

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

داود مستوفی نژاد\*، امید رضا بارانی\*\* و محمد مهدی سعادت پور\*\*\*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

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

**چکیده** - در این مقاله سعی شده است که ایده 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 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 گرفته است. معادله هم ارزی زمان - دما بیان می‌دارد که منحنی‌های خزش بر حسب لگاریتم مدت زمان بارگذاری در دماهای متفاوت، همگی جزئی 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 معادله هم ارزی زمان - دما صادق باشد، می‌توان خزش پایه دراز مدت را با استفاده از مقدار خزش پایه کوتاه مدت در دمای بالاتر برآورد کرد. برای ارائه مدلی که بتواند خزش پایه دراز مدت بتن را با استفاده از نتایج آزمایش کوتاه مدت خزش برآورد کند، معادله‌ای نظری برای در نظر گرفتن تأثیر دما و بلوغ بتن در لحظه 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 logarithmic time. To develop the model, an

\*\*\*\_استاد

\*\*\_کارشناس ارشد

\*\_دانشیار

*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 سازه 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 [۴]. همچنین خزش در سازه‌های نامعین علاوه بر نحوه توزیع تنشها بر مقدار آنها نیز تأثیر می‌گذارد [۵]. 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 دهنده بتن، دما، رطوبت و مقدار تنش اعمالی بستگی دارد.

تاکنون مطالعات بسیاری در مورد خزش در بتن صورت گرفته است. در سال ۱۹۶۷ 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 لحظه بارگذاری باعث کاهش سرعت خزش می‌شود. همچنین ایشان بیان داشتند که با افزایش دما مقدار کرنش برگشت پذیر در مرحله باربرداری افزایش چشمگیری پیدا نمی‌کند [۶].

مالن در سال ۱۹۶۴ و هنانت در سال ۱۹۶۸ نشان دادند که نمونه 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 گرمای و رطوبت نسبی متغیر بر اساس اصول ترمودینامیک ارائه داد. در این معادلات، خمیر سیمان و بتن به صورت یک ماده مختلط چند فازی<sup>۸</sup> در نظر گرفته شد که در آن شرایط تعادل استاتیکی و ترمودینامیکی بین حالت‌های مختلف آب موجود در خمیر سیمان برقرار است. این مطالعات نقطه 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 درجه 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 ۱۹۷۴ مدلی برای تخمین خزش بتن در دماهای مختلف ارائه دادند که در این مدل معادله‌ای برای محاسبه میزان خزش ناگهانی ناشی از افزایش دما نیز معرفی شد. همچنین آنها اظهار داشتند که بر طبق آزمایش انجام گرفته، اگر دمای نمونه بتنی قبل از بارگذاری به مدت دو روز از دمای ۲۰ به ۷۷ درجه سانتیگراد برده شود و سپس دمای نمونه به ۴۰ درجه سانتیگراد کاهش یابد و بعد از مدتی نمونه تحت آزمایش خزش قرار گیرد، وقتی دمای نمونه از ۴۰ به ۵۸ درجه سانتیگراد افزایش یابد، افزایش ناگهانی در مقدار خزش مشاهده نمی‌شود؛ در صورتی که وقتی دمای نمونه ضمن بارگذاری از ۵۸ به ۷۶

درجه سانتیگراد افزایش یابد، یک افزایش ناگهانی در خزش به وجود می‌آید [۱۰]. این محققان دلیلی برای توجیه این مسئله ارائه ندادند.

در سال ۱۹۷۸، بازانت و تنگوتال نشان دادند که تا دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد، سرعت حرکت آب در ریز حفره‌های موجود در خمیر سیمان سخت شده مطابق با قانون آرنیوس (معادله ۲۴) که بعداً توضیح داده خواهد شد، تابعی از انرژی فعال سازی لازم برای حرکت آب در ریزحفره‌ها است؛ در صورتی که در دماهای بیشتر از ۱۰۵ درجه سانتیگراد، سرعت حرکت آب در ریز حفره‌ها از قانون آرنیوس تبعیت نمی‌کند؛ بلکه تابعی از لزجت بخار آب و یا آب مایع بوده و نسبت به افزایش دما تغییرات ناچیزی دارد [۱۱].

در سال ۱۹۷۶ بازانت و همکاران یک مدل ریاضی برای خزش بتن ارائه دادند [۱۲]. با توسعه آن در سال ۱۹۷۸ و ۱۹۷۹ بازانت و پانلا مدل ریاضی BP-KX را ارائه کردند. در این مدل معادلاتی ریاضی برای تعیین خزش و جمع شدگی پیشنهاد شد و میزان دقت آن در تخمین رفتار بتن توسط مقایسه با نتایج آزمایشگاهی محققان مختلف مورد بررسی قرار گرفت [۱ و ۱۳-۱۷]. در این مدل اثر دما بر خزش پایه (خزش بتن عایق بندی شده توسط مواد عایق رطوبت) برای سطوح دمایی مختلف، با فرض ثابت بودن دما در طول بارگذاری ارائه شد. این مدل اثر دما بر خزش پایه را در شرایط متغیر بودن دما ضمن بارگذاری در نظر نمی‌گرفت. ایشان بیان کردند با توجه به استفاده از مفهوم انرژی فعال‌سازی برای مدل کردن اثر دما بر سرعت هیدراسیون، مدل آنها برای سطوح دما بین ۳۵ تا ۷۵ درجه سانتیگراد صادق بوده، لیکن برای سطوح دمای بین ۲۰- تا ۱۲۰ درجه سانتیگراد به طور تقریبی به کار رود؛ هرچند برای دمای بیش از ۹۵ درجه سانتیگراد ممکن است این مدل اختلاف زیادی با نتایج آزمایشگاهی داشته باشد.

در سال ۱۹۸۴ بازانت و چرن نشان دادند که انجام اندازه‌گیری‌های کوتاه مدت خزش و جمع شدگی و برون‌یابی آنها برای زمان‌های طولانی برای تخمین خزش و جمع شدگی

سازه‌های مهم، بسیار مناسب است. ایشان همچنین ابراز داشتند که تخمین خزش فقط بر اساس اطلاعات مربوط به مواد تشکیل دهنده مخلوط بتن، منجر به خطاهای نسبتاً زیادی می‌شود [۱۸].

در سال ۱۹۸۷ بازانت و چرن مدلی برای بیان افزایش قابل ملاحظه خزش بتن بر اثر تغییر دمای بتن حین بارگذاری ارائه دادند. در این مقاله تصریح شد که هم افزایش و هم کاهش دما باعث افزایش خزش می‌شود و دلیل دیگر افزایش خزش بر اثر تغییرات رطوبت و یا تغییرات دما، ایجاد ترکهای کششی در بتن است [۱۹]. بازانت و پرستان<sup>۶</sup> در سال ۱۹۸۹ اثر جمع شدگی و هیدراسیون سیمان بر خزش بتن را توسط ضرایب تصحیح تجربی بیان کردند و مدلی تحت عنوان نظریه انجماد<sup>۷</sup> برای بیان اثر هیدراسیون بر خزش بتن ارائه دادند و هیدراسیون را به صورت افزایش 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 سال ۱۹۹۷ بازانت و همکاران نظری ریز پیش تنش را برای مدل کردن اثرات جمع شدگی و سخت شدن بتن در طول زمان بر خزش درازمدت ارائه کردند. در این مدل، مفهوم جدیدی به نام ریز پیش تنش کششی ارائه شد که بیانگر پیوندهای موجود بین دیواره‌های ریزحفره‌های ژل سیمان سخت شده است و در مقابله با فشار آب موجود در ریزحفره‌ها و فشار ناشی از رشد بلورهای جامد در اثر هیدراسیون که تمایل دارند فضای ریز حفره را بیشتر کنند، به وجود می‌آید. با شکسته شدن و تشکیل مجدد این پیوندها خزش درازمدت به صورت ویسکوز به وقوع می‌پیوندد. در این مدل اثر خزش خشک شدگی (اثر پیکت) به این صورت توجیه می‌شود که تغییرات رطوبت نسبی باعث تغییر فشار آب جذب شده بین ریزحفره‌ها و در نتیجه تغییرات ریز پیش تنشها و ایجاد خزش می‌شود. این فرضیه که جدیدترین نظریه در مورد خزش و جمع شدگی خمیر سیمان است، قادر به توجیه تعداد زیادی از رفتارهای خزش در بتن است که تاکنون توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است [۲۲ و ۲۳].

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 [۲۴].

خزش بتن بر اثر حرکت آب، فرایندهای شیمیایی و تغییر مکان ذرات ژل در خمیر سخت شده سیمان به وجود می آید [۲۵]. عوامل بسیاری بر مقدار خزش بتن تأثیر می گذارند. هیدراسیون خمیر سیمان باعث افزایش ضریب کشسانی بتن و در نتیجه کاهش سرعت خزش در آن می شود. از طرفی گرمای ناشی از هیدراسیون بر خزش بتن اثر می گذارد. افزایش دما از یک سو سبب افزایش سرعت هیدراسیون و کاهش سرعت خزش می شود و از طرف دیگر باعث کاهش لزجت بتن و در نتیجه افزایش خزش می شود. همچنین بلوغ بتن در لحظه بارگذاری بر مقدار خزش تأثیر می گذارد.

دخیل بودن عوامل متعدد بر خزش بتن باعث شده است که برآورد مقدار آن در مدت زمان‌های طولانی امری پیچیده و بغرنج تلقی شود. به دلیل عدم دقت مدل‌های موجود، برآورد قابل قبولی از کرنش‌های حاصل از خزش نمی توان 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 برآورد دقیق خزش بتن به نظر می رسد [۲۵ و ۲۶]. از آنجا که دما باعث تسریع فرایندهای دخیل در خزش بتن می شود، منطقی به نظر می رسد 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 می شود که ایده انجام آزمایش‌های کوتاه مدت و تسریع فرایندها بر اثر افزایش دما را با یکدیگر ترکیب کرد و روشی جدید برای تخمین خزش پایه 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 می رود، در مورد بتن مورد ارزیابی قرار می گیرد. معادله هم ارزی زمان-دما بیان می دارد که منحنی‌های خزش بر حسب لگاریتم مدت زمان بارگذاری در دماهای متفاوت همگی جزئی از یک منحنی مادرند و با یک انتقال افقی که مقدار آن به دمای نمونه بستگی دارد، می توان این منحنی‌ها را بر منحنی مادر منطبق کرد. این خصوصیت باعث می شود 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 معادله هم ارزی زمان-دما صادق باشد، می توان خزش پایه دراز مدت را با استفاده از مقدار خزش پایه کوتاه مدت در دمای بالاتر برآورد کرد.

برای ارائه مدلی که بتواند خزش پایه دراز مدت بتن را با استفاده از نتایج آزمایش کوتاه مدت خزش برآورد کند، معادله‌ای نظری برای در نظر گرفتن تأثیر دما و بلوغ بتن در لحظه بارگذاری ارائه شده و پارامترهای آن توسط ۷۵ درصد از داده‌های آزمایشگاهی موجود برآورد شده است. برای بهبود مدل، معادلات مختلفی برای برآورد 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 بازانته که از کاملترین مدل‌های موجود برای تخمین خزش بتن است، مقایسه شده است.

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

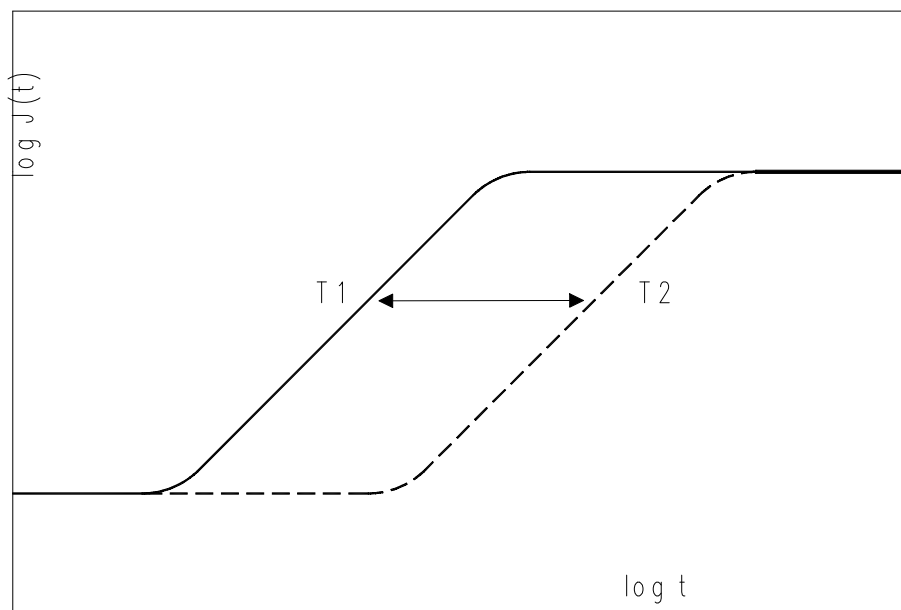
### ۳-۱- خزش در مواد ویسکوالاستیک

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 اندازه 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 ساده‌ترین شکل هم ارزی زمان-دما 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 شده 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 کلونین) و چگالی  $\rho$  به دمای مرجع  $T_0$  (بر حسب درجه کلونین) و چگالی  $\rho_0$  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 معادله 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 معادله هم ارزی زمان-دما در

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 پدیده 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 ماده ناهمگن است و وقتی که مسلح باشد، یک ماده 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 ناکشسان) 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 مؤلفه 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 نمونه بتنی که در آب نگهداری می‌شود، به شرط قابل صرف نظر بودن اتساع نمونه در مقایسه با خزش ایجاد شده در آن، به عنوان خزش پایه شناخته می‌شود [۵].



