

بررسی اثر واکنش قلیایی-سیلیسی بر رفتار سازه‌های تیرهای بتنی مسلح با استفاده از روش المان محدود

سعید حاجی قاسمعلی^{۱*}، علی اکبر رمضانیان پور^۲، وحید لطفی^۳، محمد حسین کاشفی‌زاده^۳

^۱ گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن، تهران، ایران

^۲ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

^۳ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه UTM مالزی، جوهور، مالزی

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۶ آبان ۱۳۹۲

بازنگری: ۳۰ مهر ۱۳۹۴

پذیرش: ۳۰ دی ۱۳۹۴

ارائه آنلاین: ۱۳ شهریور ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

واکنش قلیایی-سیلیسی

روش المان محدود

مدلسازی بتن

مدلسازی واکنش قلیایی-سیلیسی

تیر بتن مسلح

چکیده: واکنش قلیایی-سیلیسی یک واکنش شیمیایی است که در بین برخی از سنگدانه‌های سیلیکایی و محلول‌های قلیایی موجود در بتن رخ می‌دهد. این واکنش سبب انبساط بتن شده و در نهایت نیز منجر به ترک خوردگی و کاهش ایمنی، عمر و مقاومت آن خواهد شد. مدلسازی رفتار سازه‌های بتن متأثر از واکنش قلیایی-سیلیسی به علت دخالت مؤلفه‌های متعدد در این واکنش، کاری دشوار است. یکی از عوامل مهم در مدلسازی این واکنش، پیش‌بینی نحوه گسترش تنش‌ها و کرنش‌ها در بتن است. هدف اصلی این مقاله، بررسی تأثیر مخرب واکنش قلیایی-سیلیسی بر روی رفتار سازه‌های تیرهای بتنی مسلح با دو روش آزمایشگاهی و مدلسازی عددی و بر اساس روش‌های تحلیل سازه‌های متداول است. برای این منظور، در ابتدا تعدادی نمونه تیر در یک آزمایشگاه ساخته شد و پس از تحلیل سازه‌های نمونه‌ها با روش‌های متداول، یک مدل عددی برای تیرها در برنامه انسیس (Ansys) با روش المان محدود ارائه شد. نتایج مدلسازی عددی، همگرایی خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند. این در حالی است که سازگاری بهتری در ناحیه کششی در مقایسه با نواحی فشاری وجود دارد و استفاده از آرماتورهای فشاری نیز سبب افزایش سازگاری بین نتایج می‌شود. در ضمن، قرار دادن نیروی معادل بر روی تار ختنی در مدلسازی عددی می‌تواند کرنش در نواحی فشاری را بهبود بخشد.

۱- مقدمه

واکنش در مناطقی که دارای مقدار زیادی رطوبت است، رخ می‌دهد؛ مانند اسکله‌ها، در نزدیکی سطوح آب زیرزمینی، پشت دیوارهای محافظ، نزدیکی محل‌های اتصال و لبه‌های آزاد روسازی راه‌ها و در ستون‌ها و تیرهایی که در رودخانه‌ها در معرض جریان‌های آب قرار دارند. مشکلات ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها در سازه‌های بتنی از اوایل قرن بیستم مشاهده شد و برای نخستین بار در سال ۱۹۴۰ شناسایی شدند [۱]. واکنش قلیایی-سیلیسی به سه عامل بستگی دارد: آب، قلیای آزاد شده از سیمان حین هیدراسیون و مواد سیلیکایی موجود در برخی از انواع سنگدانه‌ها [۵-۲]. عوامل میکروسکوپی و گوناگونی در انبساط ناشی از واکنش قلیایی-سیلیسی دخیل هستند؛ مانند تخلخل بتن و همچنین نفوذپذیری، مکان و مقدار سنگدانه‌های فعال در مصالح. این عوامل با قرار گرفتن در کنار ویژگی نامتجانس بودن ذاتی بتن سبب می‌شوند که شبیه‌سازی انبساط ناشی از این واکنش امری دشوار باشد [۷-۳]. تاکنون تلاش‌های بسیاری برای کاهش اثرهای مضر واکنش قلیایی بر روی بتن صورت گرفته است و تحقیق‌های زیادی نیز در ارتباط با واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها بر روی سازه‌های بتن مسلح انجام شده است. مرجع [۸] رفتار تیرهای بتنی مسلح که با دو نوع مختلف سنگدانه فعال ساخته شده بودند را مورد بررسی قرار داد. نمونه‌های بتنی در یک محیط

تجزیه تدریجی سازه‌های بزرگ بتنی در گذشت زمان، پدیده‌ای بسیار متداول بوده است. یکی از دلایل اصلی این پدیده، واکنش بین سیمان موجود در بتن و مقداری از مصالح فعال^۱ سیلیسی است. این واکنش سبب ایجاد یک انبساط قابل توجه در بتن شده و میزان این انبساط وابسته به مصالح بکار رفته در بتن و همچنین شرایط آن در هنگام در معرض واکنش قرار گرفتن است. این فرایند که به عنوان واکنش قلیایی-سیلیسی شناخته می‌شود، تا کنون به تعداد زیادی از سازه‌های بتنی جهان مانند سدهای بزرگ و پل‌ها آسیب رسانیده است. واکنش قلیایی-سیلیسی رایج‌ترین نوع واکنش قلیایی سنگدانه‌ها در بتن است. واکنش قلیایی-سیلیسی در اثر واکنش بین یون‌های هیدروکسیل در محلول سیمان قلیایی با سنگدانه‌های فعال سیلیسی در سنگدانه بتن رخ می‌دهد. در نتیجه این واکنش، یک ژل تولید می‌شود که با جذب آب متراکم و حجم آن زیاد شده و سبب افزایش فشار به بتن و در نتیجه شکست آن می‌شود. شکست ناشی از این نوع

^۱ Reactive

* نویسنده‌دار مکاتبات: ghajji@riau.ac.ir

در کشور ژاپن مورد بررسی قرار داد. مرجع [۱۵] تأثیر آب را بر روی گسترش واکنش قلیایی-سیلیسی مورد مطالعه قرار داد. در این تحقیق، پس از آن که تیرها به مدت ۱۴ ماه تحت رطوبت بودند، وجه بالایی تیرهای فعال شده به وسیله آب به مدت ۹ ماه به طور کامل در آب قرار گرفت. این پدیده پوشش دیرهنگام توسط آب به سرعت سبب گسترش زیاد واکنش قلیایی-سیلیسی در راستاهای طولی و عرضی نمونه‌ها شده و موجب ترک‌خوردگی‌های طولی شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهند که دادن آب بیشتر به نمونه‌ها سبب ایجاد تأثیرهای مخرب بیشتری در آن‌ها خواهد شد. مرجع [۱۶] میزان مقاومت اعضای سازه‌ای تحت تأثیر واکنش قلیایی-سیلیسی را بررسی کرد. بعد از گسترش این واکنش در تیرها، هر دو وجه تیرهای فعال تحت مطالعات میکروسکوپی قرار گرفتند تا ویژگی‌های آسیب‌های ناشی از این واکنش مشخص شوند. پس از اندازه‌گیری شاخص‌های آسیب برای نمونه‌ها، تیرهای متعدد فعال و نیمه‌فعال تحت بارگذاری تا لحظه شکست قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بارگذاری‌های ثابت و چرخه‌ای و آرام‌تورهای طولی، نقش مهمی را در محدود کردن اثرهای این نوع واکنش بر روی نمونه‌ها دارند. همچنین در این مطالعه مشخص شد که واکنش قلیایی-سیلیسی سبب کاهش سختی فشاری، بسامد تشدید و همچنین مقاومت کششی بتن خواهد شد. اما بر روی مقاومت فشاری تأثیری نمی‌گذارد.

