

# مطالعه ی عددی پایداری جانبی - پیچشی تیورق های جدار نازک حاوی گشایش در جان

بابک پورسرتیپ<sup>۱</sup>؛ محمد زمان کبیر<sup>۲</sup>

## چکیده

کمانش جانبی- پیچشی تیرها یکی از مواردی است که در طراحی تیرهای جدار نازک موثر می باشد. وجود گشایش در تیرها، از پارامترهایی است که می تواند در این مورد مهم باشد. این گشایش ها به دلیل عبور تاسیسات خاص، دسترسی به تیر و یا صرفه جویی در مصالح ایجاد می شوند. در زمینه ی اثر گشایش، در حالت رفتار الاستیک و مسئله کمانش جانبی- پیچشی، کمتر کار شده است. هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی اثر پارامترهای مختلف بر بار کمانش جانبی- پیچشی تیورق ها می باشد. بار کمانش جانبی- پیچشی بیش از ۷۰۰ تیورق که حاوی گشایش ها، ابعاد و مشخصات مختلف می باشند، به کمک نرم افزار Ansys ۵.۵ بدست آمده و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شده است. سه نوع گشایش مربعی، دایره ای و شش ضلعی منتظم با ابعاد مختلف در نظر گرفته شده است. نحوه ی تغییرات بار کمانش با تغییر ابعاد گشایش، تغییر ضخامت ورق ها، شکل گشایش ها، تغییر مساحت بازشوها، تغییر طول تیر و تغییر شرایط تکیه گاهی بدست آمده است. در پایان نیز موقعیت بهینه برای ایجاد گشایش در تیر با توجه به شرایط تکیه گاهی و نوع گشایش مطرح شده است.

## کلمات کلیدی

تیورق - گشایش - کمانش جانبی - پیچشی - جان - جدار نازک - تکیه گاه

## *Numerical Study of Lateral – Torsion Stability of Thin – wall Beams with Cut-out in Web*

B. Poursartip; M. Z. Kabir ;

### ABSTRACT

One of the main challenges in designing of thin-walled open section beams is lateral-torsion buckling mode. Due to the access for piping, electrical and other devices, inserting cut-outs in web are inevitable.

This paper deals with the effects of different parameters in lateral-torsion buckling of plate girders. Lateral-torsion buckling loads of more than 700 plate girders are calculated with opening in different shapes, dimensions and locations by Ansys 5.4 . The study is performed using numerical approach and the results are compared together. Three kinds of cut-outs including square, circular and hexagonal are selected. An extensive parametric studies is conducted to study the influence of cut-out dimensions, thickness, area, location and distribution along the beam length. Finally optimum scheme is obtained in order to have better estimation load carrying capacity of open-section beam.

### KEYWORDS

Plate girder, cut-out, buckling, web, thin-wall, restrains

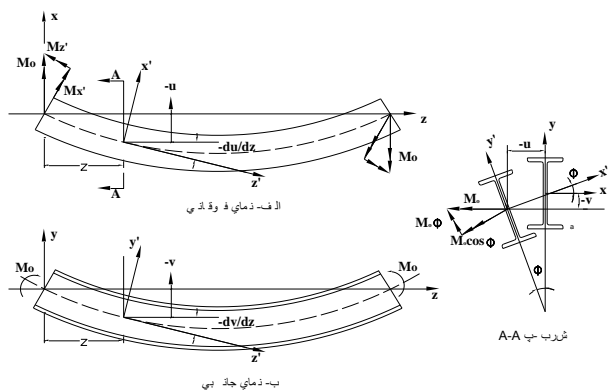
<sup>۱</sup> دانش اندوخته کارشناسی مهندسی ارشد سازه، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، Email: b\_poursartip@yahoo.com

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، Email: mz-kabir@aut.ac.ir



## ۱- مقدمه

از حالتی خواهد بود که در آن لنگر خمشی در طول مهار نشده تغییر می‌نماید. در شکل ۱ تیر I شکل تحت تاثیر لنگر خمشی  $M_0$  در دو انتها در صفحه  $YZ$  قرار دارد. دستگاه مختصات  $x'y'z'$  مربوط به وضعیت اولیه تیر، قبل از کمانش می‌باشد. حال فرض می‌شود که تحت لنگر خمشی  $M_0$ ، تیر کمانش جانبی نماید.



شکل (۱): کمانش جانبی تیر I شکل [۴]

شکل ۱ وضعیت مقطعی نظیر A-A را قبل و بعد از کمانش جانبی نشان می‌دهد. اگر دستگاه مختصات حالت کمانش یافته را با  $xyz$  نشان داده و لنگر خمشی  $M_0$  روی این دستگاه جدید تصویر گردد، دیده می‌شود که در حالت کمانش یافته، تیر تحت لنگرهای خارجی به شرح موجود در روابط ۱ و ۲ می‌باشد:

$$(M_x)_{ext} = M_0 \cos \phi \quad \text{الف - (۱)}$$

$$(M_y)_{ext} = M_0 \sin \phi = M_0 \quad \text{ب - (۱)}$$

$$(M_z)_{ext} = -\frac{du}{dz} M_0 \quad \text{ج - (۱)}$$

مقادیر لنگرهای داخلی عبارتند از:

$$(M_x)_{int} = -EI_x \frac{d^2 v}{dz^2} \quad \text{الف - (۲)}$$

$$(M_y)_{int} = EI_y \frac{d^2 u}{dz^2} \quad \text{ب - (۲)}$$

$$(M_z)_{int} = GJ \frac{d\gamma}{dz} \quad \text{ج - (۲)}$$

مطابق شکل ۱،  $u$  و  $v$  به ترتیب جابجایی افقی و قائم می‌باشند. بامساوی قراردادن لنگرهای داخلی لنگرهای خارجی سه معادله دیفرانسیل بدست می‌آید. با جایگذاری شرایط مرزی و حل معادلات دیفرانسیل، می‌توان به روابط ۳ و ۴ رسید [۴]:

$$M_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^4 E^2 C_w I_y}{L^4} + \frac{\pi^2 E I_y GJ}{L^2}} \quad (۳)$$