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

معادله (۱)،  $E_0$ ،  $\phi_1$ ،  $m$  و  $n$  چهار پارامترند که مقادیر آن برای آزمایش‌های گوناگون انجام گرفته توسط محققان مختلف، متفاوت بوده و در مرجع [۳۶] 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 معادله (۱) وقتی که  $t'$  به سمت بی نهایت میل می‌کند، مقدار خزش پایه را صفر برآورد می‌کند، بازانت و پانلا در سال ۱۹۷۸ معادله زیر را برای تابع انطباق خزش پایه پیشنهاد کردند [۱۳]:

$$J(t, t') = \frac{1}{E_0} + \frac{\phi_1}{E_0} (t')^{(-m)} + \alpha (t - t')^n \quad (2)$$

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:

$$\phi_1 = \frac{10^{3n}}{2(28^{-m} + \alpha)} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{1}{40w/c} \quad (4)$$

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 ۱۹۷۶ معادله (۱) را برای تخمین تابع انطباق خزش پایه پیشنهاد کردند که تطابق خوبی نسبت به نتایج آزمایشگاهی مختلف داشت [۳۶]:

$$J(t, t') = \frac{1}{E_0} + \frac{\phi_1}{E_0} t'^{(-m)} (t - t')^n \quad (1)$$

در این معادله  $t'$  عمر بتن در لحظه 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

شده‌اند.  $t'_e$  مبین بلوغ و یا زمان هیدراسیون معادل بتن در لحظه بارگذاری است. عدد ۴۰۰۰ درجه‌کلون در معادله (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 محدوده دمایی بین ۳۵ تا ۷۵ درجه سانتیگراد صادق است. در دماهای بیشتر از ۷۵ درجه 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 معادله ساده از مفهوم انرژی فعال سازی به دست آورد [۱۳-۱۷]. بازانت و پانلا به طور تجربی معادله زیر را برای  $C_T$  در محدوده دمایی بین ۲۰- و ۱۲۰ درجه سانتیگراد پیشنهاد کردند:

$$C_T = c_T \tau_T c_0 \quad (14)$$

$$c_T = \frac{19.4}{1 + [100/(T - 253.2)]^{3.5}} - 1 \quad (15)$$

$$\tau_T = \frac{1}{1 + 60/t'_T{}^{0.69}} + 0.78 \quad (16)$$

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 محدوده دمایی بین ۲۰- تا ۱۴۰ درجه سانتیگراد، تابع زیر را برای محاسبه آن ارائه کردند:

$$n_T = B_T n \quad (17)$$

$$B_T = \frac{0.25}{1 + (74/(T - 253.2))^7} + 1 \quad (18)$$

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

$$c_0 = \frac{1}{8} (w/c)^2 (a/c) a_1 \quad (19)$$

$$m = 0.28 + \frac{47.541}{(f'_c)^2} \quad (5)$$

$$x = [2.1 \frac{a/c}{(s/c)^{1.4}} + \frac{1}{181} (f'_c)^{1.5}] \quad (6)$$

$$(w/c)^{1/3} (a/g)^{2.2} a_1 - 4$$

$$n = 0.12 + \frac{0.07x^6}{5130 + x^6} \quad \text{برای } x > 0 \quad (7)$$

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

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:

$$\frac{1}{E_0} = 1.305 \times 10^{-5} + \frac{1}{11724z_1^2} \quad \text{بر حسب } 1/\text{MPa} \quad (8)$$

$$z_1 = 0.088587 \rho^2 f'_c \quad (9)$$

در معادله بالا  $\rho$  جرم واحد حجم بتن بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب و  $f'_c$  مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای بر حسب MPa است.

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

$$J(t, t') = \frac{1}{E_0} + \frac{\phi_T}{E_0} (t'_e)^{(-m)} + \alpha (t - t')^{n_T} \quad (10)$$

$$t'_e = \int_0^t \beta_T(t'') dt'' \quad (11)$$

$$\beta_T = \exp\left(\frac{4000}{T_0} - \frac{4000}{T}\right) \quad (12)$$

$$\phi_T = \phi_1 (1 + C_T) \quad (13)$$

در این معادلات  $C_T$ ،  $n_T$  و  $\beta_T$  تابعی از دما،  $T$  و  $T_0$  دما بر حسب کلون و  $\phi_1$  و  $\alpha$  توسط معادلات (۳) و (۴) تعریف

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  $0.93$ ، و برای سیمان تیپ چهار برابر  $1/0.5$  می‌باشد [۱۳-۱۷].

#### ۴- ارائه مدلی برای تخمین خزش پایه بتن با استفاده از آزمایش‌های کوتاه مدت

۴-۱- تاریخچه معادله هم ارزی زمان-دما برای خزش پایه بتن ارائه 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 ارائه معادله‌ای با عنوان معادله هم ارزی زمان-دما، برای انتقال منحنی خزش در یک دما بر روی منحنی مادر، اظهار داشتند در دماهایی که ویسکوزیته 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]. معادله هم ارزی زمان-دما در مواد پلیمری کاربرد زیادی داشته و از آن برای تخمین خزش یک ماده 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 معادله هم ارزی زمان-دما تناقضی با این معادلات ندارد. وی معادله مشخصی برای این موضوع ارائه نکرد؛ ولی مقدار انتقال دو منحنی در دماهای  $T$  و  $T_0$  را به صورت تابعی از  $(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})$  پیشنهاد کرد [۸].

#### ۴-۲- داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده

در این تحقیق برای بررسی معادله هم ارزی زمان-دما از داده‌های آزمایشگاهی محققان زیر استفاده شده است [۳۴]:

۱- آرتاناری و یو؛ نمونه‌های این محققان عبارت است از مکعب مستطیلهای بتنی به ابعاد  $10/2 \times 30/5 \times 30/5$  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 لحظه بارگذاری مساوی ۱۵ روز بوده و گرمایش نمونه‌ها از یک روز قبل از بارگذاری شروع شده است. مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه مکعبی مساوی با  $41/4 \text{ MPa}$  بوده و از سیمان پرتلند تیپ یک، و درشت دانه‌های به قطر  $4/76$  الی  $9/5$  سانتیمتر استفاده شده است. آب، سیمان، ماسه و درشت دانه به نسبت  $0.564$ ،  $1$ ،  $1/125$  و  $2/625$  انتخاب شده و تنش فشاری اعمال شده برابر با  $6/9$  مگا پاسکال گزارش شده است.

۲- برآون؛ نمونه‌های این محقق عبارت است از استوانه‌های بتنی به ابعاد  $10/2 \times 30/5$  سانتیمتر که در پوششهای پلی پروپیلن به ضخامت  $1/6$  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 روزه نمونه استوانه‌ای برابر  $50 \text{ MPa}$  بوده و از سیمان پرتلند تیپ یک، و به مقدار  $418$  کیلوگرم در یک متر مکعب بتن استفاده شده است. آب، سیمان، ماسه و درشت دانه به نسبت  $0.42$ ،  $1$ ،  $1/45$  و  $2/95$  انتخاب شده و تنش فشاری اعمال شده مساوی  $14/6$  مگا پاسکال گزارش شده است.

۳- داسیلویرا و فلورنتینو؛ نمونه‌های این محققان عبارت است از مکعب مستطیلهای بتنی به ابعاد  $60 \times 20 \times 20$  سانتیمتر که در پوششهای مسی عایق بندی شده است. گرمایش نمونه‌ها از سه روز قبل از بارگذاری شروع شده است. مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه مکعبی برابر  $29/1 \text{ MPa}$  بوده و از سیمان پرتلند تیپ دو استفاده شده است. اختلاط آب، سیمان، ماسه و درشت دانه به نسبت  $0.5$ ،  $1$ ،  $2/35$  و  $3/84$  گزارش شده است.

۴- کمندنت و همکاران؛ نمونه‌های این محققان عبارت است از استوانه‌های بتنی به ابعاد  $10/2 \times 30/5$  سانتیمتر که در پوشش‌هایی از جنس بوتیل عایق بندی گردیده و در دمای  $23$  درجه سانتیگراد عمل آوری شده است. گرمایش نمونه‌ها از پنج



روز قبل از بارگذاری و با نرخ  $13/3$  درجه سانتیگراد در روز، آغاز شده است. مقاومت فشاری  $28$  روزه نمونه استوانه‌ای برای مخلوط اول برابر  $45/4$  MPa، و برای مخلوط دوم مساوی  $46/2$  MPa بوده و از سیمان پرتلند تیپ دو و به مقدار  $419$  کیلوگرم در یک متر مکعب بتن استفاده شده است. حداکثر اندازه درشت دانه برابر  $38/1$  میلیمتر بوده و تنش فشاری اعمال شده مساوی  $32$  درصد مقاومت فشاری  $28$  روزه نمونه استوانه‌ای گزارش شده است.

۵- مکدونالد؛ نمونه‌های این محقق عبارت است از استوانه‌های بتنی به ابعاد  $15/2 \times 40/6$  سانتیمتر که پس از  $24$  ساعت از قالب خارج شده و بعد از  $24$  ساعت قرارگیری در اتاق مه، توسط یک لایه اپوکسی و پوشش مسی عایق بندی شده است. پس از  $83$  روز، پوشش اپوکسی برداشته شده و عایق بندی توسط نئوپرن انجام گرفته و نمونه‌ها در دمای مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. مقاومت فشاری  $28$  روزه نمونه استوانه‌ای برابر  $43/4$  MPa بوده و از سیمان پرتلند تیپ دو و به مقدار  $404$  کیلوگرم در یک متر مکعب بتن استفاده شده است. حداکثر اندازه درشت دانه برابر  $19$  میلیمتر بوده و آب، سیمان، ماسه و درشت دانه به نسبت  $0/425$ ،  $1$ ،  $2/03$  و  $2/62$  به کار گرفته شده است. تنش فشاری اعمال شده مساوی  $4/1$  و  $16/6$  مگا پاسکال گزارش شده است.

۶- ناصر و نویل؛ نمونه‌های این محققان عبارت است از استوانه‌های بتنی به ابعاد  $7/6 \times 23/5$  سانتیمتر که توسط پوششی از پلی پروپیلن عایق بندی گردیده و پس از  $24$  ساعت در آبی که دمای آن برابر با دمای آزمایش، قرار داده شده است. بارگذاری نمونه‌ها در عمر  $14$  روزه انجام شده است. مقاومت فشاری  $14$  روزه نمونه استوانه‌ای برابر  $39$  MPa بوده و از سیمان پرتلند تیپ سه و به مقدار  $320$  کیلوگرم در یک متر مکعب بتن استفاده شده است. حداکثر اندازه درشت دانه برابر  $19$  میلیمتر بوده و آب، سیمان و سنگدانه به نسبت  $0/6$ ،  $1$  و  $7/15$  مخلوط شده است. تنش فشاری اعمال شده مساوی  $13/4$  مگا پاسکال گزارش شده است.

۷- ناصر و نویل؛ نمونه‌های این محققان عبارت است از استوانه‌های بتنی به ابعاد  $7/6 \times 23/5$  سانتیمتر که در آب با دمای  $21$  درجه سانتیگراد تا یک هفته قبل از بارگذاری قرار داده شده است. بارگذاری نمونه‌ها در عمر  $365$  روزه انجام شده و نمونه‌ها ضمن بارگذاری در آب قرار داشته‌اند. مقاومت فشاری  $365$  روزه نمونه استوانه‌ای  $50$  MPa بوده و از سیمان پرتلند تیپ سه و به مقدار  $320$  کیلوگرم در یک متر مکعب بتن استفاده شده است. حداکثر اندازه درشت دانه برابر  $19$  میلیمتر بوده و آب، سیمان و سنگدانه به نسبت  $0/6$ ،  $1$  و  $7/15$  مخلوط شده است. نسبت تنش فشاری اعمال شده به مقاومت فشاری یک ساله برابر  $0/45$  گزارش شده است.

۸- هنانت؛ نمونه‌های این محقق عبارت است از استوانه‌های بتنی به ابعاد  $15/2 \times 30/5$  سانتیمتر که به مدت  $5$  ماه در آب با دمای  $20$  درجه 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  $10$  درجه سانتیگراد در ساعت بوده است. مقاومت فشاری  $28$  روزه نمونه مکعبی برابر  $64/5$  MPa بوده و از سیمان پرتلند تیپ پنج، و درشت دانه با قطر حداکثر برابر  $19$  میلیمتر، استفاده شده است. اختلاط آب، سیمان، ماسه و درشت دانه به نسبت  $0/47$ ،  $1$ ،  $1/845$  و  $2/655$  بوده و تنش فشاری اعمال شده  $13/8$  مگا پاسکال گزارش شده است.

