

ارزیابی تحلیلی تأثیر میدانهای کششی بر لنگر پلاستیک تیرهای میانی در دیوارهای برشی ورق فولادی

فرهاد صالحی راد^۱، وحید فرامرزاده^۲، عادل فردوسی^{۳*}

- ۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

چکیده

در این مقاله به بررسی تأثیر میدانهای کششی برابر و نابرابر در برآورد لنگر پلاستیک تیرهای میانی دیوار برشی ورق فولادی به کمک روش تئوری پلاستیسیته پرداخته شده و با روش اجزاء محدود در نرم افزار ABAQUS مقایسه گردیده است. نتایج حاصل بیان کننده آن است که با افزایش شدت میدان کششی و مولفه قائم آن، فشارهای محوری و نیروهای برشی به ویژه در حالت میدان کششی نابرابر در طرفین عضو مرزی افقی، با استفاده از معیار تسلیم مورد استفاده فون-میسز در تحلیل پلاستیک در حالت تنش مسطح، از مقدار ظرفیت لنگر پلاستیک تیرهای بحرانی انتخاب شده در حضور نیروهای فشاری محوری و برشی در هر سه مدل سازه‌ای کوتاه، متوسط و بلند (۳، ۵ و ۷ طبقه) که با استفاده از مدل نواری راهنمای شماره ۲۰ آیین‌نامه آمریکا شبیه‌سازی شده بودند، کاسته می‌شود و همچنین تطابق خوبی بین نتایج تحلیل روش اجزاء محدود و تحلیل تئوری پلاستیسیته دیده می‌شود که حاکی از دقیق بودن روش تحلیل کلاسیک پلاستیک در تخمین میزان لنگر پلاستیک تیرها می‌باشد. در طراحی اعضای مرزی دیوارهای برشی ورق فولادی به خصوص تیرهای میانی در تعیین ظرفیت لنگر پلاستیک در حضور میدان کششی و حداقل ممان اینرسی مورد نیاز این اعضا جهت طراحی، لحاظ نمودن اثر میدانهای کششی به دلیل افزایش و توسعه میدانهای کششی و تسلیم صفحه فولادی و به دنبال آن تأثیر بر تنشهای فشاری و برشی تیرها در بالهای بالا و پایین تیر و ظرفیت لنگر مقاوم طراحی برای خمش مثبت و منفی برای بارهای نهایی اعمالی، لازم و ضروری به نظر می‌رسد.

کلمات کلیدی: دیوارهای برشی ورق فولادی، اعضای مرزی افقی (HBES)، لنگرهای پلاستیک، معیار تسلیم فون-میسز، تحلیل اجزاء محدود.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2017.86076.1187	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.86076.1187	۱۳۹۷/۰۵/۳۰	۱۳۹۶/۰۳/۳۱	۱۳۹۶/۰۳/۳۱	۱۳۹۶/۰۴/۱۰	۱۳۹۶/۰۲/۲۵
عادل فردوسی					*نویسنده مسئول:	
a_ferdousi@iaut.ac.ir					پست الکترونیکی:	

Analytical investigation of tension fields effects on plastic moment of intermediate beams in steel plate shear walls

Farhad Salehi Rad¹, Vahid Faramarzzadeh², Adel Ferdousi^{3*}

1- PhD candidate in Civil Engineering, Tabriz branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

1- PhD candidate in Civil Engineering, Tabriz branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

2- Assistant professor, Tabriz branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

ABSTRACT

In this paper Analytical plastic procedures for studying tension fields effects on intermediate beams in steel plate shear walls and estimating the plastic moments of horizontal boundary elements under equal and unequal top and bottom tension fields of SPSWs have been developed and compared with finite element analysis procedure by using ABAQUS software. The results indicate that with developing and increasing of tension fields, axial compression and shear forces are increased specially in unequal mode and subsequently in all models (3,5,7 story), by using von-mises yield criterion in plane-stress condition, plastic moment capacity of critical selected beams are decreased and results from theoretical plastic analysis were shown to agree well with the results from finite element analysis that is shown that accuracy of classic plastic analysis in estimation of plastic moment of beams and it is noticeable that it is necessary to consider tension fields effects in plastic moment capacity and minimum required moment of inertia because of increasing and developing of tension fields and post-yielding of steel plates and subsequently affect on compress and shear beam stresses values and resistant moment design capacity in positive and negative flexure of horizontal boundary elements for ultimate loads.

ARTICLE INFO

Received: 15/05/2017

Revised: 01/07/2017

Accepted: 22/07/2017

Keywords:

Plastic moment;

Tension fields;

Stress;

Steel plate;

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

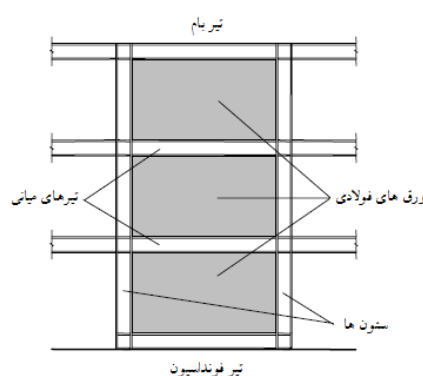
doi: 10.22065/JSCE.2017.86076.1187

*Corresponding author: Adel Ferdousi.

