



http://journaliss.ir

## مشارکت مسیره‌های انتقال بار در اتصال تیر فولادی به ستون بتنی مربعی و دایره‌ای

نسرین بخشایش اقبالی<sup>۱\*</sup>، سید رسول میرقادری<sup>۲</sup>، محمد مهدی احمدی<sup>۱</sup>، زهرا باپیری<sup>۳</sup>

۱- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه ایلام، ایلام

۲- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران

۳- کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه ایلام، ایلام

\*ایلام، صندوق پستی ۶۹۳۹۱۷۷۱۱، bakhshayesh@ilam.ac.ir

### چکیده

سیستم‌های ساختمانی متشکل از تیرهای فولادی و ستون‌های بتن‌آرمه، یک ترکیب بهینه از مصالح در طراحی ساختمان ارائه می‌کنند. در راستای گسترش استفاده از چنین سیستم‌هایی، پرداختن به ناحیه اتصال تیر به ستون، بحث سازوکار انتقال نیرو و تعیین میزان مشارکت اجزای ناحیه اتصال بسیار حائز اهمیت است. در این تحقیق، مدل‌سازی عددی بر اتصال تیر فولادی به ستون بتن‌آرمه با ورق میان‌گذر توسط نرم‌افزار آباکوس انجام شد؛ سپس نتایج حاصل از تحلیل بر اساس نتایج تست‌های آزمایشگاهی به‌طور دقیق مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. به‌منظور ارزیابی دقیق میزان مشارکت اجزای اتصال در تقاضای چشمه اتصال، مدل‌های صحت‌سنجی شده به چندین مدل با ابعاد بزرگ‌تر تیر به ستون مربعی و دایره‌ای توسعه داده شدند. همچنین چندین مدل نیز برای مطالعه اثر برشگیرهای واقع بر سطوح مختلف ناحیه اتصال در انتقال بار، مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در نمونه‌های با ستون مربعی و دایره‌ای به ترتیب حداقل ۵۰٪ و ۳۵٪ نیروهای ناحیه اتصال از طریق ورق میان‌گذر به بتن ستون انتقال می‌یابد. این تفاوت حاکی از محصورکنندگی بهتر ورق‌های پوششی دایره‌ای است. در نمونه بدون برشگیر، ورق‌های پوششی در انتقال بار بسیج نشدند که منجر به افزایش تقاضا در ورق میان‌گذر، افزایش تنش و کرنش در محل اتکای ورق میان‌گذر به بتن و کاهش در سختی اتصال شد.

### واژگان کلیدی

اتصال تیر فولادی به ستون بتن‌آرمه، ورق میان‌گذر، مدل‌سازی عددی، مسیرانتقال بار، ستون دایره‌ای

## Contribution of load transfer mechanisms in steel beam to square and circular concrete column connection

N. Bakhshayesh Eghbali, S.R. Mirghaderi, M.M. Ahmadi, Z. Bapiri

### Abstract

Structural systems consisting of steel beams and reinforced concrete columns provide an optimal combination of materials in building design. In order to expand the use of such systems, it is very important to address the beam-to-column connection area, discuss the force transfer mechanism, and determine the contribution of load transfer mechanisms. In this study, numerical modeling of the steel beam to a reinforced concrete column connection with a through plate was performed using Abaqus software. Then, the results of the analysis were accurately validated based on the results of experimental tests. In order to evaluate the contribution of the connection components from the connection shear demand, the validated models were expanded to several models with larger dimensions of beam to square and circular column connection. Some models were also analyzed and evaluated to study the effect of shear connectors located on different surfaces of the connection area on load transfer. The results showed that at least 50% and 35% of the connection demands are transferred to the column concrete through the trough plate in the specimens with square and circular columns, respectively. This difference indicates better confinement provided by the circular cover plates. In the specimen without shear connectors, the cover plates were not mobilized in load transfer, which led to increased demand on the through plate, increased stress and strain at the point where the through plate rests on the concrete, and a decrease in the stiffness of the connection.

### Keywords

Steel Beam to Reinforced Concrete Column, Through Plate, Numerical Modeling, Load Transfer Mechanisms, Circular Column



خواجه عطاری و همکاران، نیز اثر جزئیات متفاوتی بر اتصال ارائه شده توسط چنگ [۳] را بررسی نمودند و نشان دادند که ورق پوششی ناحیه اتصال می‌تواند جایگزین کمر بند بالا و پایین اتصال<sup>۵</sup> و خاموت‌های این ناحیه شود [۶].

در تحقیق لی<sup>۶</sup> و همکاران، برای تأمین اتصال مناسب ستون بتن‌آرمه و تیر فولادی، یک پروفیل فولادی درون ستون بتن‌آرمه در ناحیه اتصال تعبیه شد که مستقیماً به تیر فولادی جوش داده شد [۷]. نمونه‌ها تا دریافت حدود ۵ درصد رفتار چرخه‌ای مناسبی بدون افت مقاومت با مقداری لاغرشدگی نشان دادند.

شن<sup>۷</sup> با استفاده از روش تحلیل اجزای محدود، مکانیزم برشی اتصال و عوامل مؤثر در عملکرد آن را مورد بررسی قرار داد [۸]. در نهایت مدل و معادلاتی برای طراحی اتصالات خارجی و داخلی ارائه نمود که مبنای تئوریک برای طراحی شیوه اتصال مورد نظر قرار گرفت.

حبشی‌زاده و همکاران، در یک مدل سه‌بعدی غیرخطی، رفتار اتصال را تحت بارگذاری سیکلی مورد بررسی قرار داده و اعتبار روش اجزای محدود را در مطالعه رفتار لرزه‌ای اتصالات مرکب ارزیابی نمودند [۹].

گو<sup>۸</sup> و همکاران، مکانیزم‌های چشمه اتصال را از طریق مدل‌های اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند [۱۰].

اگرچه تحقیقات متعددی بر اتصالات و قاب‌های مرکب از تیر فولادی و ستون بتن‌آرمه انجام شده است؛ ولی استفاده از ستون‌های بتن‌آرمه دایره‌ای که دارای خصوصیات مطلوب از نظر معماری، شکل ظاهری، شکل‌پذیری، سختی پیچشی و مقاومت نسبت به ستون‌های مربعی هستند، به دلیل کمبود روش‌های اتصال مناسب و یا صعوبت اجرای اتصالات، چندان مورد توجه قرار نگرفته‌اند. روش استفاده از ورق میان‌گذر به دلیل شکل اتصال که انتقال بار عمدتاً توسط یک ورق عبوری از وسط ستون انجام می‌شود، در هر دو نوع ستون مربعی و دایره‌ای به یک شکل قابل اجرا بوده و مشکل اتصال تیر به ستون دایره‌ای را مرتفع می‌سازد [۱۱].

در این تحقیق رفتار چرخه‌ای اتصال تیر فولادی به ستون بتن‌آرمه مربعی و دایره‌ای با مدل‌سازی اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت و سپس میزان مشارکت مسیرهای انتقال بار به ستون تعیین و عوامل مؤثر بر آن بررسی شد. در این راستا،

سیستم ساختمانی مرکب از تیرهای فولادی و ستون‌های بتن‌آرمه (RCS)<sup>۱</sup> یکی از انواع سیستم‌های مرکب است که در آن مزیت‌های قاب‌های خالص بتنی و فولادی با هم ترکیب می‌شوند. استفاده از مقاومت فشاری مناسب بتن در ستون و مقاومت کششی و شکل‌پذیری مناسب فولاد در تیر، موجب شده تا این سازه‌ها وزن کم‌تر، جذب انرژی و شکل‌پذیری بیش‌تر نسبت به سازه‌های بتن‌آرمه و هزینه کم‌تر، میرایی بیش‌تر، سختی جانبی بیش‌تر و به‌دنبال آن کنترل راحت‌تر تغییرمکان جانبی طبقات را نسبت به ساختمان‌های فولادی فراهم نماید. اتصالات در این نوع سازه‌ها نقش مهمی را در عملکرد یکپارچه اجزای سازه و تأمین ضوابط آیین‌نامه‌ای به‌عنوان یک سیستم سازه‌ای تأییدشده و اجرایی ایفا می‌کنند. همین امر محققین را به بررسی بیش‌تر رفتار اتصالات در این نوع سازه‌ها سوق داده است.

کوراماتو<sup>۲</sup> و همکاران، تعدادی اتصال تیر فولادی به ستون بتن‌آرمه را برای بررسی عملکرد سازه‌ای و مکانیزم‌های انتقال بار مورد آزمایش قرار دادند که اتصالات توسط ورق‌های پوششی و سخت‌کننده‌های افقی بدون بال‌های تیر تقویت شدند [۱]. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مقداری لاغرشدگی در نمودار هیستریزس مشاهده شد ولی افت مقاومتی تا دریافت ۴٪ اتفاق نیفتاد.