۹- سکی و کواسومی؛ نمونه‌های این محققان عبارت است از استوانه‌های بتنی به ابعاد  $15 \times 60$  سانتیمتر که در پوششهای مسی ریخته شده و در دمای  $20$  درجه سانتیگراد عمل آوری شده است. دمای  $40$  درجه سانتیگراد در سنین  $28$  روز و  $97$  روز اعمال شده و در سن  $29$  روزه و  $100$  روزه بارگذاری انجام گرفته است. همچنین دمای  $70$  درجه سانتیگراد در سنین  $27$  روز و  $104$  روز اعمال شده و در سن  $29$  روزه و  $105$  روزه بارگذاری انجام گرفته است. مقاومت فشاری  $28$  روزه نمونه استوانه‌ای برابر  $31/5$  MPa بوده و از سیمان پرتلند تیپ یک و به مقدار  $343$  کیلوگرم در یک متر مکعب بتن

استفاده شده است. همچنین به میزان ۲۵ در صد وزنی سیمان، پوزولان به مخلوط اضافه شده است. حداکثر اندازه درشت دانه برابر ۴۰ میلیمتر بوده و آب، سیمان، ماسه و درشت دانه به نسبت ۰/۴، ۱، ۱/۷۶۱ و ۳/۸۳۴ مخلوط شده‌اند. تنش فشاری اعمال شده مساوی ۸/۸ مگا پاسکال گزارش شده است.

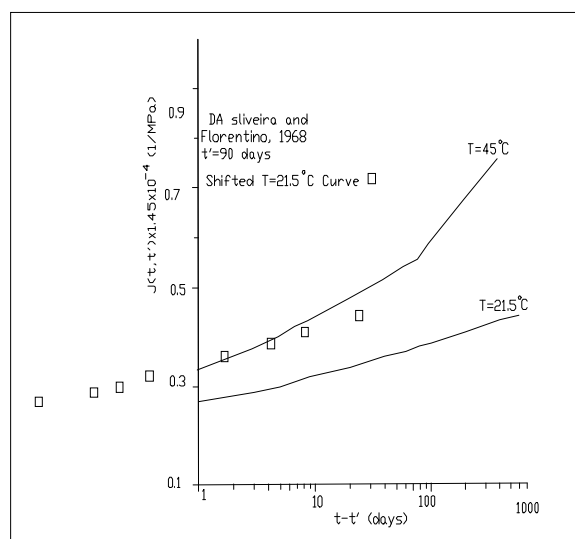
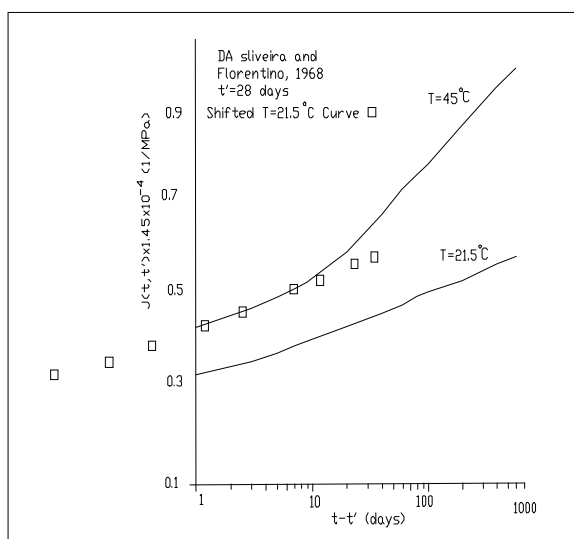
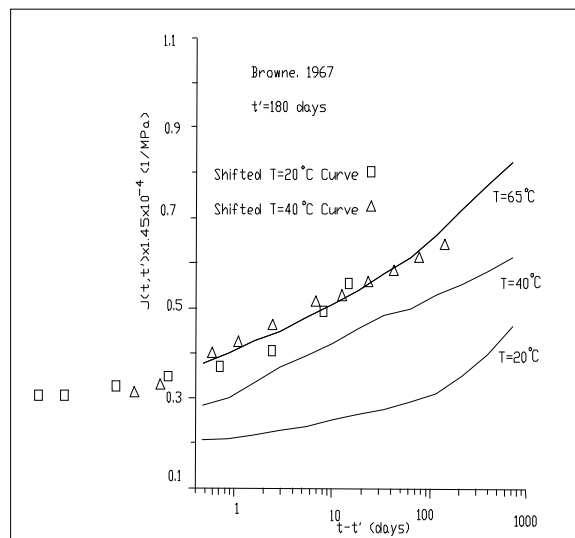
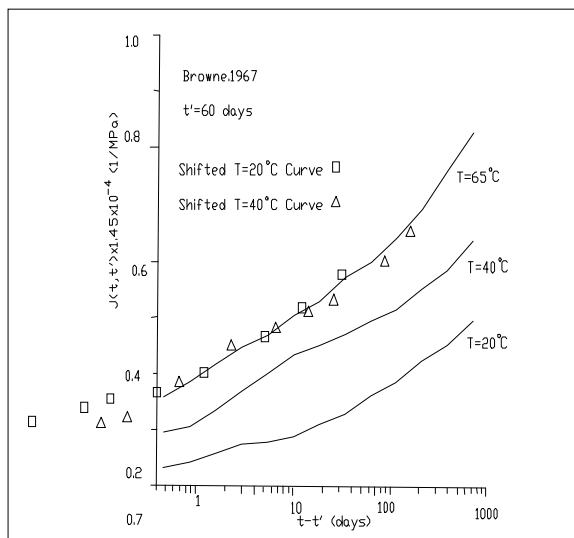
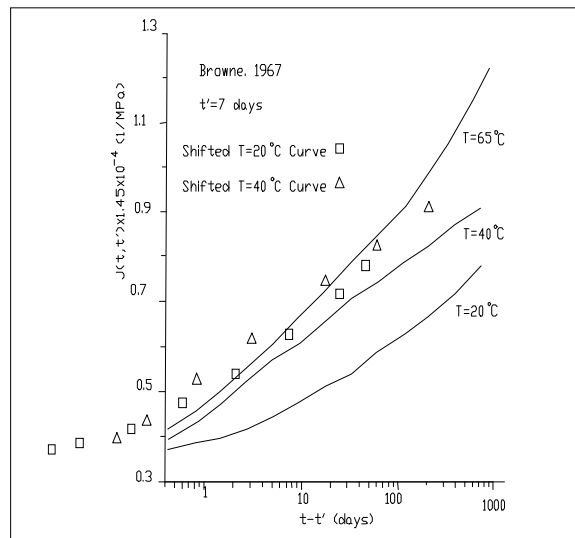
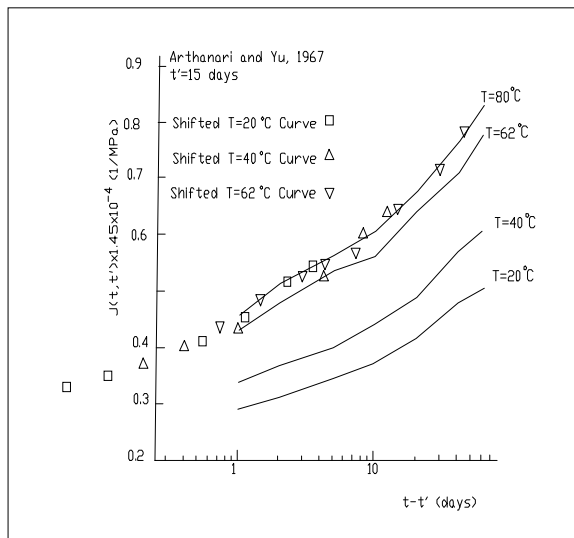
۱۰- یورک و همکاران؛ نمونه‌های این محققان عبارت است از استوانه‌های بتنی به ابعاد  $۱۵/۲ \times ۴۰/۶$  سانتیمتر که پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده است و بعد از عایق بندی توسط یک لایه اپوکسی به مدت ۲۴ ساعت در اتاق مه قرار گرفته و سپس توسط یک پوشش مسی عایق بندی شده و به مدت ۸۱ روز در دمای ۲۴ درجه سانتیگراد 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 روزه نمونه استوانه‌ای  $۴۴/۶ \text{ MPa}$  بوده و از سیمان پرتلند تیپ دو و به مقدار ۴۰۴ کیلوگرم در یک متر مکعب بتن استفاده شده است. حداکثر اندازه درشت دانه برابر ۱۹ میلیمتر بوده و آب، سیمان، ماسه و درشت دانه به نسبت ۰/۴۲۵، ۱، ۲/۰۳ و ۲/۶۲ مخلوط شده‌اند. تنش فشاری اعمال شده مساوی ۴/۱ و ۱۶/۶ مگا پاسکال گزارش شده است.

۱۱- زیلینسکی و سادوسکی؛ نمونه‌های این محققان عبارت است از استوانه‌های بتنی به ابعاد  $۱۶ \times ۴۸$  سانتیمتر که تا ۷۰ روز در رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد و دمای ۲۰ الی ۲۳ درجه سانتیگراد نگهداری شده و سپس توسط یک پوشش لاستیکی عایق بندی شده است. در سن ۱۲۰ روزه، نمونه‌ها در دمای آزمایش قرار گرفته‌اند و در سن ۱۲۳ روزه بارگذاری شده‌اند. مقاومت فشاری ۱۲۰ روزه نمونه استوانه‌ای  $۴۲/۲ \text{ MPa}$  بوده و از سیمان پرتلند تیپ یک و به مقدار ۴۵۰ کیلوگرم در یک متر مکعب بتن استفاده شده است. حداکثر اندازه درشت دانه برابر ۲۰ میلیمتر بوده و آب، سیمان و سنگدانه به نسبت ۰/۴، ۱ و  $۴/۱۵۴$  مخلوط شده‌اند. تنش فشاری اعمال شده ۱۴/۷ مگا پاسکال گزارش شده است.

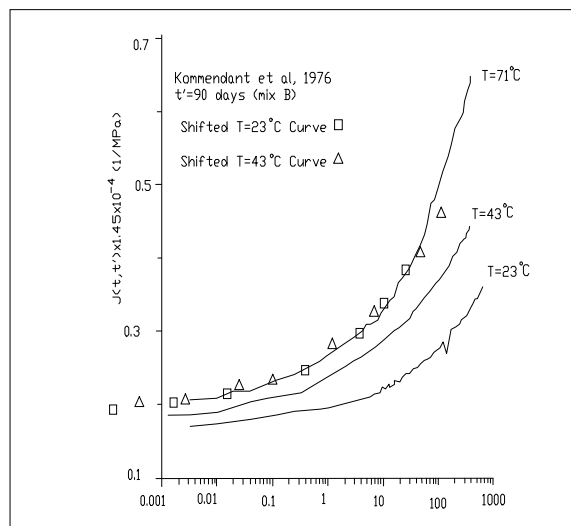
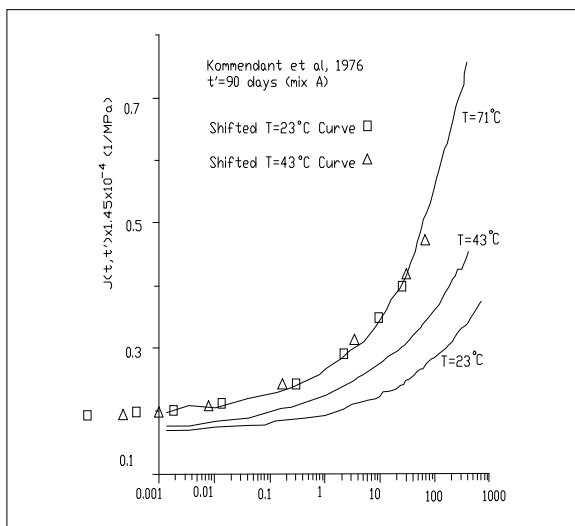
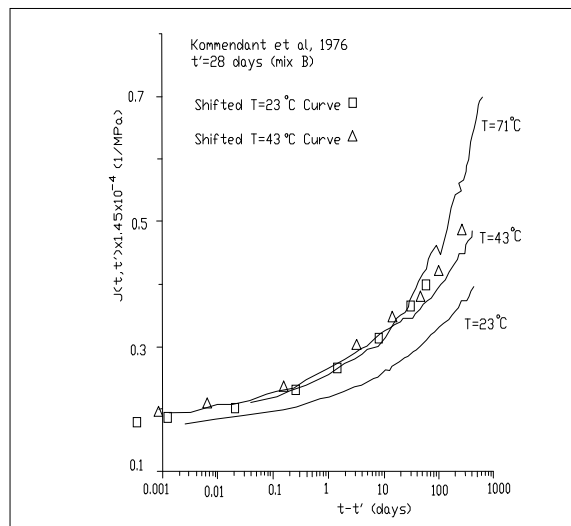
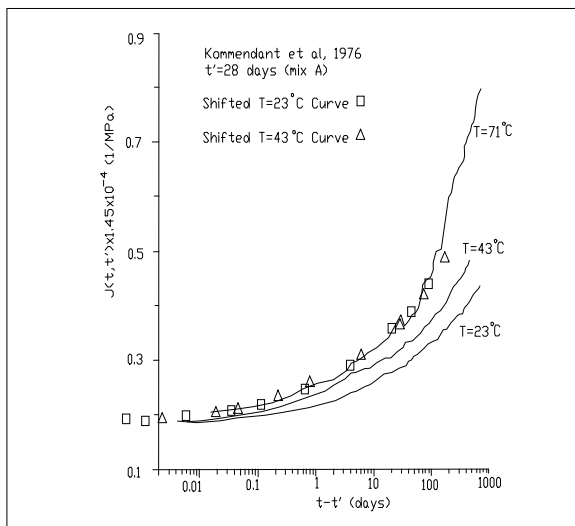
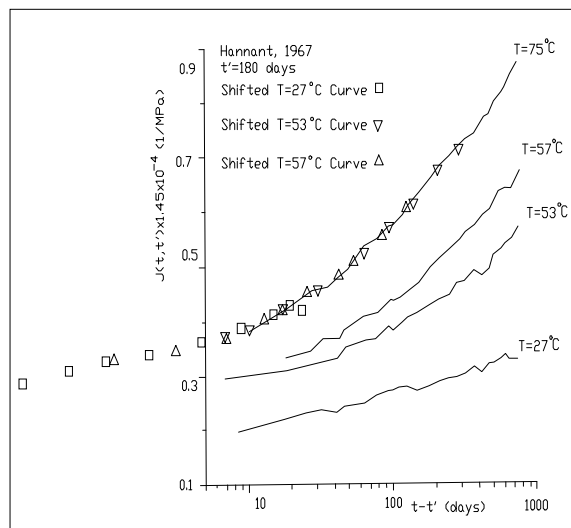
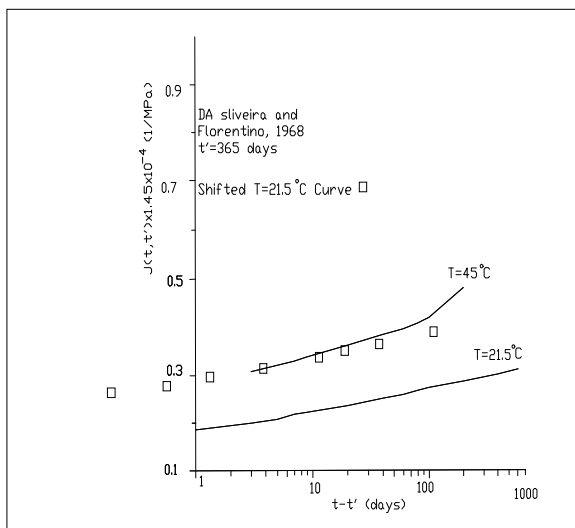
#### ۴-۳- کاربرد هم‌ارزی زمان- دما برای داده‌های آزمایشگاهی