Email address: a_ferdousi@iaut.ac.ir

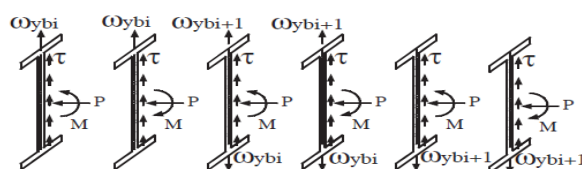
۱- مقدمه

سیستم باربرجانبی دیوارهای برشی ورق فولادی از یک ورق تقویت نشده به همراه ستونهای مرزی و در دو سمت بالا و پایین از تیرهایی که اعضای مرزی افقی نامیده می‌شوند، تشکیل یافته است. به پانل‌های واقع در درون این اجزاء اجازه کمانش در برش داده می‌شود و به دنبال آن میدان‌های کششی قطری در مقابل نیروهای جانبی مقاومت می‌کنند. [۱] تحقیقات اخیر در ایالات متحده، کانادا، ژاپن، تایوان و دیگر کشورها نشان می‌دهد که دیوارهای برشی ورق فولادی می‌توانند سختی اولیه بالایی را از خود نشان دهند، رفتار شکل‌پذیری دارند و به میزان زیادی مستهلک‌کننده انرژی لرزه‌ای می‌باشند، از این رو این سیستم یک گزینه کارآمد برای طراحی ساختمانهای جدید و همچنین مقاوم‌سازی سازه‌های موجود به حساب می‌آید. [۲] در هر دیوار برشی فولادی چند طبقه، اعضای مرزی افقی یا تیرها به دو نوع تیرهای مهارتی و میانی تقسیم می‌گردند، تیرهای مهارتی (تیرهای بام و فونداسیون) در بالا و پایین انتهای دیوار (ترازبام و فونداسیون) قرار دارند و نیروهای ناشی از پانل فولادی را مهار می‌کنند به دلیل اینکه تنها از یک سمت به صفحه متصل می‌باشند (فقط از پایین یا فقط از بالا)، تیرهای میانی در تراز به غیر از بالا و پایین انتهای دیوار قرار دارند و هر دو بال اینگونه تیرها به ورق‌های فولادی متصل بوده و تحت تنش قرار می‌گیرند. شکل (۱) شمای کلی از یک دیوار برشی ورق فولادی به همراه اجزای مرزی آن را نشان می‌دهد [۳].



شکل ۱: شمای کلی دیوار برشی ورق فولادی به همراه اجزای مرزی آن [۳]

اختلاف بین نیروهای وارده از پانل‌های فولادی در بالا و پایین تیرهای میانی بستگی به تفاوت ضخامت ورق‌های طرفین تیرها دارد. طبیعی است که اگر ضخامت صفحات فولادی نزدیک به هم باشد، این اختلاف می‌تواند کوچک و یا حتی صفر باشد. برای درک بهتر تأثیرات میدان‌های کششی بر روی اعضای مرزی افقی به خصوص ترازهای میانی در دیوارهای برشی ورق فولادی، اتصالات تیر به ستون، صلب در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۲) مؤلفه عمودی تنش‌های ناشی از میدان کششی و نیروهای داخلی در دو انتهای تیرهای تمام طبقات، به ترتیب از چپ به راست برای تیرهای فونداسیون، میانی و بام، زمانی که میدان کششی ورق فولادی تشکیل شده و مکانیزم خرابی پلاستیک گسترش می‌یابد نشان داده شده است.



شکل ۲: مؤلفه عمودی تنشهای میدان کششی در تیرهای طبقات و نیروهای داخلی آنها [۴]

در این شکل τ تنش برشی در جان HBE (اعضای مرزی افقی)، P و M نیروی فشاری محوری و لنگر وارده در دو انتهای HBE می‌باشد. O_{ybi} و O_{ybi+1} مؤلفه‌های عمودی میدان‌های کششی در بالا و پایین تیرها می‌باشند. باید توجه نمود که معمولاً HBE، زمانی که مکانیزم تسلیم شدگی، میدان کششی دیوارهای برشی ورق فولادی گسترش می‌یابد به فشار کار می‌کنند. مقادیر τ ، P و M در موقعیت‌های

¹ Horizontal Boundary Elements

مختلف در طول تیر ممکن است تغییر پیدا کند اما جهت تنش برشی τ ، بستگی به نتیجه تأثیرات برش در طول میدان‌های کششی صفحات فولادی و خمش HBE دارد، البته تأثیری در لنگر پلاستیک HBE نداشته که بعداً نشان داده می‌شود.

۱-۱- لنگر پلاستیک بال پهن در قاب خمشی

با رویکرد کران پایین برای ارزیابی لنگر پلاستیک بال پهن در قاب خمشی فولادی بر مبنای دیاگرام‌های تنش و تحلیل پلاستیسیته کلاسیک می‌توان برای محاسبه اندرکنش نیروهای برشی، محوری و خمشی استفاده شود. با استفاده از این روند، تنش برشی یکنواخت که به جان مقطع و نیروی برشی V وارد می‌گردد، می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود: [۴]

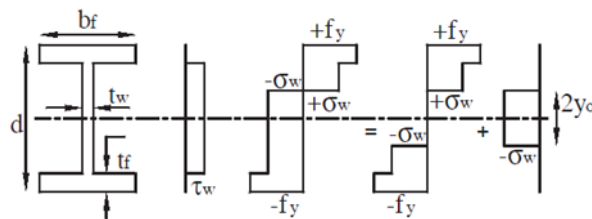
$$\tau_w = \frac{V}{h_w t_w} \quad (1)$$

t_w و h_w عمق و ضخامت جان مقطع به ترتیب می‌باشند. از معیار تسلیم فون-میسز برای محاسبه ماکزیمم تنش محوری استفاده می‌شود که می‌تواند به جان مقطع وارد شود.

$$\sigma_w = \sqrt{f_y^2 - 3\tau_w^2} \quad (2)$$

f_y مقاومت تسلیم فولاد می‌باشد. اگر تار خنثی در جان واقع شود، مقاومت بال‌ها در حد f_y باقی می‌ماند و مطابق شکل (۳) موقعیت تار خنثی از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$y_0 = \frac{P}{2\sigma_w t_w} \quad (3)$$



شکل ۳: جزئیات تنش‌های برشی، محوری و خمشی وارده بر یک تیر بال پهن [۴]

مطابق شکل (۳) در صورت صرفنظر کردن از سخت‌شدگی کرنش دیاگرام تنش محوری پلاستیک برای مقطع بال پهن به دو قسمت خمش خالص و محوری تقسیم می‌گردد.

