

Development of Strut Model for Evaluating Shear Capacity of Beams With Elongated Circular Web Openings

Vahid Akrami*

Assistant Professor, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ABSTRACT

There are a number of reasons for considering web openings in steel structures with I-sections. Design of these structural members is always a practical challenge in steel construction. There are several design methods available in the literature for design of these components. Most of these methods rely on the moment-shear-axial interaction curves. However, the preliminary studies have shown that the real performance of these reduced sections is in the form of diagonal struts. The objective of this study is to present a new model based on the tensile and compressive action of diagonal struts at reduced web region to calculate shear strength of the perforated section. For this purpose, the geometry and dimensions of the diagonal struts are described and the shear strength of reduced section is calculated accordingly. To assess the accuracy of proposed geometry and dimensions for diagonal struts, a topology optimization is conducted for two finite element models and results are compared to the proposed values based on which a good agreement is found between optimized and proposed geometries. Next, design curves are presented for calculation of shear strength followed by comparison of proposed model and its predictions with the ones obtained from numerical analysis. Comparing the predictions of the proposed model with the results of 120 finite element samples, the absolute mean error and standard deviation of absolute error were calculated to be 6% and 3.7%, respectively. This comparison shows that, although the presented model is simple and easy to use, it has acceptable accuracy and can be utilized for calculation of shear strength in perforated steel I-beams.

ARTICLE INFO

Receive Date: 01 October 2019
Revise Date: 11 October 2019
Accept Date: 03 November 2019

Keywords:

Steel beam;
Web opening;
Strut model;
Shear strength;
Finite element.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.202614.1958

*Corresponding author: Vahid Akrami
Email address: v.akrami@uma.ac.ir

توسعه مدل خرابایی برای تخمین ظرفیت برشی تیرهای دارای بازشوی لوبیایی در جان

وحید اکرمی*

عضو هیات علمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

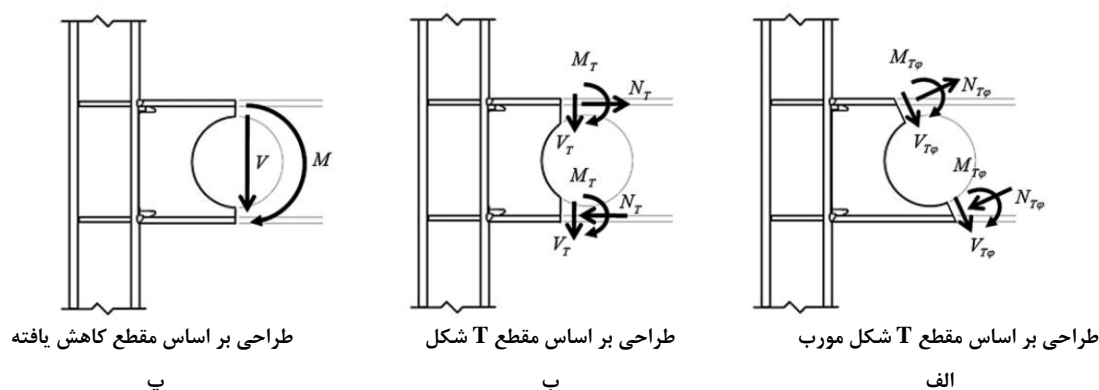
ایجاد بازشو در جان تیر یکی از امور متداول در سازه‌های فولادی می‌باشد. در حال حاضر برآورد مقاومت این نواحی بر اساس روابطی استوار می‌باشد که مبتنی بر اندرکنش خمش، برش و نیروی محوری در ناحیه مذکور است. با توجه به بررسی‌های به عمل آمده عملکرد این نواحی را می‌توان به صورت رفتار خرابایی جان تیر تحت نیروهای وارده توصیف نمود. بر همین اساس، هدف تحقیق حاضر توسعه یک مدل خرابایی برای نواحی یاد شده از تیرها و ارائه روابط حاکم برای برآورد ظرفیت باربری آنها می‌باشد. بدین منظور، ابتدا هندسه و ابعاد خرابای مذکور شرح داده شده و ظرفیت برشی تیر در ناحیه با جان کاهش یافته بر حسب پارامترهای هندسی المان‌های قطری خرپا محاسبه شده است. برای بررسی دقت هندسه پیشنهادی، دو مدل المان محدود تیر با ابعاد مختلف بازشو در نرم افزار آباکوس تولید و با استفاده از بهینه‌سازی پارامترهای هندسی مجهول، ابعاد و هندسه المان‌های خرابایی مد نظر تعیین و با مقادیر تعیین شده توسط روابط پیشنهادی مقایسه شده است. طبق نتایج این مقایسه، هندسه پیشنهادی برای مدل خرابایی مطابقت مناسبی با نتایج حاصل از بهینه‌سازی هندسی توسط نرم‌افزار دارد. در ادامه، نمودارهای طراحی برای محاسبه ظرفیت برشی مقطع با جان کاهش یافته به صورت تابعی از مشخصات هندسی تیر و بازشوی جان ارائه شده و پیش‌بینی‌های حاصل با نتایج تحلیل مدل المان محدود مقایسه شده است. بر همین اساس و با مقایسه پیش‌بینی‌های روش پیشنهادی با نتایج حاصل از ۱۲۰ نمونه المان محدود، میانگین قدر مطلق خطا برابر با ۶٪ و انحراف از معیار آن برابر با ۳/۷٪ تعیین گردید. علیرغم سادگی و سهولت کاربرد مدل پیشنهادی، می‌توان گفت که دقت آن در محدوده قابل قبولی قرار داشته و استفاده از آن برای برآورد ظرفیت برشی مقاطع با جان کاهش یافته قابل توصیه می‌باشد.

کلمات کلیدی: تیر فولادی، بازشو جان، مدل خرابایی، ظرفیت برشی، تحلیل المان محدود

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/JSCE.2019.202614.1958	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.202614.1958	۱۴۰۰/۰۵/۳۰	۱۳۹۸/۰۸/۱۲	۱۳۹۸/۰۸/۱۲	۱۳۹۸/۰۷/۱۹	۱۳۹۸/۰۷/۰۹
وحید اکرمی v.akrami@uma.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

ایجاد بازشو در جان تیرهای یک سیستم قاب خمشی فولادی ممکن است بنا به ضرورتها و دلایل متفاوتی باشد. عواملی که ضرورت استفاده از تیرهای دارای بازشو در جان را پدید می‌آورند، از تنوع زیادی برخوردارند. نمونه‌ای از این ضرورتها گنجاندن تأسیسات ساختمان در داخل ضخامت سقف طبقه می‌باشد که با عبور دادن لوله‌ها از درون جان تیرها میسر می‌شود و در نتیجه کاهش ارتفاع طبقات سازه را به همراه دارد. برای بیش از صد سال محققین مختلفی تاثیر ایجاد بازشو در جان تیر را بر نحوه توزیع تنش‌های الاستیک و پلاستیک مورد بررسی قرار داده‌اند [۱]. با توجه به کاربرد روزافزون این المان‌های سازه‌ای و پارامترهای زیاد دخیل در طراحی آنها، تحقیقات عددی و آزمایشگاهی بسیاری برای تخمین ظرفیت نهایی این تیرها انجام شده است. برای تعیین رفتار این نوع تیرها، تست‌های آزمایشگاهی قابل ملاحظه‌ای بین سال‌های ۱۹۷۰م تا ۱۹۸۰م انجام گرفت که برخی از آنها را می‌توان در مراجع [۲-۶] مشاهده نمود. این تحقیقات نشان دادند که نحوه توزیع تنش در اطراف بازشو دارای شرایط پیچیده‌ای می‌باشد که این مسئله به نوبه خود باعث می‌شود این نوع تیرها دارای رفتار پیچیده‌ای باشند [۷]. در سال‌های آتی تحقیقات تئوریک و عددی مختلفی برای تشریح رفتار خطی و غیرخطی این المان‌های سازه‌ای انجام گردید. بسیاری از این تحقیقات نشان دادند که وجود بازشو در جان تیر می‌تواند تاثیر محسوسی بر ظرفیت باربری این تیرها داشته باشد [۸-۱۱]. در تحقیقات گذشته، چندین مدل تحلیلی برای تخمین ظرفیت باربری تیرهای با جان کاهش یافته توسعه و گسترش داده شده‌اند. نخستین مورد از این روش‌ها، "طراحی بر اساس مقطع T شکل مورب"^۱ می‌باشد (شکل ۱.الف). در این روش تمامی نیروهای اصلی موثر در مرکز بازشو به صورت نیروهای ثانویه بر روی مقطعی با زاویه ϕ تصویر می‌شوند. در ادامه اثر همزمان ناشی از نیروهای ثانویه تصویر شده، با ظرفیت مقطع T شکل مورب مقایسه شده و ظرفیت تیر محاسبه می‌شود [۱۲]. روش دیگر که بنوعی حالت ساده شده روش قبیل می‌باشد، به "طراحی بر اساس مقطع T شکل"^۲ مشهور می‌باشد (شکل ۱.ب). در این روش نیروهای محلی بر روی یک مقطع T شکل قائم (واقع در گوشه‌های بازشوی مستطیلی معادل) بدست آمده و سپس کفایت عضو مورد نظر با مقایسه تنش‌های حاصل از اثر همزمان این نیروها بر مقطع یاد شده کنترل می‌گردد [۸]. روش سوم که روند پذیرفته شده توسط آیین‌نامه [13] ASCE 23-97 و همچنین راهنمای طراحی موسسه AISC [9] می‌باشد، "طراحی بر اساس مقطع کاهش یافته"^۳ می‌باشد (شکل ۱.پ). در این روش پس از تحلیل سازه مورد نظر، نیروهای برشی و لنگر خمشی موجود در محل مقطع با جان کاهش یافته تیر بدست آمده و کفایت عضو مورد نظر با کنترل تنش‌های ناشی از اندرکنش برش و لنگر خمشی در مقطع با جان کاهش یافته کنترل می‌گردد [۹].



شکل ۱: مدل‌های تحلیلی مورد استفاده در برآورد ظرفیت تیرهای دارای بازشو در جان [۱۴]

خلاصه‌ای از این روش‌ها و مقایسه دقت هر کدام در برآورد ظرفیت باربری تیرهای یاد شده را می‌توان در تحقیقات انجام شده توسط اکرمی و عرفانی [۱۴] یافت. علاوه بر مرجع یاد شده، شرح و مقایسه برخی از روش‌های فوق در تحقیقات پانددپوجامان و همکاران^۴

¹ Inclined T-section Approach (ITSA)

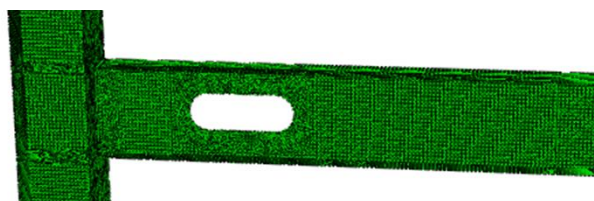
² T-section approach (TSA)

³ Perforated section approach (PSA)

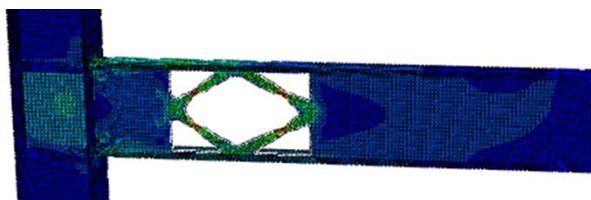
⁴ Panedpojaman et al.

