روشی جدید برای تخمین خزش پایهٔ بتن با استفاده از آزمایش‌های کوتاه مدت خزش تحت دمای بالاتر

داود مستوفی‌نژاد* ، امید رضا بارانی** و محمد مهدی سعادت‌پور***
دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۸۰/۱۲/۱۹- دریافت نسخه نهایی: ۸۲/۸/۱۰)

چکیده- در این مقاله سعی شده است که ایدهٔ انجام آزمایش‌های کوتاه مدت و تسریع فرایندها بر اثر افزایش دما با یکدیگر ترکیب شده و روشی جدید برای تخمین خزش پایه دراز مدت بتن ارائه شود. برای این کار با توجه به شباهت نسبتاً زیاد خزش پایهٔ بتن و خزش مواد پلیمری ویسکوالاستیک، ابتدا معادله هم ارزی زمان- دما که از خصوصیات مواد ویسکوالاستیک به شمار می‌رود، در مورد بتن مورد ارزیابی قرار گرفته است. معادلهٔ هم ارزی زمان- دما بیان می‌دارد که منحنی‌های خزش بر حسب لگاریتم مدت زمان بارگذاری در دماهای متفاوت، همگی جزیی از یک منحنی مادر هستند و با یک انتقال افقی که مقدار آن به دمای نمونه بستگی دارد، می‌توان این منحنی‌ها را بر منحنی مادر منطبق کرد. این خصوصیت باعث می‌شود که بتوان منحنی خزش در دمای کمتر و در مدت زمان‌های زیاد پس از بارگذاری را بر منحنی خزش در دمای بیشتر و در مدت زمان‌های کمتر پس از بارگذاری منطبق کرد. بنابر این در صورتی که در بتن معادلهٔ هم ارزی زمان- دما صادق باشد، می‌توان خزش پایهٔ دراز مدت را با استفاده از مقدار خزش پایهٔ کوتاه مدت در دمای بالاتر براورد کرد. برای ارائهٔ مدلی که بتواند خزش پایهٔ دراز مدت بتن را با استفاده از نتایج آزمایش کوتاه مدت خزش براورد کند، معادله‌ای نظری برای در نظر گرفتن تأثیر دما و بلوغ بتن در لحظهٔ بارگذاری ارائه شده است. سپس روشی مناسب برای تطبیق منحنی‌های خزش مربوط به دماهای مختلف بر یکدیگر پیشنهاد شده تا مدل بتواند مقدار خزش پایه بتن را در دماهای مختلف و در مدت زمان‌های زیاد پس از بارگذاری تخمین بزند. مدل پیشنهادی توسط قسمتی از داده‌های آزمایشگاهی موجود، مورد ارزیابی قرار گرفت و توانایی این مدل برای تخمین خزش پایه بلند مدت بتن نشان داده شد.

واژگان کلیدی: بتن، خزش پایه، هم ارزی زمان- دما، مدل.

A New Method for Estimation of Creep of Concrete Using Short-Term Tests under Higher Temperature

D. Mostofinejad, O. R. Barani, and M. M. Saadatpour
Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology

Abstract: *In the Present study, attempt will be made to propose a new method for prediction of long-term essential creep of concrete utilizing some short-term creep tests under high temperature. To do so, regarding the similarities between essential creep of concrete and creep in viscoelastic materials, the time–temperature equivalence relation in viscoelastic materials is evaluated for concrete. This relation states that experimental curves of creep at different temperatures fit into a single curve when shifted along the axis of logaritmic time. To develop the model, an*

*- دانشیار **- کارشناس ارشد ***- استاد

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]

equation was first developed taking into account the effect of temperature and the maturity of concrete. Then, an appropriate method was proposed for transmission of the creep curve of concrete under a specific temperature to fit in the creep curve of the same concrete under a temperature. The proposed model was verified using existing experimental data which very good agreement was observed.

Keywords: *Concrete, Essential creep, Time-temperature equivalence, Model.*

۱- مقدمه

خزش در مسایل گوناگون سازهٔ بتن آرمه تأثیر قابل توجهی دارد. تغییرشکلهای ناشی از خزش معمولاً دو تا سه برابر تغییرشکلهای آنی بتن است [۱]. تخمین درست کوتاه شدگی دراز مدت اعضای قائم در ساختمانهای بتنی بلند، اهمیت زیادی در طراحی آنها دارد و تفاوت در مقدار کوتاه شدگی ستونهای مجاور، باعث ایجاد لنگر و برش قابل توجهی در تیر و دالهای متصل به آن ستونها می‌شود [۲]. در تیرهای پیش تنیده، خزش باعث کاهش نیروی پیش تنیدگی و افزایش تغییر شکل تیر می‌شود [۳]. همچنین خزش در بررسی شکل پذیری اتصالات اهمیت به سزایی دارد [٤]. همچنین خزش در سازه‌های نامعین علاوه بر نحوهٔ توزیع تنشها بر مقدار آنها نیز تأثیر می‌گذارد [٥].

بنابراین با توجه به موارد زیادی که مسئله خزش در آنها اهمیت دارد، تخمین مقدار خزش بتن و تعیین رفتار آن در طول زمان امری ضروری است. خزش بتن که به طور عام به تغییر شکلهای دراز مدت ماده تحت بارگذاری اطلاق می‌شود، مسئله پیچیده‌ای بوده و به عوامل مختلفی نظیر نوع مواد تشکیل دهندهٔ بتن، دما، رطوبت و مقدار تنش اعمالی بستگی دارد.

تاکنون مطالعات بسیاری در مورد خزش در بتن صورت گرفته است. در سال ۱۹٦۷ آرتاناری و یو با آزمایش بر روی دالهای بتنی اندود شده در دماهای مختلف، نشان دادند که خزش با افزایش دما افزایش می‌یابد و افزایش عمر بتن در لحظهٔ بارگذاری باعث کاهش سرعت خزش می‌شود. همچنین ایشان بیان داشتند که با افزایش دما مقدار کرنش برگشت پذیر در مرحلهٔ باربرداری افزایش چشمگیری پیدا نمی‌کند [٦].

مالن در سال ۱۹٦٤ و هنانت در سال ۱۹٦۸ نشان دادند که نمونهٔ بتنی کاملاً خشک شده در سطوح تنش کم، خزش قابل ملاحظه‌ای نداشته و بنابراین مؤثرترین عامل در خزش و جمع شدگی، آب قابل تبخیر بتن است [۷].

بازانت در سال ۱۹۷۰ و ۱۹۷۲ معادلات بنیادی خزش و جمع شدگی را برای اولین بار ضمن در نظر گرفتن اثرات گرما و رطوبت نسبی متغیر براساس اصول ترمودینامیک ارائه داد. در این معادلات، خمیر سیمان و بتن به صورت یک مادهٔ مختلط چند فازی[۸] در نظر گرفته شد که در آن شرایط تعادل استاتیکی وترمودینامیکی بین حالتهای مختلف آب موجود در خمیر سیمان برقرار است. این مطالعات نقطهٔ شروعی برای سعی در بیان رفتار خزش بتن بر اساس معادلات اساسی ترمودینامیک شد که این کار هنوز ادامه داشته و اساس مطالعات بازانت و همکارانش را تا به امروز تشکیل می‌دهد [۷ و ۸].

در سال ۱۹۷۳ ایلستون و سندرز با آزمایش پیچش بر روی نمونه‌های خمیر سیمان تحت دمای بین ۲۰ تا ۹۵ درجهٔ سانتیگراد، به این نتیجه رسیدند که اگر در حین اعمال تنش بر نمونه، سیکلهای دمایی ایجاد شود، کرنش نمونه به مقدار زیادی در اولین سیکل افزایش یافته و در سیکلهای بعدی افزایش قابل ملاحظه‌ای در خزش مشاهده نمی‌شود [۹]. ایشان در سال ۱۹۷٤ مدلی برای تخمین خزش بتن در دماهای مختلف ارائه دادند که در این مدل معادله‌ای برای محاسبهٔ میزان خزش ناگهانی ناشی از افزایش دما نیز معرفی شد. همچنین آنها اظهار داشتند که بر طبق آزمایش انجام گرفته، اگر دمای نمونهٔ بتنی قبل از بارگذاری به مدت دو روز از دمای ۲۰ به ۷۷ درجهٔ سانتیگراد برده شود و سپس دمای نمونه به ٤۰ درجهٔ سانتیگراد کاهش یابد و بعد از مدتی نمونه تحت آزمایش خزش قرار گیرد، وقتی دمای نمونه از ٤۰ به ٥۸ درجهٔ سانتیگراد افزایش یابد، افزایش ناگهانی در مقدار خزش مشاهده نمی‌شود؛ در صورتی که وقتی دمای نمونه ضمن بارگذاری از ٥۸ به ۷٦

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]

درجـهٔ سانتیگراد افزایش یابد، یک افزایش ناگهانی در خزش به وجـود مـی‌آیـد [۱۰]. این محققان دلیلی برای توجیه این مسئله ارائه ندادند.

در سـال ۱۹۷۸، بازانـت و تـنگوتال نشان دادند که تا دمای ۱۰۰ درجـهٔ سـانتیگراد، سـرعت حـرکت آب در ریز حفره‌های موجـود در خمیـر سـیمان سـخت شده مطابق با قانون آرنیوس (معادلـهٔ (۲٤) که بعدا توضیح داده خواهد شد)، تابعی از انرژی فعـال سـازی لازم بـرای حـرکت آب در ریزحفـره‌ها است؛ در صـورتی کـه در دماهای بیشتر از ۱۰۵ درجهٔ سانتیگراد، سرعت حـرکت آب در ریـز حفـره‌ها از قانون آرنیوس تبعیت نمی‌کند؛ بلکـه تابعـی از لـزجت بخار آب و یا آب مایع بوده و نسبت به افزایش دما تغییرات ناچیزی دارد [۱۱].

در سـال ۱۹۷٦ بازانـت و همکـاران یـک مدل ریاضی برای خزش بتن ارائه دادند [۱۲]. با توسعهٔ آن در سال ۱۹۷۸ و ۱۹۷۹ بازانت و پانلا مدل ریاضی BP-KX را ارائه کردند. در این مدل معادلاتـی ریاضی برای تعیین خزش و جمع شدگی پیشنهاد شد و میـزان دقـت آن در تخمـین رفـتار بتن توسط مقایسه با نتایج آزمایشـگاهی محققـان مختـلف مـورد بررسـی قـرار گـرفت [۱ و ۱۳–۱۷]. در ایـن مـدل اثـر دما بر خزش پایه (خزش بتن عایـق بـندی شده توسط مواد عایق رطوبت) برای سطوح دمایی مختـلف، بـا فـرض ثابت بودن دما در طول بارگذاری ارائه شد. ایـن مـدل اثـر دمـا بـر خزش پایه را در شرایط متغیر بودن دما ضمن بارگذاری در نظر نمی‌گرفت. ایشان بیان کردند با توجه به اسـتفاده از مفهـوم انـرژی فعال‌سازی برای مدل کردن اثر دما بر سـرعت هیدراسـیون، مـدل آنهـا برای سطوح دما بین ۳۵ تا ۷۵ درجـهٔ سانتیگراد صادق بوده، لیکن برای سطوح دمای بین ۲۰– تا ۱۲۰ درجهٔ سانتیگراد به طور تقریبی به کار رود؛ هرچند برای دمای بیش از ۹۵ درجهٔ سانتیگراد ممکن است این مدل اختلاف زیادی با نتایج آزمایشگاهی داشته باشد.

در سـال ۱۹۸٤ بازانـت و چـرن نشـان دادنـد کـه انجـام انـدازه‌گیری‌های کوتاه مدت خزش و جمع شدگی و برون یابی آنهـا برای زمان‌های طولانی برای تخمین خزش و جمع شدگی سـازه‌های مهم، بسیار مناسب است. ایشان همچنین ابراز داشتند که تخمین خزش فقط بر اساس اطلاعات مربوط به مواد تشکیل دهـندهٔ مخلوط بتن، منجر به خطاهای نسبتاً زیادی می‌شود[۱۸]. در سـال ۱۹۸۷ بازانـت و چـرن مدلـی بـرای بیان افزایش قابل ملاحظـهٔ خـزش بتن بر اثر تغییر دمای بتن حین بارگذاری ارائه دادنـد. در این مقاله تصریح شد که هم افزایش و هم کاهش دما باعـث افزایش خزش می‌شود و دلیل دیگر افزایش خزش بر اثر تغییرات رطوبت و یا تغییرات دما، ایجاد ترکهای کششی در بتن اسـت [۱۹]. بازانت و پرسان[٦] در سال ۱۹۸۹ اثر جمع شدگی و هیدراسـیون سـیمان بـر خـزش بـتن را توسط ضرایب تصحیح تجربی بیان کردند و مدلی تحت عنوان نظریه انجماد[۷] برای بیان اثـر هیدراسـیون بـر خـزش بـتن ارائه دادند و هیدراسیون را به صـورت افـزایش حجم قسمت جامد سیمان در طول زمان مدل کردند. در این مدل افزایش هیدراسیون در طول زمان به صورت افزایش حجم قسمت جامد خمیر سیمان بیان شد [۲۰ و ۲۱].

در سـال ۱۹۹۷ بازانـت و همکاران نظری ریز پیش تنش را برای مدل کردن اثرات جمع شدگی و سخت شدن بتن در طول زمـان بـر خـزش درازمـدت ارائـه کـردند. در این مدل، مفهوم جدیـدی بـه نـام ریـز پـیش تـنش کششـی ارائـه شد که بیانگر پـیوندهای موجـود بـین دیـواره‌هـای ریزحفـره‌های ژل سیمان سخت شده است و در مقابله با فشار آب موجود در ریزحفره‌ها و فشـار ناشـی از رشـد بلـورهای جامـد در اثـر هیدراسیون که تمایـل دارند فضای ریز حفره را بیشتر کنند، به وجود می‌آید. با شکسـته شـدن و تشکیل مجدد این پیوندها خزش درازمدت به صـورت ویسـکوز بـه وقـوع مـی‌پیوندد. در این مدل اثر خزش خشـک شـدگی (اثـر پـیکت) به این صورت توجیه می‌شود که تغییـرات رطـوبت نسـبی باعث تغییر فشار آب جذب شدهٔ بین ریزحفـره‌هـا و در نتیجه تغییرات ریز پیش تنشها و ایجاد خزش مـی‌شـود. ایـن فرضـیه کـه جدیدترین نظریه در مورد خزش و جمـع شدگی خمیر سیمان است، قادر به توجیه تعداد زیادی از رفـتارهای خـزش در بـتن اسـت کـه تاکـنون تـوجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است [۲۲ و ۲۳].

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]

در سال ۱۹۹۹ هاگارد و همکاران یک مدل ریاضی برای خزش بتن ارائه دادند که در آن اثر گرما بر خزش بتن تازه و بتن سخت شده در نظر گرفته شد. در این مدل که اثر گرما به صورت کاهش ویسکوزیته و در نتیجه افزایش سرعت خزش بیان شده بود، از نظریه ریز پیش تنش برای بیان اثر نرخ تغییرات دما بر مقدار خزش استفاده شد که با تعدادی از نتایج آزمایشگاهی تطابق مطلوبی حاصل شد [۲٤].

خزش بتن بر اثر حرکت آب، فرایندهای شیمیایی و تغییر مکان ذرات ژل در خمیر سخت شدهٔ سیمان به‌وجود می‌آید[۲۵]. عوامل بسیاری بر مقدار خزش بتن تأثیر می‌گذارند. هیدراسیون خمیر سیمان باعث افزایش ضریب کشسانی بتن و در نتیجه کاهش سرعت خزش در آن می‌شود. از طرفی گرمای ناشی از هیدراسیون بر خزش بتن اثر می‌گذارد. افزایش دما از یک سو سبب افزایش سرعت هیدراسیون و کاهش سرعت خزش می‌شود و از طرف دیگر باعث کاهش لزجت بتن و در نتیجه افزایش خزش می‌شود. همچنین بلوغ بتن در لحظهٔ بارگذاری بر مقدار خزش تأثیر می‌گذارد.

دخیل بودن عوامل متعدد بر خزش بتن باعث شده است که براورد مقدار آن در مدت زمان‌های طولانی امری پیچیده و بغرنج تلقی شود. به دلیل عدم دقت مدلهای موجود، براورد قابل قبولی از کرنشهای حاصل از خزش نمی‌توان داشت. آزمایش‌های دراز مدت عموماً غیر عملی‌اند، بنابراین آزمایش‌های کوتاه مدت خزش همراه با معادلات مناسب برای تخمین خزش نهایی با توجه به نتایج آزمایش‌های کوتاه مدت، تنها روش عملی برای براورد دقیق خزش بتن به نظر می‌رسد [۲۵ و ۲٦]. از آنجا که دما باعث تسریع فرایندهای دخیل در خزش بتن می‌شود، منطقی به نظر می‌رسد که با افزایش دما بتوان زمان لازم برای تخمین مقدار خزش را کاهش داد.