مشارکت بال‌ها و جان برای تحمل لنگر پلاستیک بر اساس دیاگرام‌های تنش خمشی به ترتیب برابر [۴]:

$$M_{pr-web}^{P,V} = \frac{t_w(d-2t_f)^2}{4} \sigma_w - \frac{t_w(2y_0)^2}{4} \sigma_w \quad M_{pr-flange}^{P,V} = b_f t_f (d-t_f) f_y \quad (4)$$

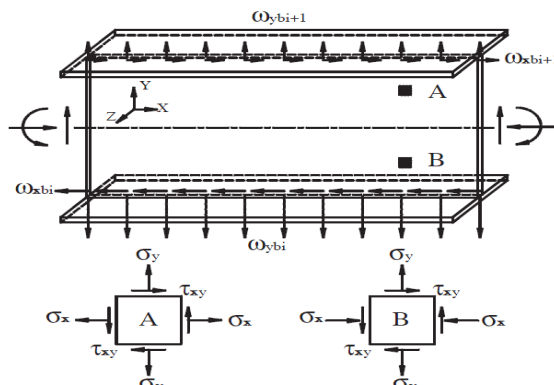
در روابط (۴)، b_f و t_f به ترتیب عرض بال و ضخامت مقطع می‌باشد، لنگر پلاستیک کل مقطع نیز از رابطه (۵) بدست می‌آید:

$$M_{pr}^{P,V} = M_{pr-web}^{P,V} + M_{pr-flange}^{P,V} \quad (5)$$

با رویکرد کران پایین نتایج قابل قبولی حاصل می‌شود که برای طراحی قاب خمش فولادی استفاده می‌شود.

۱-۲- کاهش مقاومت تسلیم در جان عضو مرزی افقی (HBE)

برای درک بهتر کاهش مقاومت محوری در جان یک عضو مرزی افقی در صورت حضور برش و تنش‌های محوری دو المان از نواحی کششی و فشاری جان، یک عضو مرزی افقی میانی انتخاب می‌گردد که در شکل (۴) نشان داده شده است. [۴]



شکل ۴: شرایط بارگذاری و جزئیات تنش‌های وارده در HBE میانی [۴]

تمامی این المان‌ها در شرایط تنش مسطح قرار دارند.

نتایج تئوری مقاومت مصالح کلاسیک نشان می‌دهد که معیار تسلیم فون-میسز در شرایط تنش مسطح می‌تواند از رابطه (۶) بدست آید [۴]:

$$\left(\frac{\sigma_x}{f_y}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_x}{f_y}\right)\left(\frac{\sigma_y}{f_y}\right) + \left(\frac{\sigma_y}{f_y}\right)^2 + 3\left(\frac{\tau_{xy}}{f_y}\right)^2 = 1 \quad (6)$$

معادله (۶) از درجه ۲ بوده که اگر نسبت به $\frac{\sigma_x}{f_y}$ حل شود خواهیم داشت [۴]:

$$\left(\frac{\sigma_x}{f_y}\right) = \frac{1}{2}\left(\frac{\sigma_y}{f_y}\right) \pm \frac{1}{2}\sqrt{4 - 3\left(\frac{\sigma_y}{f_y}\right)^2 - 12\left(\frac{\tau_{xy}}{f_y}\right)^2} \quad (7)$$

باید توجه داشت که میزان مقاومت محوری کششی و فشاری کاهش یافته را می‌توان به ترتیب با در نظر گرفتن علامات + و - در معادله (۷) محاسبه نمود. در صورت عدم حضور تنش‌های قائم ایجاد شده ($\sigma_y = 0$) خواهد بود. مقاومت‌های تسلیم کششی و فشاری از معادله (۸) حاصل خواهد شد که شبیه معادله (۲) می‌باشد. [۴]

$$\left(\frac{\sigma_x}{f_y}\right) = \pm \sqrt{1 - 3\left(\frac{\tau_{xy}}{f_y}\right)^2} \quad (8)$$

این معادله برای محاسبه لنگر پلاستیک اعضای بال پهن در قاب‌های فولادی استفاده می‌گردد.

۲- بررسی تأثیر میدان‌های کششی بر تیرهای میانی با استفاده از تحلیل پلاستیسیته مصالح

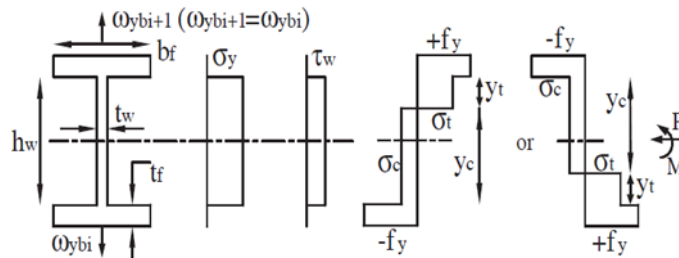
همانگونه که در ابتدای این پژوهش ذکر گردید مکانیزم عملکرد دیوارهای برشی ورق فولادی و مقاومت آنها در برابر بارهای جانبی و برش طبقات بر پایه ایجاد میدان‌های کششی استوار است لذا تأثیر آن بر ظرفیت لنگر اعضای مرزی دیوار اهمیت دارد.

