



Civil and Project Journal
<http://www.cpjournals.com/>

Research Article

Nonlinear Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Beams

Morteza Amooie^{1*}, Mahdiah Sabbaghian², Ali Kheyroddin³, Mohammadreza Sabbaghian⁴

1*- PhD in Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Guilan, Guilan, Iran

2- PhD Student in Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Environment, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

3- Distinguished Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Semnan, Semnan.

4- MSc in Civil Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Received: 06 December 2025; Revised: 25 December 2025; Accepted: 08 January 2026; Published: 22 May 2026

Abstract

Nonlinear behavior of reinforced concrete beams is complex due to the formation of multiple cracks and the interaction of various internal forces. Therefore, accurate prediction of this behavior requires experimental investigations and numerical modeling based on nonlinear finite element analysis. The objective of this study is to present effective and reliable approaches for modeling reinforced concrete beams in the software Vector2, as one of the widely used tools for concrete structural analysis. For this purpose, four rectangular reinforced concrete beams selected from existing experimental studies are simulated using Vector2. The influence of key modeling parameters on the accuracy of numerical results is investigated and their optimal values are identified. The analysis results indicate that the finite element model employed in Vector2 is capable of predicting load–displacement curves and cracking patterns with satisfactory accuracy. Moreover, the proposed approach is able to simulate beam behavior governed by both flexural and shear failure mechanisms.

Keywords:

Reinforced concrete beams, Modified Compression Field Theory, Distributed Stress Field, Nonlinear finite element analysis, Vector2

Cite this article as Sabbaghian,M , Amooie,M , kheyroddin,A and Sabbaghian,M . (2026). Nonlinear finite element modeling of reinforced concrete beams. (e239941). Civil and Project, 8(3), e239941 doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2026.573959.1429>

ISSN: 2676-511X / Copyright: © 2026 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and

*Corresponding author E-mail address: amooie@webmail.guilan.ac.ir



نشریه عمران و پروژه

<http://www.cpjournals.com/>

مدل سازی المان محدود غیرخطی تیرهای بتن آرمه

مرتضی عمویی^{1*}، مهدیه صباغیان²، علی خیرالدین³، محمدرضا صباغیان⁴

*1- دکتری عمران- سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

1- دانشجوی دکتری عمران- سازه، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

3- استاد ممتاز دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان.

4- کارشناسی ارشد عمران-زلزله، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: 15 آذر 1404؛ تاریخ بازنگری: 04 دی 1404؛ تاریخ پذیرش: 18 دی 1404؛ تاریخ انتشار آنلاین: 01 خرداد 1405

چکیده

رفتار غیرخطی تیرهای بتن مسلح به دلیل تشکیل ترک‌های متعدد و اندرکنش نیروهای مختلف پیچیده است. از این رو، برآورد دقیق این رفتار مستلزم آزمایش‌های تجربی و مدل‌سازی عددی مبتنی بر تحلیل اجزای محدود غیرخطی است. هدف این پژوهش، ارائه راهکارهایی برای مدل‌سازی دقیق و کارآمد تیرهای بتن مسلح در نرم‌افزار *Vector 2* به عنوان یکی از ابزارهای پرکاربرد تحلیل سازه‌های بتنی است. بدین منظور، چهار تیر بتن مسلح مستطیلی از مطالعات آزمایشگاهی موجود انتخاب و در نرم‌افزار *Vector 2* شبیه‌سازی شده‌اند. تأثیر پارامترهای کلیدی مدل‌سازی بر دقت نتایج عددی بررسی و مقادیر بهینه‌ی آن‌ها تعیین شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهند که مدل اجزای محدود به کاررفته در *Vector 2* قادر است منحنی‌های بار-جابجایی و الگوهای ترک‌خوردگی را با دقت مناسبی پیش‌بینی کند. همچنین، روش ارائه‌شده توانایی شبیه‌سازی رفتار تیرها را تحت مکانیسم‌های شکست خمشی و برشی دارد.

کلمات کلیدی

تیرهای بتن آرمه، نظریه میدان فشاری اصلاح‌شده، میدان تنش توزیع‌شده، تحلیل اجزای محدود غیرخطی، *Vector2*

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: amooie@webmail.guilan.ac.ir

1. مقدمه

رفتار تیر بتن مسلح را اگر تحت بارگذاری کوچک قرار گیرد می توان نسبتاً خطی در نظر گرفت. با این حال، به محض ایجاد ترک، رفتار تیر بتن مسلح با افزایش بارگذاری بسیار غیر خطی می شود. این مشخصه تا حد زیادی بر رفتار تیر و حالت شکست تأثیر می گذارد [1]. درک و پیش بینی رفتار و قدرت تیر بتن مسلح می تواند در تلاش برای انجام طراحی بهتر بسیار مهم باشد. بنابراین، آیین نامه ساختمان الزامات خاصی را برای المان سازه ای فراهم کرده است تا بتواند در شرایط مختلف بارگذاری مقاومت کند.

آزمایش تجربی و اعتبار سنجی عددی را می توان برای پیش بینی مقاومت تیر بتن مسلح و رفتار غیر خطی انجام داد. آزمایش تجربی برای بررسی پارامترهایی مانند مقاومت و حالت شکست تیر بتن مسلح طراحی شده انجام می شود. یک اعتبار سنجی عددی با توجه به داده های آزمایش تجربی برای بررسی بیشتر دقت مدل عددی برای پیش بینی رفتار تیر بتن مسلح مورد نیاز است. همراه با توسعه فناوری رایانه و تعداد پایگاه های داده تجربی که به طور فزاینده ای در دسترس هستند، مدل سازی عددی را می توان برای تأیید بیشتر قابلیت آن در پیش بینی دقیق رفتار غیرخطی تیرهای بتن مسلح به طور مکرر انجام داد.

مدل سازی عددی را می توان با استفاده از مدل سازی میکرو و مدل سازی ماکرو انجام داد. مدل سازی میکرو از مدل پلاستیسیته توزیع شده (DPM^1) استفاده می کند، در حالی که مدل سازی ماکرو از مدل پلاستیسیته متمرکز (CPM^2) استفاده می کند. مدل سازی میکرو می تواند نتایج دقیق تری نسبت به مدل سازی ماکرو ایجاد کند، زیرا در DPM ، تارهای مقطع در طول عضو توزیع می شوند و یک رابطه سطح اعضا ایجاد می کنند. از سوی دیگر، CPM یک عنصر الاستیک با دو فنر غیرخطی در دو انتها اعمال می کند [2]. در نتیجه، مدل سازی میکرو به زمان محاسباتی طولانی تری نسبت به مدل سازی ماکرو برای تحلیل اجزای سازه ای نیاز دارد [3]. در این تحقیق مدلسازی چند تیر بتن مسلح با کمک نرم افزار $VecTor2$ انجام شد. هدف این مطالعه بررسی قابلیت ها و محدودیت های $VecTor2$ در پیش بینی پاسخ های غیرخطی تیرهای بتن مسلح از نظر منحنی های بار-جابجایی و الگوهای ترک است. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل $VecTor2$ با نتایج تجربی تیرهای بتن مسلح تحت بارگذاری یکنواخت مقایسه خواهد شد.

