

Investigation of Structural Behavior in Hybrid Reinforced Concrete Frames with Steel and GFRP Bars

Fahimeh Maleki , Omid Rezaifar * , Ali Kheyroddin 

Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

ABSTRACT: The use of Fiber-Reinforced Polymer (FRP) bars as a solution for mitigating corrosion in reinforced concrete structures, including beams, slabs, bridges, and parking garages, has become increasingly widespread. However, concerns remain regarding the structural performance of FRP-reinforced members due to their linear-elastic behavior, brittle failure mode, and relatively low modulus of elasticity. Accordingly, this study presents a numerical investigation of ten one-story, one-bay reinforced concrete frames subjected to pushover analysis using ABAQUS software. The primary objective of this study is to evaluate and compare the performance of frames reinforced with different types of FRP bars in beams, columns, or both with that of steel-reinforced concrete frames. The results indicate that using CFRP bars in a one-story frame increases the maximum lateral load and the corresponding Drift ratio by approximately 63% and 32%, respectively, compared with the steel-reinforced frame. In contrast, the use of GFRP and AFRP bars in reinforced concrete frames reduces the maximum lateral load and the corresponding Drift ratio compared with the conventional reinforced concrete frame. The best structural performance in hybrid frames reinforced with GFRP and AFRP bars is achieved when these bars are placed in the beams rather than in the columns. In this case, the maximum lateral load increases by approximately 18% and 16% for GFRP and AFRP bars, respectively, compared with their use in the columns. Furthermore, the initiation and propagation of cracks in RC frames with different types of bars were investigated by comparing the maximum plastic strain at different drift levels.

Review History:

Received: Apr. 24, 2025

Revised: Mar. 01, 2026

Accepted: Jun. 12, 2026

Available Online: Jul. 05, 2026

Keywords:

Hybrid RC Frames

Finite Element Method

FRP Bars

Drift

Cracking

1- Introduction

Durability issues in aggressive environments and the significant residual deformation of steel bars under seismic loading have increased interest in alternative reinforcing materials. To overcome these limitations, FRP bars have been proposed due to its corrosion resistance and high strength-to-weight ratio. However, since FRP-reinforced concrete members exhibit low ductility and limited energy dissipation due to their linear elastic behavior up to failure, this study investigates hybrid steel-FRP reinforced concrete structures to achieve the required strength and ductility.

Hybrid steel-FRP reinforced concrete moment-resisting frames and joints have been studied to optimize FRP replacement ratios, improve detailing in plastic hinge regions, and enhance seismic performance. Experimental and analytical studies on frames, sections, and beam-column joints indicate that hybrid reinforcement can reduce residual deformations while improving structural behavior and durability under lateral and cyclic loading conditions [1-4]. Experimental and analytical studies have investigated RC frames reinforced with steel and FRP (GFRP) under various configurations,

including single-story and multi-story systems, focusing on nonlinear behavior, plastic hinge response, and lateral performance [5-7]. Genetic algorithms and neural networks have been applied to predict the effective moment of inertia in hybrid concrete beams using experimental data [8, 9]. In addition, the replacement of steel reinforcement with FRP bars in deep beams has been investigated, focusing on stiffness, cracking behavior, and overall structural response [10]. The behavior of RC columns reinforced with steel, FRP, and hybrid systems under cyclic, axial, and eccentric loading has been investigated experimentally and numerically [11, 12].

2- Methodology

A finite element model was developed in ABAQUS and validated against the experimental results of a GFRP-reinforced concrete frame reported by Hopartean et al. [13]. The validation was carried out by comparing the load-displacement response under a displacement-controlled pushover analysis. Subsequently, conventional RC and hybrid steel-FRP frames reinforced with different types of

*Corresponding author's email: orezayfar@semnan.ac.ir

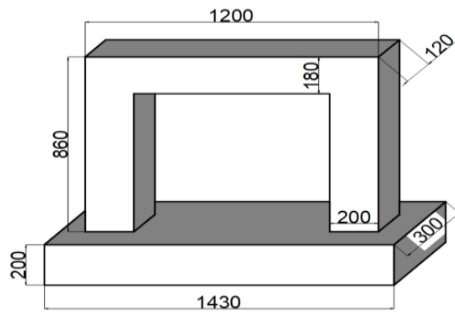


Fig. 1. Geometry and dimensions of the frame (mm) [13].

Table 1. Frame details

Column reinforcement	Beam reinforcement	f_{cu} (MPa)
8Ø6 mm GFRP	Top: 2Ø6 mm GFRP Bottom: 2Ø6 mm GFRP	42

FRP bars were simulated and analyzed.

A reinforced concrete frame with overall dimensions of 860×1200 mm was investigated, as shown in Figure 1. The longitudinal reinforcement in the beams and columns, together with the concrete compressive strength, is summarized in Table 1.

In this study, the Concrete Damage Plasticity (CDP) model was used. Concrete was modeled using C3D8R elements, while FRP reinforcement and stirrups were modeled using two-node linear beam elements (B31).

In the numerical model, GFRP reinforcement was assigned a tensile strength of 1123 MPa and a modulus of elasticity of 47.8 GPa, while steel reinforcement was assigned 500 MPa and 200 GPa, respectively.

3- Results and Discussion

To compare the behavior of hybrid concrete frames, ten reinforced concrete frames with steel and various FRP reinforcements were modeled in ABAQUS. The frames were labeled using a four-letter naming system, where the first “C” denotes the column and “B” denotes the beam, while the second and fourth letters indicate the reinforcement type in the column and beam, respectively. “S” denotes steel, “G” denotes GFRP, “C” denotes CFRP, and “A” denotes AFRP bars. In the first stage, four RC frames reinforced with steel, GFRP, and hybrid bars were modeled, and their lateral load–drift response is presented in Figure 2.

Figure 3 presents a comparison of the lateral load–drift response between the RC frame and the AFRP-reinforced and hybrid frames (CSBA and CABS). Figure 4 presents a comparison of the lateral load–drift response between the RC

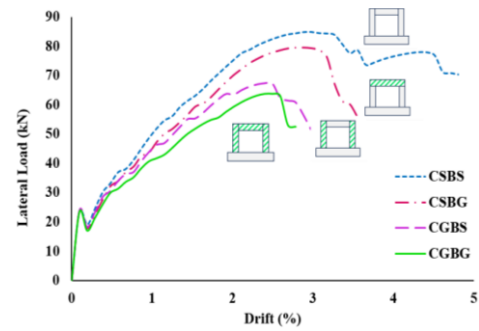


Fig. 2. Comparison of lateral load–drift ratio response of RC frames reinforced with steel, GFRP, and hybrid bars.