علاوه بر مطالعات اشاره‌شده در رابطه با تأثیر واکنش قلیایی-سیلیسی بر روی خواص مکانیکی، تحقیقات بسیاری نیز در ارتباط با مدلسازی و شبیه‌سازی واکنش قلیایی-سیلیسی انجام شده است. مرجع [۱۷] تأثیر واکنش قلیایی-سیلیسی را بر روی سد بلسار^۳ اسپانیا انجام دادند. در این سد، واکنش قلیایی-سیلیسی سبب یک تغییر مکان در قسمت بالادست سد شده بود. در این مطالعه، آن‌ها از روش المان محدود برای شبیه‌سازی و تحلیل سابقه تغییر مکان سد استفاده کردند. مرجع [۱۸] روشی برای شبیه‌سازی تورم ارتوتروپ^۴ بتن‌های در معرض واکنش قلیایی سنگدانه‌ها ارائه کردند. روش آن‌ها بر اساس توضیح تغییرهای مؤلفه‌های اصلی بتن و این نوع واکنش با استفاده از مدل ریاضی احتمالی بود. در مدل ارائه‌شده، بتن همانند مصالحی آسیب‌پذیر با کرنش‌های الاستیک و غیرالاستیک و واکنش قلیایی سنگدانه‌ها نیز با کمک تأثیرهای دمایی و رطوبتی شبیه‌سازی شد. مرجع [۱۹] تأثیر آب در واکنش قلیایی-سیلیسی را با استفاده از یک مدلسازی عددی بررسی کرد. در این تحقیق، در ابتدا چند نمونه تیر بتنی تهیه شده و تأثیر واکنش ذکر شده به صورت عملی مورد بررسی قرار گرفت و سپس روند رخ‌دادن این واکنش با یک روش عددی شبیه‌سازی شد. مرجع [۲۰] یک روش ماکروسکوپی را ارائه کرد که ویژگی اصلی آن، نشان‌دادن خاصیت غیرهمسان تورم شیمیایی و همین‌طور لحاظ کردن تأثیر جداسازی بین واکنش قلیایی سنگدانه‌ها و فشار بود. در این تحقیق، برای اطمینان از توانایی مدل در توصیف رفتار سازه‌های در معرض واکنش قلیایی در شرایط

کاملاً قلیایی و در دمای بالا برای تسریع فرایند قلیایی‌شدن نگهداری شدند. تیرها در معرض شرایط بارگذاری نشده، بارگذاری ثابت و بارگذاری متحرک قرار گرفتند. پس از آن که واکنش قلیایی-سیلیسی به اندازه قابل توجهی رخ داد، تیرها به صورت یکنواخت تا لحظه شکست تحت بارگذاری قرار گرفتند تا رفتار سازه‌ای و منحنی بار-تغییر مکان آن‌ها بدست آید. نتایج این تحقیق نشان دادند که واکنش قلیایی-سیلیسی و شرایط بارگذاری، تأثیر زیادی را بر روی سختی اولیه و ظرفیت حمل بار نهایی تیر بتنی مسلح ندارد. اما مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن را کاهش می‌دهد. در تحقیق مرجع [۹]، این نتیجه حاصل شد که تنها راه داشتن بتن مطمئن که واکنش قلیایی سنگدانه‌ها در آن رخ داده باشد، شناسایی پتانسیل فعالیت سنگدانه‌ها و یا اضافه کردن ترکیب پوزولانی به مصالح بتن است. مرجع [۱۰] یک مطالعه آزمایشگاهی را برای بررسی تأثیر واکنش قلیایی-سیلیسی بر روی رفتار سازه‌ای تیرهای بتنی مسلح انجام داد. در آزمایش آن‌ها، نمونه‌های بتنی به مدت یک‌سال در شرایط فعال‌سازی واکنش قلیایی-سیلیسی قرار گرفته و دو تیر برای شبیه‌سازی تیر در شرایط استفاده، تا لحظه ترک‌خوردگی تحت بارگذاری قرار گرفتند و اولین ترک‌خوردگی در سن ۱۲۵ روزگی مشاهده شد. قبل از اولین ترک‌خوردگی، تغییرها در خواص مکانیکی نمونه‌ها کم بود. اما پس از آن، مقاومت فشاری، استحکام کششی و مدول دینامیکی نمونه‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت. پس از گذشت یک‌سال از تسریع فعال‌سازی واکنش قلیایی-سیلیسی، مقاومت کششی تیرهای فعال شده تقریباً مشابه با تیرهای غیرفعال^۱ بود. همچنین تأثیر واکنش قلیایی-سیلیسی بر روی مقاومت کششی نمونه تیرهای بتنی ناچیز بود. مرجع [۱۱]، یک مطالعه آزمایشگاهی را برای بررسی اثر واکنش قلیایی-سیلیسی بر روی ۸ تیر بتنی مسلح تحت بارگذاری‌های ثابت و چرخه‌ای انجام داد. رفتار تیرهای متأثر از واکنش با تیرهایی که تحت شرایط این واکنش قرار نداشتند، مقایسه شد و نتایج نشان دادند که این نوع واکنش سبب افزایش ظرفیت برشی این تیرها شده و در نتیجه موجب بالا رفتن طول عمر آن‌ها خواهد شد. مرجع [۱۲] اثر واکنش قلیایی-سیلیسی را بر روی تیرهای فعال شده و نیمه‌فعال شده^۲ بررسی کرد. نتایج این بررسی نشان می‌دهند که نمونه تیرهای بتنی که دارای سنگدانه‌هایی با پتانسیل فعالیت بالا بودند و در معرض محلول هیدروکسید سدیم قرار گرفتند، دچار تغییرهای زیادی در خواص مکانیکی شدند. این در حالی است که نمونه‌ها با سنگدانه‌های نیمه‌فعال دچار تغییرهای بسیار کمی در خواص مکانیکی شده و تیرهای با مقاومت بالا که در معرض محلول هیدروکسید سدیم قرار داشتند نیز دچار تغییرهای کم‌تری در خواص مکانیکی شدند. مرجع [۱۳] اثر واکنش قلیایی-سیلیسی را بر روی تیرهای بتنی مسلح مورد بررسی قرار داد و تغییر مکان‌های سه‌بعدی را بر روی پنج نمونه تیر بتنی مسلح در طی مدت ۱۴ ماه اندازه‌گیری کرد. مرجع [۱۴] شکست آرام‌تورها را در تیرهای بتنی مسلح در اثر واکنش قلیایی-سیلیسی

³ belsar

⁴ orthotropic swelling

¹ Non-reactive

² Moderately Reactive

مخرب گسترش واکنش قلیایی بر روی رفتار سازه‌های تیرهای بتنی مسلح و همچنین خواص مکانیکی استوانه‌های بتنی بررسی شود. نمونه‌های تیر و استوانه‌های بتنی با سنگدانه‌های فعال و غیرفعال ساخته شدند. سیمان مورد استفاده، سیمان نوع II تهران بود. به منظور اطمینان از وقوع واکنش قلیایی، از مصالح بکار رفته در سد استور^۲ ایران استفاده شد. سنگدانه‌ها با توجه به نمونه‌های ارسالی از محل احداث سد، شامل دو نوع ماسه عبوری از الک شماره ۱۶ با وزن مخصوص ۲/۵۳ و ۲/۵۷ و شن عبور کرده از الک ۰/۷۵ اینچ (۱۹ میلی‌متر) بودند. میزان فعال‌بودن این سنگدانه‌ها توسط دو آزمایش استاندارد ملات منشور تسریع شده [۲۲] و منشور بتنی [۲۳] تعیین شد. مصالح غیرفعال نیز از شن و ماسه تهران تهیه شده‌اند که شامل ماسه عبوری از الک شماره ۱۶ و شن عبور کرده از الک ۰/۷۵ اینچ (۱۹ میلی‌متر) بودند. در طرح اختلاط هر دو نمونه‌های فعال و غیرفعال، نسبت سنگدانه‌های درشت، ریز و آب به سیمان به ترتیب برابر با ۲/۵، ۲/۲۵ و ۰/۴۸ انتخاب

بارگذاری خاص و همین‌طور شرایط مرزی، نتایج آزمایشگاهی مربوط به نمونه‌های بتنی فعال شبیه‌سازی شدند. مرجع [۲۱] مدلی را بر اساس روش المان محدود برای بررسی رفتار مکانیکی سازه‌های آسیب‌دیده از واکنش قلیایی-سیلیسی ارائه داد. مدل ارائه‌شده پدیده‌های زیر را در نظر می‌گرفت: خزش بتن، تنش ناشی از ترکیبات ژل موجود در واکنش قلیایی سنگدانه‌ها و آسیب مکانیکی. یک مدل رئولوژیکی بر اساس مؤلفه‌های ذکر شده ارائه شد تا اثر ترکیب‌شدن پدیده‌های ذکر شده را اندازه‌گیری نماید. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که مدل ارائه‌شده توانایی پیش‌بینی رفتار تیرهای در معرض واکنش قلیایی-سیلیسی را دارا است.

