مطالعه‌ي عددي پايداري جانبي – پيچشي تيرورق‌هاي جدار نازک حاوي گشايش در جان

بابک پورسرتيپ[i]; محمد زمان کبير[ii]

چکيده

کمانش جانبي– پيچشي تيرها يکي از مواردی است که در طراحي تيرهاي جدار نازک موثر مي‌باشد. وجود گشايش در تيرها، از پارامترهايي است که مي‌تواند در اين مورد مهم باشد. اين گشايش‌ها به دليل عبور تاسيسات خاص، دسترسي به تير و يا صرفه‌جويي در مصالح ايجاد مي‌شوند. در زمينه‌ي اثر گشايش، در حالت رفتار الاستيک و مسئله کمانش جانبي- پيچشي، کمتر کار شده است.

هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسي اثر پارامترهاي مختلف بر بار کمانش جانبي– پيچشي تيرورق‌ها مي‌باشد. بار کمانش جانبي– پيچشي بيش از ۷۰۰ تيرورق که حاوي گشايش‌ها، ابعاد و مشخصات مختلف مي‌باشند، به کمک نرم‌افزارAnsys5,4 بدست آمده و نتايج آنها با يکديگر مقايسه شده است. سه نوع گشايش مربعي، دايره‌اي و شش‌ضلعي‌منتظم با ابعادِ مختلف در نظر گرفته شده است. نحوه‌ي تغييرات بار کمانش با تغيير ابعاد گشايش، تغيير ضخامت ورق‌ها، شکل گشايش‌ها، تغيير مساحت بازشوها، تغيير طول تير و تغيير شرايط تکيه گاهي بدست آمده است. در پايان نيز موقعيت بهينه براي ايجاد گشايش در تير با توجه به شرايط تکيه‌گاهي و نوع گشايش مطرح شده است.

کلمات کليدي

تيرورق - گشايش - کمانش جانبي– پيچشي - جان - جدار نازک - تکيه‌گاه

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 Ansys5.4 . 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.

[i] دانش‌اندوخته کارشناسي مهندسي ارشد سازه، دانشگاه صنعتی اميرکبير(پلي‌تکنيک تهران)، Email: b_poursartip@yahoo.com

[ii] دانشيار دانشکده مهندسي عمران و محيط زيست، دانشگاه صنعتی اميرکبير(پلي‌تکنيک تهران)، Email: mz-kabir@aut.ac.ir

KEYWORDS

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

۱- مقدمه

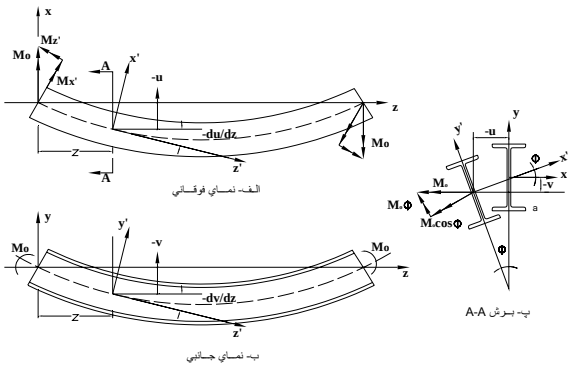
از جمله‌مسائل‌مهم درطراحي تيرها، كمانش جانبي - پيچشي آنهاست كه در مورد تيرهاي عميق با مقطع جدار نازك اهميت پيدامي‌كند. درموردمسئله‌كمانش جانبي- پيچشي تيرهاتحقيقاتي انجام شده‌است. اثرپارامترهاي‌مختلف از قبيل شرايط تكيه‌گاهي و شكل‌بارگذاري بررسي شده‌است. اما تمامي پارامترهاي موثر دراين‌زمينه مورد بررسي قرار نگرفته‌است. يكي‌ازپارامترهاي مهم، وجود گشايش در تير است. اين گشايش‌ها به دليل عبور تاسيسات‌خاص، دسترسي‌به تيروياصرفه‌جويي درمصالح ايجاد مي‌شود. تحقيقات انجام شده در اين زمينه شامل بررسي رفتار الاستوپلاستيك تير، به‌خصوص درنزديكي‌گشايش‌ها و اثرآن بر مقدار باركمانش مي‌باشد. اما درمورد اثرگشايش درحالت رفتار الاستيك و مسئله كمانش جانبي- پيچشي كمتر كار شده است. Redwood and Uenoya با استفاده‌از روش اجزا محدود، مسئله پايداري يك صفحه‌ي سوراخدار با بارگذاري در كناره‌هاي صفحه و شرايط تكيه‌گاهي مختلف را بررسي كردند[۱].