از جمله مسائل مهم در طراحی تیرها، کمانش جانبی - پیچشی آنهاست که در مورد تیرهای عمیق با مقطع جدار نازک اهمیت پیدایمی‌کند. در مورد مسئله کمانش جانبی - پیچشی تیرها تحقیقاتی انجام شده است. اثر پارامترهای مختلف از قبیل شرایط تکیه‌گاهی و شکل بارگذاری بررسی شده است. اما تمامی پارامترهای موثر در این زمینه مورد بررسی قرار نگرفته است. یکی از پارامترهای مهم، وجود گشایش در تیر است. این گشایش‌ها به دلیل عبور تاسیسات خاص، دسترسی به تیرویا صرفه‌جویی در مصالح ایجاد می‌شود. تحقیقات انجام شده در این زمینه شامل بررسی رفتار الاستوپلاستیک تیر، به خصوص در نزدیکی گشایش‌ها و اثر آن بر مقدار بار کمانش می‌باشد. اما در مورد اثر گشایش در حالت رفتار الاستیک و مسئله کمانش جانبی - پیچشی کمتر کار شده است. Redwood and Uenoya با استفاده از روش اجزا محدود، مسئله پایداری یک صفحه‌ی سوراخدار با بارگذاری در کناره‌های صفحه و شرایط تکیه‌گاهی مختلف را بررسی کردند [۱].

Coul and Alvarez بر مبنای کارهای آزمایشگاهی بار کمانش جانبی - پیچشی تیر با مقطع مستطیلی باریک را که حاوی بازشوهای دایره‌ای و مستطیلی بود بدست آوردند و نتایج را با فرمول تقریبی که خود ارائه کرده بودند مقایسه کردند. هر چند که جواب‌های این فرمول با تقریب خوبی با نتایج آزمایش منطبق است، اما از آنجا که اثر بسیاری از پارامترها را در نظر نگرفته است (مانند محل قرارگیری سوراخ‌ها)، کامل نمی‌باشد [۲]. Thevmdran and Shanmugam بر مبنای روش انرژی، روشی برای بدست آوردن بار کمانش جانبی - پیچشی تیرهای عمیق با مقطع مستطیلی نازک، حاوی گشایش‌های مربعی و دایره‌ای شکل در طول تیر، در حالتی که تیر مستطیلی و نازک باشد، ارائه دادند. آنها تیر را در دو حالت تکیه‌گاهی یکسرگیردار، یکسرآزاد و دو سر ساده و با یک بار نقطه‌ای در انتها و وسط تیر در نظر گرفتند و جواب‌های خود را با نتایج آزمایش مقایسه کردند [۳].

## ۲- بررسی تحلیلی کمانش جانبی تیر با نیمرخ I

### متقارن

در یک تیر ساده تحت خمش خالص، لنگر خمشی در طول تیر ثابت می‌باشد. در نتیجه نیروی فشاری ثابتی در کل طول مهار نشده بال فشاری وجود دارد. بنابراین احتمال وقوع کمانش جانبی بیش

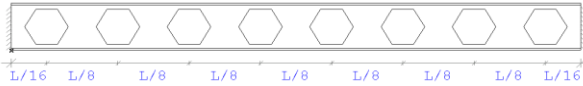


۲۰	۱۰۰	۲۰	۵۰۰	۱۳
----	-----	----	-----	----

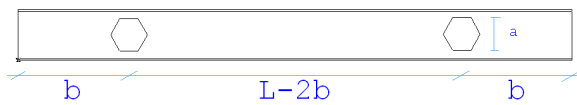
سه نوع گشایش مربعی، دایره‌ای و شش‌ضلعی منتظم در جان تیورق‌ها در نظر گرفته شده‌است. نحوه آرایش آن‌ها برای نمونه، برای گشایش شش‌ضلعی منتظم در شکل‌های ۲ تا ۴ نشان داده شده است.  $L$  طول تیر می‌باشد که برابر با ۶ یا ۱۲ متر است.



شکل (۲): تیر A



شکل (۳): تیر B



شکل (۴): تیر C

### ۲-۳- بارگذاری

برای بارگذاری از یک بار متمرکز در وسط تیر و بر روی بال بالا (در محل تقاطع با جان تیر) استفاده شده‌است. بار کمانش، حداکثر بار متمرکز است که یک تیورق می‌تواند تحمل کند. در تمام مدل‌ها مدول الاستیسیته ( $E$ ) مصالح، برابر با  $2 \times 10^{11} \text{ kg/m}^2$  و ضریب پواسون ( $\nu$ )،  $0.33$  می‌باشد.

### ۳-۳- شرایط تکیه‌گاهی

برای تیورق‌ها از تکیه‌گاه‌های ساده و گیردار که باتکیه‌گاه‌های پیچشی ساده و گیردار ترکیب شده‌اند استفاده شده‌است. تکیه‌گاه پیچشی گیردار، نسبت به دوران حول محور طولی تیر و نیز محور ضعیف‌تیر گیردار است. تکیه‌گاه پیچشی ساده نسبت به دوران حول محور طولی تیر گیردار، اما نسبت به دوران حول محور ضعیف‌تیر آزادی باشد. به این ترتیب، در تکیه‌گاه گیردار با پیچش گیردار گره‌های موجود در تکیه‌گاه در هر ۶ درجه آزادی مقید می‌شوند. در تکیه‌گاه گیردار با پیچش ساده تنها گره‌های موجود در دو انتهای جان تیر برای درجات آزادی  $R_z$ ،  $R_y$ ،  $U_z$ ،  $U_y$  و  $U_x$  مقید می‌شوند. در تکیه‌گاه ساده با پیچش گیردار گره‌های موجود در دو انتهای جان تیر نسبت به حرکت در جهت  $Z$  و دوران حول  $x$ ،  $y$  مقید می‌شوند. ضمن اینکه گره وسط جان تیر نیز نسبت به تغییر مکان در جهات  $x$ ،  $y$  نیز مقید می‌شود. همچنین، مقدار تغییر مکان در جهت  $y$  برای گره‌های موجود در هر یک از دو بال بالا و پایین به طور جداگانه مقید شده تا با هم برابر باشند. در تکیه‌گاه ساده با پیچش ساده گره‌های موجود

که با تقسیم رابطه یاد شده بر اساس مقطع ( $S_x$ )، تنش بحرانی کمانش در ناحیه الاستیک بدست می‌آید:

$$\sigma_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^4 E^2 C_w I_y}{S_x^2 L^2} + \frac{\pi^2 E I_y G J}{S_x^2 L^2}} \quad (4)$$

