

آنالیز حساسیت روسازی بتنی JPCP به چرخه‌های ذوب و انجماد

مقاله علمی - پژوهشی

محمودرضا کی‌منش، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران
محمدرضا محمدعلیها، دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
حمیدرضا ربانی‌نژاد*، دانش‌پژوه دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: hamidreza.rabbaninezhad@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۰۷ - پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۰۷

صفحه ۱۶۲-۱۴۱

چکیده

سیکل‌های ذوب و انجماد، از جمله مهم‌ترین فاکتورهای اقلیمی هستند که خصوصیات مکانیکی بتن‌های روسازی را تغییر داده، در ایجاد ترک‌ها نقش بسزایی داشته و مکانیزم رشد ترک‌ها را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهند. آسیب‌های روسازی بتنی ناشی از عوامل محیطی شامل نوسانات روزانه و فصلی در پروفیل‌های رطوبت و دما، تغییر در سطح آب‌های زیرزمینی، بارش/نفوذ، چرخه‌های ذوب و انجماد و دیگر عوامل خارجی، به صورتی کاملاً جامع در روش طراحی مکانیستیک-تجربی، مدل‌بندی شده‌اند. اثرات ذوب و انجماد، در لایه‌های زیرین تجربه می‌شود اما در نهایت موجب آسیب‌دیدگی سطح روسازی می‌گردد. در راستای آنالیز حساسیت روسازی بتنی به چرخه‌های ذوب و انجماد، در این پژوهش، حساسیت مدول ارتجاعی، مصالح اساس در مقابل این چرخه‌ها و همچنین در مقابل سطح آب‌های زیرزمینی، با استفاده از مدل پیشرفته یکپارچه‌سازی عوامل محیطی مورد تحلیل واقع شد؛ بدین منظور، ابتدا نوسانات فاکتورهای تعدیل مدول (F_{env}) در مقابل متغیرهای مختلف نظیر مشخصات فنی مصالح اساس، تعداد روزهای سپری شده از زمان ذوب یخ، عمق سفره آب زیرزمینی و درجه اشباع مصالح، محاسبه شد؛ سپس حساسیت مدول ارتجاعی لایه اساس به تغییر فاکتورهای تعدیل، مورد ارزیابی قرار گرفت و آنگاه با استفاده از شاخص حساسیت نرمال، تغییر در پتانسیل آسیب‌پذیری این نوع روسازی، آنالیز گردید. نتایج حاصله، پتانسیل آسیب‌پذیری رویه‌های بتنی ساده در زردار (از لحاظ پلکانی‌شدن، ترک‌خوردگی و ناهمواری) در مقابل چرخه‌های ذوب و انجماد را «فوق‌العاده حساس» نشان داد.

واژه‌های کلیدی: آسیب‌های رویه بتنی، آنالیز حساسیت، چرخه‌های ذوب و انجماد، روسازی بتنی ساده در زردار، مدول ارتجاعی اساس

۱- مقدمه

رطوبت و دما، دو متغیر هستند که به طور قابل توجهی بر لایه‌های روسازی و مشخصات ساب‌گرید و در نتیجه بر ظرفیت باربری آن‌ها تأثیر می‌گذارند؛ برخی تأثیرات عوامل محیطی به شرح ادامه می‌باشد (TRB: NCHRP-2016).
- مصالح سیمانی پیوسته ممکن است در طول دوران ذوب و انجماد و چرخه‌های رطوبت و خشکی، بر اثر کاهش مدول و افزایش تغییرشکل، آسیب ببینند. اثرات ذوب و انجماد در لایه‌های زیرین تجربه می‌شود اما در نهایت موجب آسیب‌دیدگی سطح روسازی خواهد شد.

داده‌های ورودی در تحلیل و طراحی روسازی بتنی به روش مکانیستیک-تجربی (M-E) شامل داده‌های آب‌وهوایی، داده‌های ترافیکی، خصوصیات لایه‌های روسازی و شرایط بستر ساب‌گرید می‌باشد. در بررسی داده‌های آب و هوایی ۱، وضعیت بارش، دما، یخ، باد، تابش خورشید و سطح آب‌های زیرزمینی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند، دسته‌بندی نواحی، به نواحی خشک دارای یخ‌زدگی و بدون یخ‌زدگی و همچنین نواحی مرطوب دارای یخ‌زدگی و بدون یخ‌زدگی، شکل گرفته و پاسخ‌های سازه‌ای ناشی از عوامل محیطی، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

مصالح (FR) و فاکتور تنظیم مدول در حالت یخ‌زده یا کاملاً بهبودیافته (FU).

$$MR = Fenv \cdot Mropt \quad (1)$$

عامل Fenv، فاکتور تعدیل و Mropt، مدول ارتجاعی در شرایط بهینه (بیشترین چگالی خشک در رطوبت بهینه) می‌باشد.

EICM، مدول ارتجاعی بهینه که توسط کاربر وارد می‌گردد را برای تمام لایه‌های ناپیوسته ثبت نماید؛ تغییرات رطوبت فصلی نسبت به شرایط مرجع (که در آن رطوبت سابگرید و مصالح ناپیوسته به تعادل می‌رسد) و همچنین شاخص انجماد و تعداد چرخه‌های ذوب و انجماد را برای محل انتخاب شده، تعیین و اثر انجماد بر Mr لایه‌ها را مورد ارزیابی قرار می‌دهد و در نهایت، با استفاده از تغییرات Mr نسبت به زمان، پاسخ بحرانی‌روسازی را محاسبه و میزان آسیب در نقاط مختلف سیستم‌روسازی را برآورد می‌نماید. خروجی‌های EICM در دو سطح داخلی و خارجی، به شرح ذیل توصیف می‌شود:

موتور محاسباتی EICM، میزان محتوای آب حجمی (w) و درجه حرارت را در هر گره در طول زمان بر اساس ورودی‌های کاربر، تعیین می‌کند. مقادیر w بر اساس میزان اشباع صورت گرفته توسط آب (به صورت حجمی)، تقسیم‌بندی می‌شوند تا مقادیر درجه اشباع (S) بدست آید. در هنگام عدم تغییر عمق ورودی سفره آب زیرزمینی، مقادیر S اساساً در حالت تعادل (S_equil) قرار دارد مگر اینکه فرایند بازیابی ذوب و یخبندان در حال انجام باشد.

مقادیر S_equil به همراه مقادیر درجه اشباع در شرایط بهینه (s_opt)، سپس در محاسبه فاکتور تنظیم مدول لایه‌های ناپیوسته در شرایط یخ‌زده (FU) در هر گره مورد استفاده قرار می‌گیرد. چنانچه دمای بدست آمده، نشان‌دهنده حالت انجماد در یک گره باشد، یک فاکتور تنظیم مدول در شرایط یخ‌زده (FF) در هر گره یخ زد محاسبه می‌گردد. فرایند ذوب پس از انجماد، به صورت نرمال به عنوان نشانه‌ای از افزایش دما و رسیدن به درجه‌ای بالاتر از دمای نقطه انجماد، رخ می‌دهد. در طول دوران بازیابی، نوع و مشخصات مصالح در جهت محاسبه شدت بازیابی (RR) در گره‌های در حال بازیابی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مقادیر RR به همراه فاکتورهای کاهش بر اثر ذوب‌شدگی (RF)، برای محاسبه فاکتور تنظیم در شرایط بازیابی (FR) در هر گره‌ی در حال بازیابی استفاده می‌شود. نتیجه اینکه، فاکتور

در هنگام یخ‌زدگی، آب در خاک یخ می‌زند و مدول ارتجاعی ۲۰ تا ۱۲۰ برابر افزایش می‌یابد. مصالح ناپیوسته تحت تاثیر دما نیستند مگر اینکه یخ در پایین‌تر از دمای صفر درجه سانتی‌گراد شکل بگیرد.

فرایند انجماد ممکن است با تشکیل لزه‌های یخ همراه شود که باعث کاهش مقاومت‌روسازی در هنگام انجماد می‌گردد.

در شرایط ثابت، افزایش رطوبت، باعث کاهش مدول مصالح ناپیوسته می‌گردد.

تغییرات مدول ارتجاعی اساس در چرخه‌های ذوب و انجماد در فصول مختلف سال، در ایجاد آسیب‌های سازه‌ای روسازی‌های بتنی نقش موثری داشته و هزینه‌های هنگفتی را به سیستم مدیریت روسازی تحمیل می‌کند. ارزیابی پتانسیل انواع خرابی‌های رویه بتنی در سیکل‌های مختلف ذوب و انجماد، امکان برنامه‌ریزی دقیق‌تر در فرایند تعمیر و نگهداری و در نتیجه کاهش خسارات ناشی از تاخیر در این فرایند را فراهم خواهد ساخت. برای ارزیابی مدول‌های ارتجاعی مصالح ناپیوسته در نرم‌افزار M-E، چندین عامل موثر بر مدول‌های ارتجاعی این مصالح در نظر گرفته شده‌اند (MEPDG-2015):

-میزان تنش

-تغییرات چگالی رطوبت

-تاثیرات ذوب/انجماد

مقادیر مدول‌های ارتجاعی در هر موقعیت و زمان در سازه روسازی، به عنوان عملکرد عوامل فوق نتیجه‌گیری شده‌اند.

مدل پیشرفته یکپارچه‌سازی عوامل اقلیمی (EICM)، با همی عوامل محیطی در ارتباط بوده و رطوبت خاک، مکش و دما را برای هر نقطه از لایه‌های ناپیوسته به دست می‌آورد. یکی از خروجی‌های مهم EICM برای طراحی روسازی به روش ME، مجموعه‌ای از فاکتورهای تعدیل (F_env) برای لایه‌های مصالح ناپیوسته است که تحت تاثیر پارامترهای محیطی همچون تغییرات رطوبت، یخبندان، ذوب و سپس بازیابی از حالت ذوب قرار می‌گیرد؛ این فاکتور در مدول ارتجاعی بهینه (M_Ropt)، ضرب شده و مدول ارتجاعی (Mr) را به صورت تابعی از موقعیت و زمان محاسبه می‌کند (رابطه ۱).

F-env ترکیبی است از فاکتورهای تنظیم مدول ارتجاعی اساس در فصول مختلف سال تحت عنوان فاکتور تنظیم مدول در حالت یخ‌زده (FF)، فاکتور تنظیم مدول در حالت ذوب و بازیابی

جدول ۱. مقادیر **b.a** و **km** برای مصالح ریزدانه و درشت‌دانه

ملاحظات	مصالح ریزدانه	مصالح درشت‌دانه	پارامتر
پارامتر رگرسیون	-۰,۵۹۳۴	-۰,۳۱۲۳	A
به طور محافظه‌کارانه به نسبت مدول ۲ به ۲,۵ مرتبط است.	۰,۴	۰,۳	B
پارامتر رگرسیون	۶,۱۳۲۴	۶,۸۱۵۷	Km

بهترین میزان ممکن برای MR_{equil} برای ۹۸٪ یا ۹۹٪ از طول عمر طراحی در مناطق یخ‌زده بدست می‌آید.

۲-۱-۲ مدول ارتجاعی برای مصالح ناپیوسته یخ‌زده/ذوب‌شده

به منظور بررسی رفتار مصالح ناپیوسته در شرایط ذوب/ یخ‌زدگی، دستیابی به مقادیر دقیق مدول برای مصالح یخ‌زده (MR_{frz}) و نسبت مدول ارتجاعی بعد از ذوب شدن (MR_{min}) به مدول ارتجاعی مصالح طبیعی یخ‌زده (MR_{runfrz}) الزامی است. این نسبت، فاکتور کاهش (RF) نام دارد. چون برخی از منابع علمی، مقادیر RF را بر اساس MR_{runfrz} و برخی بر اساس MR_{opt} تولید می‌کنند، در این پژوهش، تصمیم بر آن گرفته شد که تفسیر محافظه‌کارانه‌ای از کاربرد کوچکترین مقادیر MR_{runfrz} و MR_{opt} به عنوان شرایط اصلی پذیرفته شود. این تعریف‌ها در معادله‌ی زیر تشریح شده‌اند:

$$MR_{frz} = MR_{max} = MR$$

$$MR_{runfrz} = MR$$

$$RF = \text{عامل کاهش‌دهنده مدولها} \quad (۳)$$

$$MR_{min} / (MR_{opt}, MR_{runfrz})$$

در جدول‌های ۲ و ۳، مقادیر RF استفاده‌شده در راهنمای طراحی برای مصالح ریزدانه و درشت‌دانه در مقابل P200 و PI ارائه شده است.