Coul and Alvarez بر مبناي كارهاي آزمايشگاهي بار كمانش جانبي- پيچشي تير با مقطع مستطيلي باريك را كه حاوي بازشوهاي دايره‌اي و مستطيلي بود بدست آورند و نتايج را با فرمول تقريبي كه خود ارائه كرده بودند مقايسه كردند. هر چند كه جواب‌هاي اين فرمول با تقريب خوبي با نتايج آزمايش منطبق است، اما از آنجا كه اثر بسياري از پارامترها را در نظر نگرفته است(مانند محل قرارگيري سوراخ‌ها)، كامل نمي‌باشد[۲].

Thevemdran and Shanmugam برمبناي روش انرژي، روشي براي بدست‌آوردن باركمانش جانبي- پيچشي تيرهاي عميق با مقطع مستطيلي‌نازك، حاوي گشايش‌هاي‌مربعي و دايره‌اي شكل درطول‌تير، درحالتي كه تيرمستطيلي و نازك باشد، ارائه‌دادند. آنها تير را در دو حالت تكيه‌گاهي يكسرگيردار، يك‌سرآزاد و دو سرساده و با يك بارنقطه‌اي در انتها و وسط تير در نظر گرفتند و جواب‌هاي خود را با نتايج آزمايش مقايسه كردند[۳].

۲- بررسي تحليلي كمانش جانبي تير با نيمرخ I متقارن

دريك‌تير ساده تحت‌خمش‌خالص، لنگرخمشي در طول تير ثابت‌مي‌باشد. درنتيجه نيروي‌فشاري ثابتي دركل‌طول مهارنشده بال‌فشاري وجود دارد. بنابراين‌احتمال وقوع‌كمانش جانبي بيش ازحالتي خواهدبود كه درآن لنگرخمشي درطول مهارنشده‌تغيير مي‌نمايد. درشكل ۱ تير I شكل تحت تاثير لنگرخمشي M_0 در دو انتها در صفحه yz قراردارد. دستگاه مختصات x'y'z' مربوط به وضعيت اوليه تير، قبل از كمانش مي‌باشد. حال فرض مي‌شود كه تحت لنگرخمشي M_0، تير كمانش جانبي نمايد.



شكل (۱): كمانش جانبي تير I شكل[۴]

شكل ۱ وضعيت مقطعي نظير A-A را قبل و بعد از كمانش جانبي نشان مي‌دهد. اگر دستگاه مختصات حالت كمانش يافته را با xyz نشان داده و لنگر خمشي M_0 روي اين دستگاه جديد تصوير گردد، ديده مي شود كه در حالت كمانش يافته، تير تحت لنگرهاي خارجي به شرح موجود در روابط ۱ و ۲ مي‌باشد:

$$(M_{x'})_{ext} = M_0 \cos\varphi \qquad \text{الف – (۱)}$$

$$(M_{y'})_{ext} = M_0 \sin\varphi = M_0 \qquad \text{ب – (۱)}$$

$$(M_{z'})_{ext} = -\frac{du}{dz} M_0 \qquad \text{ج - (۱)}$$

مقادير لنگر هاي داخلي عبارتند از:

$$(M_{x'})_{int} = -EI_x \frac{d^2\upsilon}{dz^2} \qquad \text{الف – (۲)}$$

$$(M_{y'})_{int} = EI_y \frac{d^2u}{dz^2} \qquad \text{ب – (۲)}$$

$$(M_{z'})_{int} = GJ \frac{d\gamma}{dz} \qquad \text{ج – (۲)}$$

مطابق شكل ۱، u و v به‌ترتيب جابجايي افقي‌وقائم مي‌باشند. بامساوي قراردادن لنگرهاي داخلي لنگرهاي خارجي سه معادله‌ي ديفرانسيل بدست مي‌آيد. با جايگذاري شرايط مرزي و