2. معرفی نرم افزار $VecTor2$

$VecTor2$ یک نرم افزار تجزیه و تحلیل المان محدود است که در دانشگاه تورنتو توسعه یافته است و برای انجام تحلیل غیرخطی عناصر RC دو بعدی تحت ترکیبی از تنش های برشی و نرمال استفاده می شود. این برنامه از المان های مستطیل شکل چهار گره ای با تنش صفحه ای با چهار نقطه (دو نقطه در جهت افقی و عمودی) استفاده می کند (المان مثلثی در مناطق انتقال اندازه مش بکار برده می شوند). رفتار بتن مسلح با مدل میدان تنش توزیع شده ($DSFM$) [4] شبیه سازی شده است که از نظریه میدان فشاری اصلاح شده ($MCFT$) [5] گرفته شده است.

¹ Distributed Plasticity Model

² Concentrated Plasticity Model

³ Distributed Stress Field Model

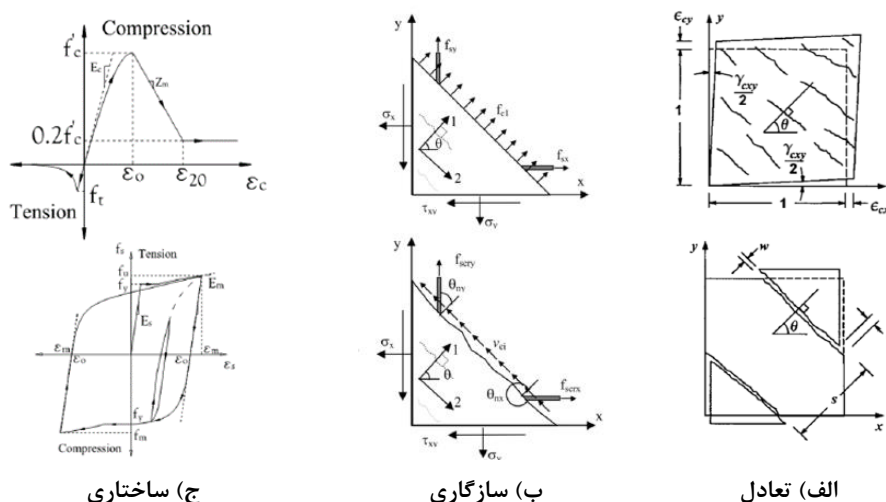
1.2. نظریه میدان فشاری اصلاح شده (MCFT)

این نظریه در سال 1986 توسط Vecchio و Collins برای تعیین رفتار نیرو-جایه جایی اعضای بتن مسلح تحت تنش‌های برشی و قائم ارائه شد. از جمله کاربردهای این روش می‌توان به تخمین تنش‌ها و کرنش‌های محلی و میانگین، جهت ترک خوردگی در قسمت‌های مختلف بتن و میلگردها، تغییر شکل نمونه‌ها تحت بارگذاری‌های مورد نظر و مد خرابی اعضا اشاره کرد. مدل‌های ترک خوردگی بتن به عنوان ماده ارتوتروپیک در این نظریه با روش ترک‌های چرخشی پراکنده⁴ در نظر گرفته شده است [5].

2.2. مدل میدان تنش توزیع شده (DSFM)

مدل میدان تنش توزیع شده (DSFM) که توسط Vecchio در سال 2000 ارائه شد به منظور برطرف نمودن نواقص نظریه MCFT می‌باشد. نظریه MCFT به دلیل فرض تساوی چرخش میدان‌های تنش و کرنش، سختی برشی و مقاومت در برخی اعضا دست بالا گرفته می‌شود و بالعکس برای اعضای که چرخش محدودی دارند این موارد دست پایین در نظر گرفته می‌شوند. در DSFM، نیز بتن با ترک‌های چرخشی پراکنده مدل‌سازی می‌شود. یک مدل ماده تک محوری برای بتن در امتداد جهت‌های موازی با جهت‌های ترک استفاده می‌شود، که جهت و عرض ترک‌ها در طول توالی بارگذاری تغییر می‌کند. فرمول DSFM با سه کلمه کلیدی توصیف می‌شود: (1 تعادل، 2 سازگاری و 3 ساختار، همانطور که در شکل 1 نشان داده شده است. رابطه تعادل تنش‌های اعمال شده خارجی را با تنش‌های داخلی بتن و آرماتور، هم از نظر تنش‌های میانگین و هم از نظر وضعیت تنش محلی (یعنی در محل‌های ترک) که در شکل 1-الف نشان داده شده است، متعادل می‌کند. برای رابطه سازگاری، کل کرنش‌های المانی به کرنش‌های بتن خالص و یک کرنش لغزشی که از لغزش برشی در امتداد ترک‌ها ایجاد می‌شود جدا می‌شوند (شکل 1-ب). از آنجایی که کرنش‌های آرماتور از کرنش کل تعیین می‌شوند، و فرض می‌شود که آرماتور بین ترک‌ها کاملاً به بتن متصل می‌شود، افزایش تنش‌ها و کرنش‌های آرماتور در مکان‌های ترک (که برای متعادل کردن کاهش تنش کششی بتن لازم است) در نظر گرفته می‌شود. انحراف حاصل از جهات تنش فشاری و کرنش اصلی می‌تواند تا ± 10 درجه تغییر کند [4].

⁴ Smeared rotating cracks



شکل 1 روابط کلیدی در فرمولاسیون DSFM [5]

3. جزئیات مدل سازی تیرها

1.3. مدل سازی مصالح

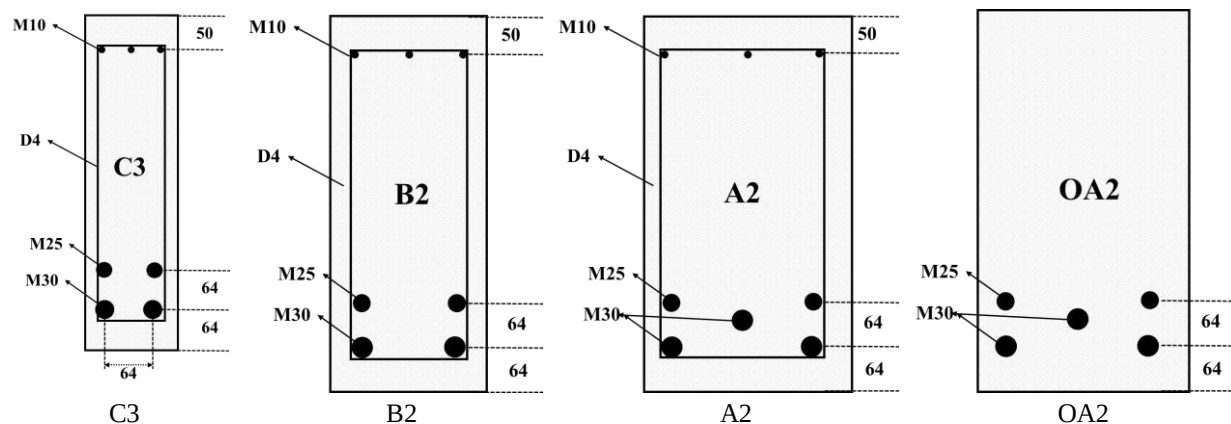
رفتار تک‌محوری بتن قبل از رسیدن به حداکثر تنش، بر اساس سهمی هاگنستاد [6] و پس از آن، با مدل اصلاح‌شده‌ی کنت و پارک [7] تعریف شده است. اثر محصورشدگی بتن به‌طور ضمنی، با استفاده از مدل‌های کوپفر و همکاران [8] و ریچارت و همکاران [9] لحاظ شده است. غیرخطی بودن مسیر بارگذاری/باربرداری با استفاده از تابع توانی رامبرگ-آسگود [10] شبیه‌سازی شده و کرنش‌های فشاری پلاستیک پسماند بتن بر اساس پیشنهاد وکیو [11] تعیین شده‌اند. همچنین، برای لحاظ تأثیر کرنش‌های کششی عمود بر هم در کاهش سختی و مقاومت، مدل وکیو و کالینز [5] به‌کار گرفته شده است.