جدول ۲. مقادیر پیشنهادی RF برای مصالح درشت‌دانه

$$(P200) < 50\%$$

PI > 35%	PI = 12% - 35%	PI < 12%	(%) P200	میزان شکستگی درشت‌دانه
-	-	0.85	< 6	شن بیشتر P4 < 50%
0.75	0.70	0.65	6 - 12	
0.70	0.65	0.60	> 12	
-	-	0.75	< 6	ماسه بیشتر P4 > 50%
0.70	0.65	0.60	6 - 12	
0.60	0.55	0.50	> 12	

تعدیل مدول مصالح ناپیوسته (f_{env}) بعنوان تابعی از موقعیت و زمان، برای هر یک از لایه‌های زیرین، از مقادیر FF و FR و FU یا هر گره محاسبه می‌گردد این فاکتور به مدل‌های آنالیز سازه‌ای LEA و یا FEA در نرم‌افزار طراحی ارسال می‌شود تا با ضرب شدن در M_{Ropt}، مدول ارتجاعی وابسته به موقعیت و زمان (MR) بدست آید. به نظر می‌رسد تغییرات مدول ارتجاعی لایه اساس ناشی از تغییر در فاکتورهای تعدیل، پتانسیل آسیب‌پذیری رویه‌های بتنی ساده درزدار (از لحاظ پلکانی‌شدن، ترک‌خوردگی و ناهمواری) در مقابل چرخه‌های ذوب و انجماد را تحت تاثیر قرار می‌دهد. تحلیل حساسیت این فرایند، با استفاده از شاخص حساسیت نرمال (NSI)، موضوع تحقیق حاضر می‌باشد.

۲-پیشینه تحقیق

۲-۱-۲ تاثیرات محیطی بر مدول ارتجاعی مصالح

ناپیوسته‌سازی

توسعه‌ی معادلات پیش‌بینی و تکنیک‌های تاثیر تغییرات رطوبت و چرخه‌ی ذوب/یخ‌زدگی بر مدول ارتجاعی مصالح ناپیوسته، در دو بخش زیر بیان شده است (NCHRP 1-37A).

۲-۱-۱-۲ مدول ارتجاعی به عنوان تابعی از رطوبت خاک

این مدل در معادله‌ی (۲) نشان داده شده است.

$$\log \frac{MR}{MR_{opt}} = a + \frac{b-a}{1 + \exp\left(\ln \frac{-b}{a} + k_m \cdot (S - S_{opt})\right)} \quad (۲)$$

MR/MR_{opt} = نسبت مدول ارتجاعی.

MR مدول ارتجاعی در زمان مشخص و MR_{opt} مدول ارتجاعی در شرایط بهینه می‌باشد.

$$a = \text{کمترین مقدار از } \log(MR/MR_{opt})$$

$$b = \text{بیشترین مقدار از } \log(MR/MR_{opt})$$

$$K_m = \text{پارامتر رگرسیون}$$

$$(S - S_{opt}) = \text{تغییرات درجه اشباع به اعشار}$$

مقادیر **a**، **b** و **km** برای مصالح ریزدانه و درشت‌دانه در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۳. مقادیر پیشنهادی RF برای مصالح ریزدانه (P200>50%)

PI> 35%	PI = 12% - 35%	PI < 12%	(%) P200
0.60	0.55	0.45	50 - 85
0.55	0.50	0.40	> 85

روش Fenv، نشان می‌دهد که چگونه فاکتورهای تعدیل برای هر سه حالت فوق، در هر گره از هر لایه محاسبه می‌گردد؛ محاسبه‌ی عوامل تعدیل برای هر شرایط (بخزده، بازیابی شده، یخ‌نزده) در هر سطح گره به شرح زیر می‌باشد.

۲-۲-۱- عامل تعدیل برای مصالح یخ‌زده (FF)

مقدار FF در هر گره و دمای یخ‌زدگی محاسبه می‌شود. جدول ۴ فرایند تخمین این پارامتر را در نرم‌افزار مذکور نشان می‌دهد.

جدول ۴. خلاصه‌ی محاسبات EICM برای تعیین عامل تعدیل برای مصالح یخ‌زده (FF)

شماره مرحله	توضیحات
۱	محاسبه $P \cdot 200 \cdot PI$ محاسبه می‌شود؛ کاربر P200، PI و D60 را وارد می‌کند.
۲	تخمین مقدار MR_{opt_est} (ورود توسط کاربر).
۳	مقادیر پیشنهادی مدول‌های ارتجاعی یخ‌زده، MR_{frz} : a) If $P200 \cdot PI = 0$ $MR_{frz} = 2.5 \times 106 \text{ psi}$ b) If $P200 \cdot PI > 0$ $MR_{frz} = 1 \times 106 \text{ psi}$
۴	محاسبه فاکتور تعدیل یخ‌زده، FF: $F_F = \frac{MR_{frz}}{MR_{opt_est}}$

۲-۲-۲- عامل تعدیل برای مصالح بازیابی شده (FR)

مقدار FR در هر گره که یخ‌زدگی در آن اتفاق نمی‌افتد و نسبت بازیابی RR در آن کمتر از ۱ است، محاسبه می‌گردد. جدول ۵، فرایند تخمین این پارامتر نشان می‌دهد.

۲-۲-۳- عامل تعدیل برای مصالح کاملاً بازیابی شده یا یخ‌نزده (FU)

جدول ۶، فرایند اجرای نرم‌افزار راهنمای طراحی را برای تخمین FU نشان داده است.

مصالحی که از حالت یخ‌زده، بازیابی شده‌اند، پیشرفتی را در مدول نسبت به زمان (از M_{Rmin} تا M_{Runfrz}) تجربه می‌کنند که می‌تواند با کاربرد نسبت بازیابی (RR) در بازه‌ی ۰ تا ۱ به دست آورده شود.

$RR = 0$ برای شرایط «بلافاصله بعد از ذوب»، زمانی که آب اضافی باعث می‌شود میزان مکش به صفر برسد، $MR_{recov} = MR_{min}$

$RR = 1$ وقتی که مکش بر اساس عمق سفره آب‌های زیرزمینی به تعادل برسد: $MR_{recov} = MR_{runfrz}$

$$RR = \frac{\Delta t}{T_R} \quad (۴)$$

هنگامی که:

$$RR = \text{نسبت بازیابی}$$

Δt = زمانی که از شروع ذوب شدن در نظر گرفته شده است.

T_R = دوره بازیابی: زمان موردنیاز برای مصالح، تا از شرایط ذوب‌شدن به حالت نرمال یا شرایط یخ‌نزده برسد که به نوع مصالح بستگی دارد:

$$T_R = 90 \text{ روز برای ماسه/شن با } P200PI < 0.1$$

$$T_R = 120 \text{ روز برای لای/رس با } P200PI < 10 > 0.1$$

$$T_R = 150 \text{ روز برای رس با } P200PI > 10$$

۲-۲-۴- محاسبه‌ی عامل تعدیل محیطی (Fenv)

فاکتور تعدیل عوامل محیطی، Fenv، یک فاکتور ترکیبی است که می‌تواند نماینده مجموع شرایط محیطی زیر باشد:

یخ‌زدگی: مصالح یخ‌زده - FF (فاکتوری برای مصالح یخ‌زده)
بازیابی: مصالح بازیابی شده از حالت یخ‌زده - FR (فاکتوری برای مصالح بازیابی شده).

یخ‌نزده/کاملاً بازیابی شده/عادی: برای مصالحی که هرگز یخ نزده‌اند یا کاملاً بهبود یافته‌اند - FU (فاکتوری برای مصالح یخ‌نزده).

جدول ۵. خلاصه‌ی محاسبات EICM برای تعیین عامل تعدیل مصالح بازیابی شده (FR)

شماره‌ی مرحله	توضیحات
۱	پارامترهای ورودی P200, P4, PI و D60 را در کنار عمق سفره آب‌های زیرزمینی (YGWT) بدست آورید. P200*PI را محاسبه کنید.
۲	نسبت بازیابی (RR) را محاسبه کنید: $RR = \frac{\Delta t}{TR}$ Δt = تعداد ساعت‌های گذشته از آغاز ذوب شدن. TR = دوره‌ی بازیابی، تابعی از ویژگی‌های مصالح: TR = 90 روز برای ماسه/شن با $P200 * PI < 0.1$; TR = 120 روز برای لای/رس با $0.1 < P200 * PI < 10$; TR = 150 روز برای رس‌ها با $P200 * PI > 10$.
۳	Sopt درجه اشباع بهینه
۴	Sequil از SWCC محاسبه می‌شود: $S_{equil} = C(h) \times \frac{1}{\left[\ln \left[EXP(1) + \left(\frac{h}{a_r} \right)^{b_r} \right] \right]^{c_r}}$ $C(h) = 1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{h}{h_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{1.45 \times 10^5}{h_r} \right)}$ $h = \gamma_{GWT} * \gamma_{water}$
۵	Requil را محاسبه کنید: $\log R_{equil} = \log \frac{M_{Requil}}{M_{Ropt}} = a + \frac{b - a}{1 + EXP \left[\ln \left(-\frac{b}{a} \right) + k_m (S_{equil} - S_{opt}) \right]}$ a, b و km از جدول ۱ (ثابت).
۶	مقدار RF تابعی از P4,PI و P200 از جداول ۲ و ۳ محاسبه می‌شود.
۷	محاسبه فاکتور تنظیم مصالح بازیابی شده (FR): If (Sequil - Sopt) < 0: FR = RF + Requil * RR - RR * RF If (Sequil - Sopt) > 0: FR = Requil (RF + RR - RR * RF)

جدول ۶. خلاصه‌ی محاسبات EICM برای تعیین عامل تعدیل مصالح کاملاً بهبودیافته یا یخ‌زده (FU)

شماره‌ی مرحله	توضیحات
۱	Sopt درجه اشباع بهینه
۲	عامل تعدیل را برای مصالح کاملاً بازیابی شده یا یخ‌زده، FU محاسبه کنید: $\log F_U = \log \frac{M_R}{M_{Ropt}} = a + \frac{b - a}{1 + EXP \left[\ln \left(-\frac{b}{a} \right) + k_m (S - S_{opt}) \right]}$

۲-۲-۴- فاکتور تعدیل ترکیبی (Fenv)، برای لایه‌های سازه‌ای

برای نمایش تغییرات ممکن در MR ناشی از تغییر وضعیت فیزیکی در طول زمان، نمودار عمق-زمان برای یک سازه روسازی معمولی در شکل ۱ نشان داده شده است. سه حالت

مصالح با سه ترکیب رنگ شامل مصالح یخ‌زده (خاکستری تیره، FF)، در حال بازیابی (خاکستری روشن، FR) و کاملاً بازیابی شده یا یخ‌زده (سفید، FU) مشخص گردیده است.

