

# بررسی رفتار قاب بتنی ترکیبی مسلح شده با آرماتورهای FRP و فولادی

فهیمة مالکی، امید رضائی فر\*، علی خیرالدین

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

\* orezayfar@semnan.ac.ir

## چکیده:

استفاده از آرماتورهای پلیمری تقویت شده با الیاف (FRP) به عنوان راهکاری برای مقابله با پدیده خوردگی در سازه‌هایی نظیر تیر، دال، پل و پارکینگ‌های طبقاتی رو به گسترش است. اما به دلیل رفتار الاستیک خطی، شکست ترد و مدول الاستیسیته پایین این آرماتورها، نگرانی‌هایی برای استفاده از آن‌ها به لحاظ عملکرد سازه‌ای مطرح می‌گردد. در این مطالعه ده قاب بتنی مسلح یک طبقه و یک دهانه، تحت تحلیل بار افزون در نرم افزار آباکوس مدل‌سازی گردید. هدف اصلی، ارزیابی و مقایسه رفتار قاب‌های بتنی مسلح با انواع آرماتورهای FRP (در تیر، ستون یا هر دو)، با قاب‌های بتن آرمه است. نتایج حاصل از تحلیل نشان داد که استفاده از آرماتور CFRP در قاب بتنی یک طبقه، سبب افزایش نیروی جانبی حداکثر و تغییر مکان نسبی متناظر با آن، به ترتیب حدود ۶۳٪ و ۳۲٪ نسبت به قاب بتن آرمه می‌شود. درحالی‌که استفاده از آرماتورهای GFRP و AFRP در قاب بتنی، نیروی جانبی حداکثر و تغییر مکان نسبی متناظر را نسبت به قاب بتن آرمه کاهش می‌دهد و بهترین عملکرد در قاب‌های مسلح با آرماتورهای GFRP و AFRP استفاده از این آرماتورها در تیرهای قاب بتنی می‌باشد، که نسبت به استفاده از آرماتورهای GFRP و AFRP در ستون قاب‌های ترکیبی مورد بررسی میزان افزایش نیروی جانبی حداکثر، به ترتیب ۱۸٪ و ۱۶٪ می‌باشد. همچنین به منظور بررسی روند ایجاد و گسترش ترک خوردگی در قاب‌های بتنی مسلح با انواع آرماتورها، کرنش پلاستیک حداکثر در تغییر مکان نسبی مختلف مقایسه شده است.

## کلمات کلیدی

قاب بتنی ترکیبی، روش اجزا محدود، آرماتور FRP، تغییر مکان نسبی، ترک خوردگی

سازه‌های بتنی معمولاً با آرماتورهای فولادی مسلح می‌شوند. اما به علت افزایش احتمال خوردگی آرماتورهای فولادی در سازه‌هایی که در محیط‌های نامساعد قرار دارند، مانند سازه‌های دریایی، پل‌ها و پارکینگ‌ها استفاده از مصالح جایگزین پیشنهاد می‌گردد. از دیگر ایرادات استفاده از آرماتورهای فولادی در سازه‌ها می‌توان به تغییر شکل‌های دائمی زیاد آن‌ها اشاره نمود، که بر عملکرد سازه‌های مسلح با این آرماتورها پس از زلزله اثر می‌گذارد. برای غلبه بر این اشکالات، استفاده از آرماتورهای FRP به دلیل خاصیت ضدخوردگی و نسبت مقاومت به وزن بالای آن پیشنهاد گردید. از آنجا که اعضای بتنی مسلح با آرماتورهای FRP به دلیل رفتار الاستیک خطی تا لحظه شکست، شکل پذیری و قابلیت اتلاف انرژی کمی دارند، در این مطالعه سازه‌های بتنی مسلح با آرماتورهای ترکیبی فولادی و FRP برای تامین شکل پذیری و مقاومت مورد نیاز سازه، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. فهمی<sup>۱</sup> و همکاران [۱] قاب‌های خمشی مقاوم بتنی با آرماتورهای ترکیبی را برای تعیین مقدار نسبت بهینه جایگزینی آرماتورهای طولی FRP با آرماتورهای فولادی و تعیین جزئیات آرماتورهای ترکیبی در نواحی مفصل پلاستیک بررسی نمودند. سونگ<sup>۲</sup> و همکاران [۲] مقاطع ترکیبی (CFRP + Steel) در قاب را برای کاهش تغییر شکل باقی‌مانده در سازه‌های مقاوم در برابر زلزله و بهبود دوام سازه‌ها پیشنهاد نمودند. فوکویاما<sup>۳</sup> و همکاران [۳] یک قاب بتنی سه طبقه مسلح شده با آرماتورهای FRP را با هدف بررسی عملکرد سازه و حالات حدی قاب تحت بارگذاری افقی آزمایش کردند. نهدی<sup>۴</sup> و سعیدی<sup>۵</sup> [۴] به منظور بررسی عملکرد قاب‌های بتنی هیبریدی تحت بارگذاری چرخه‌ای و به‌خصوص بررسی رفتار اتصالات قاب خمشی در زلزله، سه نمونه اتصال تیر-ستون مسلح با فولاد، آرماتور GFRP و آرماتورهای ترکیبی را آزمایش نمودند. سولپان<sup>۶</sup> و همکاران [۵] به بررسی آزمایشگاهی رفتار قاب‌های یک دهانه‌ی یک طبقه با آرماتورهای فولادی و GFRP پرداختند. ممقانی<sup>۷</sup> و خالو<sup>۸</sup> [۶] رفتار غیر خطی در نواحی مفصل پلاستیک چهار نوع قاب خمشی (سه و پنج طبقه و با دو و سه دهانه) بتنی مسلح با آرماتورهای GFRP را به کمک آنالیز پوش‌آور<sup>۹</sup> ارزیابی کردند. ابراهیم<sup>۱۰</sup> و همکاران [۷] اثرات بتن دال بر پاسخ جانبی قاب مقاوم خمشی بتنی مسلح با آرماتور FRP را مورد بررسی قرار دادند. گو<sup>۱۱</sup> و همکاران [۸] رفتار خمشی تیرهای بتن آرمه با آرماتورهای GFRP و فولادی و پاسخ نیرو-تغییر مکان در این تیرها در سطوح مختلف بارگذاری با در نظر گرفتن اثرات سخت شونده‌گی بررسی نمودند و مدل سخت شونده‌گی کششی نیال<sup>۱۲</sup> و رشید<sup>۱۳</sup> [۹] را برای پیش‌بینی منحنی‌های نیرو-تغییر مکان تیرهای بتن آرمه ترکیبی GFRP و فولادی مناسب دانستند. خیرالدین و مالکی [۱۰] رابطه جدیدی برای پیش‌بینی ممان اینرسی موثر در تیرهای بتنی ترکیبی به کمک داده‌های آزمایشگاهی با الگوریتم ژنتیک و نیز رابطه دیگری با شبکه عصبی [۱۱] ارائه دادند و تغییر مکان قائم کوتاه مدت تیرهای بتن آرمه با آرماتورهای فولادی و آرماتورهای کامپوزیت FRP، با مدل سازی در نرم افزار ABAQUS مورد مطالعه قرار دادند [۱۲]. هم‌چنین تأثیر استفاده از آرماتورهای کامپوزیت FRP بر ترک خوردگی تیر بتن آرمه بررسی گردید [۱۳]. مالکی و همکاران [۱۴] به بررسی تأثیر استفاده از آرماتورهای FRP به عنوان جایگزین آرماتورهای فولادی در تیرهای عمیق بتنی پرداختند. توکل و کاظمی [۱۵] به بررسی رفتار ستون‌های بتنی مسلح با فولاد، GFRP و ترکیب آن‌ها تحت بارهای چرخه‌ای جانبی و محوری به طور همزمان

---

<sup>1</sup> Fahmy

<sup>2</sup> Song

<sup>3</sup> Fukuyama

<sup>4</sup> Nehdi

<sup>5</sup> Said

<sup>6</sup> Şolpan

<sup>7</sup> Mamaghani

<sup>8</sup> Khaloo

<sup>9</sup> Pushover Analysis

<sup>10</sup> Ibrahim

<sup>11</sup> Qu

<sup>12</sup> Nayal

<sup>13</sup> Rasheed

پرداختند. لیو<sup>۱</sup> و همکاران [۱۶] به صورت عددی و آزمایشگاهی ستون‌های بتنی مسلح با آرماتورهای فولادی و BFRP را تحت بارگذاری خارج از مرکز مورد مطالعه قرار دادند. عبیده<sup>۲</sup> و همکاران [۱۷] به بررسی معیارهای شکل‌پذیری در اعضای خمشی بتنی پیش‌تنیده ترکیبی با فولاد و FRP پرداختند.