۲-۱- تیر میانی تحت میدان های کششی برابر در بالا و پایین

مطابق رابطه ارائه شده در معادله (۱) تنش برشی τ_w به صورت یکنواخت بر جان HBE اثر می کند علاوه بر آن یک تنش کششی عمودی ثابتی ناشی از میدان های کششی بر جان HBE اثر می کند که به صورت روابط (۹) بیان می گردد. [۴]

$$\sigma_y = \frac{\omega_{ybi}}{t_w} \quad \tau_w = \frac{V}{h_w t_w} \quad (9)$$

دیگرام تنش های سطح مقطع HBE میانی تحت خمش، فشار محوری و نیروی برشی و تنش های عمودی برابر در بالا و پایین ناشی از میدان های کششی در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵: نمودارهای تنش مقطع HBE میانی ناشی از میدان کششی برابر در طرفین تیر [۴]

با نوشتن معادله تعادل محوری و حل آن می توان فاصله تارخنتی را مطابق رابطه ۱۰ بدست آورد: [۴]

$$y_c = \frac{\left(\frac{\sigma_t}{f_y}\right) + \beta_w}{\left(\frac{\sigma_t}{f_y}\right) - \left(\frac{\sigma_c}{f_y}\right)} \times h_w \quad (10)$$

در معادله (۱۰)، β_w نسبت فشار محوری وارده به مقاومت محوری اسمی جان می باشد، بنابراین سهم خالص جان و بال ها از لنگر پلاستیک در کل مقطع می تواند از روابط (۱۱) حاصل شود: [۴]

$$M_{pr-web} = \sigma_t t_w y_t \left(\frac{h_w}{2} - \frac{y_t}{2}\right) - \sigma_c t_w y_c \left(\frac{h_w}{2} - \frac{y_c}{2}\right) \quad M_{pr-flange} = f_y b_f t_f (d - t_f) \quad (11)$$

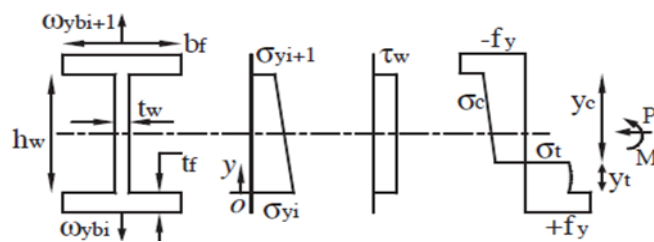
ضریب کاهش لنگر پلاستیک سطح مقطع β برای اندازه گیری کاهش مقاومت پلاستیک تحت ترکیب اثرات فشار محوری، نیروی برشی و تنش های عمودی که بر جان HBE اثر می کنند تعریف می شود. مقدار β از رابطه (۱۲) بدست می آید: [۴]

$$\beta = \frac{M_{pr-web} + M_{pr-flange}}{f_y Z} \quad (12)$$

که در رابطه (۱۲)، Z اساس مقطع پلاستیک و f_y تنش تسلیم مصالح HBE می باشد.

۲-۲- تیر میانی تحت میدان های کششی نابرابر در بالا و پایین

در بیشتر موارد پانل های پرکننده بالا و پایین HBE میانی دارای ضخامت های مختلفی هستند (طرح با ضخامت متغیر ورق) که منجر به ایجاد میدان های کششی نابرابر می گردند. در این قسمت نیز به بررسی تأثیر میدان های کششی نابرابر بر لنگر پلاستیک HBE پرداخته می شود. دیگرام های تنش مربوط به سطح مقطع تیرهای میانی که تحت خمش مثبت و فشار محوری، نیروی برش و تنش های عمودی نابرابر در بالا و پایین ناشی از میدان های کششی قرار می گیرند، در شکل ۶ آمده است.



شکل ۶: نمودارهای تنش مقطع HBE میانی تحت میدانهای کششی نابرابر طرفین در خمش مثبت [۴]

معادله تنش ناشی از میدان کشش نابرابر در بالا و پایین که بر جان HBE اثر می‌کند، می‌توان با معادله ۱۳ تقریب زد: [۴]

$$\frac{\sigma_y(y)}{f_y} = \left(\frac{\sigma_{yi}}{f_y} \right) \left(1 - \frac{y}{h_w} \right) + \left(\frac{\sigma_{yi+1}}{f_y} \right) \left(\frac{y}{h_w} \right) \quad (13)$$

که در این معادله تنش‌های عمودی هستند که به ترتیب در پایین و بالای جان HBE اثر می‌کنند. همانند معادله (۷) تنش‌های تسلیم محوری در جان (فشاری و کششی) به کمک رابطه (۱۴) حاصل می‌گردند: [۴]

$$\left(\frac{\sigma_x(y)}{f_y} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_y(y)}{f_y} \right) \pm \frac{1}{2} \sqrt{4 - 3 \left(\frac{\sigma_y(y)}{f_y} \right)^2 - 12 \left(\frac{\tau_w}{f_y} \right)^2} \quad (14)$$

که جمله دوم معادله (۱۴) بیانگر میزان مقاومت محوری کششی و فشاری کاهش یافته، به ترتیب با علامت مثبت و منفی می‌باشد. با نوشتن معادله تعادل نیروهای محوری معادله (۱۵) حاصل می‌شود: (برای خمش مثبت)

$$\int_0^{h_w - y_c} \sigma_t(y) t_w dy + \int_{h_w - y_c}^{h_w} \sigma_c(y) t_w dy = P \quad (15)$$

برای حل انتگرال فوق و پیدا کردن مقدار y_c تنها می‌توان از نرم‌افزارهای عددی نظیر متلب استفاده کرد (روش حل بسته برای حل انتگرال فوق امکان پذیر نیست). پس از بدست آوردن y_c از معادله فوق مقدار لنگر پلاستیک سهم جان بدست می‌آید. ضریب کاهش لنگر پلاستیک سطح مقطع، در حالت میدان کششی نابرابر هم برقرار بوده و از رابطه (۱۲) بدست می‌آید.

