مویین بین منحنی ایجاد شده و باعث کاهش حجم خمیر سیمان می‌شود.

رشد فشار مویین منفی تا نقطه‌ی بحرانی ادامه می‌یابد و چنانچه اگر اتلاف و تبخیر سطحی آب جلوگیری نشود، ترک‌خوردگی به وجود می‌آید [۳]. پول (poole) در سال ۲۰۰۵ معادله‌ای را برای تعیین میزان تبخیر از سطح بتن به صورت رابطه‌ی (۱) ارائه نموده است [۴].

$$ER = ۴,۸۸\left[(۰,۱۱۳ + (۰,۰۴۲۲W_s)/۰,۴۴۷\right]e^{۰,۰۰۰۳۰۳CT} - RH \times e^{۰,۰۰۰۳۰۳AT} \qquad (۱)$$

که در آن،

ER = میزان تبخیر برحسب کیلوگرم بر مترمربع در ساعت،

W_S = سرعت باد برحسب متر بر ثانیه، و

CT = دمای بتن برحسب درجه سانتی‌گراد، و

AT = دمای هوا برحسب درجه سانتی‌گراد،

RH = رطوبت نسبی هوا برحسب درصد است.

با افزوده شدن سرعت باد، دمای بتن و دمای هوا کاهش می‌یابد و رطوبت نسبی نیز کاسته می‌شود و یا تبخیر افزایش می‌یابد، البته یکی از محدودیت‌های اجرائی عدم کنترل سرعت باد است و فقط دمای بتن را با تمهیدات نسبتاً ساده‌تری می‌توان تحت کنترل درآورد. البته بایست توجه کرد که سرعت باد بایست در حدود ۵۰ سانتی‌متر سطح بتن اندازه‌گیری شود، که میزان تبخیر آب بیشتری از رابطه بدست می‌دهد [۴]. با توجه به مشخصات دمایی و محیطی هر منطقه‌ای از کشور می‌توان میزان تبخیر و از دست رفتن آب را از روابط یا نمودارهای ارائه‌شده در این قسمت محاسبه نمودو یا آب لازم برای جایگزینی برحسب لیتر در هر مترمربع پیش‌بینی کرد.

۳. مرور منابع

در عمل‌آوری بتن نقش پارامترهای گوناگون مطرح است که مهمترین آن فراهم آوردن دما در جهت تسریع عمل گیرش می‌باشد. در کارخانجات تولید قطعات بتنی، سرعتی که همراه با کیفیت مطلوب و قابل قبول باشد، یکی از اهداف اصلی است، محاسبه و رسیدن به دمای بهینه در ساخت قطعات پیش‌ساخته بتنی موضوع مطالعه‌ای است، که در آن دمای بهینه برای تولید سگمنت راینینگ تونل را محاسبه نموده‌اند [۵]. در مطالعه‌ای در مورد عمل‌آوری بتن حاوی نانوسیلیس در محل‌های مختلف، به موضوع شرایط محیطی معمولی، محیط سولفاتی در آب‌های دریای خلیج فارس و دریای خزر مطالعه شده است، که نتایج بیان می‌کند، عمل‌آوری در شرایط محیطی مختلف در سنین اولیه تاثیری بر مقاومت فشاری نمی‌گذارد ولی با گذشت زمان نمونه‌های بتنی بدون نانوسیلیس‌ها به شدت در محیطی عمل‌آوری‌شده حاوی سولفات مقاومت خود را از دست می‌دهند [۶]. اثر شرایط اقلیمی مختلف یک منطقه کشور بر عملیات بتن‌ریزی موضوع پژوهشی دیگر در خصوص عمل‌آوری بتن است، که در آن در چهار فصل مختلف عملیات بتن‌ریزی انجام شده و با توجه به داده-های هواشناسی و اقلیمی شرایط عمل‌آوری بتن را با شرایط و ضوابط استاندارد مقایسه نموده‌اند [۷]. نرخ افزایش دما و دمای ماکزیمم در عمل‌آوری الکتریکی مستقیم بتن موضوع تحقیق دیگری در این زمینه است، که در آن ۶۰ نمونه با جریان الکتریسیته گرمادهی شده‌اند تا مؤثرترین روش‌ها به عنوان باصرفه‌ترین انتخاب شود. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که نرخ گرمادهی مناسب ۲۰ درجه سلسیوس در ساعت و حداکثر دمای نهایی گرمادهی بتن بین ۷۵ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد است و زمان تاخیری مناسب برای اعمال دما و گرما به بتن ۳ ساعت است [۸]. محققین برای کاهش زمان عمل‌آوری بتن، از روش-های مختلفی بهره می‌برند از جمله عمل‌آوری داخلی به این ترتیب ماده افزودنی سوپر جاذب پلیمری به عنوان یک منبع ذخیره آب برای عمل‌آوری داخلی بتن استفاده شد. نتایج مطالعه به ثمره حاکی از آن است که با افزودن ۱ تا ۱/۵ درصد وزن سیمان از این افزودنی، تنها با ۳ یا ۴ دوز عمل‌آوری مقاومت بتن به ۹۵ تا ۱۰۰ درصد مقاومت هدف می‌رسد، همچنین با مصرف ۰/۵ تا ۱ درصد از این مواد جاذب رطوبت، می‌توان جذب آب کل مخلوط را به حدود ۵ تا ۷ درصد کاهش داد [۹]. در مطالعه‌ای دیگر، به بررسی تاثیر زمان شروع عمل‌آوری و تاخیر آن بر مقاومت ۲۸ روزه بتن پرداخته شده است. به این صورت که ۱۲ نمونه در دو گروه ۶ تایی با تاخیر زمانی متفاوت در عمل‌آوری مقایسه شدند در نتایج این مطالعه نشان داده شده که نمونه‌های با تاخیر سه روزه مقاومت کمتری نسبت به عمل‌آوری نمونه‌های شاهد دارند [۱۰].