[۱۵، ۱۶] نیز آورده شده است. این محققین علاوه بر مقایسه روش‌های تحلیلی ارائه شده در منابع پیشین، یک رابطه اندرکنشی بین لنگر خمشی، نیروی برشی و نیروی محوری موجود در تیرهای ثانویه بالا و پایین بازشو ارائه داده و پیش‌بینی‌های آن را با نتایج عددی حاصل از تحلیل‌های عددی مقایسه نمودند. در کنار مدل‌های مبتنی بر تحلیل سازه و با گسترش روش‌های نوین نظیر شبکه عصبی در علوم مهندسی، برخی از محققین نیز به ارائه مدل‌های مبتنی بر این روش‌ها روی آورده‌اند. نمونه‌ای از این مدل‌ها را می‌توان در مطالعات آتامبرس و همکاران^۵ [۱۷] جستجو کرد. این محققین برای ارائه مدل خود، از آموزش یک شبکه عصبی مصنوعی متشکل از یک لایه ورودی با ۸ نورون، ۳ لایه میانی با ۱۱ نورون و یک لایه خروجی با یک نورون بوسیله نتایج تحلیل‌های عددی بر روی تیر با جان کاهش یافته استفاده کردند.

مطابق تحقیقات اشهایم و هالترمن^۶ [۱۸] و در ادامه شین و همکاران^۷ [۱۹، ۲۰]، تعبیه بازشو در وسط دهانه تیر رفتار چرخه‌ای مناسب‌تری را برای تیر مورد نظر در پی خواهد داشت. در این حالت، ناحیه با جان کاهش یافته رفتاری برشی داشته و مکانیز حاکم بر عملکرد آن مشهور به مکانیزم ویراندیل خواهد بود. در حال حاضر برآورد مقاومت این نواحی بر اساس روابط استوار می‌باشد که مبتنی بر اندرکنش خمش، برش و نیروی محوری در ناحیه مذکور است. با توجه به بررسی‌های اولیه به عمل آمده در شکل ۲، مشاهده می‌شود که عملکرد این نواحی را می‌توان به صورت رفتار خرپایی جان تیر تحت نیروهای وارده توصیف نمود (این شکل نتایج بهینه‌سازی هندسی^۸ توسط نرم افزار آباکوس را برای یک تیر طره با بار متمرکز انتهایی و بازشو جان نمایش می‌دهد). بر همین اساس، هدف تحقیق حاضر توسعه یک مدل خرپایی برای نواحی یاد شده از تیرها و ارائه روابط حاکم برای برآورد ظرفیت باربری آنها می‌باشد.



تیر دارای بازشو در جان



تیر پس از حذف المان‌های
با سطح تنش پایین

شکل ۲: رفتار خرپایی تیر در ناحیه با جان کاهش یافته (تحلیل Topology optimization نرم افزار آباکوس)

بدین منظور، رفتار تیرهای دارای بازشو در جان در محدوده محل ایجاد سوراخ بررسی شده و یک مدل خرپایی با تعدادی پارامتر مجهول ارائه شده است. پارامترهای مجهول شامل عرض المان مورب خرپایی، زاویه المان مورب خرپایی و فاصله تقارب المان‌های خرپایی در وسط بازشو می‌باشد. در ادامه، رابطه ظرفیت مدل خرپایی بر اساس پارامترهای مجهول بدست آمده و با صفر قرار دادن مشتق آن (برای بیشینه سازی ظرفیت مقطع) محدوده بهینه برای پارامترهای مجهول محاسبه خواهد گردید. نهایتاً، نمودارهای طراحی برای محاسبه ظرفیت باربری مقطع با جان کاهش یافته به صورت تابعی از مشخصات هندسی تیر و بازشوی جان ارائه شده و پیش‌بینی‌های حاصل از مدل ارائه شده با نتایج حاصل از تحلیل مدل المان محدود مقایسه شده است.

⁵ Abambres et al.

⁶ Aschheim & Halterman

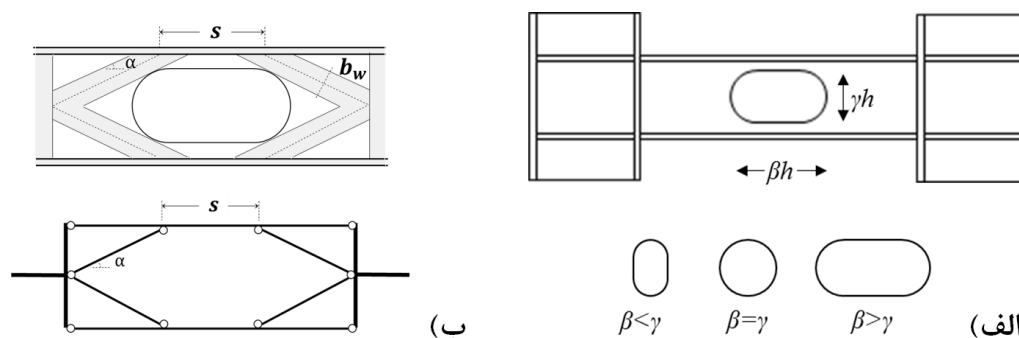
⁷ Shin et al.

⁸ Topology optimization

۲- روابط تحلیلی مدل خرابایی

۲-۱- محاسبه عرض المان مورب

با توجه به نتایج تحقیقات اکرمی و عرفانی [۲۱] مبنی بر عملکرد مناسب بازشوهای لوبیایی شکل، در این تحقیق نیز بازشو با دو انتهای گرد (لوبیایی) مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۳ الف هندسه بازشوهای مورد بررسی در تحقیق را نمایش می‌دهد. چنانچه ملاحظه می‌گردد، معرف طول بازشو $l_o = \beta h$ و معرف ارتفاع بازشو می‌باشد (h ارتفاع تیر است). با تغییر طول و ارتفاع بازشو، شکل سوراخ جان از لوبیایی قائم ($\beta < \gamma$) به دایره ($\beta = \gamma$) و نهایتاً لوبیایی افقی ($\beta > \gamma$) تبدیل می‌شود. شکل ۳ ب مدل خرابایی معادل برای ناحیه با جان کاهش یافته را نمایش می‌دهد. مطابق شکل، پارامترهای معرف این مدل، عرض المان‌های خرابایی، b_w ، زاویه قرارگیری المان‌های خرابایی، α ، و فاصله بین خطوط مرکزی دو المان مورب در مدل خرابایی می‌باشد که با s نشان داده می‌شود.



شکل ۳: معرفی مدل؛ الف) هندسه بازشوهای مورد بررسی؛ ب) مدل خرابایی معادل

برای شروع، مقطع تیر با یک بازشوی لوبیایی قائم در نظر گرفته می‌شود. شکل ۴ الف هندسه المان‌های مورب را در این حالت نمایش می‌دهد. با توجه به مماس بودن المان مورب بر گردشگی گوشه بازشو، مقدار پارامتر δ (نصف ارتفاع قائم المان مورب) مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\delta = \frac{h}{2} - \frac{t_f}{2} - \frac{\gamma h}{2} + \frac{\beta h}{2} - \frac{\beta h}{2} \cos(\alpha) - \left[\frac{\beta h}{2} \sin(\alpha) - \frac{s}{2} \right] \tan(\alpha) \quad (1)$$

بنابراین عرض المان مورب در این حالت با توجه به شکل برابر با مقدار زیر خواهد بود:

$$b_w = 2\delta \cos(\alpha) = [h - t_f + \beta h - \gamma h] \cos(\alpha) - \beta h \cos^2(\alpha) - \beta h \sin^2(\alpha) + s \sin(\alpha) \\ = [h - t_f + \beta h - \gamma h] \cos(\alpha) + s \sin(\alpha) - \beta h \quad (2)$$

برای مقطع تیر با بازشوی لوبیایی افقی نیز روند کار مشابه حالت قبل می‌باشد. شکل ۴ ب هندسه المان‌های مورب را برای حالت بازشوی لوبیایی افقی، نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل، در صورتی که المان مورب مماس بر گردشگی گوشه بازشو در نظر گرفته شود، مقدار پارامتر δ را به صورت زیر می‌توان محاسبه نمود:

$$\delta = \frac{h}{2} - \frac{t_f}{2} - \frac{\gamma h}{2} \cos(\alpha) - \left[\frac{\beta h}{2} - \frac{s}{2} - \frac{\gamma h}{2} + \frac{\gamma h}{2} \sin(\alpha) \right] \tan(\alpha) \quad (3)$$

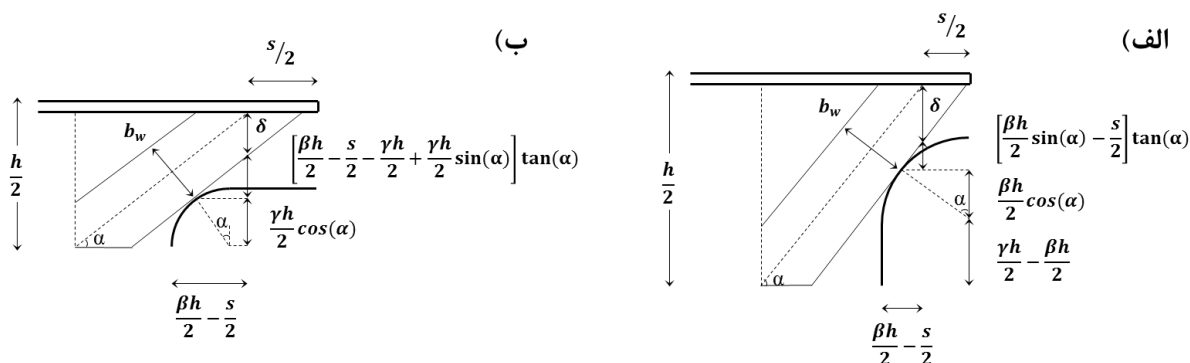
بنابراین عرض المان مورب در این حالت برابر با مقدار زیر خواهد بود:

$$b_w = 2\delta \cos(\alpha) = [h - t_f] \cos(\alpha) - \gamma h \cos^2(\alpha) - [\beta h - s - \gamma h] \sin(\alpha) - \gamma h \sin^2(\alpha) \\ = [h - t_f] \cos(\alpha) - [\beta h - s - \gamma h] \sin(\alpha) - \gamma h \quad (4)$$

با تجمیع دو رابطه به دست آمده برای سوراخ‌های لوبیایی قائم و افقی، رابطه کلی برای هر دو نوع بازشو را می‌توان به صورت کلی زیر نوشت:

$$b_w = \left\{ \left[1 - \frac{t_f}{h} - \gamma \right] \cdot \cos(\alpha) - \beta \cdot \sin(\alpha) + [\sin(\alpha) + \cos(\alpha) - 1] \cdot \min(\beta, \gamma) + \frac{s}{h} \sin(\alpha) \right\} h \quad (5)$$

رابطه فوق بر حسب اینکه کدامیک از پارامترهای β یا γ کمتر باشد، به ترتیب تبدیل به عرض المان مورب در حالت بازشوی لوبیایی قائم یا افقی خواهد شد. چنانچه ملاحظه می‌شود، عرض المان مورب تابعی از زاویه قرارگیری آن (α) و فاصله بین خطوط مرکزی دو المان مورب در طرفین بازشو (s) می‌باشد. در مراحل بعد، از رابطه بدست آمده برای عرض المان مورب در محاسبه ظرفیت باربری مقطع با جان کاهش یافته استفاده خواهد شد.