حل معادلات ديفرانسيل، مي‌توان به روابط ۳ و ۴ رسيد[۴]:

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

كه با تقسيم رابطه يادشده بر اساس مقطع (S_x)، تنش بحراني كمانش در ناحيه الاستيک بدست مي‌آيد:

$$\sigma_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^4 E^2 C_w I_y}{S_x^2 L^2} + \frac{\pi^2 E I_y G J}{S_x^2 L^2}} \qquad (۴)$$

دررابطه ۴، σ_{cr} تنش‌بحراني‌كمانش، E مدول‌الاستيسيته، G مدول الاستيسيته‌برشي، I_y ممان‌اينرسي تير حول y، C_w ثابت پيچشي تابيدگي، J ثابت پيچشي خالص، S_x اساس مقطع تير حول y و L طول‌مهارنشده‌تير است. براي‌نيمرخ I، مقادير J و C_w عبارتند از:

$$J = \frac{1}{3}\Sigma bt^3 \qquad (۵) - الف$$

$$C_w = \frac{1}{2} I_f h^2 \qquad (۵) - ب$$

در رابطه ۵، b وt به ترتيب، عرض‌وضخامت اجزاي نيمرخ، I_f ممان‌اينرسي يک بال حول محور y، h فاصله مركزبه‌مركز بال‌ها است. به كمک روابط رياضي مي‌توان رابطه ۴ رابراي حالاتِ بارگذاري و شرايط‌تكيه‌گاهي‌مختلف، به‌صورت رابطه ۶ نوشت:

$$C_4 = C_1 \pi \left[\sqrt{1+\left(\frac{\pi}{\lambda L}\right)^2 (C_2^2+1)} \pm C_2 \frac{\pi}{\lambda L}\right] \qquad (۶) - الف$$

$$\lambda^2 = \frac{1}{a^2} = \frac{G J}{E C_w} \qquad (۶) - ب$$

در رابطه ۶، C_1 به‌نوع بارگذاري‌و شرايط‌تكيه‌گاه وابسته‌است و C_2 به‌فاصله قائم‌محل‌تاثيربار تامركز برش‌مقطع‌تير بستگي‌دارد. اگر تنها لنگرهاي انتهايي موجود باشند و يا بارهاي ثقلي بر بال‌تحتاني تير اعمال‌شوند، براي جمله دوم داخل پرانتز، از علامت مثبت و درصورتي كه بر بال فوقاني تير اعمال شوند، از علامت منفي استفاده مي‌گردد[۴]. از (۶) در قسمت‌هاي بعدي براي مقايسه نتايج عددي و جواب‌هاي تحليلي استفاده مي‌شود.

۳- مدلسازي عددي

۳-۱- مدلسازی:

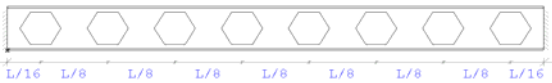
برای مدلسازی تیرورق‌ها در نرم‌افزار از المان Shell۹۳ استفاده شده‌است. مشخصات تیرورق‌ها در جدول ۱ خلاصه شده است:

جدول (۱): ضخامت و ابعاد تیرورق **(mm)**

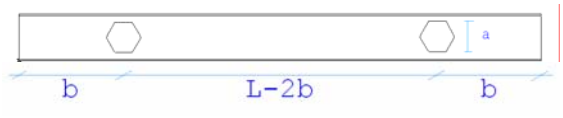
کد مقطع	ارتفاع جان	ضخامت جان	عرض بال	ضخامت بال
I۱	۵۰۰	۲۰	۲۰۰	۲۰
I۲	۵۰۰	۱۰	۲۰۰	۱۰
I۳	۵۰۰	۲۰	۱۰۰	۲۰

سه نوع گشايش مربعي، دايره‌اي و شش‌ضلعي‌منتظم در جان تيرورق‌ها درنظر گرفته‌شده‌است. نحوه آرايش‌آن‌ها برای نمونه، برای گشايش شش‌ضلعي‌منتظم در شكل‌هاي ۲ تا ۴ نشان داده شده است. L طول تير مي‌باشد كه برابر با ۶ يا ۱۲ متر است.