در رابطه ۴،  $\sigma_{cr}$  تنش بحرانی کمانش،  $E$  مدول الاستیسیته،  $G$  مدول الاستیسیته برشی،  $I_y$  ممان اینرسی تیر حول  $y$ ،  $C_w$  ثابت پیچشی تابیدگی،  $J$  ثابت پیچشی خالص،  $S_x$  اساس مقطع تیر حول  $y$  و  $L$  طول مهار نشده تیر است. برای نیمرخ  $I$  مقادیر  $J$  و  $C_w$  عبارتند از:

$$J = \frac{1}{3} \Sigma b t^3 \quad (5) \text{ الف}$$

$$C_w = \frac{1}{2} I_f h^2 \quad (5) \text{ ب}$$

در رابطه ۵،  $b$  و  $t$  به ترتیب، عرض و ضخامت اجزای نیمرخ،  $I_f$  ممان اینرسی یک بال حول محور  $y$ ،  $h$  فاصله مرکز به مرکز بال‌ها است. به کمک روابط ریاضی می‌توان رابطه ۴ را برای حالات بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی مختلف، به صورت رابطه ۶ نوشت:

$$C_4 = C_1 \pi \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\pi}{\lambda L} \right)^2} \cdot (C_2^2 + 1) \pm C_2 \frac{\pi}{\lambda L} \right] \quad (6) \text{ الف}$$

$$\lambda^2 = \frac{1}{a^2} = \frac{G J}{E C_w} \quad (6) \text{ ب}$$

در رابطه ۶،  $C_1$  به نوع بارگذاری و شرایط تکیه‌گاه وابسته است و  $C_2$  به فاصله قائم محل تأثیر بار تا مرکز برش مقطع تیر بستگی دارد. اگر تنها لنگرهای انتهایی موجود باشند و یا بارهای ثقلی بر بال تحتانی تیر اعمال شوند، برای جمله دوم داخل پرانتز، از علامت مثبت و در صورتی که بر بال فوقانی تیر اعمال شوند، از علامت منفی استفاده می‌گردد [۴]. از (۶) در قسمت‌های بعدی برای مقایسه نتایج عددی و جواب‌های تحلیلی استفاده می‌شود.

### ۳-۳- مدلسازی عددی

#### ۳-۱- مدلسازی:

برای مدلسازی تیورق‌ها در نرم‌افزار از المان Shell ۹۳ استفاده شده‌است. مشخصات تیورق‌ها در جدول ۱ خلاصه شده است:

جدول (۱): ضخامت و ابعاد تیورق (mm)

کد مقطع	ارتفاع جان	ضخامت جان	عرض بال	ضخامت بال
I۱	۵۰۰	۲۰	۲۰۰	۲۰
I۲	۵۰۰	۱۰	۲۰۰	۱۰

PI\SCR12	18400	17364	5/62
PI\SSR12	10632	10192	4/14
PI\CCR6	128509	125042	2/70
PI\CSR6	67639	65284	3/32
PI\SCR6	96177	93971	2/29
PI\SSR6	42484	40894	5/96

مطابق جدول ۲، جواب‌های حاصل از Ansys با جواب‌های تئوریک، از همگرایی قابل قبولی برخوردارند. اختلاف جواب‌های Ansys و جواب‌های تئوریک هر چند برای حالت‌های مختلف، متفاوت است، اما به طور متوسط بین ۴ تا ۱۲ درصد می‌باشد.

### ۵- بررسی بار کمانش جانبی- پیچشی تیرورق‌ها

اثر شرایط تکیه‌گاه و انواع گشایش بر بار کمانش جانبی- پیچشی تیرهای جدارنازک در این بخش بررسی شده است. نتایج این تحلیل‌ها در نمودارها نمایش داده شده است. در این نمودارها محور عمودی نشانگر نسبت بارکمانش تیرهای با گشایش ( $P_{cr}$ ) به بار کمانش تیر بدون گشایش ( $P_{cr0}$ ) است. این نسبت، پارامتر مناسبی برای مقایسه میزان کاهش بارکمانش تیرورق می‌باشد. محور افقی بسته به پارامتر، بیانگر نسبت عمق بازشوه ارتفاع جان تیرورق و یا نسبت مساحت بازشوه به مجذور ارتفاع جان است.

#### ۵-۱- اثر ضخامت مقطع تیر

زمانی که ضخامت بال‌ها و جان تیرورق به طور همزمان، به یک نسبت بزرگ یا کوچک شوند (بدون تغییر سایر پارامترها)، درصد کاهش در بار نهایی کمانش تیر، نسبت به حالتی که در تیر گشایشی وجود ندارد، تغییر چشمگیری نمی‌کند. این مسئله در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ آمده است. این نمودارها برای تیر ۶ متری، با شرط تکیه‌گاهی دوسرگیردار و تکیه‌گاه پیچشی گیردار و یک بار نقطه‌ای در وسط دهانه‌ی تیر، در دو حالت تیر A و B با بازشوه‌های دایره‌ای، مربعی و شش ضلعی و دو مقطع I1 و I2، رسم شده‌اند (اختلاف این مقاطع در ضخامت بال و جان است). در هر دو حالت نمودارها اختلاف اندکی دارند. این اختلاف به ویژه برای توزیع گشایش B کمتر است، به گونه‌ای که برای گشایش شش ضلعی، نمودارهای دوتیر با ضخامت ۱ و ۲ سانتیمتر تقریباً برهم منطبقند. بنابراین، تغییر ضخامت تیرورق تأثیر ناچیزی بر بار کمانش دارد.

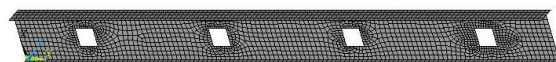
در جان تیر در دو انتها نسبت به حرکت در راستای Z و دوران حول Y مقید می‌شوند و علاوه بر آن گره وسط جان در دو انتها نسبت به تغییر مکان در راستای محورهای X و Y نیز مقید می‌شود.