۲- اهمیت تحقیق

تعداد زیادی از سازه‌های موجود در جهان از بتن‌های فعال ساخته شده‌اند که در معرض واکنش قلیایی-سیلیسی هستند. با وجود انجام تعداد زیاد این پژوهش‌ها، برطرف‌نمودن کامل اثرهای این واکنش غیرممکن است و تنها روش برای کاهش تأثیرهای مضر آن، کاهش آسیب‌های ناشی از این واکنش است. مفید بودن این روش‌ها به طور قابل توجهی به پیش‌بینی مناسب نحوه گسترش تنش‌ها و کرنش‌ها در بتن بستگی دارد. برای سازه‌های بتنی (مانند سدها و پل‌ها)، نیاز مبرمی به مدل‌های عددی که تأثیرهای مکانیکی واکنش مذکور را نیز در نظر بگیرد، وجود خواهد داشت. مدلسازی این واکنش به علت توزیع تصادفی نواحی بتن با سنگدانه فعال و همچنین اطلاعات ناکافی در ارتباط با این نوع واکنش‌های شیمیایی، امری دشوار است [۲۱، ۱۸، ۲۰، ۴]. به همین دلیل، مباحث استاتیکی مانند توزیع تصادفی نقاط فعال، دما و شرایط رطوبت در مصالح، باید در مدلسازی‌های جدید اعمال شوند تا انبساط ناشی از این واکنش را بهتر نشان دهد [۲۰]. همچنین، مطالعات بیشتری در ارتباط با ترکیب‌کردن تنش‌ها و واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها باید انجام شوند تا بتوان از مدل‌ها در بارگذاری‌های پیچیده‌تر و شرایط مرزی گوناگون استفاده نمود [۲۰]. در نتیجه، در این مقاله سعی شده است تا کرنش‌های ناشی از واکنش قلیایی-سیلیسی با استفاده از نتایج تحلیل سازه‌های متداول تیرها مدلسازی شود. هدف اصلی این مقاله، بررسی تأثیر مخرب واکنش قلیایی-سیلیسی بر روی رفتار سازه‌های تیرهای بتنی مسلح با روش‌های تجربی آزمایشگاهی و مدلسازی عددی و بر اساس روش‌های تحلیل سازه‌های متداول است. برای این منظور، در ابتدا تعدادی نمونه تیر در یک آزمایشگاه ساخته شده و سپس تحلیل‌های ذکرشده بر روی آن‌ها انجام می‌شود. سپس یک تحلیل سازه‌های متداول بر روی نمونه‌ها انجام می‌گیرد و در گام بعدی، رفتار نمونه تیر با روش المان محدود در برنامه انسیس^۱ شبیه‌سازی می‌شود. یافته‌ها در آخرین گام بررسی شده و نتیجه‌گیری انجام می‌گیرد.

۳- تحقیق‌های آزمایشگاهی

در این مطالعه، در ابتدا نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شد تا اثرهای

² Oostoor

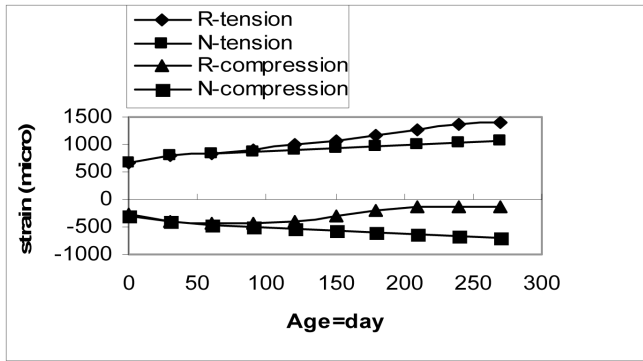
جدول ۱: نمونه‌های ساخته‌شده برای مطالعه آزمایشگاهی

Table 1. Specimens built for experimental study

نمونه‌های بتنی	ابعاد	آرما تور کششی	آرما تور فشاری
R1		2Φ8	-
N1		2Φ8	-
R2		2Φ10	-
N2		2Φ10	-
R3		2Φ12	-
N3		2Φ12	-
R4	۱۰۰×۱۵۰×۱۱۰۰	2Φ10	2Φ8
N4	میلی‌متر	2Φ10	2Φ8
R5		2Φ12	2Φ8
N5		2Φ12	2Φ8
R6		2Φ12	2Φ10
N6		2Φ12	2Φ10
R7		2Φ12	2Φ8
N7		2Φ12	2Φ8
R		ندارد	ندارد
N	۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر	ندارد	ندارد
R		ندارد	ندارد
N	۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر	ندارد	ندارد

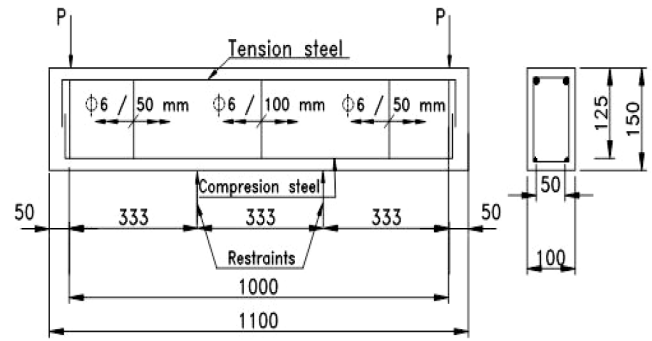
استوانه‌های
بتنی

¹ Ansys



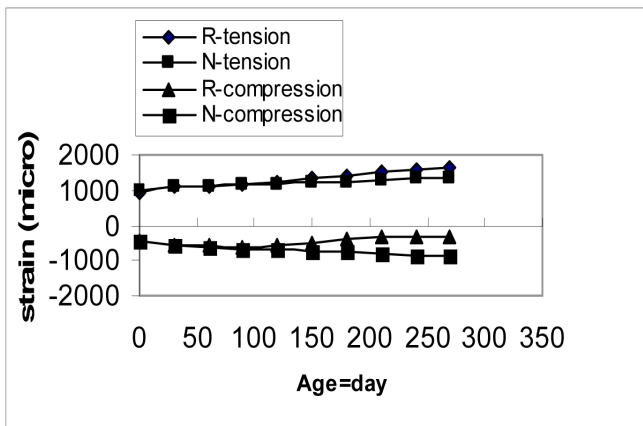
شکل ۳: تغییرهای کرنشی تیرهای R_1 و N_1 (کرنش: Strain، فشار: Compression، کشش: Tension)

Fig. 3. Strain variation for beams R1 and N1



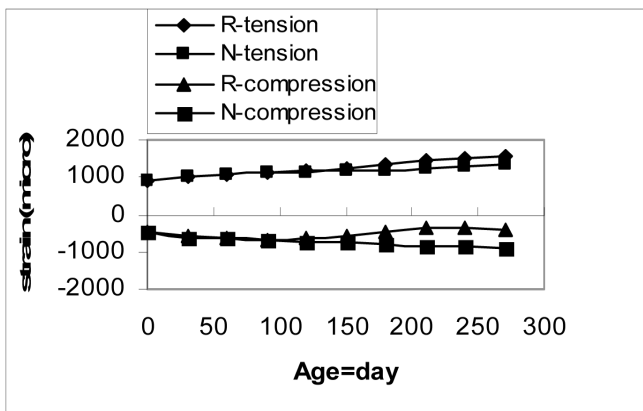
شکل ۱: تیرهای بتنی مسلح (Tension Steel: آرماتور کششی، Compression Steel: آرماتور فشاری)

Fig. 1. Reinforced concrete beams



شکل ۴: تغییرهای کرنشی تیرهای R_2 و N_2 (کرنش: Strain، فشار: Compression، کشش: Tension)

Fig. 4. Strain variation for beams R2 and N2

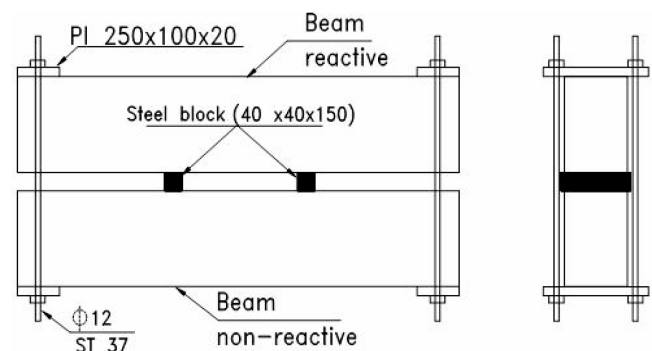


شکل ۵: تغییرهای کرنشی تیرهای R_3 و N_3 (کرنش: Strain، فشار: Compression، کشش: Tension)