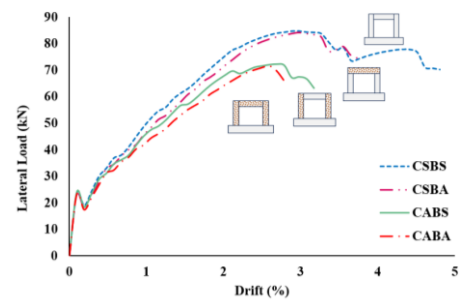


Fig. 3. Comparison of lateral load–drift ratio response of RC frames reinforced with steel, AFRP, and hybrid bars.

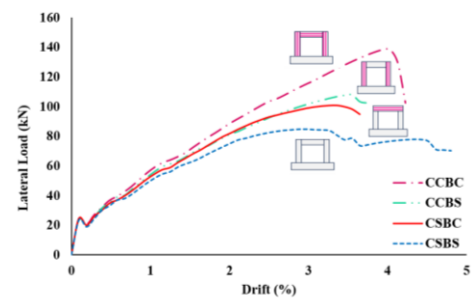


Fig. 4. Comparison of lateral load–drift ratio response of RC frames reinforced with steel, CFRP, and hybrid bars.

frame and the CFRP-reinforced and hybrid frames (CSBC and CCBS).

In the displacement-controlled pushover analysis, all frames exhibit nearly identical initial stiffness, indicating that the early elastic response is primarily controlled by the uncracked flexural stiffness of the concrete members, with negligible influence from the reinforcement type (steel or

FRP). As the structure enters the nonlinear range and flexural cracking develops, the stress distribution across the cross-section changes, making the contribution of longitudinal reinforcement to flexural stiffness increasingly significant. Consequently, both the elastic modulus of the reinforcement and its placement within the structural members have a pronounced influence on the overall structural response. The use of GFRP and AFRP bars in beams reduces the post-cracking flexural stiffness because of their lower elastic modulus relative to steel, resulting in increased lateral drift. In contrast, the use of CFRP bars in columns enhances post-cracking flexural stiffness owing to their higher elastic modulus, thereby increasing the lateral stiffness and ultimate lateral load-carrying capacity of the structural system.

The cracking behavior of the different frames was evaluated based on the distribution of the maximum principal plastic strain (PE Max Principal). This parameter was used to identify the critical regions susceptible to crack initiation and propagation and to compare the cracking patterns among the frames.

4- Conclusions

The relationship between the maximum principal plastic strain and drift was investigated to evaluate crack development, demonstrating the usefulness of PE Max Principal for identifying critical damage regions and assessing structural performance under severe loading conditions.

Based on the lateral load-drift responses of the investigated hybrid frames, GFRP and AFRP bars are recommended for use in concrete beams. Replacing steel reinforcement with GFRP and AFRP bars reduced the drift at the maximum lateral load by approximately 19.46% and 13.09%, respectively. In contrast, CFRP bars increased the maximum lateral load capacity by approximately 20% and 27% when used in beams and columns, respectively, although they also increased the drift at the maximum lateral load by approximately 16.11%.

References

- [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, 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) 275.
- [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 Mekanik 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 Conf. on FRP in Structures*, (2017) 1–4.
- [8] A. Kheyroddin, F. Maleki, Prediction of effective moment of inertia for hybrid FRP-steel reinforced concrete beams using the genetic algorithm, *Numerical Methods in Civil Engineering*, 2(1) (2017) 15–23.
- [9] 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.
- [10] 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)
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.



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

فهیمة مالکی^۱، امید رضائی فر^{۲*}، علی خیرالدین^۱

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۴

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۴/۱۴

کلمات کلیدی:

قاب بتنی ترکیبی

روش اجزا محدود

آرماتور FRP

تغییر مکان نسبی

ترک خوردگی

خلاصه: 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.

۱- مقدمه

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^۱ 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^۲ 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^۳ 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. نهیدی^۴ و سعید^۵ [۴] به منظور بررسی عملکرد قاب‌های بتنی هیبریدی تحت بارگذاری چرخه‌ای و به‌خصوص بررسی رفتار اتصالات قاب خمشی در زلزله،

1. Fahmy
2. Song
3. Fukuyama
4. Nehdi
5. Said

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: orezayfar@semnan.ac.ir



جدول ۱. جزئیات قاب.

Table 1. Frame details.

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

رفتار ستون‌های بتنی مسلح با فولاد، GFRP و ترکیب آن‌ها تحت بارهای چرخه‌ای جانبی و محوری به طور همزمان پرداختند. لیو^۹ 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^{۱۰} و همکاران [۱۷] به بررسی معیارهای شکل‌پذیری در اعضای خمشی بتنی پیش‌تنیده ترکیبی با فولاد و FRP پرداختند.

۲- صحت‌سنجی 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.