### ۳-۴- نام گذاری مقاطع

برای ارائه بهتر نتایج، به هر تیرورق یک کد اختصاص داده شده است. برای معرفی نام گذاری، کد دو تیرورق، یکی با گشایش و دیگری بدون گشایش، شرح داده می‌شود. PI\CCR12 یک تیرورق بدون گشایش است. P مخفف کلمه تیرورق می‌باشد. I1 مشخصه تیرورق مطابق با جدول ۲ است. علامت بعدی، وضعیت تکیه‌گاه را نشان می‌دهد. تکیه‌گاه گیردار با C و تکیه‌گاه ساده با S بیان می‌شود. تکیه‌گاه پیچشی گیردار نیز با CR و تکیه‌گاه پیچشی ساده با علامت SR معرفی می‌شوند. در انتها طول تیر آورده می‌شود. در این مقاله، از دو طول ۶ و ۱۲ متر استفاده شده است. در کدگذاری مقاطع حاوی گشایش باید نوع گشایش و نحوه توزیع آن نیز مشخص شود (برای نمونه تیر PI\CCR12). در بخش (۳-۱) سه نوع توزیع گشایش نشان داده شده است. تیر نمونه دارای توزیع گشایش A می‌باشد. علامت بعدی، نوع گشایش را مشخص می‌کند. برای مربع S، دایره C و شش ضلعی منتظم از H استفاده می‌شود. این تیر دارای گشایش از نوع مربعی است.

### ۳-۵- مش بندی

به منظور یافتن تعداد المان‌های بهینه برای چند تیر مختلف، مش بندی‌های مختلفی اعمال شد. با توجه به نتایج این مش بندی در نظر گرفته شد: ابعاد کلی المان ۵ cm و در اطراف گشایش‌ها که تمرکز تنش وجود دارد ابعاد المان ۲/۵ cm می‌باشد. نتایج بر اساس این مش از سرعت و دقت مناسبی برخوردار است. برای نمونه، نحوه مش بندی تیر PI\CCR6 در شکل ۵ آمده است.



شکل (۵): مش بندی تیر PI\CCR6

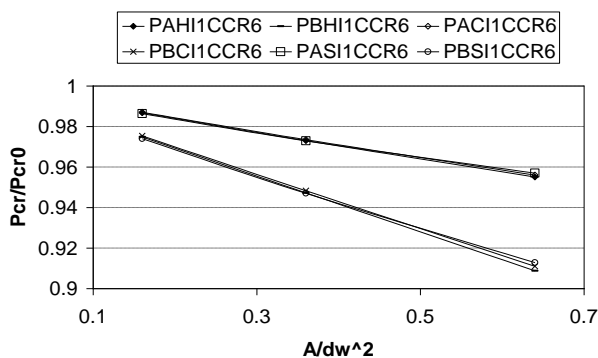
### ۴- مقایسه نتایج عددی و ریاضی

در جدول ۲ برای تیر بدون گشایش I1 مقایسه انجام شده است. در ستون دوم این جدول نتایج فرمول ریاضی مربوط به هر تیرورق آمده است [۳]. ستون سوم بار بحرانی کمانش مطابق با تحلیل انجام شده توسط نرم افزار است. در ستون چهارم اختلاف جواب تئوریک و جواب حاصل از نرم افزار نوشته شده است.

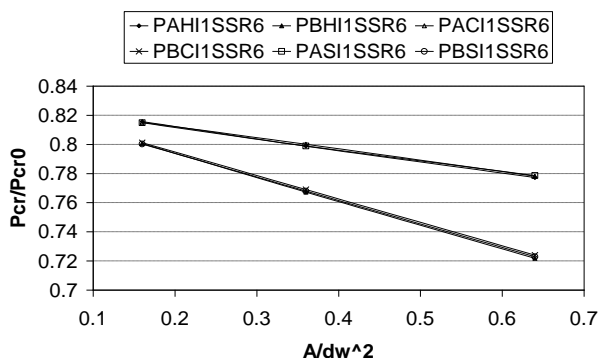
#### جدول (۲): مقایسه جواب نرم افزار با جواب تحلیلی برای مقطع I1

کد مدل	Pa (kg)	Pans (kg)	درصد اختلاف
PI\CCR12	26486	26420	0/21
PI\CSR12	19418	18952	2/39





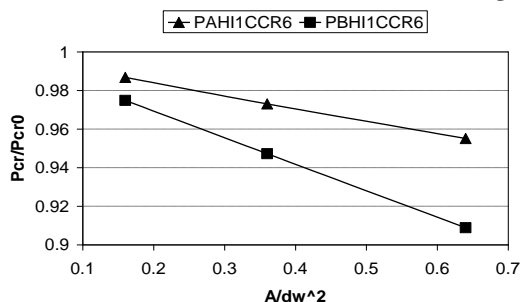
شکل (۸): اثر شکل گشایش تیر دو سر گیردار، تکیه‌گاه پیچشی گیردار



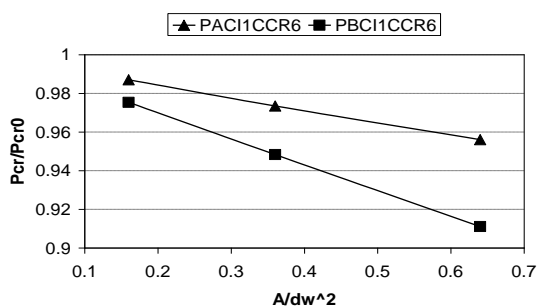
شکل (۹): اثر شکل گشایش، تیر دو سر ساده با تکیه‌گاه پیچشی ساده

### ۵-۳- اثر مساحت بازشو

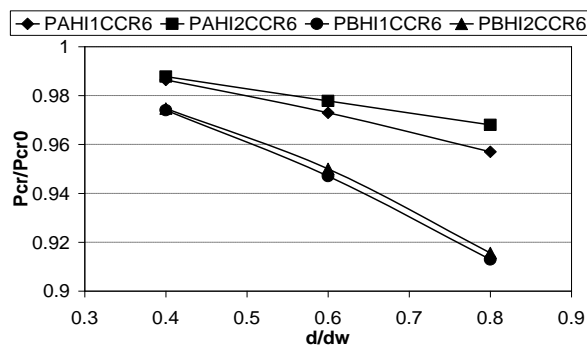
مطابق نمودارهای ۱۱، ۱۲ و ۱۳ دیده می‌شود که بارکمانش برای هر سه نوع گشایش با مساحت بازشو رابطه‌ای تقریباً خطی دارد.