Fig. 5. Strain variation for beams R3 and N3

شدند. تمامی تیرها دارای مقطع مستطیلی با ابعاد ۱۰۰ در ۱۵۰ میلی‌متر و طول ۱۱۰۰ میلی‌متر به صورت مسلح و با آرماتورهایی با نسبت‌های فشاری و کششی مختلف ساخته شدند. جزئیات نمونه‌های ساخته‌شده برای آزمایش در جدول ۱ و شکل ۱ نشان داده شده است. ابعاد انتخاب‌شده برای نمونه‌ها از تحقیق انجام‌شده توسط مرجع [۲۴] الهام گرفته شده است. به منظور شبیه‌سازی رفتار حین بهره‌برداری از نمونه‌ها، ۱۴ نمونه تیر و استوانه‌ها تحت شرایط استاندارد مراقبت شدند و سپس در حین فعالسازی واکنش تحت بارگذاری خمشی قرار گرفتند. جزئیات بارگذاری خمشی در شکل ۲ نمایش داده شده است. نمونه‌ها تحت مراقبت بلندمدت در دمای ۳۸ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد قرار گرفتند. در طول مدت فعالسازی بلندمدت، کرنش‌های بتن و فولاد موجود در بتن به طور مرتب اندازه‌گیری شدند. کرنش نمونه‌های بتنی در نواحی فشاری و کششی آن‌ها در نقطه میانی دهانه نمونه‌ها و کرنش فولاد هم با استفاده از کرنش‌سنج^۱ نصب‌شده بر روی دهانه میانی آرماتورها اندازه‌گیری شد.

^۱ strain gauge



شکل ۲: جزئیات بارگذاری خمشی

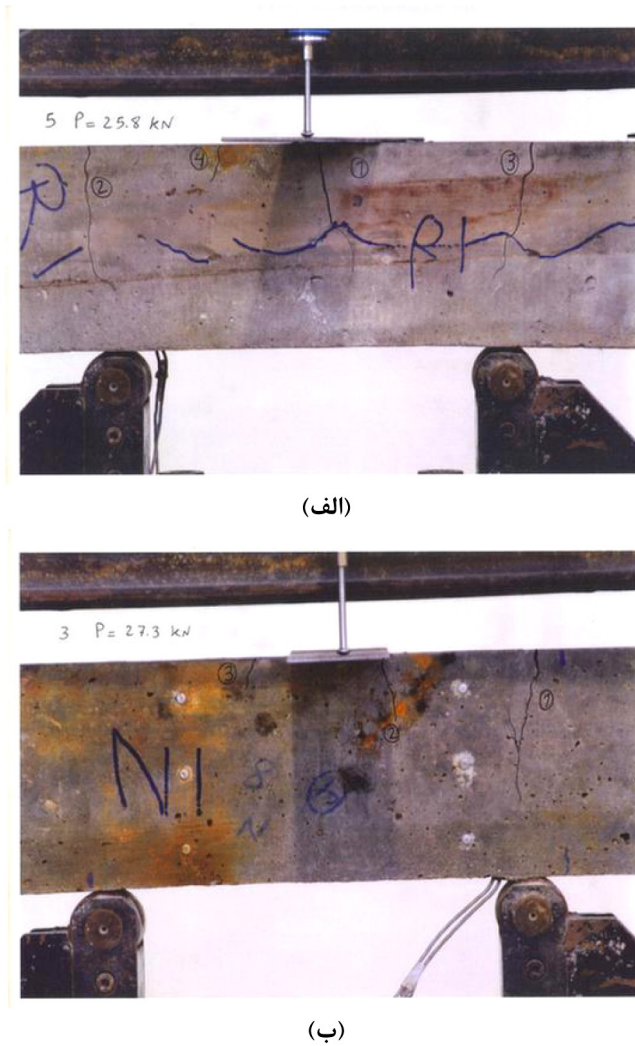
Fig. 2. Details of flexural loading

۳-۱- اندازه‌گیری کرنش نمونه‌ها

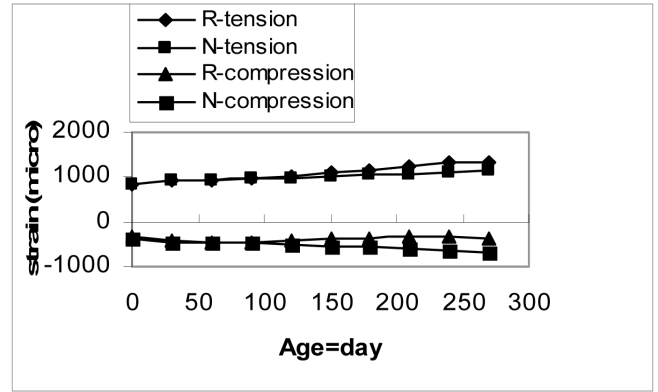
کرنش‌های اندازه‌گیری شده بتن در نمونه‌های فعال و غیرفعال، در شکل‌های ۳ تا ۸ نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها مشخص است که مقدار کرنش اندازه‌گیری شده در هر دو نمونه‌های فعال و غیرفعال تا ۱۰۰ روز اول آزمایش مشابه است. اما پس از گذشت ۱۰۰ روز، مقدار کرنش نمونه‌های فعال به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد که این افزایش، ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها است.

۳-۲- گسترش ترک در تیرهای بتنی مسلح

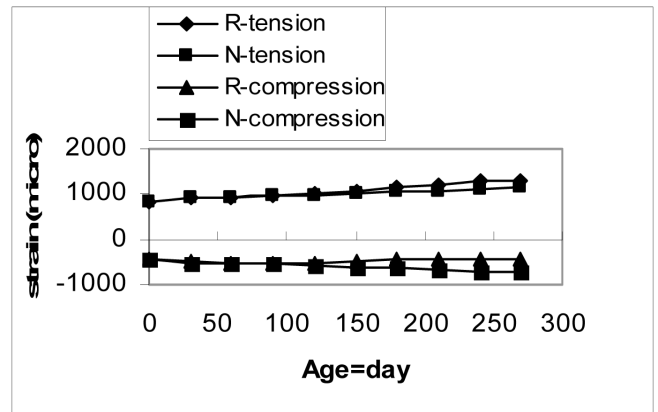
گسترش ترک در تیرهای N_1 و R_1 در شکل ۹ قابل مشاهده است. ترک‌های ناشی از واکنش قلیایی در تیر R_1 به صورت طولی در نمای تیز مشهود هستند. ترک‌های خمشی ناشی از بارگذاری تا بار بهره‌برداری نیز به صورت عرضی در تیر R_1 دیده می‌شوند. اما در تیر N_1 فقط ترک‌های



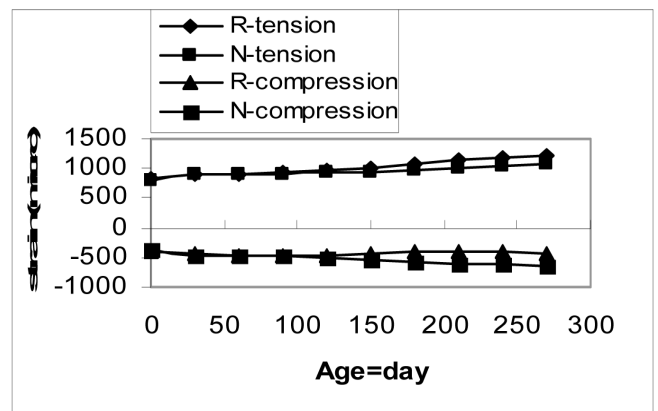
شکل ۹: گسترش ترک در تیر (الف) R_1 (ب) N_1
Fig. 9. Crack spreading in beams: (a) R1 (b) N1



شکل ۶: تغییرهای کرنشی R_4 و N_4
(کرنش: Strain، فشار: Compression، کشش: Tension)
Fig. 6. Strain variation for beams R4 and N4



شکل ۷: تغییرهای کرنشی تیرهای R_5 و N_5
(کرنش: Strain، فشار: Compression، کشش: Tension)
Fig. 7. Strain variation for beams R5 and N5