شكل (۲): تير A



شكل (۳): تير B



شكل (۴): تير C

۳-۲- بارگذاري

براي بارگذاری ازيک بارمتمركز در وسط تير و برروي بال بالا (درمحل تقاطع با جان تير) استفاده شده‌است. بار كمانش، حداكثر بار متمركزي است كه يک تيرورق مي‌تواند تحمل كند.

در تمام مدل‌ها مدول الاستيسيته (E) مصالح، برابر با $۲*۱۰^{۱۰}$ $kg/m^۲$ و ضريب پواسون (υ)، ۰/۳۳ مي‌باشد.

۳-۳- شرايط تكيه‌گاهي

براي تيرورق‌ها ازتكيه‌گاه‌هاي‌ساده‌وگيردار كه‌باتكيه‌گاه‌هاي پيچشي‌ساده وگيردار تركيب‌شده‌اند استفاده‌شده‌است. تكيه‌گاه پيچشي‌گيردار، نسبت‌به دوران‌حول‌محور طولي تير و نيز محور ضعيف‌تيرگيردار است. تكيه‌گاه‌پيچشي‌ساده‌نسبت‌به‌دوران حول محورطولي‌تيرگيردار، اما نسبت به دوران‌حول‌محور ضعيف‌تير آزادمي‌باشد. به‌اين‌ترتيب، درتكيه‌گاه گيردار با پيچش‌گيردار گره‌هاي موجود درتكيه‌گاه درهر ٦ درجه‌آزادي‌مقيدمي‌شود. در تكيه‌گاه‌گيردارباپيچش‌ساده تنهاگره‌هاي‌موجود دردوانتهای‌جان تير براي‌درجات‌آزادي R_z و R_y، U_z، U_y و U_x مقيدمي‌شوند. در تكيه‌گاه‌ساده‌باپيچش‌گيردار گره‌هاي‌موجود دردوانتهای‌جان تير نسبت‌به‌حركت‌درجهت z و دوران‌حول x، y مقيدمي‌شوند. ضمن

اینکه‌گره وسط‌جان تیر نیز نسبت‌به تغییرمکان‌درجهات x، y نیز مقیدمي‌شود. همچنین، مقدارتغییرمکان‌درجهت y براي‌گره‌هاي موجود درهریك ازدوبال‌بالاوپایین به‌طورجداگانه‌مقیدشده تا با هم برابرباشند. درتکیه‌گاه‌ساده با پیچش‌ساده گره‌هاي موجود در جان‌تیر دردوانتها نسبت‌به حرکت درراستاي z و دوران‌حول y مقیدمي‌شوند و علاوه بر آن گره وسط جان دردو انتها نسبت به تغییر مکان در راستای محورهاي x و y نیز مقیدمي‌شود.

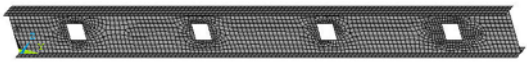
۳-۴- نام گذاري مقاطع

برای ارائه‌بهترنتایج، به‌هر تیرورق یک‌کد اختصاص‌داده‌شده است. براي‌معرفی نام‌گذاري، کد دو تیرورق، یکي با گشایش و دیگري‌بدون‌گشایش، شرح‌داده‌مي‌شود. PI۱CCR۱۲ یک‌تیرورق بدون‌گشایش‌است. P مخفف‌کلمه تیرورق‌مي‌باشد. I۱ مشخصه تیرورق مطابق‌با جدول ۲ است. علامت‌بعدي، وضعیت‌تکیه‌گاه را نشان‌مي‌دهد. تکیه‌گاه‌گیردار با C و تکیه‌گاه‌ساده‌با S بیان مي‌شود. تکیه‌گاه پیچشي‌گیردار نیز با CR و تکیه‌گاه پیچشي ساده با علامتِ SR معرفی‌مي‌شوند. در انتها طول تیر آورده مي‌شود. دراین‌مقاله، از دو طول ۶ و ۱۲ متراستفاده‌شده‌است.

