

## نشریه مهندسی سازه و ساخت (علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

### ارزیابی رفتار پیوستگی-لغزش در اتصالات تیر به ستون بتن مسلح پیش ساخته با استفاده از مدل سازی اجزاء محدود

امین ایرانپور<sup>۱</sup>، هومن ابراهیم پور<sup>۲</sup>، رضا رهگذر<sup>۳\*</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران  
۲- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران  
۳- استاد، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

#### چکیده

در این مقاله، یک راهکار برای مدل سازی عددی رفتار پیوستگی-لغزش میلگرد مدفون در بتن پیشنهاد شد. بدین منظور، یک نمونه‌ی ساده‌ی آزمایشگاهی میلگرد مدفون در بتن از مراجع معتبر انتخاب گردید. مدل سازی اجزاء محدود نمونه‌ی مذکور در نرم افزار آباکوس انجام شد و پس از مقایسه‌ی نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود با نتایج حاصل از آزمایشگاه، صحت مدل پیشنهادی مورد تأیید قرار گرفت. سپس یک نمونه‌ی اتصال تیر به ستون بتن مسلح در جاریز و یک نمونه‌ی اتصال تیر به ستون بتن مسلح پیش ساخته از مراجع معتبر انتخاب گردید و به روش اجزاء محدود مدل سازی شدند. راهکار پیشنهادی برای مدل سازی لغزش میلگرد در نمونه‌ی اتصال پیش ساخته پیاده سازی شد. پس از اتمام مدل سازی و صحت سنجی نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود نمونه‌ها، برای بهبود رفتار نمونه‌ی اتصال پیش ساخته از وصله‌ی مکانیکی برای جلوگیری از لغزش میلگرد طولی تیر استفاده شد. این اصلاح در نمونه‌ی اتصال پیش ساخته، منجر به بهبود رفتار اتصال شامل افزایش بار تسلیم و بار نهایی اتصال نسبت به نمونه‌ی اتصال پیش ساخته و حتی نمونه‌ی اتصال در جاریز شد؛ اما نسبت لنگر نهایی وارد بر مقطع به مقاومت خمشی مقطع در نمونه‌ی در جاریز و نمونه‌ی پیش ساخته‌ی اصلاح شده تقریباً برابر و نزدیک به عدد یک بود که این خود بیانگر رسیدن لنگر در مقطع به حداکثر ظرفیت خود و تشکیل مفصل پلاستیک خمشی در مقطع است.

کلمات کلیدی: بتن پیش ساخته، اتصال تیر به ستون، مدل سازی اجزاء محدود، رفتار پیوستگی-لغزش بین فولاد و بتن، مهار مکانیکی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/JSCE.2018.109860.1406	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2018.109860.1406	۱۳۹۸/۰۹/۰۱	۱۳۹۷/۰۲/۲۰	۱۳۹۷/۰۲/۲۰	۱۳۹۷/۰۱/۲۱	۱۳۹۶/۰۹/۱۸
رضا رهگذر rahgozar@mail.uk.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

## Evaluation of Bond-Slip Behavior in Precast Reinforced Concrete Beam-to-Column Connection using Finite Element Modeling

Amin Iranpour<sup>1</sup>, Houman Ebrahimpour<sup>2</sup>, Reza Rahgozar<sup>3\*</sup>

1- M.Sc. in Structural Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

2- Ph.D. Student in Structural Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

3- Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

### ABSTRACT

*In this paper, in order to numerically model the bond-slip behavior of embedded bars, an applicable procedure was proposed. To evaluate the efficiency of the proposed model, a credible experimental specimen was selected and modeled in Abaqus software. Comparing the numerical and experimental results of the specimen confirmed the acceptable accuracy of the proposed model. Afterwards, two monolithic and precast reinforced concrete beam-to-column connections were chosen from experimental tests and were numerically simulated. Investigation on the precast specimen showed that the required embedded length of longitudinal bars of beam was not considered. Hence, slippage of the longitudinal bars of the beam at the connection area led to degradation of connection strength. In order to consider this slippage in finite element modeling, the proposed approach was employed. Analytical results showed a suitable agreement with experimental ones and slippage of the beam bars was observed in the finite element analysis. Consequently, in order to prevent the slippage of beam bars, couplers at the end of the bars were used. Required area of the couplers was calculated as such to develop yielding in longitudinal beam bars. These couplers were added to the precast specimen and afterward, this specimen was named modified-precast specimen. Capacity of the modified-precast specimen including yielding load, ultimate load and ductility was improved in comparison with monolithic and precast specimen. However, the ratios of ultimate moment to flexural strength in modified-precast and monolithic specimens are approximately equal to one, which shows the formation of flexural plastic hinge in the beams of both modified-precast and monolithic specimens.*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.109860.1406

### ARTICLE INFO

Received: 09/12/2017

Revised: 10/04/2018

Accepted: 10/05/2018

### Keywords:

Precast concrete,  
Beam-to-column connection,  
Finite element modeling,  
Bond-slip behavior,  
Mechanical anchorage.

\*Corresponding author: Reza Rahgozar

Email address: rahgozar@mail.uk.ac.ir

## ۱- مقدمه

سازه‌های بتنی در مقایسه با سازه‌های فولادی دارای مزایا و معایبی می‌باشند. یکی از معایب عمده‌ی سازه‌های بتنی، سرعت کم اجرا در آنهاست. پیشنهادی که برای رفع این مشکل مطرح شد پیش‌ساختگی بتن بود. علاوه بر این موضوع، پیش‌ساختگی بتن مزایای دیگری از قبیل افزایش کیفیت بتن (شامل ساخت، انتقال و عمل‌آوری بتن)؛ نظارت ساده‌تر و دقیق‌تر و در پی آن پایین آمدن خطا و در نهایت مزایای صنعتی‌سازی را دارا است. در بسیاری از نقاط دنیا، سازه‌های بتنی پیش‌ساخته و پیش‌تنیده به‌عنوان یک سیستم مناسب باربر لرزه‌ای کاربرد دارند. نقطه‌ی ضعف این سیستم در اتصالات آن معطوف می‌شود.

در زمینه‌ی اتصالات تیر به ستون پیش‌ساخته‌ی بتنی تحقیقات زیادی صورت گرفته است؛ اما نهایتاً این تحقیقات به اتصالات واحد و تائید شده‌ای منجر نشده‌اند. این اتصالات را می‌توان از دیدگاه آیین‌نامه‌ی بتن آمریکا، به دو دسته‌ی اتصالات قوی و اتصالات شکل‌پذیر تقسیم‌بندی کرد [۱]. اتصالات قوی، در حین بارهای وارده، الاستیک می‌مانند و تغییر شکل‌های ماندگار را به اعضای دیگری (عمدتاً تیرها) منتقل می‌کنند. این در حالی است که در اتصالات شکل‌پذیر، اعضای اتلاف‌کننده‌ی انرژی، ناحیه‌ی اتصال و ادوات آن می‌باشند. اتصالات قوی نیز به‌نوبه‌ی خود در دو گروه اتصالات تیر و اتصالات خشک جای می‌گیرند. اتصالات تیر که یکی از انواع مرسوم این اتصالات است، به یک مرحله‌ی بتن‌ریزی در کارگاه نیاز دارد. استفاده از اتصالات تیر، مقدار بتن‌ریزی در کارگاه را به حداقل می‌رساند، ولی این اتصال مجدداً معایب سازه‌های بتن مسلح درجاریز را به همراه دارد، چراکه بتن‌ریزی در کارگاه در حساس‌ترین نقاط سازه، یعنی اتصالات، صورت می‌گیرد. برای رفع این مشکل، استفاده از اتصالات خشک راه‌کار مناسبی به نظر می‌رسد که در این تحقیق این نوع اتصالات مورد بررسی قرار می‌گیرند.

تحقیقات انجام گرفته در زمینه‌ی اتصالات بتن مسلح پیش‌ساخته به شرح زیر می‌باشند. در سال ۲۰۰۸، متلی و ریوا، نمونه‌ای پیشنهادی از اتصال تیر را مورد آزمایش قرار دادند. این اتصال رفتار لرزه‌ای مناسبی از خود نشان داد اما این رفتار مناسب، محدود به دریافت ۲٪ بود [۲]. در سال ۲۰۱۲، ویجاپریا و جایا، دو نمونه‌ی اتصال پیش‌ساخته‌ی خشک را در مقیاس یک‌سوم مورد آزمایش قرار دادند. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی اتصالات پیش‌ساخته با اتصال درجاریز، بیانگر مقاومت و شکل‌پذیری کمتر اتصالات پیش‌ساخته بود [۳]. در سال ۲۰۱۳، بورناس و همکاران، یک نمونه‌ی اتصال خشک تیر به ستون را پیشنهاد کردند و اتصال پیشنهادی را روی یک سازه‌ی سه طبقه‌ی تمام‌مقیاس، اجرا کردند. سازه‌ی مذکور در آزمایشگاه، روی میز لرزه، تحت رکوردهای زلزله قرار گرفت. هدف از انجام این آزمایش بررسی پاسخ کلی سازه [۴] و بررسی رفتار اتصالات و دیافراگم کف [۵] بود. نتایج آزمایش حاکی از آن است که اتصال پیشنهادی مشابه یک اتصال نیمه‌گیردار عمل می‌کند. دلایل این موضوع در کتابی که توسط نویسندگان چاپ شد مورد بررسی قرار گرفت [۶].