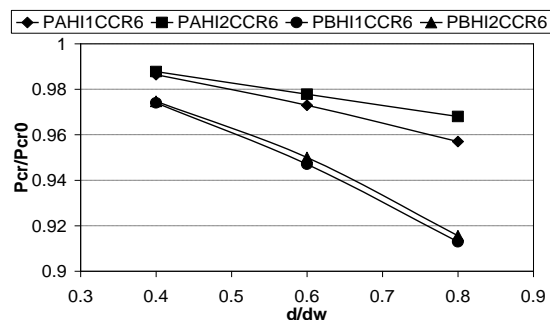
شکل (۱۰): اثر مساحت بازشو برای گشایش شش ضلعی



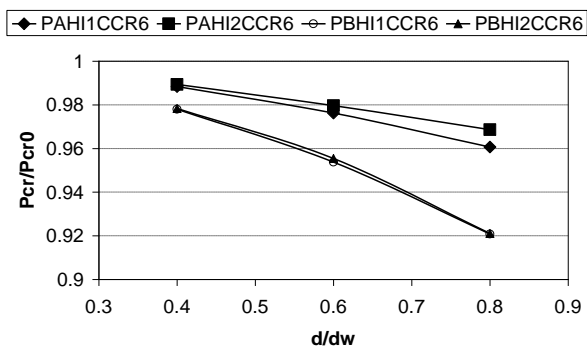
شکل (۱۱): اثر مساحت بازشو برای گشایش دایره‌ای



شکل (۵): اثر ضخامت جان برای گشایش دایره‌ای



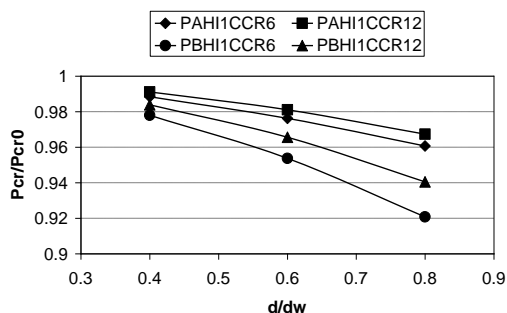
شکل (۶): اثر ضخامت جان برای گشایش مربعی



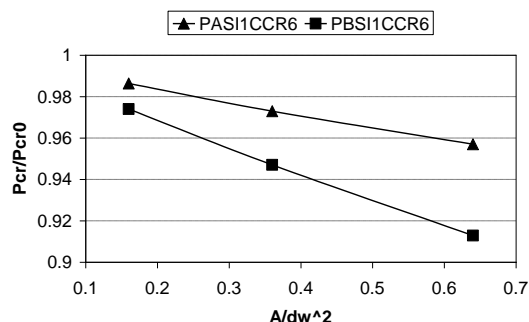
شکل (۷): اثر ضخامت جان برای گشایش شش ضلعی

### ۵-۲- اثر شکل گشایش

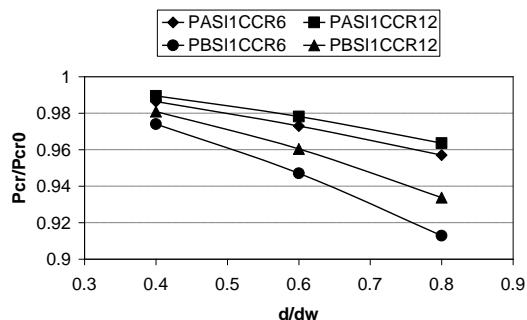
به منظور بررسی اثر شکل گشایش، از بازشوهایی با مساحت برابر استفاده شده است. مساحت‌های ۰/۰۴، ۰/۰۹ و ۰/۱۶ سانتیمتر مربع انتخاب شده است. برای تیرورق با تکیه‌گاه گیردار و تکیه‌گاه پیچشی گیردار بار بحرانی کمانش بازشوهای دایره‌ای بیش از بار کمانش در گشایش‌های مربعی و شش ضلعی است. برای تیر دو سر ساده نیز وضعیت مشابه است. اما همانطور که از نمودارهای ۹ و ۱۰ پیداست این اختلاف بسیار ناچیز است. علت آنست که به طور کلی جان تیر در مقاومت در برابر کمانش کلی نقش کمی را ایفا می‌کند و نقش اصلی را بال‌های تیر به عهده دارند. به این دلیل، در تیرهای بال پهن اختلاف ناشی از شکل گشایش قابل چشم پوشی است.



شکل (۱۴): اثر طول تیر، گشایش شش ضلعی



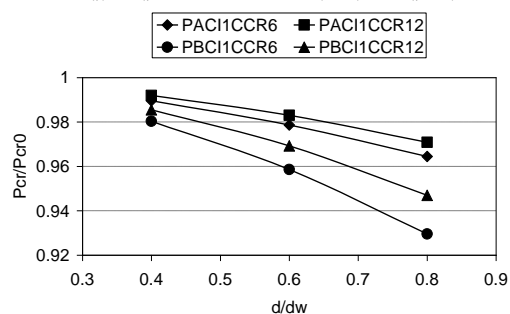
شکل (۱۲): اثر مساحت بازشو برای گشایش مربعی



شکل (۱۵): اثر طول تیر، گشایش مربعی

## ۵-۴- اثر طول تیر

مطابق شکل‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ در منحنی‌های تیرهای ۱۲ متری،  $P_{cr}/P_{cr0}$  نسبت به منحنی تیرهای ۶ متری، بیش‌تر است. همچنین می‌توان حالتی را بررسی کرد که هر چند طول تیرها متفاوت است، اما تعداد سوراخ‌ها در واحد طول برای تمامی تیرها یکسان است و یا به بیان دیگر، نسبت سطح سوراخ‌ها به سطح کل تیر مقدار ثابتی است. در این حالت، با این فرض که سوراخ‌ها در طول تیر به صورت همگن پخش شده باشند (فاصله سوراخ‌ها برابر و فاصله تکیه‌گاه تا نزدیک‌ترین بازشو نصف فاصله سوراخ باشد) و بُعد و شکل سوراخ نیز یکسان باشد، در حالتی که طول تیر بیش‌تر است، میزان افت بارکمانش نسبت به تیر بدون گشایش، مقدار بالاتری است. بنابراین، هر اندازه طول تیر بیش‌تر باشد، با فرض ثابت بودن سایر شرایط، اگر تعداد و ابعاد سوراخ‌ها در تیر ثابت باشند، درصد کاهش بار نسبت به حالتی که در تیر گشایش وجود ندارد، کمتر می‌شود. همچنین، وقتی که نسبت سطح سوراخ‌ها به سطح کل تیر ثابت باشد و سوراخ‌ها در تیر به صورت همگن پخش شده باشند و بعد و شکل سوراخ‌ها نیز برابر باشد، هر قدر که دهانه افزایش یابد، درصد کاهش بار تیر نسبت به حالت وجود گشایش بیش‌تر است.



