مجله علمی – پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره بیست و دوم، شماره۴، سال۱۴۰۱

شبیه‌سازی عددی انبساط غیرهمسانگرد ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها در اعضای بتنی

امیررضا تیموری[۱]، حسین یوسف‌پور[۲*]، بهرام نوایی‌نیا[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل؛
۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل؛
۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل؛

*** hyousefpour@nit.ac.ir**

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۳

چکیده

واکنش قلیایی سنگدانه‌ها نوعی فرایند شیمیایی مخرب و وابسته به زمان است که بین یون‌های قلیایی موجود در سیمان و مواد معدنی موجود در انواع مشخصی از سنگدانه‌ها که دارای سیلیس واکنش‌پذیر یا کربنات می‌باشند رخ می‌دهد. این واکنش سبب ایجاد نوعی ژل در بتن می‌شود که تمایل به جذب آب داشته و در صورت جذب رطوبت از محیط اطراف به صورت غیریکنواخت منبسط می‌شود. این انبساط غیریکنواخت سبب وقوع تنش‌های کششی بزرگتر از مقاومت کششی بتن و در نتیجه ترک‌خوردگی آن می‌شود. با وقوع چنین ترک‌هایی، بسیاری از پارامترهای رفتار مکانیکی بتن مانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته تغییر کرده و در نتیجه آن، پایداری و قابلیت سرویس‌دهی سازه به طور جدی تحت تاثیر قرار می‌گیرند. برای شبیه‌سازی رفتار سازه‌ها در برابر این واکنش‌ها، یکی از مهمترین محاسبات، توزیع جهتی صحیح انبساط حجمی ناشی از این واکنش‌ها است، که بر پیش‌بینی تنش‌ها و کرنش‌های موجود در سازه اثر قابل توجهی دارد. در پژوهش حاضر، با استفاده از قابلیت سابروتین‌نویسی در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، یک مدل ریاضی برای شبیه‌سازی انبساط مرتبط با واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها و خسارت ناشی از آن در المان‌ها و اعضای بتن مسلح توسعه داده شد. مدل مورد اشاره با توجه به وضعیت تنش در بتن در هر گام زمانی تحلیل، کرنش آزاد حجمی را بصورت غیرهمسانگرد در بتن توزیع می‌کند. به منظور درستی آزمایی مدل توسعه داده شده، نتایج حاصل از آن تحت شرایط مختلف آرماتورگذاری و بارگذاری با توجه به نتایج آزمایشگاهی مورد سنجش قرار گرفت. مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل عددی توسعه داده شده قادر است با دقت مناسب توزیع جهتی انبساط غیرهمسانگرد ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها را در بتن مسلح و غیرمسلح شبیه‌سازی کند. نتایج حاصل از مدل اجزای محدود همچنین حاکی از آن است که اصلاح مشخصات مکانیکی بتن هنگام شبیه‌سازی، تاثیر اندکی بر توزیع جهتی انبساط دارد. به علاوه مشاهده شد که مدل مورد استفاده تسلیم آرماتورها را در انبساط کلی متناظر با کرنش تسلیم فولاد (حدود ۰/۲ درصد) نشان می‌دهد که پیرو آن تغییرات تنش الگوی متفاوتی را دنبال می‌نماید. چارچوب عددی معرفی شده در این مقاله می‌تواند به شکل موثری در مدل‌سازی سازه‌های تحت اثر واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها مورد استفاده قرار گرفته و به منظور تعیین تنش‌ها و خسارات ناشی از پیشرفت این واکنش استفاده شود.

واژگان کلیدی: واکنش قلیایی سنگدانه‌ها، انبساط، بتن مسلح، روش اجزای محدود.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-09]

[DOI: 10.22034/22.4.5]

۱. مقدمه

واکنش قلیایی سنگدانه‌ها[1] (AAR) فرایند شیمیایی مخربی است که در سنین اولیه یک سازه بتنی در معرض رطوبت شروع می‌شود، ولی آثار ناشی از آن معمولاً پس از گذشت چندین سال قابل مشاهده خواهد بود. این واکنش، که اولین بار در سال ۱۹۴۰ میلادی توسط استنتون[2] گزارش شد، بین یون‌های قلیایی موجود در سیمان و سیلیس فعال یا کربنات موجود در انواع مشخصی از سنگدانه‌ها رخ می‌دهد [1].

تاکنون دو نوع واکنش قلیایی سنگدانه شناخته شده‌اند که عبارتند از: ۱) واکنش قلیایی سیلیسی[3] (ASR) و ۲) واکنش قلیایی کربناتی[4] (ACR) [2]. تفاوت اصلی میان این دو، در مواد معدنی واکنش‌پذیر مشارکت کننده در واکنش، یعنی سیلیس و کربنات است [2]. برای وقوع واکنش قلیایی سنگدانه‌ها حضور سه عامل اصلی در بتن سخت شده ضروری است: ۱) غلظت بالای هیدروکسیدهای قلیایی[5] (Na^+، K^+ و OH^-) ۲) مواد معدنی واکنش‌پذیر و ۳) رطوبت نسبی[6] کافی، بیش از ۸۰ تا ۸۵ درصد [4, 2].

سازوکار واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها در شکل (۱) نمایش داده شده است. چنانچه مواد معدنی واکنش‌پذیر موجود در سنگدانه‌ها به لحاظ شیمیایی ناپایدار باشند، هنگامی که در کنار هیدروکسیدهای قلیایی محلول در منافذ بتن با $pH \geq 12.5$ قرار می‌گیرند، با آن‌ها واکنش نشان می‌دهند [2]. تحت این واکنش، نوعی ژل در اطراف و داخل سنگدانه‌ها در بتن تولید می‌شود که تمایل زیادی به جذب آب دارد. این ژل با جذب رطوبت اولیه مشارکت کننده در هیدراسیون سیمان و رطوبت محیط اطراف منبسط می‌شود [5]. تحت چنین سازوکاری بتن به صورت غیریکنواخت منبسط شده که این می‌تواند منجر به فشارهای تورمی حتی بیش از ۱۰ مگاپاسکال در مقیاس میکروسکوپیک در بتن شود [6]. با توجه به قیدهای داخلی و خارجی، این تنش های فشاری سبب ایجاد تنش‌های کششی بزرگتر از مقاومت کششی بتن شده و در نتیجه در بتن ترک ایجاد می‌نمایند [7]. شکل‌گیری این ترک‌ها می‌تواند مقاومت فشاری، مقاومت کششی، و مدول الاستیسیته بتن را تحت تاثیر قرار دهد [8].

در دهه‌های گذشته پژوهش‌های گسترده‌ای در سطح تکنولوژی بتن در ارتباط با واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها انجام شده است که بیشتر آن‌ها بر پیش‌گیری از این واکنش‌ها در سازه‌های جدید متمرکز بوده است [2,9-13]. نتایج این نوع تحقیقات توانسته به شکل موثری عوامل موثر بر این واکنش‌ها را شناسایی نموده و از رخداد آن‌ها در ساخت و ساز جدید جلوگیری نماید. با این وجود، بسیاری از زیرساخت‌های موجود شامل سدها، نیروگاه‌ها، و پل‌ها در گذشته و بدون در نظر گرفتن این ملاحظات ساخته شده و این واکنش‌ها در حال حاضر در آن‌ها شروع شده است. از آن‌جایی که جایگزینی این زیرساخت‌ها بسیار پرهزینه و در مواردی غیرممکن است، ارزیابی مقاومت سازه‌های موجود که در آن‌ها این واکنش‌ها در حال رخ دادن باشند اهمیتی حیاتی دارد.

به منظور بررسی مشخصات مکانیکی بتن تحت اثر این واکنش‌ها، پژوهش‌های متعددی روی نمونه‌های استوانه‌ای ومکعبی غیرمسلح[7] انجام شده است که از بین آن‌ها می‌توان به مطالعات سوآمی و العسلی[8] [14]، انجی و کلارک[9] [7]، احمد[10] و همکاران [15]، اسماوی[11] و همکاران [16] و جیانینی و فولیارد[12] [17] اشاره کرد. این پژوهش‌ها نشان دادند که مقاومت کششی و مدول الاستیسته بتن به‌طور واضحی با افزایش انبساط کاهش می‌یابند، اما در مقایسه، مقاومت فشاری از حساسیت کمتری نسبت به انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها برخوردار بوده و از این رو، کاهش نسبتاً کمتری را با افزایش انبساط تجربه می‌کند [18].

1. Alkali-Aggregate Reaction
2. Stanton
3. Alkali-Silica Reaction
4. Alkali-Carbonate Reaction
5. Alkali Hydroxides
6. Relative Humidity
7. Plain Concrete
8. Swamy and Al-Asali
9. Ng and Clark
10. Ahmed
11. Smaoui
12. Giannini and Folliard

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-09]

[DOI: 10.22034/22.4.5]

شکل ۱. سازوکار واکنش قلیایی سنگدانه‌ها [3]

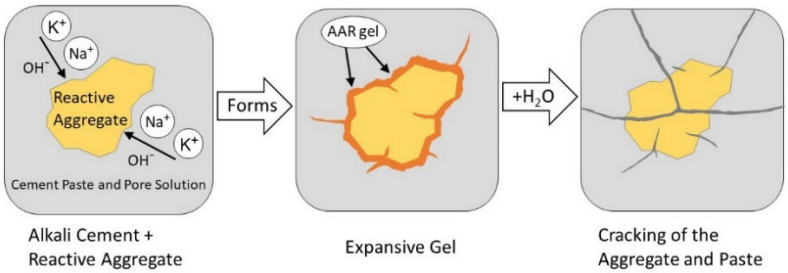


Fig. 1. Mechanism of AAR [3]

حضور آرماتور در بتن می‌تواند آثار احتمالی واکنش قلیایی سنگدانه‌ها روی مشخصات مکانیکی بتن را تا حد زیادی در چارچوب عملکرد سازه‌ای اصلاح نموده و حتی بهبود بخشد. به دلیل وجود پیوستگی بین آرماتور و بتن، مقدار کرنش به‌وجود آمده در آرماتورها برابر با مقدار انبساط (کرنش) بتن در آن جهت است. با ضرب مدول الاستیسیته فولاد در کرنش بوجود آمده، مقدار تنش کششی آرماتورها بدست می‌آید. با توجه به تعادل، تنش‌های کششی به‌وجود آمده در آرماتورها به صورت تنش‌های فشاری در بتن ظاهر می‌شوند و به نوعی در بتن ایجاد پیش تنیدگی می‌نماید. در اثر چنین تنش‌هایی، ترک‌های ایجاد شده در بتن بسته شده و یا اجازه گسترش آن‌ها داده نمی‌شود. با توجه به این شرایط، آرماتورها به عنوان مقید کننده‌های داخلی از عوامل مهم و تاثیرگذار بر گسترش انبساط و ترک‌خوردگی ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها هستند؛ به گونه‌ای که وجود آرماتورها و یا اعمال تنش‌های فشاری بین ۱ تا ۴ مگاپاسکال در یک جهت مفروض از بتن می‌توانند انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها در آن جهت را به میزان قابل توجهی کاهش دهند [2 ,8]. بنابراین، گسترش انبساط و رفتار مکانیکی بتن در اعضای بتن مسلح و غیرمسلح متفاوت هستند.