$t =$ زمان (مرتبط با ستون ماتریس)
 $h_{node} =$ طول فنر در نظر گرفته شده برای گرهی مورد نظر.
 $MR_{node,t} =$ مدول‌های گره.
 جابجایی کلی در زمان، توسط مجموع جابجایی‌ها از همگی گره‌ها در زمان t مورد نظر ارائه شده است و برای مثال، برای ساعت ۱.

$$\delta_{t=1} = \sigma \cdot \sum_{node=1}^n \frac{h_{node}}{MR_{node}} \quad (6)$$

$n =$ تعداد گره‌ها (ردیف‌های ماتریس)
 برای رسیدن به جابجایی میانگین در کل دوره‌ی تحلیل (۲ هفته یا ۱ ماه)، معادله‌ی ۷ بکاررفته است:

$$\delta_{average} = \sigma \cdot \frac{1}{t_{total}} \cdot \sum_{t=1}^{t_{total}} \left(\sum_{node=1}^n \left(\frac{h_{node}}{MR_{node,t}} \right) \right) \quad (7)$$

$t_{total} =$ کل مدت زمان t که در آن، مدول‌های ترکیبی محاسبه شده‌اند (تعداد ستون‌های ماتریس). برای کاربرد در EICM، هر گام افزایش زمانی برابر ۱ ساعت در نظر گرفته شده است.

سپس، مدول‌های معادل ترکیبی می‌توانند با یافتن مدول‌های ترکیبی (M_{Rcomp}) به دست آیند که $\delta_{average}$ مشابهی را در کل ضخامت لایه برای همان σ تولید می‌کند. $\delta_{average}$ برای مدل ترکیبی از معادله‌ی ۷ محاسبه می‌شود و σ از هر دو طرف معادله حذف می‌گردد:

$$\sigma = \frac{h_{total}}{M_{Rcomp}} \quad (8)$$

$$\frac{h_{total}}{M_{Rcomp}} = \frac{1}{t_{total}} \cdot \sum_{t=1}^{t_{total}} \left(\sum_{node=1}^n \left(\frac{h_{node}}{MR_{node,t}} \right) \right) \quad (9)$$

هنگامی که: $h_{total} =$ کل ارتفاع لایه/زیرلایه‌ی مورد نظر، و:

$$h_{total} = \sum_{node=1}^n h_{node} \quad (9)$$

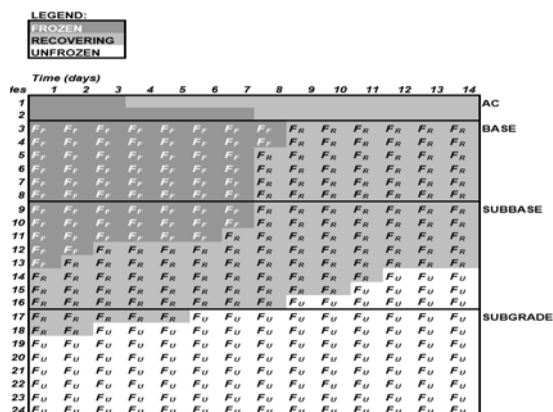
چون مدول‌های انعطاف‌پذیر در هر گره/زمان می‌توانند به عنوان نتیجه‌ی زمان‌های عامل تعدیل در حالت بهینه بیان شوند، معادله‌ی ۹ می‌تواند با معادله‌ی ۱۰ جایگزین شود. عامل تعدیل ترکیبی (F_{env}) برای زیرلایه‌ی (زیرمجموعه‌ی ماتریس) مورنظر می‌تواند از معادله‌ی زیر بدست آید:

$$\frac{h_{total}}{F_{env} \cdot M_{Ropt}} = \quad (10)$$

$$F_{env} = \frac{1}{t_{total}} \cdot \sum_{t=1}^{t_{total}} \left(\sum_{node=1}^n \left(\frac{h_{node}}{F_{node,t} \cdot M_{Ropt}} \right) \right) \cdot \frac{h_{total} \cdot t_{total}}{\sum_{t=1}^{t_{total}} \left(\sum_{node=1}^n \left(\frac{h_{node}}{F_{node,t}} \right) \right)}$$

$F_{env} =$ عامل تعدیل ترکیبی برای زیرلایه‌ی مورد نظر.

برای حل مسئله تولید فاکتور تعدیل ترکیبی (F_{env}) - که شامل ایجاد ماتریسی با عوامل تعدیل MR در هر گره i در زمان t است - محور افقی، تعداد گره‌ها و محور عمودی، افزایش زمان (در گام‌های یک ساعته) را در یک دوره‌ی تحلیل (به مدت دو هفته یا یک ماه) نشان می‌دهد. عناصر ماتریس با FF، FR و FU بسته به وضعیت مصالح بیان شده‌اند.



شکل ۱. نمودار عمق-زمان و ماتریس ضرایب تعدیل

ماتریس فاکتور تعدیل پس از تثبیت، به شکل زیر تقسیم‌بندی می‌گردد:

(آ) لایه‌ها، بسته به لایه‌های سازه‌ای (اساس، زیراساس، سابگرید) که توسط کاربر تعریف می‌شود.

(ب) زیرلایه‌ها، توسط EICM و براساس نیاز به مدول‌های بعدی و همچنین عملکرد عمق نفوذ یخ‌زدگی تعریف می‌گردد.

(ج) برای هر دوره‌ی تحلیل (۲ هفته یا ۱ ماه)، یک زیرمجموعه ماتریس از فاکتورهای تعدیل MR به هر زیرلایه الصاق می‌شود.

اگر عناصر ماتریس‌ها، همان مقادیر مدول مرتبط با فرضیات موقتی بوده و $M_{Ropt} = 1$ باشد، یک روش ساده برای دستیابی به مدول‌ها با شبیه‌سازی آن به شکل مجموعه فنرهای انعطاف‌پذیر در نظر گرفته شده است. عناصر موجود در ستون ۱ (برای مثال مرتبط با ساعت ۱) از ماتریس گره/زمان، به عنوان مجموعه‌ای از فنر (یک فنر در هر گره) در نظر گرفته می‌شود. اگر تنش‌های ایجادشده در این مدل را σ بنامیم، تغییر مکان در یک فنر در گره و زمان داده شده می‌تواند به شرح ذیل محاسبه گردد.

$$\delta_{node,t} = \frac{\sigma \cdot h_{node}}{M_{node,t}} \quad (5)$$

$nude =$ تعداد گره

۲-۳ - محاسبات EICM - تعیین دما در سیستم

روسازی

دوام مصالح دال بتنی، تحت تاثیر چرخه‌های ذوب و یخبندان عمل می‌کند. دما و رطوبت مرتبط با پدیده‌ی curling و warping است و نقش مهمی در تعریف رفتار خستگی روسازی بتنی ایفا می‌نماید. دما و رطوبت در باز و بسته کردن درزها و ترک‌هایی که بر عملکرد تاثیر می‌گذارند، نقش دارند. در مصالح پیوسته، دماهای سردتر به تشکیل یخ و افزایش مدول منجر می‌شود. برای شرایط یخ‌زده، مدول‌های ارتجاعی خاک سابگرد را معمولاً برابر ۱ میلیون psi برای مصالح ریزدانه و ۲/۵ میلیون برای مصالح درشت‌دانه در نظر گرفته‌اند. به عبارت دیگر، دماهای گرم‌تر، باعث ذوب می‌شوند و منجر به افزایش میزان رطوبت و کاهش میزان مدول‌ها می‌گردد. در طول فرایند ذوب، مدول‌های ارتجاعی در مصالح پیوسته ممکن است کمتر از میزان بهینه (۰,۵ تا ۰,۸۵ برابر MRopt) باشند.

۲-۴ - عمق آب‌های زیرزمینی

عمق آب‌های زیرزمینی برای تخمین بهتر عمق میانگین سالانه یا عمق میانگین فصلی آب (یعنی میزان آب برای هر چهار فصل سال) می‌باشد. در سطح ۱ ورودی، می‌توان با حفر گمانه‌هایی در مقطع‌های عرضی طراحی تعیین کرد. در سطح ۳ ورودی، مقدار میانگین سالانه یا میانگین‌های فصلی تخمینی می‌تواند در نظر گرفته شود. گزارشات خاکشناسی محلی، مراجع بالقوه‌ای برای دستیابی به تخمین‌های سطح ۳ می‌باشد. شناسایی این پارامتر که نقشی چشمگیر در صحت محتوای رطوبت روسازی/ زیراساس و مقادیر مدول‌های متعادل دارد، بسیار پراهمیت است.

از آنجا که با اتصال نرم افزار EICM به ایستگاه‌های هواشناسی در هر منطقه، تمام فاکتورهای اقلیمی، یکپارچه‌سازی می‌شوند، در همه تحقیقات پیشین، اثرات مناطق آب‌وهوایی بصورت کلی بررسی شده‌اند و در نتیجه تاثیر تک‌تک فاکتورهای آب و هوایی، مورد بررسی قرار نگرفته است. مهمترین تحقیقات پیشین در این رابطه به شرح ذیل عنوان می‌گردد. دانشگاه بین‌المللی قزوین (۲۰۱۹) طی مقاله‌ای تحت عنوان تاثیر سیکل‌های ذوب و انجماد در چقرمگی مودهای ۱ و ۲ شکست ملات سیمانی، با استفاده از برش نمونه‌های استوانه‌ای (دیسک برزلی ترک خورده)،

$Fnode,t =$ عامل تعدیل در زمان و گره (که می‌تواند FF، FR یا FU براساس وضعیت مصالح باشد).

شایان ذکر است که این فرایند باید برای دوره‌ی طراحی کامل (برای مثال، ۲۰ سال) که به ماه‌ها یا دوره‌های ۲ هفته‌ای تقسیم شده است) بکار برده شود. زیرا عوامل تعدیل از هر گره به گره دیگر و حتی در هر لایه (یا زیرلایه) با شرایط برابر (یخ‌زده، یخ‌زده یا در حال بازیابی)، متفاوت است.

۲-۵ - اجرای Fenv

نرم‌افزار راهنمای طراحی، دو انتخاب برای تحلیل سازه‌ای شامل LEA و FEA دارد. اگرچه EICM، اطلاعات محیطی اساس را به طور ساعتی ارائه می‌دهد اما انجام تحلیل به روش اجزاء محدود یا الاستیک خطی در لایه اساس عملی می‌باشد. برای بررسی این موضوع، دوره‌ی تحلیل (طول عمر طراحی) به دوره‌های ۱ ماهه یا ۲ ماهه تقسیم شده‌اند و در پایان، تحلیل‌های تنش- کرنش، شکل می‌گیرد.

MRopt از معادله‌ی ۱۱ محاسبه می‌گردد:

$$M_{Ropt} = k_1 \cdot p_a \cdot \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{total}}{p_a} + 1\right)^{k_3} \quad (11)$$

هنگامی که:

$$k_3, k_2, K_1 = \text{ثابت‌های رگرسیون}$$

$$p_a = \text{فشار اتمسفر}$$

$$\theta = \text{تنش بالک}$$

$$\tau_{oct} = \text{تنش برشی هشت‌وجهی}$$

برای حل Fenv با فرایندی مشابه به فرایند شبیه‌سازی فتر، شناخت شرایط تنش در اساس برای هر ستون ماتریس عمق- زمان لازم است. این مورد شامل تحلیل به روش اجزاء محدود می‌باشد، اما تحلیل‌ها را از لحاظ زمان محاسبه (۷۲۰ تحلیل در هر ماه، ۱/۷ میلیون تحلیل در هر ۲۰ سال) غیرعملی می‌کند. بنابراین، معادله‌ای که برای محاسبه‌ی مدول‌های وابسته به تنش به روش اجزاء محدود استفاده شده‌اند، به شرح ذیل می‌باشد:

$$M_R = F_{env} \cdot k_1 \cdot p_a \cdot \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3} \quad (12)$$

MR = مدول‌های ارتجاعی وابسته به تنش.

Fenv = فاکتور ترکیبی تنظیم مدول محیطی برای هر لایه/ زیرلایه.

نیوجرسی، کنتاکی و دلاور در شمال شرقی ایالات متحده بر روی روسازی‌های بتنی پرداختند و بر اساس آن نرم افزار EICM را برای این ایالت‌ها کالیبره نمودند (Li, Mills, McNeil, 2011)

عزیزی نمینی و همکارانش در دانشگاه لینکلن (۲۰۰۹) تحت حمایت سازمان ملی تحقیقات پل‌های ایالات متحده و سازمان راه‌های ایالت نبراسکا به بررسی پارامتریک نرم افزار طراحی MEPDG و آنالیز حساسیت آن پرداختند. در بخش کوتاهی از آن به تاثیر کلی آب و هوا بر آسیب‌های سازه‌ای روسازی‌ها اشاره شده و خلاصه‌ای از نتایج آن به شرح ادامه می‌باشد.