۲- هدف از این تحقیق و روش انجام آن

در این تحقیق سعی می‌شود که ایدهٔ انجام آزمایش‌های کوتاه مدت و تسریع فرایندها بر اثر افزایش دما را با یکدیگر ترکیب کرد و روشی جدید برای تخمین خزش پایهٔ دراز مدت بتن ارائه داد. برای این کار با توجه به شباهت نسبتاً زیاد خزش پایه بتن و خزش مواد پلیمری ویسکوالاستیک، ابتدا معادله هم ارزی زمان- دما که از خصوصیات مواد ویسکوالاستیک به شمار می‌رود، در مورد بتن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. معادلهٔ هم ارزی زمان- دما بیان می‌دارد که منحنی‌های خزش بر حسب لگاریتم مدت زمان بارگذاری در دماهای متفاوت همگی جزیی از یک منحنی مادرند و با یک انتقال افقی که مقدار آن به دمای نمونه بستگی دارد، می‌توان این منحنی‌ها را بر منحنی مادر منطبق کرد. این خصوصیت باعث می‌شود که قسمتهایی از منحنی‌های خزش در دماهای مختلف قابل انطباق بر روی یکدیگر باشند و در نتیجه بتوان منحنی خزش در دمای کمتر و در مدت زمان‌های زیاد پس از بارگذاری را بر منحنی خزش در دمای بیشتر و در مدت زمان‌های کمتر پس از بارگذاری منطبق کرد. بنابراین در صورتی که در بتن معادلهٔ هم ارزی زمان- دما صادق باشد، می‌توان خزش پایه دراز مدت را با استفاده از مقدار خزش پایهٔ کوتاه مدت در دمای بالاتر براورد کرد.

برای ارائه مدلی که بتواند خزش پایهٔ دراز مدت بتن را با استفاده از نتایج آزمایش کوتاه مدت خزش براورد کند، معادله‌ای نظری برای در نظر گرفتن تأثیر دما و بلوغ بتن در لحظهٔ بارگذاری ارائه شده و پارامترهای آن توسط ۷۵ درصد از داده‌های آزمایشگاهی موجود براورد شده است. برای بهبود مدل، معادلات مختلفی برای براورد میزان انتقال افقی لازم مورد آزمایش قرار گرفته است. از آنجا که برای تطبیق منحنی‌های خزش بر روی یکدیگر علاوه بر یک انتقال افقی به یک انتقال عمودی نیز نیاز است، برای تعیین آن روشی مناسب پیشنهاد شده تا مدل بتواند مقدار خزش پایه بتن را در دماهای مختلف و در مدت زمان‌های زیاد پس از بارگذاری تخمین بزند. مدل پیشنهاد شده توسط ۲۵ درصد از داده‌های آزمایشگاهی موجود، مورد ارزیابی قرار گرفته و توانایی این مدل برای تخمین خزش پایه بلند مدت بتن نشان داده شده است. این مدل پیشنهادی با مدل بازانت که از کاملترین مدلهای موجود برای تخمین خزش بتن است، مقایسه شده است.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]

۳- مفاهیم اساسی

تحلیل تغییر شکلهای بتن سخت شده در طول زمان، هدف بسیاری از تحقیقات انجام شده در سالهای اخیر بوده است و معادلات تجربی بسیاری برای ارزیابی رفتار وابسته به زمان بتن توسعه داده شده است [۲۷] .اگر چه پدیدهٔ خزش در موادی نظیر فولاد در دمای بالا، برخی سنگها تحت تنشهای بالا و پلیمرها نیز وجود دارد؛ با این وجود حداقل دو تفاوت اساسی بین بتن و بقیه مصالح ساختمانی معمول وجود دارد: اول اینکه بتن با توجه به ژل سیمان، محصولات کریستالی هیدراسیون، آب، سیمان هیدراته و سنگدانه، یک مادهٔ نا همگن است و وقتی که مسلح باشد، یک مادهٔ غیر ایزوتروپ نیز محسوب می‌شود. دوم اینکه خصوصیات بتن نسبت به عمر، گرما، رطوبت نسبی و عمل آوری آن در محل متغیر است [۵]. پدیده‌های جمع شدگی و اتساع باعث ایجاد کرنشهای تدریجی در بتن می‌شود. همچنین جمع شدگی باعث افزایش مقدار خزش می‌شود [۵].

افزایش کرنش جسم در طول زمان تحت تنش ثابت، خزش نامیده می‌شود. کرنش ناشی از خزش از کسر نمودن کرنشهای مربوط به کرنش آنی اولیه، جمع شدگی و کرنش گرمایی از کرنش کل اندازه گیری شده به دست می‌آید. خزش معمولاً به صورت تغییرات کرنش تحت شرایط ثابت رطوبت نسبی و دما بیان می‌شود [۲۵]. به دلیل اینکه مرز مشخصی برای تشخیص کرنش آنی (کشسان و نا کشسان) از کرنش ناشی از خزش وجود ندارد، و همچنین به دلیل افزایش ضریب کشسان بتن نسبت به زمان، و در نتیجه کاهش کرنش الاستیک نسبت به عمر بتن، در عمل کرنش آنی و کرنش ناشی از خزش به صورت توأم محاسبه می‌شوند. خزش دو مؤلفهٔ زیر را شامل می‌شود:

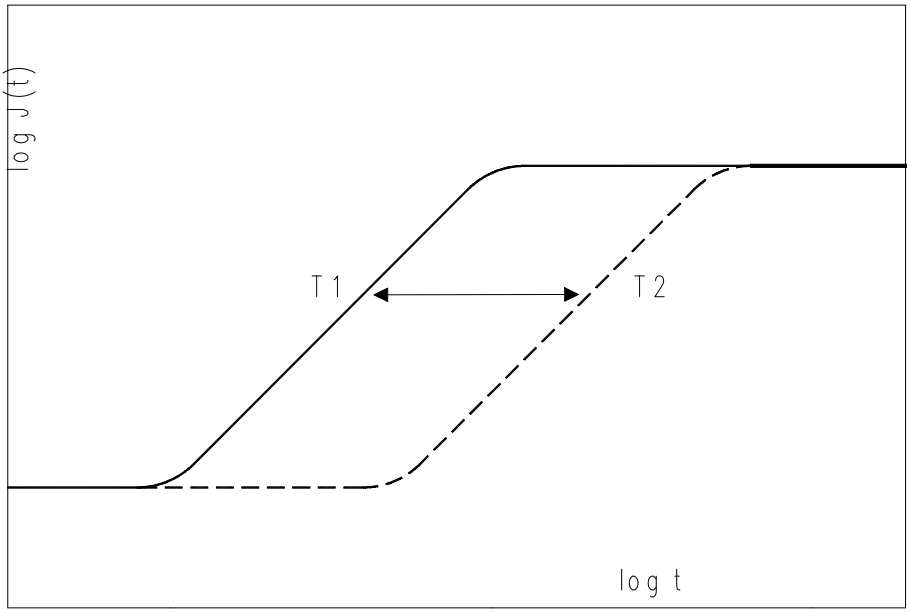
الف) خزش پایه تحت شرایط عدم وجود انتقال رطوبت از محیط به بتن؛ و یا برعکس، از بتن به محیط به وجود می‌آید [۲۵]. خزش نمونهٔ بتنی که در آب نگهداری می‌شود، به شرط قابل صرف‌نظر بودن اتساع نمونه در مقایسه با خزش ایجاد شده در آن، به عنوان خزش پایه شناخته می‌شود [۵].

ب) خزش خشک شدگی که بر اثر وجود جمع شدگی ایجاد می‌شود [۲۵].

۳-۱- خزش در مواد ویسکوالاستیک

مواد ویسکوالاستیک موادی هستند که تنش در آنها نه مانند مواد کاملاً الاستیک از قانون هوک، و نه مانند مواد کاملاً ویسکوز از قانون سیالات نیوتونی تبعیت می‌کند [۲۸]. برای مقاصد عملی طراحی سازه، رفتار بتن تحت بارهای خارجی به اندازهٔ کافی نزدیک به مواد ویسکوالاستیک است [۲۹]. رفتار و خواص ویسکوالاستیک، وابسته به متغیرهای زمان و دما هستند. جستجو برای حصول معادله‌ای که تغییر خواص ناشی از اثرات هر کدام از این دو متغیر را به دیگری مرتبط سازد، منطقی به نظر می‌رسد. چنین معادله‌ای اولین بار توسط فری (۱۹۶۱) معرفی شد [۳۰]. در ساده ترین شکل هم ارزی زمان- دما[۲] می‌توان خواص ویسکوالاستیک در یک دما را با اعمال یک تغییر در مقیاس زمانی به خواص همان ماده در دمای دومی مرتبط کرد. در شکل (۱)، دو منحنی تابع تطابق شماتیک در دماهای T_1 و T_2 در یک مقیاس زمانی لگاریتمی مشاهده می‌شوند. بر اساس مدل ساده شدهٔ هم ارزی زمانی- گرمایی بیان شده، این دو منحنی با یک انتقال افقی در امتداد محور زمان با یکدیگر منطبق می‌شوند. در حقیقت برای حصول نتایج دقیقتر هم ارزی زمانی- گرمایی، باید یک انتقال عمودی نیز در نظر گرفته شود. نظریه مولکولی انتقال عمودی را به مقدار $T_0\ \rho_0/(T\ \rho)$ در یک انتقال از دمای T (بر حسب درجه کلوین) و چگالی ρ به دمای مرجع T_0 (بر حسب درجهٔ کلوین) و چگالی ρ_0 پیش بینی می‌کند [۳۰ و ۳۱]. در عمل میزان انتقال عمودی بسیار کوچک بوده و استفاده از انتقال افقی کاملاً مرسوم است. در مورد خمیر سیمان اگر چه معادلهٔ هم ارزی زمان- دما را می‌توان ارائه داد [۲۹]؛ لیکن مقادیر انتقال منحنی تابع انطباق (انعطاف پذیری) آن با مواد پلیمری مسلماً متفاوت بوده و باید براساس قوانین ترمودینامیکی حاکم بر رفتار آن تعیین شود. در قسمتهای بعدی معادلهٔ هم ارزی زمان- دما در

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]



شکل ۱- تابع تطابق(انعطاف پذیری) خزش برحسب تابعی از زمان

بتن مورد بررسی قرار گرفته و حدود کاربرد آن مشخص می‌شود.

۳-۲- مدل بازانت برای تخمین خزش بتن

مدل بازانت بر اساس فرضیات ترمودینامیکی مربوط به خمیر سیمان، خزش بتن را با توجه به شرایط محیطی به مؤلفه‌های خزش پایه، خزش خشک شدگی، اثر دما بر خزش پایه، اثر دما بر خزش خشک شدگی و اثر تغییرات رطوبت محیط تقسیم می‌کند [۲۷ و ۳۲- ۳۵] با توجه به اینکه در این مقاله خزش پایه و اثر دما بر آن مد نظر است، برای اختصار، به تشریح مدل بازانت در این دو مورد اکتفا می‌شود.

بازانت و عثمان در سال ۱۹۷٦ معادلهٔ (۱) را برای تخمین تابع انطباق خزش پایه پیشنهاد کردند که تطابق خوبی نسبت به نتایج آزمایشگاهی مختلف داشت[۳٦]:

$$J(t,t') = \frac{1}{E_0} + \frac{\varphi_1}{E_0} t'^{(-m)} (t-t')^n \qquad (۱)$$

در این معادله t' عمر بتن در لحظهٔ بارگذاری بوده و t زمانی است که خزش در آن تعیین می‌شود. همچنین $J(t,t')$ تابع انطباق (انعطاف پذیری) بوده که بیانگر کرنش ایجاد شده در زمان t توسط یک گام تنش واحد در زمان t' است. همچنین در معادلهٔ (۱)، E_0، φ_1، m و n چهار پارامترند که مقادیر آن برای آزمایش‌های گوناگون انجام گرفته توسط محققان مختلف، متفاوت بوده و در مرجع[۳٦] می‌توان مقادیر آن را یافت. بازانت در غیاب داده‌های آزمایشگاهی کافی مقادیر $\frac{1}{3}$ و $\frac{1}{8}$ را به ترتیب برای m و n پیشنهاد می‌کند.

به دلیل آن که معادلهٔ (۱) وقتی که t' به سمت بی نهایت میل می‌کند، مقدار خزش پایه را صفر براورد می‌کند، بازانت و پانلا در سال ۱۹۷۸ معادلهٔ زیر را برای تابع انطباق خزش پایه پیشنهاد کردند [۱۳]:

$$J(t,t') = \frac{1}{E_0} + \frac{\varphi_1}{E_0} (t'^{(-m)} + \alpha)(t-t')^n \qquad (۲)$$

در این معادله نیز مقادیر متوسط m و n به ترتیب برابر $\frac{1}{3}$ و $\frac{1}{8}$ معرفی شده است. مقادیر پارامترهای مختلف این معادله به صورت زیر ارائه شده است:

$$\varphi_1 = \frac{10^{3n}}{2(28^{-m} + \alpha)} \qquad (۳)$$

$$\alpha = \frac{1}{40w/c} \qquad (٤)$$

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]

$$m = 0.28 + \frac{47.541}{(f_c')^2} \quad (۵)$$

$$x = [2.1\frac{a/c}{(s/c)^{1.4}} + \frac{1}{181}(f_c')^{1.5} (w/c)^{1/3}(a/g)^{2.2}]a_1 - 4 \quad (۶)$$

$$n = 0.12 + \frac{0.07x^6}{5130 + x^6} \quad \text{برای } x > 0 \quad (۷)$$

$$n = 0.12 \quad \text{برای } x \le 0$$

که در این معادلات، w/c نسبت آب به سیمان، a/c نسبت سنگدانه به سیمان، g/s نسبت درشت دانه به ریز دانه (حداکثر قطر ۴/۷ میلیمتر)، f_c' مقاومت فشاری بر حسب MPa، و a_1 ضریبی مساوی یک برای سیمان تیپ یک و دو، ۰/۹۳ برای سیمان تیپ سه و ۱/۰۵ برای سیمان تیپ چهار می‌باشد. همچنین مقدار $\frac{1}{E_0}$ را می‌توان از معادلات زیر محاسبه کرد:

$$\frac{1}{E_0} = 1.305\times10^{-5} + \frac{1}{11724 z_1^{\,2}} \quad 1/\text{MPa} \text{ برحسب} \quad (۸)$$

$$z_1 = 0.088587\rho^2 f_c' \quad (۹)$$

در معادلهٔ بالا ρ جرم واحد حجم بتن بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب و f_c' مقاومت فشاری نمونهٔ استوانه‌ای بر حسب MPa است.

برای بررسی خزش پایه در دماهای مختلف، بازانت و پانلا معادلات زیر را برای بتن عایق بندی شدهٔ تحت دما پیشنهاد کردند [۱۵]:

$$J(t,t') = \frac{1}{E_0} + \frac{\varphi_T}{E_0}(t_e'^{(-m)} + \alpha)(t-t')^{n_T} \quad (۱۰)$$

$$t_e' = \int_0^{t'} \beta_T(t'')dt'' \quad (۱۱)$$

$$\beta_T = \exp(\frac{4000}{T_0} - \frac{4000}{T}) \quad (۱۲)$$

$$\varphi_T = \varphi_1(1 + C_T) \quad (۱۳)$$

در این معادلات C_T، n_T و β_T تابعی از دما، T و T_0 دما بر حسب کلوین و φ_1 و α توسط معادلات (۳) و (٤) تعریف شده‌اند. t_e' مبین بلوغ و یا زمان هیدراسیون معادل بتن در لحظهٔ بارگذاری است. عدد ٤۰۰۰ درجهٔکلوین در معادلهٔ (۱۲) معرف انرژی فعال سازی هیدراسیون تقسیم بر ثابت گازهاست که به صورت تجربی و از برازش داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده است [۱۵]. ویتمن با انجام یک تحلیل نظری اظهار داشت C_T نیز از قانون آرنیوس تبعیت می‌کند؛ ولی با انجام تحلیلهای بسیار بر روی داده‌های آزمایشگاهی نشان داده شد که این موضوع تنها در محدودهٔ دمایی بین ۳۵ تا ۷۵ درجهٔ سانتیگراد صادق است. در دماهای بیشتر از ۷۵ درجهٔ سانتیگراد به دلیل تغییر حالت آب از مایع به بخار و ایجاد تغییرات شیمیایی، فرایندهای مختلف با انرژی‌های فعال سازی متفاوت به طور همزمان اتفاق می‌افتد و بنابراین نمی‌توان C_T را با یک معادلهٔ ساده از مفهوم انرژی فعال سازی به دست آورد [۱۳ -۱۷]. بازانت و پانلا به طور تجربی معادلهٔ زیر را برای C_T در محدودهٔ دمایی بین ۲۰- و ۱۲۰ درجهٔ سانتیگراد پیشنهاد کردند:

$$C_T = c_T \tau_T c_0 \quad (۱٤)$$

$$c_T = \frac{19.4}{1 + [100/(T-253.2)]^{3.5}} - 1 \quad (۱۵)$$

$$\tau_T = \frac{1}{1 + 60/t_T'^{\,0.69}} + 0.78 \quad (۱۶)$$

در معادلات بالا، c_0 پارامتری وابسته به مخلوط بتن، t_T' عمر بتن وقتی که دمای T اعمال می‌شود، و T دمای مطلق است. ملاحظه می‌شود که C_T علاوه بر دما، تابعی از t_T' نیز است. ویتمن n_T را ثابت فرض کرد، در حالی که بازانت و پانلا برای محدودهٔ دمایی بین ۲۰- تا ۱٤۰ درجهٔ سانتیگراد، تابع زیر را برای محاسبهٔ آن ارائه کردند:

$$n_T = B_T n \quad (۱۷)$$

$$B_T = \frac{0.25}{1 + (74/(T-253.2))^7} + 1 \quad (۱۸)$$

مقدار c_0 با برازش داده‌های مختلف به صورت زیر ارائه شده است:

$$c_0 = \frac{1}{8}(w/c)^2 (a/c) a_1 \quad (۱۹)$$

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]

در این معادله، w/c نسبت آب به سیمان، a/c نسبت سنگدانه به سیمان و a_1 پارامتری وابسته به نوع سیمان بوده و برای سیمان تیپ یک و دو مساوی یک، برای سیمان تیپ سه ۰/۹۳، و برای سیمان تیپ چهار برابر ۱/۰۵ می‌باشد [۱۳-۱۷].