در خصوص عملکرد سازه‌ای اعضای بتن مسلح متاثر از واکنش قلیایی در سال‌های اخیر مطالعات آزمایشگاهی معدودی صورت پذیرفته است. در مطالعات انجام شده، مشخص شده است که انبساط ناشی از واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها به عنوان مهمترین نمود خارجی این واکنش‌ها، همسانگرد یا ایزوتروپ نبوده و در جهات مختلف متفاوت است. بر همین اساس، تعیین میزان انبساط جهتی در اعضای بتن مسلح با درصدهای آرماتور و شرایط مرزی مختلف مورد علاقه پژوهشگران واقع شد.

والد[1] و همکاران [19] و الفورد[2] و همکاران [20] در پژوهشی آزمایشگاهی به منظور بررسی چگونگی گسترش و توزیع انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها در اعضای بتن مسلح اقدام به ساخت ۳۳ مکعب بتن مسلح با درصد و چیدمان‌های مختلف آرماتور نمودند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که تحت شرایط مختلف آرماتورگذاری، رفتار انبساطی مکعب‌های بتن مسلح به طرز محسوسی تغییر می‌نماید؛ به نحوی‌که همواره مقدار انبساط در جهات مسلح نسبت به جهات غیرمسلح کمتر می‌باشد. از آنجا که اندازه و مقیاس نمونه‌های مطالعاتی و نیز فواصل بین آرماتورهای مورد استفاده در آن‌ها می‌توانند بر نتایج گسترش و توزیع انبساط تاثیرگذار باشند، والد و همکاران [21] در پژوهشی دیگر برای درک بهتر این مسئله اقدام به ساخت یک تیر بتن مسلح فاقد آرماتور برشی نمودند. نتایج نشان داد که انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها همواره در جهات مسلح نسبت به جهت غیرمسلح به‌طور قابل توجهی کمتر است. همچنین والد و همکاران [22] با استفاده از اصول مکانیک جامدات یک مدل عددی غیر گام به گام[3] تحت عنوان DVEP[4] را برای توزیع چند جهتی انبساط حجمی در سازه‌های بتن مسلح پیشنهاد نمودند. این مدل قادر به تخمین

1. Wald
2. Allford
3. Non-incremental
4. Distributed Volumetric Expansion Pressure

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-09]
[DOI: 10.22034/22.4.5]

مناسب توزیع انبساط حجمی در بتن بدون در نظر گرفتن اثر زمان (شرایط محیطی و واکنش‌پذیری بتن) در گسترش انبساط بتن مسلح است، ولی کاربرد آن برای سازه‌های با هندسه و اجزای پیچیده با چالش‌های جدی روبه‌رو است.

اولیو[1] و همکاران [24, 23] به منظور بررسی عملکرد ستون‌های یک پل تحت بارهای جانبی که متاثر از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها بودند اقدام به ساخت ۱۶ ستون بتن مسلح دارای آرماتورهای عرضی نمودند که در آن‌ها نیروی محوری فشاری ستون بوسیله نیروی پیش‌تنیدگی کابل‌ها شبیه‌سازی شده بود. پس از ساخت نمونه‌ها تا پیش از انجام تست‌های سازه‌ای، با اندازه‌گیری انبساط هر یک از نمونه‌ها در بازه‌های زمانی منظم اقدام به بررسی و ارزیابی رفتار انبساطی تیرهای مورد مطالعه شد. در حین ثبت داده‌های انبساط، برای آن‌که وجوه مختلف ستون‌ها در معرض تابش خورشید قرار داشته باشند، اقدام به دوران آن‌ها در زمان‌های معین شد. نتایج نشان داد که مقدار انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها در جهات دارای قیدهای بزرگتر، یعنی جهت دارای تنش‌های فشاری بزرگتر ناشی از اثر آرماتورها یا بارهای خارجی، کمتر از جهات دارای قیدهای کوچکتر می‌باشد. نتایج این مطالعات به عنوان منبع مناسبی برای درستی آزمایی شبیه‌سازی‌های عددی واکنش‌های قلیایی سنگدانه ها قابل استفاده است.

گاوتام[2] و همکاران در سال ۲۰۱۷ بر اساس نتایج مطالعات آزمایشگاهی خود مدلی ریاضی مبتنی بر رویکرد گام به گام[3] ارائه نمودند که با توجه به وضعیت تنش فشاری در بتن، انبساط حجمی آزاد[4] ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها را در بتن توزیع می‌کند[25] [26]. بر طبق مدل مورد اشاره، مقدار انبساط در یک جهت اصلی[5] از سه جهت متعامد، با توجه به وضعیت تنش در بتن بین دو مقدار $[pe_{un}, pe_{max}]$ قرار می‌گیرد، که در آن منظور از pe_{un} و pe_{max} به ترتیب انبساط محوری غیرهمبسته[6] و حداکثر انبساط محوری محتمل[7] است که به صورت درصدی از انبساط حجمی آزاد بیان می‌شوند. روابط ارائه شده برای هر یک در جهت i به شرح زیر هستند:

$$pe_{un\,i} = a + \frac{b-a}{1+\left(\frac{f}{c}\right)^{d}} \qquad \text{for } f \geq 0 \qquad (۱)$$

$$pe_{max\,i} = A + \frac{B-A}{1+\left(\frac{f}{C}\right)^{D}} \qquad \text{for } f \geq 0 \qquad (۲)$$

در روابط فوق f تنش فشاری اصلی[8] در جهت i بوده و سایر پارامترها ضرایبی ثابت هستند.

امروزه بسیاری از سازه‌های بتنی ساخته شده در سراسر دنیا با واکنش قلیایی سنگدانه‌ها و پیامدهای ناشی از آن مواجهند. از این رو، لزوم توسعه مدل‌های اجزای محدود برای شبیه‌سازی واکنش در سازه‌های بتنی و بررسی آثار ناشی از آن ضروری به نظر می‌رسد. اما به‌واسطه پیچیدگی شبیه‌سازی واکنش قلیایی سنگدانه‌ها تاکنون پژوهش‌های اندکی در این ارتباط صورت گرفته است. از جمله پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه می‌توان به مطالعه لامع و میرزابزرگ[9] [28, 27] اشاره کرد که با توسعه یک مدل اجزای محدود واکنش قلیایی سنگدانه‌ها و در نظر گرفتن آثار تابش خورشید، درزهای سازه‌ای و مراحل ساخت اقدام به شبیه‌سازی واکنش در سدهای بتنی قوسی و بررسی رفتار لرزه‌ای آن‌ها نمودند. نتایج نشان داد که تابش خورشید می‌تواند به شکل قابل توجهی بر رفتار انبساطی ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه تاثیر بگذارد. از سوی دیگر، در این پژوهش مشخص شد که پاسخ‌های سازه‌ای عمومی و پاسخ‌های لرزه‌ای سدهای قوسی به‌طور محسوسی تحت تاثیر واکنش قلیایی سنگدانه‌ها قرار می‌گیرند. در پژوهشی دیگر گورگا[10] و همکاران [29] به منظور ارزیابی و پیش‌بینی انبساط و خسارات ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها در سازه‌های بتنی اقدام به توسعه یک مدل اجزای محدود واکنش قلیایی سنگدانه‌ها برای شبیه‌سازی آن در یک پل نمودند که تحت اثر خسارات تحمیل

1. Olave
2. Gautam
3. Incremental
4. Free Volumetric Expansion
5. Principle Direction
6. Uncoupled Axial Expansion
7. Maximum Possible Axial Expansion
8. Compressive Principal Stress
9. Lamea & Mirzabozorg
10. Gorga

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-09]

[DOI: 10.22034/22.4.5]

شده از جانب واکنش قلیایی سنگدانه‌ها تخریب شده بود. نتایج حاکی از آن بودند که مدل اجزای محدود توسعه داده شده قادر است انبساط و خسارت ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها را به شکل مطلوبی پیش‌بینی کند؛ به طوری‌که الگوهای ترک‌خوردگی بدست آمده از شبیه‌سازی به شکل مناسبی با الگوهای بدست آمده از بررسی‌های میدانی هماهنگی داشتند. همچنین شبیه‌سازی صورت گرفته نشان داد که برخی از خاموت‌های پایه پل مورد بررسی که متاثر از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها بود تسلیم شده و پل در آستانه شکست قرار داشت.

پوربهی[1] و همکاران [30] در سال ۲۰۱۹ با توسعه یک مدل اجزای محدود واکنش قلیایی سنگدانه‌ها اقدام به شبیه‌سازی واکنش در یک سد بتنی با در نظر گرفتن اثر همزمان بارهای لرزه‌ای و اندرکنش سازه–سیال نمودند. نتایج نشان داد که اثر توام موارد مزبور می‌تواند رفتار لرزه‌ای سد را به دلیل زوال تدریجی بتن ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها و وجود ترک‌ها بطور قابل توجهی تحت تاثیر قرار دهد؛ به گونه‌ای که پاسخ‌های لرزه‌ای سد متاثر از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها بزرگتر از پاسخ‌های لرزه‌ای سد فاقد اثر واکنش بودند.

با وجود مطالعات متعدد ذکر شده، در حال حاضر همچنان چارچوبی نظام‌مند که با کاربرد آن بتوان آثار واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها را از نظر انبساط و خسارت در نرم‌افزارهای متعارف اجزای محدود شبیه‌سازی نمود وجود ندارد. بر این اساس، در پژوهش حاضر با توسعه یک مدل محاسباتی مبتنی بر مدل ریاضی گاوتام و همکاران در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس[2] [31]، شبیه‌سازی انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها و اثر متقابل خسارت بتن بر آن در اعضای بتن مسلح انجام می‌شود.

۱- مدل‌سازی اجزای محدود

به منظور دستیابی به چارچوبی قابل اتکا برای مدل‌سازی انبساط ناشی از واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها در اعضای بتن مسلح با شرایط آرماتورگذاری و هندسه‌ی متنوع، ابتدا مجموعه‌ای از مطالعات آزمایشگاهی موجود در ادبیات فنی به عنوان موارد درستی‌آزمایی انتخاب شد. این مجموعه از مطالعات، که در جدول (۱) ارائه شده‌اند، شامل تعدادی از مکعب‌های مطالعه شده توسط والد و همکاران [19] و الفورد و همکاران [20]، تیر مطالعه شده توسط والد و همکاران [21]، و ستون‌های مطالعه شده توسط برچی و همکاران [23 ,24] بوده‌اند که در آن‌ها انبساط ناشی از واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها در جهات مختلف بر حسب زمان ثبت و گزارش شده است.