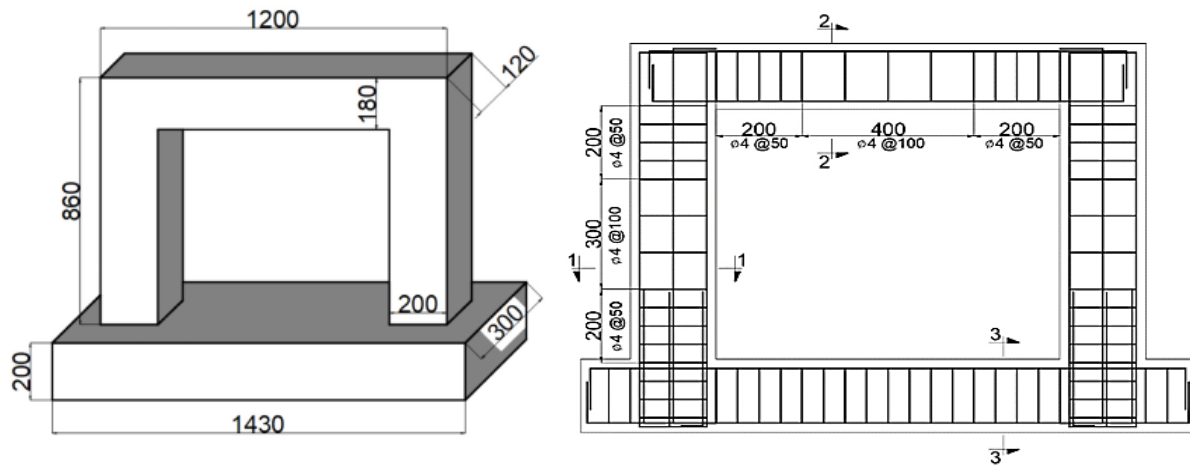
برای مدل‌سازی قاب بتنی مسلح با GFRP در نرم افزار آباکوس، مدل آزمایشگاهی هوپارتیان^{۱۱} و همکاران [۱۸] انتخاب شده است، که در آن رفتار قاب‌های تقویت شده با آرماتورهای GFRP تحت بارگذاری رفت و برگشتی مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه آزمایشگاهی برای شش قاب بتنی (سه سری قاب بتنی و هر سری شامل یک نمونه کنترل، 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. قاب با ابعاد کلی ۸۶۰ * ۱۲۰۰ 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.

نمونه آزمایشگاهی مورد بررسی، با بتن معمولی بوده و عمل‌آوری قاب

سه نمونه اتصال تیر-ستون مسلح با فولاد، آرماتور GFRP و آرماتورهای ترکیبی را آزمایش نمودند. سولپان^۱ و همکاران [۵] به بررسی آزمایشگاهی رفتار قاب‌های یک دهانه‌ای یک طبقه با آرماتورهای فولادی و GFRP پرداختند. ممقانی^۲ و خالو^۳ [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^۴ ارزیابی کردند. ابراهیم^۵ و همکاران [۷] اثرات بتن دال بر پاسخ جانبی قاب مقاوم خمشی بتنی مسلح با آرماتور FRP را مورد بررسی قرار دادند. کو^۶ 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 سخت‌شوندگی بررسی نمودند و مدل سخت‌شوندگی کششی نیال^۷ و رشید^۸ [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 مدل‌سازی در نرم افزار ABAQUS مورد مطالعه قرار دادند [۱۲]. همچنین تاثیر 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

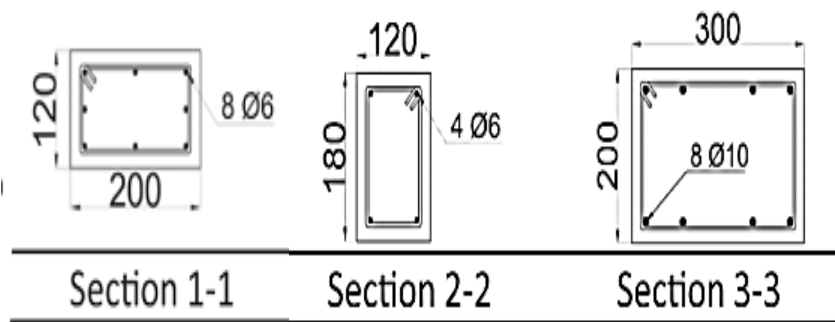
1. Şolpan
2. Mamaghani
3. Khaloo
4. Pushover Analysis
5. Ibrahim
6. Qu
7. Nayal
8. Rasheed

9. Liu
10. Obeidah
11. Hopartean



شکل ۱. ابعاد کلی قاب و جرئیات آرماتورگذاری (ابعاد بر حسب میلی متر است) [۱۸].

Fig. 1. Frame geometry and reinforcement details (mm) [18].



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

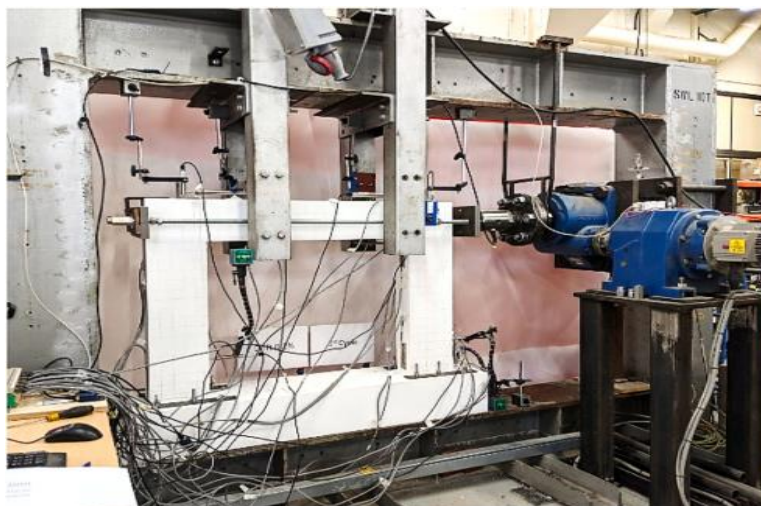
Fig. 2. Reinforcement details of the cross-sections (mm) [18].

مدل پلاستیک آسیب دیده بتن^۱ (CDP)، یک مدل غیرخطی مبتنی بر ترکیب پلاستیسیته و مکانیک آسیب است که رفتار کششی و فشاری بتن را شبیه سازی می کند. این مدل پیچیده ترین و پرکاربردترین مدل رفتاری می باشد که قابل استفاده در محاسبات استاتیکی و دینامیکی است. که در آن دو فرض اصلی مکانیزم شکست، ترک خوردگی کششی و خردشدگی فشاری در نظر گرفته می شود. از این مدل در سازه های بتنی با هر نوع بارگذاری از جمله بارگذاری رفت و برگشتی می توان استفاده نمود، که اثر کاهش سختی الاستیک ناشی از آسیب کششی و فشاری مدل سازی شده و همچنین تاثیر بهبود سختی در بارگذاری رفت و برگشتی، در نظر گرفته می شود.

1. Concrete Damage Plasticity Model

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 خاموت های از نوع فولادی و با قطر ۴ میلی متر می باشند. خم های 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 چرخه ای، با کنترل جابه جایی در هر دو جهت می باشد. نحوه اعمال بارگذاری نمونه آزمایشگاهی در شکل (۳) نشان داده شده است.