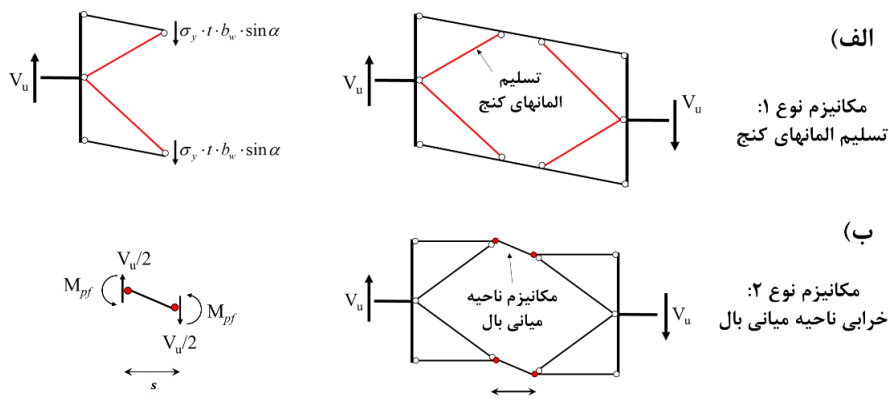


شکل ۴: جانمایی المان مورب مماس بر گردشگی گوشه بازشو؛ (الف) سوراخ لوبیایی قائم؛ (ب) سوراخ لوبیایی افقی

۲-۲- تعیین طول فاصله میانی (s)

مکانیزم خرابی شناسایی شده برای مدل پیشنهادی، تسلیم کششی و فشاری المان‌های کنج (المان‌های خرابی مورب) مطابق شکل ۵ می‌باشد. این در حالیست که برای مقادیر بزرگ فاصله میانی (s)، امکان تشکیل مکانیزم در ناحیه میانی بال وجود خواهد داشت (شکل ۵). مطابق شکل، در این حالت دو بال در دو انتهای ناحیه میانی به صورت مفصل پلاستیک در آمده و از آنجا که نصف برش در هر کدام از نیمه‌ها موثر می‌باشد، لذا رابطه زیر بین نیروهای موثر برقرار خواهد بود:

$$s = \frac{4(\eta \cdot M_{pf})}{V_{t,u}} \quad (6)$$



شکل ۵: مکانیزم‌های محتمل برای مدل پیشنهادی؛ (الف) مکانیزم تسلیم المانهای کنج؛ (ب) مکانیزم بال در ناحیه میانی برای مقادیر بزرگ s

که در آن، M_{pf} لنگر پلاستیک بال تیر می‌باشد. اساس رابطه فوق بر این فرض استوار است که دو انتهای ناحیه میانی (s) تحت خمش ناشی از برش موجود در وسط بازشو به حالت پلاستیک در آید. مطابق رابطه، لنگر بوجود آمده در دو انتهای ناحیه میانی (s) با استفاده از اساس مقطع پلاستیک بال تیر محاسبه می‌گردد. این در حالی است که ناحیه میانی به صورت یک تیر ماهیچه‌ای بوده و اساس مقطع آن در دو انتها تقریباً ۲/۰ الی ۲/۵ برابر اساس مقطع بال تیر می‌باشد [۲۲]. به همین دلیل، در این رابطه ضریبی به صورت $\eta=۲/۲۵$ برای لحاظ کردن مقداری از جان که همراه با بال تسلیم می‌شود، در نظر گرفته شده است. رابطه ارائه شده، طولی از ناحیه میانی را بدست می‌دهد که به ازای مقادیر کمتر از آن خرابی از نوع اول (تسلیم المان‌های کنج) و به ازای مقادیر بزرگتر از آن خرابی از نوع دوم (مکانیزم ناحیه میانی بال) خواهد بود. با توجه به اینکه مکانیزم خرابی ناحیه با جان کاهش یافته باید از نوع تسلیم المان‌های مورب بوده و در عین حال s بیشترین مقدار را داشته باشد (تا ظرفیت مقطع حداکثر شود)، لذا در عمل مقدار s برابر با مقدار حاصل از رابطه فوق در نظر گرفته خواهد شد.

۳-۲- محاسبه برش تحمل شده توسط هر جزء خرابی

با محاسبه عرض المان مورب، می‌توان ظرفیت باربری مربوط به نیمه سمت راست یا چپ مقطع با جان کاهش یافته را از جمع مولفه‌های قائم مربوط به مکانیزم خرابی مثلثی بالا و پایین بازشو (ر.ک. شکل ۵) مطابق رابطه زیر محاسبه نمود:

$$V_{t,u} = 2\sigma_y \cdot t_w \cdot b_w \cdot \sin \alpha \quad (۷)$$

با جایگذاری مقدار b_w از رابطه (۵) خواهیم داشت:

$$V_{t,u} = 2\sigma_y \cdot t_w \cdot h \cdot \left\{ \begin{array}{l} \left[1 - \frac{t_f}{h} - \gamma \right] \cdot \cos(\alpha) - \beta \cdot \sin(\alpha) \\ + [\sin(\alpha) + \cos(\alpha) - 1] \cdot \min(\beta, \gamma) + \frac{s}{h} \sin(\alpha) \end{array} \right\} \cdot \sin(\alpha) \quad (۸)$$

با توجه به اینکه مطابق رابطه (۶)، s برابر با $4\eta M_{pf}/V_{t,u}$ می‌باشد، لذا می‌توان نوشت:

$$V_{t,u} = 2\sigma_y \cdot t_w \cdot h \cdot \left\{ \begin{array}{l} \left[1 - \frac{t_f}{h} - \gamma \right] \cdot \cos(\alpha) - \beta \cdot \sin(\alpha) \\ + [\sin(\alpha) + \cos(\alpha) - 1] \cdot \min(\beta, \gamma) + \eta \cdot \frac{4M_{pf}}{V_{t,u}h} \sin(\alpha) \end{array} \right\} \cdot \sin(\alpha) \quad (۹)$$

بدین ترتیب خواهیم داشت:

$$\frac{V_{t,u}^2}{\sigma_y \cdot t_w \cdot h} - 2 \cdot \left\{ \begin{array}{l} \left[1 - \frac{t_f}{h} - \gamma \right] \cdot \cos(\alpha) - \beta \cdot \sin(\alpha) \\ + [\sin(\alpha) + \cos(\alpha) - 1] \cdot \min(\beta, \gamma) \end{array} \right\} \cdot V_{t,u} \cdot \sin(\alpha) - \eta \cdot \frac{8 \cdot M_{pf}}{h} \cdot \sin^2(\alpha) = 0 \quad (۱۰)$$

رابطه فوق یک معادله درجه دو نسبت به $V_{t,u}$ می‌باشد. با تعریف پارامترهای زیر:

$$f(\alpha) = \left\{ \begin{array}{l} \left[1 - \frac{t_f}{h} - \gamma \right] \cdot \cos(\alpha) - \beta \cdot \sin(\alpha) \\ + [\sin(\alpha) + \cos(\alpha) - 1] \cdot \min(\beta, \gamma) \end{array} \right\} \quad (۱۱)$$

$$\varepsilon = \eta \cdot \frac{8 \cdot M_{pf}}{\sigma_y \cdot t_w \cdot h^2} \quad (۱۲)$$

معادله درجه دو فوق را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\frac{V_{t,u}^2}{\sigma_y t_w h} - [2f(\alpha) \sin(\alpha)] V_{t,u} - \sigma_y t_w h \varepsilon \sin^2(\alpha) = 0 \quad (13)$$

با حل این معادله می توان مقدار برش در مقطع با جان کاهش یافته را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$V_{t,u} = \frac{2f(\alpha) \sin(\alpha) \pm \sqrt{4f^2(\alpha) \sin^2(\alpha) + 4\varepsilon \sin^2(\alpha)}}{2/\sigma_y t_w h} \quad (14)$$

از آنجاکه برش تحمل شده توسط مقطع با جان کاهش یافته باید بیشینه باشد، لذا در رابطه فوق فقط علامت مثبت قابل قبول خواهد بود. با ساده سازی این رابطه فوق خواهیم داشت:

$$V_{t,u} = \sigma_y t_w h \left\{ f(\alpha) + \sqrt{f^2(\alpha) + \varepsilon} \right\} \sin(\alpha) \quad (15)$$

عبارت فوق، برش تحمل شده توسط مدل پیشنهادی را به ازای یک مقدار دلخواه از زاویه α بدست می دهد.

۴-۲- محاسبه زاویه قرارگیری المان های مورب

در بخش قبل، ظرفیت برشی مقطع با جان کاهش یافته بر حسب زاویه قرارگیری المان های مورب در اطراف باز شو تعیین گردید. لیکن باید توجه نمود که مقدار زاویه α نمی تواند هر مقدار دلخواه داشته باشد. مقدار حقیقی زاویه α را می توان از بیشینه سازی ظرفیت نهایی مقطع کاهش یافته تعیین نمود. بدین منظور، مشتق رابطه (۱۵) را مطابق زیر برابر با صفر قرار می دهیم:

$$\frac{\partial V_{t,u}}{\partial \alpha} = \sigma_y t_w h \left\{ \left[\frac{\partial f(\alpha)}{\partial \alpha} + \frac{\frac{\partial f(\alpha)}{\partial \alpha} \cdot f(\alpha)}{\sqrt{f^2(\alpha) + \varepsilon}} \right] \sin(\alpha) + \left[f(\alpha) + \sqrt{f^2(\alpha) + \varepsilon} \right] \cos(\alpha) \right\} = 0 \quad (16)$$

رابطه فوق را در $\sqrt{f^2(\alpha) + \varepsilon} \cdot \sec(\alpha)$ ضرب می کنیم:

$$\frac{\partial f(\alpha)}{\partial \alpha} \sqrt{f^2(\alpha) + \varepsilon} \tan(\alpha) + \frac{\partial f(\alpha)}{\partial \alpha} \cdot f(\alpha) \tan(\alpha) + f(\alpha) \sqrt{f^2(\alpha) + \varepsilon} + f^2(\alpha) + \varepsilon = 0 \quad (17)$$

با مرتب نمودن رابطه فوق خواهیم داشت:

$$\left\{ f(\alpha) + \frac{\partial f(\alpha)}{\partial \alpha} \tan(\alpha) \right\} \sqrt{f^2(\alpha) + \varepsilon} + \left\{ f(\alpha) + \frac{\partial f(\alpha)}{\partial \alpha} \tan(\alpha) \right\} \cdot f(\alpha) + \varepsilon = 0 \quad (18)$$