شکل (۱۳): اثر طول تیر، گشایش دایره‌ای

## ۵-۵- اثر محل قرارگیری گشایش در طول تیر

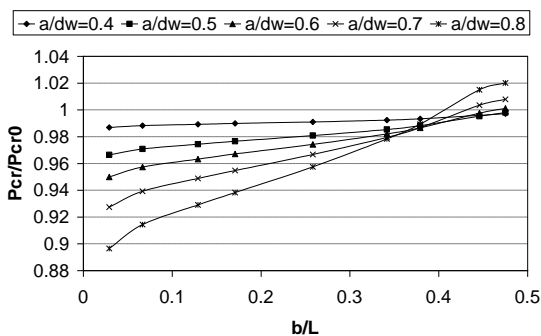
تأثیر محل قرارگیری گشایش بر بارکمانش برای حالت‌های مختلف تکیه‌گاهی در این بخش بررسی می‌شود.

### ۵-۵-۱ شرط تکیه‌گاهی گیردار با تکیه‌گاه پیچشی گیردار

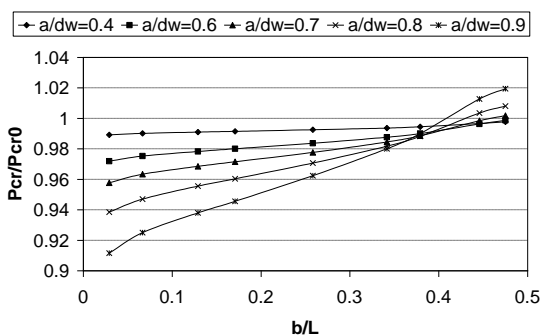
شکل‌های ۱۷، ۱۸، ۱۹ برای تیورق I۳ به طول ۱۲ متر و توزیع گشایش نوع C می‌باشند که برای گشایش‌های مختلف رسم شده است. در نمودار، مقدار b (شکل ۴) و بعد گشایش a متغیر است. برای این تکیه‌گاهی، بیشینه بارکمانش در حالتی رخ می‌دهد که گشایش در نزدیک وسط تیر قرار داشته باشد و حداقل آن در حالتی رخ می‌دهد که گشایش در محلی بین تکیه‌گاه و وسط تیر (بیشتر نزدیک به تکیه‌گاه) قرار داشته باشد. با بزرگ شدن اندازه گشایش، اختلاف بین حداقل و حداکثر بارکمانش بیش‌تر می‌شود. برای نمونه به ازای  $a/d_w = 0/4$  (بعد گشایش به ارتفاع جان مقطع)، این اختلاف ۲/۱ درصد و به ازای  $a/d_w = 0/9$ ، نزدیک ۶/۵ درصد می‌باشد. همچنین، با بزرگ شدن نسبت ابعاد بال به جان (و کم شدن نقش جان در کمانش کلی) و یا بزرگ شدن نسبت  $L/d_w$  (طول تیر به ارتفاع جان مقطع تیر)، این درصد اختلاف نیز کمتر می‌شود.

شایان ذکر است که برای این تکیه‌گاه، برای سه نوع گشایش، در سه حالت، بارکمانش تیر دارای گشایش از بارکمانش تیر بدون گشایش بیش‌تر است. این سه حالت عبارتند از تیر با بعد گشایش  $a/d_w = 0/8$  با  $b/L = 0/445$ ، تیر با بعد گشایش  $a/d_w = 0/9$  با  $b/L = 0/445$  و  $b/L = 0/475$ . این مسئله به دلیل شکل خاص کمانش

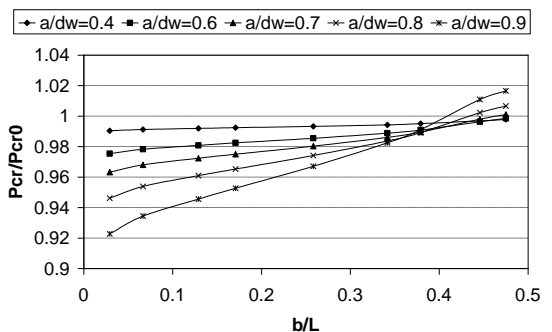
کمانش کمینه است. در این جانیز با بزرگ شدن نسبت  $a/d_w$  اختلاف بین حداکثر و حداقل بار کمانش بیشتر می شود. برای نمونه به ازای  $a/d_w = 0.7$  اختلاف بین حداکثر و حداقل بار کمانش نزدیک  $0.7$  درصد و برای  $a/d_w = 0.9$  نزدیک  $12$  درصد است. در اینجا با بزرگ شدن نسبت ابعاد بال به جان و یا بزرگ شدن نسبت  $L/d_w$  اختلاف کمتر می شود. گفتنی است که در این شرط تکیه گاهی نیز، در مواردی بار کمانش تیر با گشایش از تیر بدون گشایش بیشتر است که عبارتند از تیر با بعد گشایش  $a/d_w = 0.8$  و  $b/L = 0.445$  و  $b/L = 0.475$  و تیر با بعد گشایش  $a/d_w = 0.9$  با  $b/L = 0.445$  و  $b/L = 0.475$ . حداکثر بار کمانش برای گشایش مربع به میزان  $2$  درصد است.



شکل (۱۹): اثر محل گشایش، تیر دو سر گیردار با تکیه گاه های پیچشی ساده، گشایش مربعی

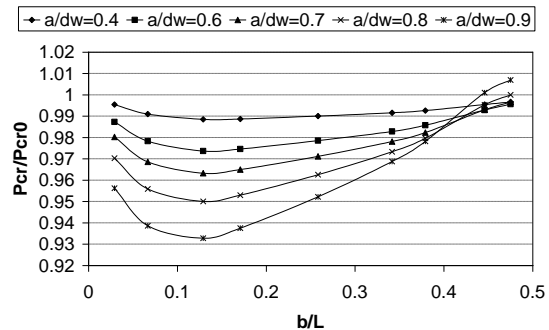


شکل (۲۰): اثر محل گشایش، تیر دو سر گیردار با تکیه گاه های پیچشی ساده، گشایش شش ضلعی