الف) شاخص ناهمواری روسازی بتنی JPCP نسبت به متغیرهای: عمق آب‌های زیرزمینی، زمان رسیدن به درصدی از انقباض نهایی و مدول‌های ارتجاعی اساس و ساب‌گرید، به صورت "غیرحساس" ارزیابی شده است.

ب) متغیرهای: عمق آب‌های زیرزمینی، زمان رسیدن به درصدی از انقباض نهایی و جذب موج کوتاه سطحی، تقریباً بر مجموع پلکانی شدن‌ها، ترک‌خوردگی‌ها و ناهمواری‌ها، حساسیت قابل توجهی نداشته‌اند و البته در این مقاله نیاز به بازمینی مجدد نقش عمق آب‌های زیرزمینی در نرم‌افزار MEPDG به روشنی پیشنهاد شده است، چرا که اگر سطح آب‌های زیرزمینی به سطح روسازی نزدیک شود، می‌تواند خسارات زیادی را به بار آورد.

(Azizinamini, Ala & Stanigzai, 2009).

تیم و بارت در دانشگاه آبرن (۲۰۰۵) تحت حمایت مرکز تحقیقات بزرگراه‌های ایالت آلاباما، نرم افزار MEPDG را برای طراحی روسازی‌های صلب ارزیابی نمودند. در بخشی از آن، به مکانیزم تاثیر فاکتورهای اقلیمی در روسازی‌های بتنی

به صورت کلی پرداخته شده و خرابی‌های روسازی‌های JPCP، JRCP و CRCP را در شرایط مختلف سازه‌ای، اقلیمی و ترافیکی بصورت کلی مورد مقایسه قرار داده است. یکی از نتایج مهم این تحقیق این بود که: ضخامت دال بتنی محاسبه شده از روش AASHTO با ضخامت دال محاسبه شده از روش MEPDG، تفاوت چندانی ندارد.

(Timm, Barret, 2005)

چقرمگی‌های شکست را در چرخه‌های ۰، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سیکل ذوب و انجماد ترسیم نموده و ارتباط تخلخل ملات با چقرمگی را به بحث گذاشت و سرانجام یک مدل فروپاشی بر اساس شکست ناشی از تخلخل ارائه نمود (Abdolghanizadeh, K., Hosseini, M., Saghafiyazdi, M. 2019)

مجله مرزهای مهندسی سازه و عمران (۲۰۱۸) در مقاله‌ای تحت عنوان بررسی آسیب‌های روسازی بتنی ساده درزدار تحت شرایط مختلف آب و هوایی، آسیب‌های ذوب/یخ را یکی از تهدیدات اصلی بر عملکرد طولانی‌مدت روسازی عنوان کرد و سپس با استفاده از داده‌های LTPP، مقادیر ترک‌های عرضی پوسته‌شدن درزها و ناهمواری (IRI) را در بین مقاطع آزمایشی واقع در مناطق آب و هوایی (مرطوب-یخ‌زده، مرطوب-بدون یخ‌زدگی، خشک-یخ‌زده و خشک-بدون یخ‌زدگی) مورد مقایسه قرار داد. نتایج حاصله با تلفیق آزمایشات FWD نشان داد که مدول الاستیسیته دال بتنی و ضریب عکس‌العمل بستر، با افزایش زمان سرویس و در شرایط انجماد، کاهش می‌یابند. در انتهای مقاله، شبیه‌سازی‌های MEPDG برای پیش‌بینی تغییرات IRI ناشی از توسعه سیکل‌های ذوب/یخ و عمر سرویس را در شرایط آب و هوایی مختلف، منطقی ارزیابی نمود

(Shuaicheng Guo, Qingli Dai & Jacob Hiller, 2018). سازمان بزرگراه‌های فدرال امریکا (۲۰۱۶)

در گزارشی، تاثیر فاکتورهای محیطی بر عملکرد روسازی‌ها با استفاده از داده‌های LTPP را مورد ارزیابی قرار داد؛ در این گزارش، تاثیر منطقه آب و هوایی، چرخه‌های ذوب و انجماد، بارندگی و دمای محیط، بر خرابی‌های روسازی JPCP مورد بررسی قرار گرفت که خلاصه‌ای از نتایج آن به شرح زیر می‌باشد:

الف) JPCP‌های قرار گرفته در مناطق با چرخه‌های ذوب و انجماد سالانه بالاتر، شکستگی گوشه و خرابی درز بیشتری را تجربه می‌کنند.

ب) JRCP‌های قرار گرفته در مناطقی که یخبندان در آن اتفاق نمی‌افتد (میانگین دما بیشتر از ۱۰ درجه سانتی‌گراد)، زبری بیشتری را نسبت به JRCP‌های قرار گرفته در مناطق سردتر، تجربه می‌کنند. (HRT-16-078, 2016).

لی و همکارانش تحت حمایت دانشگاه حمل و نقل ایالت دلاور (۲۰۱۱)، به بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی در سه ایالت

$$NSI = S_{ijk} = \frac{\partial Y_j}{\partial X_k} \left(\frac{X_{ki}}{Y_{ji}} \right) \quad (13)$$

هنگامی که X_{ki} و Y_{ji} مقادیر خروجی در مقابل مقادیر ورودی K در وضعیت i می‌باشد و

$$\frac{\partial Y_j}{\partial X_k} \Big|_i \cong \frac{\Delta Y_j}{\Delta X_k} = \frac{Y_{j,i+1} - Y_{j,i-1}}{X_{k,i+1} - X_{k,i-1}} \quad (14)$$

شاخص حساسیت NSI می‌تواند به این شکل تفسیر شود که درصدی از تغییرات در ورودی، باعث چه درصدی از تغییرات در خروجی می‌گردد. مثلاً هنگامیکه $S_{ijk} = 0.5$ باشد بدین معناست که ۲۰ درصد تغییر در مقدار ورودی، باعث ۱۰ درصد تغییر در مقدار خروجی خواهد شد. (به عبارت ساده‌تر: $0.5 \times 20\% = 10\%$).

$$NSI = \frac{Y_i - Y_0}{C_i * Y_0} \quad (15)$$

هنگامیکه NSI برابر شاخص حساسیت نرمال، Y_i برابر خروجی مبنا در مقابل ورودی مبنا، Y_0 برابر خروجی i و C_i برابر نسبت تغییرات ورودی i نسبت به ورودی مبنا می‌باشد. چنانچه $NSI \geq 5$ باشد، تعبیر "فوق العاده حساس"، چنانچه $1 \leq NSI < 5$ باشد، تعبیر "خیلی حساس"، چنانچه $0.1 \leq NSI < 1$ باشد، تعبیر "حساس"، چنانچه $0.01 \leq NSI < 0.1$ باشد، عبارت "تا حدی حساس" و چنانچه $NSI < 0.01$ باشد، تعبیر "غیرحساس" به کار خواهد رفت.

۳-۳- فرایند پژوهش

۳-۳-۱ آنالیز حساسیت آسیب‌های روسازی در مقابل چرخه‌های ذوب و انجماد و سفره آب‌های زیرزمینی هدف از این پژوهش، ارزیابی و آنالیز پلکانی‌شدن، ترک‌خوردگی عرضی و ناهمواری‌های سطح به عنوان آسیب‌های روسازی JPCP، در مقابل چرخه‌های ذوب و انجماد و عمق سفره آب‌های زیرزمینی می‌باشد. مدول ارتجاعی مصالح اساس در مواجهه با این فاکتورها تغییر می‌کند و این تغییرات، میزان آسیب‌های روسازی را تحت تاثیر قرار خواهند داد.

گکلو و سیلان در دانشکده عمران، ساختمان و محیط زیست دانشگاه ایمر ایالت آیووا (۲۰۰۵)، سیستم روسازی صلب را با استفاده از روش طراحی MEPDG آنالیز حساسیت نمودند. آنها دو نوع روسازی بتنی JPCP اجرا شده در ایالت آیووا را به عنوان محیط تحقیق در نظر گرفتند و به منظور آنالیز حساسیت روسازی به مناطق آب و هوایی، هر بار مختصات یکی از مناطق ایالات متحده آمریکا واقع در اقلیم گرم و خشک، سرد و خشک، گرم و مرطوب، سرد و مرطوب و معتدل را به عنوان منطقه آب و هوایی به نرم افزار معرفی نمودند. نتایج این تحقیق، به آنالیز حساسیت تک تک فاکتورهای آب و هوایی نپرداخته است

(Guclu, & Ceylan, 2005).

۳-روش تحقیق

۳-۱- سیستم روسازی به کار رفته در پژوهش

روسازی بتنی به کار رفته، برای یک بزرگراه با ترافیک سنگین با بار محوری منفرد معادل (ESAL) برابر $15/000/000$ طراحی می‌گردد و بر این اساس مطابق نشریه ۷۳۱ (دستورالعمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راه‌ها (Planning and Budgeting Organization, Technical and Executive Affairs, 2017) برگرفته از ضوابط طراحی آشتو (انجمن بزرگراه‌های ایالتی و سازمان حمل و نقل آمریکا)، بتن بارده C_{35} با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع به عنوان مصالح رویه، یک لایه اساس دانه‌ای به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر و جنس خاک ساب‌گرید از نوع خاک‌های (A_2, A_1) با ضریب عکس‌العمل بستر اصلاح‌شده برابر ۹۵ مگانیتون بر مترمکعب در نظر گرفته شد. فاصله بین درزها برابر $4/57$ متر، عرض سواره‌رو برابر $3/65$ متر و شانه‌ها از جنس بتنی و بصورت پیوسته نسبت به سواره‌رو در نظر گرفته شد. لازم به توضیح است که همبستگی بین مشخصات فنی به کار رفته، مطابق با جدول ۷ به صورت کامل مدنظر قرار گرفته است.

۳-۲- شاخص حساسیت و معیار ارزیابی

به مطالعه تأثیرپذیری متغیرهای خروجی یک مدل، از متغیرهای ورودی آن، «تحلیل حساسیت» گفته می‌شود؛ در این پژوهش از شاخص حساسیت نرمال به شرح رابطه ۱۳ به عنوان معیار ارزیابی استفاده شده است.