توسط همان گروه از محققین، اثر مدت زمان رطوبت‌دهی بر عمل‌آوری بتن مطالعه شد، بدین‌ترتیب که ۲۴ نمونه بتنی در دو گروه ۱۲ تایی به ۱۲ روش مختلف رطوبت‌دهی شده و مقاومت آنها اندازه‌گیری شد، که نتایج حاکی از این است که رطوبت به همراه هوادهی در افزایش مقاومت تاثیرگذار است و البته رطوبت‌دهی سطحی و آب پاششی تاثیر چندانی بر عمل‌آوری بتن و افزایش مقاومت آن ندارد [۱۱].

در مطالعه‌ای توسط هوآنگ و همکاران (۲۰۱۷)، به مدل‌سازی عددی حرکت رطوبت و نفوذپذیری و هدایت الکتریکی در رویه‌های بتنی پرداختند، البته نتایج عددی در مقایسه آزمایشگاهی با نمونه‌های ساخته‌شده مورد تائید قرار گرفت [۱۲]. در مطالعه‌ای دیگر توسط سیلان (Ceylan) و همکاران (۲۰۱۶) به اثر نحوه عمل‌آوری بر روی خرابی تاب‌خوردگی دال بتنی در رویه‌های صلب و اهمیت آن پرداخته‌اند. همچنین به اثر مواد افزودنی نظیر لاتکس و PVA و SBP جهت بهبود خواص گیرش و عمل‌آوری تسریع‌شده بتن‌ها برای عملیات‌های تعمیر و نگهداری در مطالعات قبلی پرداخته شده است [۱۳]. همچنین در مطالعه انجام‌شده توسط تدین، با عنوان بتن‌ریزی در هوای گرم، به اثر شدت تبخیر از واحد سطح از بتن و اثر وزش باد بر میزان کاهش آب سطحی اشاره شده است و اشاره نموده‌اند که برای جلوگیری از تبخیر زیاد از سطح بتن می‌توان توسط بادشکن سرعت باد را کم نمود، به ویژه، باد شکن‌هایی که بتوانند از تبخیر آب با افزایش رطوبت محیط جلوگیری کنند، می‌توانند مفیدتر باشند. البته اشاره می‌شود که استفاده از مه‌فشان و ایجاد غبار آب در محل بتن‌ریزی اگر وزش باد وجود داشته باشد تاثیر چندانی ندارد [۲]. به هر صورت در اغلب مطالعات به اهمیت نحوه عمل‌آوری بتن و تاثیر آن بر مقاومت بتن پرداخته‌اند. همچنین در تلاش برای ارائه راهکارهای کاهش اثرات نامطلوب آن از قبیل استفاده از مواد افزودنی جدید و فناوری‌های نوین پرداخته‌شد. به هر حال کمتر از آنها به موضوع اثر همزمان سرعت وزش باد، دما و رطوبت هوا به صورت عددی پرداخته‌اند که در این مطالعه تلاش شده است به صورت عددی و مدلسازی آماری به اثرات متغییرها به صورت همزمان پرداخته شود.