## ۲- صحت سنجی و مدل‌سازی

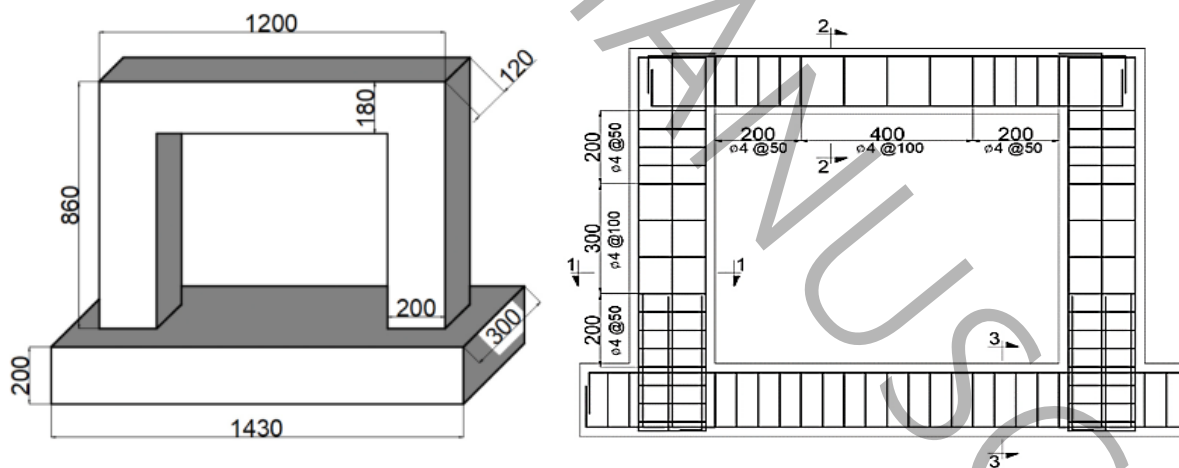
در ابتدا نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود یک قاب بتنی مسلح با آرماتور GFRP مقایسه و صحت‌سنجی شد و سپس قاب بتن آرمه و قاب بتنی ترکیبی با درصد‌های مختلف مدل‌سازی و بررسی شده است. برای مدل‌سازی قاب بتنی مسلح با GFRP در نرم افزار آباکوس، مدل آزمایشگاهی هوپارتیان<sup>۳</sup> و همکاران [۱۸] انتخاب شده است، که در آن رفتار قاب‌های تقویت شده با آرماتورهای GFRP تحت بارگذاری رفت و برگشتی مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه آزمایشگاهی برای شش قاب بتنی (سه سری قاب بتنی و هر سری شامل یک نمونه کنترل، مسلح با فولاد و یک نمونه مسلح با آرماتور GFRP و خاموت فولادی) با مقیاس  $\frac{1}{3}$  تحت بارگذاری چرخه‌ای است. تعداد آرماتورهای طولی تیر و ستون و مقاومت بتن در نمونه آزمایشگاهی مورد بررسی در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱: جزئیات قاب

Table 1: Frame details

مقاومت فشاری نمونه مکعب بتن	آرماتور ستون	آرماتور تیر
۴۲ مگا پاسکال	۸ آرماتور GFRP با قطر ۶ میلی‌متر	در بالا: ۲ آرماتور GFRP با قطر ۶ میلی‌متر در پایین: ۲ آرماتور GFRP با قطر ۶ میلی‌متر

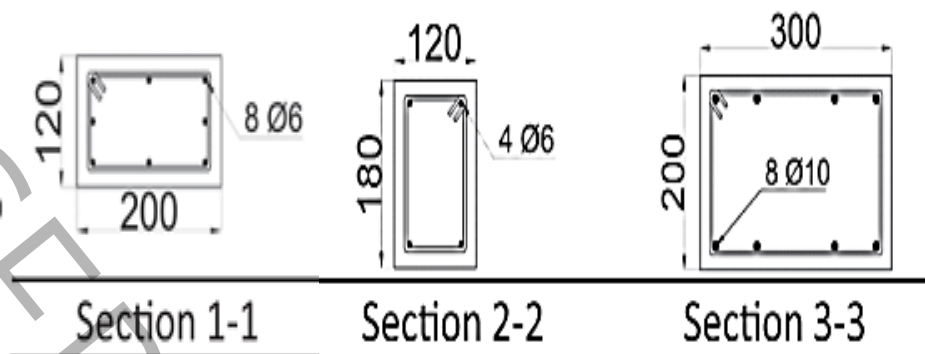
قاب با ابعاد کلی ۸۶۰ میلی‌متر و با جزئیات آرماتورگذاری نشان داده شده در شکل (۱) بررسی شده است. جزئیات آرماتورگذاری مقاطع قاب بتنی در شکل (۲) ارائه شده است.



شکل ۱: ابعاد کلی قاب و جزئیات آرماتورگذاری (ابعاد بر حسب میلی‌متر است) [۱۸]

Figure 1: Frame geometry and reinforcement details (mm) [18]

<sup>1</sup> Liu  
<sup>2</sup> Obeidah  
<sup>3</sup> Hopartean



شکل ۲: جرئیات آرماتورگذاری در مقاطع (ابعاد بر حسب میلی متر است) [۱۸]

**Figure 2: Reinforcement details of the cross-sections (mm) [18]**

نمونه آزمایشگاهی مورد بررسی، با بتن معمولی بوده و عمل آوری قاب به صورت افقی و به مدت ۲۸ روز انجام شده است. دو نوع آرماتور طولی مورد استفاده در این مدل آزمایشگاهی شامل آرماتورهای فولادی با گرید ۵۰۰ و آرماتورهای خم شده GFRP با رزین پلی استر و E-Glass و تمام خاموت‌های از نوع فولادی و با قطر ۴ میلی متر می باشند. خم‌های آرماتورهای فولادی در آزمایشگاه و آرماتورهای GFRP در کارخانه انجام شده است. در این آزمایش بار عمودی روی قاب در نظر گرفته نشده است و بارگذاری چرخه‌ای، با کنترل جابه جایی در هر دو جهت می باشد. نحوه اعمال بارگذاری نمونه آزمایشگاهی در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳: نحوه اعمال بارگذاری قاب بتنی مسلح با GFRP [۱۸]

**Figure 3: Loading setup of the GFRP-reinforced concrete frame [18]**

در مدل سازی عددی، تعریف رفتار دقیق مصالح در کشش و فشار و در دو فاز الاستیک و پلاستیک، تاثیر زیادی بر نتایج خروجی نرم افزار دارد. مدل پلاستیک آسیب دیده بتن (CDP)<sup>۱</sup>، یک مدل غیرخطی مبتنی بر ترکیب پلاستیسیته و مکانیک آسیب است که رفتار کششی و

<sup>1</sup> Concrete Damage Plasticity Model

فشاری بتن را شبیه‌سازی می‌کند. این مدل پیچیده‌ترین و پرکاربردترین مدل رفتاری می‌باشد که قابل استفاده در محاسبات استاتیکی و دینامیکی است. که در آن دو فرض اصلی مکانیزم شکست، ترک‌خوردگی کششی و خردشدگی فشاری در نظر گرفته می‌شود. از این مدل در سازه های بتنی با هر نوع بارگذاری از جمله بارگذاری رفت و برگشتی می‌توان استفاده نمود، که اثر کاهش سختی الاستیک ناشی از آسیب کششی و فشاری مدل‌سازی شده و هم‌چنین تاثیر بهبود سختی در بارگذاری رفت و برگشتی، در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق از مدل CDP برای مدل‌سازی رفتار بتن استفاده گردید. برای مدل‌سازی بتن از المان سه بعدی هشت گرهی با تابع شکل درجه یک و انتگرال کاهش یافته C3D8R و برای مدل‌سازی خاموت و آرماتور FRP، از المان سه بعدی تیر با تابع شکل درجه یک B31 استفاده شده است. خصوصیات بتن و فولاد و GFRP مدل‌سازی شده در نرم افزار به ترتیب در جدول (۲) و (۳) نشان داده شده است.