۳- مدل سازی

در این پژوهش برای ارزیابی رفتار HBE دیواربرشی فولادی در انواع ساختمان‌ها شامل (کوتاه، متوسط و بلند)، سه مدل ۳، ۷ و ۱۰ طبقه در نظر گرفته می‌شود. دهانه دیوار برشی یا به عبارتی دهانه تیرها و همچنین ارتفاع طبقات ۳ متر در نظر گرفته شده است. برای محاسبه ضخامت‌های پیشنهادی ورق و زوایای میدان کششی در آنها در دو حالت طرح با ضخامت ثابت ورق (میدان کششی برابر در طرفین تیر میانی) و طرح با ضخامت متغیر (میدان کششی نابرابر در طرفین تیر میانی)، از روش مدل نواری مطابق آیین‌نامه AISC راهنمای شماره ۲۰ و روابط مربوط به آن مطابق معادلات (۱۶) و (۱۷) استفاده می‌شود. [۵]، [۶]

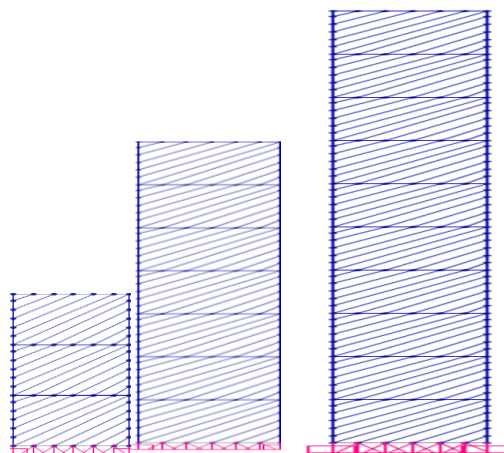
$$t = \frac{2A_b \Omega_s \sin \theta}{L \sin 2\alpha} \quad (16)$$

در رابطه (۱۶)، A_b سطح مقطع مهاربند معادل صفحه فولادی است که پس از تحلیل بدست می‌آید، Ω_s ضریب اضافه مقاومت است که در دیوارهای برشی فولادی برابر ۱/۱ در نظر گرفته می‌شود، θ زاویه بین مهاربند و ستون و α زاویه میدان کشش ایجاد شده می‌باشد که از رابطه (۱۷) حاصل می‌گردد، در این رابطه A_b سطح مقطع تیر، A_c و I_c به ترتیب سطح مقطع و ممان اینرسی ستون مربوط به صفحه فولادی موردنظر بوده و h_s ارتفاع طبقه و L دهانه دیوار می‌باشد.

² Matlab

$$\tan^4 \alpha = \frac{1 + \frac{t.L}{2A_c}}{1 + t.h_s \left(\frac{1}{A_b} + \frac{h_s^3}{360I_c.L} \right)} \quad (17)$$

بعد از محاسبه پارامترهای فوق مدل‌های نواری مربوطه در نرم‌افزار SAP2000 ایجاد می‌گردند که در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۷: مدل‌های نواری دیوارهای برشی ۳، ۷ و ۱۰ طبقه

هر سه سازه در نرم‌افزار SAP2000 [۷] با استفاده از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌آور) تحلیل شده و مقاطع تیرها بدست می‌آیند. از هر مدل یک تیر بحرانی میانی به لحاظ بارگذاری انتخاب شده، در گام نخست روند تحلیل کلاسیک پلاستیک بر روی آن انجام شده و سپس برای صحت‌سنجی تحلیل هر تیر، به بررسی اجزاء محدود در نرم‌افزار ABAQUS [۸] و مقایسه با تحلیل پلاستیسیته که در بخش قبل ذکر گردید به عنوان صحت‌سنجی در بخش‌های بعدی پرداخته می‌شود.

۴- بررسی اجزاء محدود

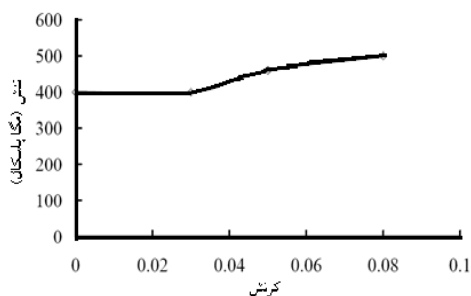
نرم افزار ABAQUS یک مجموعه از برنامه‌های مدل‌سازی بسیار توانمند می‌باشد که مبتنی بر روش اجزاء محدود، قابلیت حل مسایل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده ترین مدل‌سازی غیرخطی را دارد. این نرم‌افزار دارای مجموعه المان‌های بسیار گسترده‌ای می‌باشد که هر نوع هندسه‌ای را می‌توان به صورت مجازی توسط این المان‌ها مدل کرد. همچنین دارای مدل‌های مواد مهندسی بسیار زیادی است که در مدل‌سازی انواع مواد با خواص و رفتار گوناگون نظیر فلزات، لاستیک‌ها، پلیمرها، کامپوزیت‌ها، بتن تقویت شده، فوم‌های فبری و نیز شکننده و همچنین مواد موجود در زمین نظیر خاک و سنگ، قابلیت بالایی را ممکن می‌سازد.

۴-۱- تیر میانی تحت میدان‌های کششی برابر در بالا و پایین

از هر مدل یک تیر بحرانی میانی به لحاظ بارگذاری انتخاب شده، در ابتدا روند تحلیل کلاسیک پلاستیک بر روی آن انجام شده و سپس برای صحت‌سنجی تحلیل هر تیر، به بررسی اجزاء محدود در نرم‌افزار ABAQUS پرداخته می‌شود. جان و بال تیرها با المان Shell (S4R) (المان چهار نقطه‌ای با انتگرال‌گیری کاهش یافته)، مدل گردیده است. ماده (فولاد) به صورت الاستوپلاستیک با مشخصات ارتجاعی و پلاستیک مطابق جدول (۱) و نمودار تنش-کرنش آن مطابق شکل (۸) به نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS معرفی شده است.