که با فاکتورگیری از آن، می توان نوشت:

$$\left\{ f(\alpha) + \frac{\partial f(\alpha)}{\partial \alpha} \tan(\alpha) \right\} \cdot \left\{ f(\alpha) + \sqrt{f^2(\alpha) + \varepsilon} \right\} + \varepsilon = 0 \quad (19)$$

از رابطه فوق می توان مشتق f نسبت به پارامتر α را به صورت زیر تعیین نمود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(\alpha)}{\partial \alpha} &= \left[\frac{\varepsilon}{f(\alpha) + \sqrt{f^2(\alpha) + \varepsilon}} - f(\alpha) \right] \cot(\alpha) \\ &= \left[\frac{\varepsilon - f^2(\alpha) - f(\alpha) \sqrt{f^2(\alpha) + \varepsilon}}{f(\alpha) + \sqrt{f^2(\alpha) + \varepsilon}} \right] \cot(\alpha) \\ &= \left[\frac{\sqrt{f^2(\alpha) + \varepsilon}^2 + f(\alpha) \sqrt{f^2(\alpha) + \varepsilon}}{f(\alpha) + \sqrt{f^2(\alpha) + \varepsilon}} \right] \cot(\alpha) = -\sqrt{f^2(\alpha) + \varepsilon} \cot(\alpha) \end{aligned} \quad (20)$$

در نهایت مقدار پارامتر α را می‌توان از حل معادله زیر بدست آورد:

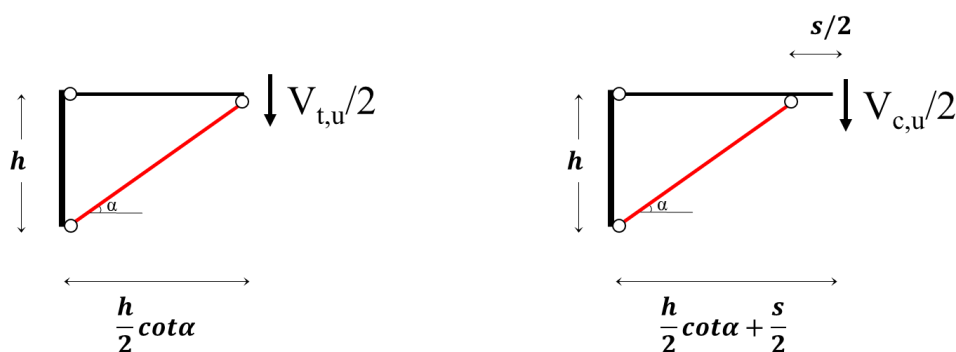
$$\frac{\partial f(\alpha)}{\partial \alpha} \cdot \tan(\alpha) + \sqrt{f^2(\alpha) + \varepsilon} = 0 \quad (21)$$

با تعیین مقدار α از رابطه فوق، مقدار ظرفیت برشی، $V_{t,u}$ ، از رابطه (۱۵) و در صورت نیاز مقدار فاصله المان‌های مورب، s ، از رابطه (۶) تعیین می‌گردد.

۲-۵- تعیین ظرفیت برشی مقطع با جان کاهش یافته

رابطه (۱۵) مورد استفاده در محاسبه $V_{t,u}$ ، در واقع پیش‌بینی کننده ظرفیت هر جزء خرپایی نشان داده شده در شکل ۵ بوده و با ظرفیت مقطع با جان کاهش یافته در مرکز بازشو اندکی متفاوت می‌باشد. با توجه به شکل ۶، مقدار ظرفیت برشی مقطع با جان کاهش یافته در مرکز بازشو به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$V_{c,u} = \left(\frac{1}{1 + \frac{s}{h} \cdot \tan \alpha} \right) \cdot V_{t,u} \quad (22)$$

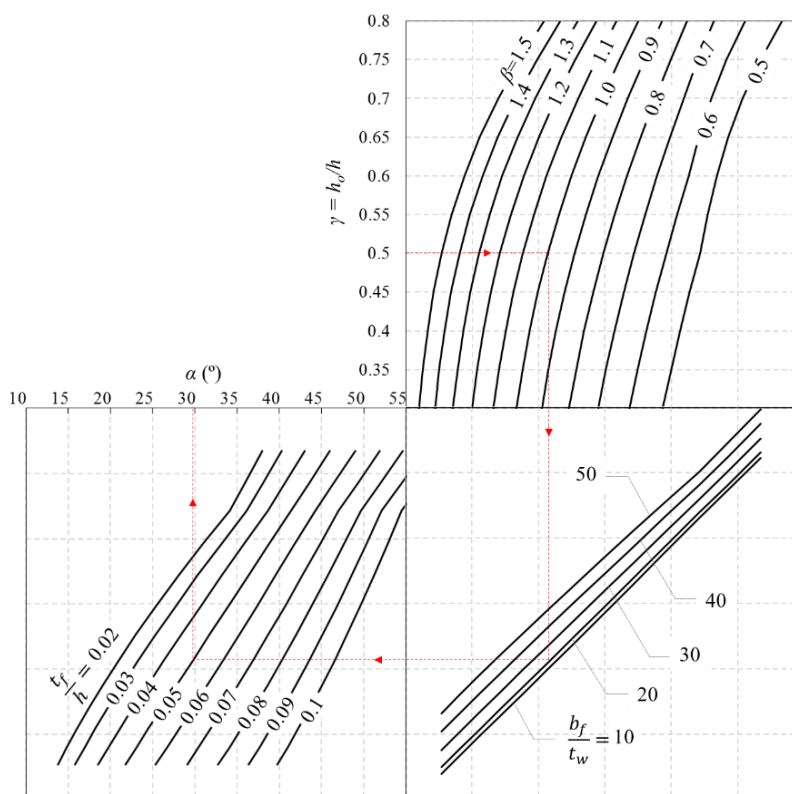


شکل ۶: ظرفیت جزء خرپایی کنج و ارتباط آن با ظرفیت مقطع در وسط بازشو

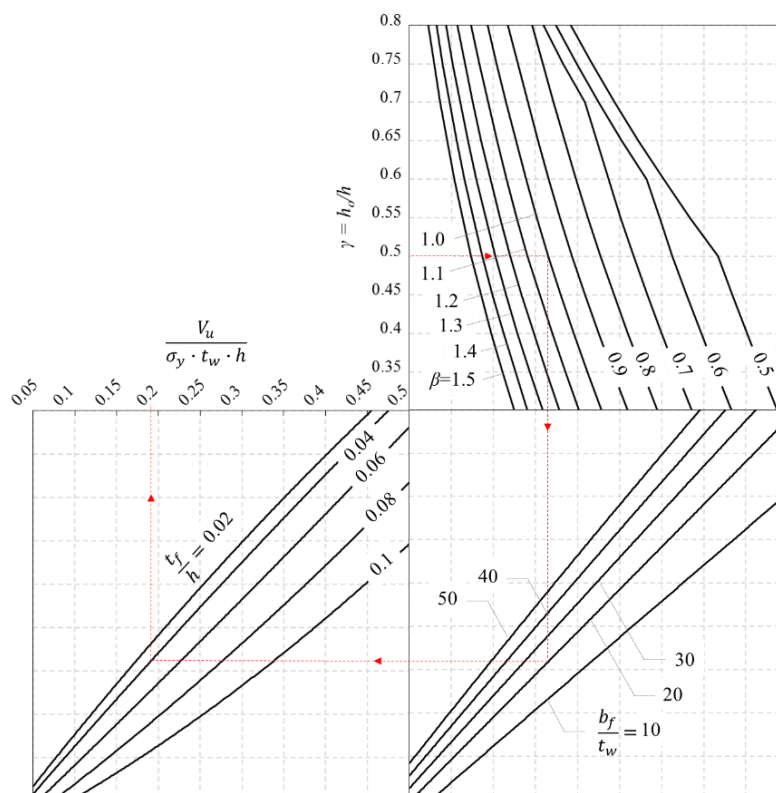
۲-۶- نمودارهای تعیین ظرفیت مقطع

با تعیین متغیرهای مستقل در رابطه (۲۱) می‌توان مقدار زاویه α را نسبت به این متغیرها محاسبه و ترسیم نمود. متغیرهای بی بعد انتخاب شده در این رابطه به ترتیب عبارتند از: β ، γ ، t_w/h و b_w/h با استفاده از این متغیرها، مقدار زاویه α از رابطه (۲۱) بدست آمده و در مجموعه نمودار شکل ۷ ترسیم شده است.

مسیر خط چین قرمز بر روی شکل، نحوه استفاده از این نمودار را نمایش می‌دهد. با توجه به این مسیرواره، برای تعیین مقدار α ابتدا مقدار پارامتر γ را از محور قائم نمودار انتخاب می‌نماییم. در ادامه یک خط افقی از مقدار انتخاب شده برای γ امتداد یافته و با منحنی مربوط به β دلخواه در نمودار نخست قطع داده می‌شود. در مرحله بعد یک خط قائم از نقطه قطع امتداد یافته و با منحنی مربوط به b_w/h دلخواه در نمودار دوم (پایین سمت راست) قطع داده می‌شود. همین روال برای مقدار t_w/h دلخواه در نمودار سوم (پایین سمت چپ) نیز انجام می‌شود. در خاتمه با امتداد نقطه قطع منحنی مربوط به t_w/h مقدار زاویه α از محور افقی نمودار سوم قابل قرائت خواهد بود. لازم به ذکر است که بدلیل روند عددی بکار رفته در ترسیم این نمودار، مقادیر قرائت شده از روی آن دارای خطایی کمتر از ۰.۵٪ نسبت به روابط تحلیلی می‌باشند. چنانچه گفته شد، با تعیین مقدار α ، ظرفیت نهایی مقطع با جان کاهش یافته، $V_{t,u}$ ، از رابطه (۲۲) قابل محاسبه می‌باشد. لیکن برای سادگی کار، محاسبات مربوطه در نرم‌افزار Matlab انجام گرفته و نتایج به طور مشابه در مجموعه نمودار شکل ۸ ترسیم شده است.

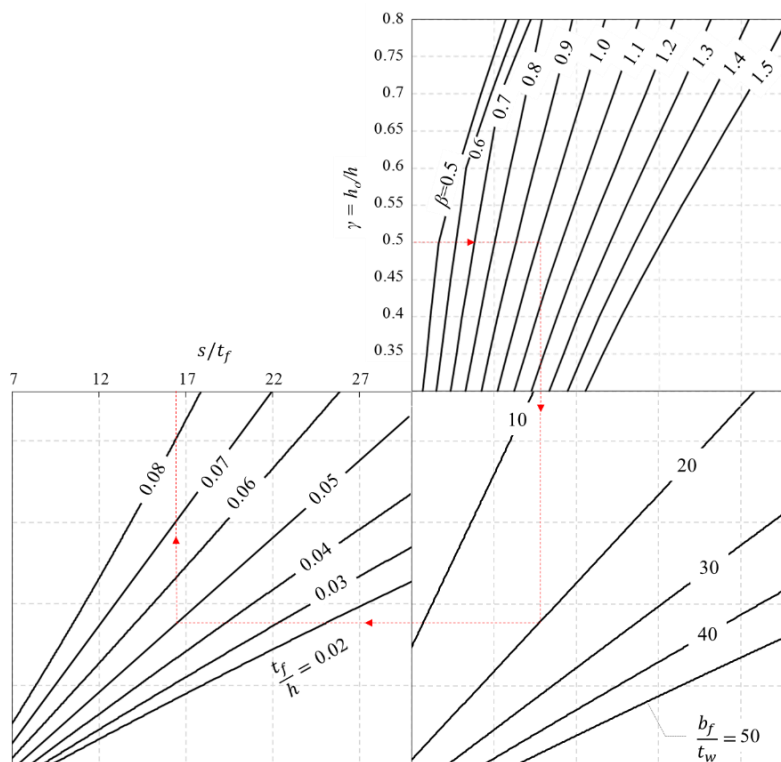


شکل ۷: نمودار مورد استفاده در تعیین زاویه α



شکل ۸: نمودار مورد استفاده برای تعیین ظرفیت باربری مقطع دارای سوراخ جان

به طور مشابه، مقدار فاصله المان‌های مورب، s ، از رابطه (۶) تعیین و در مجموعه نمودارهای شکل ۹ ترسیم شده است. نمودارهای ارائه شده در شکل ۸ به منظور طراحی و نمودارهای ارائه شده در شکل ۷ و شکل ۹ برای تعیین هندسه مدل خرابایی ناحیه با جان کاهش یافته قابل استفاده می‌باشند.