٤- ارائهٔ مدلی برای تخمین خزش پایه بتن با استفاده از آزمایش‌های کوتاه مدت

٤-۱- تاریخچهٔ معادلهٔ هم ارزی زمان- دما برای خزش پایه بتن

ارائهٔ معادلاتی که بیانگر رفتار خزش در مواد مختلف باشد، از سالها قبل هدف بسیاری از محققان بوده است. در سال ۱۹۵۵ ویلیامز و همکاران نشان دادند که برای مواد پلیمری مختلف، منحنی خزش بر حسب لگاریتم زمان در دماهای متفاوت را می‌توان با یک انتقال، بر روی یک منحنی مادر منطبق کرد. ایشان ضمن ارائهٔ معادله‌ای با عنوان معادلهٔ هم ارزی زمان- دما، برای انتقال منحنی خزش در یک دما بر روی منحنی مادر، اظهار داشتند در دماهایی که ویسکوزیتهٔ ماده دستخوش تغییرات زیادی می‌شود، نظیر محدوده‌های دمایی که ماده تغییر حالت می‌دهد، نمی‌توان منحنی خزش در آن دما را به خوبی بر روی منحنی مادر منطبق کرد [۳۷]. معادلهٔ هم ارزی زمان- دما در مواد پلیمری کاربرد زیادی داشته و از آن برای تخمین خزش یک مادهٔ پلیمری در یک دما با استفاده از خزش کوتاه مدت آن در دمای بالاتر، استفاده می‌شود [۳۰].

بازانت در سال ۱۹۷۰ ضمن بررسی ترمودینامیکی خمیر سیمان بیان داشت معادلهٔ هم ارزی زمان- دما تناقضی با این معادلات ندارد. وی معادلهٔ مشخصی برای این موضوع ارائه نکرد؛ ولی مقدار انتقال دو منحنی در دماهای T و T_0 را به صورت تابعی از $(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T})$ پیشنهاد کرد [۸].

٤-۲- داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده

در این تحقیق برای بررسی معادلهٔ هم ارزی زمان- دما از داده‌های آزمایشگاهی محققان زیر استفاده شده است [۳٤]:

۱- آرتاناری و یو؛ نمونه‌های این محققان عبارت است از مکعب مستطیلهای بتنی به ابعاد ۳۰/۵×۳۰/۵×۱۰/۲ سانتیمتر که تا ۷ روز در شرایط مرطوب عمل آوری شده و سپس توسط چسب اپوکسی و دو لایه رنگ پلاستیک، عایق بندی شده است. عمر بتن در لحظهٔ بارگذاری مساوی ۱۵ روز بوده و گرمایش نمونه‌ها از یک روز قبل از بارگذاری شروع شده است. مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ نمونهٔ مکعبی مساوی با ٤۱/٤ MPa بوده و از سیمان پرتلند تیپ یک، و درشت دانه‌های به قطر ٤/۷٦ الی ۹/۵ سانتیمتر استفاده شده است. آب، سیمان، ماسه و درشت دانه به نسبت ۰/۵٦٤، ۱، ۱/۱۲۵ و ۲/٦۲۵ انتخاب شده و تنش فشاری اعمال شده برابر با ٦/۹ مگا پاسکال گزارش شده است.

۲- برآون؛ نمونه‌های این محقق عبارت است از استوانه‌های بتنی به ابعاد ۳۰/۵×۱۵/۲ سانتیمتر که در پوششهای پلی پروپیلن به ضخامت ۱/٦ میلیمتر از هنگام ریخته شدن در قالب عایق‌بندی شده و در دمای معمولی عمل آوری شده است. گرمایش نمونه‌ها از یک روز قبل از بارگذاری شروع شده است. مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ نمونهٔ استوانه‌ای برابر ۵۰ MPa بوده و از سیمان پرتلند تیپ یک، و به مقدار ٤۱۸ کیلوگرم در یک متر مکعب بتن استفاده شده است. آب، سیمان، ماسه و درشت دانه به نسبت ۰/٤۲، ۱، ۱/٤۵ و ۲/۹۵ انتخاب شده و تنش فشاری اعمال شده مساوی ۱٤/٦ مگا پاسکال گزارش شده است.

۳- داسیلویرا و فلورنتینو؛ نمونه‌های این محققان عبارت است از مکعب مستطیلهای بتنی به ابعاد ۲۰×۲۰×٦۰ سانتیمتر که در پوششهای مسی عایق بندی شده است. گرمایش نمونه‌ها از سه روز قبل از بارگذاری شروع شده است. مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ نمونهٔ مکعبی برابر ۲۹/۱ MPa بوده و از سیمان پرتلند تیپ دو استفاده شده است. اختلاط آب، سیمان، ماسه و درشت دانه به نسبت ۰/۵، ۱، ۲/۳۵ و ۳/۸٤ گزارش شده است.

٤- کمندنت و همکاران؛ نمونه‌های این محققان عبارت است از استوانه‌های بتنی به ابعاد ۳۰/۵×۱۵/۲ سانتیمتر که در پوشش‌هایی از جنس بوتیل عایق بندی گردیده و در دمای ۲۳ درجهٔ سانتیگراد عمل آوری شده است. گرمایش نمونه‌ها از پنج

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]

روز قبل از بارگذاری و با نرخ ۱۳/۳ درجهٔ سانتیگراد در روز، آغاز شده است. مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ نمونهٔ استوانه‌ای برای مخلوط اول برابر ۴۵/۴ MPa، و برای مخلوط دوم مساوی ۴۶/۲ MPa بوده و از سیمان پرتلند تیپ دو و به مقدار ۴۱۹ کیلوگرم در یک متر مکعب بتن استفاده شده است. حداکثر اندازهٔ درشت دانه برابر ۳۸/۱ میلیمتر بوده و تنش فشاری اعمال شده مساوی ۳۲ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ نمونهٔ استوانه‌ای گزارش شده است.

۵- مکدونالد؛ نمونه‌های این محقق عبارت است از استوانه‌های بتنی به ابعاد ۴۰/۶×۱۵/۲ سانتیمتر که پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و بعد از ۲۴ ساعت قرارگیری در اتاق مه، توسط یک لایه اپوکسی و پوشش مسی عایق بندی شده است. پس از ۸۳ روز، پوشش اپوکسی برداشته شده و عایق بندی توسط نئوپرن انجام گرفته و نمونه‌ها در دمای مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ نمونهٔ استوانه‌ای برابر ۴۳/۴ MPa بوده و از سیمان پرتلند تیپ دو و به مقدار ۴۰۴ کیلوگرم در یک متر مکعب بتن استفاده شده است. حداکثر اندازهٔ درشت دانه برابر ۱۹ میلیمتر بوده و آب، سیمان، ماسه و درشت دانه به نسبت ۰/۴۲۵، ۱، ۲/۰۳ و ۲/۶۲ به کار گرفته شده است. تنش فشاری اعمال شده مساوی ۴/۱ و ۱۶/۶ مگا پاسکال گزارش شده است.

۶- ناصر و نویل؛ نمونه‌های این محققان عبارت است از استوانه‌های بتنی به ابعاد ۲۳/۵×۷/۶ سانتیمتر که توسط پوششی از پلی پروپیلن عایق بندی گردیده و پس از ۲۴ ساعت در آبی که دمای آن برابر با دمای آزمایش، قرار داده شده است. بارگذاری نمونه‌ها در عمر ۱۴ روزه انجام شده است. مقاومت فشاری ۱۴ روزهٔ نمونهٔ استوانه‌ای برابر ۳۹ MPa بوده و از سیمان پرتلند تیپ سه و به مقدار ۳۲۰ کیلوگرم در یک متر مکعب بتن استفاده شده است. حداکثر اندازهٔ درشت دانه برابر ۱۹ میلیمتر بوده و آب، سیمان و سنگدانه به نسبت ۰/۶، ۱ و ۷/۱۵ مخلوط شده است. تنش فشاری اعمال شده مساوی ۱۳/۴ مگا پاسکال گزارش شده است.

۷- ناصر و نویل؛ نمونه‌های این محققان عبارت است از استوانه‌های بتنی به ابعاد ۲۳/۵×۷/۶ سانتیمتر که در آب با دمای ۲۱ درجهٔ سانتیگراد تا یک هفته قبل از بارگذاری قرار داده شده است. بارگذاری نمونه‌ها در عمر ۳۶۵ روزه انجام شده و نمونه‌ها ضمن بارگذاری در آب قرار داشته اند. مقاومت فشاری ۳۶۵ روزهٔ نمونهٔ استوانه‌ای ۵۰ MPa بوده و از سیمان پرتلند تیپ سه و به مقدار ۳۲۰ کیلوگرم در یک متر مکعب بتن استفاده شده است. حداکثر اندازهٔ درشت دانه برابر ۱۹ میلیمتر بوده و آب، سیمان و سنگدانه به نسبت ۰/۶، ۱ و ۷/۱۵ مخلوط شده است. نسبت تنش فشاری اعمال شده به مقاومت فشاری یک ساله برابر ۰/۴۵ گزارش شده است.

۸- هنانت؛ نمونه‌های این محقق عبارت است از استوانه‌های بتنی به ابعاد ۳۰/۵×۱۵/۲ سانتیمتر که به مدت ۵ ماه در آب با دمای ۲۰ درجهٔ سانتیگراد نگهداری شده و سپس در پوششهای مسی عایق بندی شده است. گرمایش نمونه‌ها از یک روز قبل از بارگذاری شروع شده و نرخ آن در حدود ۱۰ درجهٔ سانتیگراد در ساعت بوده است. مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ نمونهٔ مکعبی برابر ۶۴/۵ MPa بوده و از سیمان پرتلند تیپ پنج، و درشت دانهٔ با قطر حداکثر برابر ۱۹ میلیمتر، استفاده شده است. اختلاط آب، سیمان، ماسه و درشت دانه به نسبت ۰/۴۷، ۱، ۱/۸۴۵ و ۲/۶۵۵ بوده و تنش فشاری اعمال شده ۱۳/۸ مگا پاسکال گزارش شده است.

۹- سکی و کواسومی؛ نمونه‌های این محققان عبارت است از استوانه‌های بتنی به ابعاد ۶۰×۱۵ سانتیمتر که در پوششهای مسی ریخته شده و در دمای ۲۰ درجهٔ سانتیگراد عمل آوری شده است. دمای ۴۰ درجهٔ سانتیگراد در سنین ۲۸ روز و ۹۷ روز اعمال شده و در سن ۲۹ روزه و ۱۰۰ روزه بارگذاری انجام گرفته است. همچنین دمای ۷۰ درجهٔ سانتیگراد در سنین ۲۷ روز و ۱۰۴ روز اعمال شده و در سن ۲۹ روزه و ۱۰۵ روزه بارگذاری انجام گرفته است. مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ نمونهٔ استوانه‌ای برابر ۳۱/۵ MPa بوده و از سیمان پرتلند تیپ یک و به مقدار ۳۴۳ کیلوگرم در یک متر مکعب بتن

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]

استفاده شده است. همچنین به میزان ۲۵ در صد وزنی سیمان، پوزولان به مخلوط اضافه شده است. حداکثر اندازهٔ درشت دانه برابر ٤٠ میلیمتر بوده و آب، سیمان، ماسه و درشت دانه به نسبت ۰/٤، ۱، ۱/۷٦۱ و ۳/۸۳٤ مخلوط شده‌اند. تنش فشاری اعمال شده مساوی ۸/۸ مگا پاسکال گزارش شده است.

۱۰- یورک و همکاران؛ نمونه‌های این محققان عبارت است از استوانه‌های بتنی به ابعاد ٤٠/٦×۱۵/۲ سانتیمتر که پس از ۲٤ ساعت از قالب خارج شده است و بعد از عایق بندی توسط یک لایهٔ اپوکسی به مدت ۲٤ ساعت در اتاق مه قرار گرفته و سپس توسط یک پوشش مسی عایق بندی شده و به مدت ۸۱ روز در دمای ۲٤ درجهٔ سانتیگراد عمل آوری شده است. پس از ۸۳ روز، عایق بندی توسط پوششی از جنس نئوپرین انجام شده و نمونه‌ها در دمای آزمایش قرار گرفته‌اند. مقاومت فشاری ۲۸ روزهٔ نمونهٔ استوانه‌ای ٤٤/٦MPa بوده و از سیمان پرتلند تیپ دو و به مقدار ٤۰٤ کیلوگرم در یک متر مکعب بتن استفاده شده است. حداکثر اندازهٔ درشت دانه برابر ۱۹ میلیمتر بوده و آب، سیمان، ماسه و درشت دانه به نسبت ۰/٤۲۵، ۱، ۲/۰۳ و ۲/٦۲ مخلوط شده‌اند. تنش فشاری اعمال شده مساوی ٤/۱ و ۱٦/٦ مگا پاسکال گزارش شده است.

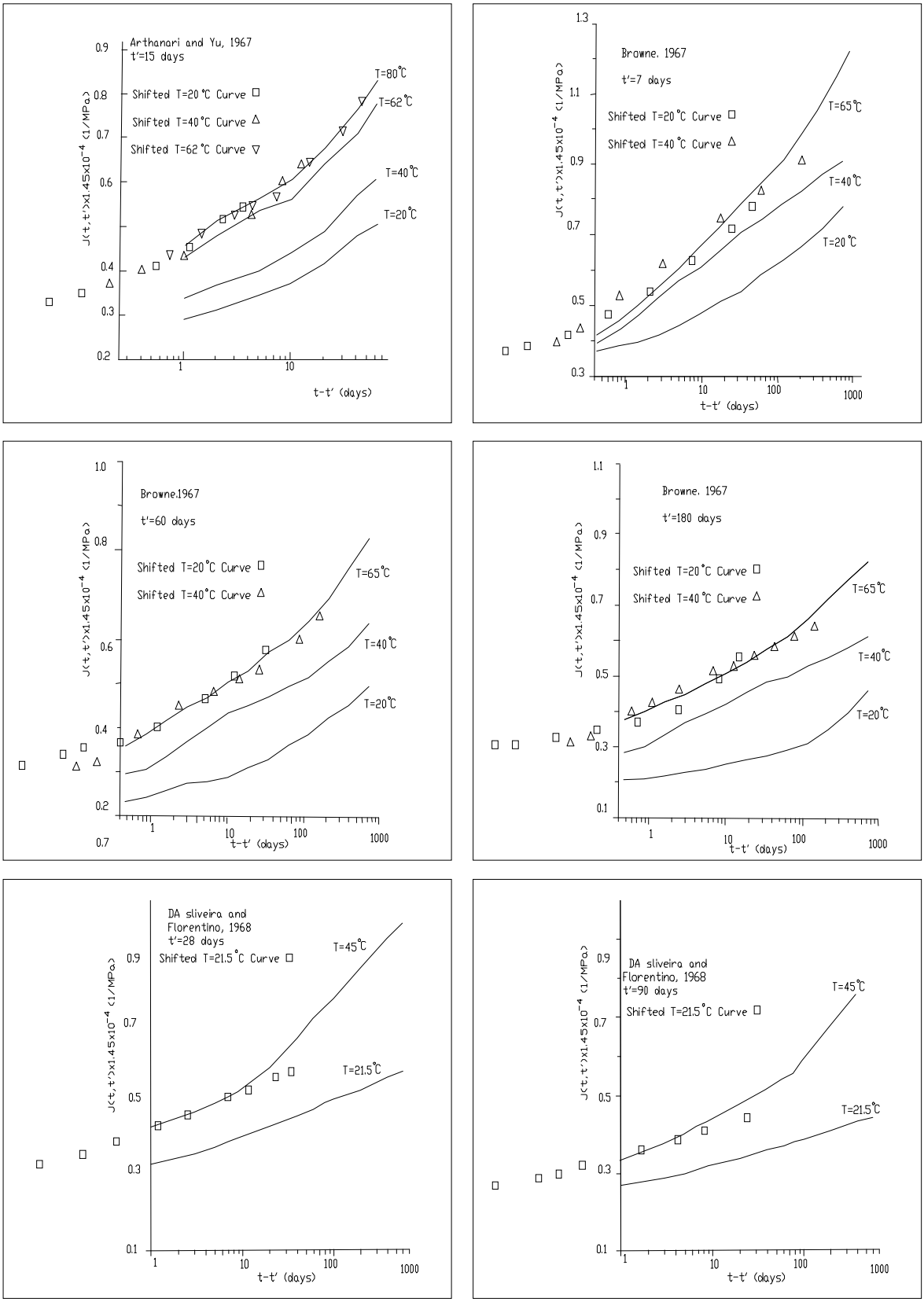
۱۱- زیلینسکی و سادوسکی؛ نمونه‌های این محققان عبارت است از استوانه‌های بتنی به ابعاد ٤۸×۱٦ سانتیمتر که تا ۷۰ روز در رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد و دمای ۲۰ الی ۲۳ درجهٔ سانتیگراد نگهداری شده و سپس توسط یک پوشش لاستیکی عایق بندی شده است. در سن ۱۲۰ روزه، نمونه‌ها در دمای آزمایش قرار گرفته اند و در سن ۱۲۳ روزه بارگذاری شده‌اند. مقاومت فشاری ۱۲۰ روزهٔ نمونهٔ استوانه‌ای ٤۲/۲ MPa بوده و از سیمان پرتلند تیپ یک و به مقدار ٤۵۰ کیلوگرم در یک متر مکعب بتن استفاده شده است. حداکثر اندازهٔ درشت دانه برابر ۲۰ میلیمتر بوده و آب، سیمان و سنگدانه به نسبت ۱،۰/٤ و ٤/۱۵٤ مخلوط شده اند. تنش فشاری اعمال شده ۱٤/۷ مگا پاسکال گزارش شده است.