فاصله بین ترک‌ها مطابق با مدل بنتز [12] محاسبه شده است. در مدل DSFM، رابطه‌ی تنش برشی در برابر لغزش ترک به‌صورت دقیق‌تر مدل‌سازی شده است، درحالی‌که در مدل MCFT این رابطه نادیده گرفته می‌شود. این ویژگی باعث می‌شود که مدل DSFM بتواند رفتار هیسترسیس و مکانیزم‌های شکست برشی (مانند لغزش برشی یا خردشدگی برشی-فشاری در دیوارهای برشی) را بهتر پیش‌بینی کند. رفتار هیسترسیس میلگردهای فولادی بر اساس مدل سکین [13]، مطابق با شکل 1-ج تعریف شده است. مدل‌های لغزش اتصال در نرم‌افزار VecTor2 موجود هستند، اما در این مطالعه، اتصال کامل بین بتن و آرماتور در نظر گرفته شده است. کماتش آرماتورها نیز بر اساس مدل داکال و مایکاوا [10] لحاظ شده است. در مدل‌سازی، میلگردهای عرضی به‌صورت پراکنده در راستای عمودی و خارج از صفحه، با توجه به درصد حجمی آرماتور، و میلگردهای طولی کششی و فشاری به‌صورت گسسته در بتن تعریف شده‌اند.

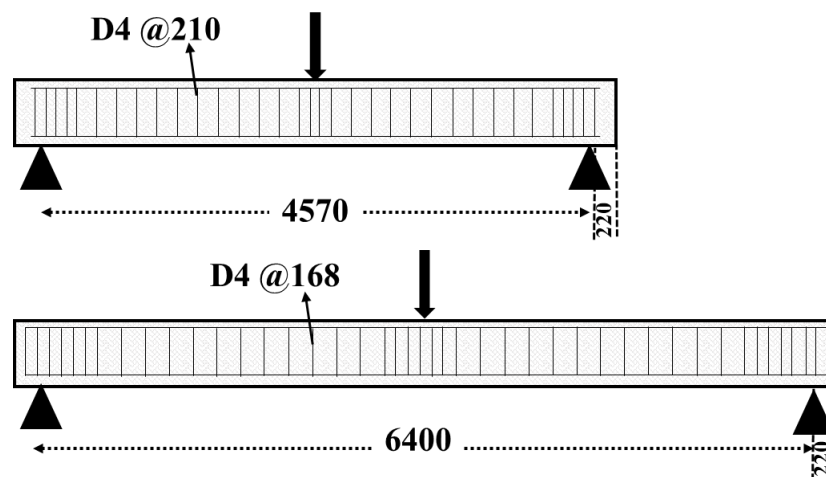
2.3. مشخصات نمونه‌ها

برای مقایسه با نتایج تحلیل المان محدود، چهار تیر بتن مسلح با مقطع مستطیلی از مطالعات آزمایشگاهی پیشین انتخاب شده‌اند. جزئیات مقاطع عرضی و طولی تیرها به ترتیب در شکل 2 و شکل 3 نشان داده شده است. اطلاعات دقیق‌تر نمونه‌ها در جداول 1 تا 3 ارائه شده است.

میلگردهای M25 و M30 (به ترتیب 500 و 700 میلی‌متر مربع) در ترکیب‌های مختلف به کار رفته‌اند تا نسبت تقویت‌کننده مشابهی با تیرهای برسلر-اسکوردلیس حاصل شود. همچنین، برای مقایسه تقویت‌کننده‌های فشاری، از میلگردهای M10 (معادل 100 میلی‌متر مربع) و برای خاموت، از میلگردهای D4 و D5 (با مقطع 25.7 و 32.2 میلی‌متر مربع) استفاده شده است. مانند تیرهای اصلی، میلگردهای طولی پایینی از انتهای تیر امتداد یافته و به صفحه‌ای انتهایی به ضخامت 25 میلی‌متر جوش داده شده‌اند. ویژگی‌های مصالح بتن در زمان آزمایش، همچنین مشخصات آرماتورهای طولی و خاموت‌ها، در جدول 2 خلاصه شده است. تمامی تیرها تحت آزمایش سه نقطه‌ای مطابق شکل 4 قرار گرفته‌اند.



شکل 2 مقطع عرضی تیرهای بتنی [14]



شکل 3 مقطع طولی تیرهای [14]

جدول 1 مشخصات تیرهای انتخاب شده [14]

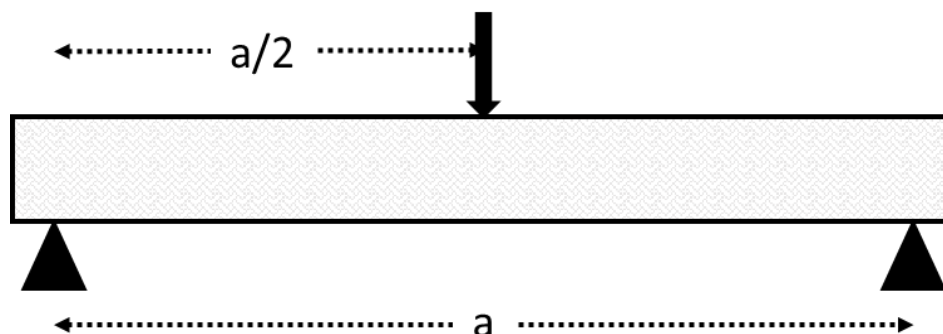
شماره تیر	b(mm)	h(mm)	d(mm)	L(mm)	دهانه (mm)	میلگرد کششی	میلگرد فشاری	خاموت ها
OA2	305	552	457	5010	4570	3M30-2M25	-	-
A2	305	552	457	5010	4570	3M30-2M25	3M10	D5 at 210
B2	229	552	457	5010	4570	2M30-2M25	3M10	D5 at 190
C3	152	552	457	6840	6400	2M30-2M25	3M10	D5 at 168

جدول 2 مشخصات میلگردهای طولی و عرضی تیرها [14] (mm, N)

اندازه میلگرد	قطر	سطح مقطع	مقاومت تسلیم	مقاومت نهایی	مدول الاستیسیته
M10	11.3	100	315	460	2e5
M25a	25.2	500	440	615	2e5
M25b	25.2	500	445	680	2e5
M30	29.9	700	436	700	2e5
D5	6.4	32.2	600	649	2e5

جدول 3 مشخصات بتن تیرها [14]

شماره تیر	مقاومت فشاری بتن $\hat{f}_c$ (MPa)	f_r (MPa)
OA2	23.7	4.34
A2	24.3	3.73
B2	23.2	3.76
C3	35.1	3.86