درکدگذاري مقاطع حاوي گشایش‌باید نوع گشایش و نحوه توزیع آن نیزمشخص‌شود(برای نمونه تیر PASI۱CCR۱۲). در بخش(۳-۱) سه نوع‌توزیع گشایش‌نشان‌داده‌شده‌است. تیر نمونه داراي توزیع گشایش A مي‌باشد. علامت‌بعدي، نوع گشایش رامشخص‌مي‌کند. براي‌مربع S، دایره C و شش‌ضلعي‌منتظم از H استفاده مي‌شود. این تیر داراي گشایش از نوع مربعي است.

۳-۵- مش بندي

به‌منظور یافتن‌تعداد المان‌هاي بهینه برای چند تیر مختلف، مش‌بندي‌هاي مختلفي اعمال شد. با توجه به نتایج این مش‌بندي درنظرگرفته شد: ابعادکلي المان cm ۵ و در اطراف گشایش‌ها که تمرکزتنش وجود دارد ابعاد المان cm ۲/۵ مي‌باشد. نتایج بر اساس این مش ازسرعت ودقت مناسبي‌برخورداراست. برای نمونه، نحوه مش‌بندی تیر PASI۱CCR۶ در شکل ۵ آمده است.



شکل (۵): مش‌بندي تیرPASI۱CCR۶

۴- مقایسه نتایج عددي و ریاضي

در جدول ۲ برای تیر بدون گشایش I۱ مقایسه انجام شده است. درستون دوم این‌جدول نتایج فرمول‌ریاضي مربوط به‌هر تیرورق آمده است[۳]. ستون سوم باربحراني کمانش مطابق با تحلیل انجام شده توسط‌نرم‌افزار است. درستون چهارم اختلاف جواب تئوریک و جواب حاصل از نرم‌افزار نوشته شده است.

جدول (۲): مقایسه جواب نرم افزار با جواب تحلیلي براي مقطع **I۱**

کد مدل	Pa (kg)	Pans (kg)	درصد اختلاف
PI۱CCR۱۲	۲۶۴۸۶	۲۶۴۳۰	۰/۲۱
PI۱CSR۱۲	۱۹۴۱۸	۱۸۹۵۳	۲/۳۹
PI۱SCR۱۲	۱۸۴۰۰	۱۷۳۶۴	۵/۶۳
PI۱SSR۱۲	۱۰۶۳۲	۱۰۱۹۲	۴/۱۴
PI۱CCR۶	۱۲۸۵۰۹	۱۲۵۰۴۲	۲/۷۰
PI۱CSR۶	۶۷۶۳۹	۶۵۳۸۴	۳/۳۳
PI۱SCR۶	۹۶۱۷۷	۹۳۹۷۱	۲/۲۹
PI۱SSR۶	۴۳۴۸۴	۴۰۸۹۴	۵/۹۶

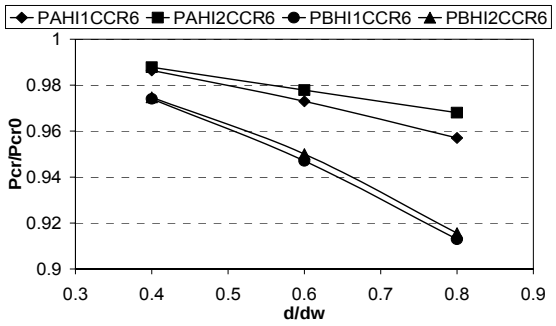
مطابق جدول ۲، جواب‌هاي‌حاصل‌از Ansys با جواب‌هاي تئوریک، ازهمگرایي‌قابل‌قبولي‌برخوردارند. اختلاف جواب‌هاي Ansys و جواب‌هاي تئوریک هر چند براي حالت‌هاي مختلف، متفاوت است، اما به طور متوسط بین ۴ تا ۱۲ درصد مي‌باشد.