با توجه به شباهت نسبتاً زیاد خزش پایه بتن و خزش مواد پلیمری ویسکوالاستیک، ابتدا معادله هم‌ارزی زمان- دما که از خصوصیات مواد ویسکوالاستیک به شمار می‌رود، در مورد بتن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. معادله هم‌ارزی زمان- دما بیان می‌دارد که منحنی‌های خزش بر حسب لگاریتم مدت زمان بارگذاری در دماهای متفاوت همگی جزئی 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 معادله هم‌ارزی زمان- دما صادق باشد، می‌توان خزش پایه دراز مدت را با استفاده از مقدار خزش پایه کوتاه مدت در دمای بالاتر برآورد کرد.

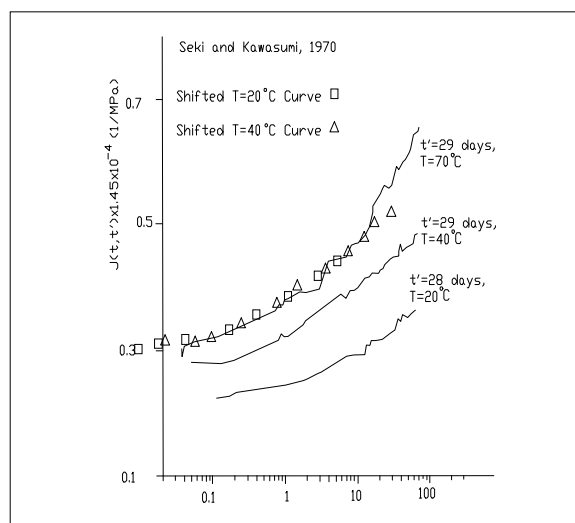
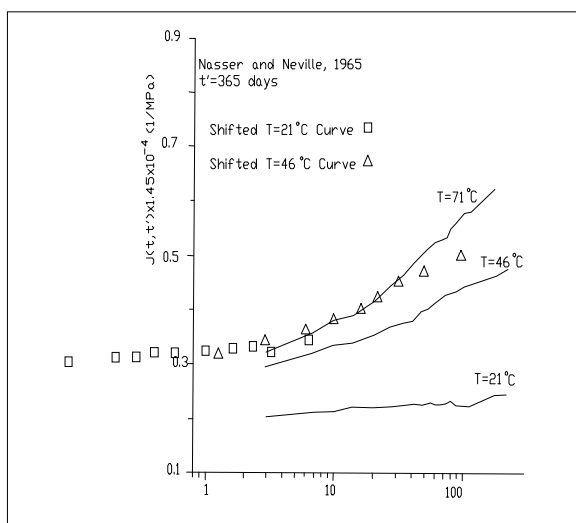
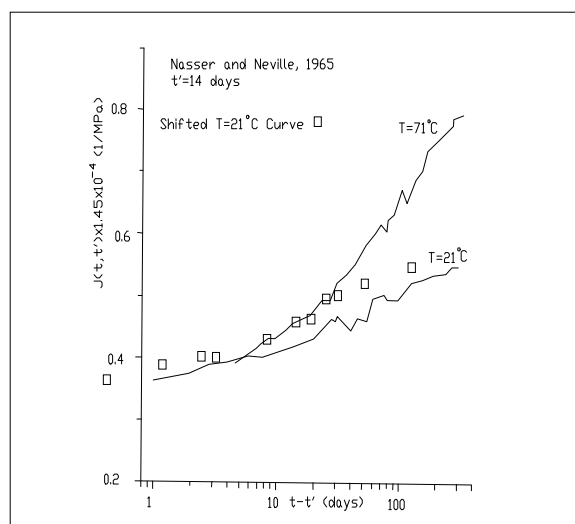
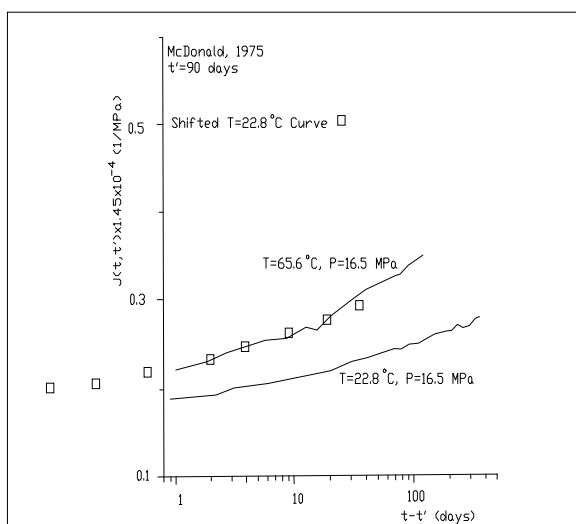
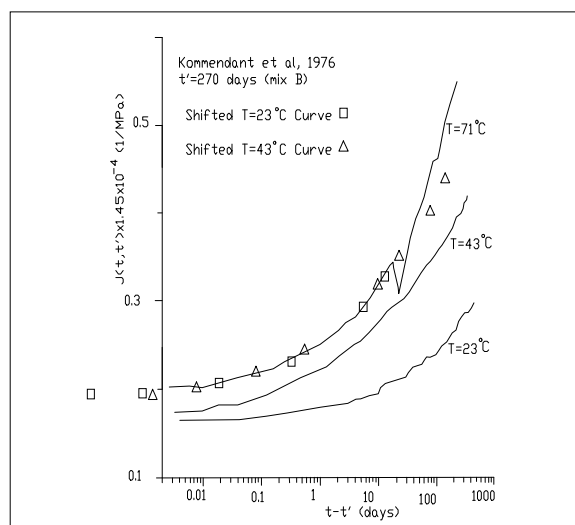
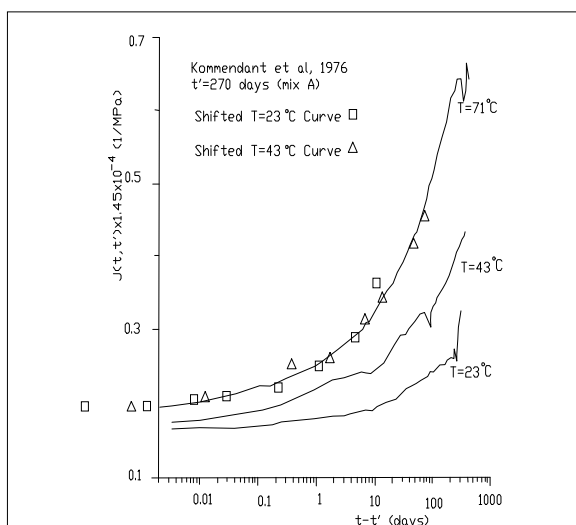
در تحقیق حاضر برای بررسی معادله هم‌ارزی زمان- دما، در ابتدا سعی می‌شود منحنی‌های خزش در دماهای مختلف بر روی منحنی متناظر با بیشترین دما منطبق شود. این کار با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی که در قسمت ۴-۲ معرفی شدند، صورت می‌گیرد. شکل‌های (۲) تا (۵) اطلاعات آزمایشگاهی مورد اشاره که توسط محققان مختلف و 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 ادامه 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



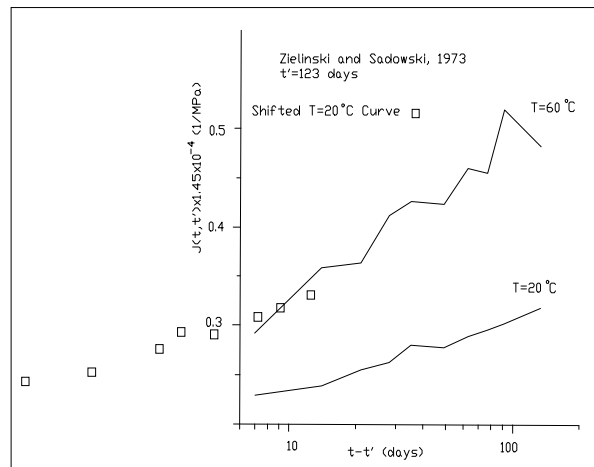
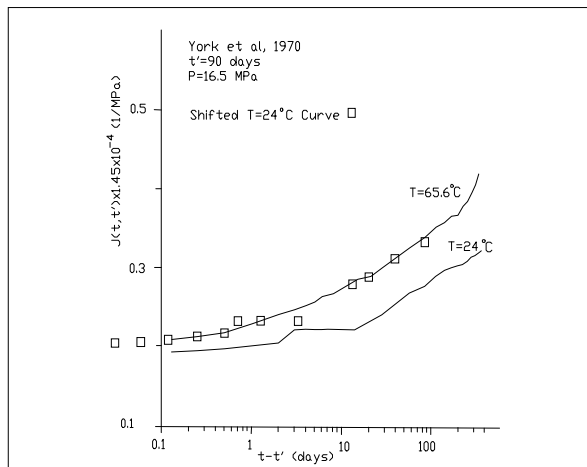
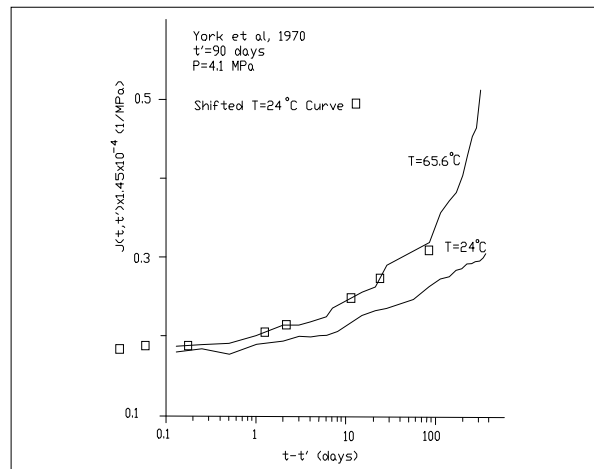
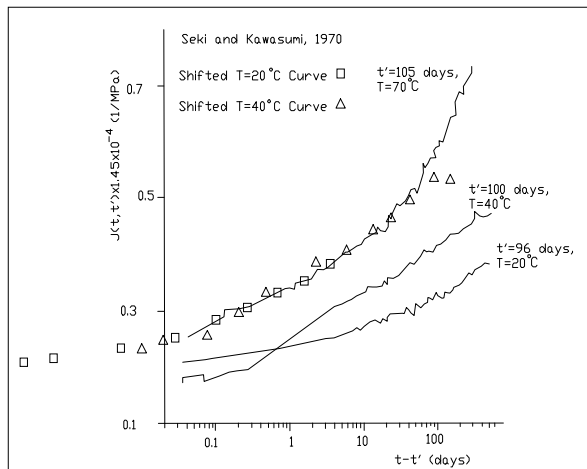
شکل ۲- منحنی خزش در دماهای متفاوت و انتقال آن بر روی منحنی خزش با دمای بالاتر برای داده‌های آرتاناری و یو، براون، و اسیلویرا و فلورنتینو



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



شکل ۴- منحنی خزش در دماهای متفاوت و انتقال آن بر روی منحنی خزش با دمای بالاتر برای داده‌های کمندت و همکاران، مکدونالد، ناصر و نویل، و سکی و کواسومی



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

برای تخمین مقدار خزش بلند مدت در دمای کمتر را با استفاده از منحنی خزش در دمای بیشتر ولی در مدت زمان بارگذاری کمتر، به وجود می‌آورد. به منظور ارائه مدلی برای تخمین مقدار خزش درازمدت با استفاده از آزمایش خزش کوتاه مدت در دمای بالاتر، کافی است مقدار انتقال لازم برای بر هم نهی دو منحنی در دماهای مختلف بر روی یکدیگر مشخص شود. به این 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 برآورد می‌شود.