(Schwartz, et al., 2011)

جدول ۷. مشخصات فنی انتخاب شده برای طراحی مبنای این تحقیق با توجه به ضوابط آشتو

عنوان کلی	عنوان جزئی	علامت	مقدار و واحد براساس ضوابط آشتو	مقدار در واحد SI
نشانه خدمت‌دهی	نشانه خدمت‌دهی اولیه	PSI	4.5	4.5
	نشانه خدمت‌دهی نهایی	Pt	3	3
خصوصیات دال بتنی	رده بتن*	C*	35	350 Kg/cm ²
	مقاومت فشاری*	f _c *	5000 Psi	34.5 Mpa
	میانگین مدول شکست ۲۸ روزه	S'c	638 Psi	4.4 Mpa
	مدول الاستیسیته دال بتنی	E _c	4,000,000 Psi	27580 Mpa
	نسبت پواسون برای بتن	U	0.19	0.19
خصوصیات اساس	مدول الاستیسیته اساس	E _b	30,000 Psi	207 Mpa
	ضخامت طراحی اساس	H _b	6 In	15 Cm
	فاکتور اصطکاک اساس-دال	F	1.4	1.4
قابلیت اطمینان و انحراف استاندارد	سطح اطمینان	R	90%	90%
	انحراف استاندارد کلی	S _o	0.34	0.34
خصوصیات اقلیمی	میانگین سرعت باد سالانه	WIND	4.9 Mph	2.19 m/s
	میانگین دمای هوای سالانه	TEMP	61.2 Fr	16.2 C'
	میانگین بارندگی سالانه	PRECIP	14.2 In	360 mm
عکس العمل بستر	ضریب عکس العمل موثر بستر	K	350 Pci	95 Mn/m ³
ترافیک	بار تک محوری معادل (ترافیک سنگین)	ESAL	15 Milion	15 Milion
	بار تک محوری معادل (ترافیک متوسط)	ESAL	5 Milion	5 Milion

۳-۲-۳- ارزیابی تغییرات مدول ارتجاعی اساس در مقابل چرخه‌های ذوب و انجماد و سطح آب‌های زیرزمینی

EICM در یکی از مدل‌بندی‌های خود با دریافت مشخصات فنی روسازی، تغییرات مدول ارتجاعی مصالح دانه‌ای ناشی از تغییر وضعیت روسازی در حالت‌های یخ زده، یخ‌نزده و در حال ذوب را بصورت ضرایب FR، FF، FU محاسبه کرده و ارائه می‌دهد. البته این نرم‌افزار در یک دوره ۱۵ روزه و یا یک‌ماهه برای هر نقطه از مقطع روسازی برای هر روز بسته به اینکه آن نقطه از مقطع از لحاظ یخ‌زدگی در چه وضعیتی باشد، ضرایب مربوطه را محاسبه می‌کند و در نهایت با محاسبه‌ی ماتریس داده‌ها، تنها یک ضریب به نام Fenv و یا فاکتور تنظیم مدول ارتجاعی را برای هر دوره ارائه می‌دهد. در این پژوهش با فرض اینکه کل مقطع روسازی از لحاظ یخ‌زدگی در شرایط مشابه قرار دارد، مدل مذکور برای مصالح اساس در دو حالت

($PI * P \# 200 = 0$) و ($PI * P \# 200 > 0$) تنظیم شد و مشخصات فیزیکی مصالح اساس در محدوده مشخصات نشریه ۱۰۱ (مشخصات فنی عمومی راه‌ها) و بر اساس ضوابط آشتو (انجمن بزرگراه‌های ایالتی و سازمان حمل و نقل آمریکا) تعریف گردید، حساسیت مدول ارتجاعی مصالح اساس در مقابل چرخه‌های ذوب و یخ‌زدان و سطح آب‌های زیرزمینی با استفاده از این مدل پیشرفته یکپارچه‌سازی مورد آنالیز واقع شد و فاکتورهای تنظیم مدول در حالت‌های یخ‌زده، یخ‌نزده و در حال ذوب و بازایی بصورت ضرایب‌های (FR, FU, FF) محاسبه و در مقابل تغییر مشخصات فنی و شرایط محیطی لایه اساس، مورد ارزیابی قرار گرفت.

۳-۲- ارزیابی آسیب‌های روسازی در مقابل تغییرات مدول ارتجاعی اساس

در نتایج تحقیقات مشترک دانشگاه‌های کالج پارک مریلند و ایمز آیووا (۲۰۱۱) تحت حمایت آستو، شاخص حساسیت هریک از آسیب‌های روسازی JPCP در مقابل تغییرات مدول ارتجاعی اساس، محاسبه و ارائه شده است. روش محاسبه این شاخص‌های حساسیت با روش محاسبه شاخص‌های حساسیت در پژوهش حاضر، همخوانی کامل دارد؛ بنابراین با تلفیق نتایج حاصل از بخش اول این تحقیق و نتایج ارائه شده در تحقیقات دانشگاه‌های مریلند و آیووا، احتمال کاهش یا افزایش هریک از آسیب‌های روسازی بتنی JPCP در مقابل چرخه‌های ذوب و انجماد ارزیابی خواهد شد.

$$(SI)_{d-e} = (SI)_{d-m} * (SI)_{m-e} \quad (16)$$

هنگامیکه $(SI)_{d-e}$ برابر با شاخص حساسیت آسیب روسازی در مقابل فاکتورهای محیطی، $(SI)_{d-m}$ برابر شاخص حساسیت آسیب‌های روسازی در مقابل تغییرات مدول ارتجاعی اساس و $(SI)_{m-e}$ برابر شاخص حساسیت مدول ارتجاعی اساس در مقابل فاکتورهای محیطی می باشد.

۴- نتایج پژوهش

۴-۱- حساسیت مدول ارتجاعی مصالح اساس در مقابل

چرخه‌های ذوب و انجماد و سطح آب‌های زیرزمینی

با استفاده از مدل EICM

جداول ۹ و ۱۰ فهرست ورودی‌های مربوط به این مدل را بصورت خلاصه نشان می‌دهد.

جدول ۸. درصد تغییر ضخامت دال طراحی نسبت به مدول ارتجاعی اساس

درصد تغییر ضخامت دال	NSI	D	Eb (psi)	درصد تغییر مدول ارتجاعی اساس دانه‌ای	ضریب فاکتور تعدیل مدول
-20.2	-0.005	7.73	1200000	3900	40
-14.2	-0.005	8.31	900000	2900	30
-11.1	-0.006	8.61	600000	1900	20
-7.6	-0.008	8.95	300000	900	10
0.0	0.000	9.69	30000	0	1
0.3	-0.031	9.72	27000	-10	0.9
0.5	-0.026	9.74	24000	-20	0.8
0.8	-0.028	9.77	21000	-30	0.7
1.1	-0.028	9.8	18000	-40	0.6
1.4	-0.029	9.83	15000	-50	0.5

و (۱۹)، مدول ارتجاعی مصالح اساس در مقطع روسازی بتنی را در شرایط مختلف ذوب و انجماد، محاسبه می‌نماید.

$$F_F * M_{ROPT} = Mr_F \quad (17)$$

$$F_F * M_{ROPT} = Mr_R \quad (18)$$

$$F_u * M_{ROPT} = Mr_u \quad (19)$$

بهینه Mr_F و Mr_R و Mr_u به ترتیب برابر با مدول ارتجاعی محاسبه شده مصالح در حالت‌های یخزده، بازیابی و یخ‌نزده می‌باشد.

خروجی مدل، شامل تولید سه فاکتور تنظیم مدول ارتجاعی در حالت‌های یخ‌نزده (F_F)، یخ‌نزده (F_u) و در حالت ذوب‌یخ و بازیابی (F_R) می‌باشد که مطابق روابط (۱۷) و (۱۸)

هنگامی که F_u ، F_R ، F_F به ترتیب برابر فاکتور تنظیم مدول ارتجاعی در شرایط یخ‌نزده، بازیابی و یخ‌نزده و M_{ROPT} برابر مدول ارتجاعی در شرایط بهینه یعنی در حداکثر تراکم در رطوبت

جدول ۹. ورودی‌های فاکتور تنظیم مدول ارتجاعی در مدل EICM در حالت $(PI * P \# 200 = 0)$

مشخصات در نظر گرفته شده به عنوان مشخصات مبنا در حالت: $(PI) * (P \# 200) = 0$					
ردیف	علامت اختصاری	شرح مشخصات	مقدار مبنا	واحد	توضیحات
1	PI	دامنه خمیری	0	-	اساس غیرخمیری
2	P#200	درصد عبوری از الک ۲۰۰	5	%	بین ۲ تا ۸ درصد مطابق ضوابط آشتو
3	D60	قطری که ۶۰٪ دانه‌ها از آن رد شده اند	0.375	In	برابر ۳/۸ اینچ مطابق ضوابط آشتو
4	M.R frz	مدول ارتجاعی مصالح یخ زده	2,500,000	Psi	برابر ۲,۵۰۰,۰۰۰ مطابق NCHRP 1-37 برای این حالت
5	M.R opt_est	مدول ارتجاعی بهینه تخمینی	30,000	Psi	بین ۱۵۰۰۰ تا ۴۵۰۰۰ برای اساس دانه‌ای
6	y.Gwt	عمق آب زیرزمینی	120	In	بین ۲ تا ۱۸ فوت مطابق NCHRP 1-37
7	S	درجه اشباع طرح	78	%	برابر با درجه اشباع در شرایط بهینه
8	Sopt	درجه اشباع در شرایط بهینه	78	%	درجه اشباع بهینه محاسبه شده توسط مدل
9	Δt	تعداد روزهای سپری شده از شروع ذوب	45	Day	برابر نصف طول دوره بازیابی در نظر گرفته شده است
10	T.R	زمان لازم برای بازیابی	90	Day	برابر ۹۰ روز برای مصالح درشت دانه مطابق NCHRP 1-37 در این حالت
11	FF	فاکتور تنظیم مدول مصالح ناپیوسته در شرایط یخ زده	83	-	محاسبه شده در این حالت توسط مدل
12	FR	فاکتور تنظیم مدول مصالح ناپیوسته در شرایط بازیابی	0.67	-	محاسبه شده در این حالت توسط مدل
13	FU	فاکتور تنظیم مدول مصالح ناپیوسته در شرایط یخ زده	1	-	محاسبه شده در این حالت توسط مدل

جدول ۱۰. ورودی‌های فاکتور تنظیم مدول ارتجاعی در مدل EICM در حالت $(PI * P \# 200 > 0)$

مشخصات در نظر گرفته شده به عنوان مشخصات مبنا در حالت: $(PI) * (P \# 200) > 0$					
ردیف	علامت اختصاری	شرح مشخصات	مقدار مبنا	واحد در مدل	توضیحات
1	PI	دامنه خمیری	2	-	بین ۰ تا ۴ درصد مطابق ضوابط آشتو
2	P#200	درصد عبوری از الک ۲۰۰	5	%	بین ۲ تا ۸ درصد مطابق ضوابط آشتو
3	D60	قطری که ۶۰٪ دانه‌ها از آن رد شده اند	0.375	In	برابر ۳/۸ اینچ مطابق ضوابط آشتو
4	M.R frz	مدول ارتجاعی مصالح یخ زده	1,000,000	Psi	برابر ۱,۰۰۰,۰۰۰ مطابق NCHRP 1-37 برای این حالت
5	M.R opt_est	مدول ارتجاعی بهینه تخمینی	30,000	Psi	بین ۱۵۰۰۰ تا ۴۵۰۰۰ برای اساس دانه‌ای
6	y.Gwt	عمق آب زیرزمینی	120	In	بین ۲ تا ۱۸ فوت مطابق NCHRP 1-37
7	S	درجه اشباع طرح	87	%	برابر با درجه اشباع در شرایط بهینه
8	Sopt	درجه اشباع در شرایط بهینه	87	%	درجه اشباع بهینه محاسبه شده توسط مدل
9	Δt	تعداد روزهای سپری شده از شروع ذوب	45	Day	برابر نصف طول دوره بازیابی در نظر گرفته شده است
10	T.R	زمان لازم برای بازیابی	90	Day	برابر ۹۰ روز برای مصالح درشت دانه مطابق NCHRP 1-37 در این حالت
11	FF	فاکتور تنظیم مدول مصالح ناپیوسته در شرایط یخ زده	33	-	محاسبه شده در این حالت توسط مدل
12	FR	فاکتور تنظیم مدول مصالح ناپیوسته در شرایط بازیابی	0.67	-	محاسبه شده در این حالت توسط مدل
13	FU	فاکتور تنظیم مدول مصالح ناپیوسته در شرایط یخ زده	1	-	محاسبه شده در این حالت توسط مدل

زده شده است، انتظار می‌رود مدول ارتجاعی مصالح اساس در طول این دوره روز به روز تغییر نماید. برای تحقیق در این مورد تعداد روزهای سپری شده از شروع ذوب یخ‌ها ($t\Delta$) برابر با ۱ روز، ۴۵ روز و ۹۰ روز در مدل EICM گذاشته شد و نتایجی به شرح جداول ۱۳ و ۱۴ بدست آمد.

این نتایج نشان می‌دهد که FR تولید شده توسط EICM در واقع مدول ارتجاعی در هنگام ذوب یخ در مصالح ناپیوسته بوده و هرچه به پایان دوره ذوب یخ نزدیک‌تر می‌شویم، مدول ارتجاعی، کمتر شده و سرانجام به کمترین مقدار خود می‌رسد.