۵- بررسي بار کمانش جانبي- پیچشي تیرورق‌ها

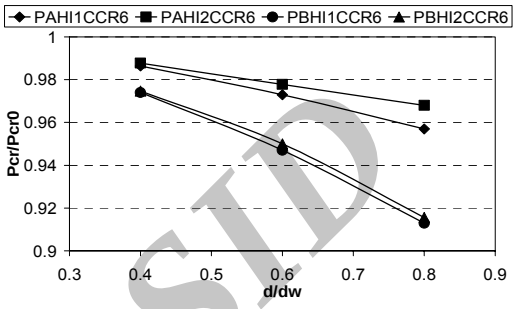
اثرشرایط تکیه‌گاه و انواع گشایش بر بار کمانش جانبي- پیچشي تیرهاي جدارنازک در این بخش بررسی‌شده‌است. نتایج این تحلیل‌ها درنمودارها نمایش داده‌شده است. در این نمودارها محورعمودي نشانگرنسبت بارکمانش تیرهاي با گشایش(P_{cr}) به بار کمانش تیر بدون گشایش(P_{cr0}) است. این‌نسبت، پارامتر مناسبي براي مقایسه‌میزان کاهش بارکمانش تیرورق مي‌باشد. محورافقي‌بسته‌به‌پارامتر، بیانگرنسبت‌عمق‌بازشوبه ارتفاع جان تیرورق و یا نسبت مساحت بازشو به مجذور ارتفاع جان است.

۵-۱- اثرضخامت‌مقطع تیر

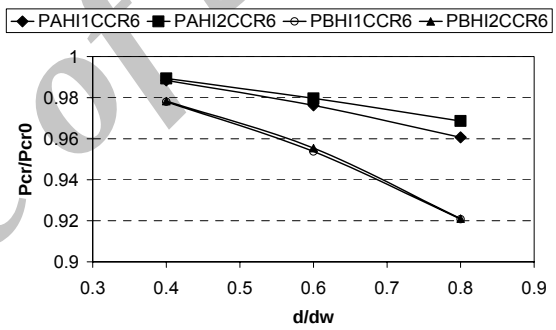
زمانی که‌ضخامت‌بال‌ها و جان‌تیرورق به‌طورهمزمان، به‌یک نسبت‌بزرگ یاکوچك شوند(بدون تغییر سایر پارامترها)، درصد کاهش دربارنهایي‌کمانش‌تیر، نسبت به حالتي که‌درتیر گشایشي وجودندارد، تغییرچشمگیری‌نمي‌کند. این‌مسئله درشکل‌هاي ۶، ۷ و ۸ آمده‌است. این‌نمودارها براي تیر۶متری، باشرط تکیه‌گاهي دوسرگیردار و تکیه‌گاه‌پیچشي گیردار ویك‌بار نقطه‌اي دروسط دهانه‌ي تیر، دردوحالت تیر A و B با بازشوهاي دایره‌اي، مربعي و شش‌ضلعي و دومقطع I۱ و I۲، رسم‌شده‌اند(اختلاف این مقاطع در ضخامت بال‌وجان‌است). درهردوحالت نمودارها اختلاف‌اندکي دارند. این اختلاف به ویژه برای‌توزیع‌گشایش B کمتراست، به‌گونه‌اي‌که براي‌گشایش شش ضلعي، نمودارهاي دوتیر باضخامت ۱ و۲ سانتیمتر تقریباً برهم منطبقند. بنابراین، تغییر ضخامت تیرورق تاثیر ناچیزي بر بار کمانش دارد.