برای شبیه‌سازی انبساط ناشی از واکنش‌ها و آثار آن روی مشخصات بتن از قابلیت سابروتین‌نویسی در نرم‌افزار آباکوس، استفاده شد. این قابلیت به کاربر اجازه می‌دهد طیف گسترده‌ای از ویژگی‌های نرم‌افزار را شخصی‌سازی کند. سابروتین‌های USDFLD و UEXPAN از حلگر آباکوس استاندارد به ترتیب برای شبیه‌سازی مشخصات مصالح بتنی و انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. از آنجایی که طی واکنش با افزایش انبساط مشخصات مکانیکی بتن تغییر می‌کنند، استفاده از سابروتین USDFLD این قابلیت را به کاربر می‌دهد که مشخصات مصالح بتنی را طی شبیه‌سازی با تعریف متغیرهای میدانی[3] اصلاح کند. از این رو در این پژوهش مشخصات بتن با استفاده از این سابروتین و داده‌های ارائه شده در جدول (۲) در شبیه‌سازی اصلاح شد. این جدول که توسط موسسه مهندسان سازه[4] (ISE) [8] پیشنهاد شده است، حد پایین مقادیر باقی‌مانده مشخصات مکانیکی نمونه‌های استوانه‌ای و مکعبی غیرمسلح نسبت به نمونه‌های متناظر ۲۸ روزه فاقد اثر واکنش قلیایی سنگدانه‌ها را با توجه به افزایش انبساط نشان می‌دهد. همچنین با استفاده از دستور GETVRM از زیربرنامه USDFLD امکان دسترسی به مقادیر تنش‌های اصلی در نقاط انتگرال‌گیری مصالح بتنی برای شبیه‌سازی انبساط ناشی از واکنش میسر شد.

1. Pourbehi
2. Abaqus
3. Field Variables
4. Institute of Structural Engineers

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-09]
[DOI: 10.22034/22.4.5]

جدول ۱. موارد مطالعاتی برای درستی‌آزمایی مدل

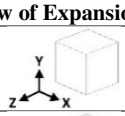
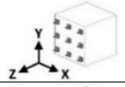
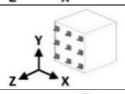
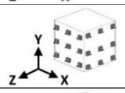
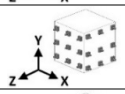
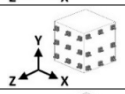
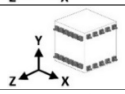
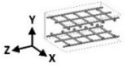
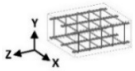
No.	Example	3D View of Expansion Zone	Material Properties / Reinforcement
1	**A1-000b** Wald et al. (2017) & Allford (2016)		$f_c' = 35.6$ MPa, $E_c = 35.6$ GPa, $f_t' = 2$ MPa $\rho_x = 0.0, \rho_y = 0.0, \rho_z = 0.0$
2	**A1-001b** Wald et al. (2017) & Allford (2016)		$f_c' = 35.6$ MPa, $E_c = 35.6$ GPa, $f_t' = 2$ MPa, $f_y = 475$ MPa $\rho_x = 0.0, \rho_y = 0.0, \rho_z = 0.5$ %
3	**A1-003** Wald et al. (2017) & Allford (2016)		$f_c' = 35.6$ MPa, $E_c = 35.6$ GPa, $f_t' = 2$ MPa, $f_y = 475$ MPa $\rho_x = 0.0, \rho_y = 0.0, \rho_z = 1.5$ %
4	**A1-101b** Wald et al. (2017) & Allford (2016)		$f_c' = 35.6$ MPa, $E_c = 35.6$ GPa, $f_t' = 2$ MPa, $f_y = 475$ MPa $\rho_x = 0.5$ %, $\rho_y = 0.0, \rho_z = 0.5$ %
5	**A1-303** Wald et al. (2017) & Allford (2016)		$f_c' = 35.6$ MPa, $E_c = 35.6$ GPa, $f_t' = 2$ MPa, $f_y = 475$ MPa $\rho_x = 1.5$ %, $\rho_y = 0.0, \rho_z = 1.5$ %
6	**A1-102a** Wald et al. (2017) & Allford (2016)		$f_c' = 35.6$ MPa, $E_c = 35.6$ GPa, $f_t' = 2$ MPa, $f_y = 475$ MPa $\rho_x = 0.5$ %, $\rho_y = 0.0, \rho_z = 1.1$ %
7	**A3-102-L1** Wald et al. (2017) & Allford (2016)		$f_c' = 32.0$ MPa, $E_c = 32.0$ GPa, $f_t' = 1.9$ MPa, $f_y = 475$ MPa $\rho_x = 0.5$ %, $\rho_y = 0.0, \rho_z = 1.1$ %
8	**Biaxially Reinforced Structure** Wald et al. (2017)		$f_c' = 33.0$ MPa, $E_c = 33.0$ GPa, $f_t' = 1.9$ MPa, $f_y = 475$ MPa $\rho_x = 1.1$ %, $\rho_y = 0.7$ %, $\rho_z = 0.0$
9	**Triaxially Reinforced Structure** Bracci et al. (2012)		$f_c' = 32.0$ MPa, $E_c = 32.0$ GPa, $f_t' = 1.9$ MPa, $f_y = 475$ MPa $\rho_x = 1.6$ %, $\rho_y = 0.22$%, $\rho_z = 0.11$ % σ_x = -3.45 MPa

Table 1. Case studies for model validation

جدول ۲. تخمین افت مشخصات مکانیکی بتن در اثر واکنش قلیایی سنگدانه‌ها [8]

Mechanical property as a percentage of that in unaffected concrete at 28 days					
Free Expansion (%)	**0.05**	**0.10**	**0.25**	**0.50**	**1.00**
Compressive Strength (Cylinder)	95	80	60	60	---
Tensile Strength (Splitting & Torsional)	85	75	55	40	---
Modulus of Elasticity	100	70	50	35	30

Table 2. Estimated Mechanical Properties of AAR-Affected Concrete [8]

۱-۲- شبیه‌سازی انبساط ناشی از واکنش

به منظور شبیه‌سازی انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها در طول زمان یا سینتیک[1] واکنش، از مدل نیمه تحلیلی لاریو[2] و همکاران [32] استفاده شده است. مدل مذکور از یک منحنی S شکل تبعیت نموده و رابطه آن در دمای θ_0 به شرح معادله ۳ می‌باشد. در این رابطه، $\varepsilon_{AAR}^{\infty}$، $\tau_{Latency}$ و τ_{Charac} به‌ترتیب کرنش حجمی نهایی آزاد[3]، زمان تاخیر[4] و زمان مشخصه[5] هستند.

$$\varepsilon(t) = \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau_{Charac}}}}{1 + e^{-\frac{t - \tau_{Latency}}{\tau_{Charac}}}} \times \varepsilon_{AAR}^{\infty} \qquad (۳)$$

شکل (۲) گسترش انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها با زمان را طبق مدل لاریو در دمای θ_0 نشان می‌دهد. به منظور

1. Kinetic
2. Larive
3. Ultimate Free Volumetric Expansion
4. Latency Time
5. Characteristic Time

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-09]

[DOI: 10.22034/22.4.5]

تعیین $\tau_{Latency}$ و τ_{Charac}، نیاز به در اختیار داشتن داده‌های انبساط در برابر زمان از نمونه‌های غیرمسلح است. با توجه به این داده‌ها و کاربرد قابلیت برازش منحنی[1] از نرم‌افزار متلب[2] [33] مقادیر پارامترهای مورد اشاره برای هر مخلوط بتنی تخمین زده شد. همچنین بر اساس تاریخچه انبساط آزاد ثبت شده، $\varepsilon_{AAR}^{\infty}$ قابل تعیین است. از آنجایی که بتن در این مطالعه به عنوان محیطی همگن و پیوسته در نظر گرفته می‌شود، باید اثر مشخصات سنگدانه، که تاثیر مهمی بر خواص انبساطی بتن دارد، به صورت غیر مستقیم در مدل وارد شود. اثر مشخصات مکانیکی سنگدانه‌ها به صورت مشخصات مکانیکی بتن و شرایط انبساطی آن‌ها از طریق پارامترهای $\tau_{Latency}$ و τ_{Charac} لحاظ شد.

برای توزیع جهتی انبساط حجمی نهایی آزاد ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها در جهت‌های اصلی از مدل گاوتام و همکاران [26, 25] مطابق روابط ۱ و ۲ استفاده شد. سابروتین UEXPAN انبساط حجمی نهایی آزاد را به صورت غیرهمسانگرد و بر اساس دستگاه مختصات مرجع (X، Y و Z) در بتن شبیه‌سازی کرده و از این روی با استفاده از ریاضیات و تبدیلات مختصات[3]، مقادیر انبساط محاسبه شده در دستگاه مختصات اصلی به دستگاه مختصات مرجع آباکوس تبدیل شد.

شکل ۲. انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها طبق مدل لاریو [32]

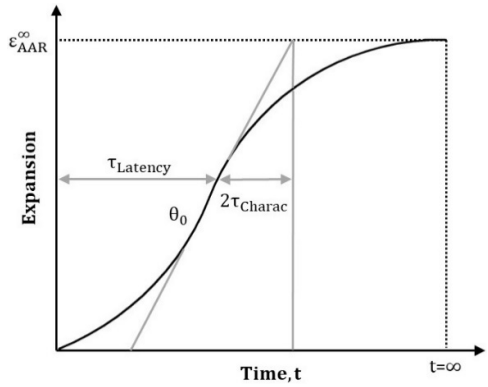


Fig 2. AAR-induced expansion based on Larive Model [32]

۲-۲- رفتار تنش-کرنش مصالح

به منظور شبیه‌سازی رفتار غیرخطی بتن در فشار، از مدل ارائه شده توسط تورنفلت[4] و همکاران [34] استفاده شد که در معادله ۴ ارائه شده و در شکل (۳) برای موارد مختلف درستی‌آزمایی شده قابل مشاهده است.

$$\frac{f_c}{f_c'} = \frac{n\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)}{n - 1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^{nk}} \qquad (۴)$$

شکل ۳. مدل رفتار فشاری بتن

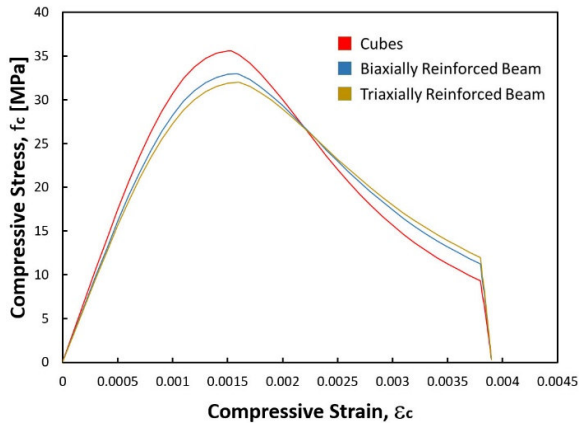


Figure 3. Compressive behavior of concrete

در رابطه ۴، f_c' و ε_0 به‌ترتیب مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های استوانه‌ای و کرنش متناظر با نقطه اوج و همچنین ضرایب n و k ثابت‌های معادله می‌باشند. مقادیر پارامترهای n، k و ε_0 برای بتن با چگالی متعارف با توجه به روابط ۵ و ۶ قابل تعیین است.

$$n = 0.8 + \left(\frac{f_c'}{2500}\right) \qquad (۵)$$

$$k = \begin{cases} 1 & \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \le 1 \\ 0.67 + \left(\frac{f_c'}{9000}\right) \ge 1 & \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} > 1 \end{cases} \qquad (۶)$$

در روابط فوق f_c' بر حسب psi است. با در اختیار داشتن E_c (مدول الاستیسیته اولیه) مقدار کرنش متناظر با نقطه اوج نیز با کاربرد رابطه ۷ قابل محاسبه است.