۴. روش تحقیق

در این مطالعه با توجه به نیاز به محاسبه میزان تبخیر آب سطحی بتن و تامین آن توسط پاشش آب، از داده‌های اقلیمی مرتبط با مناطق گرم و خشک کشور استفاده شد. پس این داده‌ها در شرایط مختلفی تغییر داده شد تا میزان تبخیر در حالات ممکن محاسبه شود. داده‌های اقلیمی موردنیاز در رابطه‌ی پول در جدول (۱) نمایش داده شده است.

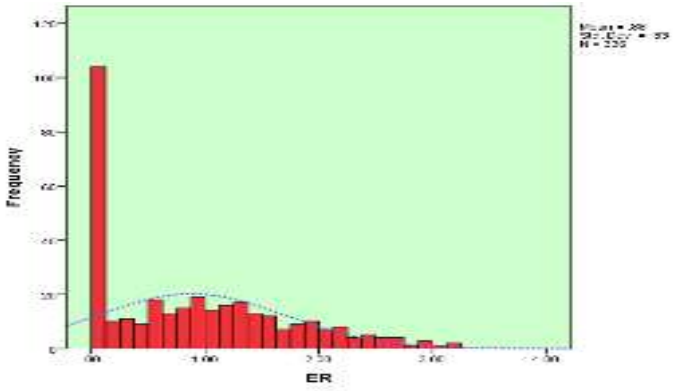
جدول ۱- تغییرات داده‌های اقلیمی بر کاربرد روسازی محاسبه میزان آب‌پاشی بتن [۱۴]

داده اقلیمی	دما ($^{\circ}C$)	رطوبت نسبی (٪)	سرعت باد $\left(\frac{m}{s}\right)$
یک عدد دوز بخصوص	۲۶	۳۶	۲۰
دامنه‌ی تغییرات	۹ – ۳۱	۸ – ۷۱	۱۷ – ۲۹

با توجه به مجموعه‌ی داده‌ی به وجود آمده از متغیرهای جدول (۱) در رابطه‌ی (۲)، بیش از ۳۰۰ داده، انتخاب الگوریتم مناسب برای اعمال روی داده‌ها ضروری است. از الگوریتم‌های موجود درخت تصمیم برای درک گرافیکی فرآیند تصمیم‌گیری و تاثیرگذاری پارامترها مناسب‌تر است. بنابراین با کمک نرم‌افزار آماری پرکاربرد SPSS داده‌های شامل سرعت باد، رطوبت نسبی و دما به متغیر وابسته میزان آب موردنیاز برای پخش برای بتن ارتباط داده شد. با کمک رابطه‌ی (۱) حدود و تغییرات مشخص شده در جدول (۱) با کمک الگوی تقسیم‌بندی داده ها به روش خوشه‌بندی ترسیم شده ابتدا مهمترین داده‌ها و سپس نحوه تاثیرگذاری داده‌ها بر روی یکدیگر به کمک الگوریتم خوشه‌بندی داده‌ها تعیین می‌شود.