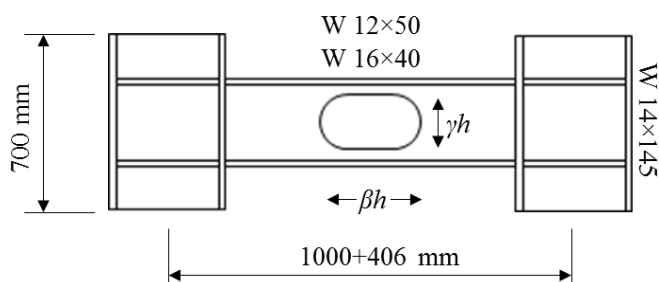


شکل ۹: نمودار مورد استفاده در تعیین فاصله میانی اعضای مورب، s

۳- بررسی المان محدود روابط تحلیلی

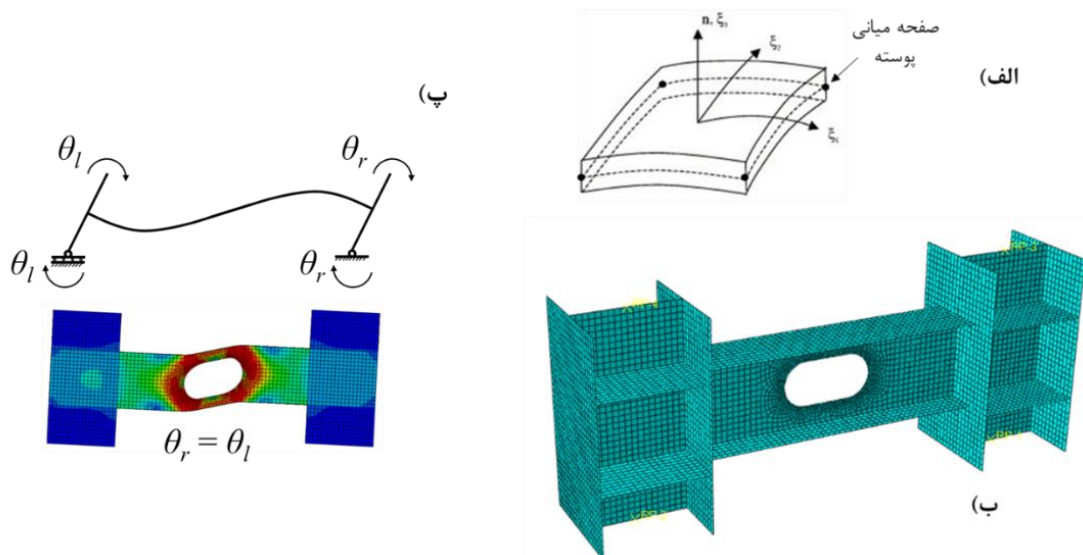
۳-۱- جزئیات مدلسازی عددی

مدل‌های بررسی شده در این تحقیق به صورت تیر فولادی دارای بازشو در جان می‌باشند. پیکربندی این مدل به صورت تیر متصل شده به دو ستون در انتهای خود فرض شده است. طول تیر مورد بررسی ۱۰۰۰ میلی‌متر و فاصله مرکز به مرکز ستون‌ها ۴۰۶+۱۰۰۰ میلی‌متر است. برای تیر مدل شده در تحلیل المان محدود از دو مقطع $W12 \times 50$ و $W16 \times 40$ استفاده است. این در حالی است که برای تمامی نمونه‌ها طول ستون ۷۰۰ میلی‌متر، و مقطع آن $W14 \times 145$ بوده است. نمونه‌ای از این اتصال را می‌توان در شکل ۱۰ مشاهده کرد.



شکل ۱۰: ابعاد هندسی و مقاطع تیر و ستون برای مدل‌های عددی مورد مطالعه

برای مدل سازی و تحلیل نمونه های یاد شده از نرم افزار المان محدود آباکوس^۹ نسخه ۲۰۱۷ استفاده شده است. در مدل سازی این نمونه، از المان پوسته ای چهار گرهی با قابلیت انحنای دو جهته و انتیگرال گیری کاهش یافته (S4R) استفاده شده است. المان پوسته ای استفاده شده در فرمول بندی تحلیل المان محدود را می توان در شکل ۱۱ الف مشاهده نمود. برای نمونه های مورد بررسی، ابعاد مش بندی کلی در تیر و ستون ۲۰ میلی متر و ابعاد مش بندی در اطراف باز شو ۵ میلی متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۱: مدل سازی المان محدود؛ الف) المان پوسته ۴ گرهی؛ ب) مدل مش بندی شده در نرم افزار آباکوس؛ پ) نحوه اعمال دوران به نمونه های المان محدود

مصالح مورد استفاده در تحلیل ها بر اساس رفتار ترکیبی ایزوتروپیک-کینماتیک مدل سازی شده است. مدول الاستیسیته مصالح فولادی برابر با ۲۰۶ GPa و ضریب پواسون آن برابر ۰/۳ لحاظ شده است. با توجه به اینکه رفتار در لحظه جاری شدگی کامل (مکانیزم) برای نمونه ها مد نظر بوده و در نظر گرفتن سخت شونده گی برای مصالح فولادی باعث سخت تر شدن تشخیص نقطه جاری شدگی در نمودار نیرو-جابجایی می گردد، رفتار مصالح به صورت الاستوپلاستیک با تنش تسلیم برابر با ۳۴۵ MPa در نظر گرفته شده است. بارگذاری نمونه ها از جنس دوران و به صورت افزایشی یک جهته (مونوتونیک) در بالا و پایین ستون ها انجام شده است (شکل ۱۱ پ).

۳-۲- صحت سنجی مدل سازی عددی

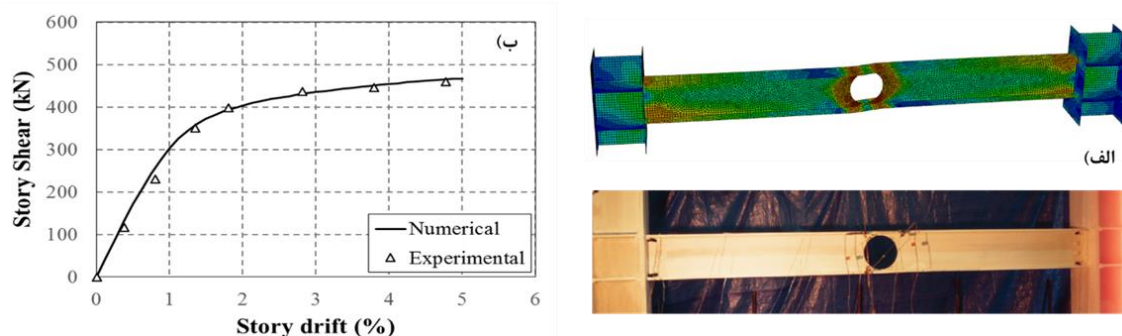
برای صحت سنجی نتایج حاصل از تحلیل های المان محدود از داده های آزمایشگاهی موجود بر روی دو نمونه تیر با بازشوی جان استفاده شده است. اولین راستی آزمایی مدل های عددی، با توجه به نمونه های آزمایشگاهی تست شده توسط شین و همکارانش^{۱۰} [۱۹]، [۲۰]، انتخاب شده است. این نمونه ها به صورت یک قاب فولادی شامل تیر با مقطع W12×50 و دو ستون با مقطع W14×176 و فاصله مرکز به مرکز ۴۴۹۵/۸ میلی متر بوده اند. قسمت تحتانی ستون ها دارای اتصال مفصلی به کف قوی و قسمت فوقانی آنها دارای اتصال مفصلی به جک بارگذاری بوده است. تاریخچه بارگذاری از نوع جابجایی و به صورت شبه استاتیکی^{۱۱} به بالای قاب اعمال شده است. پیکربندی نمونه های آزمایشگاهی در شکل ۱۲ الف قابل مشاهده می باشد. نمونه انتخاب شده برای صحت سنجی، دارای یک بازشوی دایره ای به قطر ۲۵۶ میلی متر در وسط دهانه بوده است. لازم به ذکر است که مدول الاستیسیته و تنش تسلیم برای مصالح بال تیر برابر با ۳۶۸ MPa و ۱۹۸ GPa و مقادیر مربوطه برای جان تیر برابر با ۳۸۶ MPa و ۲۲۵ GPa بوده است. مقایسه نمودار نیرو-جابجایی نمونه ها در شکل ۱۲ ب ارائه شده است. چنانچه ملاحظه می شود، سختی اولیه، مقاومت تسلیم و شیب ثانویه نمودار پس از نقطه تسلیم مطابقت مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

^۹ ABAQUS

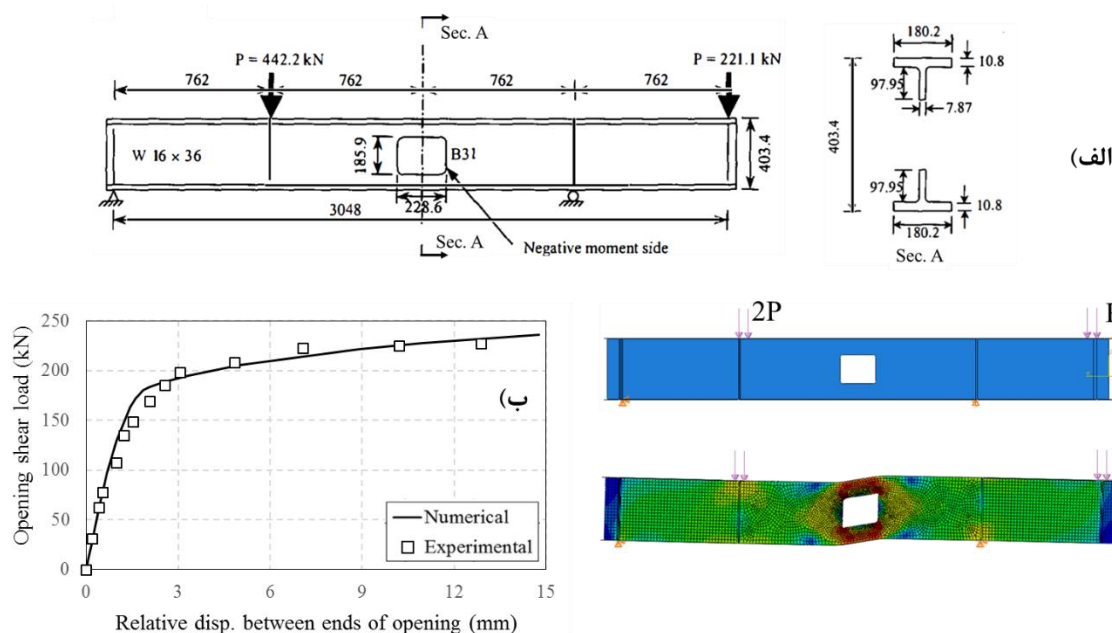
^{۱۰} Shin et al.