٤-۳- کاربرد هم‌ارزی زمان- دما برای داده‌های آزمایشگاهی

با توجه به شباهت نسبتاً زیاد خزش پایهٔ بتن و خزش مواد پلیمری ویسکوالاستیک، ابتدا معادلهٔ هم ارزی زمان- دما که از خصوصیات مواد ویسکوالاستیک به شمار می‌رود، در مورد بتن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. معادلهٔ هم ارزی زمان- دما بیان می‌دارد که منحنی‌های خزش بر حسب لگاریتم مدت زمان بارگذاری در دماهای متفاوت همگی جزیی از یک منحنی مادر هستند و با یک انتقال افقی که مقدار آن به دمای نمونه بستگی دارد، می‌توان این منحنی‌ها را بر منحنی مادر منطبق کرد. این خصوصیت باعث می‌شود که قسمتهایی از منحنی‌های خزش در دماهای مختلف قابل انطباق بر روی یکدیگر باشند و در نتیجه بتوان منحنی خزش در دمای کمتر و در مدت زمان‌های زیاد پس از بارگذاری را بر منحنی خزش در دمای بیشتر و در مدت زمان‌های کمتر پس از بارگذاری منطبق کرد. بنابر این در صورتی که در بتن معادلهٔ هم ارزی زمان- دما صادق باشد، می‌توان خزش پایهٔ دراز مدت را با استفاده از مقدار خزش پایه کوتاه مدت در دمای بالاتر براورد کرد.

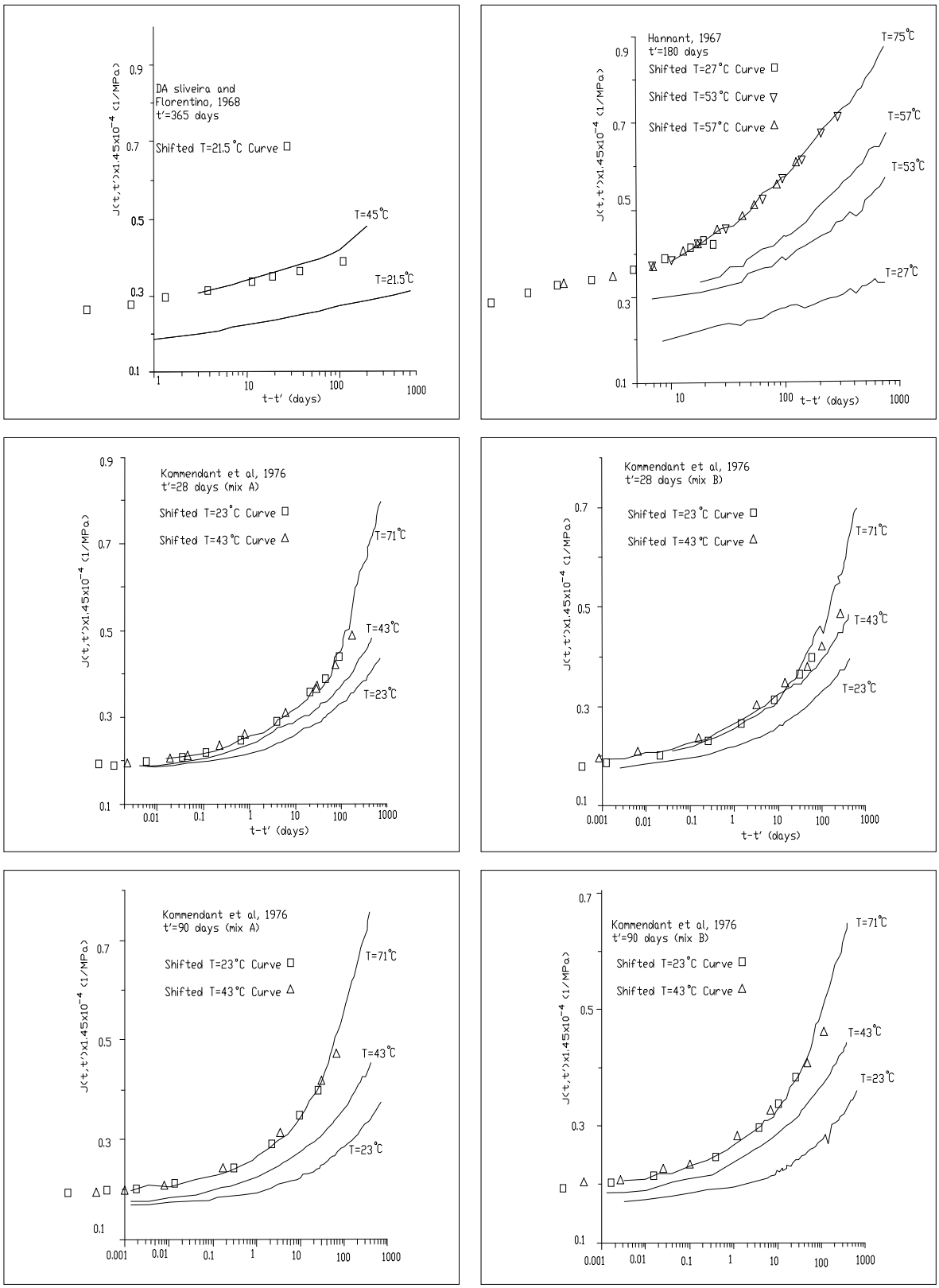
در تحقیق حاضر برای بررسی معادلهٔ هم ارزی زمان- دما، در ابتدا سعی می‌شود منحنی‌های خزش در دماهای مختلف بر روی منحنی متناظر با بیشترین دما منطبق شود. این کار با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی که در قسمت ٤-۲ معرفی شدند، صورت می‌گیرد. شکل‌های (۲) تا (۵) اطلاعات آزمایشگاهی مورد اشاره که توسط محققان مختلف و در دماهای متفاوت تهیه شده است را نشان می‌دهد. در این تحقیق ابتدا سعی شده است که در هر مورد منحنی خزش پایه در دماهای مختلف با یک انتقال به صورت ادامهٔ منحنی خزش در دمای بیشتر در آید. همان‌گونه که در شکلهای ۲ تا ۵ ملاحظه می‌شود، منحنی‌های خزش آزمایشگاهی به صورت خط ممتد و منحنی‌های خزش انتقال یافته بر روی منحنی خزش در دمای بیشتر، با علامتهای مثلث و مربع نشان داده شده‌اند. با توجه به این شکلها مشاهده می‌شود که پس از انتقال منحنی خزش در دمای پایین تر بر روی منحنی خزش در دمای بالاتر، منحنی خزش در دمای

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]



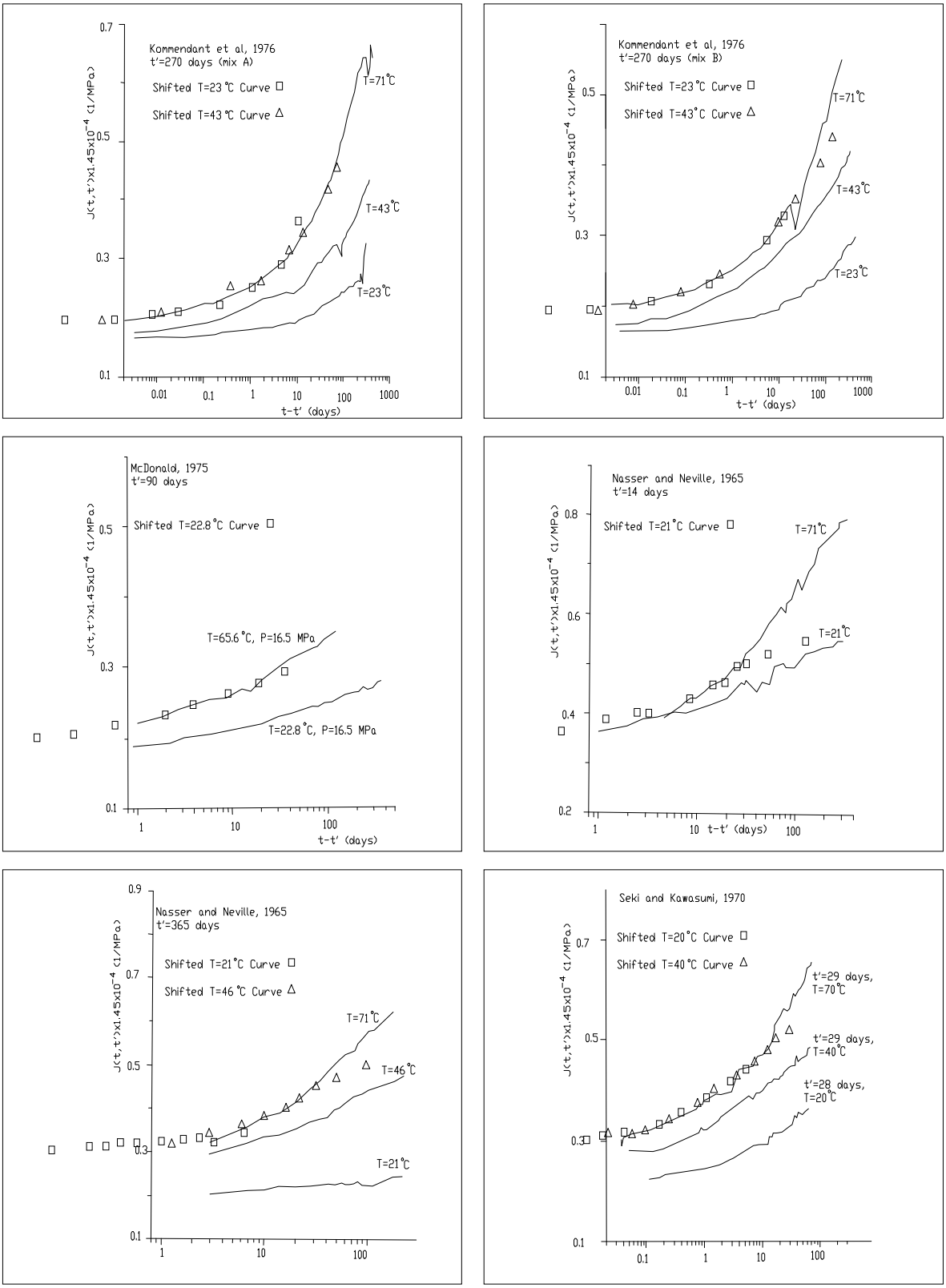
شکل ۲- منحنی خزش در دماهای متفاوت و انتقال آن بر روی منحنی خزش با دمای بالاتر برای داده‌های آرتاناری و یو، برآون، و اسیلویرا و فلورنتینو

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]



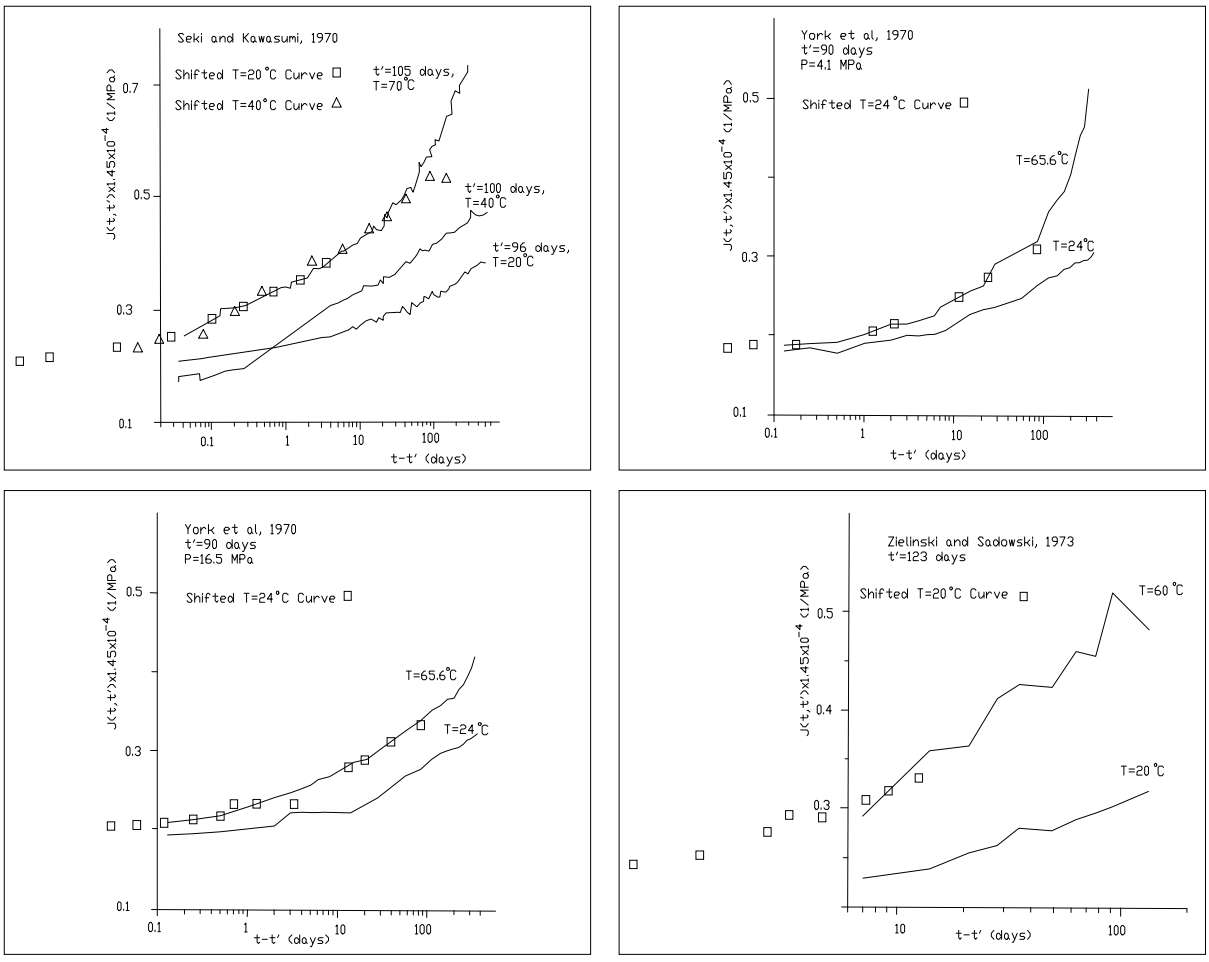
شکل ۳- منحنی خزش در دماهای متفاوت و انتقال آن بر روی منحنی خزش با دمای بالاتر برای داده‌های داسیلویرا و فلورنتینو، هنانت، و کمندنت و همکاران

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]



شکل ٤- منحنی خزش در دماهای متفاوت و انتقال آن بر روی منحنی خزش با دمای بالاتر برای داده‌های کمندنت و همکاران، مکدونالد، ناصر و نویل، و سکی و کواسومی

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]



شکل ۵- منحنی خزش در دماهای متفاوت و انتقال آن بر روی منحنی خزش با دمای بالاتر برای داده‌های سکی و کواسومی، یورک و همکاران، و زلینسکی و سادوسکی

بالاتـر را می‌توان به صورت ادامهٔ منحنی خزش در دمای پایینتر فرض کرد.