گابالدن<sup>۳</sup> و همکاران، رفتار لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون را در تراز بام به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مقاومت برشی اتصال تراز بام ۵۰٪ مقاومت یک اتصال داخلی با همان جزئیات است [۲].

چنگ<sup>۴</sup> و همکاران، رفتار لرزه‌ای اتصالات تیر فولادی به ستون بتن مسلح با و بدون دال کف را بررسی کردند و در این راستا دو تکنیک بهسازی در اتصال پیشنهادی به‌کار بردند [۳]. نتایج آزمایش حاکی از رفتار شکل‌پذیر نمونه‌ها بود؛ اگرچه ترک‌های خفیفی در ستون و چشمه اتصال مشاهده شد.

به‌منظور بهبود عملکرد اتصال مذکور علیزاده و همکاران، جزئیاتی را به تکنیک‌های بهسازی موجود اضافه نموده و به‌صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند [۴ و ۵]. جزئیات پیشنهادی شامل ورق جلویی عریض‌تر و ورق اتکایی اضافی بود که به بال‌های تیر در هر سمت اتصال جوش داده شدند.

<sup>6</sup> Li

<sup>7</sup> Shen

<sup>8</sup> Guo

<sup>1</sup> Reinforced Concrete and Steel Beam System

<sup>2</sup> Kuramoto

<sup>3</sup> Fargier-Gabaldón

<sup>4</sup> Cheng

<sup>5</sup> Steel band plate

مدل‌های عددی دو نمونه اتصال آزمایشگاهی صحت‌سنجی شد؛ سپس اتصالات با ابعاد متفاوت تیر فولادی به ستون بتن‌آرمه مربعی و دایره‌ای و همچنین سه نمونه اتصال بدون برش‌گیرهای ناحیه اتصال، طراحی و مورد ارزیابی قرار گرفتند.

## ۲- معرفی اتصال

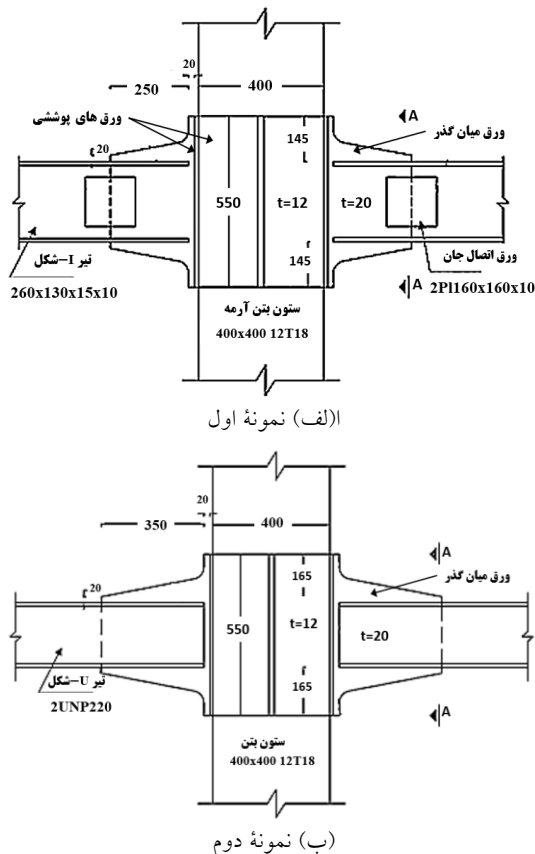
این اتصال شامل یک ورق قائم (ورق میان‌گذر) است که از ستون عبور کرده و به ورق فولادی احاطه‌کننده ستون در محل اتصال جوش داده می‌شود. در اتصال با ورق میان‌گذر، تیرها توسط ورق میان‌گذر به ستون متصل شده و اتصال مستقیم به ستون ندارند. نیروهای برشی و خمشی مفصل پلاستیک به وسیله اتصال بال و جان تیر به ورق میان‌گذر منتقل می‌شود و کلیه نیروها به صورت داخل صفحه، تمایل به چرخش ورق میان‌گذر نسبت به ستون دارند. از طریق اتصال ورق میان‌گذر به ورق‌های پوششی، بخشی از نیروها نیز به ورق‌های پوششی منتقل می‌شود و موجب ایجاد نیروهای فشاری در بتن و نیروهای برشی در ورق‌های پوششی طرفین اتصال می‌شود. بخشی از نیروهای برشی توسط برش‌گیرهای نصب‌شده بر ورق میان‌گذر و همچنین لبه‌های بالا و پایین این ورق در تماس با بتن، به بتن منتقل می‌شود و بقیه از طریق اتصال جوشی به ورق جلویی منتقل شده و نهایتاً از طریق برش‌گیرهای ورق جلویی به ستون بتنی وارد می‌شوند. بنابراین، سطح تماس لبه‌های بالا و پایین ورق میان‌گذر با بتن، بسیار مستعد ایجاد تمرکز تنش و آسیب‌های موضعی در بتن است که در مدل‌های اجزای محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌طور کلی نیروهای موجود در ورق میان‌گذر در برستون با سه مکانیزم مقاوم شامل مکانیزم‌های داخل صفحه ورق میان‌گذر، داخل صفحه ورق‌های کناری و تشکیل دستک قطری بتن روبه‌رو است که در واقع سه مسیر موازی برای انتقال بار به ستون هستند.

## ۳- مدل‌سازی اجزای محدود

مدل‌سازی نمونه‌ها در نرم‌افزار آباکوس انجام و نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها بر اساس نتایج آزمایش، اعتبارسنجی شد؛ سپس به منظور ارزیابی دقیق میزان مشارکت اجزای اتصال در تقاضای چشمه اتصال، مدل‌های اعتبارسنجی شده به چندین اتصال با ابعاد بزرگ‌تر تیر و ستون توسعه داده شدند. همچنین چندین مدل نیز برای مطالعه اثر برش‌گیرهای واقع بر سطوح مختلف ناحیه اتصال در انتقال بار مورد تحلیل قرار گرفتند.

## ۳-۱- هندسه مدل

مشخصات هندسی مدل‌های صحت‌سنجی مطابق شرایط آزمایشگاهی نمونه‌های تست‌شده در مرجع [۱۲] در نظر گرفته شد که در شکل (۱) ارائه شده است. طول ستون از محل اعمال بار جانبی تا مرکز مفصل قرارداد شده در پای ستون برابر سه متر است. طول تیر نیز حداقل دو تکیه‌گاه غلتکی دو سر تیر برابر چهار متر مدل شد. همچنین مشخصات مصالح فولادی در جداول (۱) ارائه شده است. مقاومت فشاری بتن ۴۲ و ۴۰ مگاپاسکال به ترتیب در نمونه اول و دوم است.



شکل ۱- مشخصات هندسی اتصالات

جدول ۱- مشخصات مصالح فولادی

تیر IPE220	تیر UNP220	ورق	ورق آرماتور	مقاومت
۲۴۳/۵	۳۲۹/۶	۳۳۹	۳۲۱	تسلیم
۴۴۸	۴۷۴/۵	۴۷۱	۴۶۳	کششی
۴۱	۳۰/۲	۳۰/۱	۳۵/۶	مقاومت
۴۱	۳۰/۲	۳۰/۱	۳۵/۶	کششی
۴۱	۳۰/۲	۳۰/۱	۳۵/۶	ازدیاد
۴۱	۳۰/۲	۳۰/۱	۳۵/۶	طول

### ۲-۳- تعریف المان‌ها و رفتار مصالح

مدل‌سازی بتن، ورق‌ها و پروفیل‌های فولادی به وسیله المان‌های سه‌بعدی هشت‌گره‌ی C3D8R انجام شد. آرماتورها شامل میلگردهای طولی و عرضی و همچنین صفحات صلب تکیه‌گاهی نیز به ترتیب توسط المان‌های خریابی دوگره‌ی و صفحه‌ای چهارگره‌ی سه‌بعدی R3D4 مدل‌سازی شدند. ضریب اصطکاک در سطح تماس بتن و فولاد در ناحیه اتصال ۰/۲۵ در نظر گرفته شد [۱۳ و ۱۴].