بدیهی است که ایده‌های جدیدی که برای بهبود رفتار اتصالات مطرح می‌گردد، در صورتی مورد تائید و قابل کاربرد می‌باشند که در آزمایشگاه‌های استاندارد، مورد آزمایش قرار گیرند. از آن‌جا که آزمایش‌های تجربی هزینه‌های زیادی را به محققین تحمیل می‌کند و از طرفی آزمایشگاه‌های استاندارد در اختیار تمامی مراکز آموزشی قرار ندارد، مدل‌سازی اجزاء محدود به‌عنوان یک راهکار برای آزمودن اولیه‌ی ایده‌ها در بین محققین محبوب شده است. آزمایش‌های انجام‌شده بر روی اتصالات تیر به ستون بتن مسلح پیش‌ساخته بیانگر این حقیقت است که رفتار پیوستگی-لغزش<sup>۱</sup> میلگرد، نقش مهمی در رفتار کلی بسیاری از اتصالات ایفا می‌کند. بنابراین مدل‌سازی این پدیده، در نمونه‌ی اتصالاتی که احتمال وقوع لغزش در آن‌ها وجود دارد بسیار مهم است.

تعدادی از مطالعات آزمایشگاهی و اجزاء محدودی مرتبط با رفتار پیوستگی-لغزش میلگرد مدفون در بتن به قرار زیر هستند. در سال ۱۹۷۹، ویواتاناتپا و همکاران، با انجام تست‌های آزمایشگاهی، اثر نوع بارگذاری بر روی پیوستگی بین میلگرد و بتن را مورد مطالعه قرار دادند و نهایتاً روابط تحلیلی‌ای برای مدل‌سازی ریاضی رفتار لغزش میلگرد در بتن ارائه کردند [۷]. در سال ۱۹۸۳، الی گوسن و همکاران، کارهای ویواتاناتپا را گسترش دادند که به ارائه‌ی روابطی واقع‌بینانه‌تر برای مدل‌سازی رفتار لغزش میلگرد در بتن انجامید [۸] و روابط استخراج‌شده در آیین‌نامه‌های طراحی، از جمله آیین‌نامه‌ی اروپایی CEB-FIP مورد استفاده قرار گرفت [۹ و ۱۰]. در سال ۲۰۰۳، لوتز و همکاران، گزارشی برای شبیه‌سازی ناحیه‌ی چشمه‌ی اتصال قاب بتن مسلح ارائه کردند. این گزارش منجر به ایجاد یک المان ( Beam

<sup>۱</sup> Bond-slip behavior

Column Joint) و یک مصالح (Pinching4) در نرم افزار اپنسیس شد [۱۱]. در سال ۲۰۱۰، هاویله و همکاران، اقدام به مدل سازی اجزاء محدود نمونه ای اتصال کردند که از قبل مورد آزمایش قرار گرفته بود [۱۲]. در این مرجع مواردی از قبیل پیش تنیدگی میله های اتصال و رفتار غیرخطی بتن با استفاده از نرم افزار انسیس لحاظ گردیدند، اما با فرض اینکه لغزشی بین میلگرد و بتن صورت نمی گیرد، از مدل سازی پدیده ی لغزش صرف نظر شد [۱۳].

همان طور که در قسمت های قبل ذکر شد، از دیدگاه اجرا، اتصال تیر به ستون خشک، یکی از بهترین نمونه های اتصال است اما این نوع اتصال همیشه رفتار لرزه ای مناسبی از خود نشان نداده است. تحقیق حاضر سعی بر بررسی رفتار یک نمونه ی اتصال خشک را به روش اجزاء محدود با استفاده از نرم افزار آباکوس دارد. از آن جا که میلگردهای طولی تیر در اتصال مذکور دچار لغزش می شوند، در ابتدا بایستی مدل سازی رفتار پیوستگی-لغزش میلگرد به درستی تعریف شود. لازم به ذکر است که تکنیک مرسوم مدل سازی میلگرد مدفون در بتن در نرم افزار آباکوس، قابلیت در نظر گرفتن لغزش بین میلگرد و بتن را ندارد، بنابراین برای مدل سازی پدیده ی لغزش، یک راهکار پیشنهاد می شود و نتایج آن با نمونه های آزمایشگاهی لغزش میلگرد در بتن مقایسه می گردد. پس از تأیید راهکار پیشنهادی برای مدل سازی لغزش، اقدام به پیاده سازی راهکار پیشنهادی در نمونه ی اتصال تیر به ستون پیش ساخته می گردد و پس از صحت سنجی نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود با نتایج آزمایشگاهی مربوط به اتصال مذکور، سعی می شود که تغییراتی در جزئیات اتصال اعمال شود که نهایتاً منجر به بهبود رفتار آن گردد.

## ۲- مدل سازی اجزاء محدود

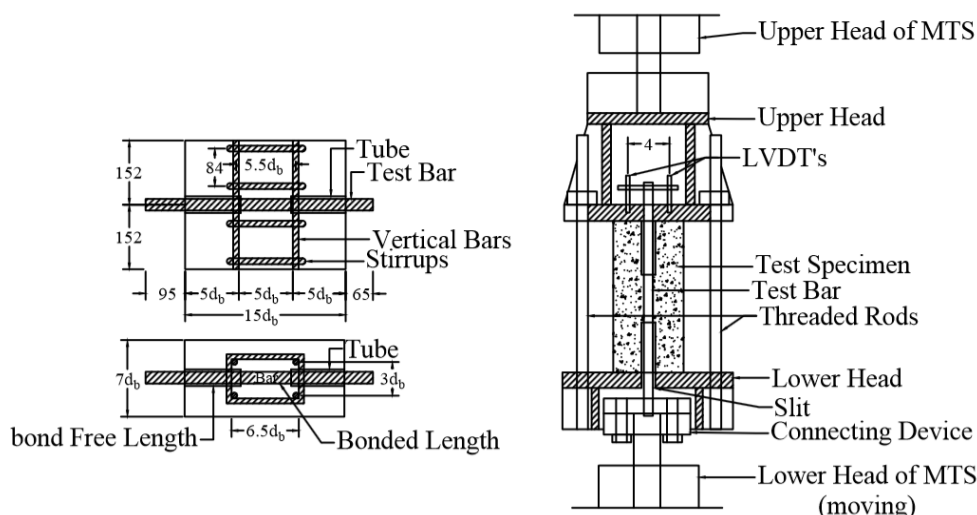
در این تحقیق برای مدل سازی اجزاء محدود از نرم افزار Abaqus 6.13 استفاده شده است. در این بخش جزئیات مربوط به مدل سازی اجزاء محدود یک نمونه ی آزمایش لغزش میلگرد مدفون در بتن، یک نمونه ی اتصال تیر به ستون بتن مسلح در جریز و یک نمونه ی اتصال بتن مسلح پیش ساخته توضیح داده شده است و در پایان نتایج مربوطه برای کنترل صحت مدل سازی های انجام شده، ارائه شده است.

### ۲-۱- ابعاد، اندازه ها و شرایط مرزی نمونه ها

در این بخش ابعاد، اندازه ها، محل قرارگیری میلگردها و سایر مشخصات مربوط به نمونه های آزمایشگاهی انتخاب شده در قسمت های جداگانه ارائه می گردد. لازم به ذکر است که در مدل سازی اجزاء محدود، شرایط مرزی نمونه ها به گونه ای تعریف شده است که معرف شرایط نمونه در آزمایشگاه باشد.

### ۲-۱-۱- لغزش میلگرد مدفون در بتن

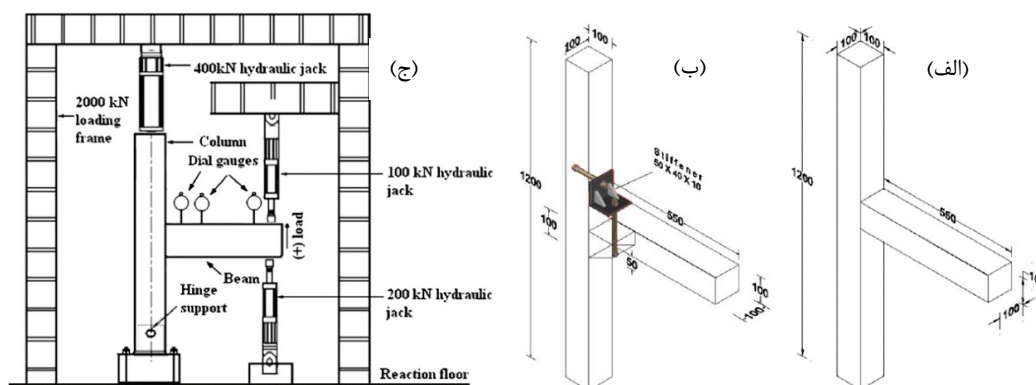
برای شبیه سازی روند خرابی پیوستگی میلگرد با بتن اطرافش می توان از نمونه های ساده استفاده نمود. نمونه ی مورد نظر در این تحقیق شامل میلگرد تکی مدفون شده در بتن است که از مرجع [۸] انتخاب شده است. بتن در این نمونه توسط خاموت های عرضی محصور شده است و قسمتی از طول میلگرد که خارج از ناحیه ی محصور شده قرار می گیرد توسط یک لوله ی پلاستیکی پوشیده شده است تا تماس بین میلگرد و بتن فقط در ناحیه ی محصور شده مورد مطالعه قرار گیرد. جزئیات نمونه ی مورد نظر و همچنین نمای کلی، ابعاد و شرایط مرزی نمونه ی مورد آزمایش در شکل ۱، ارائه شده است، این نمونه، نماینده ی ناحیه ی محصور شده در چشمه ی اتصال است.