٤-٤- ارائهٔ مدل

در بخـش قـبل نشـان داده شد که منحنی‌های تابع انطباق بر حسـب لگاریـتم مـدت بارگذاری در دمای پایینتر را می‌توان به صـورت ادامـهٔ تابـع انطبـاق در دمـای بالاتـر در نظر گرفت. به عبارت دیگر می‌توان فرض کرد که منحنی تابع انطباق بر حسب لگاریتم مدت بارگذاری در دمای بیشتر، ادامهٔ منحنی تابع انطباق در دمـای کمتـر اسـت. ایـن موضـوع امکان فراهم آمدن روشی برای تخمین مقدار خزش بلند مدت در دمای کمتر را با استفاده از منحنـی خـزش در دمای بیشتر ولی در مدت زمان بارگذاری کمتر، به وجود می‌آورد. به منظور ارائهٔ مدلی برای تخمین مقدار خـزش درازمـدت بـا اسـتفاده از آزمایش خزش کوتاه مدت در دمـای بالاتـر، کافـی است مقدار انتقال لازم برای بر هم نهی دو منحنـی در دماهـای مخـتلف بر روی یکدیگر مشخص شود. به ایـن منظور، ابتدا تابع انتقال با استفاده از مفاهیم نظری مربوط به خزش پایه حدس زده می‌شود و سپس پارامترهای آن با استفاده از برازش داده‌های آزمایشگاهی موجود براورد می‌شود.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]

برای تعیین تابع انتقال، معادلهٔ زیر که تعریف تابع انطباق (انعطاف پذیری) است، نوشته می‌شود [۳۸]:

$$\varepsilon(t,t') = J(t,t')\sigma \qquad (۲۰)$$

به طوری که t' بیانگر سن بتن در لحظهٔ بارگذاری، t زمان قرائت مقدار تغییر شکل، ε کرنش در زمان t، σ تنش اعمال شده و J تابع تطابق است. با تعریف متغیر ξ که آن را زمان توسعه یافته می‌نامیم، معادلهٔ بالا به صورت زیر در می‌آید:

$$\varepsilon(\xi,t') = J'(\xi,t')\sigma \qquad (۲۱)$$

که در آن $J'(\xi,t')$ تابع انطباق تصحیح شده[1] با در نظر گرفتن اثر دماست. ξ که بیانگر افزایش سرعت انجام واکنش هیدراسیون و همچنین افزایش خزش، با افزایش دما است، به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۸]:

$$\xi = \Phi(T,t'_e)(t-t') \qquad (۲۲)$$

به طوری که $\Phi(T,t'_e)$ تابع تصحیح دما و بلوغ اولیهٔ بتن بوده و T دمای مطلق و t'_e بلوغ بتن در لحظهٔ بارگذاری است. از آنجا که دما باعث افزایش هیدراسیون و در نتیجه افزایش بلوغ بتن می‌شود، برای محاسبهٔ بلوغ بتن در دماهای مختلف از معادلات (۱۱) و (۱۲) استفاده می‌شود.

قابل ذکر است که در معادلهٔ (۲۲)، وقتی که $(t-t')$ به سمت صفر میل می‌کند، ξ نیز به طرف صفر میل می‌کند. همچنین هنگامی که $(t-t')$ نامحدود شود، ξ نیز نامحدود می‌شود.

با لگاریتم گیری از معادلهٔ (۲۲)، معادلهٔ زیر حاصل می‌شود:

$$\log\xi = \log\Phi(T,t'_e) + \log(t-t') \qquad (۲۳)$$

این معادله بیان می‌دارد که اگر منحنی مقدار خزش بر حسب $\log(t-t')$ ترسیم شود، منحنی‌های خزش با دماهای متفاوت و یا عمرهای مختلف در لحظهٔ بارگذاری، با یک انتقال افقی بر روی یکدیگر قابل انطباق خواهند بود. برای یافتن تابع انتقال $\log\Phi(T,t'_e)$، از معادلهٔ آرنیوس استفاده می‌شود. معادلهٔ آرنیوس بیان می‌کند که ثابت سرعت (k) در یک واکنش شیمیایی نسبت به انرژی فعال سازی واکنش و دمای واکنش از معادلهٔ زیر تبعیت می‌کند (A یک ضریب ثابت است):

$$k = Ae^{(\frac{U}{RT})} \qquad (۲۴)$$

حال فرض می‌شود که دو منحنی متفاوت، دارای بلوغ یکسان در زمان بارگذاری باشند؛ بدین ترتیب با توجه به معادلهٔ آرنیوس، معادلهٔ زیر برای $\Phi(T,t'_e)$ پیشنهاد می‌شود:

$$\Phi(T,t'_e) = e^{\frac{U}{R}(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T})} \qquad (۲۵)$$

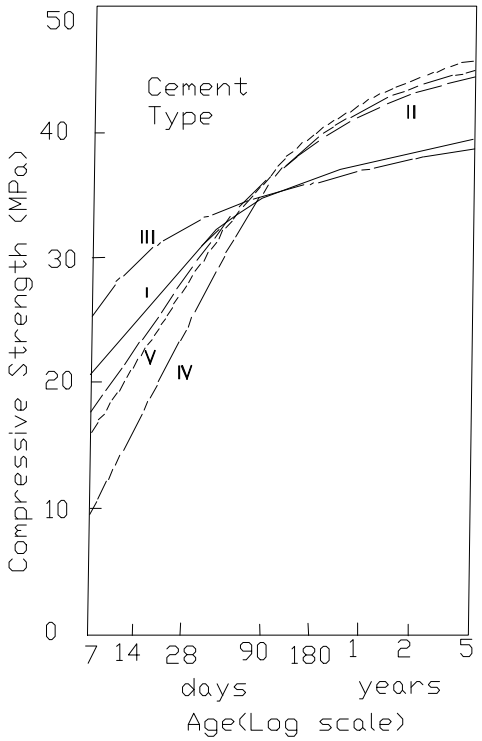
در معادلهٔ بالا، T دمای مورد نظر بر حسب درجهٔ کلوین، T_0 دمای مرجع بر حسب درجهٔ کلوین، R ثابت گازها برابر با $8.314J/mol^{\circ}K$ و U انرژی فعال سازی متوسط بر حسب J/mol است که برآیند دو اثر متفاوت دما بر خزش، یکی افزایش سرعت هیدراسیون و کاهش نرخ خزش، و دیگری کاهش ویسکوزیتهٔ آب بتن و افزایش نرخ خزش است و با انجام برازش داده‌های تجربی بر مدل حاضر تعیین می‌گردد. قابل ذکر است که در صورت تساوی T و T_0، مقدار انتقال برابر صفر به دست خواهد آمد و توابع J و J' با هم یکسان خواهند شد.

با استفاده از معادلهٔ (۲۵)، مقدار انتقال برای انطباق منحنی خزش در دمای بالاتر بر روی منحنی خزش در دمای مرجع به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\log\Phi(T,t'_e) = \frac{1}{\ln 10}\frac{U}{R}(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}) \qquad (۲۶)$$

بنابراین برای انتقال دو منحنی در دماهای دلخواه T_1 و T_2، این دماها به ترتیب جایگزین T_0 و T در معادلهٔ بالا می‌شود. با توجه به این که هیدراسیون سیمانهای متفاوت در طول زمان گیرش، سرعتهای متفاوتی دارد، لذا U بسته به نوع سیمان به کار رفته مقادیر متفاوتی خواهد داشت. شکل (٦) روند توسعهٔ مقاومت بتنهای ساخته شده با انواع مختلف سیمان را نشان می‌دهد [۳۹]. از این شکل ملاحظه می‌شود که گرچه روند توسعهٔ مقاومت انواع سیمان به میزان قابل ملاحظه‌ای متفاوت است، لیکن اختلاف کمی بین مقاومت ٦۰ روزهٔ انواع سیمانها وجود دارد. همچنین ملاحظه می‌شود رشد مقاومت بعد از ٦۰ روز، برای بتن های ساخته شده با سیمانهای مختلف شروع به

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]



شکل ٦- روند توسعهٔ مقاومت بتنهای حاوی ۳۲۵ کیلوگرم سیمان در یک متر مکعب بتن و ساخته شده با انواع مختلف

کـاهش مـی‌کـند. به علاوه مشاهده می‌شود که در سن ٦٠ روز، بتـنهای ساخته شده با سیمانهای مختلف حداقل به ٨٠ درصد از مقاومـت نهایی خود می‌رسند. بنابراین برای بتنهای با عمر بیش از ٦٠ روز، جهـت سـهولت انـرژی فعـال سـازی متوسـط U یکسان فرض می‌شود.

به منظور در نظر گرفتن اثر بلوغ اولیه نمونه، تابع سادهٔ (٢٧) بـرای مقـدار انـتقال افقـی دو نمـونه در دماهـای T_1 و T_2، و بلوغهای اولیهٔ t'_{e1} و t'_{e2} پس از سعی و خطاهای زیاد به‌دست آمـد. بـرای ایـن کـار، مقادیـر اولـیه انـتقال لازم بـرای تطبـیق منحنـی‌هـای خـزش پایـه در دماهـای مختلف بر روی یکدیگر مـورد اسـتفاده قـرار گـرفت. برای بهبود مدل معادلات مختلفی بـرای بـراورد میزان انتقال افقی لازم مورد آزمایش قرار گرفته و سـپس مقادیـر براورد شده از معادلهٔ پیشنهاد شده با مقادیر اولیه انـتقال افقی مقایسه شد. سپس در صورت مشاهدهٔ اختلاف زیاد بـین مقـدار بـراورد شده و مقدار اولیه، سعی شد مقدار اولیه به مقـدار بـراورد شـده نـزدیک شـود. از آنجـا کـه بـرای تطبـیق منحنـی‌های خزش بر روی یکدیگر علاوه بر یک انتقال افقی به یـک انـتقال عمودی نیاز است و این دو مقدار انتقال تا حدودی به یکدیگر وابسته‌اند، مقادیر انتقال افقی را می‌توان تا حدودی با تغییـر مقدار انتقال عمودی تغییر داد. پس از اصلاح مقدار انتقال افقـی بـار دیگر فرایند پیشنهاد رابطهٔ نظری و تعیین پارامتر های آن مجـدداً انجام شد و این عملیات آن قدر ادامه یافت تا معادلهٔ مناسـبی به‌صورت معادلهٔ (٢٧) برای براورد مقدار انتقال افقی به دسـت آمد. در این معـادلـه پارامترهای A و B برای بتنـهای با عمر بیشتر از ٦٠ روز در لحظهٔ بارگذاری ثابت است، و دماهای T_1 و T_2 بر حسب درجهٔ کلوین، و بلوغهای اولیهٔ t'_{e1} و t'_{e2} بر حسب روزند.

$$\log \Phi(T, t'_e) = A\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) - \frac{B}{T_1 T_2}(\ln t'_{e2} - \ln t'_{e1}) \qquad (٢٧)$$

بـا انجام برازش برای داده‌های کمندنت و همکاران، سکی و کواسـومی، مکدونالـد، ناصـر و نویل، زلینسکی و سادوسکی، و

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]

داده‌هـای در دمای بیشتر از ۲۰ درجهٔ سانتیگراد برآون که تقریباً ۷۵ درصـد از داده‌هـای موجـود را تشـکیل می‌دهند، مقدار A برابـر بـا ۳۱۵٤/۵ درجـهٔ کلـوین، و مقـدار B برابـر با ۸۷۳۱۳ برحسـب درجهٔ کلوین به دست آمده است؛ در حالی که ضریب همبسـتگی معادلـهٔ اسـتخراج شـده مساوی $R^2 = 0.98$ است. ضریب همبستگی R^2 بیانگر همبستگی خطی بین مقدار انتقال بـه دسـت آمـده از معادلهٔ براورد کننده و مقدار انتقال داده شده مـی‌باشـد؛ بـه طوری که ضریب همبستگی یک مبین همبستگی مستقیم و کامل است.

معادلـهٔ (۲۷) و مقادیـر تعیین شده برای ضرایب A و B برای داده‌های هنانت و دا اسلیویرا و فلورنتینو و داده‌های برآون بـرای دمای ۲۰ درجهٔ سانتیگراد که در مجموع حدود ۲۵ درصد از داده‌های آزمایشگاهی موجود را تشکیل می‌دهد، مورد بررسی قرار گرفت که تطابق بسیار خوبی ملاحظه شد.

تـوجه شود که چون برازش داده‌ها برای بتنهایی که سن آنها در لحظـهٔ بارگـذاری بین ٦۰ تا ۳٦۵ روز و دمای آنها بین ۲۰ تا ۸۰ درجـهٔ سـانتیگراد بـوده، انجـام گـرفته است؛ معادلهٔ (۲۷) و مقادیـر تعیـین شـده بـرای ضرایب A و B نیز برای بتنهایی که عمـر آنهـا در لحظهٔ بارگذاری بین ٦۰ تا ۳٦۵ روز بوده و دمای آنها بین ۲۰ تا ۸۰ درجهٔ سانتیگراد است، صادق خواهد بود.

لازم به ذکر است که در برازش داده‌ها در معادلهٔ (۲۷)، برای محاسـبهٔ بلـوغ نمونه‌ها قبل از بارگذاری بر بتنهایی که عمر آنها در لحظـهٔ بارگذاری بیش از ٦۰ روز است، از معادلهٔ زیر استفاده شده است [۱۵]:

$$t'_e = t' + \Delta t'_e = \int_0^{t'} e^{4000(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T})}\, dt \qquad (۲۸)$$

در معادلـهٔ (۳۰)، t'_e بلوغ بتن در لحظهٔ بارگذاری بر حسب روز، t' زمـان بارگـذاری بر حسب روز، $\Delta t'_e$ عمر اضافه شده بـر اثـر افـزایش دمـا بـر حسـب روز، T_0 دمای عمل آوری بر حسـب درجهٔ کلوین، T دمای آزمایش بر حسب درجهٔ کلوین و t زمـان برحسـب روز اسـت. عـدد ٤۰۰۰ درجـهٔ‌کلـوین در معادلـهٔ (۲۸)، معـرف انـرژی فعـال سازی هیدراسیون تقسیم بر ثابـت گازهـا اسـت کـه تاکـنون مقادیر متفاوتی برای آن توسط محققـان مخـتلف ارائه شده است. بازانت و پانلا در سال ۱۹۷۸ ایـن مقـدار را برابـر ٤۰۰۰ درجهٔ کلوین [۱۵]، بازانت و کیم در سـال ۱۹۹۲ برابـر ٤۰۰۰ درجهٔ کلوین [۳٤]، بازانت و همکاران در سـال ۱۹۹۳ مسـاوی ۵۰۰۰ درجـهٔ کلوین [٤۰]، سرکومب و همکـاران در سال ۲۰۰۰ برابر ٤۰۰۰ درجهٔ کلوین [٤۱] و اکر و آلـم در سال ۲۰۰۱ این مقدار را برای سیمان پرتلند معمولی بین ٤۰۰۰ تا ۵۰۰۰ درجهٔ کلوین [٤۲] پیشنهاد کردند. در این تحقیق نسـبت انـرژی فعال سازی هیدراسیون به ثابت عمومی گازها با توجه به مکاتبات انجام شده توسط نگارندگان با بازانت، برابر با ٤۰۰۰ درجهٔ کلوین در نظر گرفته شد.

قابـل ذکـر اسـت که در محاسبهٔ بلوغ، مدت زمان لازم برای ایـنکه کلـیه نقاط نمونه از دمای محیط به دمای آزمایش برسند، t_v، حـداقل مساوی یک روز در نظر گرفته شد و در این مدت (t_v) فـرض شـد که دمای T به طور خطی از دمای محیط به دمـای آزمـایش مـی‌رسد. پس از مدت زمان t_v، دمای نمونه در دمـای آزمـایش ثابـت بـوده و مدت زمانی که قبل از بارگذاری دمـای نمـونه در دمـای مربوط به زمان آزمایش ثابت نگه داشته مـی‌شود، با t_u نمایش داده می‌شود. در مدت زمان t_v به اندازهٔ $\Delta t'_{e_v}$، و در مـدت زمـان t_u بـه مقـدار $\Delta t'_{e_u}$ بـر بلوغ نمونهٔ بتـنـی افـزوده می‌شود. مجموع $\Delta t'_{e_v}$ و $\Delta t'_{e_u}$ برابر با کل بلوغ اضـافی نمـونهٔ تحت دمای $\Delta t'_e$ است. مقادیر بلوغ محاسبه شده برای نمونه‌های بتنی محققان مختلف، که عمر نمونه‌های آنها در لحظـهٔ بارگـذاری بـیش از ٦۰ روز اسـت، در جدول (۱) آورده شـده اسـت. شـایان ذکر است که چون معادلهٔ (۲۸) برای زمانی کـه دمـا متغیـر است، جواب ساده‌ای ندارد، برای محاسبهٔ آن از نـرم افـزار Mathematica4 کـه قـادر بـه محاسبهٔ انتگرالهای مختلف می‌باشد، استفاده شده است.