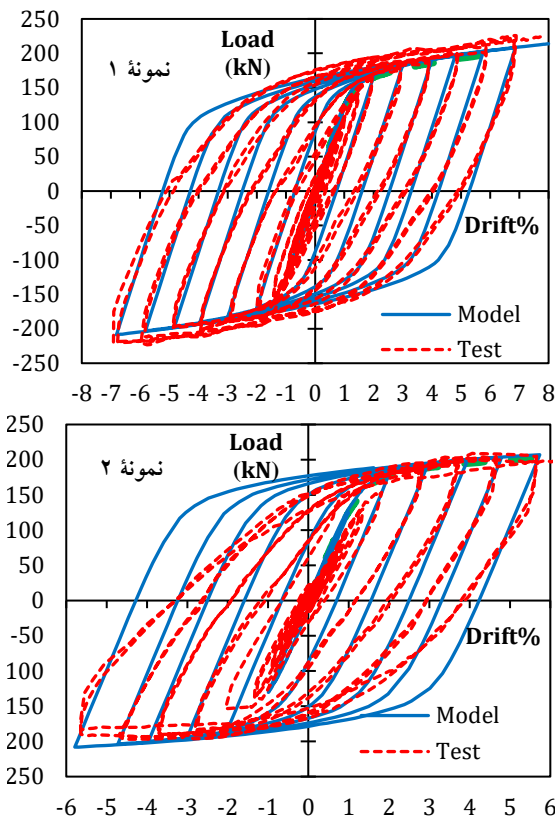
نمودار رفتار مصالح فولادی بر اساس نتایج تست مصالح، شامل مقاومت تسلیم و نهایی اجزای فولادی و تغییر طول متناظر آن‌ها طبق جدول (۱) تعیین شد. رفتار بتن طبق روابط ارائه شده در EN 1992-1-1:2004 و مدل رفتاری بتن آسیب‌دیده خمیری تعریف شد [۱۵].

### ۳-۳- صحت‌سنجی مدل‌ها

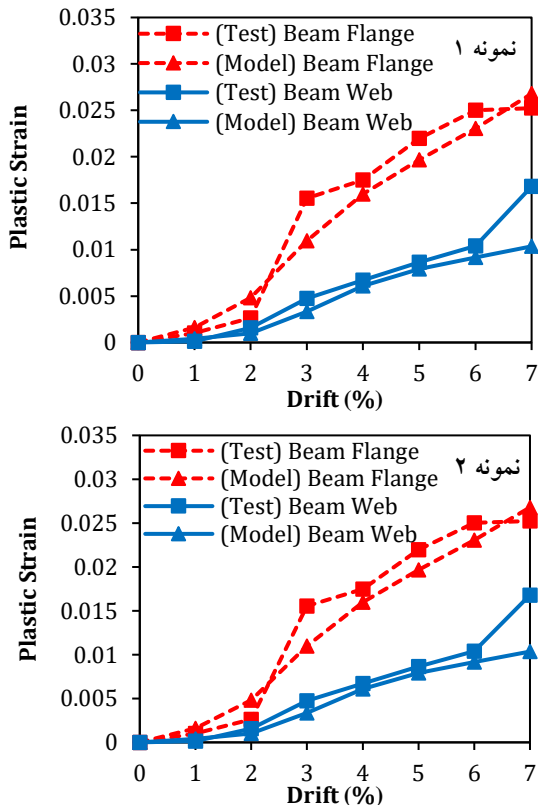
نمودار بار-تغییرمکان حاصل از تست نمونه‌ها و مدل‌سازی در شکل (۲) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق بسیار خوبی بین نمودار حاصل از تست و مدل از نظر سختی الاستیک، مقاومت تسلیم، شیب سخت‌شوندگی کرنشی و مقاومت نهایی وجود دارد.

مطابق شکل (۳)، روند تغییرات کرنش در بال و جان تیر در محل مفصل حاصل از تست و مدل نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که تطابق خوبی در مقدار کرنش در بال و جان تیر حاصل از تست و مدل در هر سطح از تغییرمکان جانبی وجود دارد.

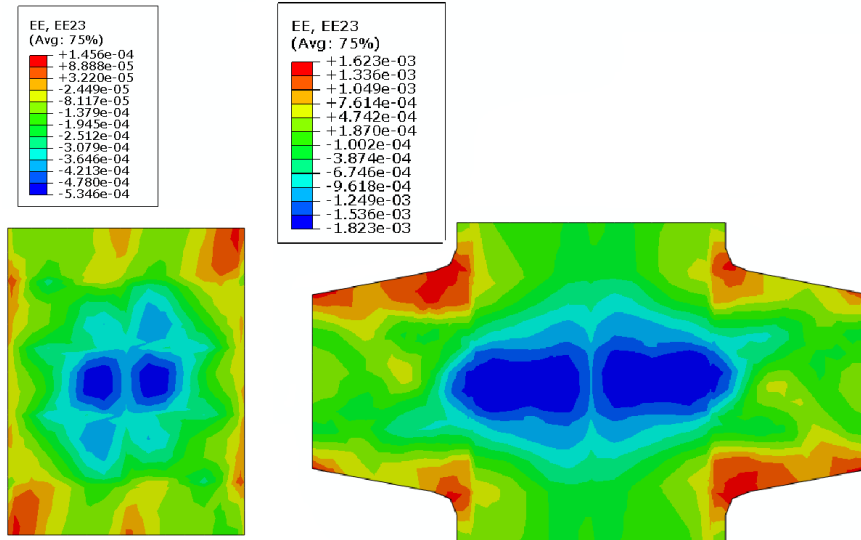
همان‌طور که در شکل‌های (۴) و (۵) قابل مشاهده است، مقادیر کرنش در قسمت میانی ورق میان‌گذر و ورق پوششی که جزئی از چشمه اتصال نمونه هستند، تا انتهای بارگذاری در دریفت ۸٪ در محدوده الاستیک قرار دارند. نمودار حداکثر کرنش برشی در سطح ورق میان‌گذر و ورق پوششی حاصل از تست و مدل در برابر دریفت طبقه در شکل (۶) ترسیم شده است. با مقایسه سطح کرنش در ورق میان‌گذر و ورق کناری مشخص است ورق میان‌گذر که مسیر مستقیم و درون‌صفحه‌ای انتقال بار به ستون است، در مقایسه با ورق‌های کناری که بار با تأخیر به آن‌ها انتقال می‌یابد، سهم بسیار بزرگ‌تری از نیروها را انتقال می‌دهد.



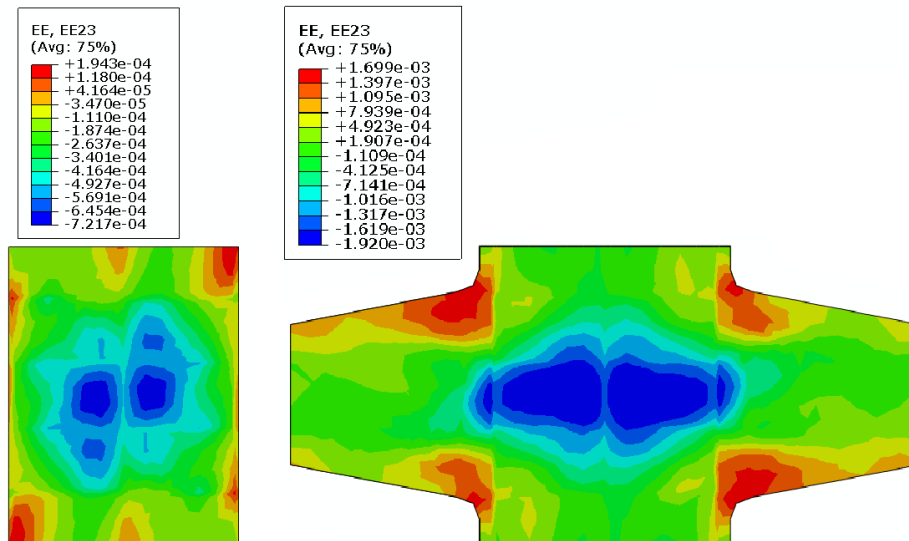
شکل ۲- نمودار بار-تغییرمکان نمونه‌های ۱ و ۲ حاصل از تست آزمایشگاهی و مدل



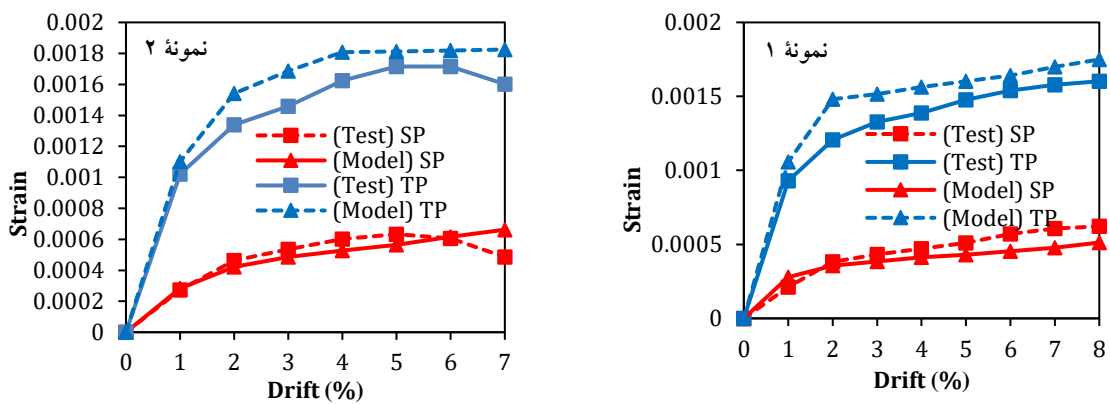
شکل ۳- روند تغییرات کرنش در بال و جان تیر در نمونه‌های ۱ و ۲ در محل مفصل حاصل از تست و مدل