1. Curve Fitting
2. MATLAB
3. Coordinate Transformations
4. Thorenfeldt

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-09]
[DOI: 10.22034/22.4.5]

$$\varepsilon_0 = \frac{f'_c}{E_c}\left(\frac{n}{n-1}\right) \quad (۷)$$

برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی بتن در کشش از مدل ارائه شده توسط بلاربی و شو[1] [35] استفاده شده است که در معادله ۸ ارائه شده و منحنی آن مطابق شکل (۴) است.

$$f_r = f_{cr}\left(\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_r}\right)^{0.4} \quad (۸)$$

در این رابطه، f_{cr} و ε_{cr} به ترتیب مقاومت کششی مستقیم بتن و کرنش متناظر با آن هستند.

شکل ۴. مدل رفتار کششی بتن [35]

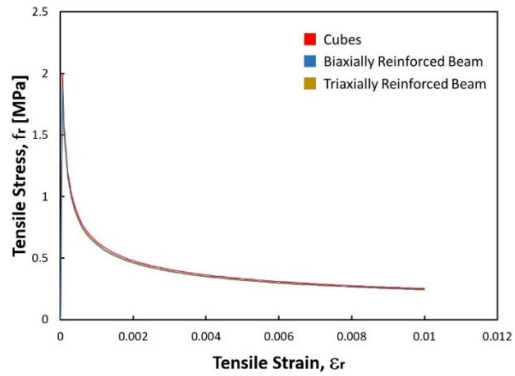


Figure 4. Tensile behavior of concrete [35]

۳-۲- شبیه‌سازی آسیب در بتن

برای تعریف رفتار بتن از مدل آسیب پلاستیک بتن[2] استفاده شد که قادر است خسارت و رفتار غیرخطی بتن را در شرایط تنشی مختلف به نحو مطلوبی شبیه‌سازی کند. این مدل رفتاری مبتنی بر پلاستیسیته بتن و به صورت خسارت مداوم آن تعریف شد، که در آن ترک‌خوردگی کششی و خردشدگی فشاری به عنوان دو سازوکار اصلی خرابی بتن در نظر گرفته می‌شوند [31]. پارامترهای پلاستیسیته مدل آسیب پلاستیک بتن در پژوهش حاضر به شرح جدول (۳) می‌باشند.

جدول ۳. پارامترهای مدل آسیب پلاستیک بتن

Dilation Angle	Eccentricity	fb0/fc0	K	Viscosity Parameter
35	0.1	1.16	0.667	**0.001**

Table 3. Concrete Damage Plasticity parameters

فولاد مورد استفاده در بتن مسلح به صورت مستقل از بتن و بر اساس مدل سه خطی با ناحیه تسلیم وسخت‌شدگی مطابق شکل ۵ تعریف شد.

شکل ۵. منحنی تنش کرنش فولاد

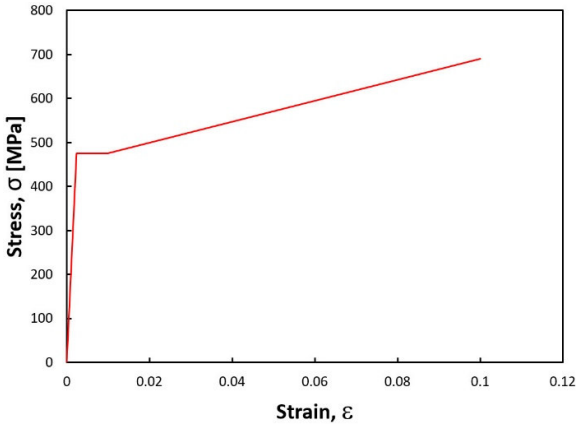


Figure 5. Stress-strain curve for steel

۴-۲- مش‌بندی

برای مش‌بندی بتن و فولاد نمونه‌های مطالعاتی به ترتیب از المان شش وجهی خطی[3] (C3D8R) و المان میله‌ای خطی[4] (T3D2) استفاده شده است. برای اندرکنش بین بتن و آرماتور، به‌منظور ساده‌سازی محاسبات فرض پیوستگی کامل[5] از طریق مدفون نمودن[6] المان‌های آرماتور داخل بتن بر اساس پژوهش‌های عددی گذشته [22] [29] اعمال گردید.

داده‌های حاصل از تحلیل‌های اولیه نشان دادند که نتایج شبیه‌سازی انبساط به اندازه المان‌های مورد استفاده حساس است. از این رو به‌منظور دستیابی به اندازه بهینه المان‌ها در این پژوهش، با انتخاب یک نمونه مکعبی با حساسیت بالاتر و تغییر اندازه المان‌های آن، آنالیز حساسیت انجام شد که در قسمت بعد به آن اشاره می‌شود.

1. Belarbi and Hsu
2. Concrete Damage Plasticity
3. Linear Hexahedral Element
4. Linear Bar Element
5. Perfect Bond
6. Embedment

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-09]
[DOI: 10.22034/22.4.5]

۲- نتایج و بحث

با انجام تحلیل روی مدل‌های ساخته شده، نتایج کرنش‌ها و تنش‌ها بر اساس زمان از نرم‌افزار استخراج گردید. سپس با حذف زمان، نمودار انبساط در هر یک از جهت‌های مورد بررسی بر حسب میزان کل انبساط حجمی (برابر با مجموع انبساط در سه جهت متعامد مفروض) ترسیم شد تا وضعیت توزیع جهتی انبساط از نرم‌افزار بررسی شود. نتایج گذشته نشان داده‌اند که نمودار حاصل شده وابستگی چندانی به شرایط محیطی مانند دما و رطوبت نداشته و بیشتر تابعی از وضعیت تنش‌ها، شرایط مرزی، و چیدمان آرماتورها می‌باشد [22, 20]. بر همین اساس، تمرکز نتایج گزارش شده در این مطالعه بیشتر بر نمودارهای انبساط محوری (جهتی)-انبساط حجمی[1] است.

هنگام تعیین ابعاد بهینه مش مشاهده شد که با افزایش درصد آرماتور، دقت نتایج وابستگی بیشتری نسبت به اندازه المان‌های مورد استفاده پیدا می‌کند. شکل (۶) نتایج حاصل از آنالیز یکی از مکعب‌های حساس را برای سه اندازه مختلف نشان می‌دهد. نتایج بیانگر حساسیت نتایج شبیه‌سازی به اندازه المان‌ها است. با انجام آنالیز حساسیت مکعب A1-003 در محدوده ۱۶۰ تا ۱۶ میلی‌متر، اندازه بهینه المان‌ها به لحاظ دقت مناسب در شبیه‌سازی و نیز هزینه محاسباتی منطقی ۲۶/۶۷ میلی‌متر تخمین زده شد.

شکل ۶. آنالیز حساسیت مکعب A1-003

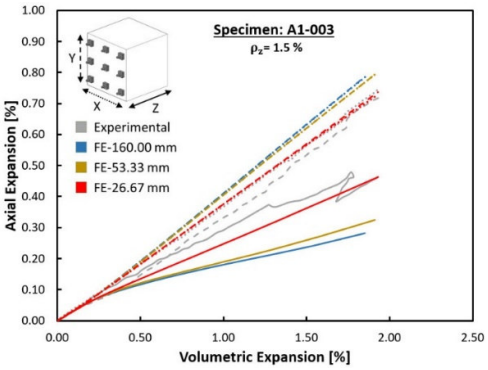


Fig 6. Sensitivity analysis for A1-003

شکل (۷) انبساط‌های به دست آمده از مدل عددی را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی برای نمونه مکعبی غیرمسلح (نمونه A1-000b) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مدل عددی توسعه داده شده به خوبی قادر است انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها را در بتن غیرمسلح شبیه‌سازی کند. همان‌گونه که انتظار می‌رود، در این حالت، توزیع انبساط در سه جهت یکسان بوده و بخش ثابتی از انبساط در هر یک از سه جهت رخ می‌دهد.

شکل ۷. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و نتایج اندازه‌گیری شده برای مکعب A1-000b

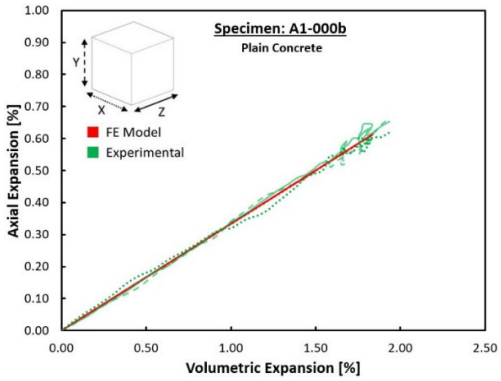


Fig. 7. Comparison of computed and measured results for Specimen A1-000b

شکل (۸ و ۹) به‌ترتیب نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی را در قیاس با نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های مکعبی A1-001b و A1-003 نشان می‌دهند. این دو نمونه فقط در یک جهت (Z) و با درصدهای آرماتور به‌ترتیب ۰/۵ و ۱/۵ مسلح شده‌اند.