جدول ۲: مشخصات مکانیکی بتن مدل سازی شده در آباکوس

Table 2: Mechanical properties of the concrete modeled in Abaqus

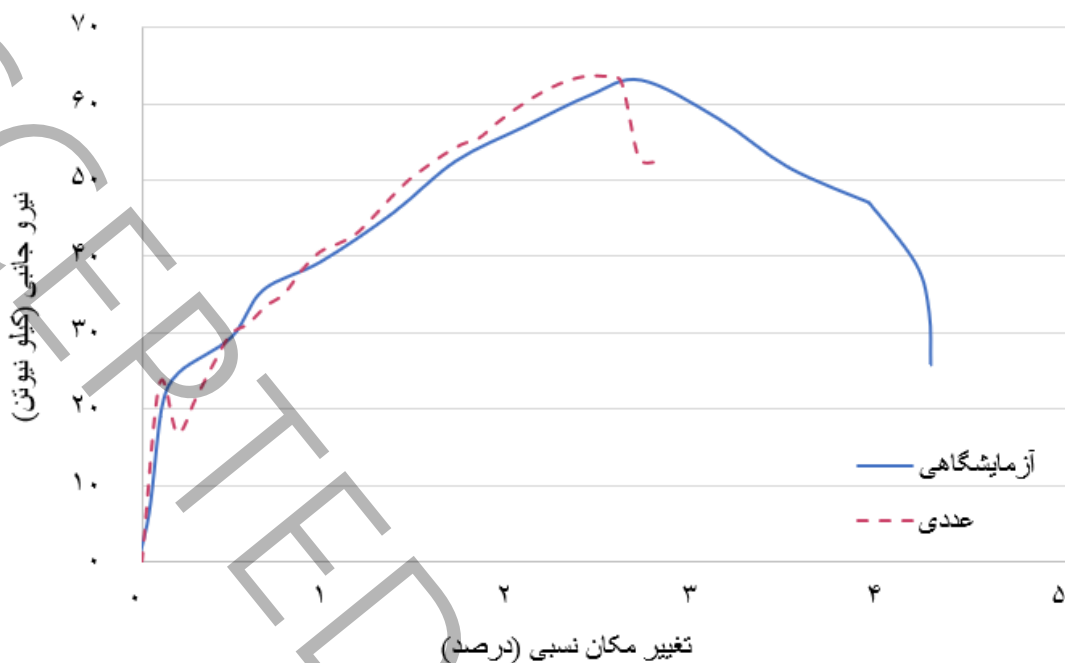
مصلح	مقاومت فشاری (مگا پاسکال)	مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)	ضریب پواسون
بتن	۳۷	۲۸/۶	۰/۱۵

جدول ۳: مشخصات مکانیکی فولاد و آرماتور GFRP مدل‌سازی شده در آباکوس

Table 3: Mechanical properties of steel and GFRP bar modeled in Abaqus

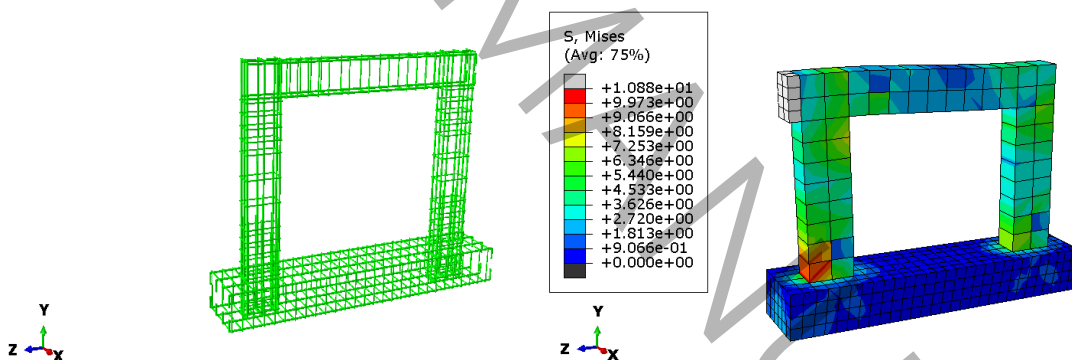
مصلح	مقاومت کششی (مگا پاسکال)	مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)	ضریب پواسون
فولاد	۵۰۰	۲۰۰	۰/۳
GFRP	۱۱۲۳	۴۷/۸	۰/۳

مطابق شکل (۴) نیروی جانبی بیشینه در مدل آزمایشگاهی مقدار ۶۲/۹۸ در تغییر مکان نسبی ۲/۶ درصد رخ داده است و در مدل عددی نیروی جانبی بیشینه مقدار ۶۳/۶۷ در تغییر مکان ۲/۵ درصد اتفاق افتاده است که نشان می‌دهد مقادیر مدل‌سازی به نمونه آزمایشگاهی بسیار نزدیک می‌باشد. میزان خطا در مدل‌سازی در نیروی جانبی حدود ۱/۱ درصد خطا و در تغییر مکان نسبی حدود ۳/۸ درصد می‌باشد. جزییات آرماتورگذاری و کانتور تنش قاب مدل شده در نرم افزار در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۴: مقایسه نمودار نیروی جانبی - تغییر مکان نسبی در مدل عددی و آزمایشگاهی

Figure 4: Comparison of the numerical and experimental lateral load–drift curves



شکل ۵: آرماتور گذاری و کانتور تنش در قاب مدل شده در آباکوس

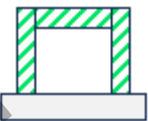

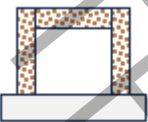
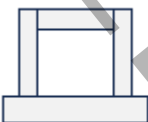
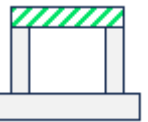
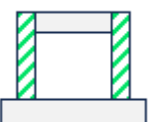
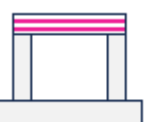


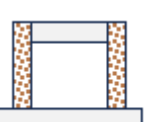
Figure 5: Reinforcement layout and stress distribution in the frame modeled in Abaqus

### ۳- بررسی قاب‌های بتنی مدل‌سازی شده در نرم افزار آباکوس

به منظور مقایسه رفتار قاب های بتنی ترکیبی، ده قاب بتنی مسلح با آرماتورهای فولادی و انواع مختلف آرماتورهای FRP در نرم افزار آباکوس مدل‌سازی شده‌اند که انواع قاب‌های مورد بررسی در این مطالعه در جدول (۴) ارائه شده است. نمونه ها بر اساس چهار حرف نام گذاری شده است که B نماد تیر و حرف C اول از سمت چپ نشان دهنده ستون می‌باشد. حروف دوم و چهارم از سمت چپ به ترتیب نوع آرماتور مورد استفاده در ستون و تیر را نشان می دهد که شامل S (آرماتور فولادی)، G (آرماتور CFRP)، C (آرماتور CFRP) و A (آرماتور AFRP) می‌باشد.