۵. نتایج مدل آماری و بحث

الگوریتم داده‌کاوی به کار رفته ار الگوی CART است، که داده‌ی آب موردنیاز سطحی را به داده‌های اقلیمی که بتن‌ریزی در آن انجام شده ارتباط می‌دهد. درخت تصمیم ساخته‌شده برای این تحقیق در شکل (۳) قابل مشاهده است، همانگونه که ملاحظه می‌شود این درخت تصمیم ساخته‌شده دارای ۳۲ برگ و ۱۴ شاخه و ۱۶ گره است. قبل از به کار بردن الگوی درخت تصمیم، از بخش آمار توصیفی این نرم‌افزار نمودار نرمال بودن داده‌های میزان آب موردنیاز بتن به ازاء هر متر مربع در هر ساعت ترسیم شده است، که در شکل (۲) قابل مشاهده است. در این شکل بجز تمرکز داده‌ها در بخش صفر (بدون نیاز به آب‌دهی بتن به علت شرایط اقلیمی) مابقی داده‌ها دارای توزیع نرمال هستند.



شکل ۲- بافت‌نگار توزیع داده‌های آب موردنیاز برای مرطوب نگه داشتن سطح دال بتن و رویه‌ی بتنی

همانگونه که در شکل(۳) ملاحظه می‌شود، در گره ۱ اگر دمای هوا بیش از ۲۰ درجه باشد متوسط آب موردنیاز سطحی بتن بیش از Lit/m^2hr ۲ می‌شود.

شکل (۴) نمودار مهمترین متغیرهای مستقل تاثیرگذار بر میزان آب موردنیاز پاششی بر روی بتن نمایش می‌دهد که مطابق آن دمای هوا، دمای بتن، سرعت وزش باد و میزان رطوبت هوا به ترتیب دارای اهمیت هستند. وقتی که تبخیر سطحی آب بتن زیاد باشد توصیه شده است که اقداماتی جهت میزان کاهش رطوبت با استفاده از بادشکن و مات کردن سطحی کار بتن تازه به کار برد. برای روسازی در مناطق و سطوح وسیع (مانند روسازی بتنی) سه راهکار [۴] پیشنهاد شده است، که عبارتند از اجرا روسازی در ساعاتی از شبانه‌روز با تبخیر کمتر و یا کاهش دمای بتن در زمان اجراء (خنک کردن سنگدانه‌ها و آرماتورها و قالب‌ها) و به کار بردن کاهنده‌های تبخیر است که تا ۵۰ درصد می‌توان تبخیر آب را کاهش داد. همچنین جدول (۲) نتایج مدلسازی رگرسیون خطی برای پیش‌بینی آب موردنیاز بتن را براساس متغیرهای چهارگانه اقلیمی نمایش می‌دهد و رابطه‌ی (۲) براساس این جدول ساخته شده است.

$$ER = -۱,۱۷۸ + ۰,۰۸۱CT - ۰,۰۳۹AT - ۰,۰۲RH + ۰,۰۶۳W_s \qquad R^2 = ۰,۹۲۲ \qquad (۲)$$

که در آن،

ER = میزان آب موردنیاز سطحی بتن رویه دال (برحسب Lit/m^2hr)

CT = دمای بتن (برحسب $^\circ C$)

AT = دمای هوا (برحسب $^\circ C$)

RH = رطوبت نسبی (٪)