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.



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

Fig. 3. Loading setup of the GFRP-reinforced concrete frame [18].

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

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.

۳- بررسی قاب‌های بتنی مدل سازی 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 مدل سازی 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 GFRP)، C (آرماتور CFRP) و A (آرماتور AFRP) می‌باشد.

در این تحقیق از مدل CDP برای مدل سازی رفتار بتن استفاده گردید. برای مدل سازی بتن از المان سه بعدی هشت گرهی با تابع شکل درجه یک و انتگرال کاهش یافته C3D8R و برای مدل سازی خاموت و آرماتور FRP، از المان سه بعدی تیر با تابع شکل درجه یک B31 استفاده شده است.

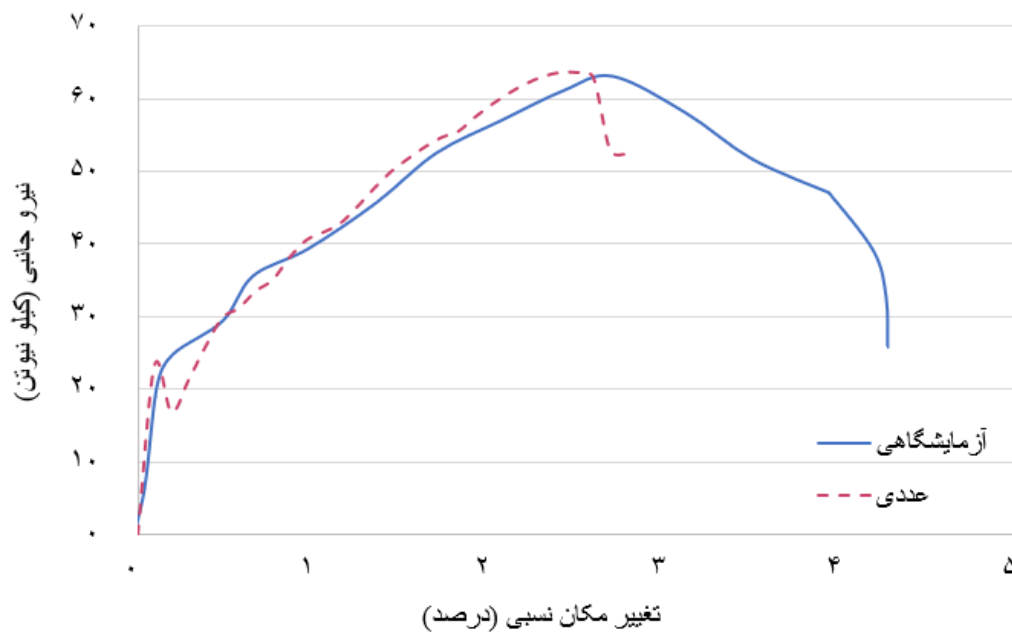
خصوصیات بتن و فولاد و GFRP مدل سازی شده در نرم افزار به ترتیب در جدول (۲) و (۳) نشان داده شده است.

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 مدل سازی به نمونه آزمایشگاهی بسیار نزدیک می‌باشد. میزان خطا در مدل سازی در نیروی جانبی حدود ۱/۱ درصد خطا

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

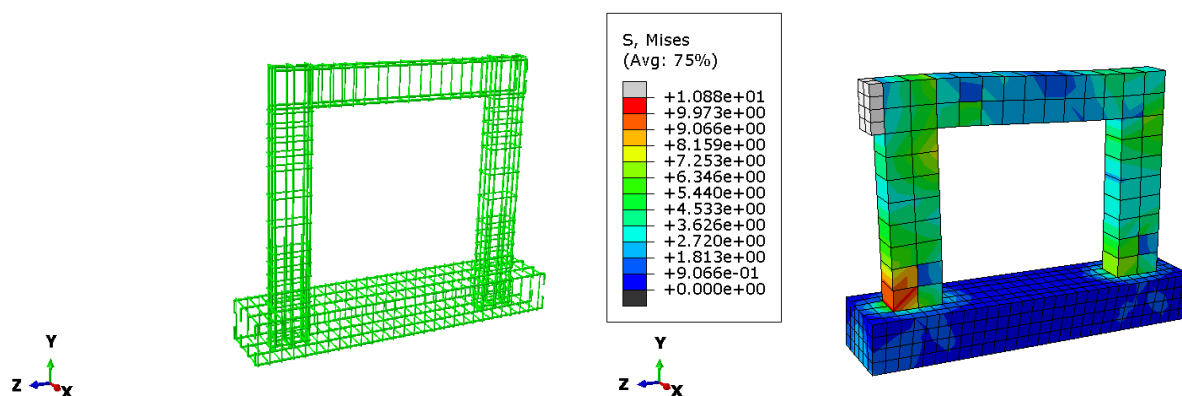
Table 3. Mechanical properties of steel and GFRP bar modeled in Abaqus.

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



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

Fig. 4. Comparison of the numerical and experimental lateral load–drift curves.

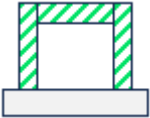
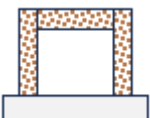
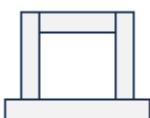
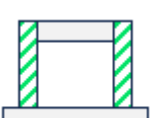
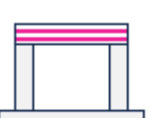
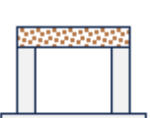
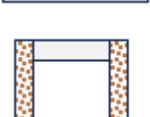