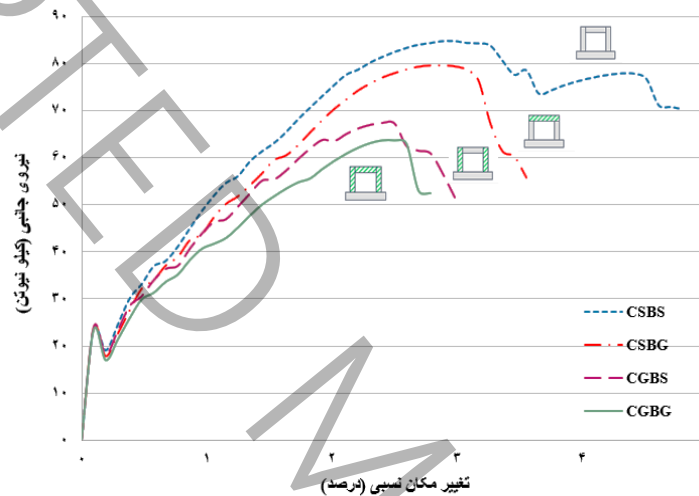
جدول ۴: نام‌گذاری نمونه‌های مورد بررسی

Table 4: Designation of the studied RC frames

شکل	نوع آرماتور تیر	نوع آرماتور ستون	نام
	GFRP	GFRP	CGBG
	CFRP	CFRP	CCBC
	AFRP	AFRP	CABA
	فولادی	فولادی	CSBS
	GFRP	فولادی	CSBG
	فولادی	GFRP	CGBS
	CFRP	فولادی	CSBC
	AFRP	فولادی	CSBA
	فولادی	CFRP	CCBS
	فولادی	AFRP	CABS

### ۳-۱- بررسی منحنی نیرو جانبی- جابه‌جایی نسبی

در اولین مرحله چهار قاب بتنی مدل‌سازی شده شامل، قاب‌های بتنی مسلح با آرماتورهای فولادی، آرماتورهای GFRP و ترکیبی از آرماتورها می‌باشند. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۶)، تمام قاب تا لحظه ترک خوردگی دارای سختی یکسانی می‌باشند ولی نیروی جانبی حداکثر در قاب بتن آرمه CSBS نسبت به قاب بتنی ترکیبی CSBG و CGBS به ترتیب ۶/۶ درصد و ۲۵/۹ درصد بیشتر و نسبت به قاب بتنی مسلح با GFRP، ۳۳/۱۶ درصد بیشتر می‌باشد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۵) میزان جابه‌جایی نسبی متناظر با نیروی جانبی حداکثر در قاب بتن آرمه نسبت به قاب CSBG، ۶/۸۱ درصد و نسبت به قاب‌های CGBS و CGBG، ۲۴/۱۷ درصد افزایش مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج مشاهده می‌گردد که در صورت استفاده از آرماتورهای GFRP به جای آرماتورهای فولادی، استفاده از این نوع آرماتورها در تیرها پیشنهاد می‌گردد.



شکل ۶: مقایسه نمودار نیروی جانبی- تغییر مکان نسبی در قاب بتن آرمه و قاب‌های ترکیبی با آرماتور GFRP

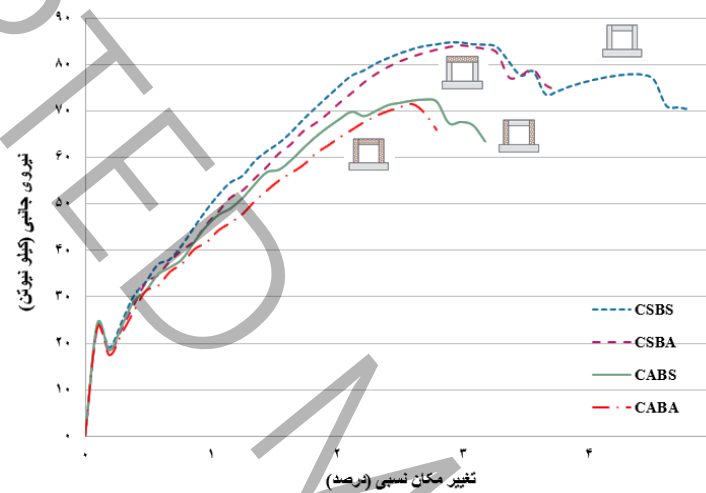
Figure 6: Lateral load–drift responses of RC frames reinforced with steel, GFRP, and hybrid bars

جدول ۵: مقایسه حداکثر بار جانبی و تغییر مکان نسبی متناظر آن در قاب بتن آرمه با قاب‌های ترکیبی با آرماتور GFRP

Table 5: Comparison of the maximum lateral load and corresponding drift of RC frames reinforced with steel, GFRP, and hybrid bars

نام	نیروی جانبی حداکثر (کیلو نیوتن)	تغییر مکان نسبی متناظر (درصد)
CSBS	۸۴/۷۸	۲/۹۸
CSBG	۷۹/۵۳	۲/۷۹
CGBS	۶۷/۳۴	۲/۴۰
CGBG	۶۳/۶۷	۲/۴۰

در مرحله بعدی قاب بتن آرمه با قاب مسلح با آرماتورهای AFRP و قابهای ترکیبی CSBA و CABS بررسی می‌شوند. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۷)، سختی تمام قاب‌ها مورد بررسی در این مرحله تا لحظه ترک خوردگی یکسان می‌باشند، ولی نیروی جانبی حداکثر در قاب بتن آرمه CSBS نسبت به قاب بتنی ترکیبی CSBA و CABS به ترتیب ۱/۲۱ درصد و ۱۷/۵۲ درصد بیشتر و نسبت به قاب بتنی مسلح با AFRP، ۱۸/۴۴ درصد بیشتر می‌باشد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۶) میزان جابه‌جایی نسبی متناظر با نیروی جانبی حداکثر، در قاب بتن آرمه نسبت به قاب CSBA، ۳/۴۷ درصد و نسبت به قابهای CABS و CABA، ۱۵/۱ درصد افزایش مشاهده می‌شود. قاب ترکیبی CSBA دارای رفتار مشابه با قاب بتن آرمه می‌باشد.



شکل ۷: مقایسه نمودار نیروی جانبی-تغییر مکان نسبی در قاب بتن آرمه و قابهای ترکیبی با آرماتور AFRP

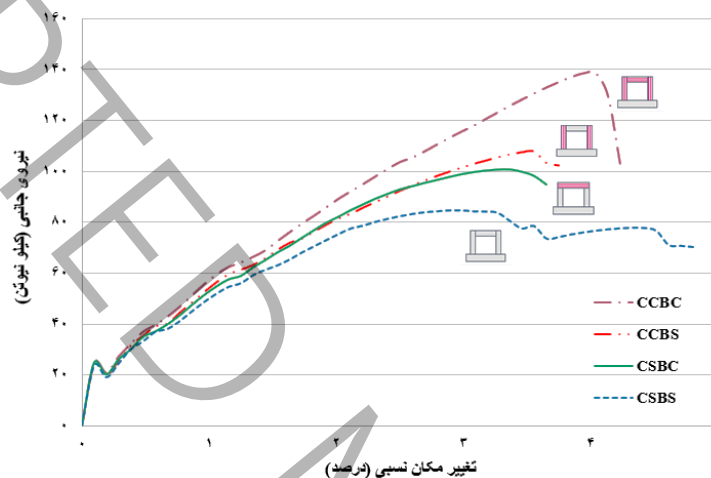
Figure 7: Lateral load–drift responses of RC frames reinforced with steel, AFRP, and hybrid bars

جدول ۶: مقایسه حداکثر بار جانبی و تغییر مکان نسبی متناظر آن در قاب بتن آرمه با قابهای ترکیبی با آرماتور AFRP

Table 6: Comparison of the maximum lateral load and corresponding drift of RC frames reinforced with steel, AFRP, and hybrid bars

نام	نیروی جانبی حداکثر (کیلو نیوتن)	تغییر مکان نسبی متناظر (درصد)
CSBS	۸۴/۷۸	۲/۹۸
CSBA	۸۳/۷۷	۲/۸۸
CABS	۷۲/۱۴	۲/۵۹
CABA	۷۱/۵۸	۲/۵۹

نتایج ارائه شده در شکل (۸)، مقایسه قاب بتن آرمه با قاب مسلح با آرماتورهای CFRP و قابهای ترکیبی CSBC و CCBS می‌باشند. سختی اولیه تمام قاب‌ها تا لحظه ترک خوردگی یکسان است ولی نیروی حداکثر در قاب بتن آرمه CCBC نسبت به قاب بتنی ترکیبی CSBC و CCBS به ترتیب ۲۸/۶۵ درصد و ۳۷/۳۴ درصد بیشتر و نسبت به قاب بتن آرمه ۶۳/۳۵ درصد بیشتر می‌باشد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۷) میزان جابه‌جایی نسبی متناظر با نیروی جانبی حداکثر در قاب بتن مسلح با CFRP نسبت به قاب CCBS، ۱۳/۸۷ درصد و نسبت به قابهای CSBC و CSBS، به ترتیب ۱۷/۲۶ و ۳۲/۲۱ درصد افزایش مشاهده می‌شود.