شکل ۸: تغییرهای کرنشی تیرهای R_6 و N_6
(کرنش: Strain، فشار: Compression، کشش: Tension)
Fig. 8. Strain variation for beams R6 and N6

جدول ۲: بار نظیر وقوع ترکها در تیرها

Table 2. Crack load in beams

شماره تیر	بار ترک اول (کیلو نیوتون)	بار ترک دوم (کیلو نیوتون)	بار ترک سوم (کیلو نیوتون)	بار ترک چهارم (کیلو نیوتون)
N1	۱۵	۲۳	۲۷/۳	۲۹/۵
R1	۷/۶	۸/۳	۱۱	۲۵/۸
N2	۱۶	۱۶	۴۰	۴۲
R2	۹/۴	۱۲/۳	۲۹/۴	۳۶/۶
N3	۱۸/۲	۲۲/۲	۲۲/۲	۲۴/۳
R3	۱۲	۱۲/۳	-	-
N4	۱۶/۸	۳۹/۵	۴۰	۴۱
R4	۱۰/۵	۱۰/۵	۱۰/۵	۱۸/۲
N5	۱۷/۵	۵۰	۵۰	-
R5	۱۱	۲۵/۶	۲۵/۶	-
N6	۱۹/۸	۲۹/۴	۳۵/۲	۴۷
R6	۱۳/۳	۲۷	۳۴	۴۵/۸

که این کاهش بار به ترتیب برابر با ۴۹/۳۳، ۴۱/۲۵ و ۳۴/۰۶ درصد است. اما در ارتباط با تیرهای R_3 و R_5 و R_6 با درصدهای مختلف آماتور فشاری، کاهش بار نظیر اولین ترک برابر با ۳۴/۰۶، ۳۷/۱۴ و ۳۷/۱۴ درصد بوده که با افزایش درصد آماتور فشاری، تأثیر چندانی بر کاهش این بار دیده نمی‌شود. از مطالب فوق، نتیجه می‌شود که وجود آماتور کششی نقش بسزایی در محدود کردن واکنش قلیایی دارد.

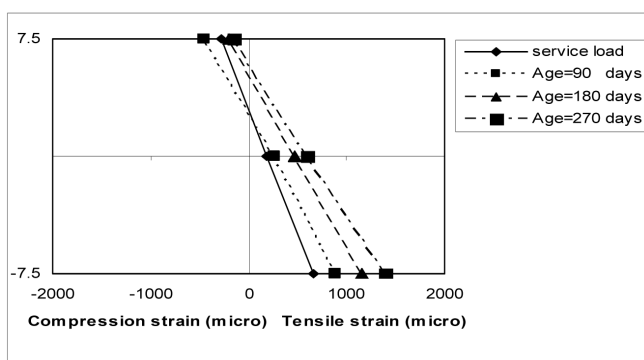
۳-۳- تحلیل سازه‌ای تیر بتنی مسلح با روش متداول

شکل‌های ۱۰ تا ۱۵ توزیع کرنش بتن در نمونه‌های آزمایش را نشان

جدول ۳: میزان درصد کاهش بار نظیر وقوع ترکها در تیرها

Table 3. Percentage loss of crack load compared to non-reactive beam

شماره تیر	درصد کاهش بار نظیر ترک اول نسبت به تیر شاهد
R1	۴۹/۳۳
R2	۴۱/۲۵
R3	۳۴/۰۶
R4	۳۷/۵۰
R5	۳۷/۱۴
R6	۳۷/۱۴



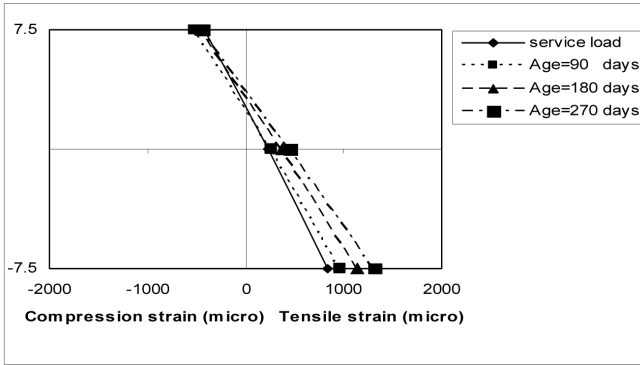
شکل ۱۰: توزیع کرنش بتن در تیر R_1

(Compression Strain: کرنش فشاری و Tensile Strain: کرنش کششی)

(کرنش کششی)

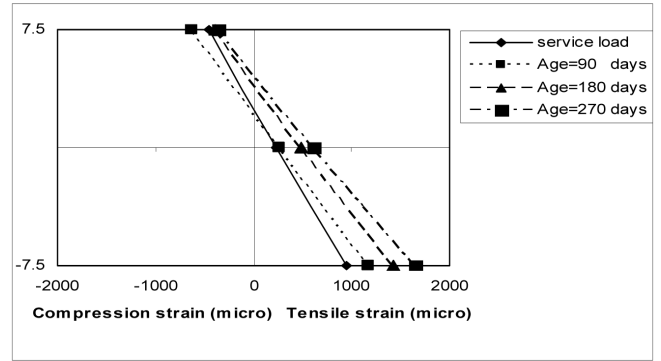
Fig. 10. Concrete strain distribution in R1 beam

عرضی خمشی ناشی از بارگذاری تا بار بهره‌برداری وجود دارند. بارهای نظیر ترک‌های مختلف در جدول ۲ و میزان درصد کاهش بار نظیر وقوع اولین ترک در جدول ۳ ارائه شده‌اند. با بررسی گسترش ترکها در تیرهای فعال و غیرفعال، مشخص شد که وقوع ترکها و گسترش آن‌ها در تیرهای فعال در بارهای کمتری رخ می‌دهد. همچنین با مشاهده جدول‌های فوق، نتیجه می‌شود که به دلیل وجود کرنش کششی ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها در تیرهای فعال، بار نظیر اولین ترک در تمامی تیرها با سنگدانه فعال کمتر از تیرهای شاهد مربوطه است. تأثیر افزایش درصد آماتور کششی برای تیرهای R_1 و R_2 و R_3 در کاهش بار نظیر وقوع اولین ترک مشهود است؛ به طوری



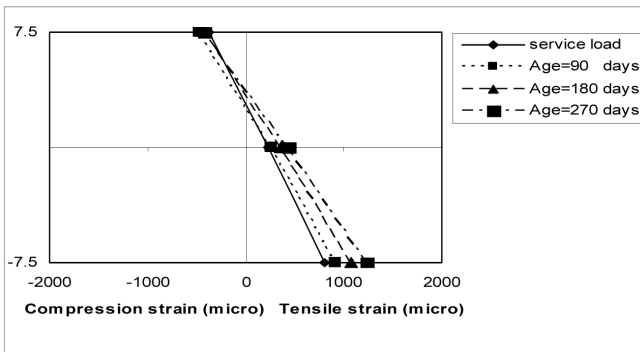
شکل ۱۴: توزیع کرنش بتن در تیر R_5
:Compression Strain: کرنش فشاری و Tensile Strain: کرنش کششی

Fig. 14. Concrete strain distribution in R5 beam



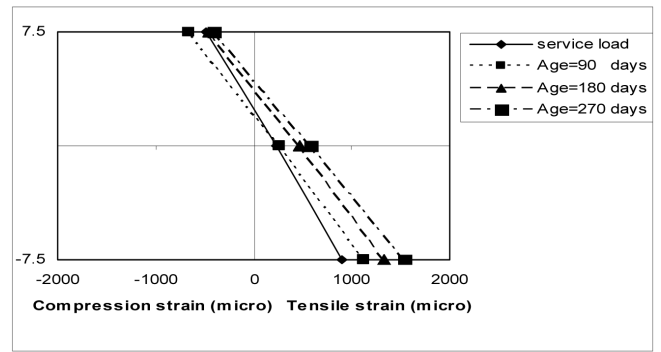
شکل ۱۱: توزیع کرنش بتن در تیر R_2
:Compression Strain: کرنش فشاری و Tensile Strain: کرنش کششی

Fig. 11. Concrete strain distribution in R2 beam



شکل ۱۵: توزیع کرنش بتن در تیر R_6
:Compression Strain: کرنش فشاری و Tensile Strain: کرنش کششی