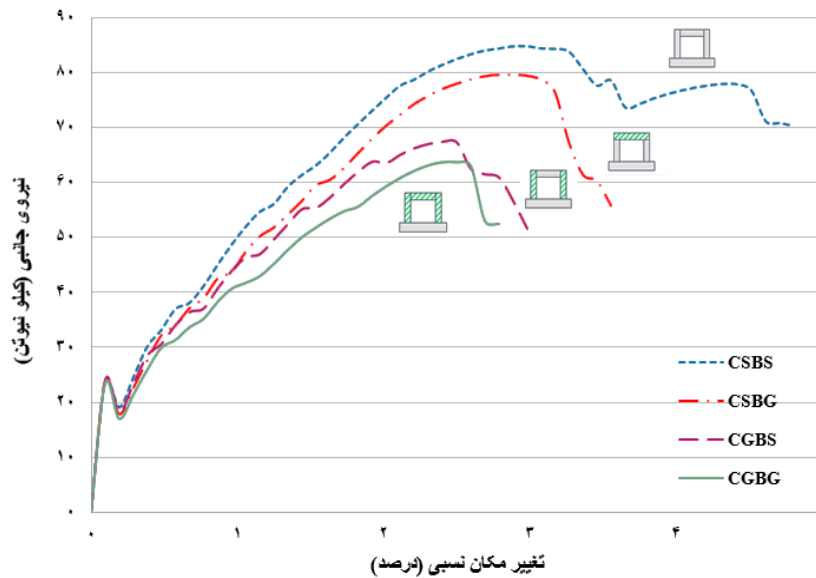
شکل ۵. آرماتور گذاری و کانتور تنش در قاب مدل شده در آباکوس.

Fig. 5. Reinforcement layout and stress distribution in the frame modeled in Abaqus.

جدول ۴. نام‌گذاری نمونه‌های مورد بررسی.

Table 4. Designation of the studied RC frames.

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



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

Fig. 6. Lateral load-drift responses of RC frames reinforced with steel, GFRP, and hybrid bars.

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.

نتایج ارائه شده در شکل (۸)، مقایسه قاب بتن آرمه با قاب مسلح با آرماتورهای CFRP و قاب‌های ترکیبی CSBC و CCBS می‌باشد. سختی اولیه تمام قاب‌ها تا لحظه ترک خوردگی یکسان است ولی نیروی جانبی حداکثر در قاب بتن آرمه CCBC نسبت به قاب بتنی ترکیبی CCBS و CSBC 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.

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)

۳-۱- بررسی منحنی نیرو جانبی- جابه‌جایی نسبی

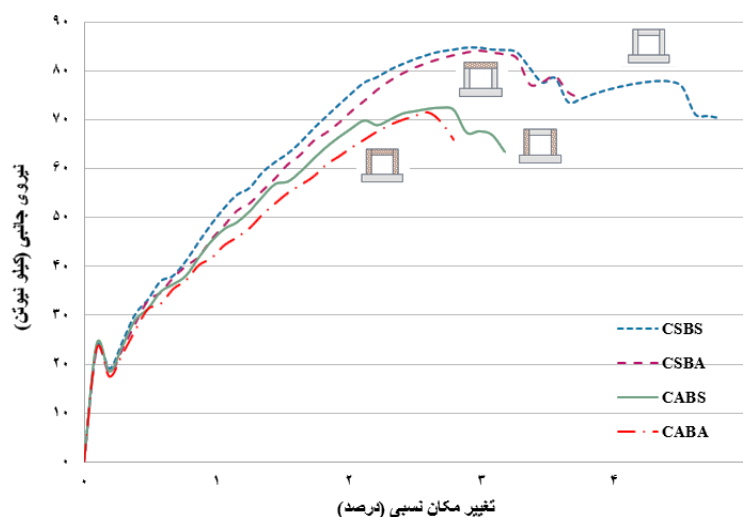
در اولین مرحله چهار قاب بتنی مدل‌سازی شده شامل، قاب‌های بتنی مسلح با آرماتورهای فولادی، آرماتورهای GFRP و ترکیبی از آرماتورهای می‌باشند. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۶)، تمام قاب تا لحظه ترک خوردگی دارای سختی یکسانی می‌باشند ولی نیروی جانبی حداکثر در قاب بتن آرمه CSBS نسبت به قاب بتنی ترکیبی CSBG 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.

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

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



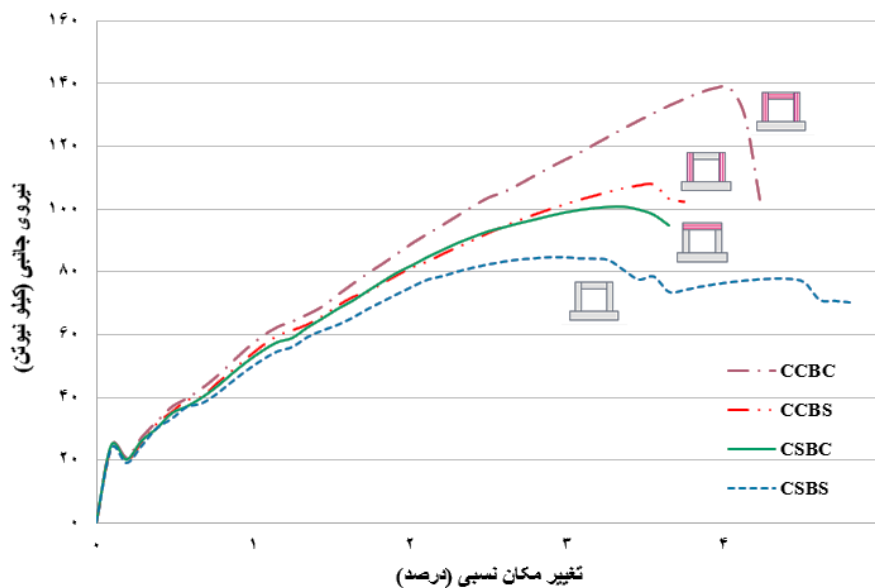
شکل ۷. مقایسه نمودار نیروی جانبی - تغییر مکان نسبی در قاب بتن آرمه و قاب‌های ترکیبی با آرماتور AFRP.

Fig. 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



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

Fig. 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.