شکل ۸. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده مکعب A1-001b

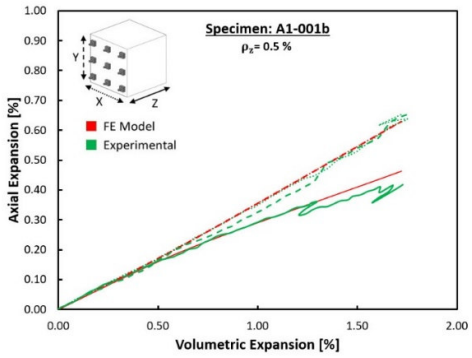


Fig. 8. Comparison of computed and measured results for Specimen A1-001b

1. Axial Expansion vs. Volumetric Expansion

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-09]
[DOI: 10.22034/22.4.5]

شکل ۹. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده مکعبA1-003

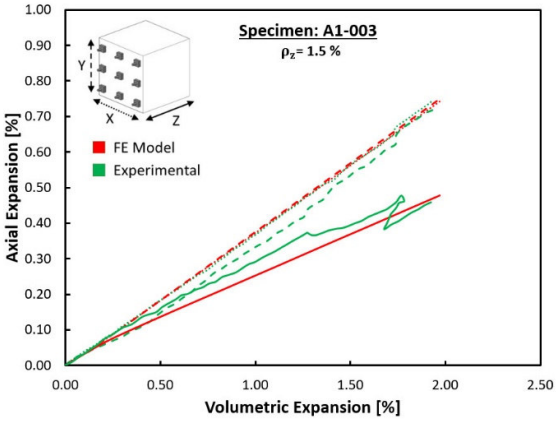


Fig. 9. Comparison of computed and measured results for Specimen A1-003

همان‌گونه که از نتایج بر می‌آید، مدل عددی توسعه داده شده به خوبی قادر است انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها را در این مکعب‌های بتن مسلح شبیه‌سازی کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که نرخ گسترش انبساط در جهت Z نسبت به دو جهت متعامد دیگر، از ابتدای شروع واکنش به تدریج کاهش یافته و در نتیجه، مقدار انبساط در آن جهت از دو جهت غیرمسلح دیگر همیشه کمتر می‌باشد. به عبارت دیگر، حضور آرماتور در بتن می‌تواند انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها را کاهش داده و تا حدودی کنترل کند. این مشاهده با نتایج ادبیات فنی قبلی و فرضیات مدل ریاضی گاوتام و همکاران سازگار بوده و بیانگر نقش موثر تنش ایجاد شده در اثر انبساط در آرماتورها در کاهش انبساط در جهت مقید شده است.

تنش آرماتورها در انبساط کلی ۰/۲ درصد برای نمونه A1-001b در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، آرماتورها در این حد از انبساط به تنش تسلیم می‌رسند. در یک بررسی پارامتری برای این نمونه، مقدار تنش تسلیم تغییر داده شد. نتایج نشان داد که تنش تسلیم آرماتورها بطور محسوسی بر توزیع انبساط تاثیر می‌گذارد. همان‌گونه که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، با کاهش تنش تسلیم، توزیع انبساط در بتن مسلح به سمت الگوی توزیع در بتن غیرمسلح، یعنی نمونه A1-000b، تمایل پیدا می‌کند.

شکل ۱۰. سطح تنش آرماتورها در انبساط کلی ۰/۲ درصد (بر حسب مگاپاسکال)

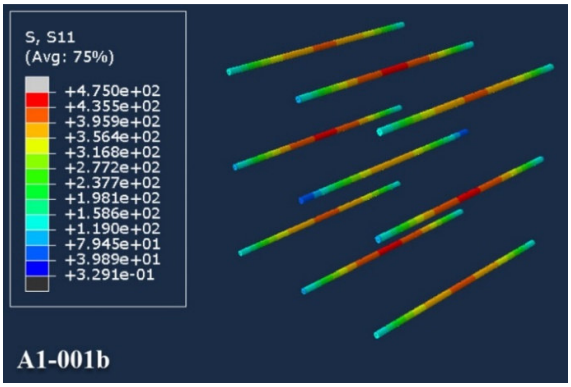


Fig. 10. Reinforcements stress level at 0.2% overall expansion (in MPa)

شکل ۱۱. اثر تنش تسلیم آرماتورها بر توزیع انبساط

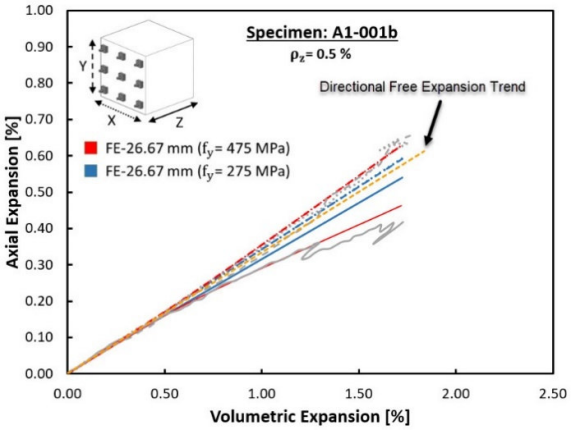


Fig. 11. Effect of reinforcements yield stress on expansion distribution

در مطالعات آزمایشگاهی گذشته، گزارش شده است که توزیع انبساط جهتی حساسیت نسبتاً کمی به تغییرات درصد آرماتور دارد [20]. این الگو در نتایج مطالعه عددی حاضر نیز برای نمونه‌های A1-001b و A1-003 در شکل (۱۲) قابل مشاهده است. با این وجود، تغییرات درصد آرماتور می‌تواند بر میزان تنش فشاری بوجود آمده در بتن تحت واکنش قلیایی سنگدانه‌ها تاثیر بگذارد. والد و همکاران [22] رابطه بین انبساط و فشار ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها در بتن مسلح را پیش از تسلیم آرماتورها به صورت رابطه (۹) بیان نمودند.

$$\sigma_i^{exp} = \frac{\varepsilon_i^{AAR}}{\left(\frac{1}{E_{C.Sec}} + \frac{1}{\rho E_S}\right)_i} \qquad (۹)$$

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-09]

[DOI: 10.22034/22.4.5]

در این رابطه، ε_i^{AAR} و σ_i^{exp} به‌ترتیب انبساط و تنش فشاری ناشی از واکنش‌ها در جهت i هستند. با توجه به آن که در نمونه‌های A1-001b و A1-003 از بتن و آرماتورهای مشابه استفاده شده است، مقادیر $E_{C.Sec}$ و E_S که به‌ترتیب مدول الاستیسیته سکانت بتن و مدول الاستیسیته فولاد می‌باشند، یکسان هستند. بنابراین در یک مقدار ثابت انبساط در جهت Z بتن A1-003 به‌دلیل برخورداری از درصد آرماتور (ρ) بزرگتر آن جهت، تنش‌های فشاری بزرگتری را نیز تجربه می‌کند. شکل (۱۳) تنش فشاری بتن (با علامت منفی) نمونه‌های A1-001b و A1-003 را در هنگام تسلیم آرماتورها در جهت Z نشان می‌دهد.

شکل ۱۲. اثر درصد آرماتور بر توزیع انبساط

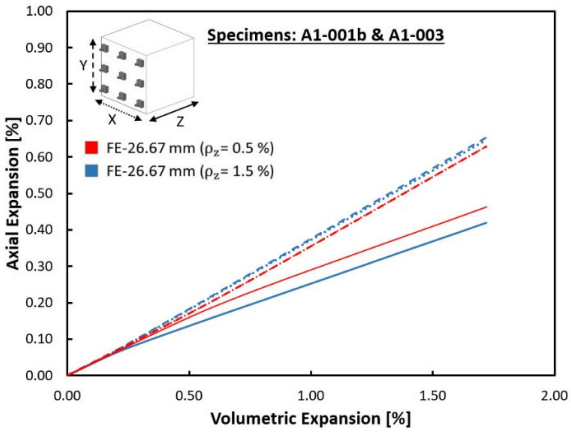


Fig. 12. Effect of reinforcement percentage on expansion distribution

به‌منظور تعیین فرایند دقیق برای شبیه‌سازی، تلاش شد تا اهمیت تغییر مشخصات بتن با استفاده از سابروتین بررسی شود. نتایج این بررسی، که در شکل (۱۴) برای نمونه‌های با درصد آرماتور مختلف نشان داده شده است، حاکی از حساسیت نسبتا کم نتایج شبیه‌سازی توزیع جهتی انبساط به اصلاح مشخصات بتن است؛ البته با افزایش درصد آرماتور، اهمیت اصلاح مشخصات بتن افزایش یافته است. این مسئله در واقع به ماهیت مدل اجزای محدود توسعه داده شده باز می‌گردد که با توجه به بازخوردی که به‌طور مستقیم از تنش‌ها دریافت می‌کند اقدام به توزیع و شبیه‌سازی انبساط می‌کند. هنگامی که درصد آرماتور افزایش می‌یابد تنش‌های به وجود آمده در بتن و اثرگذاری آن‌ها بر نتایج بیشتر می‌شود.

نتایج بررسی پارامتری تاثیر مشخصات مقاومتی بتن، شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته در شکل (۱۵) نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که نتایج توزیع انبساط جهتی، به دلایل مشابه بند قبل، تاثیر نسبتا کمی از تغییر انفرادی هر یک از مشخصات مقاومتی پذیرفته است؛ البته تاثیر تغییر مقاومت کششی بر نتایج کمی محسوس‌تر است.

شکل ۱۳. سطح تنش فشاری بتن در جهت Z از مکعب‌های A1-001b و A1-003 (بر حسب مگاپاسکال)

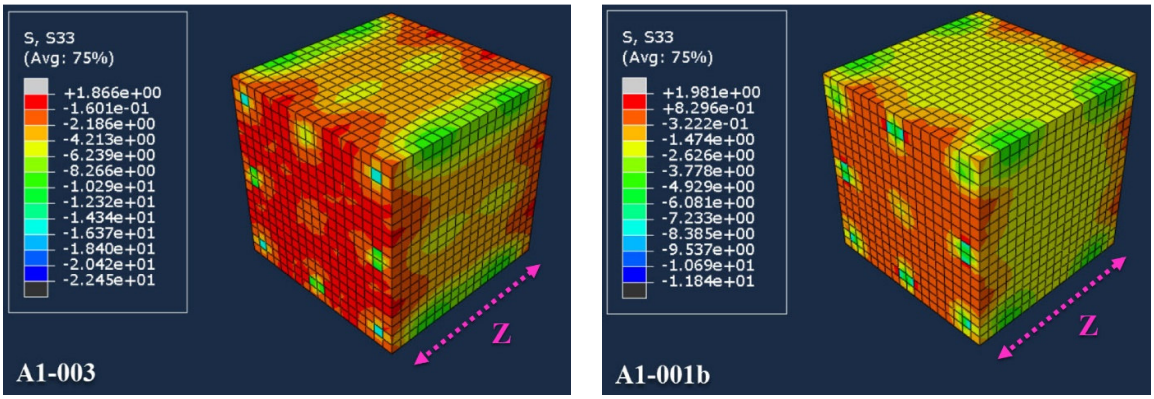


Fig. 13. Compressive stress level in concrete in the Z direction for Specimens A1-001b and A1-003 (in MPa)