شکل ۴- کرنش برشی الاستیک در ورق میان‌گذر و ورق پوششی در دریفت ۸٪ در نمونه ۱

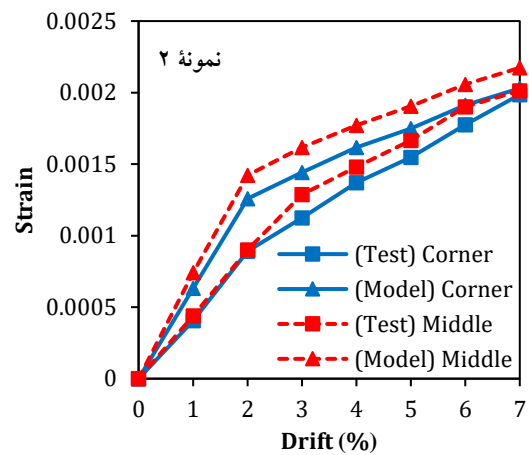
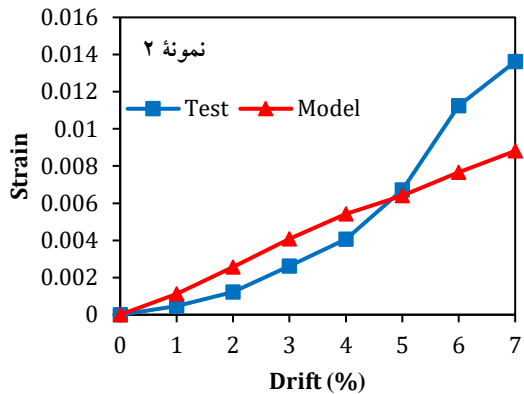
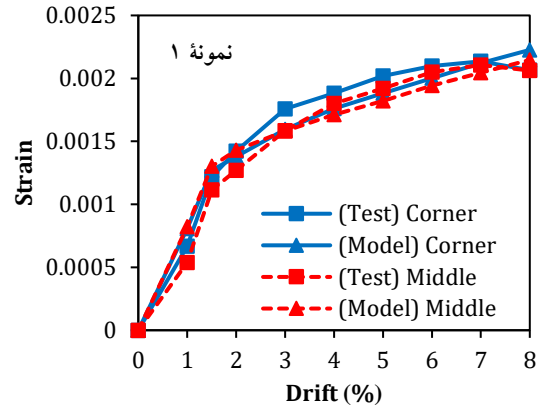
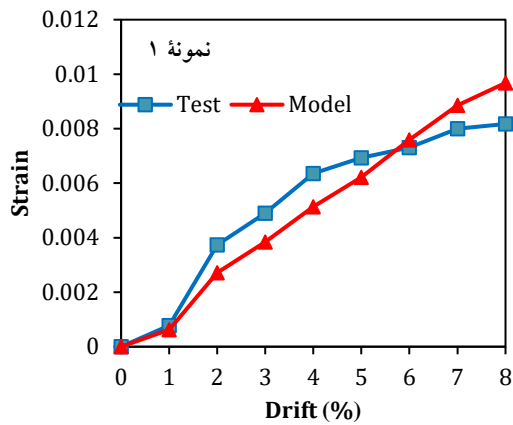


شکل ۵- کرنش برشی الاستیک در ورق میان‌گذر و ورق پوششی در دریفت ۷٪ در نمونه ۲



شکل ۶- نمودار کرنش الاستیک در مرکز ورق میان‌گذر و ورق کناری در برابر دریفت طبقه

در مدل صحت‌سنجی، کرنش آرما توره‌ها نیز با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، نمودار کرنش در آرما توره‌های گوشه و میانی حاصل از تست و مدل در نمونه‌ها با دقت خوبی بر هم منطبق هستند.



شکل ۸- نمودار کرنش پلاستیک گوشه ورق میان‌گذر مجاور بال تیر کرنش الاستیک در ورق کناری در نقاط ۱ و ۲ حاصل از تست و مدل در شکل (۹) مقایسه شده‌اند. مقایسه کرنش الاستیک در این نقاط که در بالا و پایین برش‌گیر قرار دارند، نشان‌دهنده مشارکت بیشتر برش‌گیرهای دورتر از مرکز ستون در انتقال بار هستند.

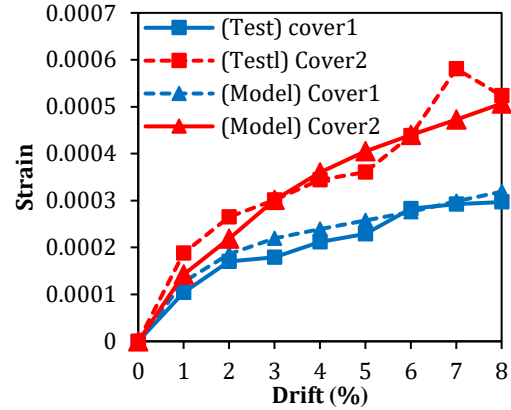
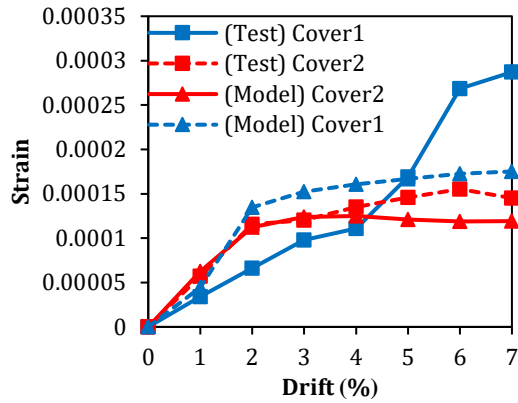
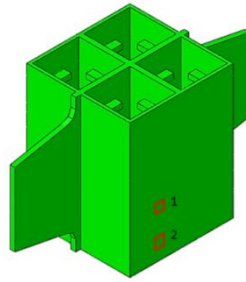
شکل ۷- نمودار کرنش در آرما توره‌های گوشه و میانی در برابر دریفت همچنین، مقادیر کرنش پلاستیک در گوشه مثلثی ورق میان‌گذر مجاور بال بالا و پایین تیر، حاصل از تست و مدل در شکل (۸) نشان داده شده است. افزایش سطح کرنش در ورق میان‌گذر در نمونه ۲ در نمودار حاصل از تست به علت وقوع کمانش جانبی پیچشی در دریفت‌های بالا است.

#### ۴- توسعه مدل‌سازی

برای بررسی بیشتر میزان مشارکت اجزای اتصال در تحمل نیروهای ناحیه اتصال، مدل‌های صحت‌سنجی شده بر اساس نتایج آزمایش، برای ساخت مدل نمونه‌های با ابعاد بزرگ‌تر تیر و ستون مربعی و دایره‌ای به کار گرفته شدند.

#### ۴-۱- مشخصات نمونه‌ها و طراحی اجزای اتصال

طراحی اتصالات بر اساس روابط ارائه شده در مرجع [۱۲] انجام شد. نتایج طراحی اتصالات در جدول‌های (۲) و (۳) ارائه شده است.