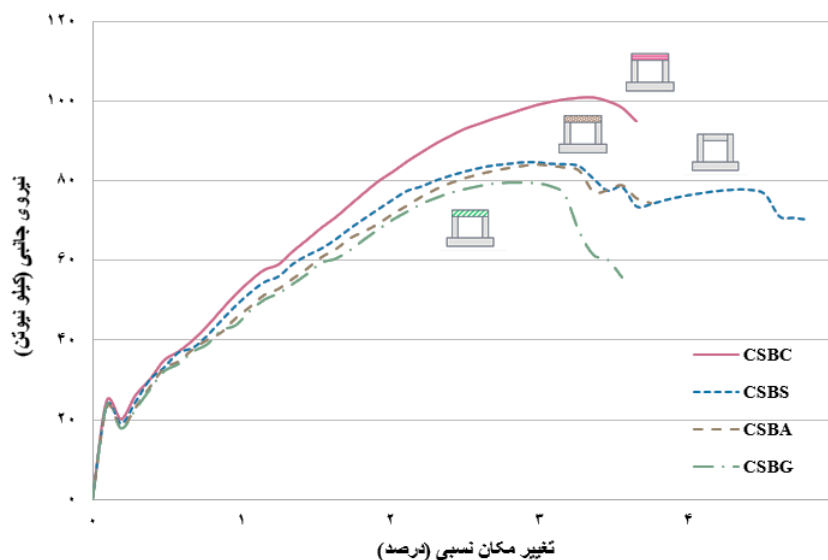
تغییر مکان نسبی متناظر (درصد)	نیروی جانبی حداکثر (کیلو نیوتن)	نام
۲/۹۸	۸۴/۷۸	CSBS
۳/۳۶	۱۰۰/۸۴	CSBC
۳/۴۶	۱۰۷/۶۵	CCBS
۳/۹۴	۱۳۸/۴۹	CCBC

حداکثر و جابه‌جایی نسبی متناظر با آن را به ترتیب ۲۶/۹۸ درصد و ۱۶/۱۱ درصد افزایش می‌یابد در صورتی که جایگزینی آرماتورهای AFRP و CFRP 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.

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

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 می‌یابد در صورتی که جایگزینی آرماتورهای AFRP و CFRP 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.

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



شکل ۹. نمودار نیروی جانبی - تغییر مکان نسبی در قاب‌های بتنی با انواع آرماتور FRP و فولادی در تیر.

Fig. 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.

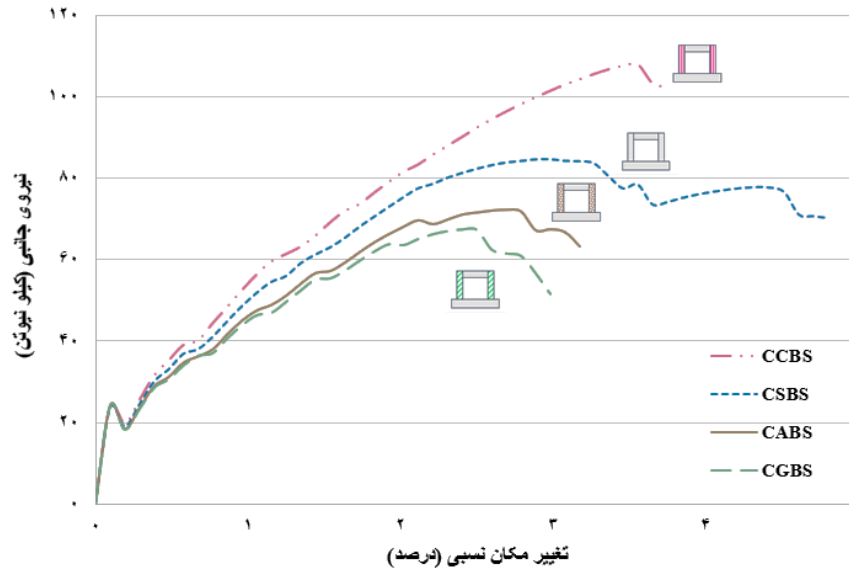
Table 8. Comparison of the maximum lateral load and corresponding drift of the RC frame and hybrid RC frames with different types of FRP bars in the beams.

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

استقرار آن در تیر یا ستون تاثیر 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 ترک‌خوردگی و در نتیجه افزایش تغییر مکان نسبی قاب شده است. در مقابل، ستون‌ها نقش کلیدی در تامین ظرفیت باربری نهایی و کنترل مکانیزم کلی تغییر شکل قاب دارند و به‌کارگیری 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.

ترک‌خوردگی، پاسخ جانبی قاب عمدتاً توسط سختی خمشی مقاطع بتنی در حالت تقریباً غیرترک‌خورده کنترل می‌شود. در این مرحله، سهم آرماتورهای طولی در تامین سختی کلی عضو محدود بوده و تفاوت در نوع یا محل به‌کارگیری آرماتور (فولادی یا FRP) تأثیر معناداری بر شیب اولیه منحنی ندارد.

با ورود سازه به محدوده غیرخطی و گسترش ترک‌خوردگی خمشی، توزیع تنش در مقطع تغییر کرده و سهم آرماتورهای طولی در تامین سختی خمشی افزایش می‌یابد. در این مرحله، مدول الاستیسیته آرماتور و محل



شکل ۱۰. نمودار نیروی جانبی- تغییر مکان نسبی در قاب‌های بتنی با انواع آرماتور FRP و فولادی در ستون

Fig. 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.