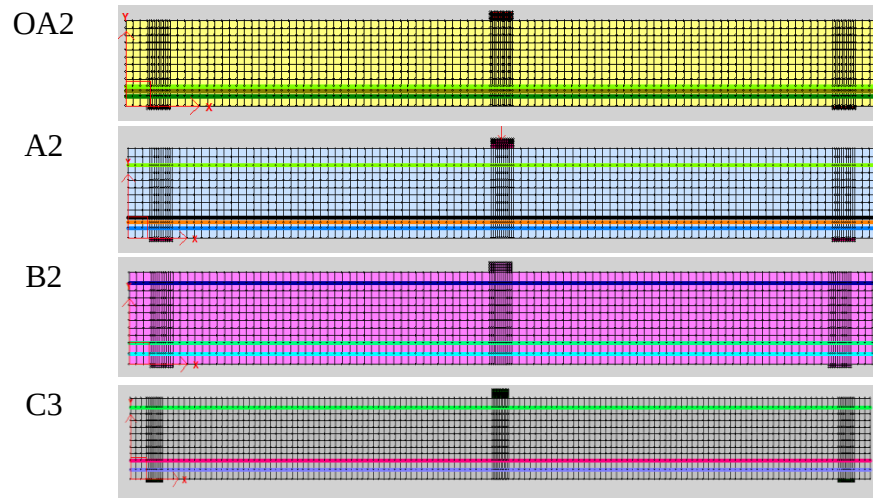


شکل 4 ستاپ آزمایش [14]

3.3. مدل سازی تیرهای بتن مسلح

نمونه‌ها به‌عنوان سازه‌های غشایی بتن مسلح دوبعدی در نرم‌افزار VecTor2 مدل‌سازی شدند. در این مطالعه، آرماتورهای طولی به‌صورت آرماتورهای گسسته و آرماتورهای عرضی به‌صورت آرماتورهای پراکنده (Smeared Reinforcement) در مدل لحاظ شده‌اند. مش‌بندی مدل‌ها با استفاده از المان‌های مستطیلی، حداکثر به اندازه 50 میلی‌متر انجام شده است. برای نمونه‌هایی که دارای فواصل مختلف بین آرماتورهای عرضی یا ناحیه‌ی بدون تقویت در وسط دهانه هستند، مدل‌های مصالح متفاوتی در نرم‌افزار اعمال شده‌اند که این نواحی به‌صورت بصری با رنگ‌های مختلف نمایش داده شده‌اند. همچنین، مناطق پوشش بتن تیرها به‌عنوان

مناطق بتن نامحدود (Unconfined Concrete) در نظر گرفته شده است. بارگذاری به صورت کنترل شده بر اساس جابجایی (Displacement-Controlled Loading) اعمال شده است. نیروی کلی اعمال شده و جابجایی تیرها ثبت شده و برای تهیه منحنی‌های بار-جابجایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این منحنی‌ها با منحنی‌های آزمایشگاهی متناظر مقایسه شده‌اند. همچنین، الگوی ترک‌های حاصل از تحلیل عددی با الگوی ترک‌های ثبت شده در آزمایش‌ها تطبیق داده شده است. مدل اجزای محدود غیرخطی نمونه‌ها در نرم‌افزار VecTor2 در شکل 5 نشان داده شده است.



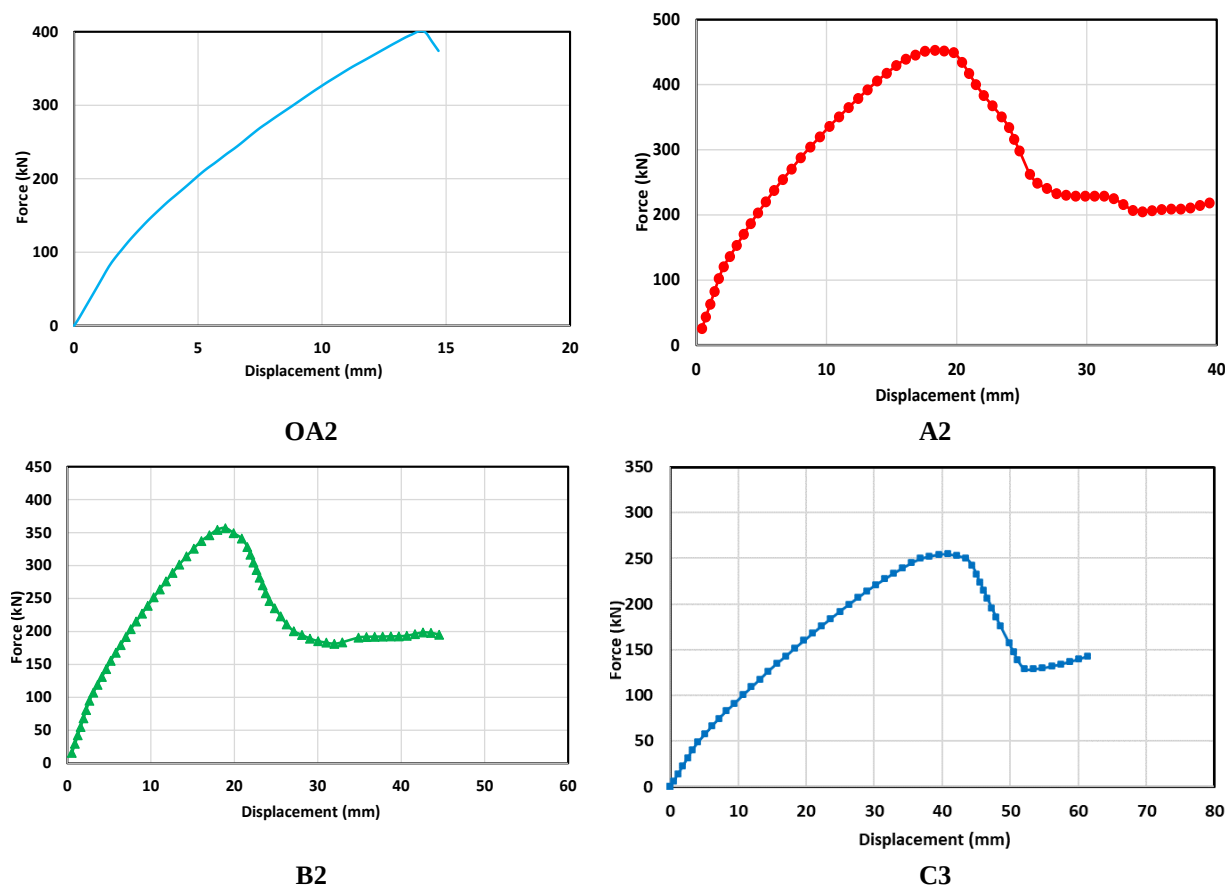
شکل 5 نحوه مدل سازی تیرهای بتن مسلح در نرم افزار Vector 2

4. نتایج و بحث ها

در این بخش، نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود تیرهای بتن آرمه ارائه شده است. از این پس، واژه‌ی «مدل» به نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار VecTor2 اشاره دارد. شکل 6 منحنی‌های بار-جابجایی تیرهای تحلیل شده را نمایش می‌دهد. این منحنی‌ها جهت ارزیابی دقت مدل عددی، با داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی مقایسه شده‌اند. انطباق مناسب بین نتایج عددی و تجربی، کارایی مدل‌سازی انجام شده در پیش‌بینی رفتار غیرخطی تیرهای بتن آرمه را تأیید می‌کند. در ادامه، مقایسه‌های دقیق‌تری میان پاسخ‌های حاصل از مدل عددی و آزمایشگاهی از جنبه‌هایی مانند سختی اولیه، مقاومت نهایی، شکل‌پذیری، و الگوی ترک‌خوردگی انجام شده است.