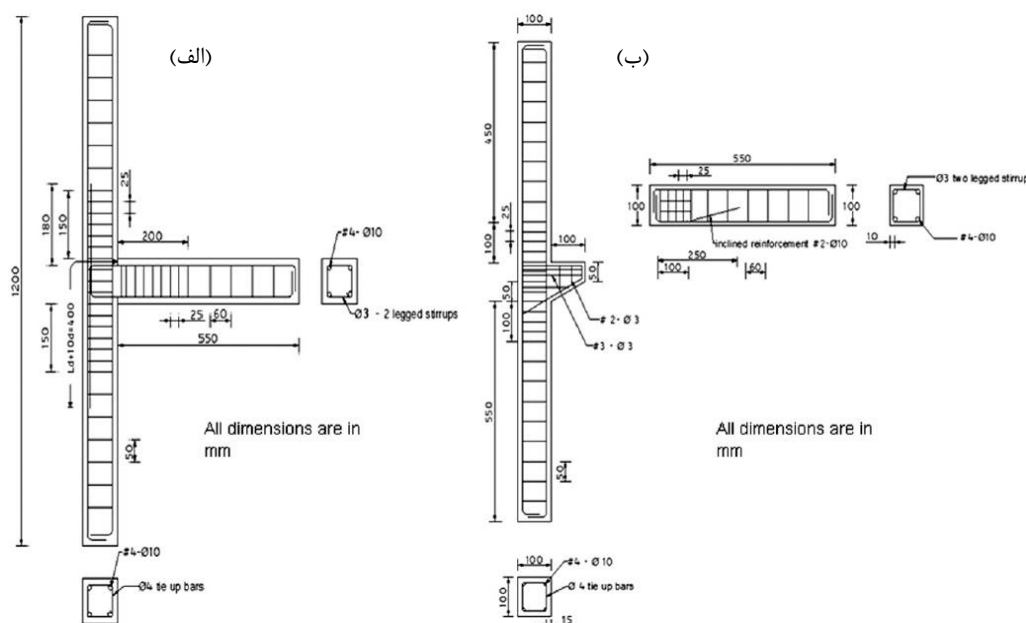
شکل ۱: ابعاد نمونه و نمای کلی نمونه در آزمایشگاه [۸]

### ۲-۱-۲- اتصال تیر به ستون بتن مسلح در جاریز و پیش ساخته

در این تحقیق از کار آزمایشگاهی و جاپریا و جایا [۳] استفاده شده که جزئیات آن به قرار زیر است. یک ساختمان سه طبقه‌ی بتن مسلح مورد تحلیل قرار گرفته و یک اتصال خارجی آن مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل و طراحی تیر، ستون و اتصال، بر اساس آیین‌نامه‌های هندوستان (BIS 1993,2000,2002) انجام شده و نمونه‌های درجاریز و پیش‌ساخته با مقیاس یک‌سوم ساخته شدند. جزئیات ابعاد و اندازه‌ها و نمای شماتیک آزمایش در شکل ۲ و جزئیات آرماتورگذاری نمونه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. نبشی مورد استفاده در نمونه‌ی اتصال پیش‌ساخته، نبشی  $L100 \times 100 \times 10$  است که طول بال‌های آن  $100 \text{ mm}$  و ضخامت ورق آن  $10 \text{ mm}$  است. ضخامت کاور بتن نمونه‌ها،  $10 \text{ mm}$  است.



شکل ۲: (الف) نمای سه‌بعدی نمونه‌ی درجاریز؛ (ب) نمای سه‌بعدی نمونه‌ی پیش‌ساخته؛ (ج) نمای شماتیک آزمایش [۳]



شکل ۳: جزئیات آرماتورگذاری نمونه‌ی: (الف) در جاریز، (ب) پیش ساخته [۳]

همان‌طور که در شکل ۲-ج نشان داده شده است، یک انتهای ستون توسط اتصال مفصلی به زمین متصل است و انتهای دیگر آن در برابر جابجایی و چرخش آزاد است ولی برای مدل‌سازی بار محوری موجود، ستون توسط یک جک تحت بار محوری قرار گرفته است. برای لحاظ کردن بار محوری اعمال شده از طبقات بالا بر ستون، مقدار بار  $0.1f'_c \times A_g$ ، در ابتدای آزمایش به ستون وارد شده و این بار تا انتهای آزمایش باقی مانده است. بار وارد شده به تیر در فاصله‌ی ۱۰۰ میلی‌متری از انتهای آزاد تیر واقع شده است. برای اندازه‌گیری جابجایی قائم تیر، سه گیج در فواصل ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۲۵ میلی‌متری از بر ستون قرار گرفته است.

## ۲-۲- خصوصیات مصالح

مصالح موجود در نمونه‌ها را می‌توان به طور کلی به سه دسته‌ی فولاد، بتن و پیوستگی بین فولاد و بتن تقسیم کرد. از آن‌جا که خرابی‌های موضعی مربوط به محل تکیه‌گاه‌ها در آزمایشگاه کنترل شده است، در مدل‌سازی اجزاء محدود در این قسمت‌ها از ورق‌های صلب استفاده شده است.

### ۲-۲-۱- فولاد

برای مدل کردن رفتار فولاد از مدل دوخطی با مدول الاستیسیته‌ی  $200000 \text{ MPa}$  استفاده شده است. در آزمایش لغزش میلگرد مدفون در بتن، فولادهای طولی و عرضی از نوع فولاد آج‌دار Grade 60 می‌باشند که مقاومت تسلیم واقعی آنها برابر  $530 \text{ MPa}$  اندازه‌گیری شده است. در نمونه‌های اتصال تیر به ستون، برای آرماتورهای طولی از فولاد ۴۱۵ و برای خاموت‌ها از فولاد ۲۵۰ استفاده شده است. مقادیر تنش و کرنش فولادهای مذکور مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده است [۱۴ و ۱۵]. برای مدل کردن نبشی و سخت‌کننده از فولاد ۲۵۰ و برای میله‌های اتصال تیر به نشیمن و تیر به ستون از فولاد Grade 4.6 با قطر ۱۶ mm استفاده شده است [۳].

جدول ۱: مقادیر تنش و کرنش آرماتورها

نوع فولاد	Fy (MPa)	Fu (MPa)	Elongation (%)	Elastic strain (%)	Plastic strain (%)
415	415	485	14.5	0.21	14.29
250	250	410	23	0.13	22.88

## ۲-۲-۲- بتن

در آزمایش لغزش میلگرد مدفون در بتن، مقاومت فشاری بتن ( $f'_c$ ) برابر  $30 \text{ MPa}$  و مقاومت کششی آن برابر  $2/9 \text{ MPa}$  است. در نمونه‌های اتصال تیر به ستون، مقاومت فشاری متوسط  $28$  روزهی نمونهی مکعبی  $41/6 \text{ MPa}$  و مقاومت کششی بتن حاصل از آزمایش نمونهی استوانه‌ای استاندارد، برابر  $3/06 \text{ MPa}$  بدست آمده است. در این تحقیق، مقاومت فشاری نمونهی استوانه‌ای برابر با  $80\%$  مقاومت فشاری نمونهی مکعبی، یعنی مقدار  $33/28 \text{ MPa}$ ، در نظر گرفته شده است و از آنجا که آزمایش کششی شکاف خوردگی (برزیلی) در مقایسه با آزمایش کشش مستقیم،  $10$  تا  $15$  درصد مقاومت کششی بتن را بیشتر ارزیابی می‌کند، مقاومت کششی بتن برابر با  $2/8 \text{ MPa}$  فرض شده است [۱۰]. در تحقیق حاضر برای مدل‌سازی مصالح بتن از مدل خسارت پلاستیک بتن<sup>۲</sup> استفاده شده است که توسط محققین قبلی نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۱۶ و ۱۷]. از آنجا که رفتار بتن در کشش و فشار متفاوت است، رفتار فشاری و کششی بتن به‌طور جداگانه به نرم‌افزار معرفی می‌گردند.