بالاتر را می‌توان به صورت ادامه منحنی خزش در دمای پایینتر فرض کرد.

#### ۴-۴- ارائه مدل

در بخش قبل نشان داده شد که منحنی‌های تابع انطباق بر حسب لگاریتم مدت بارگذاری در دمای پایینتر را می‌توان به صورت ادامه تابع انطباق در دمای بالاتر در نظر گرفت. به عبارت دیگر می‌توان فرض کرد که منحنی تابع انطباق بر حسب لگاریتم مدت بارگذاری در دمای بیشتر، ادامه منحنی تابع انطباق در دمای کمتر است. این موضوع امکان فراهم آمدن روشی

$$k = Ae^{\left(\frac{U}{RT}\right)} \quad (24)$$

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

$$\Phi(T, t'_e) = e^{\frac{U}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)} \quad (25)$$

در معادله بالا،  $T$  دمای مورد نظر بر حسب درجه کلوین،  $T_0$  دمای مرجع بر حسب درجه کلوین،  $R$  ثابت گازها برابر با  $8.314 \text{ J/mol}^\circ\text{K}$  و  $U$  انرژی فعال سازی متوسط بر حسب  $\text{J/mol}$  است که برآیند دو اثر متفاوت دما بر خزش، یکی افزایش سرعت هیدراسیون و کاهش نرخ خزش، و دیگری کاهش ویسکوزیته آب بتن و افزایش نرخ خزش است و با انجام برآزش 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 معادله (25)، مقدار انتقال برای انطباق منحنی خزش در دمای بالاتر بر روی منحنی خزش در دمای مرجع به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\log \Phi(T, t'_e) = \frac{1}{\ln 10} \frac{U}{R} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \quad (26)$$

بنابراین برای انتقال دو منحنی در دماهای دلخواه  $T_1$  و  $T_2$ ، این دماها به ترتیب جایگزین  $T_0$  و  $T$  در معادله 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 (6) روند توسعه مقاومت بتنهای ساخته شده با انواع مختلف سیمان را نشان می‌دهد [39]. از این شکل ملاحظه می‌شود که گرچه روند توسعه مقاومت انواع سیمان به میزان قابل ملاحظه‌ای متفاوت است، لیکن اختلاف کمی بین مقاومت 60 روزه انواع سیمانها وجود دارد. همچنین ملاحظه می‌شود رشد مقاومت بعد از 60 روز، برای بتن های ساخته شده با سیمانهای مختلف شروع به

برای تعیین تابع انتقال، معادله زیر که تعریف تابع انطباق (انعطاف پذیری) است، نوشته می‌شود [38]:

$$\varepsilon(t, t') = J(t, t') \sigma \quad (20)$$

به طوری که  $t'$  بیانگر سن بتن در لحظه بارگذاری،  $t$  زمان قرائت مقدار تغییر شکل،  $\varepsilon$  کرنش در زمان  $t$ ،  $\sigma$  تنش اعمال شده و  $J$  تابع تطابق است. با تعریف متغیر  $\xi$  که آن را زمان توسعه یافته می‌نامیم، معادله بالا به صورت زیر در می‌آید:

$$\varepsilon(\xi, t') = J'(\xi, t') \sigma \quad (21)$$

که در آن  $J'(\xi, t')$  تابع انطباق تصحیح شده<sup>1</sup> با در نظر گرفتن اثر دماست.  $\xi$  که بیانگر افزایش سرعت انجام واکنش هیدراسیون و همچنین افزایش خزش، با افزایش دما است، به صورت زیر تعریف می‌شود [38]:

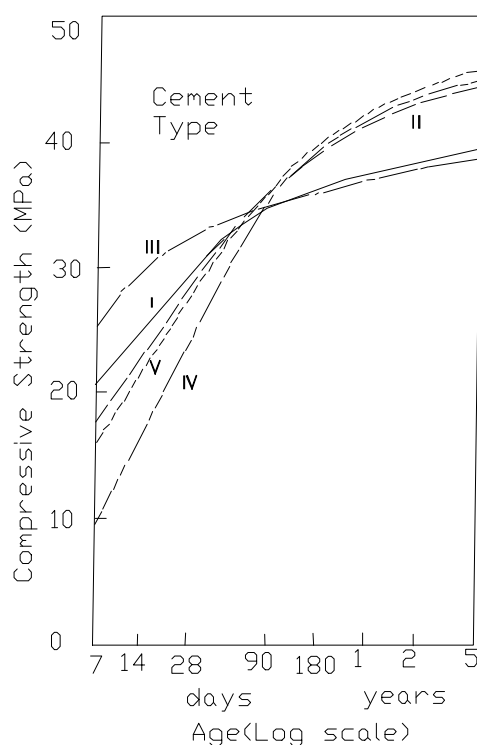
$$\xi = \Phi(T, t'_e)(t - t') \quad (22)$$

به طوری که  $\Phi(T, t'_e)$  تابع تصحیح دما و بلوغ اولیه بتن بوده و  $T$  دمای مطلق و  $t'_e$  بلوغ بتن در لحظه بارگذاری است. از آنجا که دما باعث افزایش هیدراسیون و در نتیجه افزایش بلوغ بتن می‌شود، برای محاسبه بلوغ بتن در دماهای مختلف از معادلات (11) و (12) استفاده می‌شود.

قابل ذکر است که در معادله (22)، وقتی که  $(t - t')$  به سمت صفر میل می‌کند،  $\xi$  نیز به طرف صفر میل می‌کند. همچنین هنگامی که  $(t - t')$  نامحدود شود،  $\xi$  نیز نامحدود می‌شود. با لگاریتم گیری از معادله (22)، معادله زیر حاصل می‌شود:

$$\log \xi = \log \Phi(T, t'_e) + \log(t - t') \quad (23)$$

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 لحظه بارگذاری، با یک انتقال افقی بر روی یکدیگر قابل انطباق خواهند بود. برای یافتن تابع انتقال  $\log \Phi(T, t'_e)$ ، از معادله آرنیوس استفاده می‌شود. معادله آرنیوس بیان می‌کند که ثابت سرعت ( $k$ ) در یک واکنش شیمیایی نسبت به انرژی فعال سازی واکنش و دمای واکنش از معادله زیر تبعیت می‌کند ( $A$  یک ضریب ثابت است):



شکل ۶- روند توسعه مقاومت بتنهای حاوی ۳۲۵ کیلوگرم سیمان در یک متر مکعب بتن و ساخته شده با انواع مختلف

منحنی‌های خزش بر روی یکدیگر علاوه بر یک انتقال افقی به یک انتقال عمودی نیاز است و این دو مقدار انتقال تا حدودی به یکدیگر وابسته‌اند، مقادیر انتقال افقی را می‌توان تا حدودی با تغییر مقدار انتقال عمودی تغییر داد. پس از اصلاح مقدار انتقال افقی بار دیگر فرایند پیشنهاد رابطه نظری و تعیین پارامترهای آن مجدداً انجام شد و این عملیات آن قدر ادامه یافت تا معادله مناسبی به صورت معادله (۲۷) برای برآورد مقدار انتقال افقی به دست آمد. در این معادله پارامترهای A و B برای بتنهای با عمر بیشتر از ۶۰ روز در لحظه بارگذاری ثابت است، و دماهای  $T_1$  و  $T_2$  بر حسب درجه کلون، و بلوغهای اولیه  $t'_{e1}$  و  $t'_{e2}$  بر حسب روزند.

$$\log \Phi(T, t'_e) = A \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) - \frac{B}{T_1 T_2} (\ln t'_{e2} - \ln t'_{e1}) \quad (27)$$

با انجام برازش برای داده‌های کمندنت و همکاران، سکی و کواسومی، مکدونالد، ناصر و نویل، زلینسکی و سادوسکی، و

کاهش می‌کند. به علاوه مشاهده می‌شود که در سن ۶۰ روز، بتنهای ساخته شده با سیمانهای مختلف حداقل به ۸۰ درصد از مقاومت نهایی خود می‌رسند. بنابراین برای بتنهای با عمر بیش از ۶۰ روز، جهت سهولت انرژی فعال سازی متوسط U یکسان فرض می‌شود.

به منظور در نظر گرفتن اثر بلوغ اولیه نمونه، تابع ساده (۲۷) برای مقدار انتقال افقی دو نمونه در دماهای  $T_1$  و  $T_2$ ، و بلوغهای اولیه  $t'_{e1}$  و  $t'_{e2}$  پس از سعی و خطاهای زیاد به دست آمد. برای این کار، مقادیر اولیه انتقال لازم برای تطبیق منحنی‌های خزش پایه در دماهای مختلف بر روی یکدیگر مورد استفاده قرار گرفت. برای بهبود مدل معادلات مختلفی برای برآورد میزان انتقال افقی لازم مورد آزمایش قرار گرفته و سپس مقادیر برآورد شده از معادله پیشنهاد شده با مقادیر اولیه انتقال افقی مقایسه شد. سپس در صورت مشاهده اختلاف زیاد بین مقدار برآورد شده و مقدار اولیه، سعی شد مقدار اولیه به مقدار برآورد شده نزدیک شود. از آنجا که برای تطبیق



داده‌های در دمای بیشتر از ۲۰ درجه سانتیگراد برآون که تقریباً ۷۵ درصد از داده‌های موجود را تشکیل می‌دهند، مقدار  $A$  برابر با  $3154/5$  درجه کلونین، و مقدار  $B$  برابر با  $87313$  برحسب درجه کلونین به دست آمده است؛ در حالی که ضریب همبستگی معادله استخراج شده مساوی  $R^2 = 0.98$  است. ضریب همبستگی  $R^2$  بیانگر همبستگی خطی بین مقدار انتقال به دست آمده از معادله برآورد کننده و مقدار انتقال داده شده می‌باشد؛ به طوری که ضریب همبستگی یک مبین همبستگی مستقیم و کامل است.

معادله (۲۷) و مقادیر تعیین شده برای ضرایب  $A$  و  $B$  برای داده‌های هنانت و داسلیویا و فلورنتینو و داده‌های برآون برای دمای ۲۰ درجه سانتیگراد که در مجموع حدود ۲۵ درصد از داده‌های آزمایشگاهی موجود را تشکیل می‌دهد، مورد بررسی قرار گرفت که تطابق بسیار خوبی ملاحظه شد.

توجه شود که چون برازش داده‌ها برای بتهایی که سن آنها در لحظه بارگذاری بین ۶۰ تا ۳۶۵ روز و دمای آنها بین ۲۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد بوده، انجام گرفته است؛ معادله (۲۷) و مقادیر تعیین شده برای ضرایب  $A$  و  $B$  نیز برای بتهایی که عمر آنها در لحظه بارگذاری بین ۶۰ تا ۳۶۵ روز بوده و دمای آنها بین ۲۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد است، صادق خواهد بود.