شکل ۹- نمودار کرنش در ورق پوششی

جدول ۲- طراحی نمونه‌ها

شماره نمونه	ابعاد ستون (cm)	مقاومت فشاری بتن (MPa)	آرماتور ستون	ظرفیت خمشی ستون (t.m)	مقطع تیر	طول تیر (cm)	تنش تسلیم اساس مقطع		ظرفیت خمشی تیر (t.m)	نسبت ظرفیت ستون به تیر
							پلاستیک تیر (cm <sup>3</sup> )	فولاد تیر (kg/cm <sup>2</sup> )		
۱	۴۰x۴۰	۴۲	12T18-2%	۳۱/۷۶	I24x13x1.5x1	۴۰۰	۵۴۹	۳۳۰۰	۲۳/۵۵	۱/۳۴
ستون ۲	۴۰x۴۰	۴۰	12T18-2%	۳۰/۵	2U220	۴۰۰	۵۲۴	۳۲۷۰	۲۵/۷	۱/۱۸
مربعی ۳	۵۰x۵۰	۴۰	20T22-3%	۷۰/۴	2U380	۱۰۰۰	۱۷۶۰	۲۴۰۰	۶۹/۷	۱/۰۱
۴	۶۰x۶۰	۴۰	20T25-2.7%	۱۱۷	IPE550	۱۵۰۰	۲۷۸۷	۲۴۰۰	۱۱۰/۳۷	۱/۰۶
ستون ۵	۴۰	۴۲	14T22-4%	۳۵/۳	IPE260	۴۰۰	۶۱۰	۳۳۰۰	۲۹/۴	۱/۲
دایره‌ای ۶	۶۰	۴۲	22T22-3%	۹۳/۹۵	IPE450	۶۰۰	۱۶۲۴	۳۳۰۰	۷۸/۳	۱/۱۹

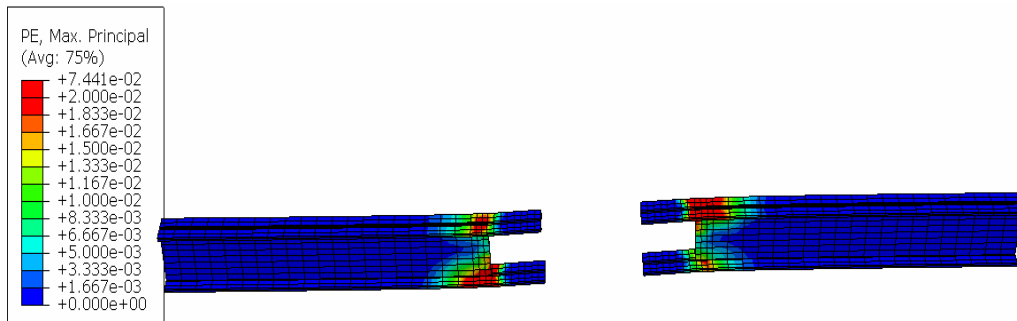
جدول ۳- طراحی ورق میان‌گذر

شماره نمونه	ضخامت ورق میان‌گذر (cm)	ارتفاع ورق میان‌گذر (cm)	ظرفیت خمشی ورق (t.m)	تقاضای خمشی ورق (t.m)	نسبت خمش	ظرفیت برشی چشمه اتصال		نسبت برش
						چشمه اتصال (ton)	تقاضای برشی (ton)	
۱	۲	۵۰	۳۳/۸۸	۲۸/۷۸	۱/۱۸	۱۵۱/۱۷	۱۳۰/۸۴	۱/۱۶
۲	۲	۵۰	۳۳/۸۸	۳۲/۰۴	۱/۰۶	۱۵۳/۵۳	۱۳۲/۵۴	۱/۱۶
۳	۲/۵	۷۰	۸۰/۸۵	۷۵/۲۸	۱/۰۷	۲۰۹/۱۲	۲۱۳/۰۳	۰/۹۸
۴	۲/۵	۸۵	۱۱۹/۲۱	۱۱۸/۶۴	۱	۲۵۲/۴۵	۲۱۶/۶۷	۱/۱۷
۵	۲	۵۰	۳۳/۸۸	۳۳/۸۳	۱	۱۵۱/۱۷	۱۴۶/۳۳	۱/۰۳
۶	۲	۹۰	۱۰۹/۷۸	۹۳/۴۹	۱/۱۷	۲۱۱/۷۳	۲۴۶/۳۱	۱/۱۶

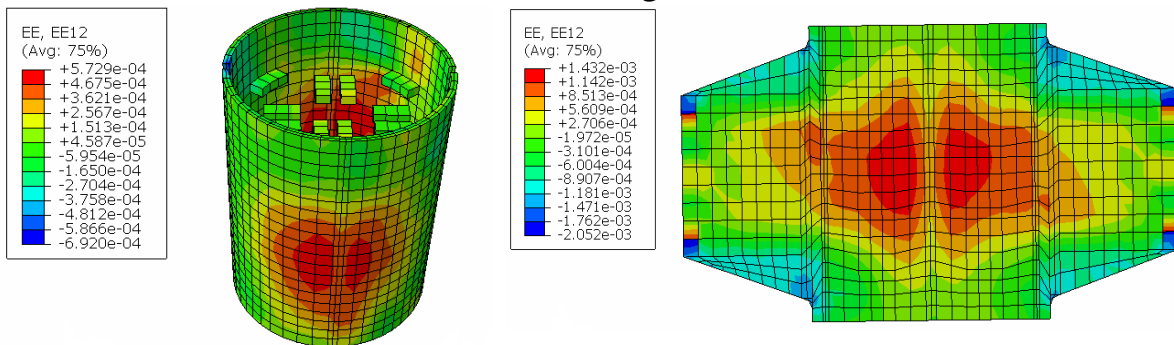
#### ۲-۴- بررسی رفتار نمونه‌ها

پوششی به دلیل تفاوت سطح مشارکت در تحمل تنش‌های چشمه اتصال است. در نمونه‌های ۳ و ۴ با ستون مربعی با ابعاد ۶۰ و ۵۰ سانتی‌متر، به دلیل طراحی بهینه برش‌گیرها و کاهش مقدار برش‌گیرها نسبت به سطح تنش‌های موجود در مقایسه با نمونه‌های تست‌شده، مقدار حداکثر کرنش فشاری خصوصاً مجاور برش‌گیرها افزایش یافته است. مقادیر تنش برشی در ورق‌های ناحیه اتصال و حداکثر کرنش فشاری در بتن ناحیه اتصال در جدول (۴) ارائه شد.

در همه نمونه‌ها مفصل پلاستیک در تیر تشکیل شد و سطح تنش در ورق میان‌گذر بسیار نزدیک به تسلیم است که حاکی از طراحی بهینه ورق میان‌گذر است. توزیع کرنش در اجزای نمونه ۵ با ستون دایره‌ای در دریف ۴٪ در شکل (۱۰) نشان داده شده است. شکل (۱۱) توزیع تنش در اجزای نمونه ۵ را در دریف ۲٪ نشان می‌دهد که تفاوت سطح تنش برشی در ورق میان‌گذر و ورق