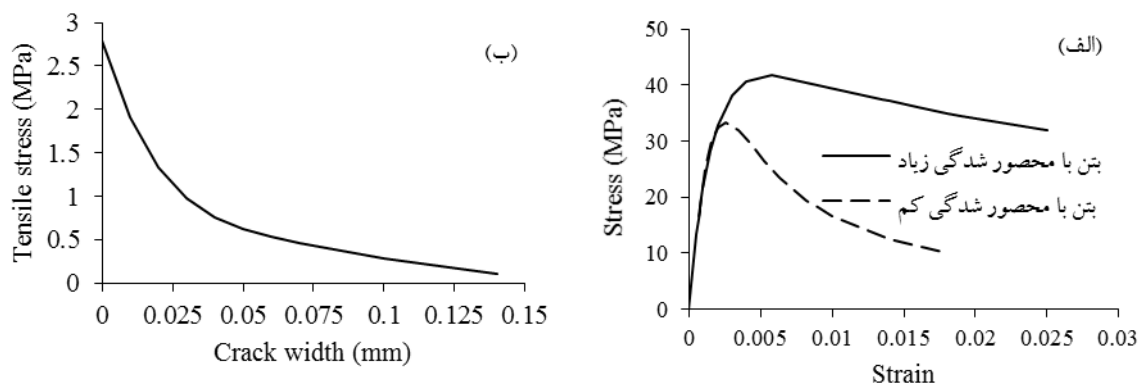
## ۲-۲-۲-۱- رفتار بتن در فشار

با توجه به اینکه در مدل خسارت پلاستیک بتن، رفتار تک‌محورهی بتن به نرم‌افزار معرفی می‌شود، موضوع محصورشدگی بتن در محاسبات کمرنگ است [۱۸]. از آنجا که محصورشدگی بتن در نواحی‌ای که فاصله‌ی آرماتورهای عرضی کم است، تأثیر قابل‌توجهی روی مقاومت فشاری و کرنش شکست بتن می‌گذارد، در این تحقیق، به‌عنوان یک راهکار، بتن موجود در مدل به دو گروه بتن با محصورشدگی کم و بتن با محصورشدگی زیاد تبدیل شده است و رفتار هر کدام به‌طور جداگانه به نرم‌افزار معرفی گردیده است. برای تعریف بتن با محصورشدگی کم، از رابطه‌ی تنش - کرنش پیشنهادشده توسط هسو و هسو [۱۹] استفاده شده است. این مدل تنها با در دست داشتن مقاومت فشاری بتن رابطه‌ی تنش - کرنش بتن را تحت بار فشاری تک‌محوره ارائه می‌دهد. برای تعریف بتن با محصورشدگی زیاد که مربوط به ناحیه‌ی آرماتورگذاری ویژه می‌شود، از مدل مندر و همکاران [۲۰] استفاده شده است. از این مدل در کارهای تحقیقاتی دیگری نیز استفاده شده است [۲۱-۲۳]. مدل مذکور رابطه‌ی تنش - کرنش فشاری بتن محصورشده با خاموت‌های دایره‌ای و مستطیلی را ارائه می‌کند. شکل ۴-الف نمودار تنش - کرنش بتن با محصورشدگی کم و همچنین نمودار تنش - کرنش بتن با محصورشدگی زیاد را برای بتن استفاده شده در نمونه‌های اتصال تیر به ستون نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده است، اثر محصورشدگی تا  $25\%$  مقاومت فشاری بتن را افزایش داده است. پس از اینکه مقدار تنش در بتن از مقاومت حداکثر آن می‌گذرد، شیب رفتار الاستیک بتن دچار زوال یا آسیب می‌گردد. این افت سختی با پارامتری به نام ضریب آسیب به نرم‌افزار معرفی می‌گردد [۱۸]. در این تحقیق مقادیر ضرایب آسیب برای رفتار کششی و فشاری بتن با استفاده از روابط مرجع [۲۴] محاسبه گردیده است.

## ۲-۲-۲-۲- رفتار بتن در کشش

برای معرفی رفتار کششی بتن با استفاده از مدل خسارت پلاستیک بتن در نرم‌افزار آباکوس می‌توان از سه روش استفاده کرد: معرفی رابطه‌ی تنش - کرنش، رابطه‌ی تنش - عرض ترک و رابطه‌ی تنش - انرژی شکست. روش‌های دوم و سوم برای کمرنگ کردن حساسیت غیرمعمول مش بندی در بتن استفاده می‌شوند [۱۸] که در این مقاله از روش دوم (رابطه‌ی تنش - عرض ترک) استفاده شده است. شکل ۴-ب نمودار تنش کششی - عرض ترک مربوط به بتن استفاده شده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد که مقادیر آن با استفاده از روابط مرجع [۲۴] بدست آمده است.

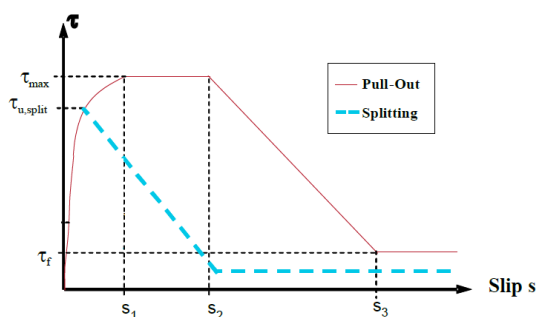
<sup>2</sup> Concrete damage plasticity



شکل ۴: الف) نمودار تنش- کرنش بتن با محصورشدگی کم و زیاد؛ ب) نمودار تنش کششی- عرض ترک

### ۲-۲-۳- پیوستگی بین فولاد و بتن

از آن جا که یکی از مسائل مورد بررسی در تحقیق حاضر مبحث لغزش میلگرد مدفون در بتن تحت بار یکنواخت است، در ابتدا لازم است که توضیحاتی در این خصوص ارائه شود. به طور کلی برای میلگرد مدفون در بتن می توان دو حالت خرابی در نظر گرفت: خرابی همراه با جداشدگی مقطع و خرابی همراه با تسلیم برشی بتن بین آجها و بیرون آمدن از بتن [۱۰]. اگر میلگردهای عرضی قادر به ایجاد محصورکنندگی کافی نباشند و ترکهای جداکننده در مقطع رشد کنند، قبل از تسلیم برشی بتن بین آجها، میلگرد با نیروی کمتری از بتن بیرون کشیده می شود. این حالت خرابی پیوستگی بین میلگرد و بتن، خرابی همراه با جداشدگی مقطع نام دارد. اما در صورتی که میلگردهای عرضی موجود در مقطع بتوانند رشد ترکهای عرضی را کنترل کنند، خرابی مقطع همراه با تسلیم برشی بتن بین آجها اتفاق می افتد که این امر نهایتاً منجر به بیرون آمدن میلگرد از بتن می گردد. شکل ۵، اختلاف بین مقاومت چسبندگی در دو حالت خرابی همراه با جداشدگی و بدون جداشدگی (تسلیم برشی بتن بین آجها و بیرون آمدن میلگرد) را نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می گردد در حالت خرابی بدون جداشدگی، مقاومت چسبندگی بین فولاد و بتن، بیشتر است.



شکل ۵: منحنی لغزش-تنش پیوستگی برای دو حالت خرابی بیرون آمدن میلگرد (Pull-Out) و جداشدگی مقطع (Splitting) [۱۰]

همان طور که در شکل ۵، مشاهده می گردد، نمودار مربوط به حالت خرابی بیرون آمدن میلگرد با یک رابطه‌ی غیرخطی (Error!) (Reference source not found.) شروع می شود که برای میزان لغزش کمتر از  $S_1$  قابل استفاده است. در ناحیه‌ی  $S_1 \leq S \leq S_2$  نمودار وارد یک ناحیه‌ی خطی با شیب صفر می شود (Error! Reference source not found.). با عبور مقدار لغزش از  $S_2$  مقدار تنش پیوستگی  $\tau$  به صورت خطی کاهش می یابد (Error! Reference source not found.). این کاهش مقاومت تا مقاومت اصطکاک  $\tau_3$  ادامه می یابد. مقدار  $S_3$  برابر با فاصله‌ی خالص بین آجهای میلگرد است که از آن به بعد، مقاومت چسبندگی مقدار ثابت  $\tau_3$  را تجربه می کند (Error! Reference source not found.).

$$0 \leq S \leq S_1 \quad \text{For} \quad \tau = \tau_1 \left( \frac{S}{S_1} \right)^\alpha \quad (1)$$



$$\tau = \tau_1 \text{ For } S_1 \leq S \leq S_2 \quad (2)$$

$$S_2 \leq S \leq S_3 \text{ For } \tau = \tau_1 - \frac{\tau_1 - \tau_3}{S_3 - S_2} (S - S_2) \quad (3)$$

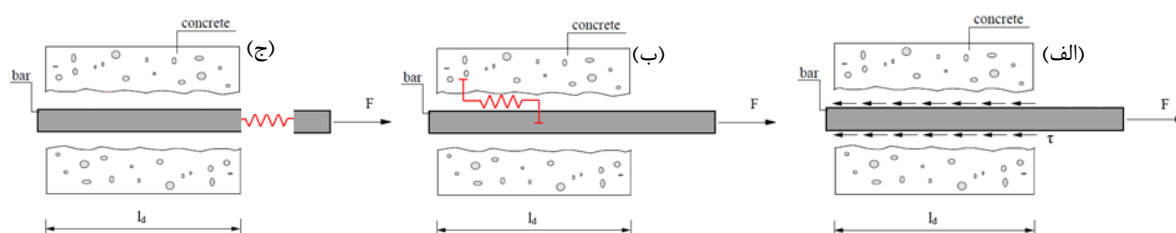
$$S \geq S_3 \text{ For } \tau = \tau_3 \quad (4)$$

پارامترهایی از قبیل مقاومت پیوستگی حداکثر ( $\tau_1$ )، مقاومت اصطکاک ( $\tau_3$ )،  $\alpha$ ،  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  را می توان با استفاده از آیین نامه ی اروپایی FIP-CEB بدست آورد [۱۰]. در صورتی که بتن اطراف میلگرد به خوبی محصور شده باشد و حالت شکست پیوستگی، حالت بیرون آمدن میلگرد و نه حالت جداسازی باشد، مقادیر  $\alpha$ ،  $S_1$  و  $S_2$  به ترتیب برابر ۰/۴، ۱mm و ۲mm هستند و مقادیر ( $\tau_1$ )، مقاومت اصطکاک ( $\tau_3$ )، به ترتیب با استفاده از **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.** قابل محاسبه هستند. در مدل سازی نمونه ی میلگرد مدفون در بتن تحت کشش، مقدار  $S_3$  برابر ۱۰/۵ mm فرض شده است [۸].