لازم به ذکر است که در برازش داده‌ها در معادله (۲۷)، برای محاسبه بلوغ نمونه‌ها قبل از بارگذاری بر بتهایی که عمر آنها در لحظه بارگذاری بیش از ۶۰ روز است، از معادله زیر استفاده شده است [۱۵]:

$$t'_e = t' + \Delta t'_e = \int_0^{t'} e^{4000\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)} dt \quad (28)$$

در معادله (۳۰)،  $t'_e$  بلوغ بتن در لحظه بارگذاری بر حسب روز،  $t'$  زمان بارگذاری بر حسب روز،  $\Delta t'_e$  عمر اضافه شده بر اثر افزایش دما بر حسب روز،  $T_0$  دمای عمل آوری بر حسب درجه کلونین،  $T$  دمای آزمایش بر حسب درجه کلونین و  $t$  زمان برحسب روز است. عدد ۴۰۰۰ درجه کلونین در معادله (۲۸)، معرف انرژی فعال سازی هیدراسیون تقسیم بر

ثابت گازها است که تاکنون مقادیر متفاوتی برای آن توسط محققان مختلف ارائه شده است. بازانت و پانلا در سال ۱۹۷۸ این مقدار را برابر ۴۰۰۰ درجه کلونین [۱۵]، بازانت و کیم در سال ۱۹۹۲ برابر ۴۰۰۰ درجه کلونین [۳۴]، بازانت و همکاران در سال ۱۹۹۳ مساوی ۵۰۰۰ درجه کلونین [۴۰]، سرکومب و همکاران در سال ۲۰۰۰ برابر ۴۰۰۰ درجه کلونین [۴۱] و اکر و آلم در سال ۲۰۰۱ این مقدار را برای سیمان پرتلند معمولی بین ۴۰۰۰ تا ۵۰۰۰ درجه کلونین [۴۲] پیشنهاد کردند. در این تحقیق نسبت انرژی فعال سازی هیدراسیون به ثابت عمومی گازها با توجه به مکاتبات انجام شده توسط نگارندگان با بازانت، برابر با ۴۰۰۰ درجه کلونین در نظر گرفته شد.

قابل ذکر است که در محاسبه بلوغ، مدت زمان لازم برای اینکه کلیه نقاط نمونه از دمای محیط به دمای آزمایش برسند،  $t_v$ ، حداقل مساوی یک روز در نظر گرفته شد و در این مدت  $(t_v)$  فرض شد که دمای  $T$  به طور خطی از دمای محیط به دمای آزمایش می‌رسد. پس از مدت زمان  $t_v$ ، دمای نمونه در دمای آزمایش ثابت بوده و مدت زمانی که قبل از بارگذاری دمای نمونه در دمای مربوط به زمان آزمایش ثابت نگه داشته می‌شود، با  $t_{II}$  نمایش داده می‌شود. در مدت زمان  $t_v$  به اندازه  $\Delta t'_e$ ، و در مدت زمان  $t_{II}$  به مقدار  $\Delta t'_{II}$  بر بلوغ نمونه بتنی افزوده می‌شود. مجموع  $\Delta t'_e$  و  $\Delta t'_{II}$  برابر با کل بلوغ اضافی نمونه تحت دمای  $\Delta t'_e$  است. مقادیر بلوغ محاسبه شده برای نمونه‌های بتنی محققان مختلف، که عمر نمونه‌های آنها در لحظه بارگذاری بیش از ۶۰ روز است، در جدول (۱) آورده شده است. شایان ذکر است که چون معادله (۲۸) برای زمانی که دما متغیر است، جواب ساده‌ای ندارد، برای محاسبه آن از نرم افزار Mathematica 4 که قادر به محاسبه انتگرالهای مختلف می‌باشد، استفاده شده است.

### انتقال عمودی لازم

برای تطبیق منحنی‌های خزش بر روی یکدیگر، علاوه بر انتقال افقی یک انتقال عمودی نیز لازم به نظر می‌رسد. اگرچه

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

محقق	$t'$ (روز)	$T_0$ (° K)	$T$ (° 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

این منظور کافی است که ابتدای منحنی خزش در دمای بیشتر، بر حداقل سه نقطه از انتهای منحنی خزش در دمای مورد نظر برآزش شود. منحنی انتقال یافته، مقادیر خزش در دمای پایتتر را در زمان‌های بعدی برآورد می‌کند.

از آنجا که داده‌های آزمایشگاهی موجود که در ارائه 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 برآورد 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)

به رغم تلاش نگارندگان، معادله 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 شیوه مناسب این است که نمونه 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 معادله (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 داده‌ها را در دماهای ۲۳، ۴۳ و ۷۱ درجه سانتیگراد به ترتیب با اشکال دایره با زمینه سفید، مثلث و دایره با زمینه سیاه نشان می‌دهد. داده‌های خزش در دمای ۷۱ درجه سانتیگراد، تشکیل یک منحنی ممتد را داده اند که این منحنی پس از انتقال لازم و برآزش بر سه نقطه از داده‌های خزش در دماهای ۲۳ و ۴۳ درجه سانتیگراد، تشکیل مدل پیشنهادی برای خزش در این دو دما را داده است. این نمودار حاکی از آن است که در مورد این نمونه‌ها، برای تخمین خزش ۷۰۰ روزه نمونه بتنی در دمای ۲۳ درجه سانتیگراد کافی است نمونه بتنی در دمای ۷۱ درجه سانتیگراد به مدت ۳۱ روز، و نمونه بتنی در دمای ۲۳ درجه سانتیگراد به مدت ۳ روز تحت آزمایش خزش قرار گیرد. به بیان دیگر، منحنی خزش در دمای ۷۱ درجه سانتیگراد پس از انتقال افقی و قائم لازم، در وضعیتی قرار گرفته که ابتدای آن بر منحنی خزش در دمای ۲۳ درجه سانتیگراد و مرتبط با زمان ۳ روز واقع شده است؛ درحالی که خزش مرتبط با زمان ۳۱ روز از منحنی مربوط به دمای ۷۱ درجه سانتیگراد، وضعیت منحنی مربوط به دمای ۲۳ درجه سانتیگراد در زمان ۷۰۰ روز را دربر می‌گیرد. منحنی شکل (۷) همچنین نشان می‌دهد که برای برآورد خزش ۷۰۰ روزه نمونه بتنی در دمای ۴۳ درجه سانتیگراد، کافی است نمونه بتنی در دمای ۷۱ درجه سانتیگراد به مدت ۱۱۰ روز، و نمونه بتنی در دمای ۴۳ درجه سانتیگراد به مدت ۱ روز مورد آزمایش قرار گیرد. توجه شود که در شکل (۷)، مدل بازانت برای تخمین خزش در دماهای ۲۳ و ۴۳ درجه سانتیگراد نیز برای مقایسه با خط چین نشان داده شده است.

## ۵- ارزیابی مدل

به منظور ارزیابی مدل، روش پیشنهادی در مورد سایر داده‌های موجود به کار گرفته شده و نتایج حاصله در شکل‌های (۸) تا (۱۹) نشان داده شده است. در کلیه این شکل‌ها سعی شده است که با استفاده از قسمتی از داده‌ها که مربوط به دمای بالاتر است، خزش دراز مدت در دمای پایتتر که مرتبط با قسمت دیگری از داده‌هاست، پیش‌بینی شود. در همه این شکل‌ها مدل بازانت نیز برای مقایسه ارائه شده است.

شایان ذکر است که در بین شکل‌های مورد اشاره، شکل‌های (۱۵) تا (۱۹) مربوط به حدود ۲۵ درصد از داده‌هاست که در تنظیم مدل مطلقاً از آنها استفاده نشده است. با این وجود در این نمونه‌ها نیز اکثراً تطابق بسیار خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و منحنی‌های 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.

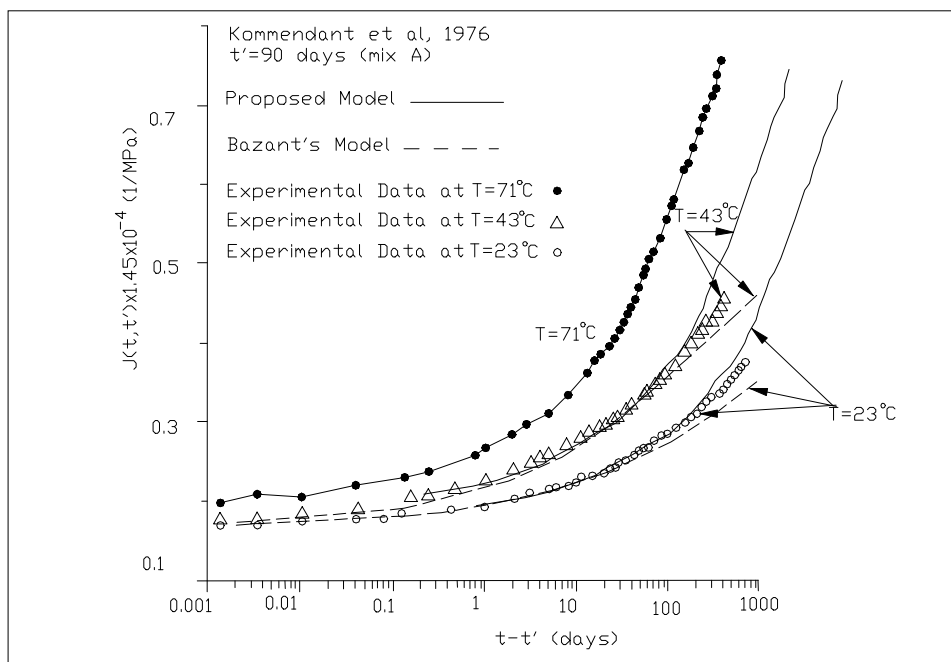
همان طور که از شکل‌های (۷) تا (۱۹) مشاهده می‌شود، مدل پیشنهادی که برآورد مناسبی از خزش در زمان‌های طولانی دارد، در زمان‌های بیش از ۱۰۰۰ روز اکثراً منجر به تخمینی می‌شود که از مقدار واقعی اندکی بیشتر است. این در حالی است که مدل بازانت در اکثر موارد، تخمین دست پایینی از مقدار خزش در بلند مدت انجام می‌دهد. بنابراین مدل پیشنهادی می‌تواند به همراه مدل بازانت برای تخمین خزش پایه به کار رود؛ به طوری که مدل بازانت به صورت تخمین دست پایین و مدل حاضر به عنوان برآورد دست بالای مقدار واقعی خزش در دراز مدت تلقی شوند.

## ۶- خلاصه و نتیجه‌گیری

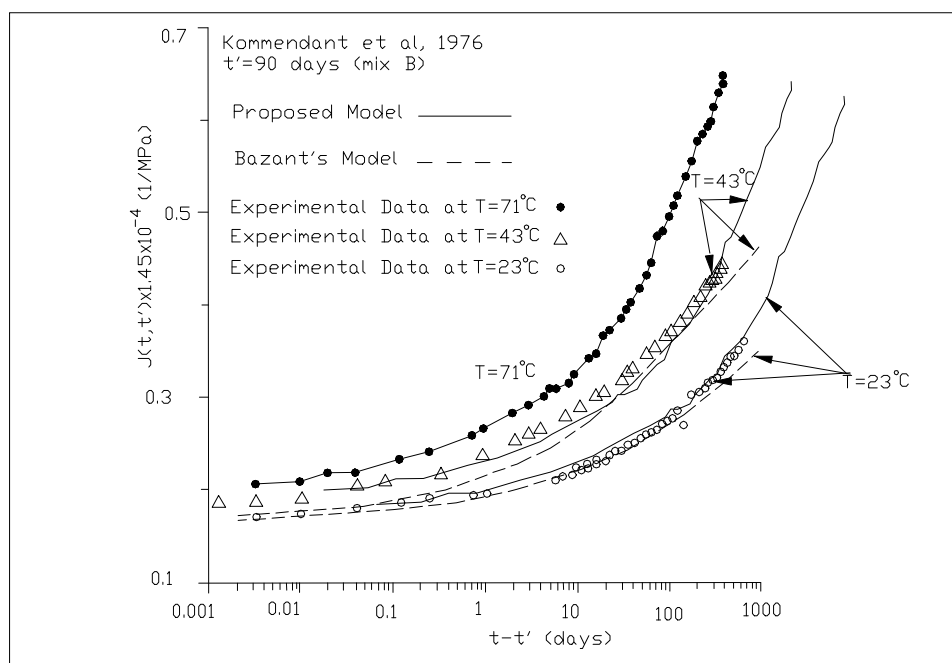
۱- معادله هم ارزی زمان- دما در مورد خزش پایه بتن همچون خزش در مواد ویسکوالاستیک پلیمری برقرار است، با این تفاوت که در مورد بتن مقدار انتقال افقی منحنی‌های تابع انطباق (انعطاف پذیری) بر حسب لگاریتم مدت زمان بارگذاری، علاوه بر دما به بلوغ بتن در لحظه بارگذاری نیز بستگی دارد.

۲- افزایش دما باعث می‌شود که منحنی تابع انطباق بر حسب لگاریتم مدت زمان بارگذاری به سمت چپ انتقال یابد، در صورتی که افزایش بلوغ بتن در لحظه بارگذاری، این منحنی را به سمت راست انتقال می‌دهد.