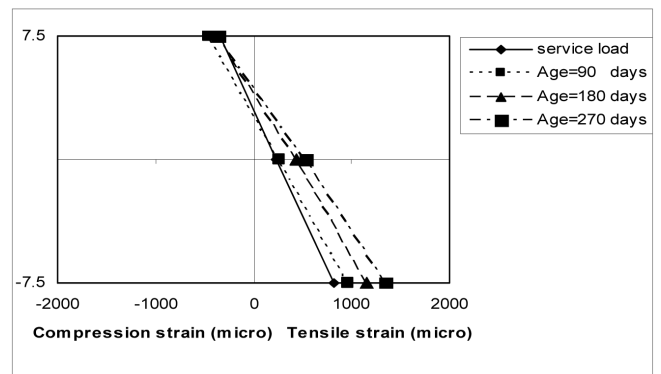
Fig. 15. Concrete strain distribution in R6 beam



شکل ۱۲: توزیع کرنش بتن در تیر R_3
:Compression Strain: کرنش فشاری و Tensile Strain: کرنش کششی

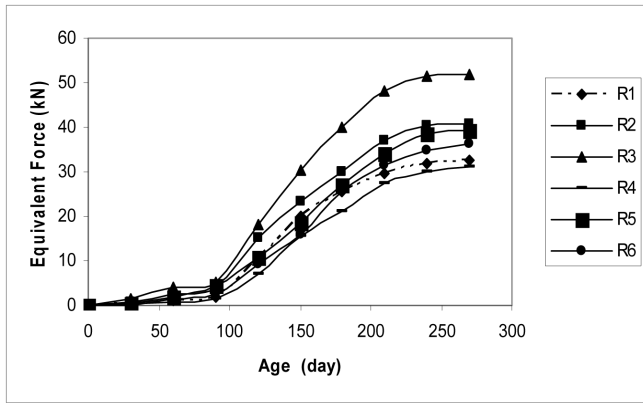
Fig. 12. Concrete strain distribution in R3 beam

می‌دهند. نتایج این شکل نشان می‌دهند که توزیع وابسته به زمان کرنش در تمامی نمونه‌ها تحت ترکیبی از شرایط بارگذاری ثابت، خزش و واکنش قلیایی-سیلیسی، همچنان به صورت خطی باقی خواهد ماند. همچنین شکل‌های ۱۰ تا ۱۵ نشان می‌دهند که تار خنثای نمونه‌ها با افزایش عمر به سمت ناحیه فشاری جابه‌جا خواهد شد. این جابه‌جایی در نمونه‌های R_1 و R_2 و R_3 بیشتر بود که این موضوع، به علت نداشتن آرماتور فشاری است. با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده کرنش‌های بتن و فولاد در آزمایش مرحله قبل، یک تحلیل سازه‌ای تیر بتنی مسلح با روش معمول انجام گرفت. مدول الاستیک بتن و نیروی کششی محوری معادل با استفاده از دو رابطه تعادل لنگر خمشی و نیرو در مقطع تیر محاسبه شدند (شکل ۱۶). شکل ۱۷ تغییرهای وابسته به زمان مدول الاستیک بتن را در نمونه‌های ساخته شده ارائه می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که مدول الاستیک بتن با گذشت زمان کاهش می‌یابد که این موضوع، عمدتاً ناشی از خزش بتن است. شکل ۱۸



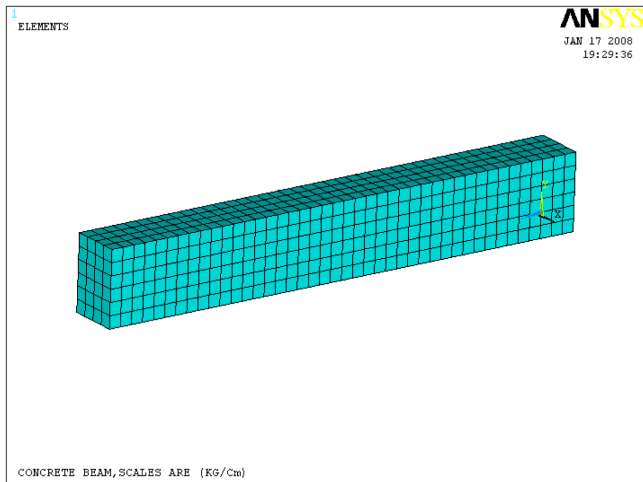
شکل ۱۳: توزیع کرنش بتن در تیر R_4
:Compression Strain: کرنش فشاری و Tensile Strain: کرنش کششی

Fig. 13. Concrete strain distribution in R4 beam



شکل ۱۸: تغییرهای وابسته به زمان نیروی معادل در تیرهای R_1 تا R_6 (Age: سن بر حسب روز، نیروی معادل، Age: سن بر حسب روز)

Fig. 18. Time dependent variation of equivalent force for beams R1 to R6

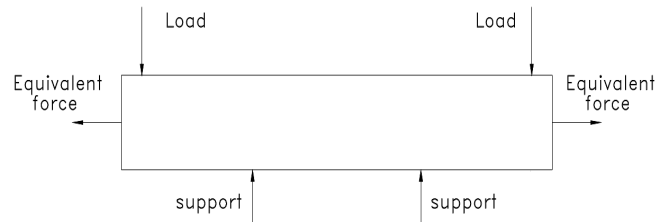


شکل ۱۹: شبیه‌سازی تیر بتنی با روش المان محدود در برنامه انسیس

Fig. 19. Simulation of concrete beam using finite element method in Ansys program

۴- مدلسازی عددی

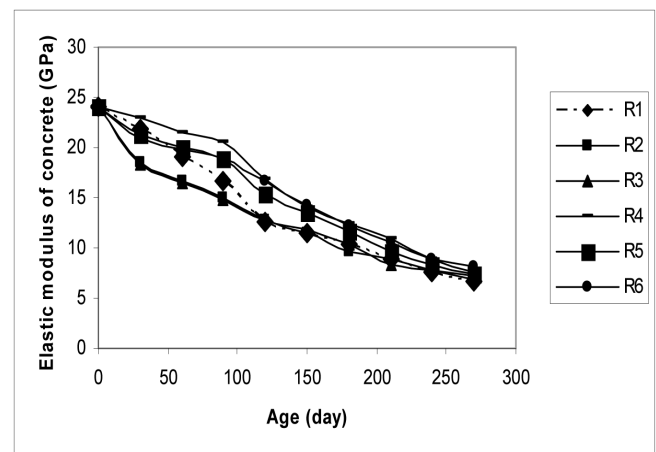
در این قسمت از تحقیق، تیرهای در معرض واکنش قلیایی-سیلیسی با استفاده از روش المان محدود در برنامه انسیس شبیه‌سازی شدند و نمونه شبیه‌سازی شده در برنامه، در شکل ۱۹ نشان داده شده است. مدول الاستیک آرماتور استفاده شده، برابر با ۲۱۰ گیگا پاسکال بوده و آرماتورهای کششی و فشاری استفاده شده نیز همانند جدول ۱ هستند. همچنین مدول الاستیک اولیه بتن استفاده شده نیز برابر با ۲۴/۳ گیگا پاسکال است. در نخستین گام شبیه‌سازی به منظور شبیه‌سازی شرایط بهره‌برداری، تیرها تحت بارگذاری



شکل ۱۶: مدل سازه‌ای برای تیرهای تحت کرنش ناشی از واکنش قلیایی-سیلیسی

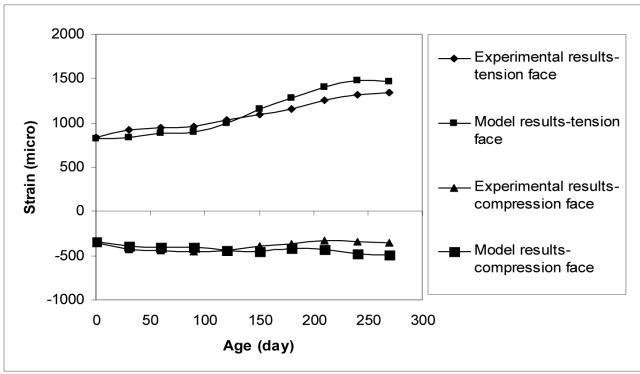
Fig. 16. Structural model for beams affected by alkali-silica reaction's strain

مقدار تغییرهای وابسته به زمان نیروی معادل را بیان می‌کند. در این شکل مشاهده می‌شود که در نمونه‌های با سنگدانه فعال، یک افزایش در نیروی محوری معادل وجود دارد که این موضوع، به علت کرنش‌های ناشی از واکنش قلیایی-سیلیسی است. زیرا این واکنش تأثیر زیادی را بر روی عملکرد تیرها دارد. بیشترین مقدار این افزایش نیروی محوری، در نمونه‌های R_2 و R_4 مشاهده شده است که به ترتیب ۴۰/۶ کیلو نیوتون و ۳۱/۲ کیلو نیوتون بود. اما استفاده از آرماتورهای فشاری در تیر R_4 سبب کاهش مقدار آن شده است. با مقایسه نیروی محوری نمونه‌های R_5 و R_6 با R_3 ، این نقش کلیدی و مهم آرماتورهای فشاری مشخص‌تر خواهد شد. زیرا مقدار این نیرو در نمونه‌های R_5 و R_6 (که دارای آرماتورهای فشاری هستند)، به ترتیب معادل با ۳۹/۳ کیلو نیوتون و ۳۶/۳ کیلو نیوتون است. اما در R_3 مقدار آن ۵۱/۹ کیلو نیوتون خواهد بود.