$$\tau_1 = 2.5\sqrt{f_c} \quad (5)$$

$$\tau_3 = 0.4\tau_1 \quad (6)$$

در این تحقیق برای شبیه سازی این موضوع یک راهکار پیشنهاد شده است که در آن خواص مربوط به پیوستگی بین فولاد و بتن به عنوان خواص مصالح به ناحیه ای از میلگرد طولی که مستعد لغزش است، اختصاص می گیرد. این ایده، مشابه ایده ی مدل سازی لغزش با فنر است که توسط محققین قبلی مورد استفاده قرار گرفته است [۲۵-۳۰]. شکل ۶-ب ایده ی مدل سازی لغزش با فنر را نشان می دهد و شکل ۶-ج ایده ی ارائه شده در تحقیق حاضر را نشان می دهد. در این شکل ها پارامتر  $l_d$  نشان دهنده ی طول مهاری میلگرد یا طول مدفون شده ی میلگرد در بتن است. تفاوت موجود در ایده ی حاضر این است که فنر شبیه ساز لغزش، یک المان جداگانه نیست بلکه قسمتی از همان میلگرد فولادی است. این موضوع مقداری از پیچیدگی مدل سازی لغزش را کم می کند، چراکه در ایده ی قبل، علاوه بر اینکه بایستی المان جداگانه ای برای لغزش تعریف گردد، شرایط مرزی ابتدا و انتهای المان فنر هم بایستی به طور جداگانه تعریف گردد.



شکل ۶: شکل شماتیک المان های بتن، میلگرد و (الف) تنش های پیوستگی؛ (ب) المان شبیه ساز تنش های پیوستگی مورداستفاده در تحقیقات گذشته و (ج) المان پیشنهادی برای مدل سازی تنش های پیوستگی

از آن جا که در ایده ی حاضر، فنر شبیه ساز لغزش جایگزین قسمتی از فولاد موجود در سیستم می شود برای در نظر گرفتن رفتار فولاد حذف شده می توان رفتار آن را در فنر مذکور اعمال کرد. در این تحقیق طول کوتاهی از میلگرد طولی به فنر شبیه ساز لغزش اختصاص داده شده است از این رو لحاظ نکردن رفتار قسمت حذف شده ی فولاد در این فنر خطای بسیار ناچیزی وارد محاسبات می کند. حال برای تعیین رفتار فنر مورد نظر در ابتدا معادله ی تعادل برای شکل ۶-الف نوشته می شود (**Error! Reference source not found.**) چراکه تمامی تنش های پیوستگی ای که در سطح تماس میلگرد با بتن ایجاد می شوند بایستی توسط المان فنر شبیه ساز پیوستگی تحمل گردند.

$$\sum F_x = 0 \rightarrow F = \tau \times \pi d_b l_d \quad (7)$$

تمامی نیروی  $F$  که توسط سطح تماس بین میلگرد و بتن تحمل می شود، به فنر تحمیل می شود. به این ترتیب تنشی که در فنر ایجاد می شود با استفاده از **Error! Reference source not found.** قابل محاسبه است.

$$\sigma = \frac{F}{A_{spring}} = \frac{\tau \times \pi d_{bar} l_d}{A_{spring}} \quad (8)$$

در این رابطه،  $\sigma$  تنش نرمال ایجاد شده در المان فنر،  $\tau$  تنش پیوستگی موجود در سطح تماس میلگرد و بتن،  $d_{bar}$  قطر میلگرد،  $l_d$  طول مهاری میلگرد (در نمونه‌ی مورد مطالعه برابر ۱۲۷mm است) و  $A_{spring}$  مساحت المان فنر است، که در اینجا مساحت فنر با مساحت میلگرد برابر است. متناظراً میزان کرنشی که در این فنرها ایجاد می‌شود از طریق **Error! Reference source not found.** قابل محاسبه است.

$$\varepsilon = \frac{S}{L_{spring}} \quad (9)$$

در این رابطه،  $\varepsilon$  کرنش ایجاد شده در المان فنر،  $S$  میزان لغزش یا میزان تغییر مکان نسبی فولاد و بتن، و  $L_{spring}$  طول اولیه‌ی المان فنر است که در این نمونه برابر با ۵۰ mm در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه مقادیر  $\tau$  در بازه‌های مختلف لغزش تغییر می‌کند، روابط تنش-کرنش مربوط به فنر (**Error! Reference source not found.**) می‌بایست برای بازه‌های مختلف لغزش به‌طور جداگانه تعریف شوند. جدول ۲، روابط مربوط به هر بازه‌ی لغزش را در کنار مقادیر تنش-کرنش مربوط به مصالح المان فنر شبیه‌ساز لغزش را در بازه‌های مختلف لغزش نشان می‌دهد.

جدول ۲: مقادیر تنش-کرنش و لغزش-تنش پیوستگی مربوط مصالح فنر شبیه‌ساز لغزش

محدوده لغزش	S (mm)	رابطه محاسبه $\tau$	$\varepsilon$	$\sigma$ (MPa)
	0		0	0
$0 \leq S < S_1$	0.1		0.002	109.0261
	0.2		0.004	143.8609
	0.3	<b>Error! Reference source not found.</b>	0.006	169.1917
	0.4	<b>Error! Reference source not found.</b>	0.008	189.8255
	0.5	<b>Error! Reference source not found.</b>	0.01	207.548
	0.6	<b>Error! Reference source not found.</b>	0.012	223.2498
	0.7	<b>Error! Reference source not found.</b>	0.014	237.4487
	0.8	<b>Error! Reference source not found.</b>	0.016	250.4763
	0.9	<b>Error! Reference source not found.</b>	0.018	262.5594
$S_1 \leq S < S_2$	1	<b>Error! Reference source not found.</b>	0.02	273.8613
	1.5	<b>Error! Reference source not found.</b>	0.03	273.8613
$S_2 \leq S \leq S_3$	3	<b>Error! Reference source not found.</b>	0.06	273.8613
	10.5	<b>Error! Reference source not found.</b>	0.21	109.5445
$S > S_3$	15	<b>Error! Reference source not found.</b>	0.3	109.5445

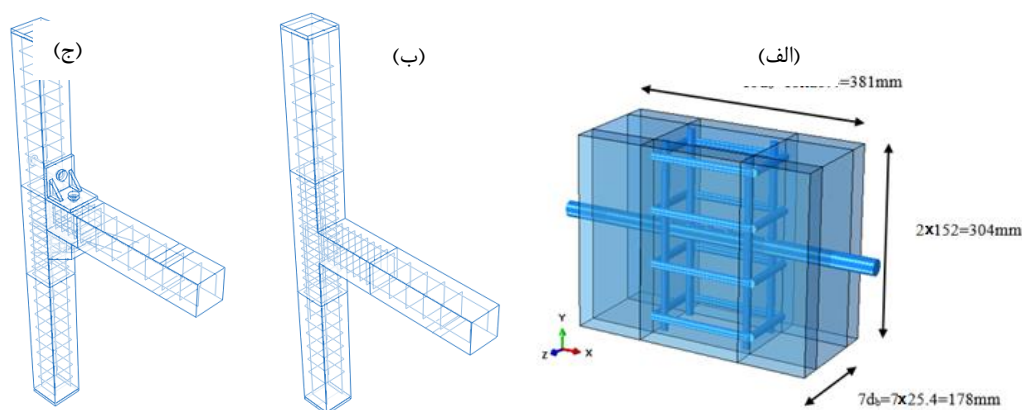
برای تعریف مصالح جدید به نرم‌افزار آباکوس، باید خواص الاستیک نیز معین گردد که در این صورت تعریف مدول الاستیسیته الزامی است. مدول الاستیسیته‌ی مصالح فنر با تقسیم تنش به کرنش در اولین نقطه نمودار تنش-کرنش آن بدست می‌آید که مقدار آن برابر ۵۴۵۱۳ MPa است. لازم به ذکر است که برای مدل‌سازی پیوستگی بین فولاد و بتن در نمونه‌ی اتصال پیش‌ساخته نیز از روند ارائه‌شده در این قسمت استفاده شده است. در این نمونه، مقدار  $S_3$  برابر ۵ mm، مقدار  $l_d$  برابر ۴۵ mm،  $d_{bar}$  برابر ۱۰ mm،  $d_{spring}$  برابر ۱۰ mm،  $f'_c$  برابر ۳۲/۲۸ MPa و بقیه‌ی پارامترها مشابه قسمت قبل فرض شده است. مشابه محققین قبلی [۳۱ و ۳۲]، برای میلگردهایی که در مدت زمان آزمایش لغزش را تجربه نمی‌کنند (مانند خاموت‌ها)، از تکنیک Embedded region در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده

است.

## ۳-۲- مش بندی و المان های مورد استفاده

در این تحقیق، برای مدل سازی میلگردهای فولادی از المان خرابی دو گره ای و برای مدل سازی قطعات بتنی و قطعات سه بعدی فولادی از المان مکعب هشت گره ای استفاده شده است. در صورتی که المان های سه بعدی مورد استفاده در حالت فرمول بندی انتگرال کامل<sup>۳</sup> قرار گیرند، ممکن است در حین آنالیز دچار پدیده ی قفل شدگی برشی شوند. برای جلوگیری از این پدیده، المان های مذکور در حالت فرمول بندی انتگرال کاهش یافته<sup>۴</sup> قرار گرفتند. از آن جا که این انتخاب باعث انعطاف پذیری زیاد المان ها می شود، می تواند باعث ناپایداری مش و در پی آن کاهش دقت خروجی گردد که برای جلوگیری از این موضوع از قابلیت Hourglass control در نرم افزار آباکوس استفاده می شود.