انتقال عمودی لازم

بـرای تطبـیق منحنـی‌های خزش بر روی یکدیگر، علاوه بر انتـقال افقی یک انتقال عمـودی نیز لازم به نظر می‌رسد. اگرچه

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]

جدول ۱- مقادیر بلوغ محاسبه شده در لحظهٔ بارگذاری برای نمونه‌های بتنی محققین مختلف

محقق	t' (روز)	T_0 ($^\circ K$)	T ($^\circ K$)	t_v (روز)	t_u (روز)	$\Delta t'_{e_v}$ (روز)	$\Delta t'_{e_u}$ (روز)	$\Delta t'_e$ (روز)
کمندنت و همکاران	۹۰ و ۲۷۰	۲۹۶	۳۱۶	۱/۵	۳/۵	۲/۳۹	۸/۲۳	۱۰/۶۲
کمندنت و همکاران	۹۰ و ۲۷۰	۲۹۶	۳۴۴	۳/۶۱	۱/۳۹	۱۱/۱۹	۹/۱۶	۲۰/۳۵
مکدونالد	۹۰	۲۹۵/۸	۳۳۸/۶	۱	۶	۲/۷۵	۳۳/۱۵	۳۵/۹
سکی و کواسومی	۱۰۰	۲۹۳	۳۱۳	۱	۲	۱/۶۱	۴/۷۸	۶/۳۹
سکی و کواسومی	۱۰۵	۲۹۳	۳۴۳	۱	۰	۳/۳۳	۰	۳/۳۳
ناصر و نویل	۳۶۵	۲۹۴	۳۱۹	۱	۶	۱/۸۱	۱۷/۴۳	۱۹/۲۴
ناصر و نویل	۳۶۵	۲۹۴	۳۴۴	۱	۶	۳/۳۰	۴۳/۳۵	۴۶/۶۵
زلینسکی و سادوسکی	۱۲۳	۲۹۳	۳۳۳	۱	۲	۲/۶۲	۱۰/۳۱	۱۲/۹۳
برآون	۶۰ و ۱۸۰	۲۹۳	۳۱۳	۱	۰	۱/۶۱	۰	۱/۶۱
برآون	۶۰ و ۱۸۰	۲۹۳	۳۳۸	۱	۰	۲/۹۵۵	۰	۲/۹۵۵
هنانت	۱۸۰	۳۰۰	۳۲۶	۱	۰	۱/۸۱	۰	۱/۸۱
هنانت	۱۸۰	۳۰۰	۳۳۰	۱	۰	۱/۹۸	۰	۱/۹۸
هنانت	۱۸۰	۳۰۰	۳۴۸	۱	۰	۳/۰۰	۰	۳/۰۰
دا اسلیویرا و فلورنتینو	۹۰ و ۳۶۵	۲۹۴/۵	۳۱۸	۱	۲	۱/۷۴	۵/۴۶	۷/۲۰

به رغم تلاش نگارندگان، معادلهٔ نظری مناسبی که بیانگر این انتقال باشد، حاصل نشد؛ اما با انجام بررسیهای بسیار گسترده بر روی داده‌های موجود، روش زیر برای این منظور پیشنهاد شد:

برای یافتن مقدار انتقال عمودی، یک شیوهٔ مناسب این است که نمونهٔ بتنی، در دمایی که مقدار خزش آن در زمان‌های طولانی مورد نظر است، نیز به مدت کوتاهی تحت آزمایش خزش قرار گیرد. بدین ترتیب فرایند تخمین به این صورت خواهد بود که تغییر شکل نمونه در دمای بالاتر از همان دقایق نخست ثبت شود و به مدت لازم ادامه یابد؛ به طوری که پس از انتقال منحنی خزش در این دما، خزش در دما و زمان مورد نظر به دست آید. آن‌گاه منحنی خزش آن در مقیاس لگاریتمی به اندازه‌ای که از معادلهٔ (۲۹) به دست می‌آید، به صورت افقی انتقال می‌یابد. سپس منحنی انتقال یافته، یک انتقال عمودی نیز پیدا می‌کند؛ به طوری که محدوده‌ای از ابتدای آن بر محدوده‌ای از انتهای منحنی خزش در دمای مورد نظر منطبق شود. برای این منظور کافی است که ابتدای منحنی خزش در دمای بیشتر، بر حداقل سه نقطه از انتهای منحنی خزش در دمای مورد نظر برازش شود. منحنی انتقال یافته، مقادیر خزش در دمای پایینتر را در زمان‌های بعدی براورد می‌کند.

از آنجا که داده‌های آزمایشگاهی موجود که در ارائهٔ این روش مورد استفاده قرار گرفتند، شامل داده‌های خزش پایه حداکثر تا ۱۰۰۰ روز پس از اعمال بارند، روش مذکور خزش پایه را تا عمر ۱۰۰۰ روز براورد می‌کند و در زمان‌های بیشتر، با توجه به عدم وجود داده‌های آزمایشگاهی در این مورد، قضاوت مطمئنی نمی‌توان داشت. با این وجود پیش بینی می‌شود که این روش برای زمان‌های بیشتر از ۱۰۰۰ روز، در تخمین خزش پایه برای نمونه‌هایی که دمای آنها در حدود دمای محیط باشد، منجر به تخمین دست بالایی شود.

برای درک بهتر روش پیشنهادی، از داده‌های آزمایشگاهی کمندنت در خزش نمونه‌های بتنی استفاده می‌شود. شکل(۷)

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]

ایـن داده‌هـا را در دماهـای ۲۳، ٤۳ و ۷۱ درجـهٔ سـانتیگراد بـه تـرتیب با اشکال دایرهٔ با زمینهٔ سفید، مثلث و دایرهٔ با زمینهٔ سیاه نشـان مـی‌دهـد. داده‌هـای خزش در دمای ۷۱ درجهٔ سانتیگراد، تشکیل یک منحنی ممتد را داده اند که این منحنی پس از انتقال لازم و بـرازش بـر سه نقطه از داده‌های خزش در دماهای ۲۳ و ٤۳ درجـهٔ سانتیگراد، تشکیل مدل پیشنهادی برای خزش در این دو دمـا را داده اسـت. این نمودار حاکی از آن است که در مورد این نمونه‌ها، برای تخمین خزش ۷۰۰ روزهٔ نمونهٔ بتنی در دمای ۲۳ درجـهٔ سـانتیگراد کافی است نمونهٔ بتنی در دمای ۷۱ درجهٔ سـانتیگراد بـه مـدت ۳۱ روز، و نمـونهٔ بتنی در دمای ۲۳ درجهٔ سـانتیگراد بـه مـدت ۳ روز تحت آزمایش خزش قرار گیرد. به بـیان دیگـر، منحنی خزش در دمای ۷۱ درجهٔ سانتیگراد پس از انـتقال افقی و قائم لازم، در وضعیتی قرار گرفته که ابتدای آن بر منحنـی خـزش در دمای ۲۳ درجهٔ سانتیگراد و مرتبط با زمان ۳ روز واقـع شده است؛ درحالی که خزش مرتبط با زمان ۳۱ روز از منحنـی مربوط به دمای ۷۱ درجهٔ سانتیگراد، وضعیت منحنی مربوط به دمای ۲۳ درجهٔ سانتیگراد در زمان ۷۰۰ روز را دربر می‌گیرد.

منحنـی شـکل (۷) همچنـین نشـان می‌دهد که برای براورد خزش ۷۰۰ روزهٔ نمونهٔ بتنی در دمای ٤۳ درجهٔ سانتیگراد، کافی اسـت نمـونهٔ بتنـی در دمـای ۷۱ درجهٔ سانتیگراد به مدت ۱۱۰ روز، و نمـونهٔ بتنی در دمای ٤۳ درجهٔ سانتیگراد به مدت ۱ روز مـورد آزمـایش قـرار گیـرد. تـوجه شود که در شکل (۷)، مدل بازانت برای تخمین خزش در دماهای ۲۳ و ٤۳ درجهٔ سانتیگراد نیز برای مقایسه با خط چین نشان داده شده است.

۵- ارزیابی مدل

بـه مـنظور ارزیابـی مـدل، روش پیشـنهادی در مـورد سایر داده‌هـای موجـود به کار گرفته شده و نتایج حاصله در شکلهای (۸) تا (۱۹) نشان داده شده است. در کلیهٔ این شکلها سعی شده اسـت که با استفاده از قسمتی از داده‌ها که مربوط به دمای بالاتر اسـت، خـزش دراز مـدت در دمـای پایینتر که مرتبط با قسمت دیگـری از داده‌هاسـت، پیش‌بینی شود. در همهٔ این شکلها مدل بازانت نیز برای مقایسه ارائه شده است.

شـایان ذکر است که در بین شکلهای مورد اشاره، شکلهای (۱۵) تـا (۱۹) مـربوط به حدود ۲۵ درصد از داده‌هاست که در تنظیم مـدل مطلقـا از آنهـا اسـتفاده نشـده اسـت. با این وجود در این نمونه‌ها نیز اکثرا تطابق بسیار خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و منحنـی‌های حاصله از روش پیشنهادی وجود دارد. بدین ترتیب می‌توان شکلهای (۱۵) تا (۱۹) را به عنوان آزمایش اعتبار روش پیشنهادی با داده‌های مستقل قلمداد کرد.

همان طور که از شکلهای (۷) تا (۱۹) مشاهده می‌شود، مدل پیشنهادی که براورد مناسبی از خزش در زمان‌های طولانی دارد، در زمـان‌هـای بیش از ۱۰۰۰ روز اکثرا منجر به تخمینی می‌شود کـه از مقـدار واقعـی اندکـی بیشتر است. این در حالی است که مدل بازانت در اکثر موارد، تخمین دست پایینی از مقـدار خزش در بلـند مدت انجام می‌دهد. بنابراین مدل پیشنهادی می‌تواند به همراه مدل بازانت برای تخمین خزش پایه به کار رود؛ به طوری کـه مـدل بازانـت بـه صـورت تخمـین دسـت پایـین و مدل حاضر بـه عـنوان براورد دست بالای مقدار واقعی خزش در دراز مدت تلقی شوند.

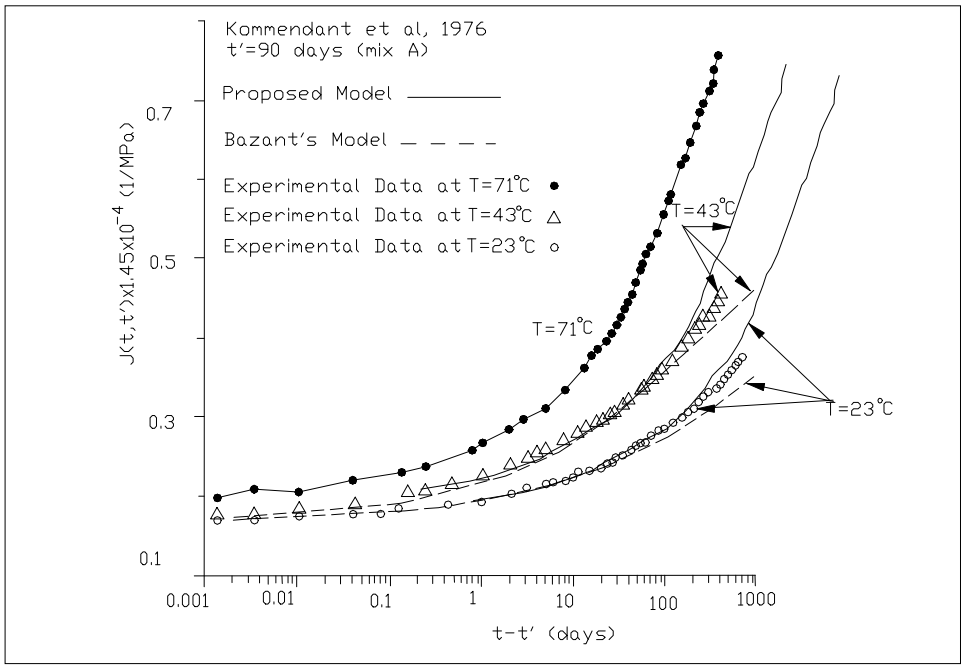
٦- خلاصه و نتیجه‌گیری

۱- معادلهٔ هم ارزی زمان- دما در مورد خزش پایهٔ بتن همچون خـزش در مـواد ویسکوالاسـتیک پلیمـری برقـرار است، با این تفـاوت کـه در مـورد بـتن مقـدار انـتقال افقی منحنی‌های تابع انطـباق (انعطـاف پذیـری) بـر حسـب لگاریـتم مـدت زمـان بارگـذاری، عـلاوه بـر دمـا بـه بلوغ بتن در لحظهٔ بارگذاری نیز بستگی دارد.

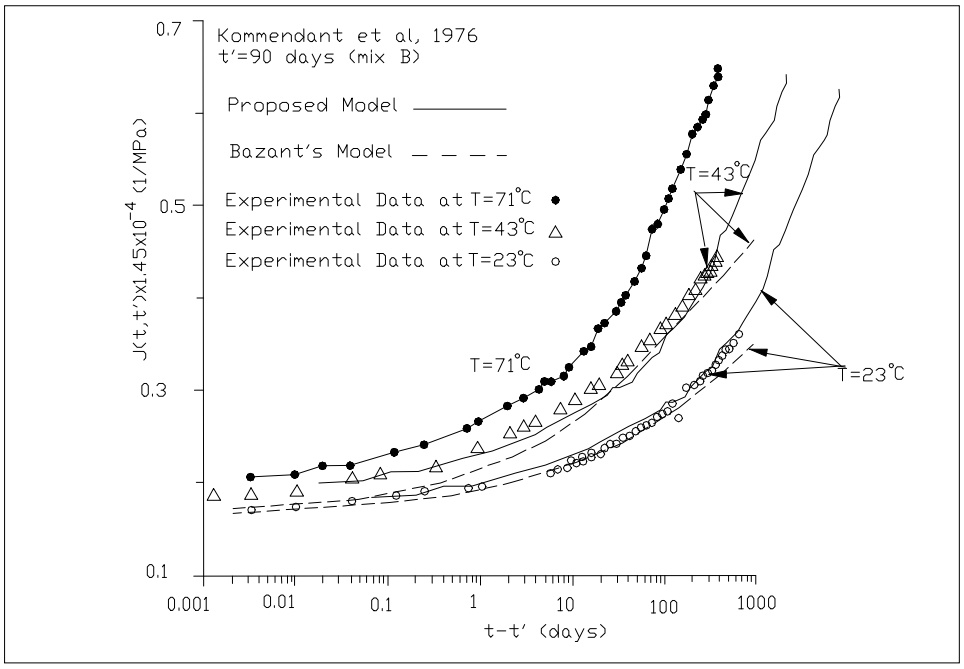
۲- افـزایش دمـا باعث می‌شود که منحنی تابع انطباق بر حسب لگاریـتم مـدت زمـان بارگـذاری به سمت چپ انتقال یابد، در صـورتی که افزایش بلوغ بتن در لحظهٔ بارگذاری، این منحنی را به سمت راست انتقال می‌دهد.

۳- مقـدار انتقال مربوط به بلوغ بتن در لحظهٔ بارگذاری به دمای نمونه بستگی داشته، به طوری که با افزایش دما مقدار این انتقال کمتر می‌شود.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]

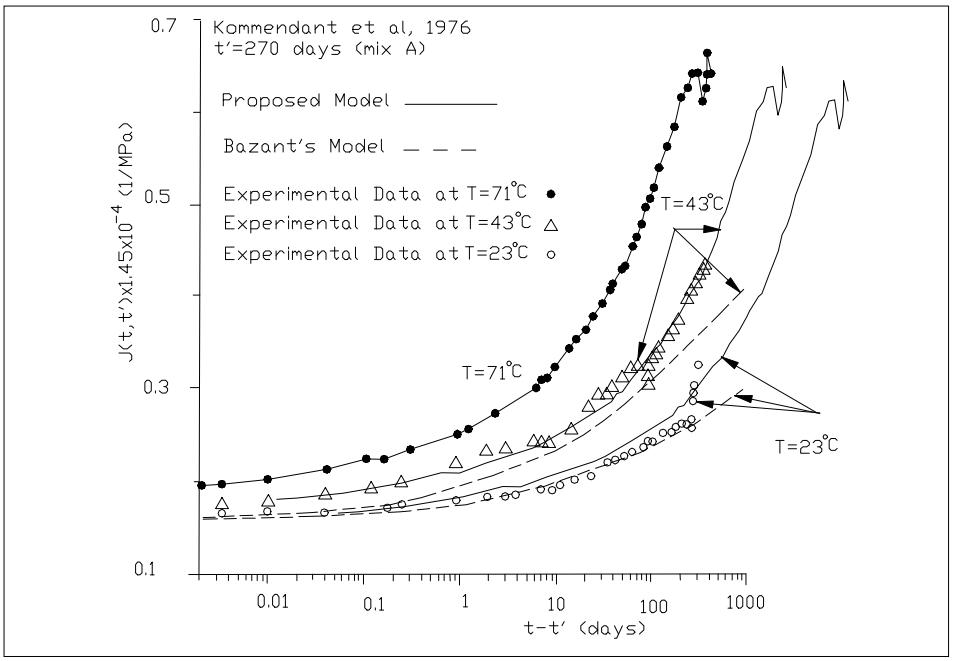


شکل۷- منحنی خزش براورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانت برای داده های کمندنت (مخلوط A به کار رفته و عمر بتن در لحظهٔ بارگذاری ۹۰ روز بوده است).