جدول ۱۳. تغییر در فاکتور تنظیم مدول‌های فصلی در طول دوره

ذوب یخ در مصالح اساس در حالت

$$(PI*P\# 200=0)$$

فاکتورهای تنظیم مدول در حالت: $PI*P\#200=0$			متغیر Δt	ردیف
FF	FR	FU		
83	0.85	1	1	1
83	0.67	1	45	2
83	0.49	1	90	3

جدول ۱۴. تغییر در فاکتور تنظیم مدول‌های فصلی در طول دوره

ذوب یخ در مصالح اساس در حالت

$$(PI*P\#200>0)$$

فاکتورهای تنظیم مدول در حالت: $PI*P\#200>0$			متغیر Δt	ردیف
FF	FR	FU		
33	0.85	1	1	1
33	0.67	1	45	2
33	0.487	1	90	3

۴-۱-۴- تأثیر نشانه خمیری و درصد عبوری از الک نمره

۲۰۰ در مصالح اساس بر فاکتورهای تنظیم مدول فصلی

حداکثر نشانه خمیری برای مصالح اساس در نشریه ۱۰۱ (مشخصات فنی عمومی راه) برابر ۴ درصد و دامنه مصالح عبوری از الک نمره ۲۰۰ در محدوده ۲٪ تا ۸٪ مجاز دانسته شده است. جدول ۱۵ تغییر فاکتورهای تنظیم مدول فصلی در مقابل تغییر در درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ برای اساس غیرخمیری و جداول ۱۶ و ۱۷ به ترتیب تغییر فاکتورهای تنظیم

۴-۱-۲- تأثیر تغییرات مدول ارتجاعی بهینه بر فاکتورهای

تنظیم مدول ارتجاعی فصلی

با توجه به اینکه مطابق جداول ۹ و ۱۰ مدول ارتجاعی تخمینی اساس برای حالت مبنا برابر ۳۰۰۰۰ پوند بر اینچ مربع در نظر گرفته شده بود، با تغییر در مدول ارتجاعی تخمینی اساس از ۱۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰۰ پوند بر اینچ مربع در گام‌های (۱۵۰۰۰)، نتایجی به شرح جداول ۱۱ و ۱۲ بدست آمد. داده‌های این جداول نشان می‌دهد که تغییر در مدول ارتجاعی تخمینی اولیه، تنها به تغییر در فاکتور تنظیم مدول ارتجاعی در حالت یخ‌زده می‌انجامد و بر فاکتورهای تنظیم مدول ارتجاعی در حالت‌های بازیابی و یخ‌زده تأثیری ندارد.

جدول ۱۱. تغییر در فاکتورهای تنظیم مدول فصلی در مقابل

تغییرات مدول ارتجاعی بهینه در حالت

$$(PI*P\# 200=0)$$

فاکتورهای تنظیم مدول در حالت: $PI*P\#200=0$			متغیر $M.R\ opt_est$	ردیف
FF	FR	FU		
167	0.67	1	15,000	1
83	0.67	1	30,000	2
56	0.67	1	45,000	3
42	0.67	1	60,000	4

جدول ۱۲. تغییر در فاکتور تنظیم مدول فصلی در مقابل تغییرات

مدول ارتجاعی بهینه در حالت

$$(PI*P\# 200>0)$$

فاکتورهای تنظیم مدول در حالت: $PI*P\#200>0$			متغیر $M.R\ opt_est$	ردیف
FF	FR	FU		
67	0.67	1	15,000	1
33	0.67	1	30,000	2
22	0.67	1	45,000	3
17	0.67	1	60,000	4

۴-۱-۳- تأثیر طول دوره ذوب یخ بر فاکتور تنظیم مدول

فصلی

با توجه به اینکه در راهنمای مدل EICM زمان لازم برای ذوب یخ و بازیابی مصالح اساس دانه‌ای برابر ۹۰ روز تخمین

نتایج مندرج در جداول فوق نشان می‌دهد که تغییر در میزان درصد عبوری از الک نمرة ۲۰۰ در مصالح غیرخمیری تا $(\#200) < 6$ فاکتور تنظیم مدول در حالت بازیابی مصالح (FR) کاهش یافته است.

اما در حالت $(PI * P\#200 > 0)$ نه تنها فاکتور تنظیم مدول در حالت بازیابی مصالح پس از $P\#200 > 6$ کاهش می‌یابد که فاکتور تنظیم مدول در حالت یخ‌زده (FU) در تمام بازه تغییر درصد عبوری از الک ۲۰۰ و همسو با آن تغییر می‌نماید. جدول ۱۷ نشان می‌دهد که تغییر در نشانه خمیری مصالح اساس تغییری در فاکتورهای تنظیم مدول فصلی در حالت‌های بازیابی و یخ‌زده ایجاد نمی‌نماید اما فاکتورهای تنظیم مصالح یخ‌زده (FU) همسو با تغییرات PI به میزان قابل توجهی تغییر نموده است.

۴-۱-۵- تأثیر درصد اشباع مصالح و سطح آبهای زیرزمینی بر فاکتورهای تنظیم مدول فصلی در مدل EICM

سطح آبهای زیرزمینی در محدوده ۲ تا ۱۸ فوت (۰/۶ تا ۵/۵ متر و یا ۲۴ تا ۲۱۶ اینچ) تعریف شده است. همچنین این مدل درصد اشباع بهینه مصالح (S_{opt}) را بر اساس مقادیر ورودی محاسبه می‌نماید.

در این پژوهش مقادیر سطح آبهای زیرزمینی برابر ۲۴، ۱۲۰ و ۲۱۶ اینچ در مدل مذکور قرار گرفت و در هر حالت فاکتورهای تنظیم مدول فصلی برای لایه اساس به شرح جدول ۱۸ و ۱۹ بدست آمد.

همانگونه که مندرجات جداول نشان می‌دهد، تغییر در سطح آبهای زیرزمینی بر فاکتورهای تنظیم مدول فصلی هیچگونه تاثیری نداشته است و تغییر در درصد اشباع نسبت به درصد اشباع بهینه منجر به تغییر در فاکتور تنظیم مدول فصلی در حالت یخ‌زده (FU) شده است به طوری که افزایش درصد رطوبت نسبی نسبت به درصد رطوبت بهینه باعث دو برابر شدن FU و کاهش درصد رطوبت نسبی نسبت به درصد رطوبت بهینه باعث نصف شده FU گردیده است. همخوانی این جداول با جدول (۱۷) مربوط به تغییر نشانه خمیری می‌تواند جالب توجه باشد.

مدول فصلی در مقابل تغییرات درصد عبوری از الک نمرة ۲۰۰ و همچنین در مقابل تغییرات میزان نشانه خمیری مصالح حالت $(PI * P\#200) > 0$ را نشان می‌دهد.

جدول ۱۵. تغییر فاکتورهای تنظیم مدول فصلی در مقابل تغییرات درصد عبوری از الک نمرة ۲۰۰ در حالت $(PI * P\# 200 = 0)$

فاکتورهای تنظیم مدول				ردیف
متغیر مدول در حالت: $PI * P\#200 = 0$				
FF	FR	FU	P#200	
83	0.67	1	2	1
83	0.67	1	3	2
83	0.67	1	4	3
83	0.67	1	5	4
83	0.67	1	6	5
83	0.57	1	7	6
83	0.57	1	8	7

جدول ۱۶. تغییر فاکتورهای تنظیم مدول فصلی در مقابل تغییرات درصد عبوری از الک نمرة ۲۰۰ در حالت $(PI * P\# 200 > 0)$

فاکتورهای تنظیم مدول در حالت: $PI * P\#200 > 0$				ردیف
متغیر				
FF	FR	FU	P#200	
33	0.67	0.487	2	1
33	0.67	0.494	3	2
33	0.67	0.573	4	3
33	0.67	1	5	4
33	0.67	1.63	6	5
33	0.57	1.9	7	6
33	0.57	1.97	8	7

جدول ۱۷. تغییر فاکتورهای تنظیم مدول فصلی در مقابل تغییرات نشانه خمیری مصالح در حالت $(PI * P\# 200 > 0)$

فاکتورهای تنظیم مدول در حالت: $PI * P\#200 > 0$				ردیف
متغیر				
FF	FR	FU	PI	
33	0.67	0.49	1	1
33	0.67	1	2	2
33	0.67	1.95	3	3
33	0.67	2	4	4

جدول ۱۸. فاکتورهای تنظیم مدول ارتجاعی در مقابل تغییرات سطح آبهای زیرزمینی در حالت $(PI*P\# 200=0)$

جدول ۲۰. فاکتورهای تنظیم مدول ارتجاعی در مقابل تغییرات درجه اشباع در حالت $(PI*P\# 200=0)$

فاکتورهای تنظیم مدول در حالت: $PI*P\#200=0$			متغیر	ردیف
FF	FR	FU		
83	0.67	1	24	1
83	0.67	1	120	2
83	0.67	1	216	3

فاکتورهای تنظیم مدول در حالت: $PI*P\#200=0$			متغیر	ردیف
FF	FR	FU		
83	0.67	2	<Sopt	1
83	0.67	1	=Sopt	2
83	0.67	0.487	>Sopt	3

جدول ۱۹. فاکتورهای تنظیم مدول ارتجاعی در مقابل تغییرات سطح آبهای زیرزمینی در حالت $(PI*P\# 200>0)$

جدول ۲۱. فاکتورهای تنظیم مدول ارتجاعی در مقابل تغییرات درجه اشباع در حالت $(PI*P\# 200>0)$

فاکتورهای تنظیم مدول در حالت: $PI*P\#200>0$			متغیر	ردیف
FF	FR	FU		
33	0.67	1	24	1
33	0.67	1	120	2
33	0.67	1	216	3

فاکتورهای تنظیم مدول در حالت: $PI*P\#200>0$			متغیر	ردیف
FF	FR	FU		
33	0.67	2	<Sopt	1
33	0.67	1	=Sopt	2
33	0.67	0.487	>Sopt	3

۴-۱-۶- کاهش یا افزایش احتمال آسیب‌های روسازی در چرخه‌های ذوب و انجماد

مدول ارتجاعی مصالح اساس در حالت متراکم، بین ۱۰۵ تا ۳۲۰ مگاپاسکال (۱۵۰۰۰ تا ۴۵۰۰۰ پوند بر اینچ مربع) می‌باشد. این مقدار مدول مطابق گزارش NCHRP 1-37 در هنگام یخزدگی اساس غیرخمیری تا ۲۵۰۰۰۰۰ و برای اساس با دامنه خمیری بیشتر از صفر، تا ۱۰۰۰۰۰۰ پوند بر اینچ مربع افزایش خواهد یافت.

از طرفی ردیف ۷ جدول ۲۲ شاخص حساسیت آسیب‌های روسازی JPCP در مقابل تغییرات مدول ارتجاعی اساس (حاصل نتایج تحقیقات دانشگاههای مریلند و آیووا) را نشان می‌دهد؛ تلفیق این دو موضوع، میزان کاهش یا افزایش احتمال هریک از آسیب‌های روسازی در فصول ذوب و یخبندان (بهار و زمستان) ناشی از تغییرات مدول ارتجاعی اساس را بشرح جداول ۲۳ و ۲۴ نتیجه می‌دهد.