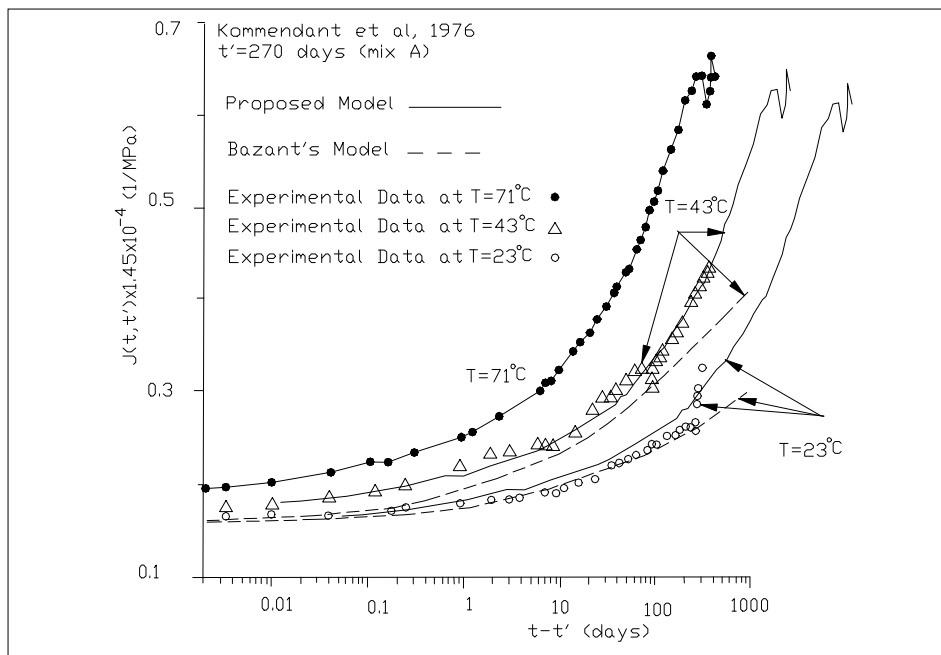
۳- مقدار انتقال مربوط به بلوغ بتن در لحظه بارگذاری به دمای نمونه بستگی داشته، به طوری که با افزایش دما مقدار این انتقال کمتر می‌شود.



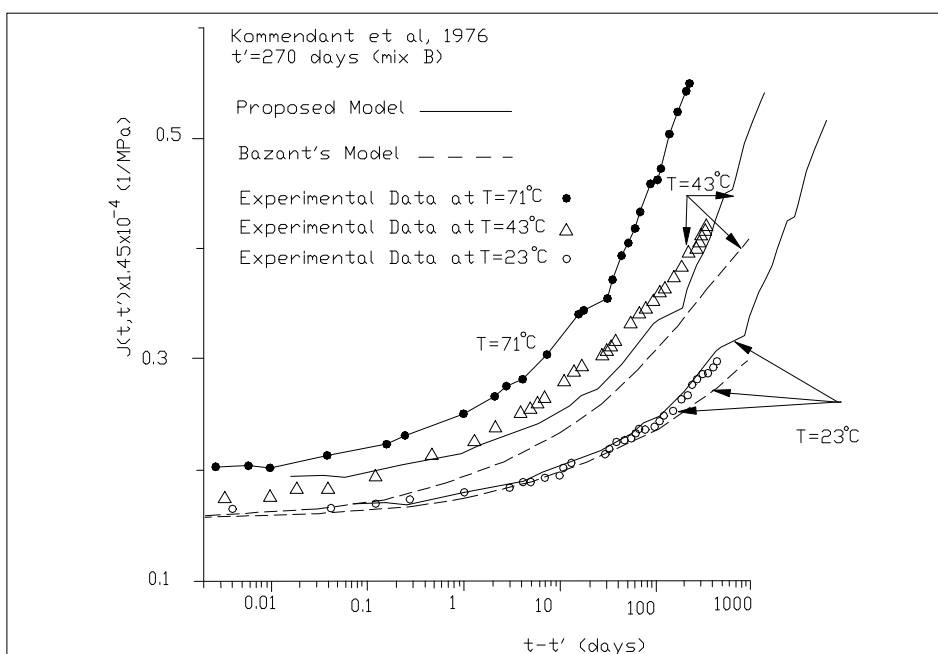
شکل ۷- منحنی خزش برآورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانت برای داده های کمندنت (مخلوط A به کار رفته و عمر بتن در لحظه بارگذاری ۹۰ روز بوده است).



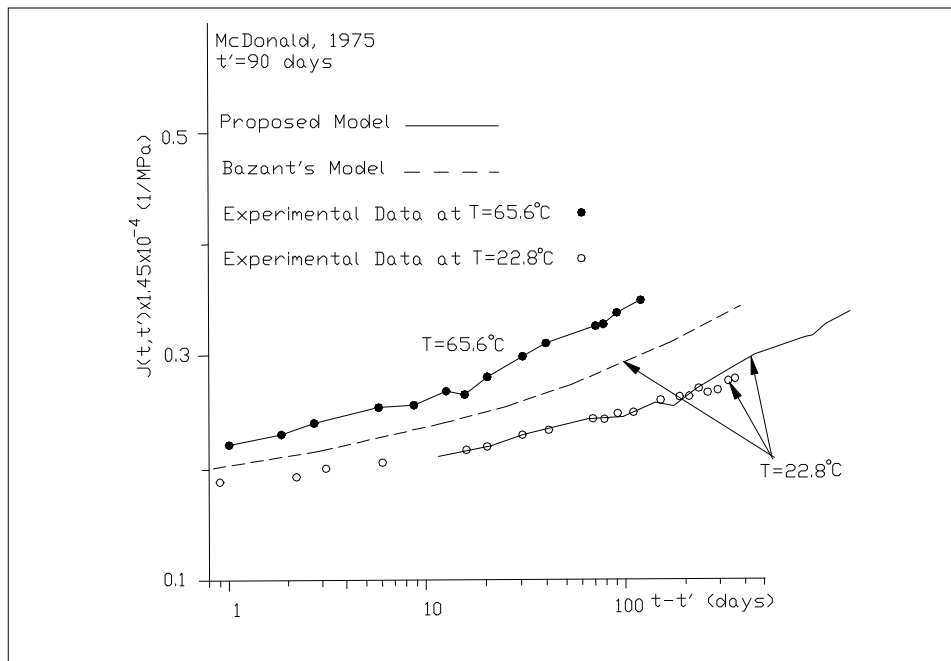
شکل ۸- منحنی خزش برآورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانت برای داده های کمندنت (مخلوط B به کار رفته و عمر بتن در لحظه بارگذاری ۹۰ روز بوده است)



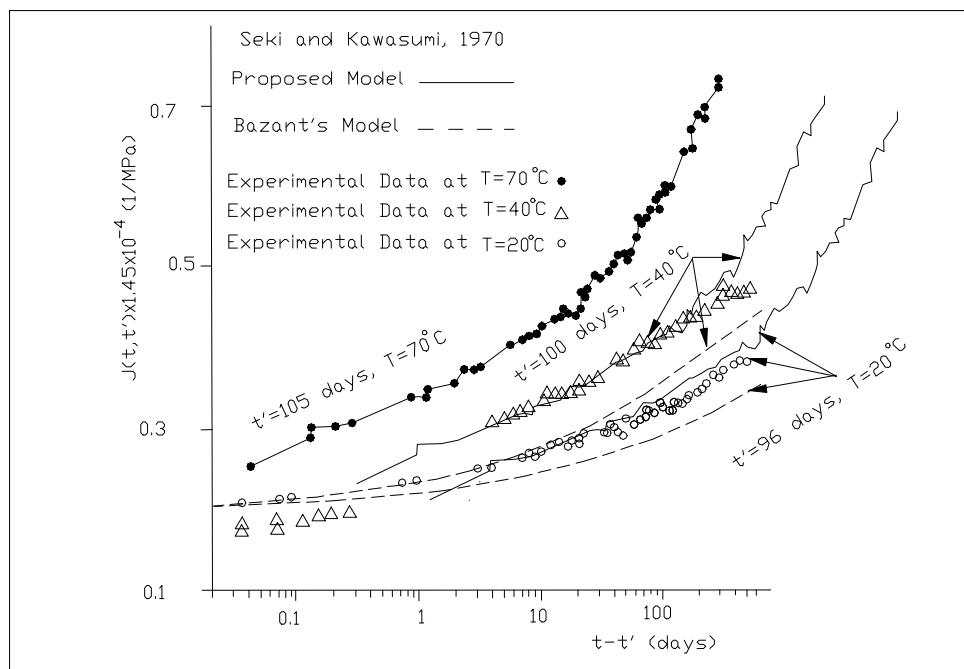
شکل ۹- منحنی خزش برآورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانت برای داده های کمندنت (مخلوط A به کار رفته و عمر بتن در لحظه بارگذاری ۲۷۰ روز بوده است)



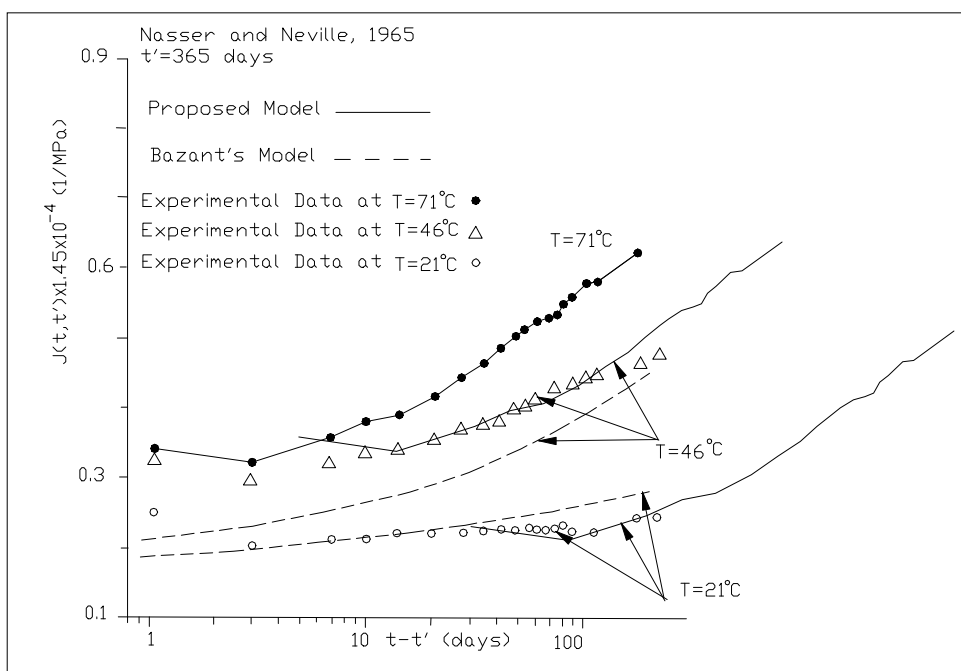
شکل ۱۰- منحنی خزش برآورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانت برای داده های کمندنت (مخلوط B به کار رفته و عمر بتن در لحظه بارگذاری ۲۷۰ روز بوده است)



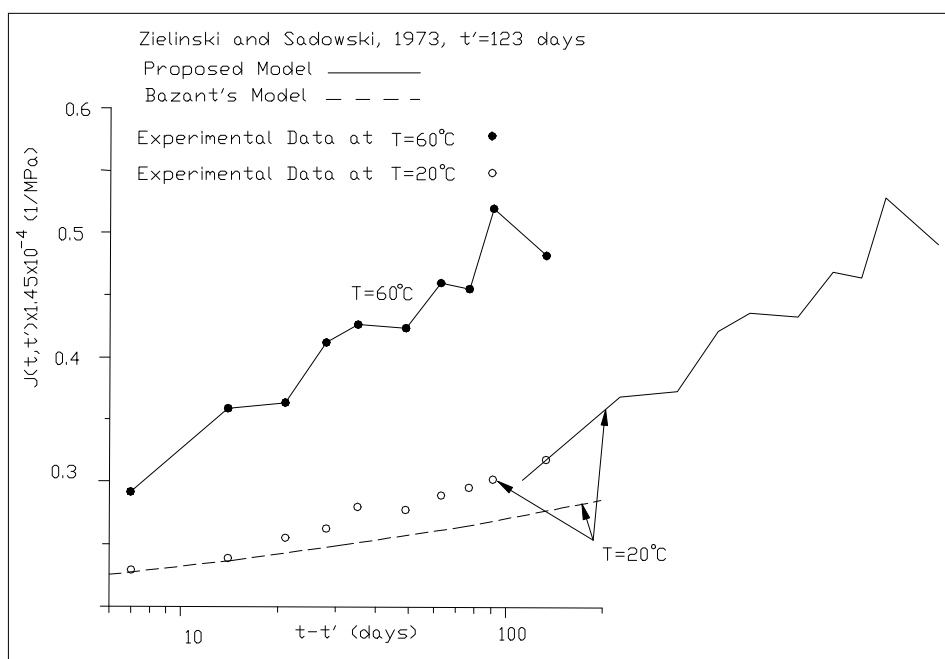
شکل ۱۱- منحنی خزش برآورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانته برای داده های مکدونالد (عمر بتن در لحظه بارگذاری ۹۰ روز بوده است).