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-09]

[DOI: 10.22034/22.4.5]

شکل ۱۴. اثر اصلاح مشخصات بتن بر نتایج شبیه‌سازی

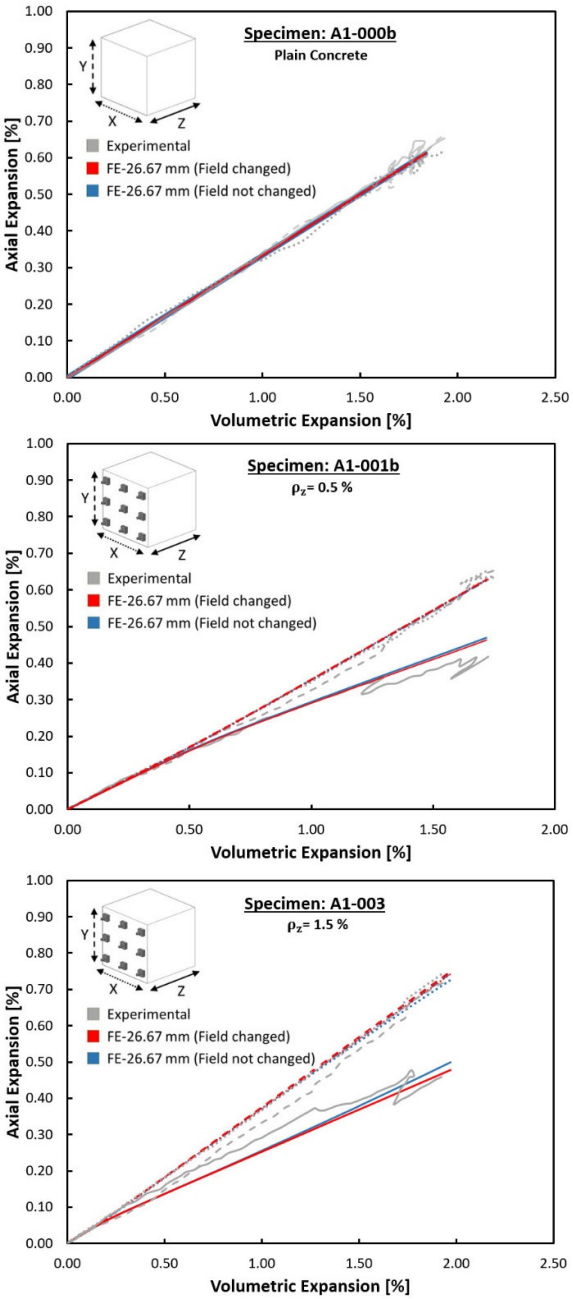


Fig. 14. Effect of modification of the concrete mechanical properties on expansion

شکل (۱۶) نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی را در قیاس با نتایج آزمایشگاهی برای مکعب‌های بتن مسلح A1-101b و A1-303 نشان می‌دهد. این دو نمونه به‌صورت دو محوره و با درصدهای آرماتور یکسان در جهات X و Z مسلح شده بودند. مقدار فولاد به کار رفته در این دو نمونه به‌ترتیب ۰/۵ و ۱/۵ درصد بوده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در این مکعب‌ها مقدار اختلاف انبساط بین جهت غیرمسلح و جهات مسلح بیشتر از زمانی است که نمونه تنها در یک جهت مسلح شده است. چنین مسئله‌ای به ماهیت انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها در بتن بازمی‌گردد که تحت آن، انبساط در یک جهت از بتن به وضعیت تنش در دو جهت متعامد دیگر نیز بستگی دارد [25].

شکل ۱۵. اثر پارامترهای مکانیکی بتن بر نتایج شبیه‌سازی

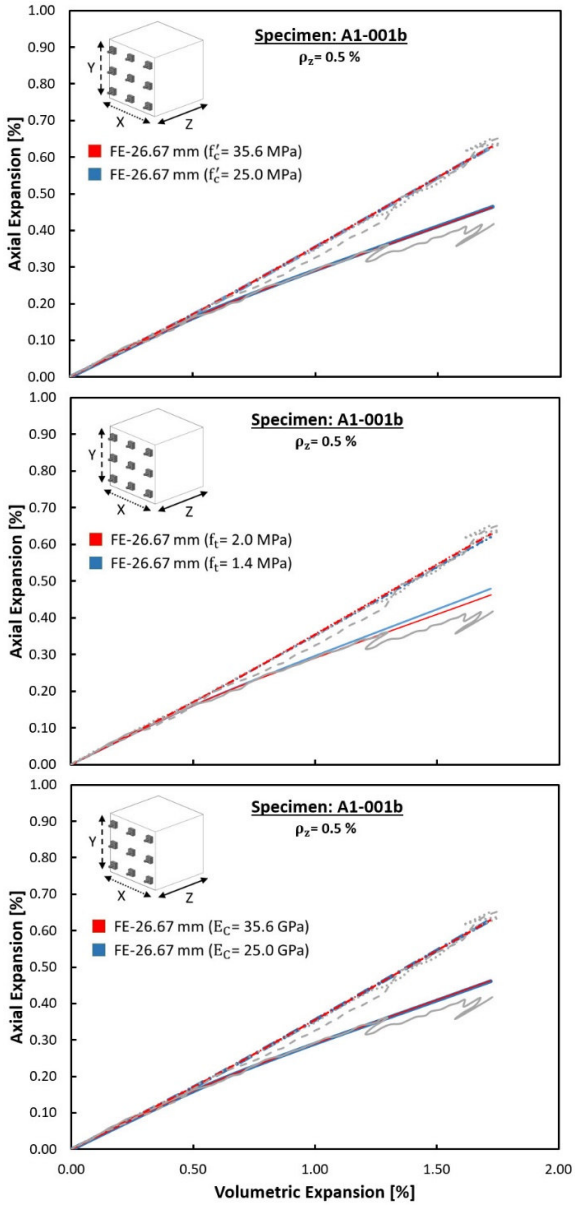


Fig. 15. Effect of concrete mechanical parameters on the simulation results

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-09]
[DOI: 10.22034/22.4.5]

شکل ۱۶. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده مکعب‌های A1-101b و A1-303

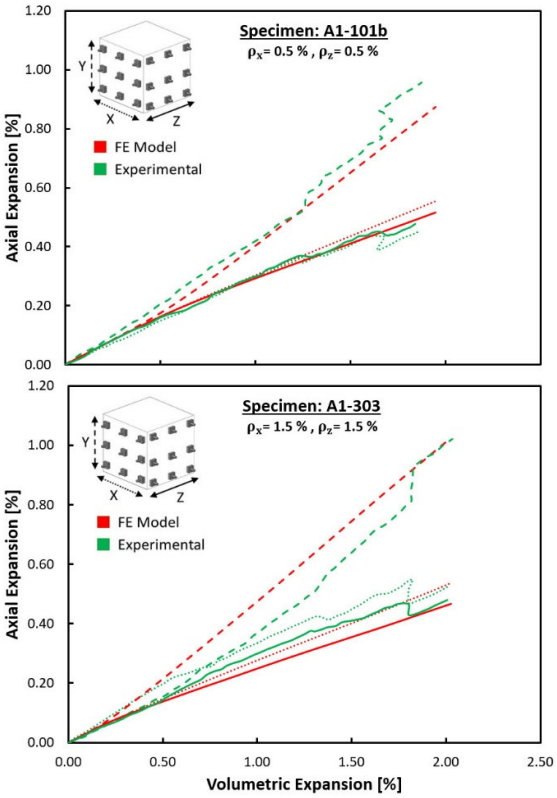


Fig. 16. Comparison of Computed and Measured Results for Specimens A1-101b and A1-303

شکل (۱۷) توزیع جهتی انبساط را برای مکعب بتن مسلح A1-102a نشان می‌دهد. این نمونه به صورت دو محوره و با درصدهای آرماتور ۰/۵ و ۱/۵ به‌ترتیب در جهات X و Z مسلح شده است. مشاهده می‌گردد که مدل عددی به‌خوبی قادر است انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه و اثر متقابل خسارات بوجود آمده بر انبساط را شبیه‌سازی نماید. همچنین مقدار انبساط در جهت فاقد آرماتور (Y) از مقدار انبساط در جهت دارای آرماتور سبک‌تر (X) بیشتر بوده و مقدار انبساط در جهت X از مقدار انبساط در جهت دارای آرماتور سنگین‌تر (Z) بیشتر است. شکل (۱۸) نتایج توزیع جهتی انبساط را برای نمونه بتن مسلح A3-102-L1 نشان می‌دهد. این نمونه مانند مکعب A1-102a به صورت دو محوره و با درصدهای آرماتور یکسان اما در دو لایه آرماتورگذاری شده است. در نتیجه، دو ناحیه مسلح و غیرمسلح در نمونه بوجود آمده که بنابر نتایج آزمایشگاهی، چنین مسئله‌ای می‌تواند انبساط در سراسر نمونه را برخلاف مکعب‌های قبل غیریکنواخت کند. هرچند نتایج عددی در این حالت، در مقایسه با حالت‌های قبلی تطابق کمتری با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند، اما مدل عددی توسعه داده شده قادر بوده است با دقت کلی قابل قبولی انبساط را در چنین شرایط آرماتورگذاری شبیه‌سازی کند.

شکل ۱۷. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده مکعب A1-102a

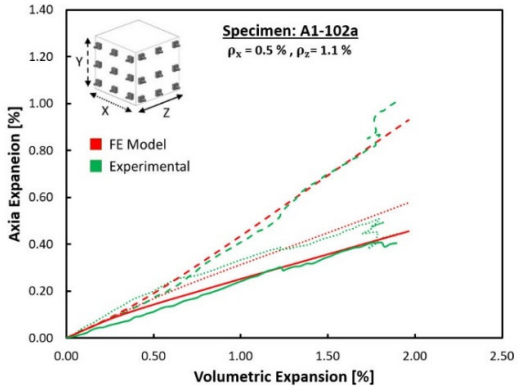


Fig. 17. Comparison of computed and measured results for Specimen A1-102a

نتایج آزمایشگاهی گذشته نشان داده‌اند که اندازه نمونه‌های مطالعاتی و فواصل آرماتورها می‌توانند بر رفتار انبساطی اعضای بتن مسلح تاثیر بگذارند. برای اطمینان از درستی نتایج مدل برای چنین تغییراتی، در شکل (۱۹) نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه در قیاس با نتایج آزمایشگاهی والد و همکاران برای Zone A از تیر ارائه شده است.