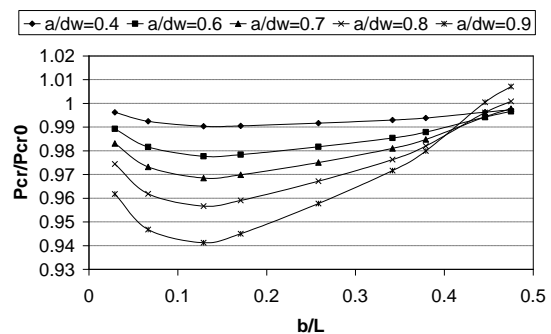


شکل (۲۱): اثر محل گشایش، تیر دو سر گیردار با تکیه گاه های پیچشی ساده، گشایش دایره ای

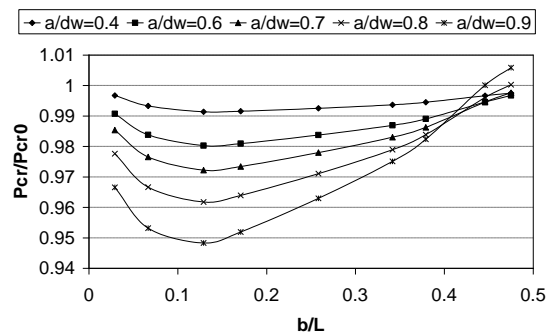
است. از آنجا که گشایش ها در محل اعمال بار قرار دارند، با افزایش نیرو، در ابتدای کار، تیر در محل نیرو تغییر شکل بزرگی می دهد. سپس تا انتهای کمانش تغییر شکل زیادی رخ نمی دهد. مقدار حداکثر بار کمانش برای گشایش شش ضلعی به میزان  $0.7$  درصد است.



شکل (۱۶): اثر محل گشایش، تیر دو سر گیردار با تکیه گاه های پیچشی گیردار، گشایش مربعی



شکل (۱۷): اثر محل گشایش، تیر دو سر گیردار با تکیه گاه های پیچشی گیردار، گشایش شش ضلعی



شکل (۱۸): اثر محل گشایش، تیر دو سر گیردار با تکیه گاه های پیچشی گیردار، گشایش دایره ای

۵-۲ شرط تکیه گاهی گیردار با تکیه گاه پیچشی ساده

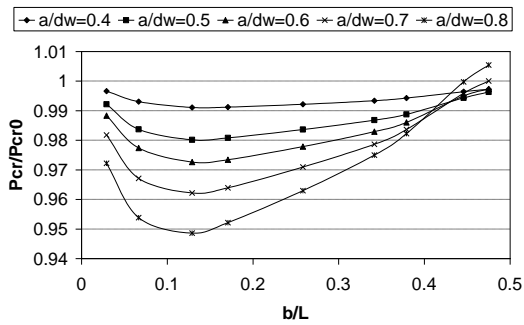
شکل های ۲۰، ۲۱، ۲۲، برای تیر ورق  $L$ ، طول  $12$  متر و توزیع گشایش نوع C می باشد که برای گشایش های مختلف رسم شده است. در هر نمودار مقدار  $b$  (شکل ۴) و بعد گشایش  $a$  متغیر است. در این حالت، زمانیکه گشایش نزدیک وسط تیر قرار دارد، بار کمانش بیشینه است و وقتی که گشایش نزدیک تکیه گاه قرار دارد، بار

### ۵-۵-۳ شرط تکیه‌گاهی ساده با تکیه‌گاه پیچشی گیردار

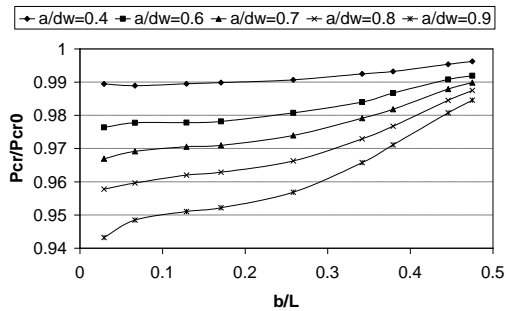
بر اساس شکل‌های ۲۳، ۲۴، ۲۵ رفتار تیر تاحدی مشابه تکیه‌گاه گیردار با تکیه‌گاه پیچشی گیردار می‌باشد. حداکثر بارکمانش زمانی رخ می‌دهد که گشایش در نزدیکی وسط تیر قرار داشته باشد و حداقل آن در حالتی رخ می‌دهد که گشایش در محلی بین تکیه‌گاه و وسط تیر (بیشتر نزدیک به تکیه‌گاه) قرار داشته باشد. با بزرگ شدن نسبت  $a/d_w$  اختلاف بین ماکزیمم و می‌نیمم بارکمانش افزایش می‌یابد. برای نسبت  $a/d_w=0.4$  این اختلاف نزدیک ۵/۰ درصد و برای  $a/d_w=0.9$  نزدیک ۳ درصد می‌باشد. مشابه حالت قبل بارکمانش برای بعضی از حالت‌ها بیش از بار تیر بدون گشایش است.

### ۵-۵-۴ شرط تکیه‌گاهی ساده با تکیه‌گاه پیچشی ساده:

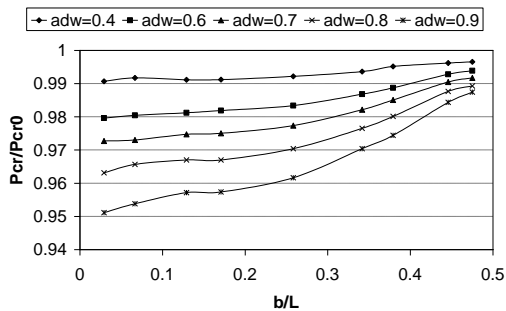
بر اساس شکل‌های ۲۶، ۲۷، ۲۸ ماکزیمم بارکمانش زمانی رخ می‌دهد که گشایش در وسط تیر قرار داشته باشد. در حالتیکه گشایش نزدیک تکیه‌گاه قرارداد، بارکمانش کمترین مقدار خود را دارد. در اینجانبین با افزایش نسبت  $a/d_w$  اختلاف بین ماکزیمم و می‌نیمم بار کمانش بیشتر می‌شود. در این حالت، برای  $a/d_w=0.4$  این اختلاف نزدیک ۵/۰ درصد و برای  $a/d_w=0.9$  نزدیک ۳ درصد است.