شکل ۷ مقایسه‌ی منحنی‌های بار-جابجایی حاصل از نتایج آزمایشگاهی، تحلیل عددی با نرم‌افزار VecTor2، و مدل کلاسیک Bresler-Scordelis را برای تیرهای مورد بررسی نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، مدل عددی نرم‌افزار VecTor2 به خوبی توانسته است رفتار غیرخطی تیرها را شبیه‌سازی کند و انطباق مناسبی با نتایج تجربی و مدل تحلیلی ارائه دهد. برای تیر C3، تطابق کامل میان منحنی‌های آزمایشگاهی و عددی مشاهده می‌شود. در سایر تیرها، اگرچه اختلافات جزئی در مقدار جابجایی نهایی یا بار نهایی وجود دارد، اما روند کلی، شیب منحنی و شکل‌پذیری سازه به درستی توسط مدل عددی پیش‌بینی شده است.

در جدول ۴، حداکثر بار حاصل از تحلیل عددی با VecTor2، نتایج تجربی، و نسبت درصدی آن‌ها ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهند که اختلاف مدل عددی با داده‌های تجربی در اکثر نمونه‌ها کمتر از ۵٪ بوده است، به جز نمونه‌ی OA2 که حداکثر بار در آن حدود ۴۴٪ بیش‌تر از مقدار آزمایشگاهی پیش‌بینی شده است.

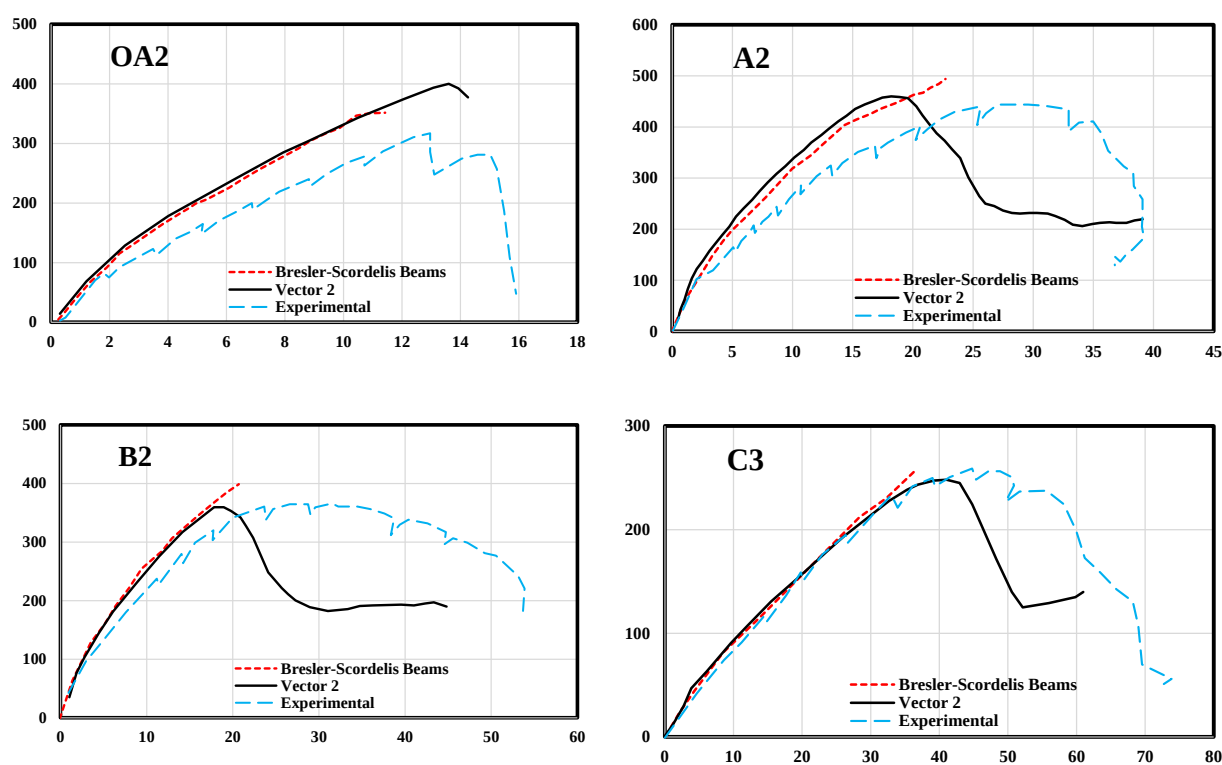


شکل 6 منحنی‌های بار-جابجایی تیرهای بتن مسلح

در نمونه OA2، نرم‌افزار VecTor2 حداکثر بار را 400 kN پیش‌بینی کرده است که 26٪ بیش‌تر از مقدار آزمایشگاهی و 13.8٪ بیش‌تر از مدل Bresler-Scordelis است. با وجود این بیش‌برآورد در ظرفیت نهایی، سختی اولیه و روند رشد بار-جابجایی به خوبی توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی شده است، همان‌طور که در شکل 7 قابل مشاهده است. علت این اختلاف می‌تواند به تفاوت در مدل‌سازی ناحیه بدون خاموت یا فرضیات ترد شدن موضعی بتن مربوط باشد. در تیر A2، مدل عددی VecTor2 با 460 kN تنها 4٪ بیش‌تر از مقدار آزمایشگاهی (444 kN) بار پیش‌بینی کرده است. مدل Bresler-Scordelis نیز در این مورد تقریباً با 11٪ افزایش نسبت به آزمایش رفتار محافظه‌کارانه‌تری دارد. در مورد تیر B2، مدل عددی 2٪ کمتر از مقدار تجربی و مدل Bresler-Scordelis با 398.59 kN بیش‌برآوردی 9٪ نسبت به آزمایش دارد. نسبت بین مدل کلاسیک و عددی نیز 11٪ است، نشان‌دهنده دقت بالای مدل عددی در این حالت با کمترین خطای نسبی می‌باشد. در نهایت، تیر C3 بهترین انطباق را ارائه می‌دهد. نرم‌افزار VecTor2 مقدار 248 کیلو نیوتن را برای حداکثر بار پیش‌بینی کرده که تنها 4٪ کمتر از مقدار آزمایشگاهی (259 kN) است. مدل Bresler نیز عملکرد بسیار نزدیکی با بار 258.08 کیلو نیوتن داشته است.