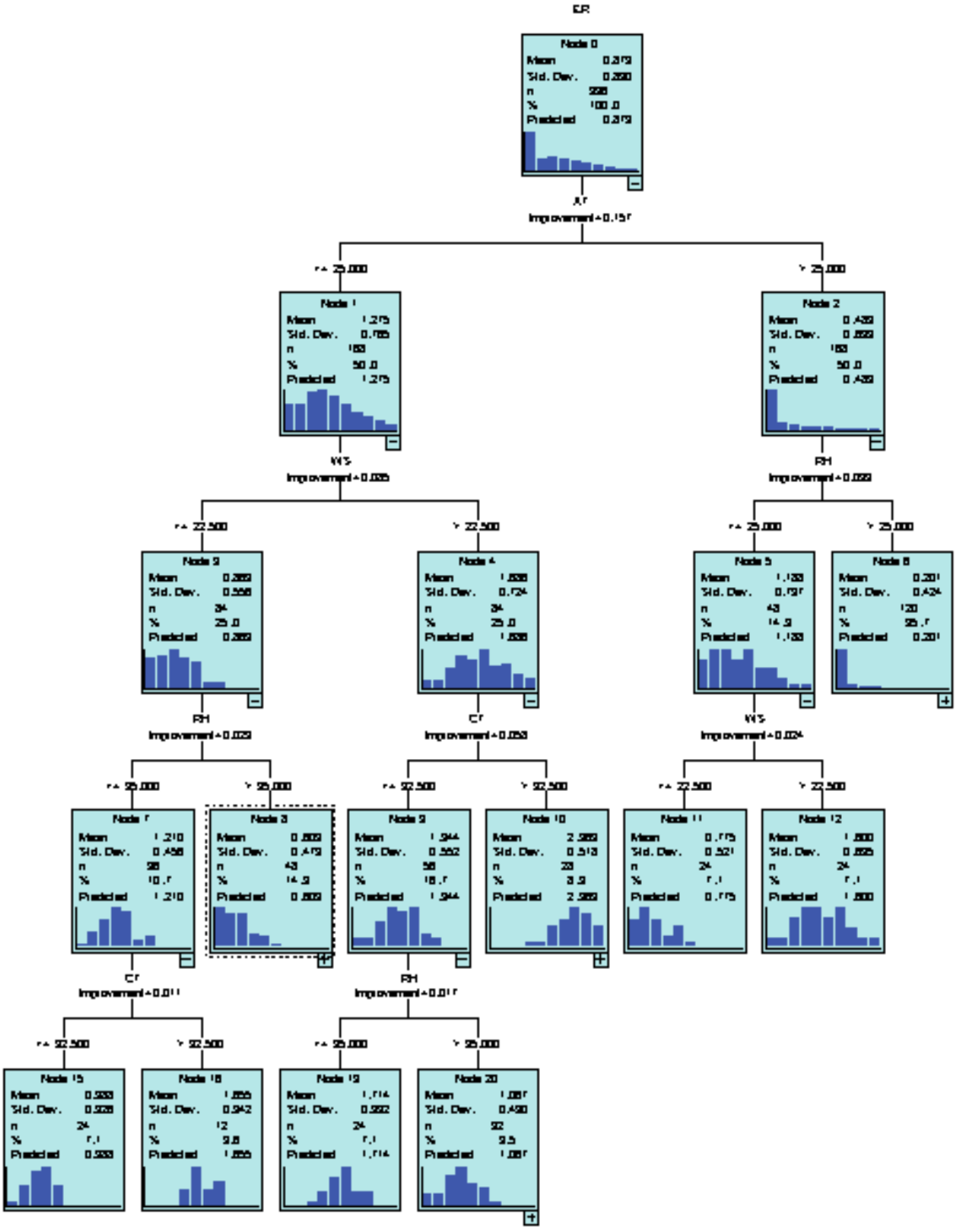
W_S = سرعت وزش باد (m/s) است.

جدول ۳- خلاصه‌ی آماره های مدلسازی درونیابی خطی تخمین نیاز آب پاششی در بتن تازه

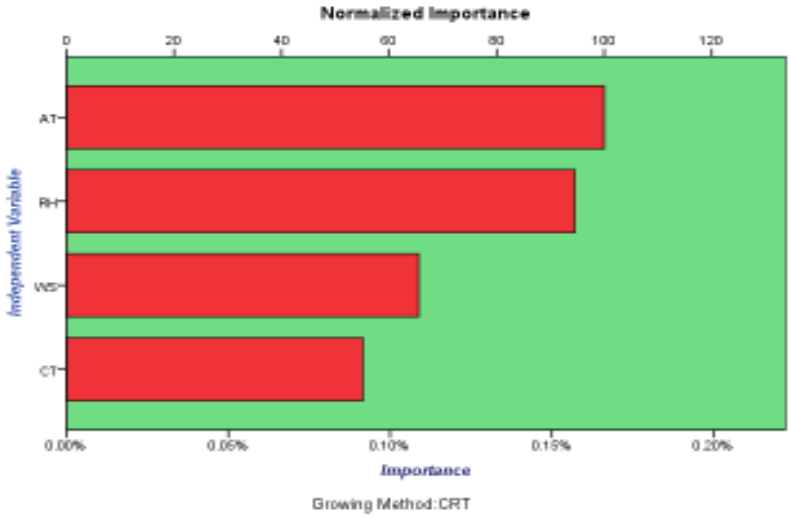
Model Summary[b]