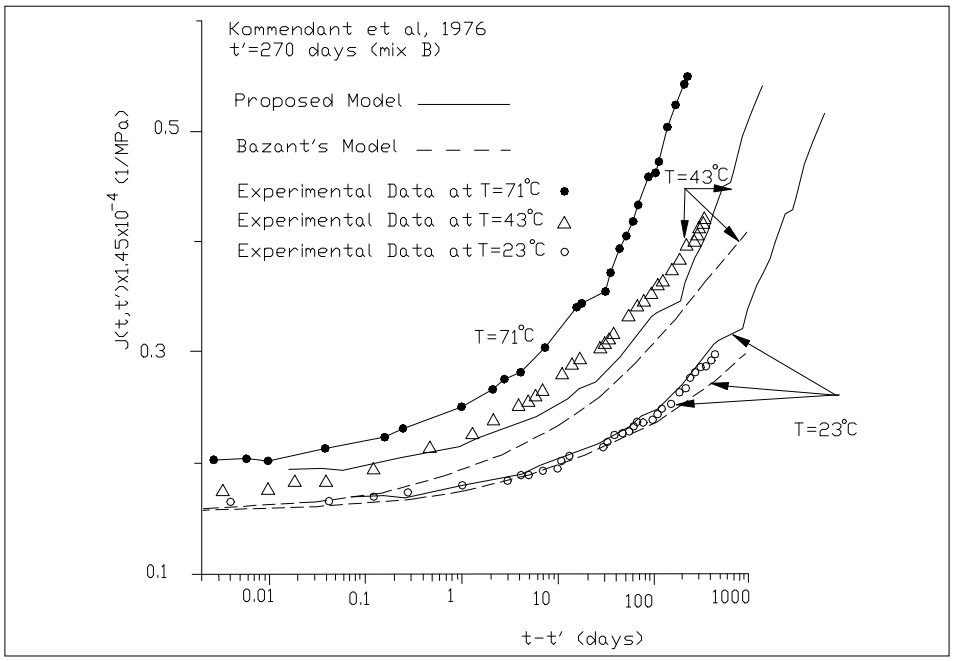


شکل۸- منحنی خزش براورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانت برای داده های کمندنت (مخلوط B به کار رفته و عمر بتن در لحظهٔ بارگذاری ۹۰ روز بوده است)

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]

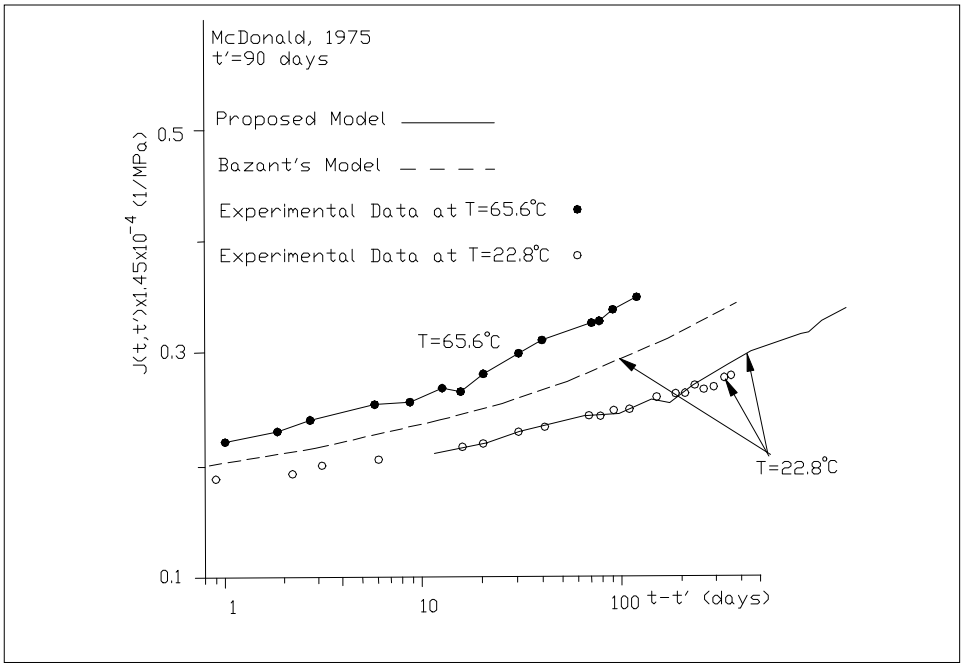


شکل۹- منحنی خزش براورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانت برای داده های کمندنت (مخلوط A به کار رفته و عمر بتن در لحظهٔ بارگذاری ۲۷۰ روز بوده است)

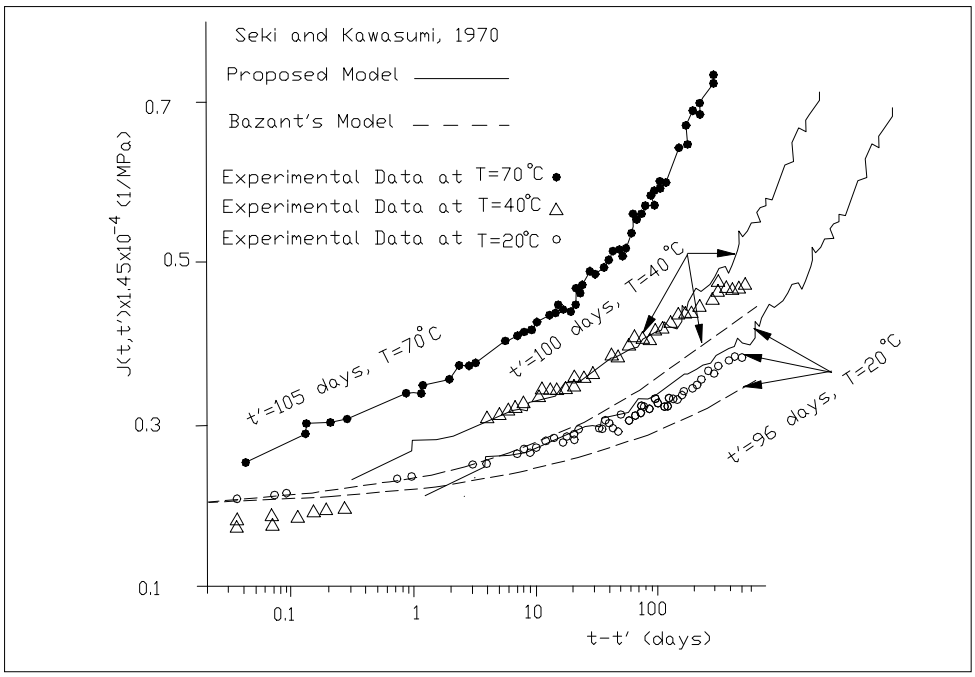


شکل۱۰- منحنی خزش براورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانت برای داده های کمندنت (مخلوط B به کار رفته و عمر بتن در لحظهٔ بارگذاری ۲۷۰ روز بوده است)

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]

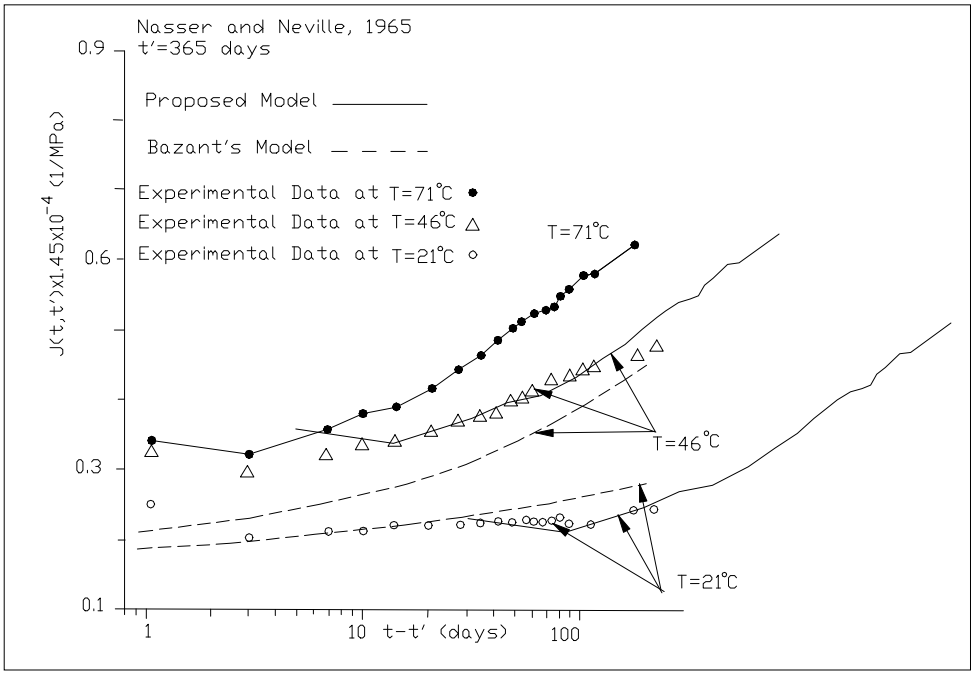


شکل۱۱- منحنی خزش براورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانت برای داده های مکدونالد (عمر بتن در لحظهٔ بارگذاری ۹۰ روز بوده است).

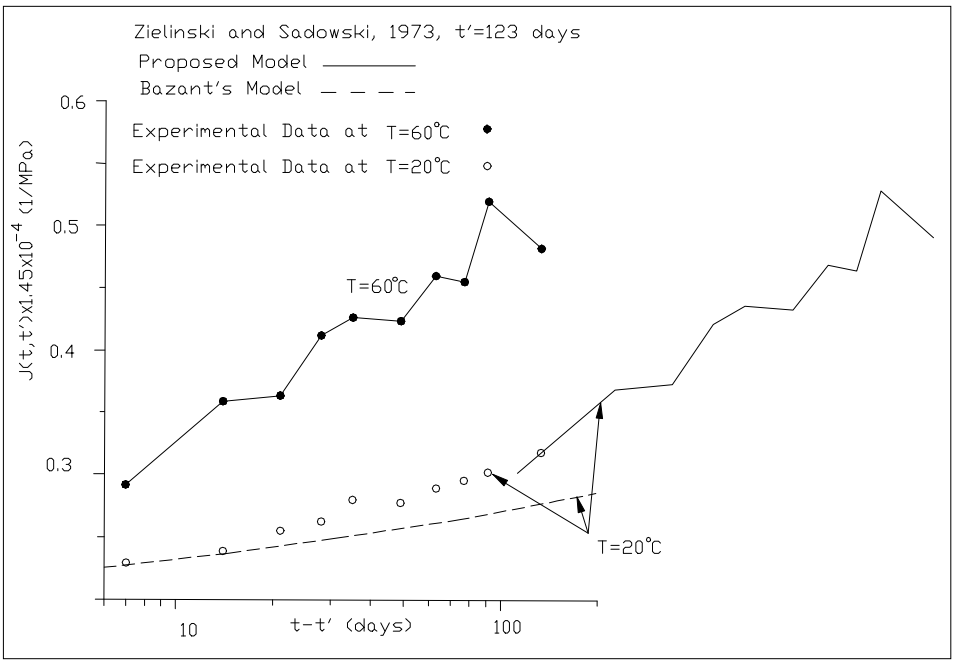


شکل۱۲- منحنی خزش براورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانت برای داده های سکی و کواسومی (عمر بتن در لحظهٔ بارگذاری ۹۶ ، ۱۰۰ و ۱۰۵ روز بوده است)

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]

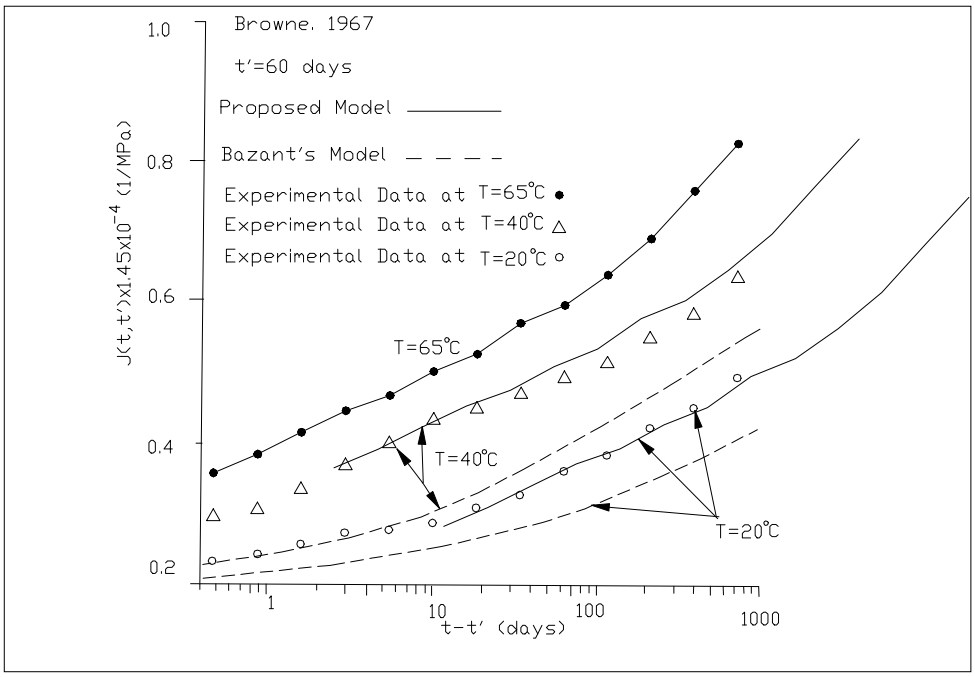


شکل۱۳- منحنی خزش براورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانت برای داده های ناصر و نویل (عمر بتن در لحظهٔ بارگذاری ۳٦۵ روز بوده است)

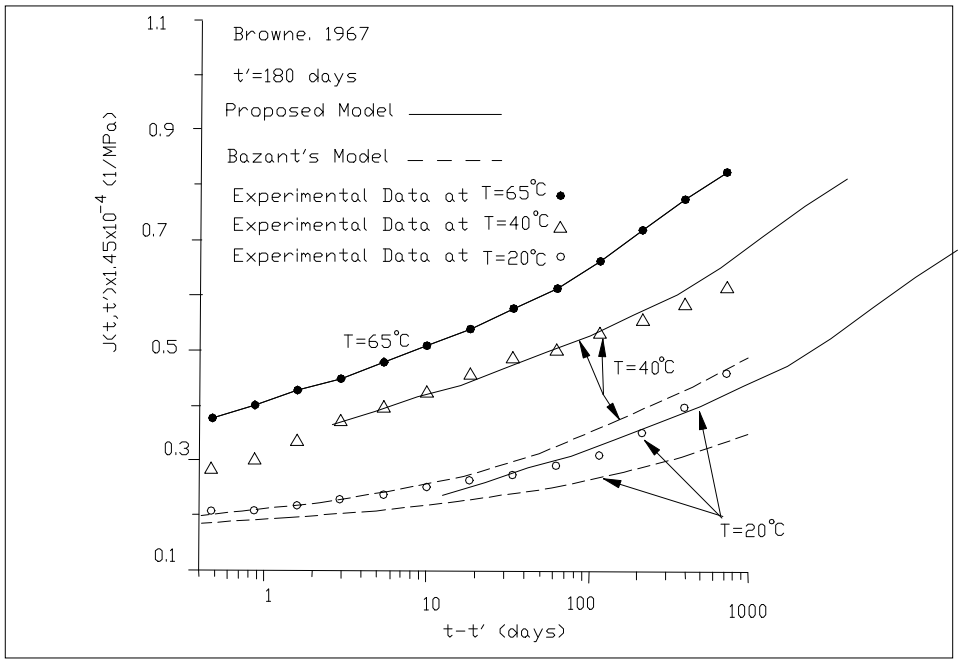


شکل۱٤- منحنی خزش براورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانت برای داده های زلینسکی و سادوسکی (عمر بتن در لحظهٔ بارگذاری ۱۲۳ روز بوده است)

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]