شکل ۸: مقایسه نمودار نیروی جانبی- تغییر مکان نسبی در قاب بتن آرمه و قابهای ترکیبی با آرماتور CFRP

Figure 8: Lateral load–drift responses of RC frames reinforced with steel, CFRP, and hybrid bars

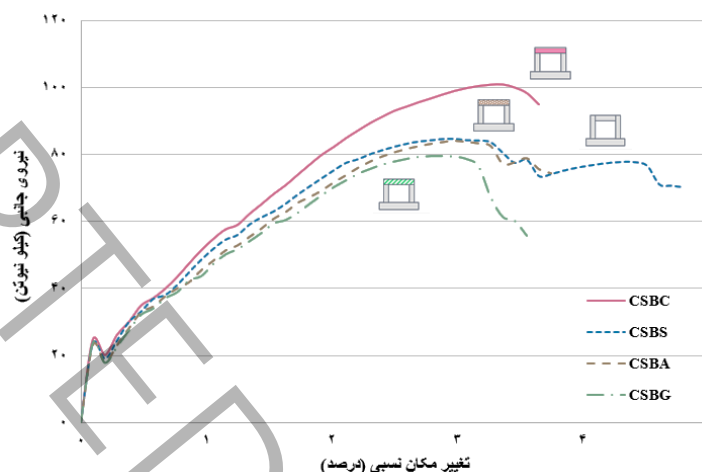
جدول ۷: مقایسه حداکثر بار جانبی و تغییر مکان نسبی متناظر آن در قاب بتن آرمه با قابهای ترکیبی با آرماتور CFRP

Table 7: Comparison of the maximum lateral load and corresponding drift of RC frames reinforced with steel, CFRP, and hybrid bars

نام	نیروی جانبی حداکثر (کیلو نیوتن)	تغییر مکان نسبی متناظر (درصد)
CSBS	۸۴/۷۸	۲/۹۸
CSBC	۱۰۰/۸۴	۳/۳۶
CCBS	۱۰۷/۶۵	۳/۴۶
CCBC	۱۳۸/۴۹	۳/۹۴

نتایج استفاده از انواع آرماتورهای FRP به جای آرماتورهای فولادی در تیرهای قاب بتنی در شکل (۹) نشان داده شده است. با توجه به جدول (۸) استفاده از آرماتورهای CFRP به جای آرماتور فولادی، نیروی جانبی حداکثر و جابه‌جایی نسبی متناظر با آن را به ترتیب ۱۸/۹۴

درصد و ۱۲/۷۵ درصد افزایش می یابد در صورتی که جایگزینی آرماتورهای AFRP و GFRP نیروی جانبی حداکثر را به ترتیب ۱/۲ درصد و ۶/۲ درصد و جابه‌جایی نسبی متناظر را به ترتیب ۳/۳۶ درصد و ۶/۳۸ درصد کاهش می‌دهد.



شکل ۹: نمودار نیروی جانبی\_ تغییر مکان نسبی در قاب‌های بتنی با انواع آرماتور FRP و فولادی در تیر

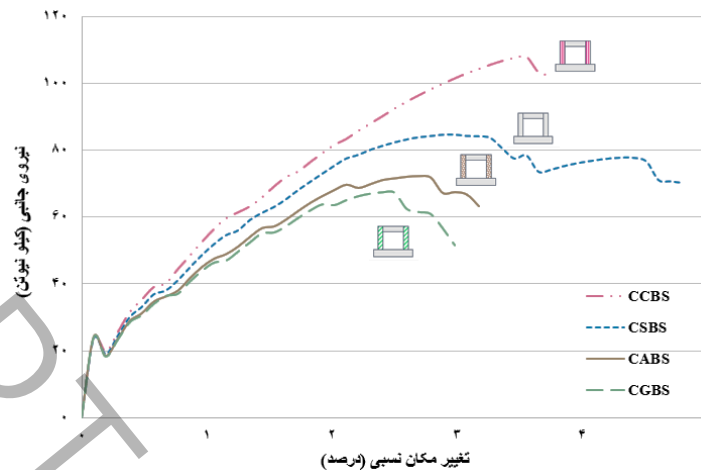
Figure 9: Lateral load–drift responses of RC frames with steel, GFRP, AFRP, and CFRP bars in the beams

جدول ۸: مقایسه حداکثر بار جانبی و تغییر مکان نسبی متناظر آن در قاب بتن آرمه با قاب‌های بتنی ترکیبی با انواع آرماتور FRP در تیر

Table 8: Comparison of the maximum lateral load and corresponding drift of the RC frame and hybrid RC frames with different types of FRP bars in the beams

نام	نیروی جانبی حداکثر (کیلو نیوتن)	تغییر مکان نسبی متناظر (درصد)
CSBC	۱۰۰/۸۴	۳/۳۶
CSBS	۸۴/۷۸	۲/۹۸
CSBA	۸۳/۷۷	۲/۸۸
CSBG	۷۹/۵۳	۲/۷۹

نتایج استفاده از انواع آرماتورهای FRP به جای آرماتورهای فولادی در ستون‌های قاب بتنی در شکل (۱۰) ارائه شده است. با توجه به جدول (۹) استفاده از آرماتورهای CFRP به جای آرماتور فولادی، نیروی جانبی حداکثر و جابه‌جایی نسبی متناظر با آن را به ترتیب ۲۶/۹۸ درصد و ۱۶/۱۱ درصد افزایش می یابد در صورتی که جایگزینی آرماتورهای AFRP و GFRP نیروی جانبی حداکثر را به ترتیب ۱۴/۹۱ درصد و ۲۰/۵۷ درصد و جابه‌جایی نسبی متناظر را به ترتیب ۱۳/۰۹ درصد و ۱۹/۴۶ درصد کاهش می‌دهد.



شکل ۱۰: نمودار نیروی جانبی\_ تغییر مکان نسبی در قاب‌های بتنی با انواع آرماتور FRP و فولادی در ستون

Figure 10: Lateral load–drift responses of RC frames with steel, GFRP, AFRP, and CFRP bars in the columns

جدول ۹: مقایسه حداکثر بار جانبی و تغییر مکان نسبی متناظر آن در قاب بتن آرمه با قاب‌های بتنی ترکیبی با انواع آرماتور FRP در ستون

Table 9: Comparison of the maximum lateral load and corresponding drift of the RC frame and hybrid RC frames with different types of FRP bars in the columns