شکل ۱۸. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده مکعب A3-102-L1

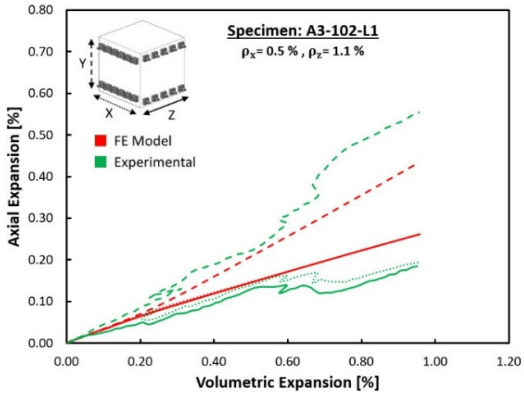


Fig. 18. Comparison of computed and measured results for cube A3-102-L1

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-09]
[DOI: 10.22034/22.4.5]

نتایج نمایش داده شده در شکل (۱۹) برای این تیر، که تنها در دو جهت طولی (Z) و عرضی (X) و با درصدهای آرماتور به ترتیب ۱/۱ و ۰/۷ مسلح شده بود، نشان دادند که مدل عددی توسعه داده شده قادر است در شرایط متفاوت اندازه اعضای بتن مسلح و فاصله بین آرماتورها، رفتار انبساطی غیرهمسانگرد را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند.

شکل ۱۹. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده برای تیر مسلح شده در دو محور

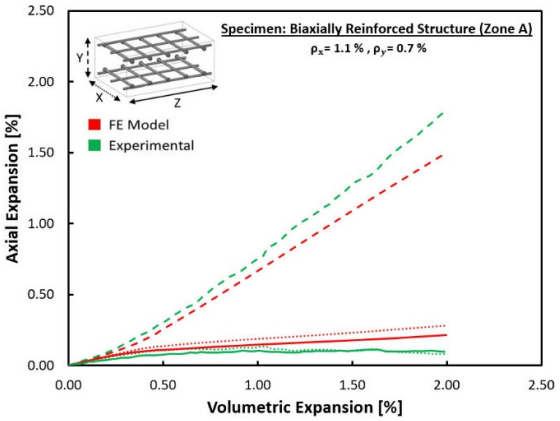


Figure 19. Comparison of computed and measured results for the biaxially reinforced beam

آخرین نمونه تحت مطالعه، ستون‌های بتن مسلح اولیو و همکاران است که در آن‌ها اثر همزمان قید داخلی آرماتور و تنش خارجی (بارگذاری) بر رفتار انبساطی اعضای بتن مسلح مورد بررسی قرار می‌گیرند. ستون‌های مورد اشاره به صورت سه محوره و با درصدهای آرماتور ۰/۲۲، ۰/۱۱ و ۱/۶ به‌ترتیب در جهات X، Y و Z مسلح شده و بوسیله ۱۶ کابل فولادی پس‌کشیده تحت تنش فشاری محوری ۳/۴۵ مگاپاسکال قرار داده شده بودند. همان‌طور که در شکل (۲۰) می‌توان مشاهده نمود، در جهت طولی تیر (Z) به دلیل حضور درصد آرماتور بزرگتر نسبت به دو جهت دیگر و نیز تنش فشاری خارجی، انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها بدون آن‌که آرماتورهای طولی به حد تسلیم برسند متوقف می‌شود.

مشاهده می‌شود که برای این نمونه نیز مدل عددی قادر است انبساط در جهت Z را به نحو مطلوبی شبیه‌سازی نماید؛ اما در دو جهت دیگر، شبیه‌سازی با دقت کمتری صورت گرفته است.

با توجه به پیچیدگی مسئله مورد بررسی، الگوی کلی تغییرات همچنان قابل قبول به نظر می‌رسد. دقت نسبتا پایین‌تر در شبیه‌سازی انبساط جهات X و Y را می‌توان به شرایط نگهداری نسبتا نامتعارف، تغییرات زیاد محل و شرایط مرزی نمونه‌ها در دوره نگهداری در این مطالعه آزمایشگاهی نیز مربوط دانست.

شکل ۲۰. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده تیر مسلح شده در سه محور

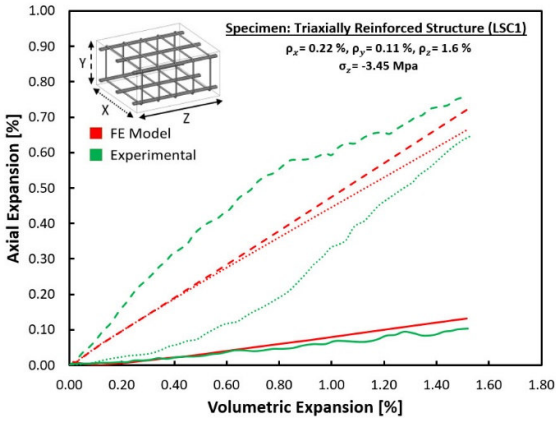


Fig. 20. Comparison of computed and measured results for the triaxially reinforced beam

به طور کلی، تفاوت بین نتایج اندازه‌گیری شده در مطالعات آزمایشگاهی مورد بررسی و نتایج مدل عددی مورد استفاده، در محدوده قابل قبول قرار می‌گیرند. پایش انبساط ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها دارای مشکلات قابل توجه به‌دلیل زمان‌بر بودن، آثار دمایی و خطاهای اندازه‌گیری است. در نمونه‌های مربوط به دو شکل (۱۸ و ۲۰) نیز تطابق بین نتایج مدل مورد بررسی در یک یا دو جهت با نتایج آزمایشگاهی کمتر بوده است؛ در حالی که شرایط فیزیکی مسئله به نتایج مدل شباهت بیشتری داشته و به نظر می‌رسد نوسانات نتایج آزمایشگاهی بیشتر به نوسانات دمایی و خطاهای اندازه‌گیری مرتبط باشد.

۳- نتیجه‌گیری

اثرگذاری واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها روی سازه‌های بتن مسلح فرایندی پیچیده است که توام با انبساط غیرهمسانگرد، ایجاد آسیب و کاهش مقاومت و سختی بتن، و از سوی دیگر

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-09]
[DOI: 10.22034/22.4.5]

ایجاد پیش‌تنیدگی با اثر مثبت بر اعضای سازه‌ای است. در نتیجه همزمانی این پدیده‌ها، شبیه‌سازی اثر این واکنش‌ها، که اهمیتی حیاتی در ارزیابی، مدیریت نگهداری و محاسبات بهسازی سازه-های موجود متاثر از آن‌ها دارد، تاکنون با موفقیت محدودی همراه بوده و روش‌های موجود در ادبیات فنی برای آن مستلزم استفاده از برنامه‌نویسی مستقل و موردی با قابلیت عملیاتی بسیار محدود برای سازه‌های واقعی بوده است.

در این مطالعه، یک چارچوب شبیه‌سازی معرفی شده است که در آن با کاربرد سابروتین‌های عددی در محیط نرم‌افزار آباکوس، انبساط حجمی کلی ناشی از واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها محاسبه شده و به صورت غیرهمسانگرد با توجه به وضعیت تنش در بتن توزیع می‌شود. در نتیجه، توزیع تنش‌ها در بتن و آرماتور و آسیب ناشی از واکنش‌ها توسط نرم‌افزار اجزای محدود محاسبه شده و در گام‌های بعدی، وضعیت سازه متاثر از این واکنش‌ها تحت بارگذاری دلخواه مانند هر سازه دیگری قابل شبیه‌سازی می‌شود. در نتیجه کاربرد این رویکرد، می‌توان از یک نرم‌افزار اجزای محدود تجاری و در دسترس برای شبیه‌سازی هر نوع سازه با هندسه و بارگذاری پیچیده استفاده نمود.

در مقاله حاضر، گام‌های این چارچوب عددی–نرم‌افزاری و کاربرد آن برای شبیه‌سازی نمونه‌های متعدد آزمایشگاهی از ادبیات فنی، شامل نمونه‌های مکعبی و نمونه‌های تیر بزرگ مقیاس ارائه شد. نتایج نشان داد که مدل مزبور قادر است با دقت مناسبی انبساط آزاد را به صورت غیرهمسانگرد در جهات مختلف توزیع نماید، به شکلی که انبساط محاسبه شده در مورد تمامی نمونه‌های مکعبی عموماً با خطای کمتر از ۱۰ درصد بر انبساط اندازه‌گیری شده منطبق بوده است. در مورد نمونه‌های تیر بزرگ مقیاس، خطای تخمین انبساط کمی بزرگتر بوده است. چیدمان و فواصل آرماتورها بر دقت تخمین مدل عددی توسعه داده شده تاثیر گذار بوده‌اند، و نتایج مدل پیشنهادی در اعضای بتن مسلح دارای آرماتورهای با فواصل کوچکتر، دقیق‌تر از اعضای با فواصل بزرگتر آرماتور است.

کاربرد مدل معرفی شده همچنین موارد زیر را نشان داد:

- اصلاح مشخصات بتن، شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، و مدول الاستیسیته تاثیر اندکی بر توزیع جهتی انبساط دارد. به عبارت دیگر، صدمه دیدن بتن در اثر رخداد واکنش‌ها، توزیع انبساط را دستخوش تغییر ناچیزی می‌کند. البته تاثیر مقاومت کششی بر نتایج نسبت به دو پارامتر دیگر بیشتر است.
- تنش تسلیم آرماتورهای مصرفی به صورت قابل توجهی بر نتایج توزیع انبساط حجمی تاثیر می‌گذارد؛ به شکلی که با کاهش تنش تسلیم، توزیع انبساط جهتی نمونه بتن مسلح به روند توزیع انبساط حجمی آزاد در نمونه غیرمسلح نزدیک می‌شود. بنابراین در مورد سازه‌هایی که در آن‌ها از آرماتور با تنش تسلیم کمتر استفاده شده باشد، نگرانی در مورد صدمه ناشی از انبساط بیشتر است.
- با افزایش درصد آرماتور در یک جهت از عضو بتن مسلح، میزان انبساط در آن جهت کاهش می‌یابد؛ به طوری که در جهت با درصد آرماتور بزرگتر انبساط کمتری نسبت به جهت یا جهات با درصد آرماتور کوچکتر رخ می‌دهد.

۴- منابع

[1] Stanton, T. E., 1940. Expansion of Concrete through Reaction between Cement and Aggregate. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 101(1), pp. 54-84.

[2] Fournier, B. and Berube, M.A., 2000. Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: A Review of Basic Concepts and Engineering Implications. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(2), pp. 167-191.

[3] Deschenes, D.J., Bayrak, O. and Folliard K.J., 2009. ASR/DEF-Damaged Bent Caps: Shear Tests and Field Implications. Master's thesis, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, United States, 277 pp.