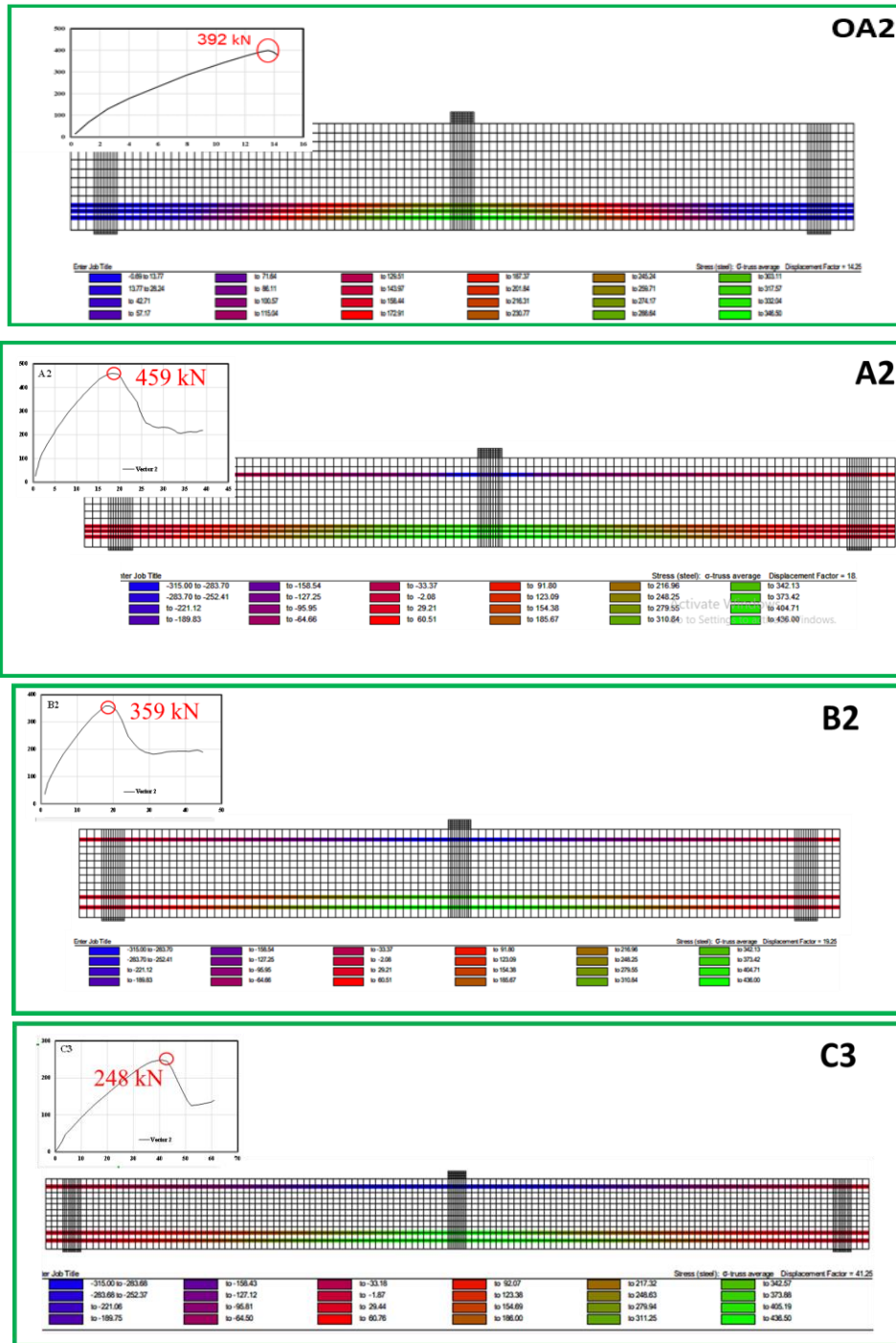
جدول 4 مقایسه نتایج حداکثر بار تیرها

vector/ EXP	Bresler-Scordelis Beams / EXP	Bresler-Scordelis Beams / Vector 2	حداکثر بار (kN)			نام نمونه
			Bresler-Scordelis Beams	Vector 2	Experimental	
1.26	1.11	0.88	351.43	400	317	OA2
1.04	1.11	1.07	493.90	460	444	A2
0.98	1.09	1.11	398.59	359	366	B2
0.96	1.00	1.04	258.08	248	259	C3



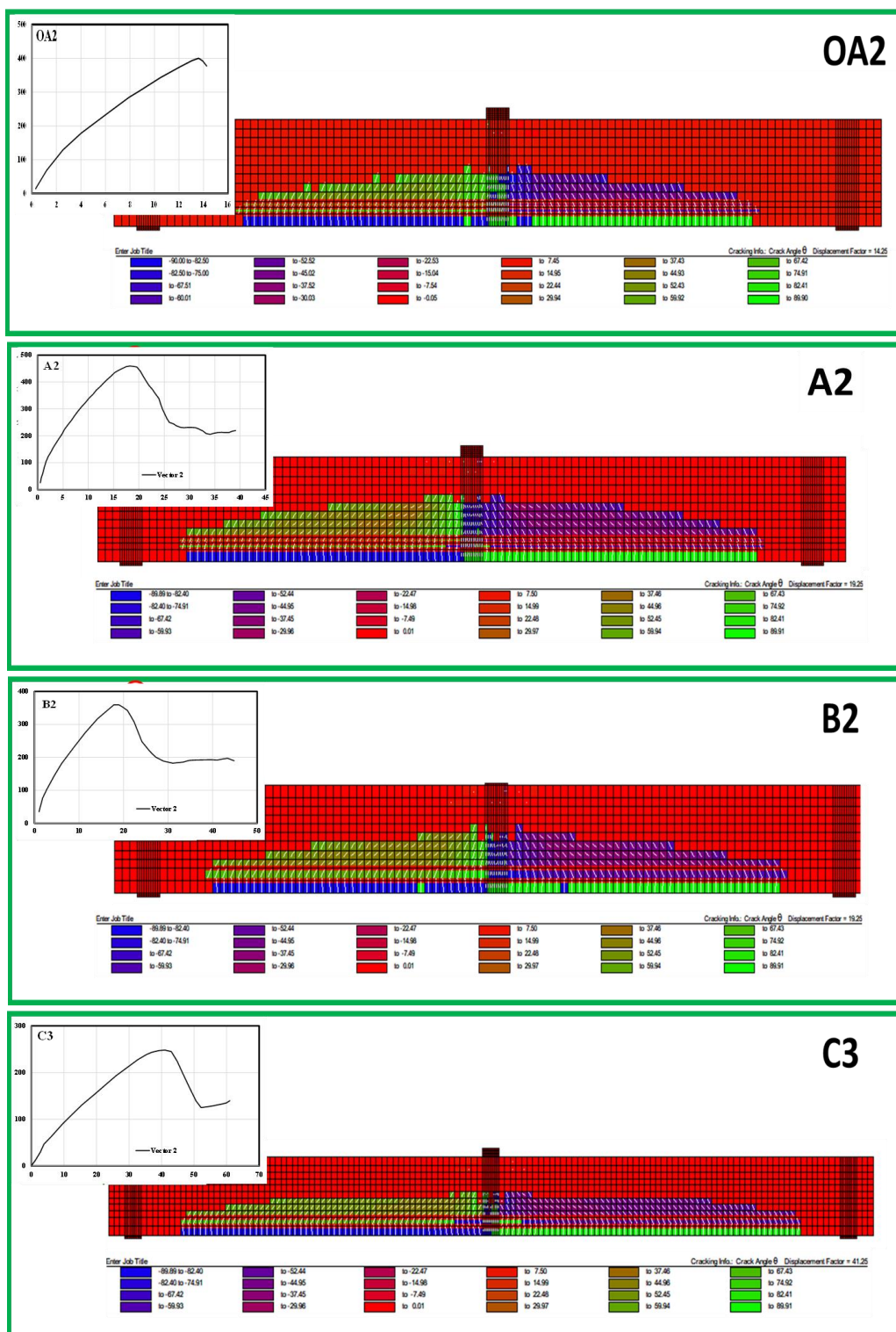
شکل 7 مقایسه منحنی های بار-جا به جایی تیرهای بتن آرمه