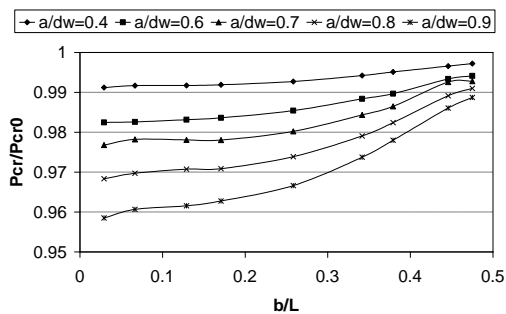
شکل (۲۴): اثر محل گشایش، تیر دو سر ساده، با تکیه‌گاه‌های پیچشی گیردار، گشایش دایره‌ای



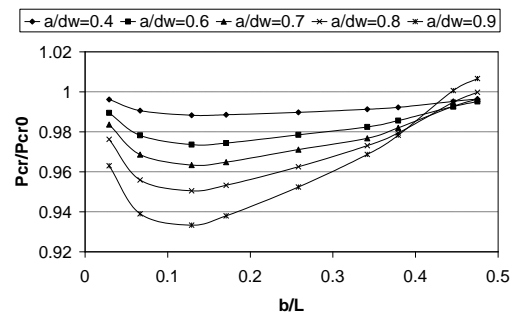
شکل (۲۵): اثر محل گشایش، تیر دو سر ساده با تکیه‌گاه‌های پیچشی ساده، گشایش مربعی



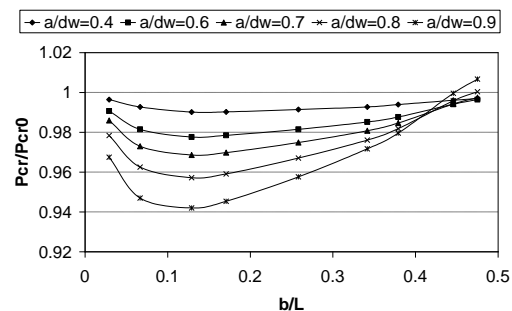
شکل (۲۶): اثر محل گشایش، تیر دو سر ساده با تکیه‌گاه‌های پیچشی ساده، گشایش شش‌ضلعی



شکل (۲۷): اثر محل گشایش، تیر دو سر ساده با تکیه‌گاه‌های پیچشی گیردار، گشایش دایره‌ای



شکل (۲۲): اثر محل گشایش، تیر دو سر ساده با تکیه‌گاه‌های پیچشی گیردار، گشایش مربعی



شکل (۲۳): اثر محل گشایش، تیر دو سر ساده با تکیه‌گاه‌های پیچشی گیردار، گشایش شش‌ضلعی

### ۶- نتایج

این مقاله، به بررسی اثر پارامترهای مختلف بر بارکمانش جانبی- پیچشی تیرهای حاوی گشایش در جان با شرایط تکیه‌گاهی دوسر ساده و دوسرگیردار پرداخته است. نتایجی که



از این مقاله حاصل شده است به شرح زیر می‌باشد:

- طبق بررسی‌هایی که انجام شد، برای مقاطع I شکل، ضخامت مقطع اثر قابل توجهی بر روی درصد کاهش بار کمانش نسبت به حالتی که در تیر گشایشی وجود ندارد، نمی‌گذارد. (البته این موضوع به شرطی درست است که نسبت ضخامت جان به ضخامت بال تغییر نکند.)

- برای مقاطع I شکل، بار کمانش با تغییرات سطح بازشو، رابطه‌ای تقریباً خطی دارد.

- با فرض توزیع متقارن و همگن گشایش با افزایش طول تیر (بدون تغییر در پارامترهای دیگر) هرگاه تعداد گشایش‌ها در طول تیر ثابت باشد، با افزایش طول تیر درصد کاهش بار بحرانی کمانش نسبت به حالتی که در تیر گشایشی وجود ندارد، افزایش و در حالتی که تعداد گشایش‌ها در طول تیر ثابت باشد، کاهش می‌یابد.

- یکی دیگر از مسائلی که در این مقاله بررسی شده است، اثر محل قرارگیری بازشو بر روی بار بحرانی کمانش می‌باشد. در مورد تیرهای I شکل در حالت تکیه‌گاه‌های پیچشی گیردار (در هر دو حالت تکیه‌گاه ساده و گیردار)، بار کمینه‌ی کمانش وقتی رخ می‌دهد که گشایش در فاصله‌ی نزدیک  $L/4$  از تکیه‌گاه قرار داشته باشد و هر چه محل گشایش از این نقطه به سمت وسط تیر و یا تکیه‌گاه حرکت کند، به بار بحرانی کمانش افزوده می‌شود. در حالت تکیه‌گاه‌های پیچشی ساده (در هر دو حالت تکیه‌گاهی) بار بیشینه‌ی کمانش، وقتی رخ می‌دهد، که گشایش در نزدیک وسط تیر قرار داشته باشد و با دور شدن گشایش از وسط تیر و نزدیک شدن به تکیه‌گاه از بار بحرانی

کمانش کاسته می‌شود. علاوه بر مطالب یاد شده، به جز حالت تکیه‌گاه ساده با تکیه‌گاه پیچشی ساده، در سایر موارد در زمانی که گشایش درست در زیر بار متمرکز قرار دارد و بعد گشایش زیاد باشد، بار کمانش تیر با گشایش از بار کمانش تیر بدون گشایش بیش‌تر خواهد شد که جزئیات در متن آمده است.

## ۷- مراجع

- [۱] Redwood, R.G. & Uenoya, M., "Critical Loads for Webs with Holes", Journal of the Structural Division, ASCE, VOL. 105, No.ST10, Proc. Paper14925, Oct., 1979, pp.2053-2067
- [۲] Coul, A. & Alvarez, M.C., "Lateral Buckling of Beams Containing Openings", Thesis presented to the University of Strathclyde, at Glasgow, Scotland, 1978, in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science
- [۳] Thevendran, V. & Shunmugam, N.E., "Lateral Buckling of Narrow Rectangular Beams Containing openings", Journal of Computers and Structures, VOL. 43, No. 2, 1992, pp. 247-254
- [۴] Chen, W.F. and Lui, E.M., "Structural Stability, Theory and Implementation", 1<sup>st</sup> Edition, Elsevier, 1987
- [۵] Tong, G. and Zhang, L., "A new derivation of the buckling theory of thin walled beams", Journal of Advances in Steel Structures, ICASS, 2002, pp129-137
- [۶] Chu, X. and Rickard, J. and Li, L., "Influence of lateral restrain on lateral torsional buckling of cold formed steel purlins", Journal of Thin-Walled Structures, V. 43, Issue 5, 2005, pp800-810