مدول ارتجاعی مصالح اساس در طراحی مبنای این پژوهش، برابر ۳۰۰۰۰ پوند بر اینچ مربع اختیار شده است. ردیف‌های ۱۱ الی ۱۳ در جداول ۹ و ۱۰ نشان می‌دهد که فاکتورهای تنظیم مدول ارتجاعی مصالح در شرایط یخزده (FF) برای اساس غیرخمیری برابر ۸۳ و برای اساس خمیری برابر ۳۳ می‌باشد. یعنی در هنگام یخزدگی، مدول ارتجاعی اساس خمیری ۸۲۰۰ درصد و مدول ارتجاعی اساس خمیری ۳۲۰۰ درصد افزایش خواهد یافت. داده‌های جدول مذکور همچنین نشان می‌دهد که فاکتورهای تنظیم مدول در شرایط بازبایی مصالح از حالت یخ زده (FR) برای اساس خمیری و

۴-۱-۷- کاهش یا افزایش احتمال آسیب‌های روسازی در مقابل تغییرات عمق سفره آب‌های زیرزمینی

جداول ۱۸ و ۱۹ نشان می‌دهد که تغییرات عمق سفره آب‌های زیرزمینی، تغییری در مدول ارتجاعی اساس ایجاد نمی‌کند و بنابراین نرم‌افزار طراحی MEPDG، آسیب‌های روسازی را در مقابل تغییرات عمق سفره آب‌های زیرزمینی بصورت غیرحساس نشان می‌دهد و این مساله به بررسی و بازبینی بیشتری نیاز دارد.

جدول ۲۲. خلاصه برخی نتایج آنالیز حساسیت در دانشگاه‌های مریلند و آیووا (۲۰۱۱)

ردیف	متغیر	حساسیت "پلکانی شدن (FAULTING)" به متغیر	شاخص حساسیت "ترکها (CRACKS)" "به متغیر	شاخص حساسیت ترک ها	حساسیت "شخص" نامواری (IRI) به	شاخص حساسیت
۱	منطقه آب و هوایی	به طور کلی خیلی حساس				
۲	گرا دیان دمای موثر بر تاییدگی دائمی دال بتنی زمان رسیدن به درصدی از	به طور کلی خیلی حساس				
۳	انقباض نهایی	به طور کلی غیر حساس				
۴	عمق آب های زیرزمینی	غیر حساس	+۰/۰۸	حساس	-۰/۳۷	غیر حساس
۵	جذب موج کوتاه سطحی	حساس	+۰/۶۸	خیلی حساس	+۲/۲۷	حساس
۶	مدول ارتجاعی سابگرید	حساس	-۰/۰۲	حساس	-۰/۳۴	حساس
۷	مدول ارتجاعی اساس	حساس	+۰/۳۳	حساس	+۰/۰۴	حساس
۸	ضخامت اساس	حساس	-۰/۱۲	حساس	+۰/۳۵	غیر حساس
۹	ضخامت دال بتنی	حساس	+۰/۵۱	خیلی حساس	-۳/۸۸	حساس

جدول ۲۳. میزان کاهش یا افزایش احتمال آسیب‌های روسازی ناشی از تغییرات مدول ارتجاعی فصلی اساس غیر خمیری

یخ زدگی مصالح (زمستان)	ذوب یخ و باز یابی مصالح (بهار)	*
2706	-11	درصد تغییر احتمال پلکانی شدن
3280	-13	درصد تغییر احتمال ایجاد ترک
1804	-7	درصد تغییر احتمال نامواری

جدول ۲۴. میزان کاهش یا افزایش احتمال آسیب‌های روسازی ناشی از تغییرات مدول ارتجاعی فصلی اساس خمیری

یخ زدگی مصالح (زمستان)	ذوب یخ و باز یابی مصالح (بهار)	*
1056	-11	درصد تغییر احتمال پلکانی شدن
1280	-13	درصد تغییر احتمال ایجاد ترک
704	-7	درصد تغییر احتمال نامواری

۵-تحلیل یافته‌ها

جدول ۲۵ خلاصه‌ای از نتایج آنالیز حساسیت خرابی‌های JPCP در مقابل فاکتورهای اقلیمی است که از تلفیق نتایج مندرج در جداول ۲۲، ۲۳ و ۲۴، نتیجه‌گیری شده است.

۵-۱- نتایج آنالیز حساسیت مدول ارتجاعی مصالح

اساس در مقابل چرخه‌های ذوب و انجماد و سطح آبهای زیرزمینی

مدل تغییرات شرایط مصالح ناپیوسته روسازی بر اثر تغییرات فصلی فاکتورهای اقلیمی را در برآورد میزان تغییر در

جدول ۲۵. نتایج آنالیز حساسیت خرابی‌های JPCP در مقابل فاکتورهای اقلیمی

نتایج آنالیز حساسیت		*
عمق سفره آب‌های زیرزمینی	چرخه‌های ذوب و انجماد	
غیرحساس	فوق‌العاده حساس	پلکانی شدن
غیرحساس	فوق‌العاده حساس	ترک خوردگی
غیرحساس	فوق‌العاده حساس	ناهمواری

مدول ارتجاعی مصالح جمع‌بندی می‌کند و هر ماه و یا هر ۱۵ روز یک ضریب بعنوان فاکتور تنظیم مدول ارتجاعی تعریف می‌نماید و بسته به اینکه گره در نظر گرفته شده در مقطع روسازی در حالت یخ‌زده، یخ‌نزده و یا در حالت بازیابی خود از حالت یخ‌زدگی باشد، سه فاکتور F_U , F_F , F_R را برآورد و ارائه می‌کند.

زمان لازم برای ذوب اساس دانه‌ای یخ‌زده بصورت پیش‌فرض در این مدل برابر با ۹۰ روز قرار داده شده است و سطح آب‌های زیرزمینی در عمق ۲ الی ۱۸ فوت متغیر می‌باشد.

۱-۱-۵- نتایج تغییر فاکتورهای تنظیم مدول ارتجاعی فصلی

در مقابل تغییرات مدول ارتجاعی بهینه

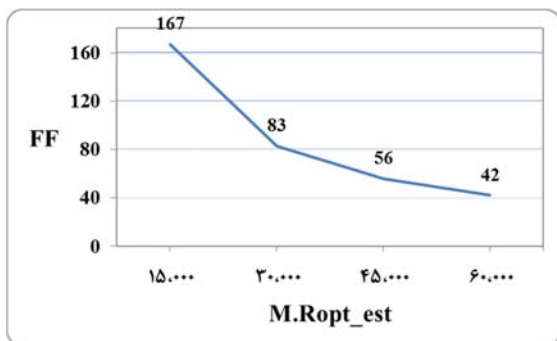
الف) تغییر در مدول ارتجاعی تخمینی اولیه، تنها به تغییر در فاکتور تنظیم مدول ارتجاعی در حالت یخ‌زده می‌انجامد و بر فاکتورهای تنظیم مدول ارتجاعی در حالات بازیابی و یخ‌نزده تاثیری ندارد.

ب) کاهش مدول ارتجاعی تخمینی اولیه باعث افزایش ضریب مدول ارتجاعی در حالت یخ‌زده می‌گردد و برعکس.

ج) نسبت افزایش یا کاهش مدول ارتجاعی تخمینی اولیه به ترتیب با نسبت کاهش یا افزایش ضریب مدول ارتجاعی در حالت یخ‌زده برابر است. یعنی چنانچه مدول ارتجاعی اولیه دو برابر شود، ضریب مدول ارتجاعی در حالت یخ‌زده (F_F)، نصف می‌شود و برعکس.

همانگونه که در شکل (۲) مشاهده می‌گردد با کاهش مدول ارتجاعی تخمینی اولیه اساس غیرخمیری از ۳۰/۰۰۰ به ۱۵/۰۰۰ ضریب مدول ارتجاعی یخ‌زده از ۸۳ به ۱۶۷ افزایش یافته و با افزایش مدول ارتجاعی تخمینی اولیه اساس از ۳۰/۰۰۰ به ۶۰/۰۰۰، ضریب مدول ارتجاعی یخ‌زده از ۸۳ به ۴۲ کاهش یافته است.

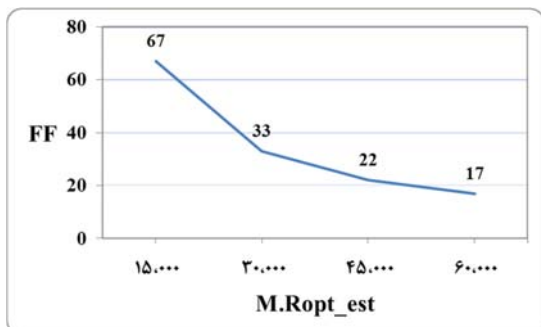
د) هرچه مدول ارتجاعی اولیه کمتر باشد، سازه روسازی بتنی در فصول یخ‌زده، با تغییرات مدول بیشتری روبرو خواهد شد و برعکس.



شکل ۲. نمودار تغییرات فاکتور تنظیم مدول ارتجاعی یخ‌زده در

مقابل تغییرات مدول ارتجاعی اولیه در حالت

$$(PI * P \# 200) = 0$$



شکل ۳. نمودار تغییرات فاکتور تنظیم مدول ارتجاعی یخ‌زده در

مقابل تغییرات مدول ارتجاعی اولیه برای اساس در حالت

$$(PI * P \# 200) > 0$$

۵-۱-۲- نتایج تغییر فاکتورهای تنظیم مدول ارتجاعی

فصلی در مقابل تغییرات طول دوره ذوب و انجماد

الف) تغییر در مقدار روزهای سپری شده از شروع ذوب یخ در لایه اساس، باعث تغییر در فاکتور تنظیم مدول در حالت بازبایی (F_R) می‌گردد.

ب) نتایج جدول ۱۳ و ۱۴ نشان می‌دهد که F_R تولیدشده توسط EICM در واقع ضریب مدول ارتجاعی در هنگام ذوب یخ در مصالح ناپیوسته بوده و هرچه به پایان دوره یخ نزدیک می‌شویم، مدول ارتجاعی کمتر شده و سرانجام به کمترین مقدار خود می‌رسد.

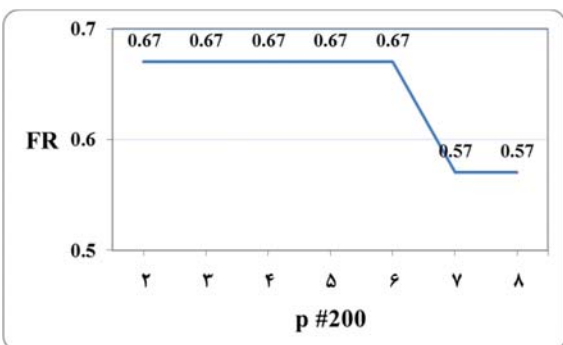
ج) تغییرات فاکتور تنظیم مدول ارتجاعی در حالت بازبایی در مقابل تعداد روزهای سپری شده از شروع ذوب یخها برای اساس در حالات $(PI * P \# 200) = 0$ و $(PI * P \# 200) > 0$ با هم برابر و بصورت شکل ۴ می‌باشد.

می‌یابد که فاکتور تنظیم مدول در حالت یخ‌نزده (F_U) نیز در تمام بازه تغییرات مربوط به درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ (و همسو با آن)، تغییر می‌نماید.

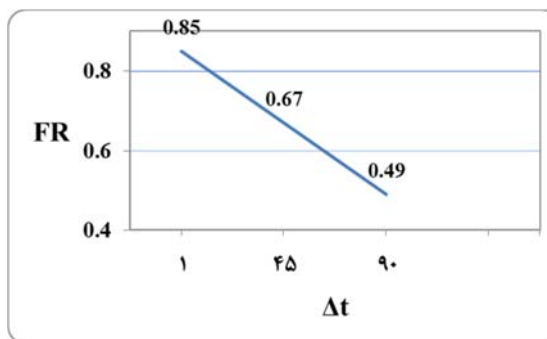
ب) جدول ۱۷ نشان می‌دهد که تغییر در نشانه خمیری مصالح اساس، تغییری در فاکتورهای تنظیم مدول فصلی در حالت‌های بازبایی و یخ‌نزده ایجاد نمی‌نماید، اما فاکتورهای تنظیم مصالح یخ‌نزده (F_U) همسو با تغییرات PI ، به میزان قابل توجهی تغییر نموده است.

شکل ۵) تغییرات F_R در مقابل درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ در حالت‌های $(PI * P \# 200) = 0$ و $(PI * P \# 200) > 0$ را نشان می‌دهد.