^{۱۱} Quasi-static

نمونه بعدی مورد استفاده در راستی‌آزمایی تحلیلی‌های عددی، تیر با جان کاهش یافته تست شده توسط باور^{۱۲} می‌باشد که نمای شماتیک آن در شکل ۱۳ الف ارائه شده است. تیر مذکور با مقطع $W16 \times 36$ دارای یک بازشو به طول و ارتفاع 228.6 و 185.9 میلی‌متر در وسط طول خود می‌باشد. مطابق شکل، تیر در ابتدا و سه-چهارم طول خود دارای تکیه‌گاه بوده و بارگذاری با شدت $2P$ و P به ترتیب در یک-چهارم و انتهای تیر صورت گرفته است. تنش تسلیم برای مصالح بال تیر برابر با 232 MPa و برای جان تیر برابر با 260 MPa بوده است. لازم به ذکر است که مدول الاستیسیته برای هر دو ناحیه برابر با 200 GPa در نظر گرفته شده است. مقایسه نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها در شکل ۱۳ ب ارائه شده است. همانند نمونه قبل، سختی اولیه، مقاومت تسلیم و شیب ثانویه نمودار پس از نقطه تسلیم مطابقت مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.



شکل ۱۲: صحت سنجی مدل‌های عددی با مطالعات شین و همکاران [۱۹، ۲۰]؛ الف) پیکربندی مدل‌های عددی و آزمایشگاهی؛ ب) مقایسه نمودار نیرو-جابجایی



شکل ۱۳: صحت سنجی مدل‌های عددی با مطالعات باور [۳]؛ الف) پیکربندی مدل‌های عددی و آزمایشگاهی؛ ب) مقایسه نمودار نیرو-جابجایی

مقایسه بین ظرفیت برشی مقطع با جان کاهش یافته برای نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل پیشنهادی در جدول ۱ ارائه شده است. برای مدل نخست، برش تسلیم طبقه مطابق آزمایش شین و همکاران [۱۹، ۲۰] برابر با 350 kN بوده است که طبق همین مرجع با تقسیم آن به $1/43$ می‌توان برش تیر را برابر با 245 kN محاسبه نمود. برای مدل دوم که بازشوی آن به صورت مستطیلی می‌باشد، طول و ارتفاع

¹² Bower

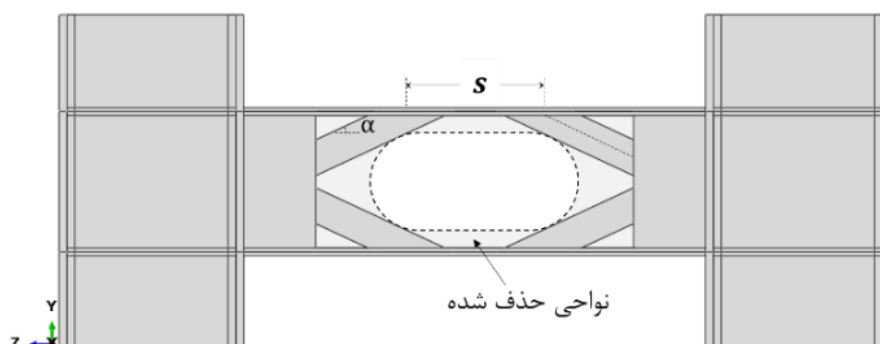
بازشوی لوبیایی معادل مطابق توصیه‌های آیین‌نامه [13] ASCE 23-97 به ترتیب برابر با $330/8$ و $206/5$ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به مقایسه صورت گرفته برای این دو مدل ملاحظه می‌شود که دقت پیش‌بینی‌های روش پیشنهادی در حد مطلوبی بوده است.

جدول ۱: مقایسه ظرفیت برشی مقطع برای نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل پیشنهادی

ردیف	مقطع تیر	طول*ارتفاع بازشو (mm)	تنش تسلیم جان (kg/cm^2)	b_w (mm)	α ($^\circ$)	s (mm)	ظرفیت برشی (kN)		خطا
							آزمایشگاهی	تخمینی	
۱	W12×50	256×256	386	46	41	152	245	220	٪۱۰
۲	W16×36	185/9×228/6	260	118	26	54	200	197	٪۱،۵

۳-۳- بررسی صحت روابط هندسی المان مورب

تمامی مصالح جان تیر در اطراف بازشو، در عملکرد ناحیه با جان کاهش یافته تیر مشارکت یکسانی نداشته و نواحی با سطح تنش پایین قابل حذف می‌باشند. همانگونه که بیان گردید، مصالح باقی‌مانده در اطراف بازشو به صورت المان‌های کششی و فشاری در چهار کنج بازشو خواهند بود. در این بخش، برای صحت‌سنجی روابط ارائه شده در بخش قبل، مدل المان محدودی مشابه شکل ۱۴ از طریق کدنویسی در نرم‌افزار آباکوس توسعه یافته و دو متغیر با اسامی s و α (مطابق شکل) بعنوان پارامترهای بهینه‌یابی در این مدل تعریف شده‌اند. پارامتر s تعیین کننده فاصله مرکز به مرکز المان‌های مورب و پارامتر α معرف زاویه این المان‌ها با افق می‌باشند.

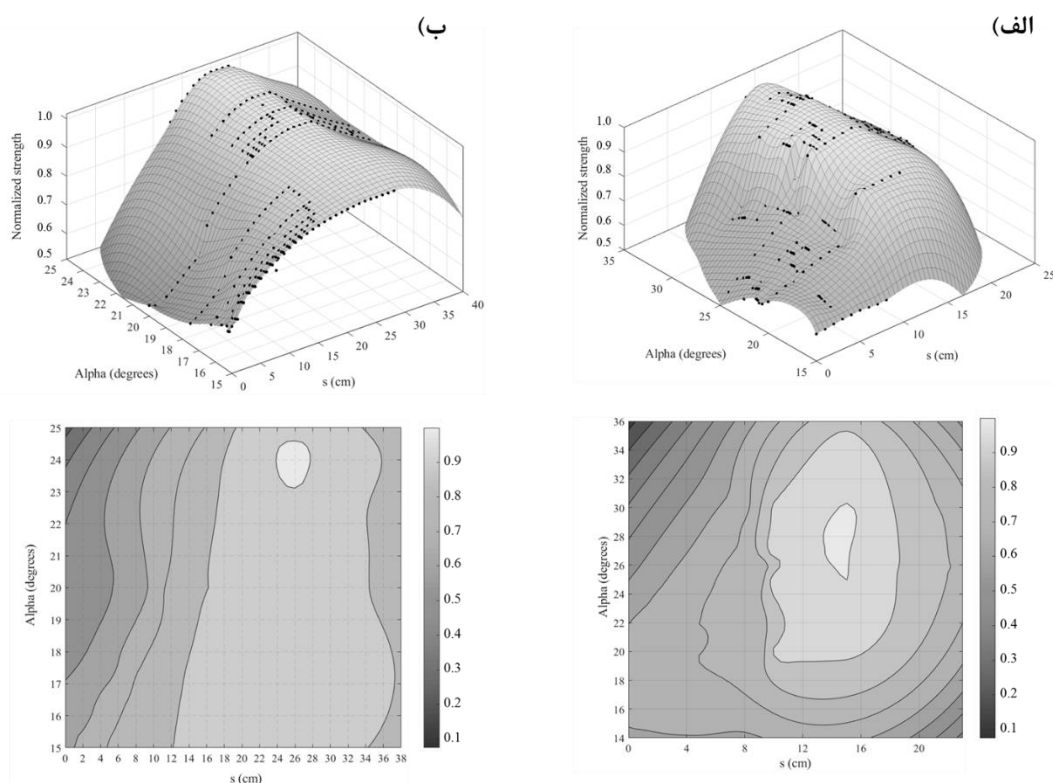


شکل ۱۴: پارامترهای بهینه‌یابی تعریف شده برای مدل المان محدود

با توجه به گستردگی حجم محاسباتی مورد نیاز برای بهینه‌سازی پارامترهای s و α ، این تحلیل تنها برای دو نمونه اتصال دارای تیر با مقطع W12×50 و ابعاد بازشوی متفاوت انجام گرفته است. در نمونه نخست ارتفاع بازشو $0.5h$ و طول بازشو برابر با $1.0h$ می‌باشد. این در حالی است که برای نمونه دوم ارتفاع و طول بازشو به ترتیب $0.6h$ و $1.5h$ بوده است. برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل نخست، نمونه اتصال مورد بررسی 202 بار و برای بهینه‌سازی مدل دوم 297 بار با مقادیر مختلف s و α تحلیل شده‌اند.

شکل ۱۵ الف نتایج حاصل از بهینه‌سازی پارامترهای s و α برای نمونه نخست ($\beta=1.0$ و $\gamma=0.5$) را به صورت سه بعدی و کانتور نمایش می‌دهد. چنانچه ملاحظه می‌گردد، در این مدل به ازای $s=14\text{cm}$ و $\alpha=28^\circ$ مقاومت نهایی مدل با المان‌های مورب نزدیک‌ترین مقدار را به مقاومت نهایی نمونه اصلی خواهد داشت. این مقادیر با استفاده از روابط ارائه شده در بخش قبل برابر با $s=14/6\text{cm}$ و $\alpha=30^\circ$ بدست می‌آید که مطابقت خوبی با نتایج تحلیل‌های المان محدود دارد.