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

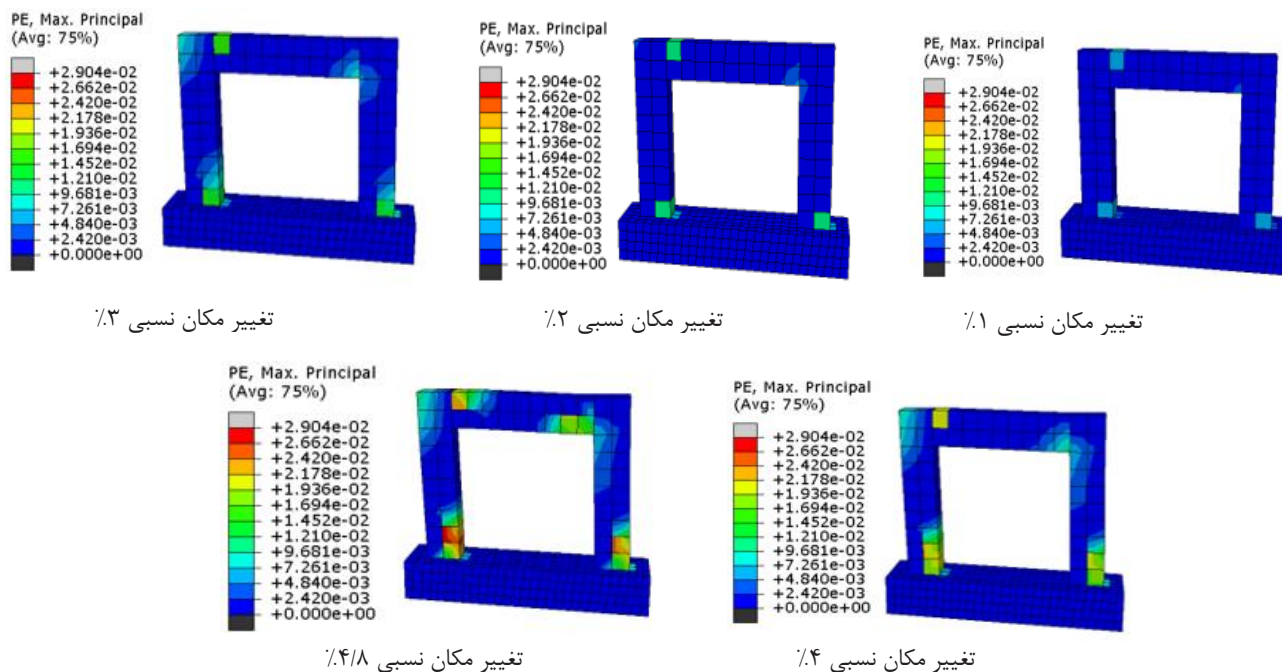
۳-۲- بررسی ترک‌خوردگی

اگر چه ترک‌خوردگی در سازه‌های بتنی را نمی‌توان مستقیماً از مدل آسیب دیده بتن بیان نمود اما می‌توان از طریق مفهوم PE Max Prin- cipal (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 به‌عنوان معیاری برای شناسایی نواحی بحرانی که در آن‌ها تجمع کرنش پلاستیک و احتمال

1. Maximum Principal Plastic Strain

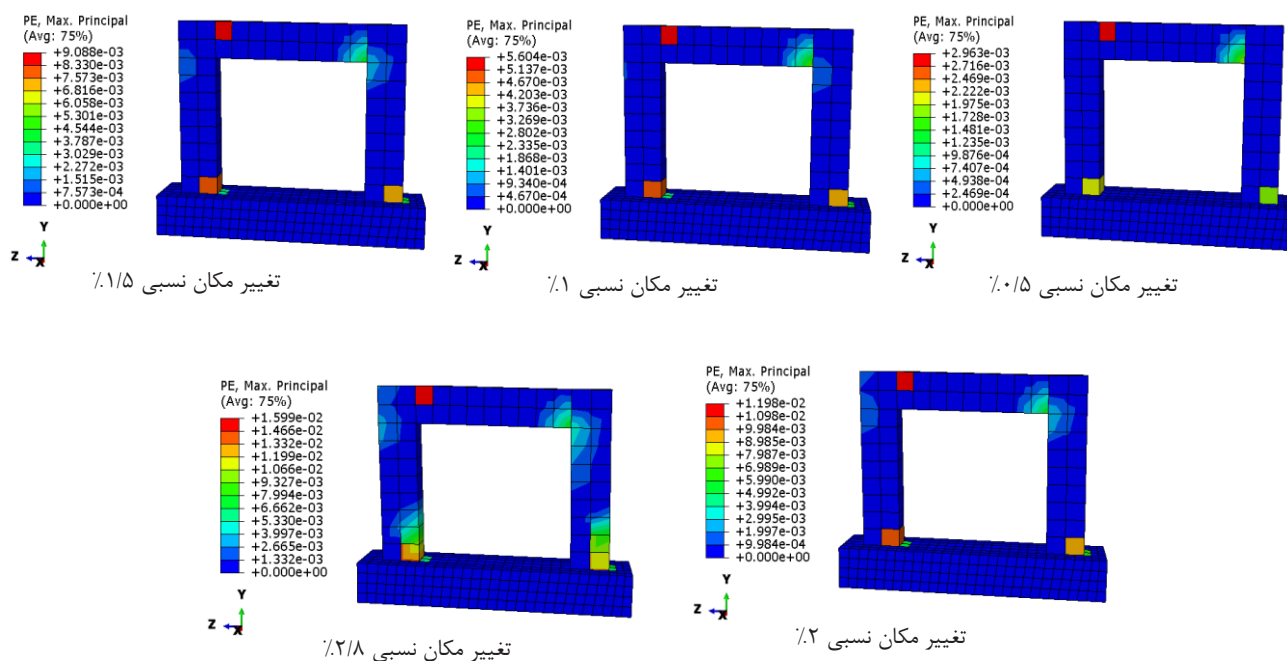
ترک خوردگی وجود دارد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. کرنش‌های پلاستیک در نواحی با تغییرات بزرگ تنش، مانند نقاط اتصال یا دارای تغییرات هندسی، به حداکثر می‌رسند و می‌توانند باعث شروع یا گسترش ترک‌ها شوند. در شبیه‌سازی‌های آباکوس، PE Max برای پیش‌بینی نقاط شروع ترک و مسیر گسترش آن‌ها نقش مهمی ایفا می‌کند.

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.