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df۱	df۲	Sig. F Change
1	.922[a]	.850	.848	.32332	.850	468.498	4	331	.000

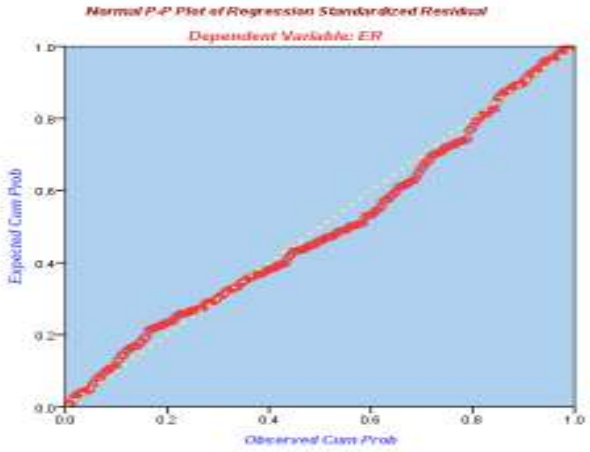
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-1.178	.158		-7.459	.000
	CT	.081	.004	.398	18.706	.000
	AT	-.039	.002	-.521	-24.483	.000
	RH	-.020	.001	-.490	-23.022	.000
	WS	.063	.003	.423	19.865	.000



شکل ۳- الگوریتم درخت تصمیم ترسیمی برای میزان رطوبت موردنیاز وابسته به داده‌های اقلیمی



شکل ۴- مقایسه متغیرهای موثر در میزان آب پاششی مورد نیاز سطح بتن تازه



شکل ۵- مقایسه نتایج مدلسازی رگرسیون غیرخطی چندگانه و معیارهای استاندارد و دستورالعملها

۶. نتیجه‌گیری

تأمین رطوبت سطحی در فرآیند عمل‌آوری در سطوح وسیع نظیر دال‌های روسازی بتن جهت جلوگیری از ترک‌های سطحی بسیار مؤثر هستند. در مطالعه حاضر و باب ررسی تاثیر شرایط اقلیمی مؤثر بر میزان از دست رفتن این رطوبت سطحی، و فرآیند داده‌کاوی مبتنی بر درخت تصمیم، مقدار آب پاششی موردنیاز به ازاء هر متر مربع در هر ساعت پیش‌بینی شد. نتایج این مطالعه به صورت خلاصه عبارتند از:

-اگر دمای هوا بیش از ۲۰ درجه باشد متوسط آب موردنیاز سطحی بتن بیش از ۲لیتر در ساعت به ازاء هرمترمربع می‌شود. -در مورد مهمترین متغیرهای مستقل تاثیرگذار بر میزان آب موردنیاز پاششی بر روی بتن نمایش دمای هوا، دمای بتن، سرعت وزش باد و میزان رطوبت هوا به ترتیب دارای اهمیت هستند.

- پیشنهاد شده است، اجرا روسازی در ساعاتی از شبانه‌روز با تبخیر کمتر و یا کاهش دمای بتن در زمان اجراء و به کار بردن کاهنده‌های تبخیر است که تا ۵۰ درصد می‌توان تبخیر آب را کاهش داد.

-مدلسازی آماری انجام شده دادههای رطوبت سطحی طیق رابطه بدست آمده ونیز توصیه های استانداردها و آئیننامه های مشاهده شد که شیب خط ترسیمی یک مثبت است که حکایت از عملکرد درست رابطه درونیابی شده در پیشبینی آب مورد نیاز برای پاشش روی بتن تازه است.

۷. مراجع

[۱] صادقیان، ر.، دشتی، م. ع.، (۱۳۹۶)، اشکالات حاصل از عمل‌آوری نامناسب در شرایط آب و هوایی سرد و گرم، دومین کنفرانس ملی مهندسی عمران و توسعه شهری، انتشارات علم‌آوران دانش، بابل، صفحهٔ ۱-۹.