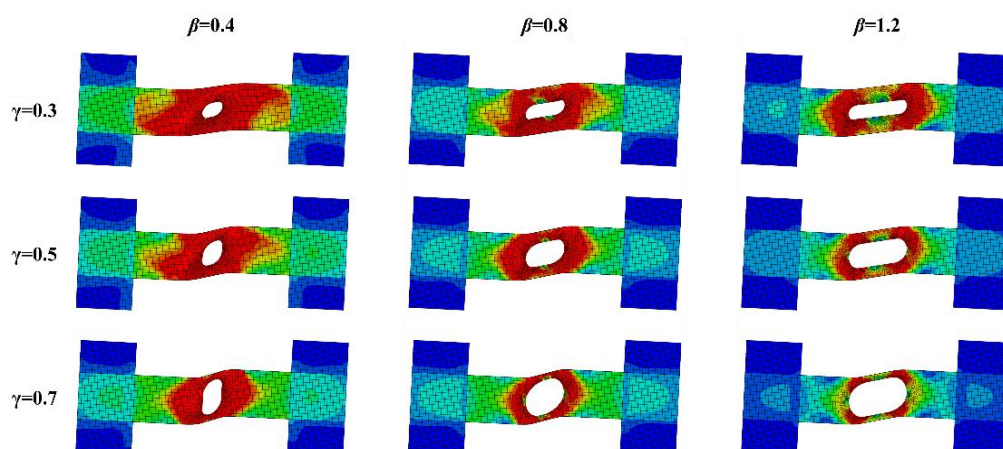
نتایج حاصل از بهینه‌سازی پارامترهای s و α برای نمونه دوم ($\beta=1.5$ و $\gamma=0.6$) در شکل ۱۵ ب ارائه شده است. با توجه به شکل، می‌توان دریافت که مقادیر بهینه برای فاصله s و زاویه α به ترتیب برابر با 26cm و 24° می‌باشند. این در حالی است که مقادیر متناظر برای این پارامترها از روابط ارائه شده در بخش قبل به ترتیب برابر با $27/7\text{cm}$ و $24/4^\circ$ به دست می‌آیند که همخوانی مناسبی با مقادیر عددی حاصل از بهینه‌سازی با نرم افزار المان محدود دارد. بدین ترتیب، با توجه به دو نمونه مقایسه انجام شده بین نتایج المان محدود و روابط تحلیلی ارائه شده برای تخمین هندسه المان مورب می‌توان از صحت پیش‌بینی‌های این روابط اطمینان خاطر حاصل نمود.



شکل ۱۵: نتایج حاصل از بهینه سازی پارامترهای s و α : (الف) نمونه با $\beta=1.0$ و $\gamma=0.5$; (ب) $\beta=1.5$ و $\gamma=0.6$

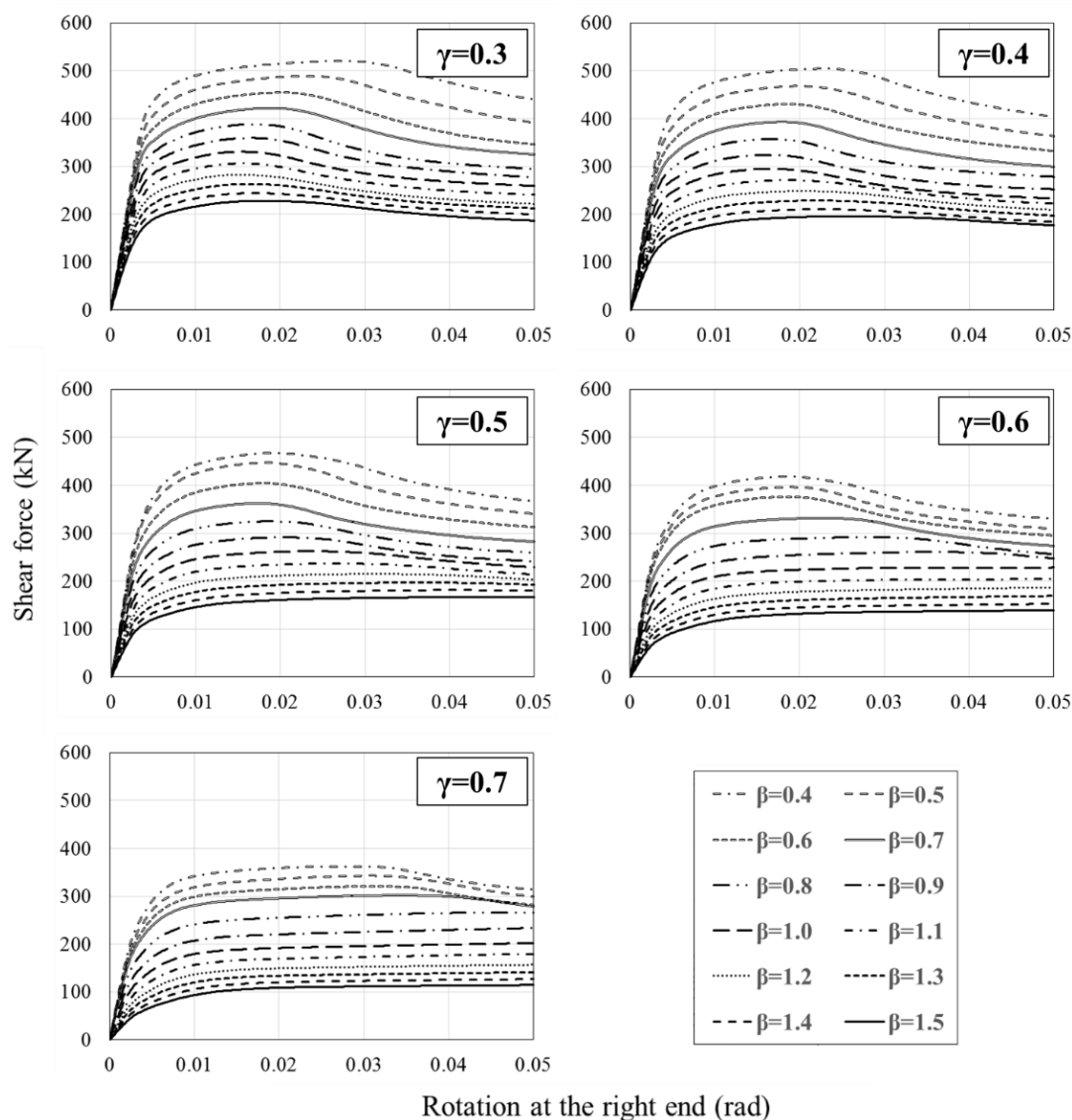
۳-۴- بررسی دقت مدل در تخمین ظرفیت برشی

برای بررسی دقت روابط تخمین ظرفیت ارائه شده در بخش‌های قبل، از دو گروه مدل عددی استفاده شده است که تفاوت آنها در مقطع پروفیل تیر می‌باشد. چنانچه قبلاً نیز توضیح داده شد، در مدل‌های گروه نخست پروفیل تیر $W12 \times 50$ و در مدل‌های گروه دوم مقطع پروفیل تیر از نوع $W16 \times 40$ می‌باشد. در مدل‌های مورد بررسی طول بازشو از 0.4 برابر ارتفاع تیر تا $1/5$ برابر ارتفاع تیر با گام 0.1 متغیر بوده است. این در حالی است که ارتفاع بازشو بین 0.3 تا 0.7 ارتفاع تیر با گام 0.1 تغییر نموده است. تغییر شکل تعدادی از مدل‌های عددی با تیر $W12 \times 50$ و بازشو با ابعاد مختلف در انتهای تحلیل را می‌توان در شکل ۱۶ مشاهده نمود.



شکل ۱۶: تغییر شکل مدل‌های با تیر $W12 \times 50$ و بازشو با ابعاد مختلف در انتهای تحلیل

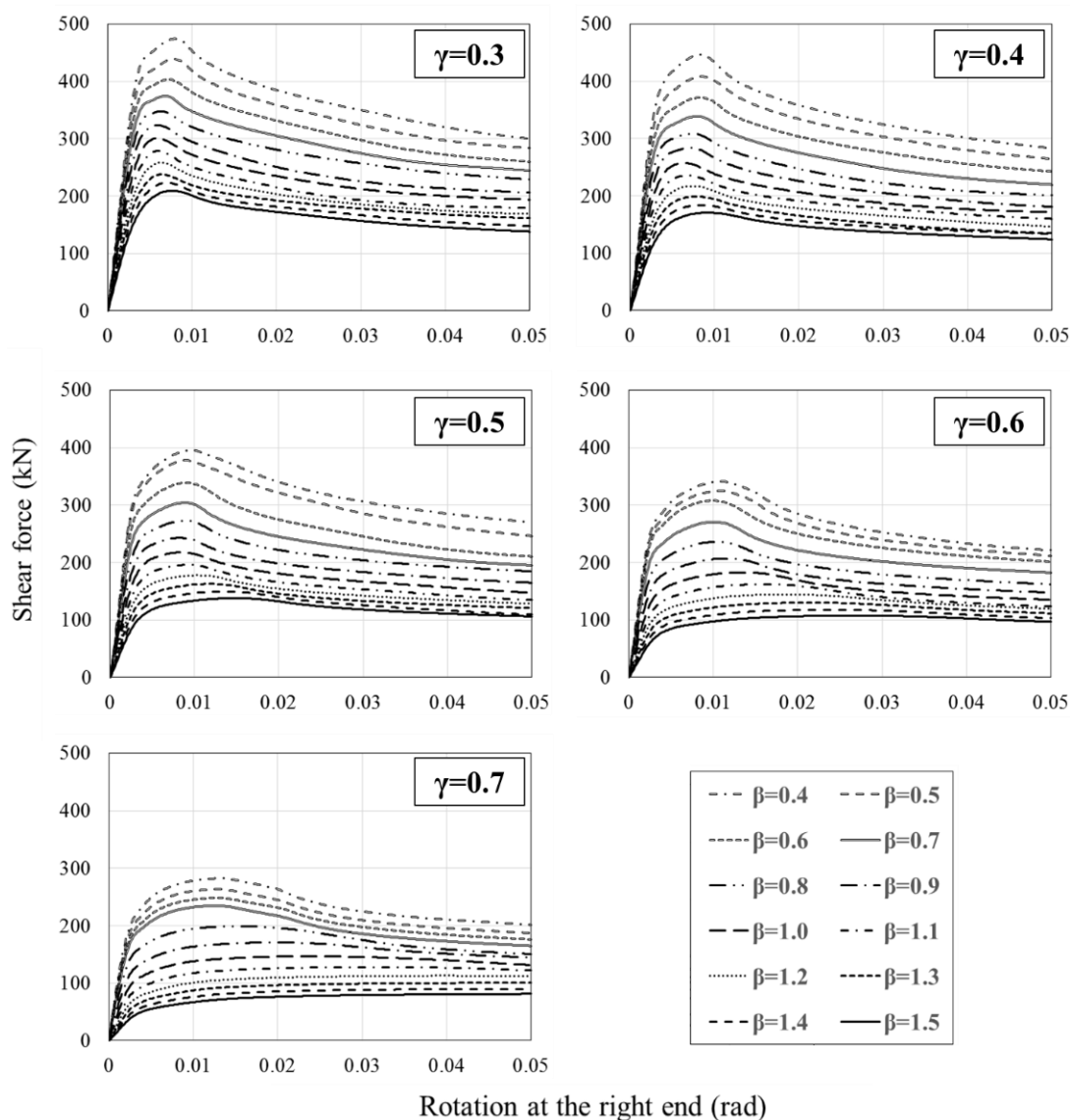
پس از تحلیل، برش تیر که همان نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاه سمت راست یا چپ می‌باشد بدست آمده و بر حسب دوران انتهای تیر ترسیم شده است. نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی بر روی مدل‌های المان محدود گروه نخست با پروفیل تیر W12×50 در قالب منحنی‌های نیرو-جابجایی (دوران) در شکل ۱۷ نشان داده شده است. نتایج مشابه برای مدل‌های گروه دوم (پروفیل تیر W16×40) در شکل ۱۸ قابل ملاحظه می‌باشد. با استفاده از نمودارهای ارائه شده، بیشینه ظرفیت باربری مدل‌های دو گروه محاسبه و به ترتیب در جدول ۲ و جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۱۷: نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های المان محدود با پروفیل تیر W12×50