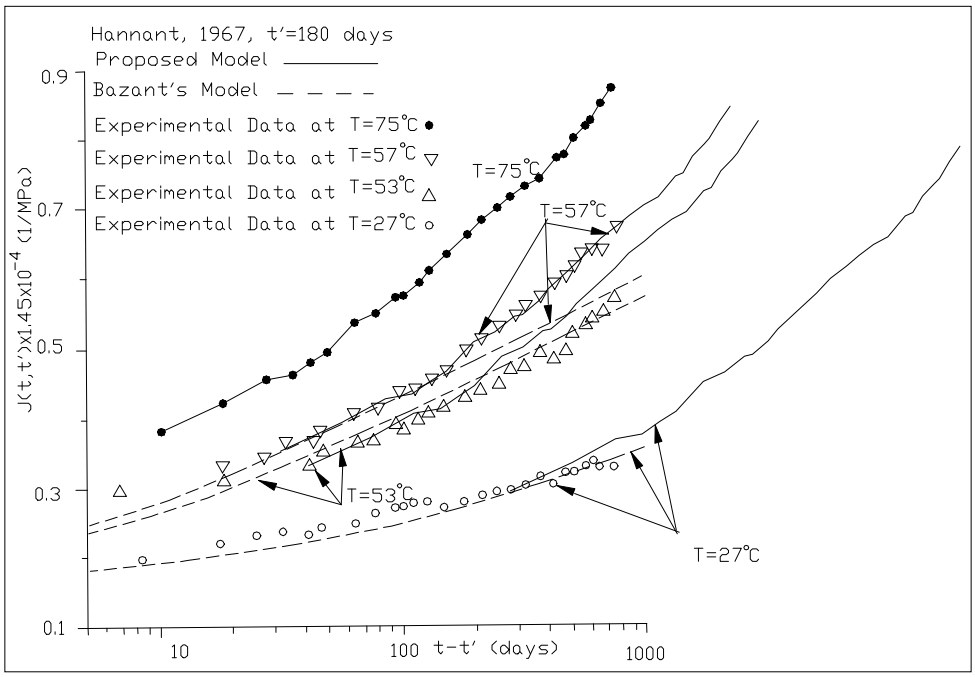


شکل۱۵- منحنی خزش براورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانت برای داده های برآون (عمر بتن در لحظهٔ بارگذاری ۶۰ روز بوده است)

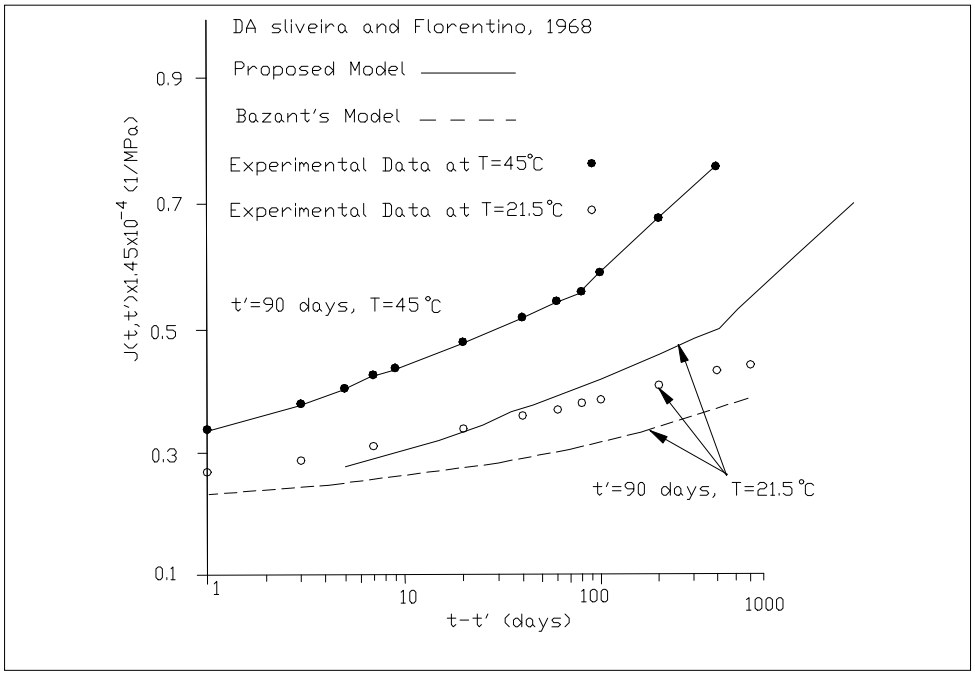


شکل۱۶- منحنی خزش براورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانت برای داده های برآون (عمر بتن در لحظهٔ بارگذاری ۱۸۰ روز بوده است)

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]

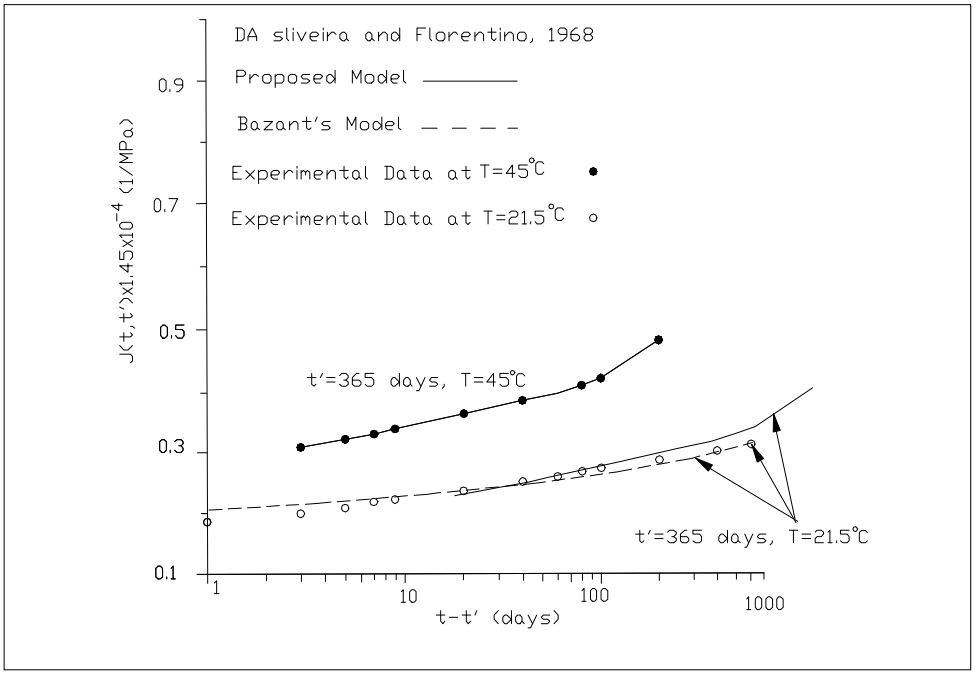


شکل۱۷- منحنی خزش براورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانت برای داده های هنانت (عمر بتن در لحظهٔ بارگذاری ۱۸۰ روز بوده است)



شکل۱۸- منحنی خزش براورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانت برای داده های دا اسلیویرا و فلورنتینو (عمر بتن در لحظهٔ بارگذاری ۹۰ روز بوده است)

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]



شکل۱۹- منحنی خزش براورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانت برای داده های دا اسلیویرا و فلورنتینو (عمر بتن در لحظهٔ بارگذاری ۳٦٥ روز بوده است)

٤- قانـون آرنـیوس به خوبی قابلیت بیان تغییر رفتار خزش پایه را بـر اثر تغییر دما در محدودهٔ دمایی ۲۰ تا ۸۰ درجهٔ سانتیگراد داراست.

٥- دقـت بـالای مدل حاضر در تخمین خزش پایهٔ بتن، نشانگر حائـز اهمـیت بـودن آزمـایش‌های کوتاه مدت در براورد خزش دراز مـدت اسـت؛ بـه طوری که با انجام آزمایش کوتاه مدت و انجـام یـک انـتقال ساده، خزش دراز مدت بتن با تقریب بسیار خوبی به‌دست می‌آید.

٦- مـدل بازانـت در مورد بتن هایی که با بلوغ بیش از ٦۰ روز در دماهـای بیشتر از دمای معمول تحت آزمایش قرار گرفته‌اند، در مـدت زمـان‌هـای زیـاد پس از بارگذاری (مثلاً ۱۰۰۰ روز)، خزش پایه را کمتر از مقدار مقدار واقعی براورد می‌کند. این در حالـی اسـت که استفاده از مدل حاضر عموماً منجر به جوابهای دسـت بالایـی مـی‌شود که به مقدار واقعی بیشتر نزدیک است. بنابـر ایـن مـی‌تـوان ایـن دو مدل را به صورت مکمل یکدیگر بـه‌کـار بـرد؛ بـه طوری که خزش پایهٔ تخمین زده شده از مدل حاضـر را حـد بالای مقدار واقعی، و خزش پایهٔ براورد شده از مدل بازانت را حد پایین مقدار واقعی قلمداد کرد.

۷- مـدل حاضر نیازی به اطلاعات مربوط به مواد تشکیل دهندهٔ بتن ندارد؛ بنابراین این روش در مواردی که اطلاعات مربوط به طرح اختلاط بتن نظیر مقدار سیمان به کار رفته و نسبت آب به سیمان وجود ندارد، یک روش دقیق برای براورد خزش پایهٔ بتن است.

واژه‌نامه

1. Modified Compliance Function

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]

مراجع

1. Bažant, Z. P., and Panula, L., "Practical Prediction of Time-Dependent Deformations of Concrete: Part 1-Shrinkage," *Materials and Structures (RILEM)*, Vol. 11, pp. 307-316, 1978.
2. Pan, L. B., Liu, P. C. and Bakoss, S. L., "Long-Term Shortening of Concerte Columns in Tall Buildings," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 119, No. 7, pp. 2258-2262, 1993.
3. Samra, R. M., "New Analysis for Creep Behavior in Concerte Columns," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, No. 3, pp. 399-407, 1995.
4. Dezi, L., Leoni, G. and Tarantino, A. M., "Algebraic Methods for Creep Analysis of Continuous Composite Beams," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 122, No. 4, pp. 423-430, 1996.
5. Neville, A. M., *Creep of Plain and Structural Concrete*, Longman Inc., New York, 1983.
6. Arthanari, S. and Yu, C. W., "Creep of Concrete under Uniaxial and Biaxial Srtesses at Elevated Temperatures," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 19, No. 60, pp. 149-156, 1967.
7. Bažant, Z. P., "Thermodynamics of Interacting Continiua with Surfaces and Creep Analysis of Concrete Structures," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 20, pp. 477-505, 1972.
8. Bažant, Z. P., "Constitutive Equation for Concrete Creep and Shrinkage Based on Thermodynamics of Multiphase Systems," *Materials and Structures (RILEM)*, Vol. 3, pp. 3-36, 1970.
9. Illston, J. M., and Sanders, P. D., "The Effect of Temperature Change upon the Creep of Mortar under Torsional Loading," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 25, No. 84, pp. 136-144, 1973.
10. Illston, J. M., and Sanders, P. D., "Characteristics and Prediction of Creep of a Saturated Mortar under Variable Temperature," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 26, No. 88, pp. 169-179, 1974.
11. Bažant, Z. P., and Thonguthal, W., "Pore Pressure and Drying of Concrete at High Temperature," *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 104, No. EM5, pp. 1059-1079, 1978.
12. Bažant, Z. P., Osman, E., and Thonguthai, W., "Practical Formulation of Shrinkage and Creep of Concrete," *Materials and Structures (RILEM)*, Vol. 9, pp. 395-406, 1978.
13. Bažant, Z. P., and Panula, L., "Practical Prediction of Time-Dependent Deformations of Concrete: Part 2-Basic Creep," *Materials and Structures (RILEM)*, Vol. 11, 317-328, 1978.
14. Bažant, Z. P., and Panula, L., "Practical Prediction of Time-Dependent Deformations of Concrete: Part 3-Drying Creep," *Materials and Structures (RILEM)*, Vol. 11, 415-424, 1978.
15. Bažant, Z. P., and Panula, L., "Practical Prediction of Time-Dependent Deformations of Concrete: Part 4-Temperature Effect on Basic Creep," *Materials and Structures (RILEM)*, Vol. 11, 424-434, 1978.
16. Bažant, Z. P., and Panula, L., "Practical Prediction of Time-Dependent Deformations of Concrete: Part 5-Temperature Effect on Drying Creep," *Materials and Structures (RILEM)*, Vol 12,pp. 169-174, 1979.
17. Bažant, Z. P., and Panula, L., "Practical Prediction of Time-Dependent Deformations of Concrete: Part 6-Cyclic Creep, Nonlinearity and Statistical Scatter," *Materials and Structures (RILEM)*, Vol 12,pp. 175-183, 1979.
18. Bažant, Z. P., and Chern, J., "Bayesian Statistical Prediction of Concrete Creep and Shrinkage," *ACI Journal*, Vol. 29, No. 81, pp. 319-330, 1984.
19. Bažant, Z. P., and Chern, J., "Stress-Induced Thermal and Shrinkage Strains in Concrete," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 113, pp. 1493-1511, 1987.
20. Bažant, Z. P., and Prasannan, W. J., "Solidification Theory for Concrete Creep:Part 1-Formulation," *Journal of Engineering Mechanics , ASCE*, Vol. 115, pp. 1691-1703, 1989.
21. Bažant, Z. P., and Prasannan, W. J., "Solidification Theory for Concrete Creep:Part 2-Verification and Application," *Journal of Engineering Mechanics , ASCE*, Vol. 115, pp. 1704-1725, 1989.
22. Bažant, Z. P., Hauggaard, A. B., Baweja, S. and Ulm, F. J., "Microprestress-Solidification Theory for Concrete Creep: Part 1-Aging and Drying Effects," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 123, pp. 1188-1194, 1997.
23. Bažant, Z. P., Hauggaard, A. B., Baweja, S. and Ulm, F. J. "Microprestress-Solidification Theory for Concrete Creep: Part 2-Algorithm and Verification," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 123, pp. 1195-1201, 1997.
24. Hauggaard, A. B., Damkilde, L. and Freiesleben Hansen, P., "Transitional Thermal Creep of Early Age Concrete," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 125, pp. 458-465, 1999.
25. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures," *ACI Manual of Concrete Practice*, Part 1, American Concrete Institute, Detroit, pp. 209 R-1-209R-92, 2000.
26. Ojdrovic, R. P., and Zarghamee, M. S., "Concrete Creep and Shrinkage Prediction from Short-Term Tests," *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 2, pp. 169-177, 1996.
27. Bažant, Z. P., and Kim, J. K., "Improved Prediction Model for Time-Dependent Deformations of Concrete: Part 2-Basic Creep," *Materials and Structures*, Vol. 24, pp. 409-421, 1991.
28. Ferry, J. D., "*Viscoelastic Properties of Polymers,*" John Wiley and Sons, 1970.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]

29. Carol, I., and Bažant, Z. P., "Viscoelasticity with Aging caused by Solidification of Nonaging Constituent," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 119, pp. 2252-2269, 1993.

۳۰. اسلامبولچی، آ، "بررسی اثرات گرما و زمان بر خواص ویسکوالاستیک لیگامانها"، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف ،پایان نامهٔ کارشناسی ارشد، ۱۳۷٤.

31. Fung, Y. C., *Biomechanics, Mechanical Properties of Living Tissues*, Springer-Verlag, 1981.
32. Bažant, Z. P. and Kim, J. K., "Improved Prediction Model for Time-Dependent Deformations of Concrete: Part 1-Shrinkage," *Materials and Structures*, Vol. 24, pp. 327-345, 1991.
33. Bažant, Z. P., and Kim, J. K., "Improved Prediction Model for Time-Dependent Deformations of Concrete: Part 3-Creep at Drying," *Materials and Structures*, Vol. 25, pp. 21-28, 1992.
34. Bažant, Z. P., and Kim, J. K., "Improved Prediction Model for Time-Dependent Deformations of Concrete: Part 4-Temperature Effects," *Materials and Structures*, Vol. 25, pp. 84-94, 1992.
35. Bažant, Z. P., and Kim, J. K., "Improved Prediction Model for Time-Dependent Deformations of Concrete: Part 5-Cyclic Load and Cyclic Humidity," *Materials and Structures*, Vol. 25, pp. 163-169, 1992.
36. Bažant, Z. P., and Osman, E., "Double Power Law for Creep of Concrete," *Materials and Structures, Research and Testing (RILEM, Paris)*, Vol. 9, no. 49, pp. 3-11, 1976.
37. Williams, M. L., Landel, R. F., and Ferry, J. D., "The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids," *Journal of American Chemical Society*, Vol. 24, pp. 3701-3707, 1955.
38. Lockett, F. J., *Engineering Design Basis for Plastics Products*, Crown Inc., London, 1982.
39. Neville, A. M., and Brooks, J. J., *Concrete Technology*, John Wiley and Sons Inc., New York, 1987.
40. Bažant, Z. P., Baweja, Xi, Y, and Carol, I., "Preliminary Guidelines and Recommenation for Characterizing Creep and Shrinkage in Structural Design Codes," *Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium*, pp. 805-829, 1993.
41. Sercombe, J., Hellmich, C., Ulm, F.-J., and Mang, H., "Modeling of Early-Age Creep of Shotcrete: Part 1-Model and Model Parameters," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 126, pp. 284-291, 2000.
42. Aker, P., and Ulm, F-J., "Creep and Shrikage of Concrete: Physical Origins and Practical Measurements," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 203, pp. 143-158, 2001.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1383.23.1.7.3]