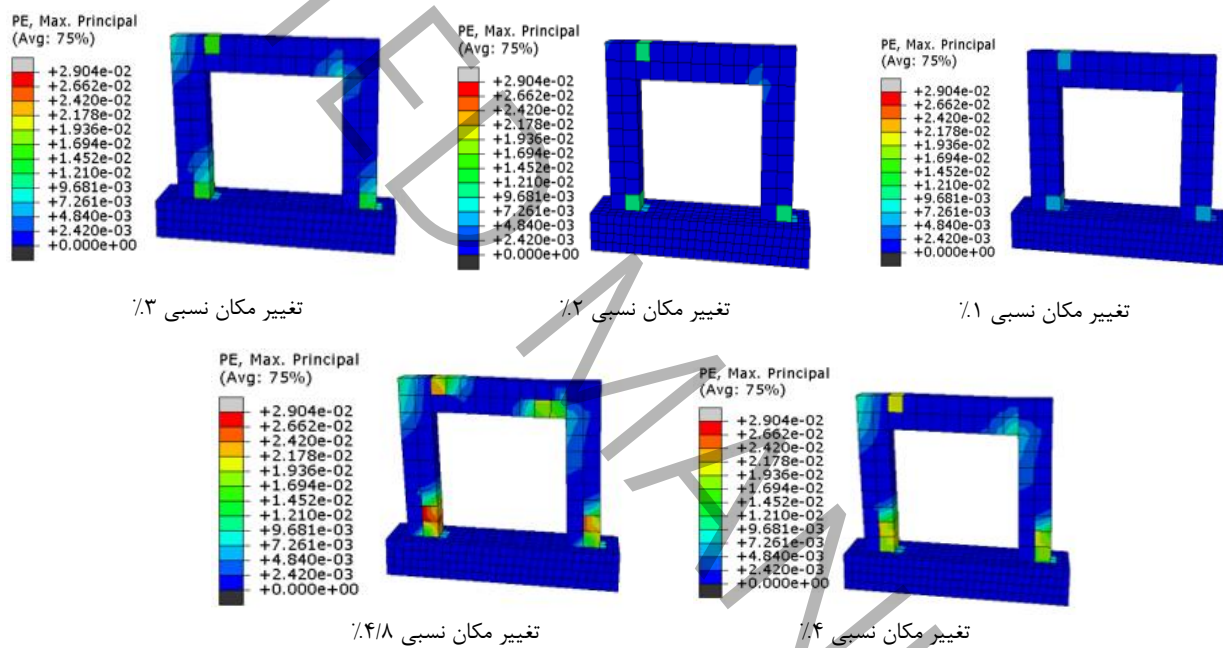
تغییر مکان نسبی متناظر (درصد)	نیروی جانبی حداکثر (کیلو نیوتن)	نام
۳/۴۶	۱۰۷/۶۵	CCBS
۲/۹۸	۸۴/۷۸	CSBS
۲/۵۹	۷۲/۱۴	CABS
۲/۴۰	۶۷/۳۴	CGBS

نتایج تحلیل بار افزون نشان می‌دهد که سختی اولیه منحنی نیروی جانبی \_ تغییر مکان نسبی در تمامی مدل‌ها تقریباً یکسان است. این رفتار بیانگر آن است که در محدوده الاستیک اولیه و پیش از گسترش قابل توجه ترک خوردگی، پاسخ جانبی قاب عمدتاً توسط سختی خمشی مقاطع بتنی در حالت تقریباً غیرترک خورده کنترل می‌شود. در این مرحله، سهم آرماتورهای طولی در تأمین سختی کلی عضو محدود بوده و تفاوت در نوع یا محل به کارگیری آرماتور (فولادی یا FRP) تأثیر معناداری بر شیب اولیه منحنی ندارد.

با ورود سازه به محدوده غیرخطی و گسترش ترک خوردگی خمشی، توزیع تنش در مقطع تغییر کرده و سهم آرماتورهای طولی در تأمین سختی خمشی افزایش می‌یابد. در این مرحله، مدول الاستیسیته آرماتور و محل استقرار آن در تیر یا ستون تأثیر قابل توجهی در پاسخ سازه دارد. استفاده از میلگردهای GFRP و AFRP در تیرها، به دلیل مدول الاستیسیته پایین‌تر نسبت به فولاد، باعث کاهش سختی خمشی مؤثر اعضا پس از ترک خوردگی و در نتیجه افزایش تغییر مکان نسبی قاب شده است. در مقابل، ستون‌ها نقش کلیدی در تأمین ظرفیت باربری نهایی و کنترل مکانیزم کلی تغییر شکل قاب دارند و به کارگیری میلگردهای CFRP در ستون‌ها به دلیل مدول الاستیسیته بالاتر، موجب افزایش سختی خمشی ستون در محدوده غیرخطی و در نهایت افزایش ظرفیت نیروی جانبی حداکثر سیستم می‌گردد.

اگر چه ترک خوردگی در سازه‌های بتنی را نمی‌توان مستقیماً از مدل آسیب دیده بتن بیان نمود اما می‌توان از طریق مفهوم PE Max Principal (حداکثر کرنش اصلی پلاستیک) بیان کرد. بر این اساس، ترک خوردگی یا شکست زمانی رخ می‌دهد که کرنش پلاستیک در ناحیه‌ای خاص به حداکثر مقدار خود برسد. در نرم‌افزار آباکوس، PE Max به عنوان معیاری برای شناسایی نواحی بحرانی که در آن‌ها تجمع کرنش پلاستیک و احتمال ترک خوردگی وجود دارد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. کرنش‌های پلاستیک در نواحی با تغییرات بزرگ تنش، مانند نقاط اتصال یا دارای تغییرات هندسی، به حداکثر می‌رسند و می‌توانند باعث شروع یا گسترش ترک‌ها شوند. در شبیه‌سازی‌های آباکوس، PE Max برای پیش‌بینی نقاط شروع ترک و مسیر گسترش آن‌ها نقش مهمی ایفا می‌کند.

در شکل (۱۱) و (۱۲) به ترتیب الگوی ترک خوردگی پیش‌بینی شده در قاب بتن آرمه و قاب بتنی مسلح شده با آرماتور AFRP بر اساس خروجی کرنش پلاستیک ماکزیمم در پنج تغییر مکان نسبی نشان داده شده است.