اندازه ی مش، موضوع مهمی است که باید به آن توجه ویژه ای شود، چرا که از یک طرف اندازه ی مش بسیار درشت، می تواند دقت خروجی را کاهش دهد و از طرف دیگر اندازه ی مش بسیار ریز، زمان آنالیز را بالا می برد. در این تحقیق، اندازه ی مش برای میلگردهای طولی و عرضی به ترتیب برابر ۱۴ mm و ۱۰ mm و برای بتن برابر ۲۵ mm استفاده شد. نوع المان و اندازه ی المان استفاده شده در تحقیق حاضر توسط محققین قبلی نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۲۴ و ۳۳-۳۷]. با توجه به اینکه برای ترسیم آرماتورها، خط مرکزی آن ها معرفی می گردد، فاصله ی مرکز تا مرکز آنها ملاک کار است. شکل ۷، نمونه ی میلگرد مدفون در بتن و نمونه های اتصال مدل شده در نرم افزار آباکوس را نشان می دهد. اگرچه میلگردهای طولی و عرضی با استفاده از المان خرابی مدل شده اند، در شکل ۷-الف، برای نمایش بهتر، این اعضا به صورت سه بعدی نمایش داده شده اند.



شکل ۷: نمونه های مدل شده در نرم افزار: (الف) نمونه ی میلگرد مدفون در بتن؛ (ب) نمونه ی اتصال در جریز؛ (ج) نمونه ی اتصال پیش ساخته

## ۴-۲- صحت سنجی مدل سازی های اجزاء محدود

### ۴-۲-۱- نمونه ی لغزش میلگرد مدفون در بتن تحت بارگذاری یکنواخت

برای بررسی میزان دقت مدل های اجزاء محدود، در ابتدا، نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود نمونه ی میلگرد مدفون در بتن با نتایج حاصل از آزمایشگاه، مربوط به این نمونه، در قالب نمودار لغزش- تنش پیوستگی در شکل ۸-الف، مورد مقایسه قرار گرفتند. طبق نتایج بدست آمده، مقاومت حداکثر و مقاومت پسماند در مدل اجزاء محدود به ترتیب ۵/۰۷- درصد و ۷/۰۳- درصد با مدل آزمایشگاهی تفاوت دارند. همان طور که در شکل ۸-الف مشاهده می گردد از نقطه نظر سختی اولیه، مقاومت حداکثر و مقاومت پسماند، تطابق خوبی میان نتایج حاصل از آزمایشگاه و نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود وجود دارد که بیانگر دقت قابل قبول مدل سازی اجزاء محدود و راهکار

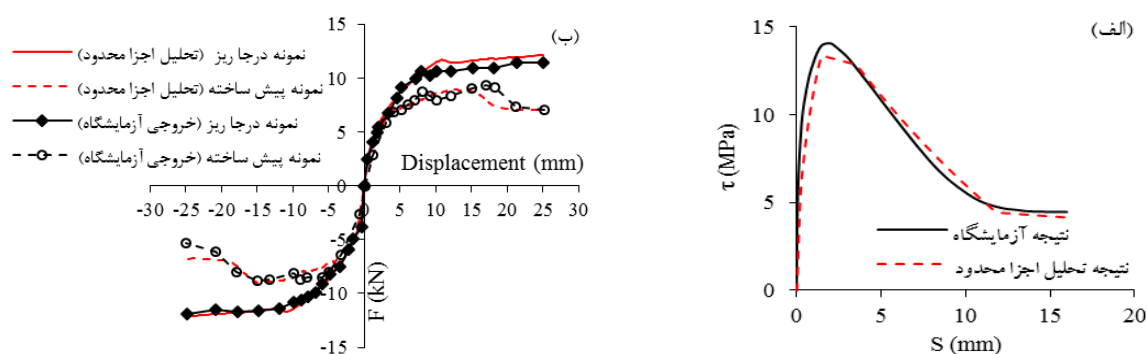
<sup>3</sup> Full integration

<sup>4</sup> Reduced integration

پیشنهادی برای مدل سازی رفتار پیوستگی-لغزش میلگرد مدفون در بتن است.

### ۲-۴-۲- نمونه های اتصال تیر به ستون بتن مسلح در جاریز و پیش ساخته

همان طور که در بخش ۲-۲-۳ ذکر شد، روند پیشنهادی برای مدل سازی رفتار پیوستگی-لغزش در نمونه های اتصال تیر به ستون بتن مسلح پیش ساخته نیز اعمال گردید. در این قسمت برای کنترل صحت مدل سازی اجزاء محدود و هم چنین روند مدل سازی رفتار پیوستگی-لغزش که در بخش ۲-۲-۳ پیشنهاد شد، نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود با نتایج حاصل از آزمایشگاه نمونه های در جاریز و پیش ساخته مورد مقایسه قرار می گیرد. بدین منظور نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه ها در شکل ۸-ب، نشان داده شده است. لازم به ذکر است که نیروی برداشت شده برای رسم نمودار مربوط به محل اعمال نیرو (محل جک) است ولی مقدار جابجایی قائم از محل نزدیک ترین گیج به محل جک برداشت شده است (شکل ۲-ج مشاهده گردد). همان طور که در شکل ۸-ب و جدول ۳ مشاهده می گردد، تطابق نسبتاً مناسبی بین نتایج حاصل از مدل سازی اجزاء محدود و نتایج حاصل از آزمایشگاه وجود دارد. در جدول ۳، جهت بارگذاری رو به بالا، با علامت "جهت مثبت ↑" و جهت بارگذاری رو به پایین، با علامت "جهت منفی ↓" نشان داده شده است. همان طور که نتایج این جدول نشان می دهند، حداکثر اختلاف بین مقادیر بار نهایی بدست آمده از تحلیل اجزاء محدود و آزمایشگاه برای نمونه های در جاریز و نمونه های پیش ساخته به ترتیب برابر ۶/۱۳+ درصد و ۳/۶۶- درصد است.



شکل ۸: مقایسه ی نتایج آزمایشگاه با نتایج تحلیل اجزاء محدود برای: الف) نمونه ی میلگرد مدفون در بتن؛ ب) نمونه اتصالات در جاریز و پیش ساخته

جدول ۳: بار نهایی تحمل شده توسط نمونه ها، حاصل از نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی اجزاء محدود

پیش ساخته	در جاریز	نمونه	بار نهایی (kN)، آزمایشگاه
8.8	11.94	جهت منفی ↓	بار نهایی (kN)، تحلیل اجزاء محدود
9.3	11.42	جهت مثبت ↑	
8.99	12.12	جهت منفی ↓	اختلاف (%)
8.96	12.12	جهت مثبت ↑	
2.16	1.51	جهت منفی ↓	
3.66	6.13	جهت مثبت ↑	

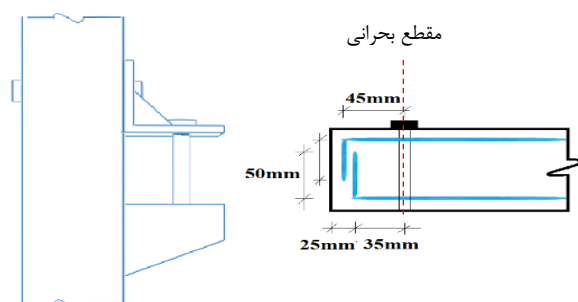
### ۳- بررسی نتایج و اصلاح نمونه های اتصال پیش ساخته

طبق شکل ۸، نمودار بار-تغییر مکان نمونه های پیش ساخته دارای افت مقاومتی است که با توجه به عدم رعایت طول مهاره آرماتور کششی از مقطع بحرانی (شکل ۹)، دلیل این موضوع می تواند به زوال پیوستگی بین فولاد و بتن و لغزش میلگرد مربوط باشد. برای بررسی

این موضوع لازم است مقاومت پیوستگی بین فولاد و بتن در طول مهاري اجرا شده، محاسبه گردد. حداکثر تنش برشی قابل تحمل توسط سطح تماس فولاد و بتن (باند)، برای حالتی که محصورشدگی بتن مناسب باشد با استفاده از **Error! Reference source not found** بدست می آید که مقدار آن برابر  $14/42 \text{ MPa}$  بدست می آید. لازم به ذکر است که **Error! Reference source not found** فقط برای قسمت مستقیم میلگرد قابل استفاده است، زیرا فقط بتن این ناحیه را می توان با محصورشدگی مناسب فرض کرد. برای قسمت قلاب میلگرد که بتن اطراف آن محصورشدگی کمی دارد، حداکثر تنش برشی قابل تحمل توسط سطح تماس فولاد و بتن از **Error! Reference source not found** بدست می آید [۱۰].

$$\tau_1 = 5(f_c' / 20)^{0.25} = 5.68 \text{ MPa} \quad (10)$$

با توجه به مقادیر حاصل از **Error! Reference source not found** و **Error! Reference source not found** با توجه به شکل ۹، طول مهاري های اجرا شده تنها قادر به تحمیل تنش  $370 \text{ MPa}$  به میلگردهای کششی می باشند، در صورتی که این میلگردها در تنش  $415 \text{ MPa}$  به تسلیم می رسند. بدیهی است که برای دستیابی به شکل پذیری مناسب نیاز است که میلگردهای طولی رفتار غیرخطی را نیز تجربه کنند که مصالح با ورود به این ناحیه، با سخت شدگی کرنشی مواجه می شوند و تنش میلگردها می تواند به  $485 \text{ MPa}$  نیز برسد. بنابراین عدم رعایت طول مهاري باعث لغزش میلگرد، قبل از وقوع تسلیم در میلگرد می شود و به رفتار نامناسب اتصال منجر می شود.