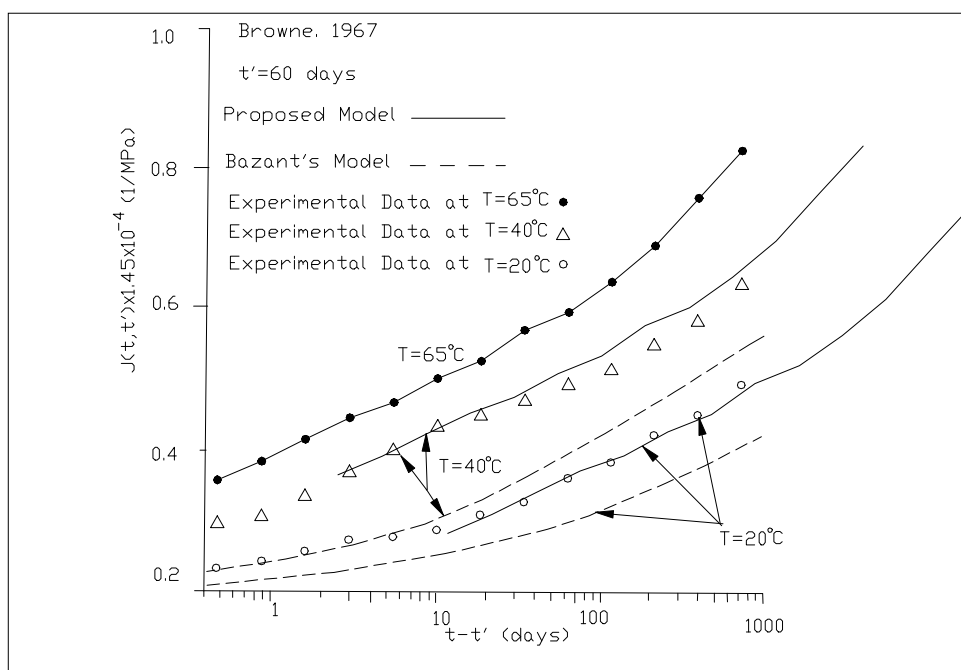
شکل ۱۲- منحنی خزش برآورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانته برای داده های سکی و کواسومی (عمر بتن در لحظه بارگذاری ۹۶، ۱۰۰ و ۱۰۵ روز بوده است)



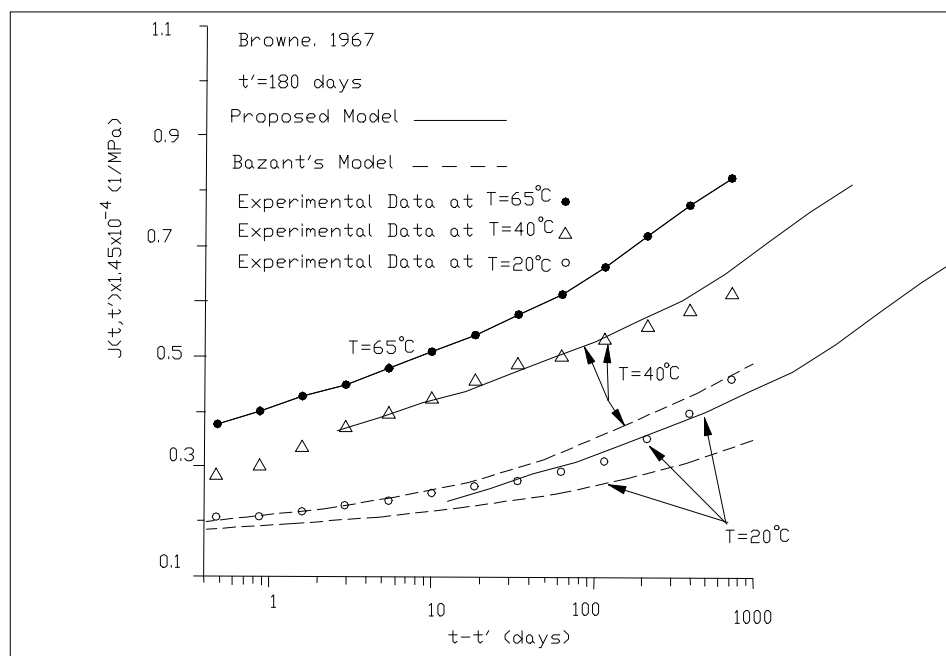
شکل ۱۳- منحنی خزش برآورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانته برای داده های ناصر و نویل (عمر بتن در لحظه بارگذاری ۳۶۵ روز بوده است)



شکل ۱۴- منحنی خزش برآورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانته برای داده های زیلینسکی و سادوسکی (عمر بتن در لحظه بارگذاری ۱۲۳ روز بوده است)

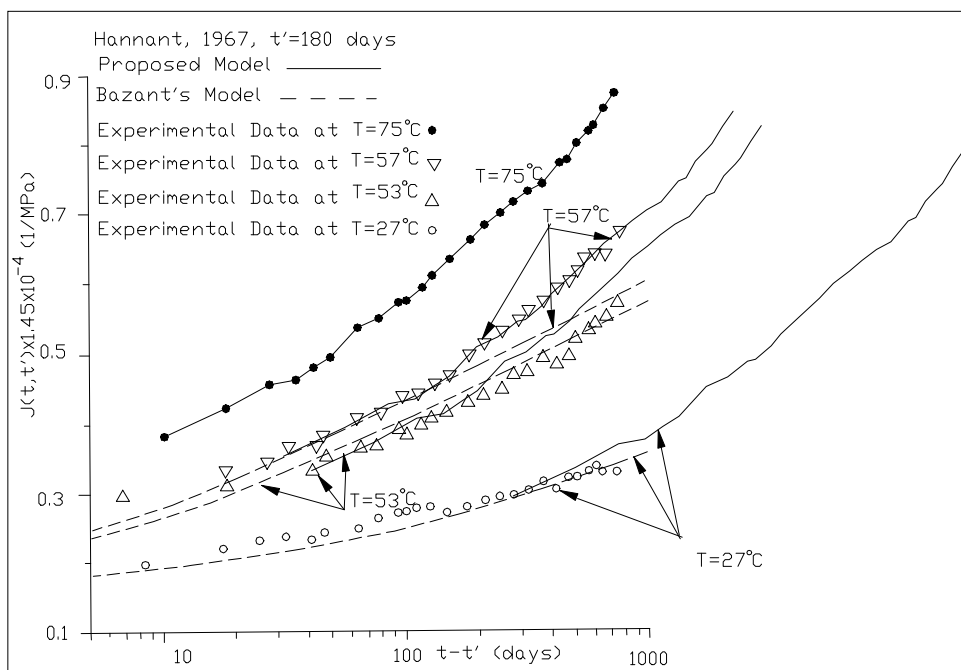


شکل ۱۵- منحنی خزش برآورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانت برای داده های برآون (عمر بتن در لحظه بارگذاری ۶۰ روز بوده است)

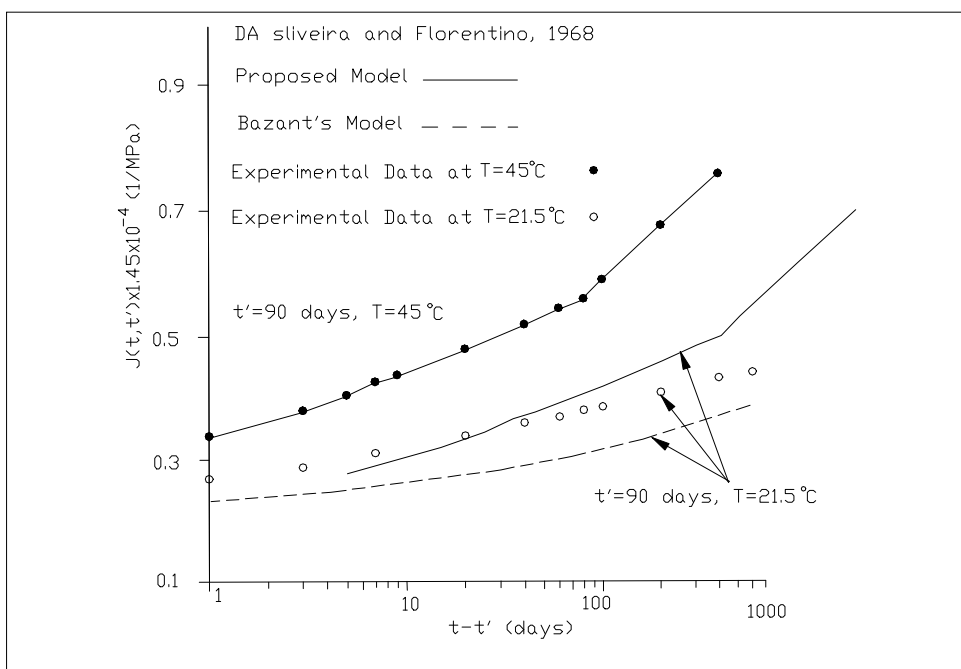


شکل ۱۶- منحنی خزش برآورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانت برای داده های برآون (عمر بتن در لحظه بارگذاری ۱۸۰ روز بوده است)

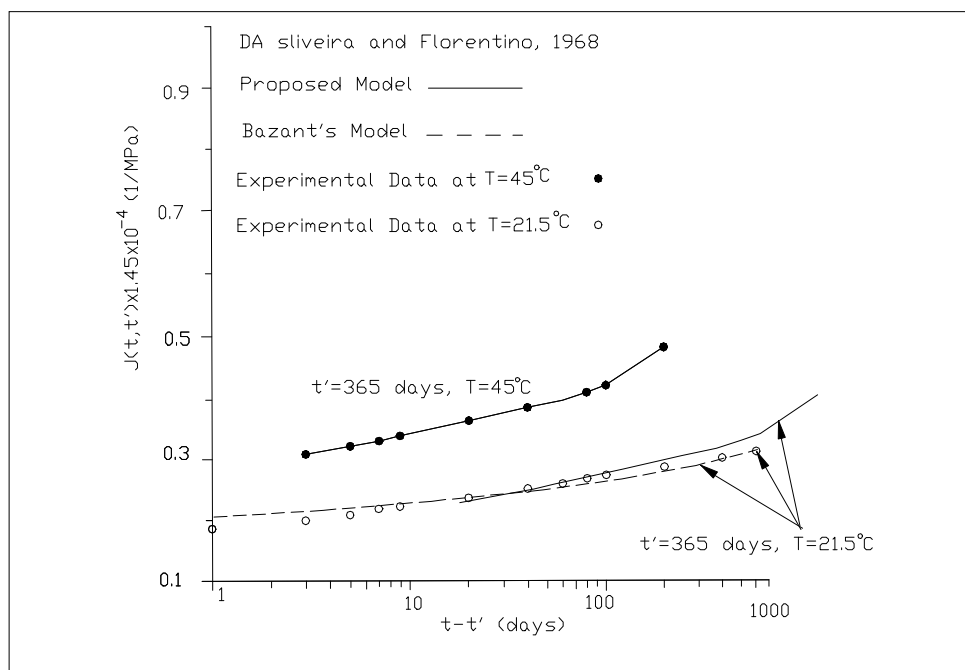




شکل ۱۷- منحنی خزش برآورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانت برای داده های هانت (عمر بتن در لحظه بارگذاری ۱۸۰ روز بوده است)



شکل ۱۸- منحنی خزش برآورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانت برای داده های داسلیویرا و فلورنتینو (عمر بتن در لحظه بارگذاری ۹۰ روز بوده است)



شکل ۱۹- منحنی خزش برآورد شده در دماهای متفاوت توسط مدل پیشنهادی و مدل بازانت برای داده های دا اسلیویرا و فلورنتینو (عمر بتن در لحظه بارگذاری ۳۶۵ روز بوده است)

حالی است که استفاده از مدل حاضر عموماً منجر به جوابهای دست بالایی می شود که به مقدار واقعی بیشتر نزدیک است. بنابراین می توان این دو مدل را به صورت مکمل یکدیگر به کار برد؛ به طوری که خزش پایه تخمین زده شده از مدل حاضر را حد بالای مقدار واقعی، و خزش پایه برآورد شده از مدل بازانت را حد پایین مقدار واقعی قلمداد کرد.

۷- مدل حاضر نیازی به اطلاعات مربوط به مواد تشکیل دهنده 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 برآورد خزش پایه بتن است.

۴- قانون آرنیوس به خوبی قابلیت بیان تغییر رفتار خزش پایه را بر اثر تغییر دما در محدوده دمایی ۲۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد داراست.

۵- دقت بالای مدل حاضر در تخمین خزش پایه بتن، نشانگر حائز اهمیت بودن آزمایش های کوتاه مدت در برآورد خزش دراز مدت است؛ به طوری که با انجام آزمایش کوتاه مدت و انجام یک انتقال ساده، خزش دراز مدت بتن با تقریب بسیار خوبی به دست می آید.

۶- مدل بازانت در مورد بتن هایی که با بلوغ بیش از ۶۰ روز در دماهای بیشتر از دمای معمول تحت آزمایش قرار گرفته اند، در مدت زمان های زیاد پس از بارگذاری (مثلاً ۱۰۰۰ روز)، خزش پایه را کمتر از مقدار مقدار واقعی برآورد می کند. این در

## واژه نامه

### 1. Modified Compliance Function

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 Concrete 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 Concrete 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 Stresses at Elevated Temperatures," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 19, No. 60, pp. 149-156, 1967.
7. Bažant, Z. P., "Thermodynamics of Interacting Continua 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, pp. 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, pp. 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, pp. 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., "Microprestess-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., "Microprestess-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. Ojdovic, 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.

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"، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۷۴.
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 Recommendation 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 Shrinkage of Concrete: Physical Origins and Practical Measurements," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 203, pp. 143-158, 2001.