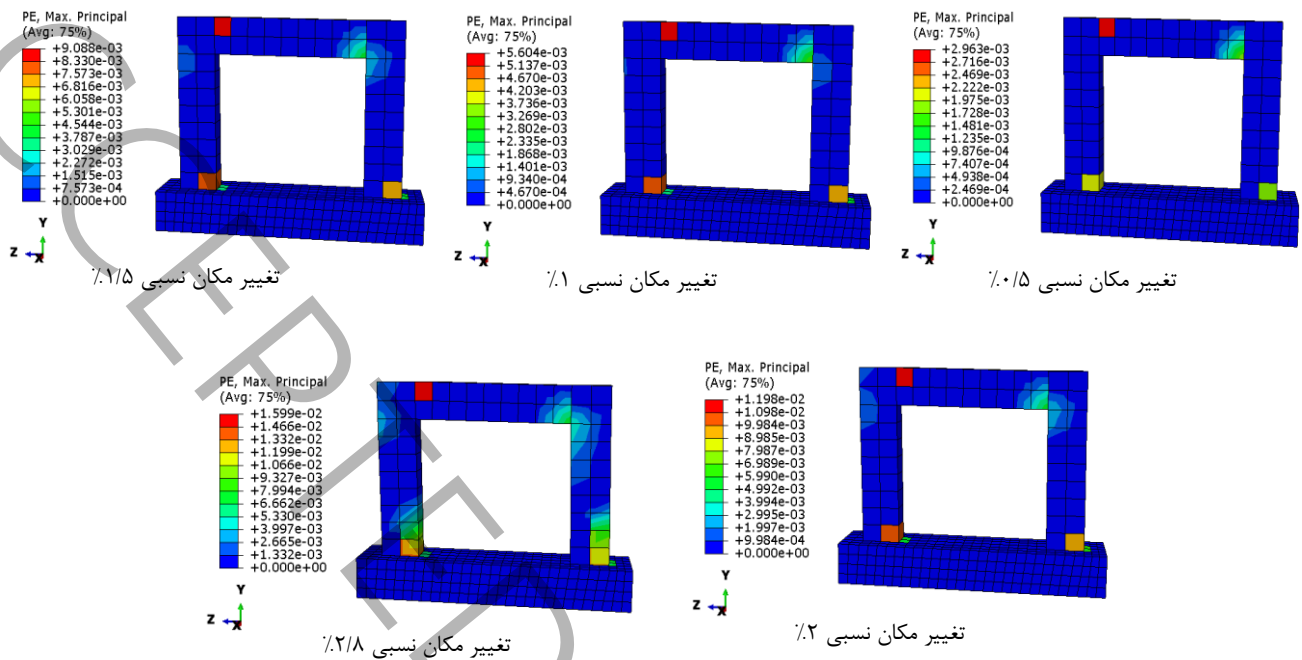


شکل ۱۱: کرنش پلاستیک ماکزیمم در قاب بتن آرمه در تغییر مکان‌های نسبی مختلف

Figure 11: plastic strain distribution in the RC frame at different drift levels

در مراحل ابتدایی بارگذاری، کرنش پلاستیک مقادیر کمی دارد و سازه عمدتاً رفتار الاستیک از خود نشان می‌دهد. اما با افزایش تغییر مکان‌های نسبی و تجاوز از ظرفیت الاستیک، کرنش پلاستیک در اعضای سازه افزایش یافته و PE Max به تدریج بالا می‌رود. در این مرحله، اعضای سازه وارد ناحیه پلاستیک شده و کرنش‌های پلاستیک بیشتر در نواحی بحرانی ایجاد می‌شود. در نهایت، در تغییر مکان‌های نسبی زیاد و شرایط بحرانی، کرنش پلاستیک به حداکثر خود می‌رسد و احتمال وقوع ترک خوردگی‌های عمده در سازه افزایش می‌یابد.

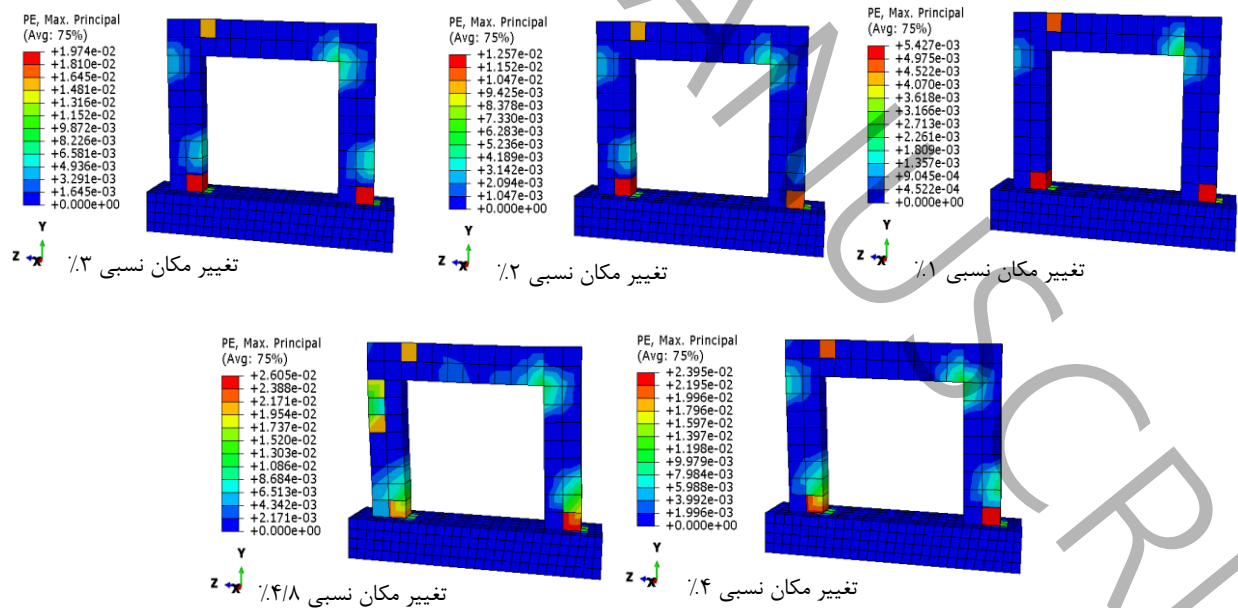
<sup>1</sup> Maximum Principal Plastic Strain



شکل ۱۲: کرنش پلاستیک ماکزیمم در قاب بتنی مسلح با آرماتور AFRP در تغییر مکان‌های نسبی مختلف

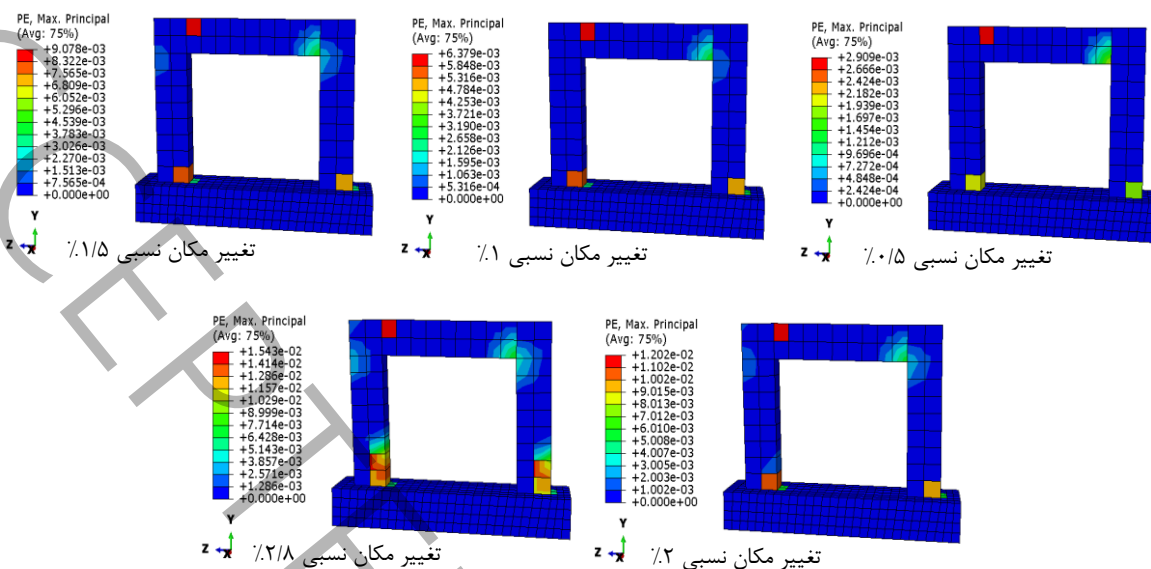
Figure 12: Plastic strain distribution in the AFRP-reinforced concrete frame at different drift levels

در شکل (۱۳) و (۱۴) به ترتیب الگوی ترک خوردگی پیش‌بینی شده در قاب بتنی مسلح شده با آرماتور CFRP و GFRP بر اساس خروجی کرنش پلاستیک ماکزیمم در پنج تغییر مکان نسبی نشان داده شده است.



شکل ۱۳: کرنش پلاستیک ماکزیمم در قاب بتنی مسلح با آرماتور CFRP در تغییر مکان‌های نسبی مختلف

Figure 13: Plastic strain distribution in the CFRP-reinforced concrete frame at different drift levels



شکل ۱۴: کرنش پلاستیک ماکزیمم در قاب بتنی مسلح با آرماتور GFRP در تغییر مکان‌های نسبی مختلف

Figure 14: Plastic strain distribution in the GFRP-reinforced concrete frame at different drift levels

اگرچه با مدل‌سازی سه‌بعدی و غیرخطی قاب بتن‌آرمه و بهره‌گیری از مدل رفتاری CDP پاسخ کلی سازه با دقت مطلوبی پیش‌بینی شده است، اما محدودیت‌های در فرآیند مدل‌سازی وجود دارد که باید در تفسیر نتایج مد نظر قرار گیرد. نخست، به دلیل به‌کارگیری قید ناحیه مدفون<sup>۱</sup> در شبیه‌سازی اندرکنش بین بتن و آرماتورها، هیچگونه لغزشی بین آرماتور و بتن در نظر گرفته نشده است. دوم، مدل قادر به شبیه‌سازی دقیق کمانش موضعی آرماتورها در فشار و رفتار پس‌کمانشی آن‌ها در مرحله پس از خردشدگی بتن پوششی نبوده است. لذا، اعتبارسنجی نتایج صرفاً در سطح رفتار کلی قاب و مقایسه عملکرد سیستم‌های مسلح به آرماتورهای فولادی و FRP امکان‌پذیر است و بررسی دقیق‌تر مکانیزم‌های ناپایداری موضعی، فراتر از دقت این مدل عددی است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیر کرنش پلاستیک حداکثر در قاب‌ها و ارتباط آن با تغییر مکان‌های نسبی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که PE Max به‌عنوان معیاری برای ارزیابی شروع رفتار غیرالاستیک و وقوع کرنش‌های پلاستیک سازه‌ها، در پیش‌بینی آسیب‌های سازه‌ای نقش اساسی دارد. با افزایش تغییر مکان‌های نسبی، کرنش پلاستیک در اعضای سازه افزایش یافته و به‌ویژه در نقاط بحرانی مانند اتصالات و نواحی با تنش‌های بالا، امکان شروع ترک خوردگی و خرابی‌های جدی بیشتر می‌شود.