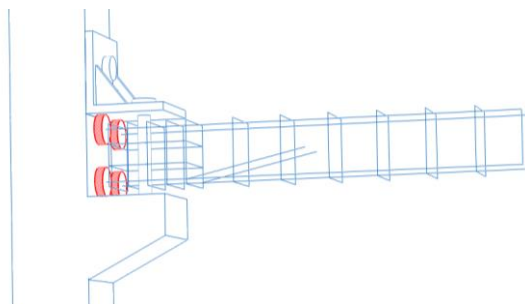
شکل ۹: مقطع بحرانی تیر در نمونه ی پیش ساخته و طول مهاري های اجرا شده

برای جلوگیری از لغزش زود هنگام میلگردهای طولی دو راه وجود دارد. راه اول، دور کردن محل مقطع بحرانی از محل غلاف (با قوی کردن مقطع در این ناحیه) است که از طرفی با دور شدن مفصل از بر ستون لنگر بیشتری به اتصال وارد می شود [۳۸] و راه دوم، استفاده از وصله مکانیکی برای مهار میلگرد است که در این تحقیق از راه دوم استفاده شده است. مساحت وصله انتهایی باید به اندازه ای باشد که بتواند نیروی تسلیم مورد انتظار میلگرد را به بتن منتقل کند. با توجه به اینکه نیروی تسلیم مورد انتظار میلگرد  $1/25$  برابر نیروی تسلیم اسمی میلگرد است و از طرفی ضریب کاهش مقاومت بتن ( $\phi_c$ ) در اعضای پیش ساخته برابر  $0/75$  فرض شده است [۱]، با استفاده از **Error! Reference source not found**، مساحت مورد نیاز وصله ( $A_{coupler}$ ) برابر با  $18 \text{ cm}^2$  بدست می آید. در این رابطه،  $F_{bond}$  نیروی قابل تحمل توسط طول مهاري،  $A_{bar}$ ، مساحت میلگرد و  $r_{coupler}$  شعاع مورد نیاز وصله هستند. لازم به ذکر است که در این رابطه از مقاومت باند ایجاد شده توسط قسمت خم میلگرد در جهت اطمینان صرف نظر شده است.

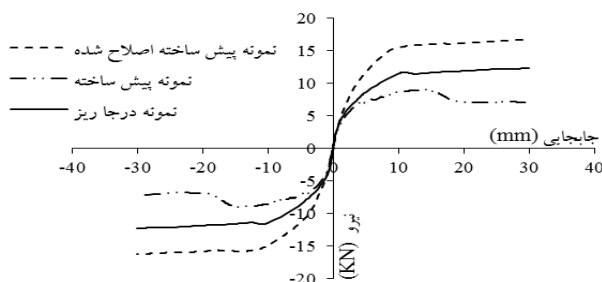
$$(A_{coupler} - A_{bar}) \times \phi_c f_c' + F_{bond} = 1.25 A_{bar} f_y \quad (11)$$

با قرار دادن وصله انتهایی در مدل اجزاء محدود و جلوگیری از لغزش میلگردهای طولی در نمونه ی اتصال پیش ساخته، تغییراتی در رفتار اتصال مشاهده شده است. شکل ۱۰، محل قرارگیری وصله های انتهایی در نمونه ی اتصال پیش ساخته را نشان می دهد. شکل ۱۱ و جدول ۴، نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود نمونه های درجاریز، پیش ساخته و پیش ساخته ی اصلاح شده را نشان می دهند. در جدول ۴، جهت بارگذاری رو به بالا، با علامت "جهت مثبت ↑" و جهت بارگذاری رو به پایین، با علامت "جهت منفی ↓" نشان داده شده است. این جدول بیانگر این واقعیت است که میلگردهای طولی در نمونه ی اتصال پیش ساخته تسلیم نمی شوند و این لغزش میلگرد است که می تواند

به عنوان مود خرابی اتصال در نظر گرفته شود.



شکل ۱۰: محل قرارگیری وصله های انتهایی در نمونه ی اتصال پیش ساخته اصلاح شده



شکل ۱۱: نمودار بار-تغییر مکان نمونه ها حاصل از مدل سازی اجزاء محدود

جدول ۴: مقادیر ظرفیت نمونه ها حاصل از تحلیل اجزاء محدود

نمونه	درجاریز	پیش ساخته	پیش ساخته اصلاح شده
بار تسلیم میلگردهای طولی	11.29	-	15.56
جهت منفی ↓	11.29	-	15.39
جهت مثبت ↑	26	-	11.76
جابجایی نظیر بار تسلیم	26	-	9.84
میلگردهای طولی (mm)	12.27	8.99	16.22
بار نهایی (kN)	12.27	8.96	16.72
جهت منفی ↓	425	325	325
جهت مثبت ↑	5.21	2.92	5.27
بازوی گشتاور (mm)	5.21	2.91	5.43
لنگر نهایی (kN.m)	1.13	0.63	1.14
نسبت لنگر نهایی به ظرفیت	1.13	0.63	1.17
مقطع	جهت مثبت ↑	جهت مثبت ↑	جهت مثبت ↑

همان طور که در شکل ۱۱ قابل مشاهده است، با جلوگیری از لغزش میلگرد طولی (نمونه ی پیش ساخته ی اصلاح شده) مقدار مقاومت حداکثر نمونه حتی نسبت به نمونه ی اتصال درجاریز، بیش از ۳۰ درصد افزایش یافته است. اما از آن جا که با توجه به شکل اتصال در نمونه ی پیش ساخته، محل تشکیل مفصل پلاستیک به اندازه ی ۱۲۵ mm از بر ستون فاصله گرفته است و این موضوع باعث کمتر شدن بازوی گشتاور نسبت به نمونه ی درجاریز شده است، میزان لنگر نهایی وارد بر مقطع در هر دو نمونه ی درجاریز و پیش ساخته ی اصلاح شده تقریباً برابر است و در پی آن نسبت لنگر نهایی وارد بر مقطع به مقاومت خمشی مقطع (۴/۶۳ kN.m) تقریباً برابر است. جدول ۴، نیز نشان دهنده ی این حقیقت است که نسبت لنگر نهایی به ظرفیت خمشی مقطع در دو نمونه ی درجاریز و پیش ساخته ی اصلاح شده تقریباً برابر است. لازم به ذکر است که دور شدن مفصل از بر ستون منجر به افزایش لنگر وارد بر ستون می شود و در صورتی که ظرفیت خمشی تیر و ستون نزدیک به هم باشند این موضوع می تواند منجر به تشکیل مفصل در ستون گردد؛ بنابراین میزان لنگر بر ستون در نمونه ی

پیش ساخته باید با در نظر گرفتن محل جدید مفصل محاسبه گردد.

#### ۴- خلاصه و نتیجه گیری

در این مقاله، یک راهکار برای مدل سازی عددی رفتار پیوستگی- لغزش میلگرد مدفون در بتن پیشنهاد شد. سپس یک نمونه ی ساده ی آزمایشگاهی میلگرد مدفون در بتن از مراجع معتبر انتخاب گردید. مدل سازی اجزاء محدود نمونه ی مذکور در نرم افزار آباکوس انجام شد و پس از مقایسه ی نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود با نتایج حاصل از آزمایشگاه، صحت مدل پیشنهادی مورد تأیید قرار گرفت. سپس یک نمونه ی اتصال تیر به ستون بتن مسلح در جاریز و یک نمونه ی اتصال تیر به ستون بتن مسلح پیش ساخته از مراجع معتبر انتخاب گردیده و با استفاده از نرم افزار آباکوس مدل سازی شدند. از آن جا که نتایج آزمایشگاهی بیانگر یک افت مقاومت در نمونه ی اتصال پیش ساخته بودند و از طرفی میزان طول مهاری میلگرد طولی تیر در این نمونه، به مقدار لازم برای گسترش تسلیم در میلگرد نبود، این افت مقاومت به لغزش میلگرد نسبت داده شد و راهکار پیشنهادی برای مدل سازی لغزش میلگرد در نمونه ی اتصال پیش ساخته پیاده سازی شد. پس از اتمام مدل سازی و صحت سنجی نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود نمونه ها، افت مقاومت و عدم تسلیم میلگرد طولی تیر در نمونه ی اتصال پیش ساخته مدل شده در نرم افزار نیز مشاهده گردید. در ادامه، برای بهبود رفتار نمونه ی اتصال پیش ساخته از وصله ی مکانیکی برای جلوگیری از لغزش میلگرد طولی تیر استفاده شد. در این راستا، مساحت مورد نیاز برای وصله ها محاسبه گردید و مدل سازی وصله ها در نرم افزار انجام شد. این اصلاح در نمونه ی اتصال پیش ساخته منجر به بهبود رفتار اتصال شد. خلاصه نتایجی که از تحقیق حاضر حاصل می شود در ادامه ارائه شده است:

- مقایسه ی نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود با نتایج حاصل از آزمایشگاه مربوط به آزمایش لغزش میلگرد مدفون در بتن بیانگر دقت قابل قبول روش پیشنهادی برای مدل سازی اجزاء محدودی رفتار پیوستگی- لغزش میلگرد مدفون در بتن است. طبق نتایج بدست آمده، مقاومت حداکثر و مقاومت پسماند در مدل اجزاء محدود به ترتیب ۵/۰۷- درصد و ۷/۰۳- درصد با مدل آزمایشگاهی تفاوت دارند.
- مقایسه ی نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود با نتایج حاصل از آزمایشگاه مربوط به نمونه ی اتصال تیر به ستون بتن مسلح پیش ساخته که رفتار پیوستگی- لغزش بین فولاد و بتن در آن با استفاده از روش پیشنهادی شبیه سازی شده است، نشان دهنده ی دقت مناسب روش پیشنهادی و کاربردی بودن آن برای اتصالات تحت بار یکنواخت است. طبق نتایج بدست آمده، حداکثر اختلاف بین مقادیر بار نهایی بدست آمده از تحلیل اجزاء محدود و آزمایشگاه برای نمونه ی در جاریز و نمونه ی پیش ساخته به ترتیب برابر ۶/۱۳+ درصد و ۳/۶۶- درصد است.
- استفاده از وصله ی مکانیکی در نمونه ی اتصال تیر به ستون بتن مسلح پیش ساخته می تواند منجر به جلوگیری از لغزش میلگرد طولی تیر و در پی آن تشکیل مفصل پلاستیک خمشی در تیر شود.
- بار نهایی قابل تحمل توسط نمونه ی اتصال پیش ساخته ی اصلاح شده بیش از ۳۰ درصد از بار نهایی نمونه ی در جاریز بیشتر است که دلیل آن را می توان به دور شدن محل تشکیل مفصل پلاستیک از بر ستون در نمونه ی پیش ساخته مرتبط دانست. زیرا با ثابت ماندن ظرفیت خمشی مقطع در دو نمونه ی در جاریز و پیش ساخته و کمتر شدن بازوی گشتاور (فاصله ی اعمال بار تا محل مفصل پلاستیک خمشی تیر) در نمونه ی اتصال پیش ساخته، نیروی بیشتری برای تسلیم مقطع تیر در این نمونه اتصال نیاز است.
- نسبت لنگر نهایی وارد بر مقطع تیر به مقاومت خمشی آن در نمونه ی در جاریز و نمونه ی پیش ساخته ی اصلاح شده تقریباً برابر و نزدیک به عدد یک بود که این خود بیانگر رسیدن لنگر در مقطع تیر به حداکثر ظرفیت خود و تشکیل مفصل پلاستیک خمشی در مقطع تیر است.

#### مراجع

[1] ACI 318, (2014). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14) and commentary*. Farmington Hills: American Concrete Institute.

- [2] Metelli, G. and Riva, P. (2008). Behaviour of a beam to column “dry” joint for precast Concrete elements. In: *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*.
- [3] Vidjeapriya, R. and Jaya, K. (2012). Experimental study on two simple mechanical precast beam-column connections under reverse cyclic loading. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 27 (4), 402-414.
- [4] Negro, P., Bournas, D.A. and Molina, F.J. (2013). Pseudodynamic tests on a full-scale 3-storey precast concrete building: global response. *Engineering structures*, 57, 594-608.
- [5] Bournas, D.A., Negro, P. and Molina, F.J. (2013). Pseudodynamic tests on a full-scale 3-storey precast concrete building: behavior of the mechanical connections and floor diaphragms. *Engineering structures*, 57, 609-627.
- [6] Negro, P. and Toniolo, G. (2012). *Design Guidelines for Connections of Precast Structures under Seismic Actions*.
- [7] Viathanatepa, S., Popov, E.P. and Bertero, V.V. (1979). *Effects of generalized loadings on bond of reinforcing bars embedded in confined concrete blocks*. University of California, Earthquake Engineering Research Center.
- [8] Eligehausen, R., Popov, E.P. and Bertero, V.V. (1982). *Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations*.
- [9] CEB-FIP, (1990). *Model Code for Concrete Structures*.
- [10] CEB-FIP, (2010). *Model Code for Concrete Structures*.
- [11] Lowes, L.N., Mitra, N. and Altoontash, A. (2003). *A beam-column joint model for simulating the earthquake response of reinforced concrete frames*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California Berkeley.
- [12] Cheok, G.S. and Lew, H.S. (1991). *Performance of 1/3-scale Model Precast Concrete Beam-column Connections Subjected to Cyclic Inelastic Loads: Report No. 2*. US National Institute of Standards and Technology.
- [13] Hawileh, R., Rahman, A. and Tabatabai, H. (2010). Nonlinear finite element analysis and modeling of a precast hybrid beam-column connection subjected to cyclic loads. *Applied Mathematical Modelling*, 34 (9), 2562-2583.
- [14] Standard.432.1.1982, I., *Specification For Mild Steel And Medium Tensile Steel Bars And Hard-Drawn Steel wire For Concrete Reinforcement*.
- [15] Standard.1786.2008, I., *High Strength Deformed Steel Bars and Wires for Concrete Reinforcement*.
- [16] Zha X, Wan C, Yu H, Dassekpo J-BM. (2016). Seismic behavior study on RC-beam to CFST-column non-welding joints in field construction. *Journal of Constructional Steel Research*, 116, 204-17.
- [17] Breccolotti M, Gentile S, Tommasini M, Materazzi AL, Bonfigli MF, Pasqualini B, Colone, V, Gianesini, M. (2016). Beam-column joints in continuous RC frames: Comparison between cast-in-situ and precast solutions. *Engineering Structures*, 127, 129-44.
- [18] Abaqus 6.13. (2013). *Analysis User's Manual*.
- [19] Hsu, L. and Hsu, C.T. (1994). Complete stress—strain behaviour of high-strength concrete under compression. *Magazine of Concrete Research*, 46 (169), 301-312.
- [20] Mander, J.B., Priestley, M.J. and Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of structural engineering*, 114 (8), 1804-1826.
- [21] Li Y, Cao S, Jing D. (2018). Analytical compressive stress—strain model for concrete confined with high-strength multiple-tied-spiral transverse reinforcement. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27(2).
- [22] Patel VI, Hassanein M, Thai H-T, Al Abadi H, Paton-Cole V. (2017). Behaviour of axially loaded circular concrete-filled bimetallic stainless-carbon steel tubular short columns. *Engineering Structures*, 147, 583-97.
- [23] Zeng X. (2017). Finite element analysis of the behaviour of reinforced concrete columns confined by overlapping hoops subjected to rapid concentric loading. *Civil Engineering Journal-Stavebni Obzor*, 4, 530-43.
- [24] Birtel, V. and Mark, P. (2006). Parameterised finite element modelling of RC beam shear failure. In: *ABAQUS Users' Conference*.
- [25] Gan, Y. (2000). *Bond stress and slip modeling in nonlinear finite element analysis of reinforced concrete structures*. MSc thesis. University of Toronto.
- [26] Elmorsi, M., Kianoush, M.R. and Tso, W. (2000). Modeling bond-slip deformations in reinforced concrete beam-column joints. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27 (3), 490-505.
- [27] Ožbolt, J., Lettow, S. and Kožar, I. (2002). Discrete bond element for 3D finite element analysis of reinforced concrete structures. In: *Proceedings of the 3rd International Symposium: Bond in Concrete-from research to standards*. Budapest: University of Technology and Economics.
- [28] Gooranorimi O, Suaris W, Nanni A. (2017). A model for the bond-slip of a GFRP bar in concrete. *Engineering Structures*, 146:34-42.
- [29] Alfarah B, Murcia-Delso J, López-Almansa F, Oller S. (2018). RC structures cyclic behavior simulation with a model integrating plasticity, damage, and bond-slip. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 47(2), 460-78.
- [30] Hwang J-y, Kwak H-G, Kwon Y. (2018). A numerical model for considering the bond-slip effect in axially loaded circular concrete-filled tube columns. *Advances in Structural Engineering*, 1369433218759779.



- [31] Nzabonimpa J, Hong W-K, Kim J. (2017). Nonlinear finite element model for the novel mechanical beam-column joints of precast concrete-based frames. *Computers & Structures*, 189, 31-48.
- [32] Wang C, Shen Y, Yang R, Wen Z. (2017). Ductility and Ultimate Capacity of Prestressed Steel Reinforced Concrete Beams. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017.
- [33] Chaudhari, S. and Chakrabarti, M. (2012). Modeling of concrete for nonlinear analysis Using Finite Element Code ABAQUS. *International Journal of Computer Applications*, 44 (7), 14-18.
- [34] Zhou X, Cheng G, Liu J, Gan D, Chen YF. (2017). Behavior of circular tubed-RC column to RC beam connections under axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 130, 96-108.
- [35] Ning N, Qu W, Ma ZJ. (2016). Design recommendations for achieving “strong column-weak beam” in RC frames. *Engineering Structures*, 126, 343-52.
- [36] El Ezz AA, Galal K. (2017). Compression behavior of confined concrete masonry boundary elements. *Engineering Structures*, 132, 562-75.
- [37] Tang X-L, Cai J, Chen Q-J, Liu X, He A. (2016). Seismic behaviour of through-beam connection between square CFST columns and RC beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 122, 151-66.
- [38] Sucuoğlu, H. (1995). Inelastic seismic response of precast concrete frames with constructed plastic hinges. *Computers & structures*, 56 (1), 121-131.