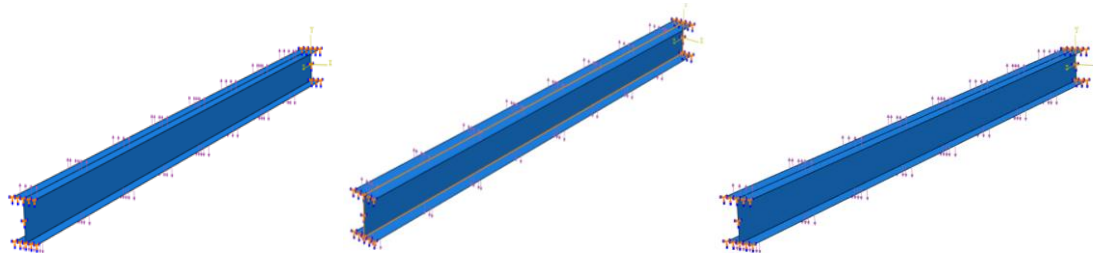
جدول ۱: مشخصات الاستوپلاستیک مقاطع

کرنش پلاستیک	تنش تسلیم (Mpa)
۰/۰۰	۴۰۰
۰/۰۳	۴۰۰
۰/۰۵	۴۶۰
۰/۰۸	۵۰۰



شکل ۸: نمودار تنش-کرنش مصالح فولادی مقاطع

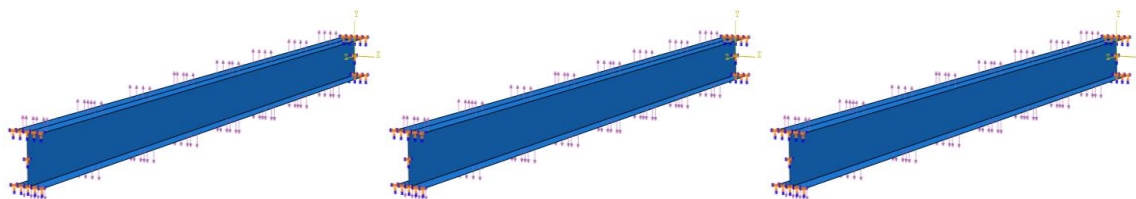
به عنوان مثال مدل میدان کششی برابر در دو طرف تیر میانی مربوط به مدل‌های سازه‌های ۳، ۷ و ۱۰ طبقه در نرم افزار ABAQUS به صورت اشکال (۹) می‌باشد.



شکل ۹: مدل میدان کششی برابر در طرفین تیر میانی سازه‌های ۳، ۷ و ۱۰ طبقه

۴-۲- تیر میانی تحت میدان‌های کششی نابرابر در بالا و پایین

همانند حالت قبل از هر مدل یک تیر بحرانی میانی به لحاظ بارگذاری انتخاب شده، تحلیل اجزاء محدود در نرم افزار ABAQUS انجام شده و برای صحت‌سنجی از تحلیل کلاسیک پلاستیک استفاده می‌شود. مدل‌های اجزاء محدود میدان کششی نابرابر در طرفین تیر میانی مربوط سازه‌های ذکر شده در شکل (۱۰) آورده شده است.



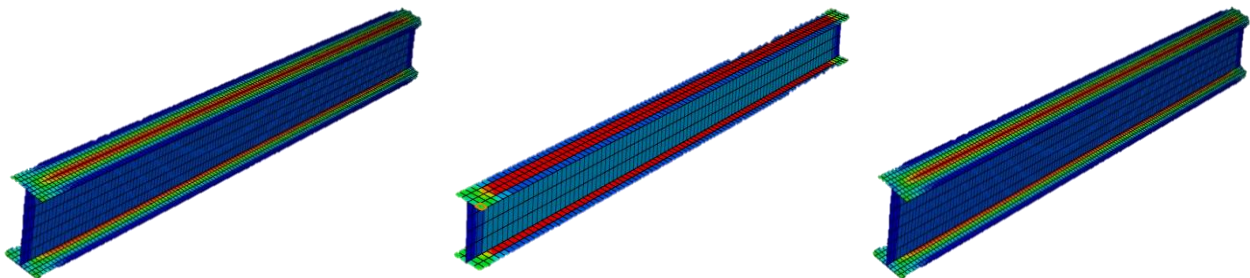
شکل ۱۰: مدل میدان کششی نابرابر در طرفین تیر میانی سازه‌های ۳، ۷ و ۱۰ طبقه

۵- نتایج حاصل از تحلیل پلاستیک و اجزاء محدود نرم افزار ABAQUS برای بررسی تأثیر میدان های کششی بر تیرهای میانی