جدول ۲: مقاومت مدل‌های گروه اول (تیر با پروفیل W12×50) بر حسب kN

$\beta =$	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
$\gamma = 0.3$	525	486	447	411	375	345	318	293	270	250	234	216
$\gamma = 0.4$	503	462	421	382	343	310	283	262	242	223	203	191
$\gamma = 0.5$	456	434	391	349	316	283	257	233	213	196	180	167
$\gamma = 0.6$	405	383	364	328	294	262	237	210	187	168	153	140
$\gamma = 0.7$	366	342	322	305	266	229	201	177	157	141	127	115

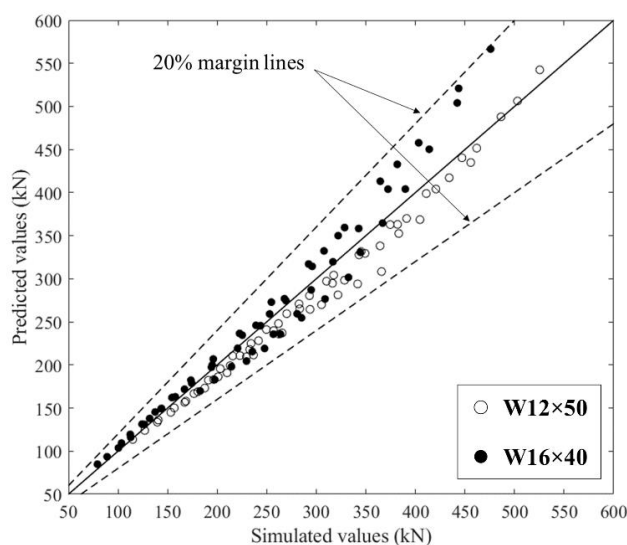


شکل ۱۸: نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های المان محدود با پروفیل تیر W16×40

جدول ۳: مقاومت مدل‌های گروه دوم (تیر با پروفیل W16×40) بر حسب kN

$\beta =$	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
$\gamma = 0.3$	476	442	414	390	367	344	332	309	285	264	248	230
$\gamma = 0.4$	444	403	372	343	317	295	281	257	236	214	198	183
$\gamma = 0.5$	382	365	329	296	268	244	221	194	174	158	144	132
$\gamma = 0.6$	322	308	292	255	223	196	173	154	137	124	112	103
$\gamma = 0.7$	269	253	239	225	195	167	143	127	113	100	89	79

مقایسه بین مقاومت نهایی بدست آمده از روابط تحلیلی ارائه شده در بخش‌های قبل با مقدار واقعی حاصل از تحلیل‌های المان محدود در شکل ۱۹ نشان داده شده است. میانگین قدرمطلق خطا برای هر دو گروه برابر با ۶٪ و انحراف از معیار قدرمطلق خطا برابر با ۳/۷٪ می‌باشد. مقایسه پیش‌بینی‌های حاصل از این روابط با مقادیر حاصل از تحلیل‌های المان محدود نشان می‌دهد که دقت روابط پیشنهاد شده در محدوده مناسب و قابل قبولی می‌باشد.



شکل ۱۹: مقایسه بین مقاومت نهایی بدست آمده از روابط تحلیلی ارائه شده در بخش‌های قبل با مقدار واقعی حاصل از تحلیل‌های المان محدود

۴- نتیجه گیری

در حال حاضر برآورد مقاومت تیرهای با جان کاهش یافته بر اساس روابطی استوار می‌باشد که مبتنی بر اندرکنش خمش و برش در ناحیه مذکور است. با توجه به بررسی‌های اولیه به عمل آمده، مشاهده گردید که عملکرد نواحی اطراف بازشو را می‌توان به صورت رفتار خرابایی قسمتهایی از جان تیر در نظر گرفت. بر همین اساس، در این پژوهش مدل جدیدی بر پایه رفتار خرابایی ناحیه دارای بازشو شرح و توسعه داده شده است. به طور کلی، روند انجام این پژوهش و نتایج بدست آمده به شرح زیر می‌باشد:

- رفتار تیرهای دارای بازشو در جان در محدوده محل ایجاد سوراخ بررسی شده و یک مدل خرابایی با تعدادی پارامتر مجهول برای مدلسازی آن ارائه گردید. پارامترهای مجهول شامل عرض المان مورب خرابایی، زاویه المان مورب خرابایی و فاصله تقارب المان‌های خرابایی در وسط بازشو بودند.
- رابطه ظرفیت مدل خرابایی بر اساس پارامترهای مجهول بدست آمده و با صفر قرار دادن مشتق آن (برای بیشینه سازی ظرفیت مقطع) محدوده بهینه برای پارامترهای مجهول محاسبه گردید.
- به منظور بررسی دقت هندسه پیشنهادی برای مدل خرابایی، دو مدل المان محدود تیر با ابعاد مختلف بازشو در نرم افزار آباکوس تولید و با استفاده از بهینه‌سازی پارامترهای هندسی مجهول، ابعاد و هندسه المان‌های خرابایی مد نظر تعیین و با مقادیر تعیین شده توسط روابط پیشنهادی مقایسه گردید. نتایج این مقایسه صحت پیش‌بینی روابط تحلیلی ارائه شده برای محاسبه مشخصات هندسی مدل خرابایی را تایید نمود.
- دو گروه مدل با دو نوع پروفیل تیر متفاوت و ابعاد مختلف بازشو (هر گروه شامل ۶۰ مدل) به صورت المان محدود شبیه‌سازی شده و ظرفیت برشی مقطع کاهش یافته با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی تعیین گردید. صحت سنجی نتایج این مدل‌ها توسط داده‌های آزمایشگاهی حاصل از دو نمونه تست شده توسط سایر محققین انجام گرفت.
- با استفاده از نتایج تحلیل‌های عددی و با مقایسه آنها با پیش‌بینی‌های مدل خرابایی پیشنهادی یک تحلیل آماری انجام شده و دقت روابط پیشنهادی در برآورد ظرفیت باربری المان‌های سازه‌ای مذکور ارائه گردید. بر همین اساس، میانگین قدر مطلق خطای روش پیشنهادی برابر با ۶٪ و انحراف از معیار قدر مطلق خطا برابر با ۳/۷٪ تعیین گردید.
- مقایسه پیش‌بینی‌های حاصل از روابط پیشنهادی با مقادیر حاصل از تحلیل‌های عددی نشان داد که دقت روابط پیشنهادی در محدوده مناسب و قابل قبولی بوده و لذا می‌توان از آنها برای محاسبه ظرفیت برشی تیرهای با جان کاهش یافته استفاده نمود.

سپاسگزاری

بدینوسیله از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی برای حمایت از پژوهش حاضر سپاسگزاری به عمل می‌آید. همچنین، زحمات هیات داوران و اعضای کمیته علمی انجمن مهندسی سازه ایران در ارتقای کیفیت مقاله و انتشار آن شایسته قدردانی می‌باشد.

مراجع

1. Verweij, J.G., Cellular beam-columns in portal frame structures. 2010, Master thesis, Civil Engineering Department, Delft University of Technology.
2. Redwood, R.G. and J. McCutcheon, Beam tests with unreinforced web openings. Journal of the Structural Division, Proceedings of the ASCE, 1968. Vol. 94.
3. Bower, J.E., Ultimate strength of beams with rectangular holes. Journal of the Structural Division. Proceedings of the ASCE, 1968. Vol. 94.
4. Congdon, J.G. and R.G. Redwood, Plastic behavior of beams with reinforced holes. J. Struct. Div., 1970. 96(ST9): p. 1933-1956.
5. Clawson, W.C. and D. Darwin, Composite beams with web openings. 1980, Univ. of Kansas: Lawrence, KS.
6. Redwood, R.G., H. Baranda, and M.J. Daly, Tests of thin-webbed beams with unreinforced holes. J. Struct. Div., 1978. 104(ST3): p. 577-595.
7. Chung, K.F., C.H. Liu, and A.C.H. Ko, Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: an empirical design method using a generalised moment-shear interaction curve. Journal of Constructional Steel Research, 2003. 59(9): p. 1177-1200.
8. Lawson, R.M., Design for openings in the webs of composite beams, in SCI Publication 068 (SCIP068). 1987, The Steel Construction Institute: Berkshire, U.K.
9. Darwin, D., Steel and Composite Beams with Web Openings. 1990, Steel Design Guide Series 2, American Institute of Steel Construction (AISC).
10. Redwood, R.G. and S.H. Cho, Design of steel and composite beams with web openings. J. Constr. Steel Res., 1993. 25(1-2): p. 23-41.
11. Tsavdaridis, K.D. and C. D'Mello, Vierendeel Bending Study of Perforated Steel Beams with Various Novel Web Opening Shapes through Nonlinear Finite-Element Analyses. Journal of Structural Engineering, 2012. 138(10).
12. Ward, J.K., Design of composite and non-composite cellular beams. 1990, The Steel Construction Institute Publication 100 (SCI P100).
13. SEI/ASCE23, Proposed specification for structural steel beams with web opening, in SEI/ASCE 23-97. 1997: Reston, VA.
14. Akrami, V. and S. Erfani, Review and Assessment of Design Methodologies for Perforated Steel Beams. Journal of Structural Engineering, 2015: p. 04015148.
15. Panedpojaman, P., T. Thepchatri, and S. Limkatanyu, Novel simplified equations for Vierendeel design of beams with (elongated) circular openings. Journal of Constructional Steel Research, 2015. 112: p. 10-21.
16. Panedpojaman, P. and T. Rongram. Design Equations for Vierendeel Bending of Steel Beams with Circular Web Openings. in Proceedings of the World Congress on Engineering 2014 (WCE 2014). 2014. London, U.K.
17. Abambres, M., K. Rajana, K. Tsavdaridis, and T. Ribeiro, Neural Network-based formula for the buckling load prediction of I-section cellular steel beams. Computers, 2019. 8(1): p. 2.
18. Aschheim, M. and A. Halterman. Reduced web section beams, Phase One: Experimental findings and design implications. in 7th US national conference on earthquake engineering, Boston, Massachusetts. 2002.
19. Shin, M., S.-P. Kim, A. Halterman, and M. Aschheim, Seismic toughness and failure mechanisms of reduced web-section beams: Phase 1 tests. Engineering Structures, 2017. 141: p. 198-216.
20. Shin, M., S.-P. Kim, A. Halterman, and M. Aschheim, Seismic toughness and failure mechanisms of reduced web-section beams: Phase 2 tests. Engineering Structures, 2017. 141: p. 607-623.
21. Akrami, V. and S. Erfani, Effect of local web buckling on the cyclic behavior of reduced web beam sections (RWBS). Steel Composite Structures An International Journal, 2015. 18(3): p. 641-657.
22. Akrami, V., Development of truss model for evaluating load carrying capacity of reduced web beams. 2019, University of Mohaghegh Ardabili, Ardbil, Iran.: Research project report, Faculty of Engineering.