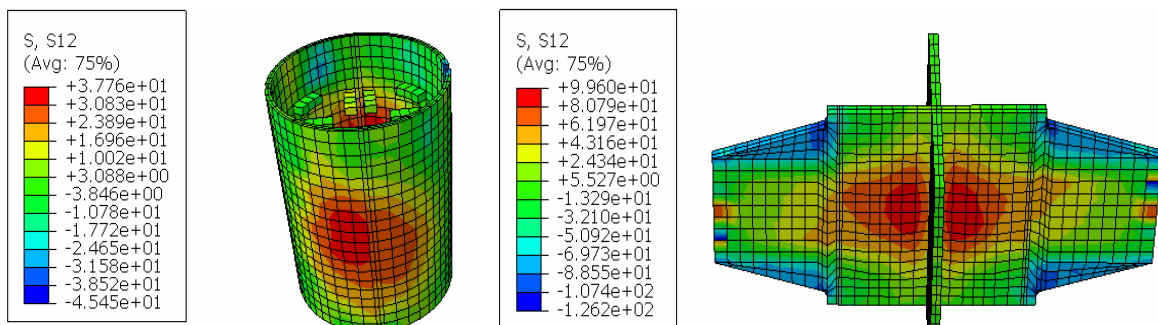
الف) توزیع تنش پلاستیک در تیر



ب) توزیع کرنش الاستیک در ورق پوششی

ب) توزیع کرنش الاستیک در ورق میان‌گذر

شکل ۱۰- توزیع کرنش در اجزای نمونه با ستون دایره‌ای در دریف ۴٪



ب) توزیع تنش برشی در ورق پوششی

الف) توزیع تنش برشی در ورق میان‌گذر

شکل ۱۱- توزیع تنش در اجزای نمونه با ستون دایره‌ای در دریف ۲٪

جدول ۵- مقادیر تنش برشی ورق‌های ناحیه اتصال و حداکثر کرنش فشاری در بتن

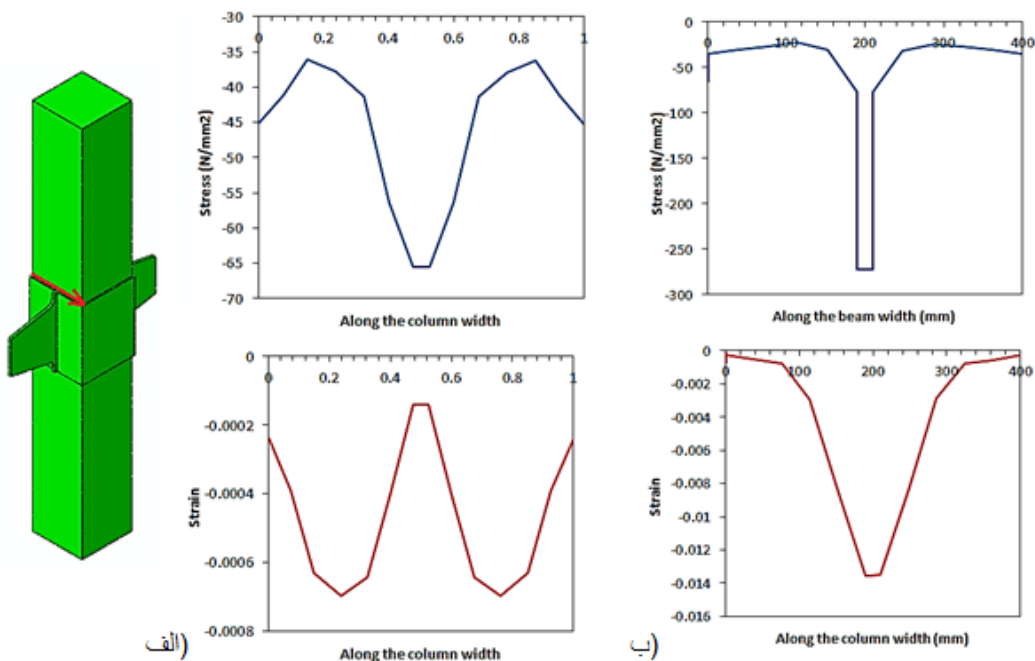
شماره نمونه	ابعاد ستون (cm)	مقطع تیر	حداکثر تنش برشی دررفت ۲٪ (kg/cm <sup>2</sup> )		دررفت ۲٪ فشاری
			ورق پوششی	ورق میان‌گذر	
۱	۴۰x۴۰	I24x13x1.5x1	۱۲۰۰	۳۲۰	۰/۰۰۱۲
۲	۴۰x۴۰	2U220	۱۴۵۰	۳۳۴	۰/۰۰۱۴
۳	۵۰x۵۰	2U380	۱۵۰۰	۳۸۴	۰/۰۰۲۷
۴	۶۰x۶۰	IPE550	۱۲۰۰	۳۵۸	۰/۰۰۲۴
۵	۴۰	IPE260	۹۹۶	۳۷۷	۰/۰۰۵۶
۶	۶۰	IPE450	۱۰۵۴	۵۴۳	۰/۰۰۴۸

#### ۳-۴- بررسی سطح تماس ورق میان‌گذر با بتن

در نمونه بدون برش‌گیر، همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، مقدار تنش و کرنش در محل اتکای ورق میان‌گذر به بتن، به مقدار بسیار زیادی نسبت به نمونه دارای برش‌گیر افزایش یافته است. به دلیل انتقال نیرو به صورت اتکایی از ورق‌های فولادی به بتن، کرنش‌های فشاری قابل توجهی یافته که منجر به ایجاد آسیب‌های موضعی در بتن و وقوع لغزش می‌شود.

با توجه به اینکه برش‌گیرهای واقع بر ورق میان‌گذر در مقایسه با برش‌گیرهای واقع بر ورق‌های پوششی، بر وجوه جلو و عقب ستون در فاصله کم‌تر نسبت به تار ختنی قرار دارند، در نتیجه مشارکت کم‌تری نیز در انتقال نیروها به ستون بتنی خواهند داشت. لذا برش‌گیرهای واقع بر ورق میان‌گذر در دو مدل حذف شدند. بدین ترتیب سهم برش‌گیرهای واقع بر ورق میان‌گذر (حدود ۱۵٪ لنگر کل) بین برش‌گیرهای ورق‌های پوششی (خصوصاً ورق جلویی) و لبه‌های بالا و پایین ورق میان‌گذر توزیع می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که عدم وجود برش‌گیر بر ورق میان‌گذر منجر به کاهش میزان بسیج شدن بتن ناحیه اتصال و کاهش تنش فشاری در دستک قطری شده است که موجب افزایش تقاضا در ورق میان‌گذر و همچنین افزایش تنش فشاری در بالا و پایین لبه‌های ورق میان‌گذر شده است (شکل (۱۳)).

نمودار بار جانبی در برابر تغییرمکان نمونه‌ها مطابق شکل (۱۴) است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود حذف کلیه برش‌گیرها منجر به کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در سختی اتصال می‌شود.

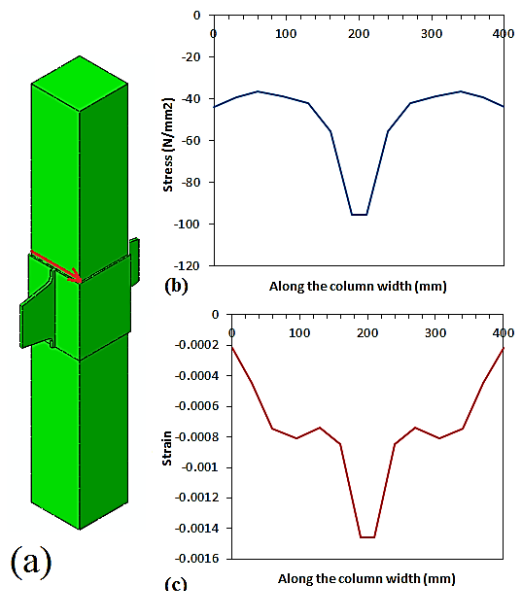


شکل ۱۲- نمودار تنش و کرنش در مسیر مشخص شده در دررفت ۴٪ (الف) نمونه ۲ (ب) نمونه بدون برش‌گیر

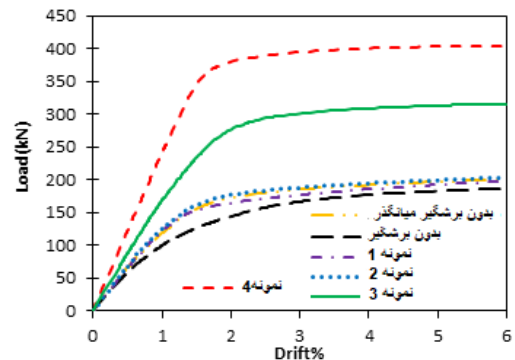
#### ۴-۴- تعیین مشارکت مسیرهای انتقال بار

یکی از مکانیسم‌های انتقال نیرو در ناحیه چشمه اتصال، ایجاد دستک فشاری در بتن است. وجود برش‌گیرها و ورق پوششی دور ستون، دو عامل مهم در بسیج کردن دستک فشاری بتن هستند. به‌عنوان نمونه، سطح تنش فشاری دستک قطری بتن در نمونه ۵، در شکل (۱۵) نشان داده شده است. در دررفت‌های ۲٪ و ۴٪ تنش فشاری دستک قطری بتن به ترتیب ۷ و ۱۳ مگاپاسکال است. در نمونه مشابه با ستون مربعی مقدار تنش فشاری در دستک قطری به ترتیب ۶ و ۱۱ مگاپاسکال به دست آمد.

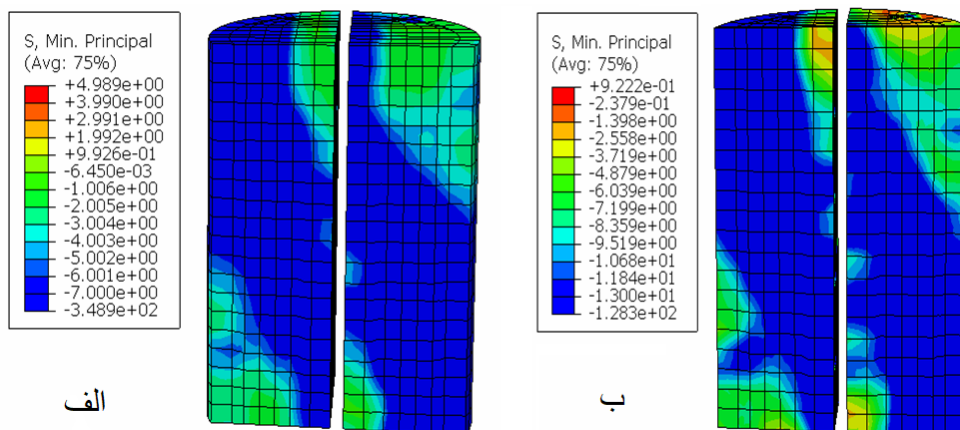
بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی، مطابق شکل‌های (۱۶) و (۱۷)، در نمونه ۱ سهم ورق میان‌گذر، ورق‌های کناری و بتن از نیروی برشی چشمه اتصال در دررفت ۸٪ به ترتیب ۵۱٪، ۱۴٪ و ۳۵٪ و در نمونه ۲، ۴۵٪، ۱۴٪ و ۳۸٪ است. نتایج فوق با سهم‌های به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد. بر طبق نتایج آزمایشگاه [۱۲]، سهم دستک قطری بتن ۱۵٪ است. در مجموع ۲۰٪ از کل نیروها نیز از طریق برش‌گیرهای ورق‌های کناری و میان‌گذر به بتن منتقل می‌شوند که کل سهم بتن برابر ۳۵٪ مطابق نتایج مدل‌سازی خواهد بود. در نهایت سهم ورق میان‌گذر و ورق‌های کناری (۶۵٪) از طریق برش‌گیر به ستون منتقل می‌شوند که بیش‌ترین سطح تنش‌های فشاری را در این نواحی بر بتن اعمال می‌کنند. همچنین مطابق شکل‌های (۱۸) و (۱۹)، سهم ورق میان‌گذر، ورق‌های کناری و بتن از نیروی برشی چشمه اتصال در دررفت ۴٪ به ترتیب ۵۴٪، ۱۰٪ و ۳۳٪ در نمونه ۱ و ۵۱٪، ۱۱٪ و ۳۵٪ در نمونه ۲ است.