۵-۱- نتایج تحلیل پلاستیک و اجزاء محدود تیرهای میانی تحت میدان کششی برابر

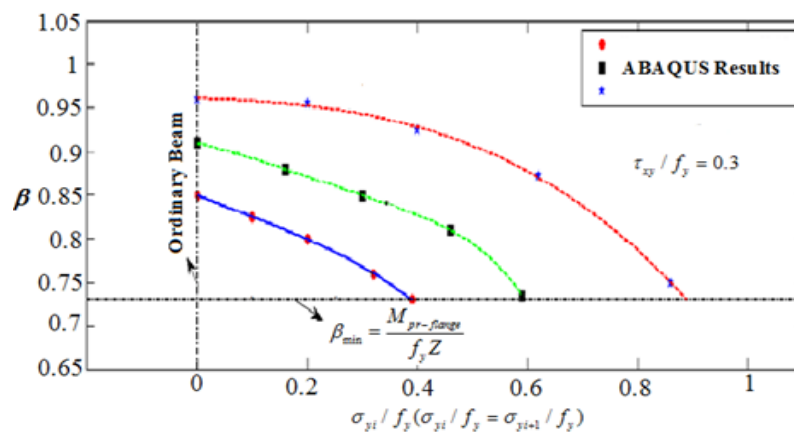
همانطور که در بخش قبل ذکر گردید در این قسمت از هر مدل یک تیر میانی بحرانی به لحاظ نیروهای داخلی تحت مؤلفه قائم تنش های ناشی از میدان های کششی برابر در بالا و پایین انتخاب گردیده یک بار با استفاده از تحلیل پلاستیک و معیار فون میسز و بار دیگر به صورت تحلیل اجزاء محدود در نرم افزار ABAQUS تحلیل می شوند و در هر پروسه نتایج حاصل بخصوص در مورد پارامترهای مربوط به ظرفیت لنگر پلاستیک نظیر β حالت های وجود و عدم وجود تنش های برشی و همچنین برای لنگرهای مثبت و منفی ترسیم می گردند که در حالت میدان کششی برابر، علامت لنگر تأثیری در نتایج ندارد.

کنتورهای تنش مربوط به مدل های اجزاء محدود تیرهای میانی انتخابی از سه مدل سازه های ۳، ۷ و ۱۰ طبقه بر اساس معیار فون-میسز در مجموعه اشکال (۱۱) نشان داده شده اند.



شکل ۱۱: کنتورهای تنش مربوط به تیر میانی مدل های ۳، ۷ و ۱۰ طبقه تحت میدان کششی برابر

مقادیر β (پارامتر کاهش لنگر پلاستیک) مربوط به تحلیل پلاستیک که با خطوط خط چین مشخص شده و همچنین نتایج اجزاء محدود نرم افزار ABAQUS در پنج نقطه متناظر با فرض نسبت $\tau_{xy}/f_y = 0.3$ برای سه مدل سازه های ذکر شده به ترتیب در نمودارهای شکل (۱۲) و مقادیر عددی نظیر در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل ۱۲: نمودارهای پارامتر β مربوط به تحلیل پلاستیک و اجزاء محدود در حالت میدان کششی برابر برای $\tau_{xy}/f_y = 0.3$

جدول ۲: پارامتر β محاسبه شده در تحلیل پلاستیک و نرم افزار ABAQUS برای نسبت

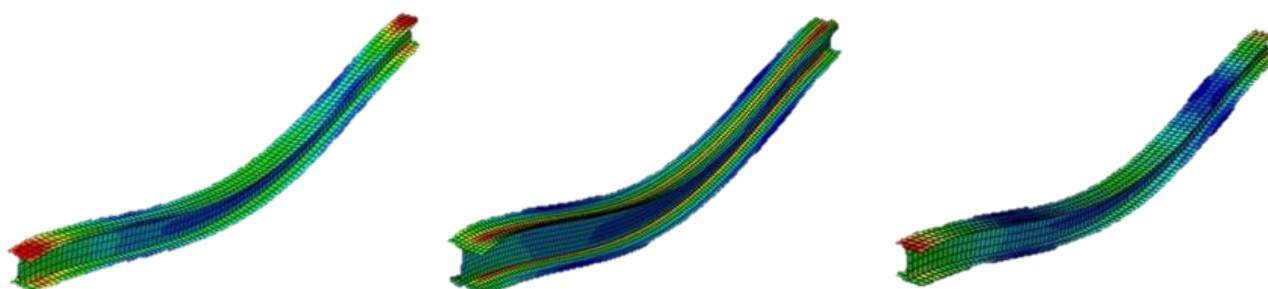
$\tau_{xy}/f_y=0/3$ در حالت میدان‌های کششی برابر طرفین تیر میانی

$\tau_{xy}/f_y=0/3$	β	
	تحلیل کلاسیک پلاستیک	تحلیل اجزاء محدود ABAQUS
0	0/848	0/849
0/120	0/827	0/826
0/240	0/801	0/803
0/400	0/764	0/759
0/570	0/739	0/734
0	0/917	0/915
0/182	0/882	0/883
0/276	0/850	0/851
0/473	0/818	0/821
0/595	0/738	0/731
0	0/967	0/966
0/120	0/951	0/963
0/240	0/944	0/934
0/400	0/877	0/883
0/570	0/754	0/753

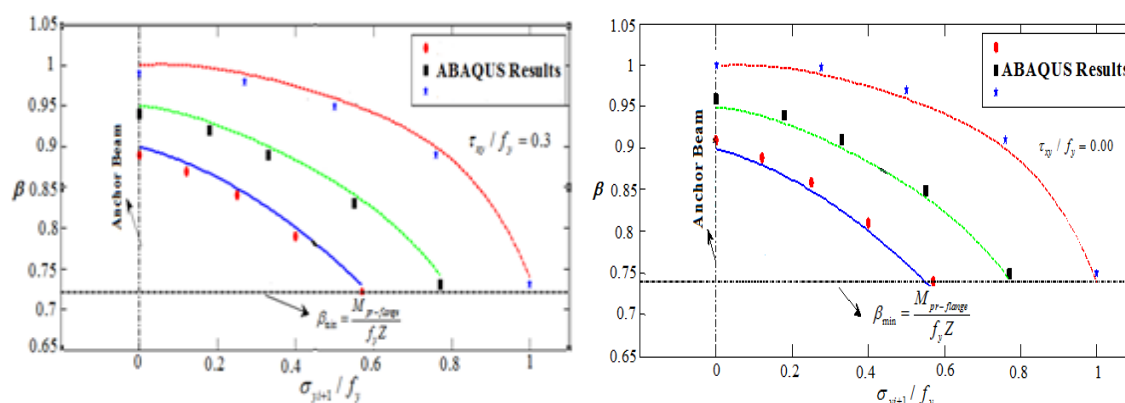
همانطور که در جداول (۲) و (۳) نیز مشاهده می‌گردد مقادیر مربوط به تحلیل‌های کلاسیک پلاستیک و اجزاء محدود خیلی نزدیک به هم و بعضاً منطبق می‌باشند، همین روند تحقیق را در بررسی تأثیر میدان‌های کششی نابرابر یک بار برای خمش مثبت و یک بار هم برای خمش منفی در سه مدل ادامه خواهیم داد و منحنی‌های نتایج تحلیل پلاستیک و مقادیر اجزاء محدود را جهت صحت‌سنجی مقایسه خواهیم نمود.