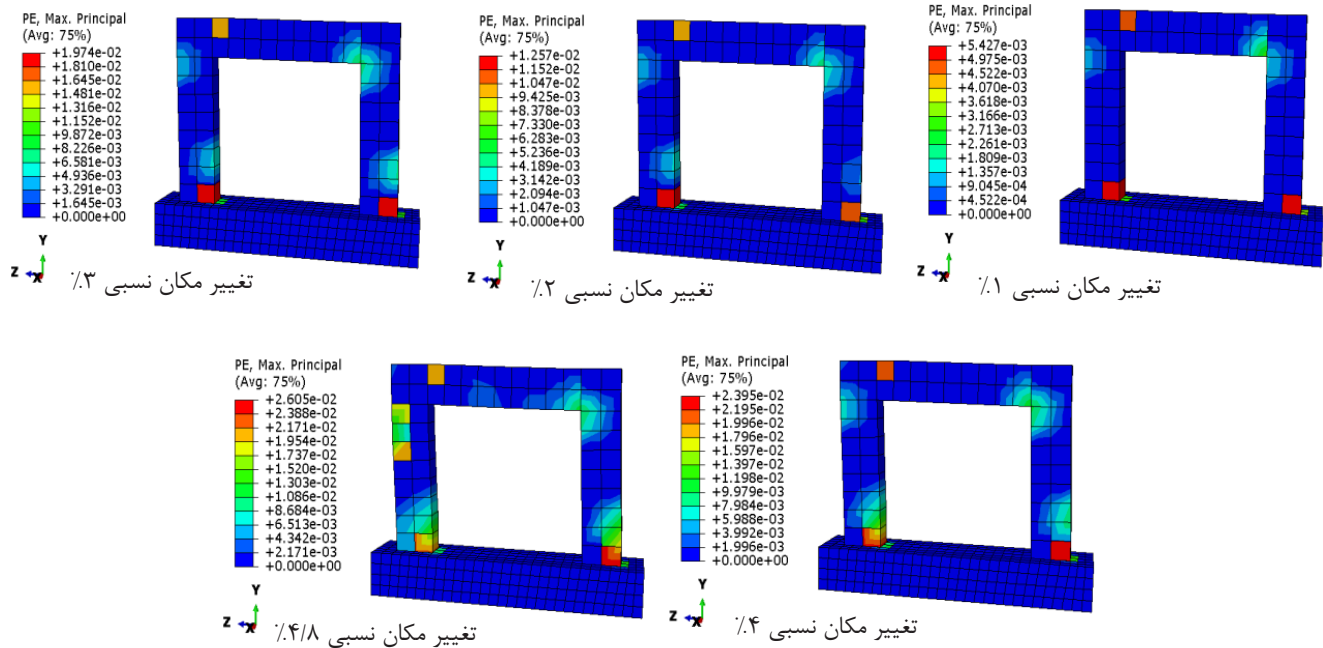
شکل ۱۱. کرنش پلاستیک ماکزیمم در قاب بتن آرمه در تغییر مکان‌های نسبی مختلف.

Fig. 11. plastic strain distribution in the RC frame at different drift levels.



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

Fig. 12. Plastic strain distribution in the AFRP-reinforced concrete frame at different drift levels.



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

Fig. 13. Plastic strain distribution in the CFRP-reinforced concrete frame at different drift levels

گرفته نشده است. دوم، مدل قادر به شبیه‌سازی دقیق کمایش 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

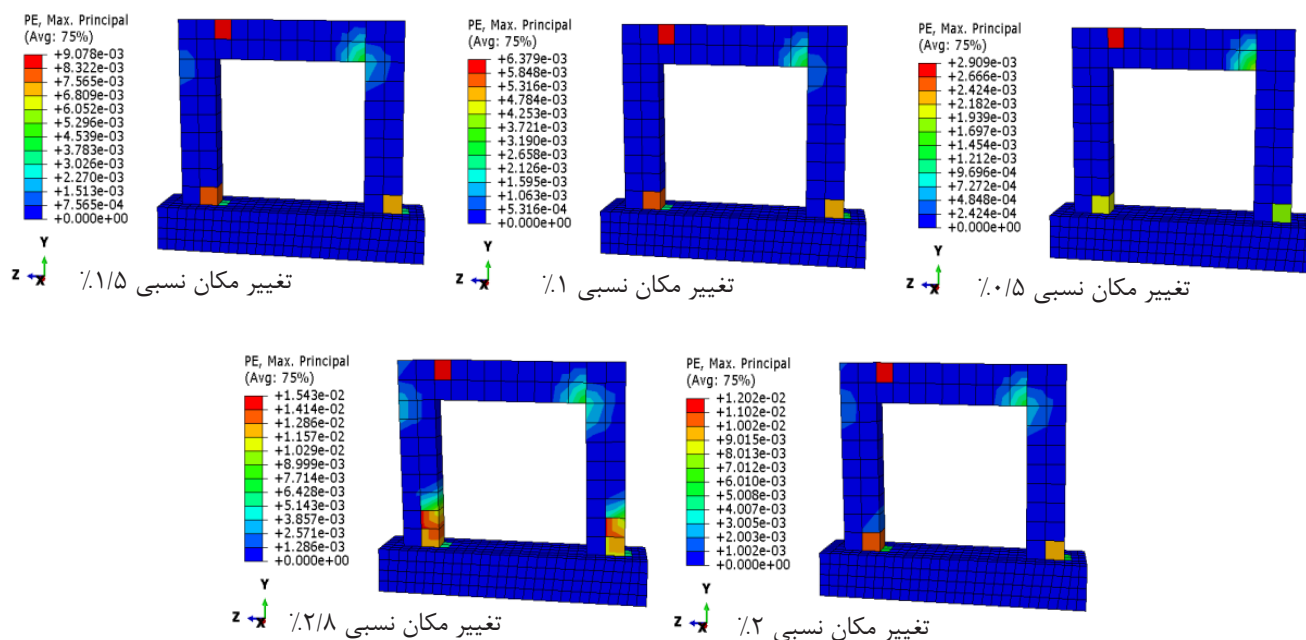
در این مطالعه، تأثیر کرنش پلاستیک حداکثر در قاب‌ها و ارتباط آن با تغییر مکان‌های نسبی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که PE Max به‌عنوان معیاری برای ارزیابی شروع رفتار غیرالاستیک و وقوع کرنش‌های پلاستیک سازه‌ها، در پیش‌بینی آسیب‌های سازه‌ای نقش اساسی دارد. با افزایش تغییر مکان‌های نسبی، 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

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.

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.

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 فرایند مدل‌سازی وجود دارد که باید در تفسیر نتایج مد نظر قرار گیرد. نخست، به دلیل به‌کارگیری قید ناحیه مدفون^۱ در شبیه‌سازی اندرکنش بین بتن و آرماتورها، هیچگونه لغزشی بین آرماتور و بتن درنظر

1. Embedded Region



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

Fig. 14. Plastic strain distribution in the GFRP-reinforced concrete frame at different drift levels.

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.

منابع

- [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)

می‌تواند به شناسایی نقاط ضعف و جلوگیری از خرابی‌های عمده کمک کند. به‌ویژه در شرایطی که دریافت‌ها 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.

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 تغییر شکل 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

- [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.
- 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.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Maleki, O. Rezaifar, A. Kheyroddin, Investigation of Structural Behavior in Hybrid Reinforced Concrete Frames with Steel and GFRP Bars, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 58(3) (2026) 335-352.

DOI: [10.22060/ceej.2026.24097.8258](https://doi.org/10.22060/ceej.2026.24097.8258)