شکل ۱۳- نمودار تنش و کرنش نمونه بدون برش‌گیرهای ورق میان‌گذر در مسیر مشخص شده در دررفت ۴٪



شکل ۱۴- نمودار بار جانبی در برابر تغییر مکان

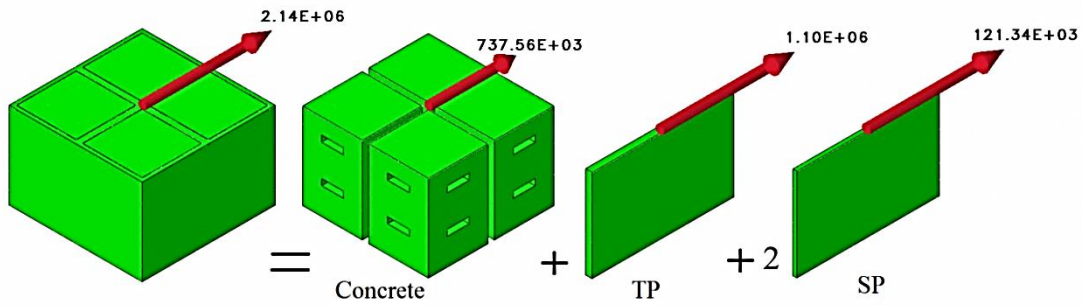


شکل ۱۵- تنش در بتن ناحیه اتصال در نمونه ۵ الف) دررفت ۲٪، ب) دررفت ۴٪

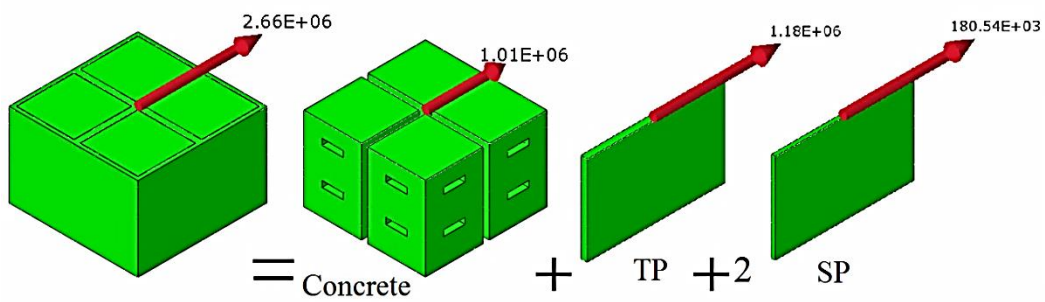
می‌کند. در نمونه‌های با ستون دایره‌ای، به دلیل فراهم نمودن محصورشدگی بهتر توسط ورق‌های پوششی، میزان مشارکت ورق‌های پوششی و بتن نسبت به نمونه‌های با مقطع مربعی

میزان مشارکت اجزای اتصال در تحمل نیروهای برشی وسط اتصال در جدول (۶) ارائه شده است. میزان مشارکت اجزای اتصال در نمونه‌های اول الی چهارم تقریباً از الگوی ثابتی پیروی

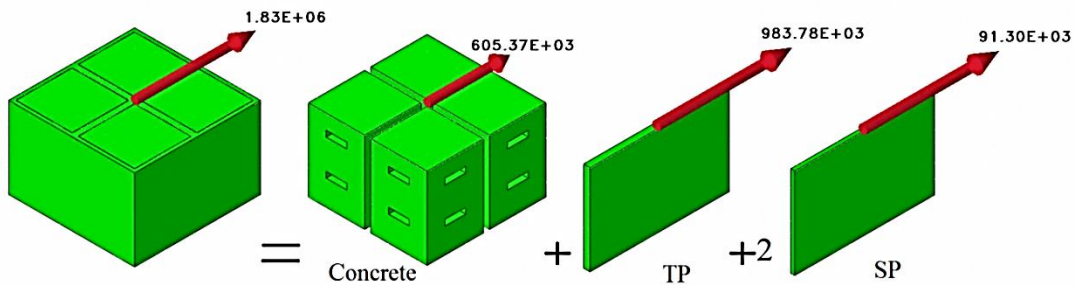
افزایش یافت. بهتر بسیج شدن بتن و ورق های پوششی در نمونه های دایره ای، منجر به کاهش تقاضا بر ورق میان گذر و در نتیجه طراحی سبک تر این ورق می شود.



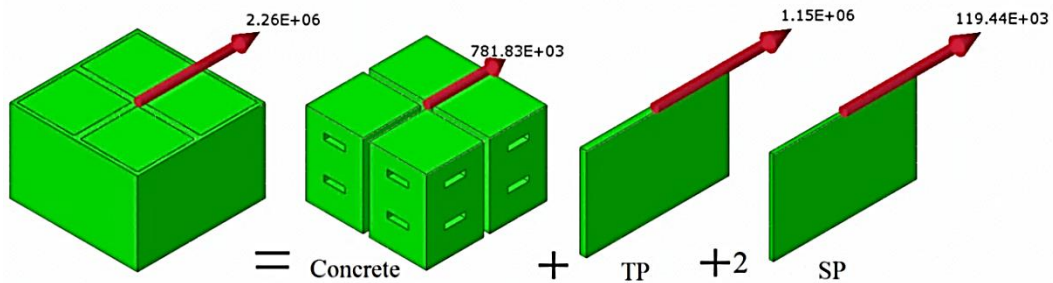
شکل ۱۶- سهم اجزای اتصال نمونه ۱ از برش چشمه اتصال در دررفت ۸٪



شکل ۱۷- سهم اجزای اتصال نمونه ۲ از برش چشمه اتصال در دررفت ۸٪



شکل ۱۸- سهم اجزای اتصال نمونه ۱ از برش چشمه اتصال در دررفت ۴٪



شکل ۱۹- سهم اجزای اتصال نمونه ۲ از برش چشمه اتصال در دررفت ۴٪

بسیج کردن ورق های کناری اتصال نیست. کل انتقال بار به ستون بتنی صرفاً به صورت اتکایی در سطح جلو و عقب ورق های

در نمونه بدون برش گیر، سهم ورق میان گذر به میزان چشمگیری افزایش می یابد و جزئیات ناحیه اتصال قادر به

پوششی و همچنین از لبه‌های ورق میان‌گذر است و همان‌طور که در جدول (۵) ارائه شد، منجر به افزایش چشمگیر در سطح کرنش فشاری و آسیب‌های موضعی بتن می‌شود. در نمونه‌های با حذف برش‌گیرهای ورق میان‌گذر، سطح مشارکت بتن کاهش یافته است و قسمت بیش‌تری از نیروهای ورق میان‌گذر از طریق عملکرد اتکایی لبه‌های ورق میان‌گذر به بتن منتقل می‌شود که تأثیری در بسیج‌نمودن دستک قطری ندارد. نتایج نشان داد اگرچه ورق

میان‌گذر بخش عمده نیروهای چشمه اتصال را از طریق برش‌گیرها به بتن انتقال می‌دهد، ولی نمونه‌های فاقد برش‌گیر بر روی ورق میان‌گذر نیز از طریق مسیر ورق‌های کناری به‌عنوان مسیر جایگزین قادر به انتقال نیرو و کنترل آسیب در سطح تماس لبه‌های بالا و پایین ورق میان‌گذر با بتن هستند. بنابراین وجود چندین مسیر موازی انتقال نیرو در این شیوه اتصال، تضمین‌کننده عملکرد قابل‌اطمینان آن تحت بارهای وارده است.