۵-۲- نتایج تحلیل پلاستیک و اجزاء محدود تیرهای میانی بحرانی تحت میدان کششی نابرابر با خمش مثبت

کنتورهای تنش مربوط به مدل‌های اجزاء محدود تیرهای میانی بحرانی (با حداکثر اختلاف بین شدت میدان‌های کششی در بالا و پایین تیر) انتخابی از سه مدل سازه‌ای به ترتیب در اشکال (۱۳) برای لنگر خمشی مثبت نشان داده شده است و نمودارهای دو تحلیل (پلاستیک و اجزاء محدود) مربوط به این مدل‌ها در مجموعه اشکال (۱۴) برای دو نسبت $\tau_{xy}/f_y=0/3$ و $\tau_{xy}/f_y=0$ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۳: کنتر تنش مربوط به تیرهای میانی انتخابی از مدل‌های ۳، ۷ و ۱۰ طبقه تحت میدان کششی نابرابر طرفین تحت خمش مثبت



شکل ۱۴: نمودارهای پارامتر β مربوط به تحلیل پلاستیک و اجزاء محدود در حالت میدان کششی نابرابر طرفین تحت خمش مثبت

همانطور که در نمودارهای اشکال (۱۴) نیز دیده می شود در حالت میدان کششی نابرابر طرفین تیر بصورت خمش مثبت، با افزایش تنش از مقدار پارامتر β یا همان ظرفیت لنگر پلاستیک کاسته می شود و تطابق نسبتاً خوبی بین منحنی های خط چین β - σ_{yi+1} (تحلیل کلاسیک پلاستیک) و مقادیر β حاصل از تحلیل اجزاء محدود نرم افزار ABAQUS وجود دارد که به صورت پنج نقطه انتخابی از نتایج استخراج شده است.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی رفتار لرزه ای تیرهای میانی و تأثیر میدان های کششی برابر و نابرابر بر لنگر پلاستیک تیرهای میانی با استفاده از دو تحلیل پلاستیک و اجزاء محدود در سازه های ۳، ۷ و ۱۰ طبقه مورد بررسی قرار گرفته و نتایج دو تحلیل با هم مقایسه شدند. برخی نتایج کلی مربوط به این مقاله به شرح ذیل ارائه گردیده اند: ۱- نتایج حاصل از تحلیل پلاستیک تیرهای میانی دیوار برشی ورق فولادی در سه مدل کوتاه، متوسط و بلند تطابق بسیار خوبی با نتایج اجزاء محدود دارند فلذا می توان برای محاسبه ظرفیت لنگر پلاستیک اعضای مرزی افقی به خصوص تیرهای میانی در دیوارهای برشی ورق فولادی، با دقت بسیار خوبی از روشهای تحلیلی نظیر تحلیل کلاسیک پلاستیک بهره جست. ۲- ضریب کاهش لنگر پلاستیک مقطع β در تیرهای میانی با افزایش تنش های برشی، نیروهای محوری و تنش های قائم ناشی از میدان های کششی برابر و نابرابر از مقدار واحد کاسته شده و به مقدار حداقل خود می رسد لذا به نظر می رسد جهت افزایش ظرفیت لنگر پلاستیک تیر، استفاده از سخت کننده و یا کابل در طول تیر می تواند عملکرد تیرهای میانی را بهبود بخشد. ۳- به عنوان یک نتیجه مهم حاصل از این پژوهش، لازم است اثر میدان های کششی برای منظور نمودن در طراحی اعضای مرزی دیوارهای برشی ورق فولادی به خصوص حداقل ممان ایترسی لازم برای تیرهای میانی و تعیین ظرفیت لنگر پلاستیک عضو در نظر گرفته شود.

مراجع

- [1] Elgaaly, M. (1998). *Thin Steel Plate Shear Walls Behavior and Analysis*. Thin-Walled Structures, 151-180.
- [2] Sabouri-Ghomi, S.; Gholhaki, M.: (2008). Ductility of Thin Steel Plate Shear Walls. *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, Vol.9(2), 153-166.
- [3] Lopez-Garcia D, Bruneau M. (2006). Seismic behavior of intermediate beams in steel plate shear walls. *The 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Proceedings of San Francisco, California, USA. 2-5.
- [4] Berman, J.W. , Bruneau M. (2003). Plastic Analysis and Design of steel plate shear walls. *Journal of Structural Engineering*, Vol.129, No. 11.8-10.
- [5] AISC Steel Design Guide No. 20 , (2006). *Steel Plate Shear walls*. American institute of steel construction, Inc., 46-52.
- [6] Astaneh-Asl, A. (2002). *Seismic Behaviour and Design of Steel Shear Walls*. Steel TIPS Report, Structural Educational Council, July, Moraga, CA.
- [7] CSI (Computers and Structures Inc.).(2015). SAP2000 v17 Analysis Reference Manual. CSI, Berkeley.
- [8] ABAQUS Analysis User's Manual (version 6.11.), Hibbit, Karlsson, and Sorenson. Pawtucket, RI.