شکل 8 توزیع تنش در میلگردهای طولی تیرهای بتن آرمه را در طول بارگذاری نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، تنش ها در ناحیه ی کششی به تدریج افزایش یافته و به مقدار تسلیم میلگردها نزدیک می شوند. مدل عددی نرم افزار VecTor2 به خوبی توانسته است رفتار غیرخطی میلگردها را از مرحله ی خطی تا تسلیم و پس از آن، در محدوده ی پلاستیک پیش بینی کند. روند افزایش تنش در میلگردها با نتایج آزمایشگاهی سازگار بوده و مکانیزم انتقال نیرو بین بتن و فولاد نیز به درستی شبیه سازی شده است.



شکل 8 توزیع تنش در میلگردهای تیرهای بتن مسلح

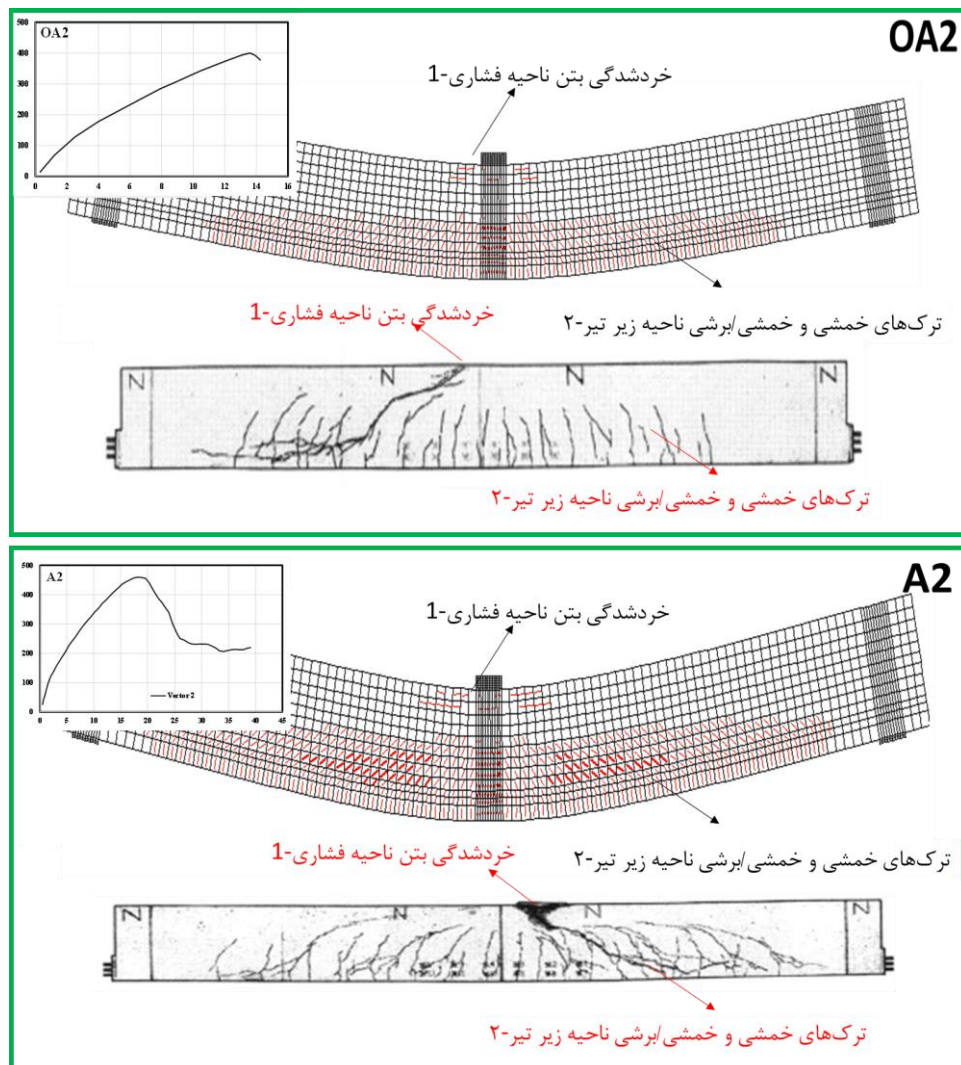
شکل 9 ترکیب توزیع جابجایی و ترک خوردگی در تیرهای بتن آرمه را نمایش می‌دهد. با افزایش بارگذاری، ترک‌ها ابتدا در ناحیه میانی دهانه ظاهر شده و با پیشروی بار به سمت نواحی برشی و تکیه‌گاه‌ها گسترش یافته‌اند. مدل عددی موفق شده است مسیر رشد ترک‌ها، تمرکز جابجایی‌ها و نحوه توزیع آن‌ها را به صورت واقع‌گرایانه بازسازی کند. همپوشانی نواحی دارای تمرکز کرنش و تراکم ترک‌ها، تطابق مدل عددی با رفتار واقعی سازه را تأیید می‌کند.