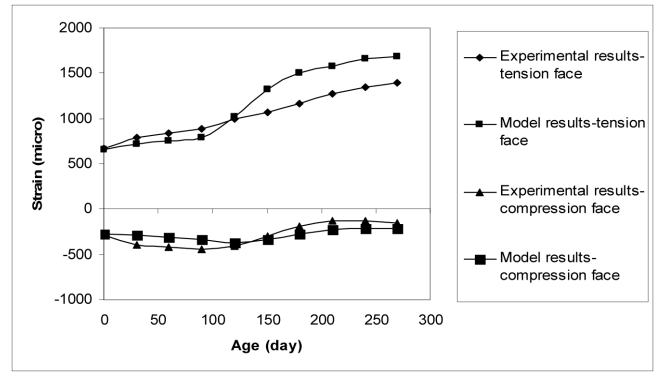
شکل ۱۷: تغییرهای وابسته به زمان مدول الاستیک بتن برای تیرهای R_1 تا R_6 (Elastic Modulus of Concrete: مدول الاستیک بتن، Age: سن بر حسب روز)

Fig. 17. Time dependent variation of elastic modulus of concrete for beams R1 to R6



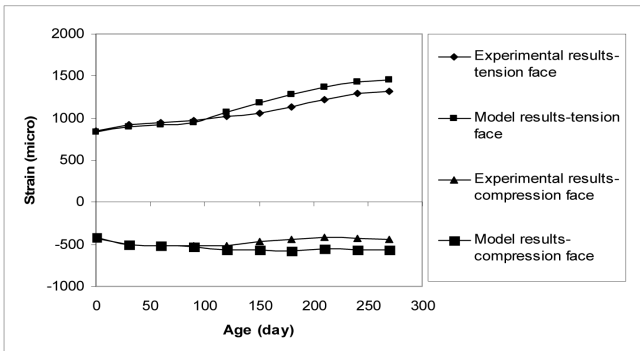
شکل ۲۳: مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی برای تیر R_4 (کرنش: Strain، سن بر حسب روز: Age)

Fig. 23. Comparison between experimental and model results for R4 beam



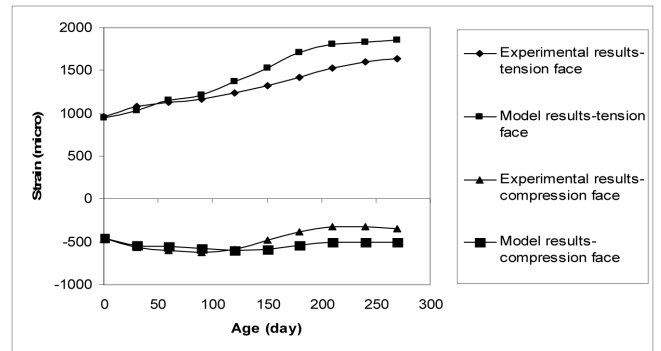
شکل ۲۰: مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی برای تیر R_1 (کرنش: Strain، سن بر حسب روز: Age)

Fig. 20. Comparison between experimental and model results for R1 beam



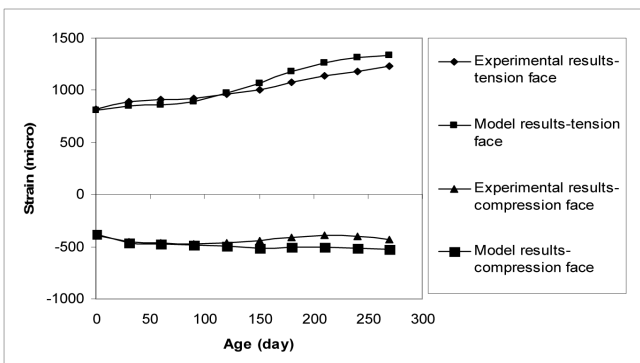
شکل ۲۴: مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی برای تیر R_5 (کرنش: Strain، سن بر حسب روز: Age)

Fig. 24. Comparison between experimental and model results for R5 beam



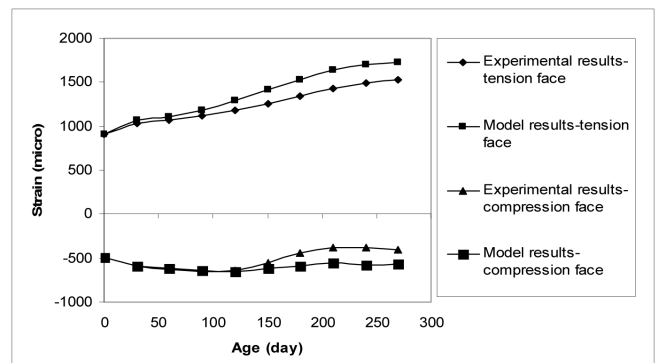
شکل ۲۱: مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی برای تیر R_2 (کرنش: Strain، سن بر حسب روز: Age)

Fig. 21. Comparison between experimental and model results for R2 beam



شکل ۲۵: مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی برای تیر R_6 (کرنش: Strain، سن بر حسب روز: Age)

Fig. 25. Comparison between experimental and model results for R6 beam



شکل ۲۲: مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی برای تیر R_3 (کرنش: Strain، سن بر حسب روز: Age)

Fig. 22. Comparison between experimental and model results for R3 beam

عددی و نتایج آزمایشگاهی خواهد شد. با وجود این سازگاری، در مطالعات آینده می‌توان شرایط مرزی روش المان محدود را در شرایط مختلف برای افزایش دقت مدل عددی در شبیه‌سازی واکنش قلیایی-سیلیسی، به مدل اعمال نمود. همچنین مدلسازی واکنش مورد نظر بر روی تیرها با روش ترکیبی المان محدود و حجم محدود موضوع مناسبی برای مطالعات آینده خواهد بود.

مراجع

- [1] D., Stark; Alkali-silica Reaction and its Effects on Concrete, *Proceedings of the 2nd International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Hydroelectric Plants and Dams, USCOLD, Chattanooga, Tennessee*, pp. 9-18, 1995.
- [2] B., Capra; J. P., Bournazel; Modeling of Induced Mechanical Effects of Alkali-Aggregate Reactions, *Cem. Concr. Res.*, Vol. 28, No. 2, pp. 251-260, 1998.
- [3] C., Ferraris; E., Garboczi; F., Davis; J., Clifton; Stress Due to Alkali-silica Reaction in Mortars, *Proceedings of the 4th Materials Engineering Conference, ASCE, Washington, DC*, pp. 1379-1388, 1996.
- [4] B., Capra; A., Sellier; Mechanical Modelling of Alkali-aggregate Reaction in Concrete Structures, *Proceedings of the Fracture Mechanics of Concrete Structures, Cachan, France*, pp. 183-190, 2001.
- [5] M., Pigeon; P., Plante; R., Pleau; N., Banthia; Influence of Soluble Alkalis on the Production and Stability of the Air-void System in Superplasticized and Nonsuperplasticized Concrete, *ACI Mater. J.*, Vol. 89, No. 1, pp. 24-31, 1992.
- [6] P., Grattan-Bellew; Laboratory Evaluation of Alkali-silica Reaction Inconcrete from Saunders Generating Station, *ACI Mater. J.*, Vol. 92, No. 2, pp. 126-134, 1995.
- [7] M., Prezzi; P. J., Monteiro; G., Sposito; The Alkali-Silica Reaction: Part I. Use of Double-layer Theory to Explain the Behavior of Reaction-product Gels, *ACI Mater. J.*, Vol. 94, No. 1, pp. 10-17, 1997.
- [8] R. N., Swamy; M. M., Al-Asali; Effect of Alkali-silica Reaction on the Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams, *ACI Structural Journal*, Vol. 86, No. 4, pp. 451-459, 1989.
- [9] D., Stark; Alkali-silica Reaction and its Effects on Concrete, *Proceedings of the 2nd International Conference on Alkali-aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams, USCOLD, Chattanooga, Tennessee*, pp. 9-18, 1995.
- [10] S. Fan; J. M., Johnson; Effect of Alkali Silica Reaction Expansion and Cracking on Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams, *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No. 5, pp. 498-505, 1998.