این تحلیل‌ها نشان می‌دهند که در طراحی و تقویت قاب‌ها و سازه‌ها، به‌ویژه برای مقاومت در برابر بارهای شدید و زلزله، بررسی دقیق PE Max می‌تواند به شناسایی نقاط ضعف و جلوگیری از خرابی‌های عمده کمک کند. به‌ویژه در شرایطی که دررفت‌ها به حد بحرانی می‌رسند، کنترل و پیش‌بینی کرنش‌های پلاستیک می‌تواند ایمنی و عملکرد بلندمدت سازه‌ها را تضمین کند. بنابراین، توجه به PE Max در تحلیل‌ها و طراحی‌ها، به‌ویژه در شرایط بارگذاری شدید، می‌تواند به بهبود عملکرد سازه‌ها و افزایش دوام آنها در برابر تغییرات بحرانی کمک کند.

<sup>1</sup> Embedded Region

بررسی نمودارها نشان می‌دهد که محل استفاده FRP تأثیر قابل توجهی بر سختی اولیه قاب در محدوده الاستیک ندارد، اما در ناحیه غیرخطی، نوع و محل آرماتور نقش تعیین‌کننده‌ای در ظرفیت باربری نهایی و میزان تغییرشکل سیستم ایفا می‌کند. با توجه به نمودارهای نیروی جانبی - تغییر مکان نسبی در قاب‌های ترکیبی مورد بررسی استفاده از آرماتورهای GFRP و AFRP در تیرهای قاب بتنی توصیه می‌شود ولی با توجه به افزایش حدود ۲۰ تا ۲۷ درصدی نیروی جانبی حداکثر در قاب‌هایی که آرماتور CFRP به ترتیب در تیر یا ستون به کار رفته است، می‌توان از آرماتور CFRP در تیر و ستون قاب بتنی یک طبقه استفاده نمود. با جایگزینی آرماتورهای GFRP و AFRP به جای آرماتورهای فولادی جابه‌جایی نسبی متناظر با نیروی جانبی حداکثر به ترتیب ۱۹/۴۶ و ۱۳/۰۹ درصد کاهش می‌یابد و استفاده از آرماتورهای CFRP جابه‌جایی نسبی متناظر با نیروی جانبی حداکثر را ۱۶/۱۱ درصد افزایش می‌دهد.

با استناد به نتایج این پژوهش، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی توسعه مدل به قاب‌های چنددهانه و چندطبقه و همچنین ارزیابی اثر دیوارهای میانقاب بر عملکرد سیستم‌های مسلح به آرماتورهای مختلف مورد توجه قرار گیرد.

## مراجع

- [1] M.F. Fahmy, H.A. Ibrahim, Steel-FRP Reinforced Concrete Moment-Resisting Frames under Lateral Loads: Numerical Investigation, *Journal of Composites for Construction*, 24(6) (2020) 04020064.
- [2] S. Song, G. Wang, X. Min, N. Duan, Y. Tu, Experimental study on cyclic response of concrete frames reinforced by Steel-CFRP hybrid reinforcement, *Journal of Building Engineering*, 34 (2021) 101937.
- [3] H. Fukuyama, Y. Masuda, Y. Sonobe, M. Tanigaki, 33 Structural performances of concrete frame reinforced with FRP reinforcement, in: *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Proceedings of the Second International RILEM Symposium*, CRC Press, (1995).
- [4] M. Nehdi, A. Said, Performance of RC frames with hybrid reinforcement under reversed cyclic loading, *Materials and structures*, 38(6) (2005) 627–637.
- [5] B. ŞOLPAN, E. ÜNLÜOĞLU, M. ERYILMAZ-YILDIRIM, Ö. KARAGÖZ, An Experimental Study On Behavior Of Concrete Frames Reinforced With Hybrid FRP-Steel Bars, in: *Ulusal 7. Yapı Mekaniği Laboratuvarları Çalıştayı Konya, Turkey*, (2019) 59–62.
- [6] M. Aliasghar-Mamaghani, A. Khaloo, Seismic behavior of concrete moment frame reinforced with GFRP bars, *Composites Part B: Engineering*, 163 (2019) 324–338.
- [7] H.A. Ibrahim, M. Fahmy, Z. Wu, 3D finite-element analysis for slab effect on the seismic behavior of FRP reinforced concrete (FRC) frames, in: *Proc., 6th Asia-Pacific Conference on FRP in Structures*. Singapore: International Institute for FRP in Construction (IIFC), (2017) 1–4.
- [8] W. Qu, X. Zhang, H. Huang, Flexural behavior of concrete beams reinforced with hybrid (GFRP and steel) bars, *Journal of Composites for construction*, 13(5) (2009) 350–359.
- [9] R. Nayal, H.A. Rasheed, Tension stiffening model for concrete beams reinforced with steel and FRP bars, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(6) (2006) 831–841.
- [10] A. Kheyroddin, F. Maleki, Prediction of effective moment of inertia for hybrid FRP-steel reinforced concrete beams using the genetic algorithm, *International Journal of Numerical Methods in Civil Engineering*, 2(1) (2017) 15–23.
- [11] F. Maleki, A. Kheyroddin, H. Naderpour, M. Mirrashid, Estimation of the effective moment of inertia for hybrid concrete beams reinforced with steel and FRP bars, *Scientia Iranica*, 32(7) (2025) 6576.
- [12] A. Kheyroddin, F. Maleki, Investigation of Short-Term Deflection in Reinforced Concrete Beams with FRP Bars, *JOURNAL OF FERDOWSI CIVIL ENGINEERING* 31(4) (2019) 113–130.
- [13] F. Maleki, A. Kheyroddin, Investigation of cracking moment in RC beams with FRP bars, *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2(1) (2017) 37–47.
- [14] F. Maleki, M. Gholhaki, A. Kheyroddin, O. Rezaifar, Investigating the behavior of concrete deep beams reinforced with FRP bars, *Concrete Research*, 14(3) (2021) 83–93. (in Persian)
- [15] M. Tavakol, H.H. Kazemi, Comparative assessment of concrete columns reinforced with hybrid steel-GFRP, GFRP, and steel bars under cyclic lateral loading, *Structures*, 71 (2025) 108034.
- [16] S. Liu, X. Wang, Y. Zhou, Y.M. Ali, J. Ding, Z. Wu, Experimental and numerical study of concrete columns reinforced with BFRP and steel bars under eccentric loading, *Journal of Composites for Construction*, 29(2) (2025) 04025010.
- [17] A. Obeidah, W. Nasreddine, M. Harajli, H. Nassif, Assessment of ductility measures of prestressed concrete flexural members: Application to hybrid steel-FRP systems, *Journal of Composites for Construction*, 29(1) (2025) 04024081.
- [18] G. Hopartean, T. Donchev, D. Petkova, C. Georgopoulos, M. Limbachiya, Experimental investigation of concrete frames reinforced with GFRP bars under reversed cyclic loading, *Engineering Structures*, 302 (2024) 117377.