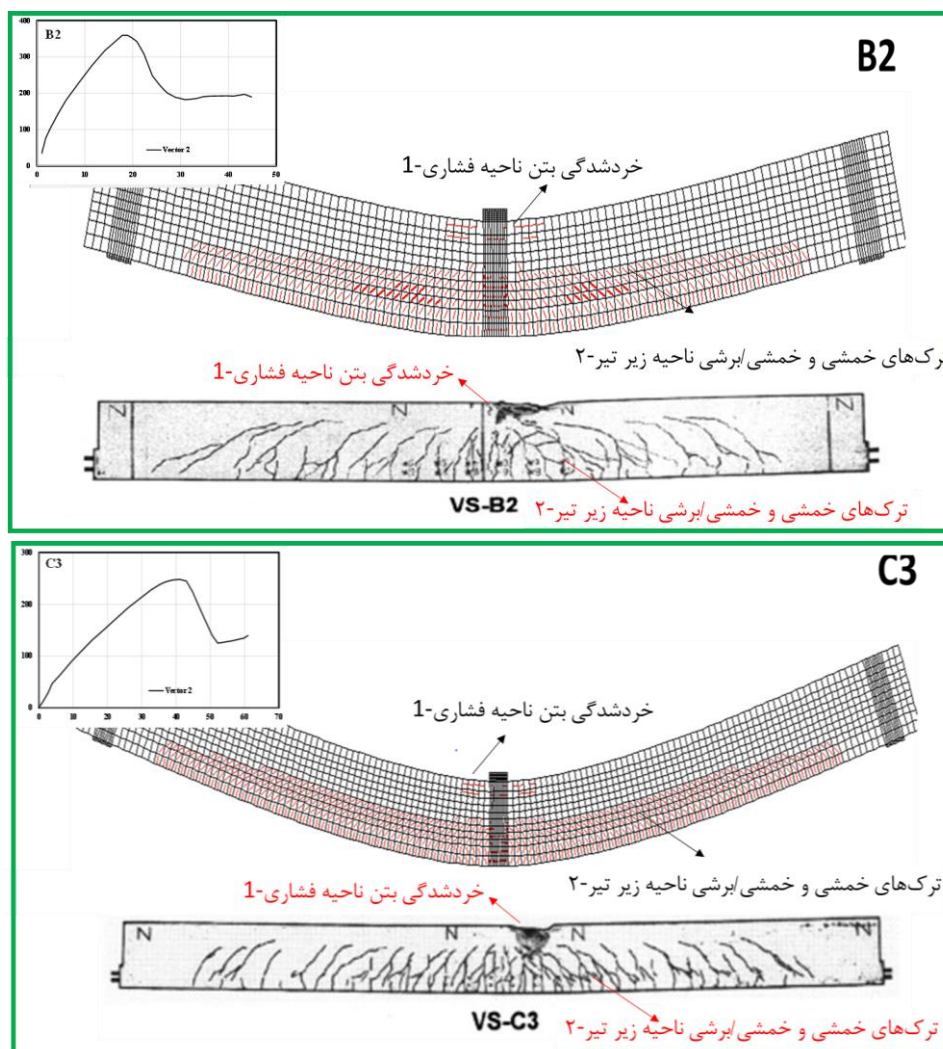


شکل 9 ترکیب جابه جایی و ترک خوردگی

در شکل 10، الگوی ترک خوردگی حاصل از تحلیل عددی با نرم افزار VecTor2 با نتایج آزمایشگاهی مربوط به مطالعه‌ی مرجع [14] مقایسه شده است. الگوهای ترک‌ها از نظر محل شروع، شیب ترک‌ها، نحوه‌ی گسترش، و تراکم ترک‌ها در ناحیه‌ی میانی دهانه

و نواحی نزدیک به تکیه‌گاه، با دقت بالایی توسط نرم‌افزار بازتولید شده‌اند. این تطابق نشان می‌دهد که مدل اجزای محدود به‌کار رفته در نرم‌افزار VecTor2 توانایی بالایی در پیش‌بینی مکانیزم ترک‌خوردگی و شکست در تیرهای بتن‌آرمه دارد. به‌طور کلی، توزیع تنش‌ها در آرماتورها، میزان جابجایی‌ها، و الگوهای ترک‌خوردگی حاصل از تحلیل عددی، همگی تطابق قابل قبولی با داده‌های آزمایشگاهی دارند. این موضوع نشان‌دهنده‌ی کارایی بالای مدل DSFM و قابلیت نرم‌افزار VecTor2 در شبیه‌سازی واقع‌گرایانه‌ی رفتار غیرخطی سازه‌های بتن‌آرمه است.





شکل 10 مقایسه توزیع ترک خوردگی بین حالت آزمایشگاهی [14] و نرم افزار Vector 2.

5. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، چهار نمونه تیر بتن‌آرمه تحت بارگذاری سه‌نقطه‌ای با استفاده از نرم‌افزار VecTor2 مدل‌سازی و تحلیل شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که این نرم‌افزار قابلیت مناسبی در پیش‌بینی رفتار غیرخطی تیرهای بتن‌آرمه دارد. تحلیل‌ها نشان داد که حداکثر بار پیش‌بینی‌شده توسط مدل عددی برای اکثر نمونه‌ها با خطای کمتر از ۱۰٪ نسبت به داده‌های تجربی مطابقت دارد؛ تنها در یک مورد، این اختلاف فراتر از محدوده‌ی یادشده بوده است. این موضوع بیانگر دقت مناسب نرم‌افزار در پیش‌بینی ظرفیت نهایی تیرها با مکانیزم‌های شکست خمشی و برشی است. علاوه بر این، الگوهای ترک‌خوردگی حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی تطابق مطلوبی دارند، به‌گونه‌ای که مسیر و پراکندگی ترک‌ها به‌خوبی بازتولید شده است. اگرچه پیش‌بینی کاهش ناگهانی ظرفیت پس از نقطه‌ی اوج در برخی نمونه‌ها با دقت کمتری انجام شده، اما به‌طور کلی، مدل عددی توانسته است روند کلی رفتار، سختی اولیه، شکل‌پذیری، و مکانیزم‌های شکست را با دقت مناسب بازنمایی کند.

منابع

- [1] P. Bernardi, R. Cerioni, and E. Michelini, "A nonlinear procedure for the analysis of RC beams," *Procedia Structural Integrity*, vol. 2, pp. 2873–2880, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.PROSTR.2016.06.359.
- [2] M. F. Giberson, "Two Nonlinear Beams With Definitions of Ductility," *Journal of the Structural Division*, vol. 95, no. 2, pp. 137–157, Feb. 1969, doi: 10.1061/JSDEAG.0002184.
- [3] A. Calabrese, J. P. Almeida, and R. Pinho, "Numerical Issues in Distributed Inelasticity Modeling of RC Frame Elements for Seismic Analysis," *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 14, no. SUPPL. 1, pp. 38–68, 2010, doi: 10.1080/13632461003651869.
- [4] F. J. Vecchio, "Disturbed Stress Field Model for Reinforced Concrete: Formulation," *Journal of Structural Engineering*, vol. 126, no. 9, pp. 1070–1077, Sep. 2000, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:9(1070).
- [5] F. J. Vecchio and M. P. Collins, "Compression Response of Cracked Reinforced Concrete," *Journal of Structural Engineering*, vol. 119, no. 12, pp. 3590–3610, Dec. 1993, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:12(3590).
- [6] E. Hognestad, "A study of combined bending axial load in reinforced concrete members," in *Bulletin Series No. 399*, Engineering Experimental Station: The University of Illinois, 1951.
- [7] D. C. Kent and R. Park, "Flexural Members with Confined Concrete," *Journal of the Structural Division*, vol. 97, no. 7, pp. 1969–1990, Jul. 1971, doi: 10.1061/JSDEAG.0002957.
- [8] H. B. Kupfer and K. H. Gerstle, "Behavior of Concrete under Biaxial Stresses," *Journal of the Engineering Mechanics Division*, vol. 99, no. 4, pp. 853–866, Aug. 1973, doi: 10.1061/JMCEA3.0001789.
- [9] F. E. Richart, A. Brandtzaeg, and R. L. Brown, "The failure of plain and spirally reinforced concrete in compression," Urbana: University of Illinois., 1929.
- [10] W. Ramberg and W. R. Osgood, "Description of stress–strain curves by three parameters," in *National Advisory Committee For Aeronautics*, Washington, 1943, p. Technical Note No. 902.
- [11] F. Vecchio, "Towards Cyclic Load Modeling of Reinforced Concrete," *ACI Struct J*, vol. 96, no. 2, pp. 193–202, 1999.
- [12] E. C. Bentz, "Explaining the Riddle of Tension Stiffening Models for Shear Panel Experiments," *Journal of Structural Engineering*, vol. 131, no. 9, pp. 1422–1425, Sep. 2005, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:9(1422).

- [13] M. Seckin, “Hysteretic Behavior of Cast in-place Exterior Beam Column-slab Subassemblies,” University of Toronto, 1981.
- [14] F. J. Vecchio and W. Shim, “Experimental and Analytical Reexamination of Classic Concrete Beam Tests,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 130, no. 3, pp. 460–469, Mar. 2004, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:3(460).