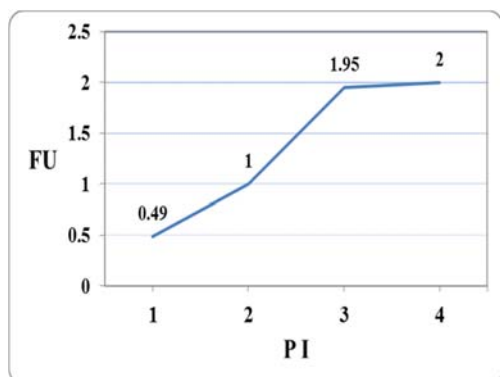
اشکال (۶) و (۷) به ترتیب نمودار تغییرات فاکتور تنظیم مدول ارتجاعی یخ‌نزده (F_U) را در مقابل تغییرات PI و تغییرات $P \# 200$ نشان می‌دهد.



شکل ۵. نمودار تغییرات F_R در مقابل درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰



شکل ۴. نمودار تغییرات F_R در مقابل تعداد روزهای سپری شده از شروع ذوب اساس یخ‌نزده



شکل ۶. نمودار تغییرات فاکتور تنظیم مدول ارتجاعی یخ‌نزده (F_U) در مقابل تغییرات PI در حالت $(PI * P \# 200) > 0$

۵-۱-۳- نتایج تغییر فاکتورهای تنظیم مدول ارتجاعی فصلی

در مقابل تغییرات نشانه خمیری و درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰

الف) نتایج مندرج در جداول ۱۵ و ۱۶ نشان می‌دهد که در حالت اساس غیرخمیری، تغییر در میزان درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ تا $(P \# 200) \leq 6$ در فاکتورهای تنظیم مدول فصلی تاثیری ندارد و در حالت $(P \# 200) > 6$ فاکتور تنظیم مدول در حالت بازبایی مصالح (F_R)، کاهش یافته است. اما در حالت $(PI * P \# 200) > 0$ نه تنها فاکتور تنظیم مدول در حالت بازبایی مصالح پس از $P \# 200 > 6$ کاهش

در هنگام یخزدگی اساس در فصل زمستان، مدول ارتجاعی اساس به شدت افزایش می‌یابد و در نتیجه احتمال پلکانی شدن، ترک‌خوردگی و ناهمواری در JPCP دارای اساس غیرخمیری به ترتیب، ۳۲،۲۷ و ۱۸ برابر و در JPCP دارای اساس خمیری به ترتیب، ۱۰،۱۲ و ۷ برابر می‌گردد.

۵-۱-۶ - ارزیابی تاثیر عمق سفره آب‌های زیرزمینی

بر آسیب‌های روسازی بتنی

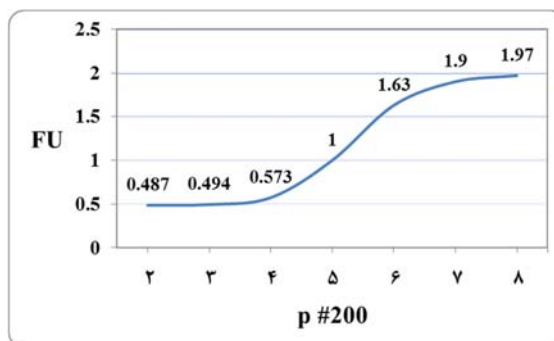
جداول ۱۸ و ۱۹ نشان می‌دهد که تغییرات عمق سفره آب‌های زیرزمینی، تغییری در مدول ارتجاعی اساس ایجاد نمی‌کند و بنابراین نرم افزار طراحی MEPDG، آسیب‌های روسازی را در مقابل تغییرات عمق سفره آب‌های زیرزمینی بصورت "غیرحساس" نشان می‌دهد و این مساله به بررسی و بازبینی بیشتری نیاز دارد.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پتانسیل آسیب‌پذیری روسازی‌های بتنی در مقابل چرخه‌های ذوب و انجماد، در مواردی همچون پلکانی شدن، ترک‌خوردگی و ناهمواری، «فوق‌العاده حساس» ارزیابی گردید؛ لذا توصیه می‌گردد در مناطقی که مستعد چرخه‌های ذوب و انجماد بیشتری هستند، تدابیر لازم در راستای کنترل طرح و روش‌های اجرا اتخاذ گردیده و برنامه‌ریزی‌های ویژه‌ای در فرایند تعمیر و نگهداری، صورت پذیرد.

۷- مراجع

- ربانی‌نژاد، حمیدرضا (۱۴۰۱). مطالعه آزمایشگاهی تأثیر سیکل‌های ذوب و انجماد بر خواص مکانیک شکست بتن روسازی. رساله دوره دکتری تخصصی (اساتید راهنما: دکتر محمودرضا کی‌منش، دکتر محمدرضا محمدعلیها). دانشکده فنی و مهندسی. دانشگاه پیام‌نور تهران.
- کی‌منش، محمدرضا، و ربانی‌نژاد، حمیدرضا (۱۳۹۹). کتاب روسازی بتنی (جلد اول). تهران، انتشارات دانشگاه پیام‌نور.
- کی‌منش، محمدرضا، و ربانی‌نژاد، حمیدرضا (۱۴۰۰). کتاب روسازی بتنی (جلد دوم). تهران، انتشارات دانشگاه پیام‌نور.



شکل ۷. نمودار تغییرات فاکتور تنظیم مدول ارتجاعی یخ‌نزده (F_U)

در مقابل تغییرات P # 200

در حالت $(PI * P \# 200) > 0$

۵-۱-۴ - نتایج تغییر فاکتورهای تنظیم مدول فصلی در مقابل

تغییرات درصد اشباع و سطح آب‌های زیرزمینی

الف) در مدل‌بندی EICM تغییر در سطح آب‌های زیرزمینی، هیچ‌گونه تغییری را در فاکتورهای مدول فصلی نشان نداد.

ب) تغییر در درصد اشباع نسبت به درصد اشباع بهینه، منجر به تغییر در فاکتور تنظیم مدول فصلی در حالت یخ‌نزده (F_U) شده است بطوری که افزایش درصد رطوبت نسبی نسبت به درصد رطوبت بهینه، باعث دو برابر شدن F_U و کاهش درصد رطوبت نسبی نسبت به درصد رطوبت بهینه، باعث نصف شدن F_U گردیده است و لذا مدول ارتجاعی مصالح دانه‌ای روسازی، با کم و زیاد شدن رطوبت نسبی مصالح نسبت به رطوبت بهینه، به‌نحو قابل‌ملاحظه‌ای تغییر خواهد کرد.

ج) با مقایسه جداول ۲۰ و ۲۱ با جدول ۱۷ مشاهده می‌گردد که کم و زیاد شدن شاخص خمیری مصالح نسبت به شاخص خمیری مینا نیز تأثیری مشابه با تغییرات رطوبت نسبی بر روی فاکتور تنظیم مدول ارتجاعی در حالت یخ‌نزده دارد.

۵-۱-۵ - ارزیابی تاثیر چرخه‌های ذوب و انجماد

بر آسیب‌های روسازی بتنی

جدول ۲۳ نشان می‌دهد که تغییرات مدول ارتجاعی اساس در چرخه‌های ذوب و انجماد، تأثیر بسیار زیادی بر خرابی‌های روسازی JPCP دارد. در هنگام ذوب یخ‌ها در فصل بهار، با کاهش مدول ارتجاعی اساس، درصد احتمال پلکانی شدن، ترک‌خوردگی و ناهمواری در JPCP به ترتیب، ۱۳،۱۱ و ۷ درصد کاهش می‌یابد.

- Li, Q., Mills, L., & McNeil, S., (2011). The implications of climate change on pavement performance design. *A report submitted to the University of Delaware University Transportation Center (UD-UTC)*.
- Luo, S., Bai, T., Guo, M., Wei, Y., & Ma, W. (2022). Impact of Freeze–Thaw Cycles on the Long-Term Performance of Concrete Pavement and Related Improvement Measures: A Review. *Materials*, 15(13), 4568.
doi.org/10.3390/ma15134568
- Springer, J., (2016). Impact of Environmental Factors on Pavement Performance in the Absence of Heavy Loads (Publication No. FHWA-HRT-16-078). VA: *Turner-Fairbank Highway Research Center*.
- Timm, D., Barret, w., (2005). Analysis of the 2002 design guide for rigid pavement. Final report, ALDOT project 930-554. *University of Auburn, Alabama*.
- Wang, R., Zhang, Q., & Li, Y., (2022). Deterioration of concrete under the coupling effects of freeze–thaw cycles and other actions: A review. In *Construction and Building Materials*, Vol. 319, 126045-126046. Elsevier BV.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.12604
- Abdolghanizadeh, K., Hosseini, M., Saghafiyazdi, M., (2019). Effects of number of freeze-thaw cycles and freezing temperature on mode I and mode II fracture toughness of cement mortar. *Journal of Mining and Environment*, 10(4), 967-978.
doi: 10.22044/jme.2019.8501.1728
- American Association of State Highway and Transportation Officials, (2015). AASHTOWare™ Pavement ME Design, *American Association of State Highway and Transportation Officials*, Washington D. C.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, (2008). AASHTO Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, *A Manual of Practice*, Interim Edition. Washington D. C.
- Azizinamini, a., Ala, N., & Stanigzai, M. (2009). Development of field data for effective implementation of mechanistic empirical pavement design procedure. *NaBRO*. University of Nebraska-Lincoln.
- Ferrebee, E., (2017). Software tools and solutions to design concrete pavements. *WCPA 2017 Annual Concrete Pavement Workshop*. Wisconsin.
- Guclu, A., & Ceylan, H., (2005). Sensitivity analysis of rigid pavement system using the mechanistic-empirical design guide software. MS. Thesis, *Iowa University*.
- Guo, S., Dai, Q., & Hiller, J., (2018). Investigation on the freeze-thaw damage to the jointed plain concrete pavement under different climate conditions. In *Frontiers of Structural and Civil Engineering, Springer Science and Business Media LLC*. Vol. 12, Issue 2, 227–238.

Sensitivity Analysis of Jointed Plain Concrete Pavement to Freeze-Thaw Cycles

*Mahmoudreza Keymanesh, Associate Prof., Department of Civil Engineering,
Payame Noor University, Tehran, Iran.*

*Mohammadreza Mohammadaliha, Associate Prof., Department of Industrial Engineering,
Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Hamidreza Rabbaninezhad, Ph.D., Candidate, Department of Civil Engineering,
Payame Noor University, Tehran, Iran.*

E-mail: hamidreza.rabbaninezhad@gmail.com

Received: November 2023- Accepted: February 2024

ABSTRACT

Freeze-thaw cycles are among the most important climatic factors that change the mechanical properties of pavement concrete, and play an important role in creating cracks and also affect the growth mechanism of cracks. Concrete pavement damage caused by environmental factors including daily and seasonal fluctuations in humidity and temperature profiles, changes in groundwater level, precipitation/ infiltration, freeze-thaw cycles and other external factors, are completely modeled in the mechanistic-empirical design method (ME). The effects of melting and freezing are experienced in the substrates, but ultimately cause damage to the pavement surface. In order to analyze the sensitivity of JPCP concrete pavement to freeze-thaw cycles, in this study, the sensitivity of the resilient modulus (M_r) of the base material against these cycles and also against the groundwater level was analyzed using enhanced integrated climate model (EICM). For this purpose, the fluctuations of modulus adjustment factors (F_{env}) against various variables such as technical characteristics of base materials, number of days elapsed since ice melting, groundwater table level and saturation degree of materials were calculated and then, the sensitivity of the base layer resilient modulus to changing the adjustment factors was evaluated. Then, using the normal sensitivity index (NSI), the change in the damage potential of this type of pavement was analyzed. The results showed the potential for vulnerability of jointed plain concrete pavement (in terms of faulting, cracking and roughness) to freeze-thaw cycles to be "Extremely Sensitive".

Keywords: Concrete Pavement Failures, Sensitivity Analysis, Freeze-Thaw Cycles, Jointed Plain Concrete Pavement, Base Resilient Modulus