[۲] تدین، م.، (۱۳۹۶)، بتن‌ریزی در هوای گرم، انجمن بتن ایران مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، دانشگاه بوعلی سینا همدان، صفحهٔ ۱-۱۰.

[۳] ساقی، ح.، دلبری، ح.، (۱۳۹۴)، تاثیر الیاف پلیمری و مقاومت بتن بر میزان ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی (آبرفتگی) پلاستیک در دال‌های بتنی، مجله تحقیقلت بتن، سال ۸، شماره ۲، صفحهٔ ۳۵-۴۶.

[۴] فرجی، ق.، ولی‌پور، ح.، (۱۳۹۳)، روسازی بتنی، انتشارات فنی حسینیان و سیمای دانش، تهران، نوبت چاپ اول، صفحهٔ ۱-۳۸۸.

[۵] آرام، ع.، سلیم دهکردی، ب.، (۱۳۹۷)، مکانیزم عمل‌آوری بتن‌های پیش‌ساخته به روش بخار و انتخاب دمای بهینه در کارخانه تولید قطعات بتنی سگمنت در لاینتینگ تونل، کنفرانس بین‌المللی عمران و توسعه شهری، دانشگاه تبریز، آذربایجان، صفحه ۱-۱۳.

[۶] راستگو، م.، آراسته خوش‌بین، ا.، قویدل، ر.، (۱۳۹۷)، بررسی مقاومت فشاری بتن‌های حاوی نانوذرات سیلیس در محیط‌های عمل‌آوری مختلف، کنفرانس بین‌المللی عمران و توسعه شهری دانشگاه تبریز، آذربایجان، صفحهٔ ۱-۱۲.

[۷] رفتاری، م.، کوکبی، ا. (۱۳۹۶)، بتن‌ریزی اقلیمی، مطالعه موردی شهر کرمانشاه، سومین کنفرانس ملی مهندسی عمران، انتشارات علم‌آوریان دانش، بابل، صفحهٔ ۱-۱۰.

[۸] حسین‌زاده فروغی، ر.، دیلمقانی، ص.، (۱۳۹۶)، اثر دمای ماکزیمم و نرخ افزایش دما بر روی مقاومت فشاری در عمل‌آوری الکتریکی مستقیم بتن، سومین همایش بین‌المللی عمران و شهرسازی، دانشگاه البرز، تهران، صفحهٔ ۱-۱۳.

[۹] عسکریان، ر.، درب هتزی، ع.، (۱۳۹۶)، کاهش زمان عمل‌آوری بتن مبتنی بر عمل‌آوری داخلی، پنجمین کنگره بین‌المللی عمران و توسعه شهری، تهران، صفحهٔ ۱-۸

[۱۰] کلاهی، م. ج.، قوهستانی، س.، (۱۳۹۶)، بررسی اهمیت زمان شروع عمل‌آوری بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن، دومین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران، مهندسی سازه و ساخت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، صفحهٔ ۱-۸

[۱۱] کلاهی، م. ج.، قوهستانی، س.، (۱۳۹۶)، بررسی اثر مدت زمان رطوبت‌دهی در عمل‌آوری ۲۸ روزه بتن، دومین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران، سازه و مدیریت ساخت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، صفحهٔ ۱-۹.

[۱۲] Huang, K., Zollinger, D. G., Shi, X., & Sun, P. (۲۰۱۷). "A developed method of analyzing temperature and moisture profiles in rigid pavement slabs". Construction and Building Materials, 151, 782-788.

[۱۳] Ceylan, H., Gopalakrishnan, K., Kim, S., Taylor, P., Alhasan, A. A., & Yang, S. (۲۰۱۶). "Impact of Curling and Warping on Concrete Pavement".

[۱۴] امیدوار، ک. ر.، (۱۳۹۸)، تحلیلی از رژیم بادهای شدید و طوفانی یزد، فصلنامه مدرس علوم انسانی، برنامه‌ریزی و آسایش فضا، دوره ۱۴، شماره ۱، پیاپی ۶۵، صفحهٔ ۸۳-۱۰۵.