جدول ۶ - درصد مشارکت اجزای اتصال در تحمل نیروهای برش

شماره نمونه	مقطع ستون	مقطع تیر	دریفت	ورق میان‌گذر	ورق‌های پوششی	بتن
۱	۴۰x۴۰	I24x13x1.5x1	٪۱	۵۴/۳۴	۱۵/۱۶	۳۰/۵
			٪۲	۶۱/۹۶	۱۲/۸۸	۲۵/۱۵
			٪۴	۶۲/۳	۱۳/۳۶	۲۴/۳۵
۲	۴۰x۴۰	2U220	٪۱	۵۶/۰۷	۱۴/۶۸	۲۹/۲۶
			٪۲	۶۳/۶۲	۱۲/۸۳	۲۳/۶۶
			٪۴	۵۶/۶۴	۱۶/۴	۲۶/۹۶
۳	۵۰x۵۰	2U380	٪۱	۵۴/۸۸	۲۱/۱۸	۲۳/۹۶
			٪۲	۶۳/۰۷	۱۹/۶۹	۱۷/۲۴
			٪۴	۵۵/۶۸	۲۴/۹۳	۱۹/۳۹
۴	۶۰x۶۰	IPE550	٪۱	۵۰/۵۶	۱۳/۲	۳۶/۲۴
			٪۲	۵۷/۹۸	۱۲/۵۸	۲۹/۴۴
			٪۴	۶۰/۲	۱۲/۲۹	۲۷/۵۱
۵	۴۰	IPE260	٪۱	۳۵/۷۶	۲۸/۰۸	۳۶/۱۶
			٪۲	۴۶/۷۲	۲۲/۳۱	۳۰/۹۷
			٪۴	۴۸/۱۳	۲۴/۸۳	۲۷/۰۴
۶	۶۰	IPE450	٪۱	۳۸/۲۲	۲۱/۳۸	۴۱/۰۴
			٪۲	۳۹/۰۴	۱۹/۸۹	۴۱/۰۷
			٪۴	۴۰/۳۸	۱۹/۰۷	۴۰/۵۵
بدون برش‌گیر	۴۰x۴۰	2U220	٪۱	۷۴/۵۲	۲/۸۳	۲۲/۶۵
			٪۲	۷۹/۸۳	۱/۹۳	۱۸/۲۴
			٪۴	۷۱/۷۱	۳/۷۱	۲۳/۱۳
بدون برش‌گیر بر ورق میان‌گذر	۴۰x۴۰	2U220	٪۱	۶۷/۶۶	۱۵/۳۸	۱۵/۲
			٪۲	۶۹/۸۵	۱۵/۷۲	۱۲/۱۶
			٪۴	۶۱/۲۳	۱۸/۴۴	۱۶/۷۳
بدون برش‌گیر بر ورق میان‌گذر	۵۰x۵۰	2U380	٪۱	۶۶/۴۵	۱۲/۵۶	۱۵/۷۶
			٪۲	۷۰/۵۴	۱۲/۲۶	۱۱/۷۶
			٪۴	۵۹/۴۷	۱۶/۵	۱۵/۷۱

##### ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مدل‌سازی عددی اتصال تیر فولادی به ستون بتن‌آرمه مربعی و دایره‌ای انجام شد. در این راستا دو نمونه تست آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد؛ سپس به‌منظور ارزیابی دقیق میزان

مشارکت اجزای اتصال در تقاضای چشمه اتصال، مدل‌های اعتبارسنجی شده به چندین مدل با ابعاد بزرگ‌تر تیر به ستون مربعی و دایره‌ای توسعه داده شدند. همچنین چندین مدل نیز برای مطالعه اثر برش‌گیرهای واقع بر سطوح مختلف ناحیه اتصال در



انتقال بار، مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. نتایج به شرح زیر است:

- به طور کلی در اتصال مورد بررسی، سه مکانیزم انتقال نیرو از تیر به ستون شامل مکانیزم‌های ورق میان‌گذر، ورق‌های پوششی و دستک قطری بتن وجود دارد. حداقل مشارکت ورق میان‌گذر در نمونه‌های با ستون مربعی ۵۰ درصد و در نمونه‌های با ستون دایره‌ای ۳۵ درصد است. این کاهش با افزایش مشارکت بتن در نمونه‌های با ستون دایره‌ای همراه است که حاکی از اثر محصورکنندگی بهتر توسط ورق‌های پوششی دایره‌ای است. بالاتر بودن سطح تنش‌های فشاری در محل اتکای برش‌گیرها به بتن در نمونه‌های دایره‌ای نیز تأییدکننده این مطلب است.

- تنش برشی در ورق میان‌گذر در نمونه‌های مربعی حدود ۳/۵ برابر تنش برشی در ورق‌های پوششی است. تفاوت سطح تنش برشی در ورق میان‌گذر و ورق پوششی به دلیل تفاوت سطح مشارکت در تحمل تنش‌های چشمه اتصال است.

- نسبت تنش برشی در ورق میان‌گذر به ورق‌های پوششی در نمونه‌های با ستون دایره‌ای نسبت به نمونه‌های با ستون مربعی کم‌تر بوده و حدود دو برابر است. این موضوع نشان‌دهنده مشارکت بهتر ورق‌های پوششی دایره‌ای در باربری و انتقال تنش‌های ناحیه اتصال است.

- در نمونه بدون برش‌گیر، ورق‌های پوششی در انتقال بار چندان بسیج نشدند و مقدار تنش و کرنش در محل اتکای ورق میان‌گذر به بتن نسبت به نمونه دارای برش‌گیر افزایش یافت که همراه با افزایش آسیب‌های موضعی در بتن، وقوع لغزش در این ناحیه و کاهش در سختی اتصال بود.

- حذف برش‌گیرهای ورق میان‌گذر منجر به کاهش میزان بسیج شدن بتن ناحیه اتصال و کاهش تنش فشاری در دستک قطری شد که موجب افزایش تقاضا در ورق میان‌گذر و همچنین افزایش تنش فشاری در بالا و پایین لبه‌های ورق میان‌گذر شد.

- [14] Ellobody, E., Young, B., and Lam, D., (2006), "Behaviour of normal and high strength concrete-filled compact steel tube circular stub columns", *Journal of Constructional Steel Research*, 62(7), pp.706-715.
- [15] ENV, D., (1992), 1-1 Eurocode 2, Design of Concrete Structures. British Standards Institute.
- [1] Kuramoto, H., and Nishiyama, I. (2004), "Seismic performance and stress transferring mechanism of through-column-type joints for composite reinforced concrete and steel frames", *Journal of Structural Engineering*, 130(2), pp.352-360.
- [2] Fargier-Gabaldón, L.B., and Parra-Montesinos, G.J. (2006), "Behavior of reinforced concrete column-steel beam roof level T-connections under displacement reversals", *Journal of Structural Engineering*, 132(7), pp.1041-1051.
- [3] Cheng, C.T., and Chen, C.C. (2005), "Seismic behavior of steel beam and reinforced concrete column connections", *Journal of Constructional Steel Research*, 61(5), pp.587-606.
- [4] Alizadeh, S., Attari, N.K., and Kazemi, M.T. (2013), "The seismic performance of new detailing for RCS connections", *Journal of Constructional Steel Research*, 91, pp.76-88.
- [5] Alizadeh, S., Attari, N.K., and Kazemi, M.T. (2015), "Experimental investigation of RCS connections performance using self-consolidated concrete", *Journal of Constructional Steel Research*, 114, pp.204-216.
- [6] Attari, N.K., Azadvar, N., and Alizadeh, S. (2020), "Numerical investigation of cover plate in RCS connections", *Scientia Iranica*, 27(1), pp.10-24.
- [7] Dung Le, D., Nguyen, X.H., and Nguyen, Q.H. (2020), "Cyclic testing of a composite joint between a reinforced concrete column and a steel beam", *Applied Sciences*, 10(7), pp.2385.
- [8] Shen, H.X. (2007), "Research on static behavior of reinforced concrete column-steel beam (RCS) moment joints (Doctoral dissertation)", PhD dissertation, Xi'an University of architecture and technology. Xi'an, PR China.
- [9] Asl, M.H.H., Chenaglou, M.R., Abedi, K., and Afshin, H. (2013), "3D finite element modelling of composite connection of RCS frame subjected to cyclic loading", *Steel and Composite Structures, An International Journal*, 15(3), pp.281-298.
- [10] Guo, Z.F., Men, J.J., Shi, Q.X., and Tian, J.B. (2013), "Research on behavior of RCS composite joints", *Advanced Materials Research*, 671, pp.534-537.
- [11] Ahmadi, M.M., Mirghaderi, S.R., and Eghbali, N.B. (2022), "Cyclic testing of through-plate moment connection for beam to concrete filled and unfilled circular column", *Engineering Structures*, 267, pp.114695.
- [12] Eghbali, N.B., and Mirghaderi, S.R. (2017), "Experimental investigation of steel beam to RC column connection via a through-plate", *Journal of Constructional Steel Research*, 133, pp.125-140.
- [13] Nguyen, H.T., and Kim, S.E. (2009), "Finite element modeling of push-out tests for large stud shear connectors", *Journal of Constructional Steel Research*, 65(10-11), pp.1909-1920.