دو نقطه قرار گرفتند. در گام‌های بعدی، مقدار مدول الاستیک کاهش یافته تیرها و مقدار نیروی معادل بارگذاری مورد استفاده قرار گرفتند. شکل‌های ۲۰ تا ۲۵ مقدار کرنش بدست‌آمده در بتن نمونه‌ها را با استفاده از مدلسازی عددی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها نیز مشخص است، نتایج مدل‌های عددی همگرایی خوبی را با نتایج آزمایشگاهی در ناحیه کششی دارند. مقدار تفاوت در کرنش‌های کششی مدل عددی و آزمایشگاهی تیرهای R_1 تا R_6 به ترتیب برابر با ۲۰، ۱۲، ۱۲، ۹، ۱۰ و ۸/۵ درصد هستند. اما نتایج مدلسازی عددی در ناحیه فشاری دارای تفاوت زیادی با نتایج آزمایشگاهی است. مقدار تفاوت در کرنش‌های فشاری برای تیرهای R_1 تا R_6 بین ۲۰ تا ۴۰ درصد متغیر بوده که این مقدار خطا، بسیار زیاد است. این تفاوت زیاد به علت اعمال نیروی معادل در نقطه میانی دهانه تیر علی‌رغم آگاهی به بیش‌تر بودن کرنش ناشی از واکنش قلیایی-سیلیسی در ناحیه فشاری است. در نظر گرفتن نیروی معادل بر روی تار خنثی می‌تواند روش خوبی برای کاهش کرنش‌های فشاری باشد. در شکل ۱۰ مشاهده شد که استفاده از آرماتورهای فشاری سبب افزایش سازگاری بین نتایج مدل‌های عددی و آزمایشگاهی خواهد شد. در نمونه تیر R_6 با بیشترین آرماتور فشاری، مقدار تفاوت در نتایج مدل‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی در ناحیه‌های کششی و فشاری به ترتیب ۸/۵ و ۲۱ درصد است؛ در حالی که برای نمونه R_3 که هیچ آرماتور فشاری ندارد، به ترتیب برابر با ۱۲ و ۴۲ درصد است.

به طور کلی، از مقایسه نتایج می‌توان نتیجه گرفت که روش بکار رفته در مدلسازی عددی، روشی نسبتاً خوب برای مدل کردن یک تیر بتنی تحت اثر همزمان بار ثابت و واکنش قلیایی است. دلیل این امر، جایگزین کردن انبساط ناشی از واکنش قلیایی با یک نیروی کششی محوری معادل و کاهش مدول الاستیسیته بتن در اثر رخ‌دادن همزمان خزش و واکنش قلیایی خواهد بود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثر واکنش قلیایی بر روی تیرهای بتنی مسلح بررسی شد. برای این منظور، در ابتدا کرنش‌های بتن در نمونه‌های فعال و غیرفعال بتنی اندازه‌گیری شدند. پس از انجام مدل آزمایشگاهی، مدلسازی عددی نیز با استفاده از برنامه انسیس و به وسیله روش المان محدود انجام شد. در طول آزمایش، مشاهده شد که تار خنثای نمونه‌ها با افزایش زمان به سمت ناحیه فشاری جابه‌جا می‌شود و همچنین مدول الاستیک بتن با گذشت زمان کاهش می‌یابد که این امر، عمدتاً ناشی از خزش بتن است. همچنین یک افزایش در نیروی محوری معادل در نمونه‌های با سنگدانه فعال وجود دارد که این موضوع، به علت کرنش‌های ناشی از واکنش قلیایی-سیلیسی است. مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و مدلسازی عددی ارائه شده، نشان می‌دهد که سازگاری بهتری در ناحیه کششی در نتایج در مقایسه با نواحی فشاری وجود دارد. همچنین قرار دادن نیروی معادل بر روی تار خنثی در مدلسازی عددی، می‌تواند کرنش در نواحی فشاری را بهبود بخشد و استفاده از آرماتورهای فشاری نیز سبب افزایش سازگاری بین مدل‌های

- International Journal*, pp. 34-38, 2002.
- [18] B., Capra; A., Sellier; Orthotropic Modelling of Alkali-aggregate Reaction in Concrete Structures: Numerical Simulations, *Mechanics of Material Journal*, Vol. 5, pp. 817-830, 2003.
- [19] S., Poyet; A., Sellier; B., Capra; G., Foray; Modelling of Alkali-silica Reaction in Concrete, Part 3: Structural Effects Induced by ASR, *Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-aggregate Reaction in Concrete*, China, pp. 191-197, 2004.
- [20] M. C. R., Farage; J. L. D., Alves; E. M. R., Fairbairn; Macroscopic Model of Concrete Subjected to Alkali-aggregate Reaction, *Cement and Concrete Research Journal*, Vol. 34, pp. 495-505, 2004.
- [21] E., Grimal; A., Sellier; S., Multon; Y., Le-Pape; E., Bourdarot; Concrete Modeling for Expertise of Structures Affected by Alkali-aggregate Reaction, *Journal of Cement and Concrete Research*, Vol. 40, No. 4, pp. 502-507, 2010.
- [22] ASTM C1260; Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar-Method), *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 4, No. 2, 2005.
- [23] ASTM C1293; Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-silica Reaction, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 4, No. 2, American Society for Testing and Materials, 2005.
- [24] S., Hajighasemali; A. A., Ramezaniapour; M., Kashefzadeh; Investigation of the Effect of Alkali-Silica Reaction on Strength and Ductility Analyses of Reinforced Concrete Beams, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 66, No. 15, pp. 751-760, 2014.
- [11] T., Ahmed; E., Burley; S., Ridgen; Effect of Alkali-silica Reaction on Tensile Bond Strength of Reinforcement in Concrete Tested under Static and Fatigue Loading, *ACI Materials Journal*, Vol. 96, No. 4, pp. 419-428, 1998.
- [12] H., Marzouk; S., Langdon; The Effect of Alkali-aggregate Reactivity on the Mechanical Properties of High and Normal Strength Concrete, *Journal of Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, Nos. 4-5, pp. 549-556, 2003.
- [13] J. F., Seignol; F., Barbier; S., Multon; F., Toutlemonde; Numerical Simulation of ASR Affected Beams Comparison to Experimental Data, *Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-aggregate Reaction in Concrete*, China, pp. 198-206, 2004.
- [14] T., Miyagawa; K., Seto; K., Sasaki; Y., Mikata; K., Kuzume; T., Minami; Fracture of Reinforcing Steels in Concrete Structures Damaged by Alkali-silica Reaction-field Survey, Mechanism and Maintenance, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 4, No. 3, pp. 339-355, 2003.
- [15] S., Multon; F., Toutlemonde; Effect of Moisture Conditions and Transfers on Alkali-silica Reaction Damaged Structures, *Journal of Cement and Concrete Research*, Vol. 40, No. 6, pp. 924-934, 2010.
- [16] L. J., Monette; N. J., Gardner; P. E., Grattan-Bellew; Residual Strength of Reinforced Concrete Beams Damaged by Alkali-silica Reaction-Examination of Damage Rating Index Method, *ACI Materials Journal*, Vol. 99, No. 1, pp. 42-50, 2002.
- [17] L. E., Romera; S., Hernandez; Modeling an Arch Dam Suffering from Alkali-aggregate Reaction, *Concrete*

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

S., Hajighasemali, A. A., Ramezaniapour, V., Lotfi, M. H., Kashefzadeh, "Investigation of the Effect of Alkali-Silica Reaction on the Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams Using the Finite Element Method".

Amirkabir J. Civil Eng., 49(1) (2017) 23-33.

DOI: 10.22060/ceej.2016.701