[4] Berube, M.A. and Fournier, B., 1993. Canadian Experience with Testing for Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete. *Cement & Concrete Composite*, 15(1-2), pp. 27-47.

[5] Thomas, M.D.A., Fournier, B. and Folliard, K.J., 2013. Alkali Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book (No. FHWA-HIF-13-019). United States, Federal Highway Administration, Office of Pavement Technology.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-09]

[DOI: 10.22034/22.4.5]

[6] Rigden, S.R., Majlesi, Y. and Burley, E., 1995. Investigation of Factors Influencing the Expansive Behavior, Compressive Strength and Modulus of Rupture of Alkali-Silica Reactive Concrete using Laboratory Concrete Mixes. *Magazine of Concrete Research*, 47(170), pp. 11-21.

[7] Ng, K.E. and Clark, L.A., 1992. Punching Tests on Slabs with Alkali-Silica Reaction. *The Structural Engineer*, 70(14), pp. 245-252.

[8] The Institution of Structural Engineers, 1992. Structural Effects of Alkali-Silica Reaction: Technical Guidance on the Appraisal of Existing Structures. London: SETO Ltd.

[9] Folliard, K.J., Barborak, R., Drimalas, T., Du, L., Garber, S., Ideker, J., Ley, T., Williams, S., Juenger, M., Fournier, B. and Thomas M.D.A., 2006. Preventing ASR/DEF in New Concrete: Final Report. *Technical Report No. FHWA/TX-06/0-4085-5*, Center of Transportation Research, The University of Texas at Austin, Austin, TX, 266 pp.

[10] Thomas, M.D.A., Fournier, B. and Folliard, K.J., 2008. Report on Determining the Reactivity Concrete Aggregates and Selecting Appropriate Measures for Preventing Deleterious Expansion in New Concrete Construction. *Technical Report No. FHWA-HIF-09-001*, The Transtec Group, Inc., Austin, TX, 28 pp.

[11] Thomas, M., Dunster, A., Nixon, P. and Blackwell, B., 2011. Effect of Fly Ash on the Expansion of Concrete due to Alkali-Silica Reaction-Exposure Site Studies. *Cement & Concrete Composites*, 33(3), pp. 359-367.

[12] Leemann, A., Bernard, L., Alahrache, S. and Winnefeld, F., 2015. ASR Prevention - Effect of Aluminum and Lithium Ions on the Reaction Products. *Cement and Concrete Research*, 76, pp. 192-201.

[13] Shi, Z., Shi, C., Zhang, J., Wan, S., Zhang, Z. and Ou, Z., 2018. Alkali-Silica Reaction in Waterglass-Activated Slag Mortars Incorporating Fly Ash and Metakaolin. *Cement and Concrete Research*. 108, pp. 10-19.

[14] Swamy, R.N. and Al-Asali, M.M., 1988. Engineering Properties of Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction. *ACI Materials Journal*, 85(5), pp. 367-374.

[15] Ahmed, T., Burley, E., Rigden, S. and Abu-Tair, A.I., 2003. The Effect of Alkali Reactivity on the Mechanical Properties of Concrete. *Construction and Building Materials*, 17(2), pp. 123-144.

[16] Smaoui, N., Bissonnette, B., Berube, M.A., Fournier, B. and Durand, B., 2006. Mechanical Properties of ASR-Affected Concrete Containing Fine or Coarse Reactive Aggregates. *Journal of ASTM International*, 3(3), pp. 1-16.

[17] Giannini, E.R. and Folliard, K.J., 2012. Stiffness Damage and Mechanical Testing of Core Specimens for the Evaluation of Structures Affected by ASR. *In Proceedings of the 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*.

[18] American Concrete Institute, 1998. ACI 221.1R-98: Report on Alkali-Aggregate Reactivity. Farmington Hills, MI: ACI.

[19] Wald, D.M., Allford, M.T., Bayrak, O. and Hrynyk, T.D., 2017. Development and Multiaxial Distribution of Expansions in Reinforced Concrete Elements Affected by Alkali-Silica Reaction. *Structural Concrete*, 18(6), pp. 914-928.

[20] Allford, M.T., Bayrak, O. and Hrynyk, T.D., 2016. Expansion Behavior of Reinforced Concrete Elements Due to Alkali-Silica Reaction. Master's thesis, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, United States, 144 pp.

[21] Wald, D.M., Martinez, G.A. and Bayrak, O., 2017. Expansion Behavior of a Biaxially Reinforced Concrete Member Affected by Alkali-Silica Reaction. *Structural Concrete*, 18(4), pp. 1-11.

[22] Wald, D.M., Bayrak, O. and Hrynyk T.D., 2017. ASR Expansion Behavior in Reinforced Concrete-Experimentation and Numerical Modeling for Practical Application. Ph.D. dissertation, The University of Taxes at Austin, Austin, Texas, United States, 281 pp.

[23] Bracci, J.M., Gardoni, P., Olave, M.K.E. and Trejo, D., 2012. Performance of Lap Splices in Large-Scale Column Specimens Affected by ASR and/or DEF. *Technical Report No. FHWA/TX-12/0-5722-1*, Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, College Station, TX, 380 pp.

[24] Olave, M.K.E., Bracci, J.M., Gardoni, P. and Trejo, D., 2015. Performance of RC Columns Affected by ASR. I: Accelerated Exposure and Damage. *Journal of Bridge Engineering*, 20(3), pp. 1-11.

[25] Gautam, B.P., Panesar, D.K., Sheikh, S.A. and Vecchio, F.J., 2017. Multiaxial Expansion-Stress Relationship for Alkali Silica Reaction-Affected Concrete. *ACI Materials Journal*, 114(1), pp. 171-184.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-09]

[DOI: 10.22034/22.4.5]

[26] Gautam, B.P., 2016. Multiaxially Loaded Concrete Undergoing Alkali-Silica Reaction (ASR). Ph.D. thesis, University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada, 187 pp.

[27] Lamea, M. and Mirzabozorg, H., 2015. Modeling of Alkali-Aggregate Reaction Effects on Seismic Behavior of Concrete Arch Dams. Ph.D. thesis, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran, 203 pp. (In Persian)

[28] Lamea, M. and Mirzabozorg, H., 2016. Alkali Aggregate Reaction Effects on an Arch Dam Behavior Including Simulation of Construction Stages and Contraction Joints. *Structural Engineering International*, 26(1), pp. 37-44.

[29] Gorga, R.V., Sanchez, L.F.M. and Martin-Perez, B., 2018. FE Approach to Perform the Condition Assessment of a Concrete Overpass Damaged by ASR After 50 Years in Service. *Engineering Structures*, 177, pp. 133-146.

[30] Pourbehi, M.S., Zijl, G.P.A.G.V. and Strasheim, J.A.V.B., 2019. Analysis of Combined Action of Seismic Loads and Alkali-Silica Reaction in Concrete Dams Considering the Key Chemical-Physical-Mechanical Factors and Fluid-Structure Interaction. *Engineering Structures*, 195, pp. 263-273.

[31] Abaqus 6.14 (Software), 2014. *Dassault Systemes Simulia Corporation*, Providence, RI.

[32] Larive, C. and Coussy, M.O., 1997. Combined Contribution of Experiments and Modelling to the Understanding of Alkali-Aggregate Reaction and its Mechanical Consequences. Ph.D. thesis, National Institute of Bridges and Roads, Paris, France, 327 pp. (In French)

[33] MATLAB 7.10.0 (R2012a), 2013**.** *The MathWorks Inc.*, Natick, Massachusetts, United States**.**

[34] Wight, J.K., 2015. Reinforced Concrete: Mechanics and Design (Seventh Edition). Hoboken, New Jersey: Pearson.

[35] Belarbi, A. and Hsu, T.T.C., 1994. Constitutive Laws of Concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened by Concrete. *ACI Structural Journal*, 91(4), pp. 465-474.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-09]

[DOI: 10.22034/22.4.5]

Numerical Framework for Simulation of Anisotropic Expansion due to Alkali-Aggregate Reactions in Concrete Members

Amir Reza Teymouri[1], Hossein Yousefpour[2*], Bahram Navayi Neya[3]

1- M.Sc. Student, Hydraulic Structures and Water Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Iran.
2- Assistant Professor, Babol Noshirvani University of Technology, Iran.
3- Professor, Babol Noshirvani University of Technology, Iran.

***hyousefpour@nit.ac.ir**

Abstract

Alkali-Aggregate Reaction (AAR) is a type of destructive and time-dependent chemical process in concrete that occurs between alkali ions in the cement and reactive minerals in certain types of aggregates. First recognized in 1930s, AAR is divided into two major categories of Alkali-Silica Reaction (ASR) and Alkali-Carbonate Reaction (ACR), both of which produce an expansive gel in the concrete which expands as a result of water absorption. The expansion of the AAR gel exerts significant internal pressure in the concrete, which may lead to internal and external cracks. With the occurrence of such cracks, many parameters affecting the stiffness and strength of the structure, such as compressive strength, tensile strength, and modulus of elasticity are diminished. As a result, the safety and serviceability of the structure may be seriously impacted. While advances in concrete materials science have led to means to prevent AAR in new construction, numerous existing structures worldwide, such as dams, power plants, and bridges, are affected by these reactions, the replacement of which may be impractical, or in some cases, impossible. As a result, it is crucial to simulate the behavior of such structures for reliable estimation of their safety and providing rehabilitation measures as necessary. One of the major indicators of AAR is the anisotropic expansion it generates inside the concrete member, which changes drastically based on the boundary conditions and internal and external restraint imposed on the expansions. As a result, the prediction of the anisotropic expansions is of utmost importance in successful simulation of AAR-affected reinforced concrete structures. This paper presents a practical simulation methodology for estimating the directional distribution of AAR expansions. The methodology makes use of the user subroutine capability in the finite element software Abaqus. A mathematical model is used to simulation AAR-related expansion based on the stress tensor, whereas concrete damage is simulated using the concrete damage plasticity model. The model is used to simulate a variety of AAR-affected reinforced and plain concrete cube and beam specimens for which the directional expansion data have been reported in the literature. Comparison between numerical and experimental results shows that the proposed methodology is capable of reliably simulating the AAR-induced expansions and the interaction between AAR expansions and the ensuing damage for a variety of reinforcement configurations. The model showed that the yield strength of reinforcing bars plays a major role in the directional distribution of expansion. However, changes in the mechanical properties of concrete were found to be inconsequential in the distribution of the expansions. Moreover, changes in distance between reinforcing bars and the reinforcement ratio in each direction were observed to affect the accuracy of the model. However, the model was found to be successful in reasonably capturing the trends in all case studies investigated. The results of this study are of great value to the simulation of AAR-affected reinforced concrete structures.

Keywords: Alkali-Aggregate Reaction, Expansion, Reinforced concrete, Finite Element Method.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-09]

[DOI: 10.22034/22.4.5]