شکل (۵): اثر ضخامت جان براي گشايش دايره‌اي



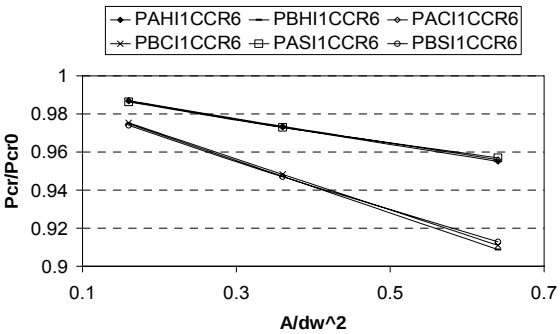
شکل (۶): اثر ضخامت جان براي گشايش مربعي



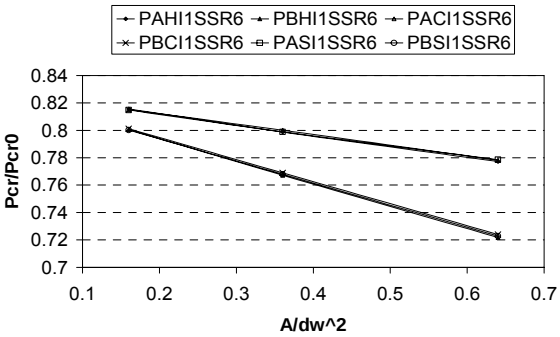
شکل (۷): اثر ضخامت جان براي گشايش شش‌ضلعي

۵-۲- اثر شکل گشايش

به‌منظوربررسي اثرشکل گشايش، ازبازشوهايي با مساحت برابراستفاده‌شده‌است. مساحت‌های ۰/۰۴، ۰/۰۹و۰/۱۶سانتيمتر مربع انتخاب‌شده‌است. براي تيرورق با تکيه‌گاه گيردارو تکيه‌گاه پيچشي‌گيردار باربحراني کمانش بازشوهاي دايره‌اي بيش‌از بار کمانش درگشايش‌هاي مربعي وشش‌ضلعي‌است. براي‌تيردوسر ساده نيزوضعيت مشابه‌است. اما همانطور که از نمودارهاي ۹و ۱۰ پيداست اين‌اختلاف‌بسيارناچيزاست. علت‌آنست‌که‌به طورکلي جان‌تير درمقاومت دربرابر کمانش کلي نقش‌کمي را ايفامي‌کند و نقش‌اصلي را بال‌هاي تير به‌عهده‌دارند. به‌اين‌دليل، در تيرهاي بال پهن اختلاف ناشي از شکل گشايش قابل‌چشم پوشی است.



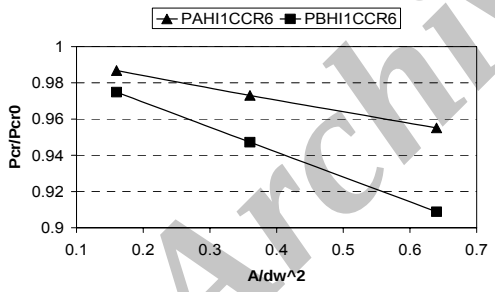
شکل (۸): اثر شکل گشايش تير دو سر گيردار، تکيه‌گاه پيچشي گيردار



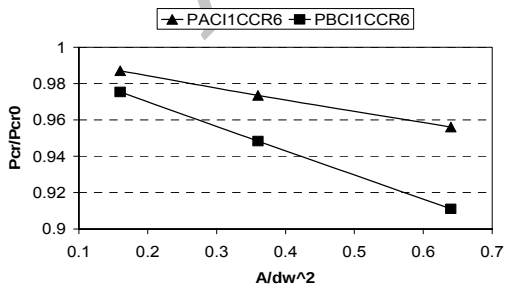
شکل(۹): اثر شکل گشايش، تير دو سر ساده با تکيه‌گاه پيچشي ساده

۵-۳- اثر مساحت بازشو

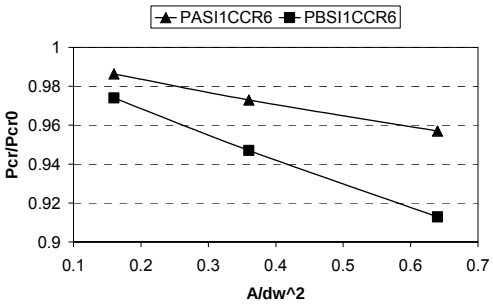
مطابق‌نمودارهاي۱۱،۱۲ و۱۳ ديده‌مي‌شود که‌بارکمانش‌براي هرسه نوع‌گشايش با مساحت بازشو رابطه‌اي تقريباً خطي دارد.



شکل (۱۰): اثر مساحت بازشو براي گشايش شش‌ضلعي



شکل (۱۱): اثر مساحت بازشو براي گشايش دايره‌اي

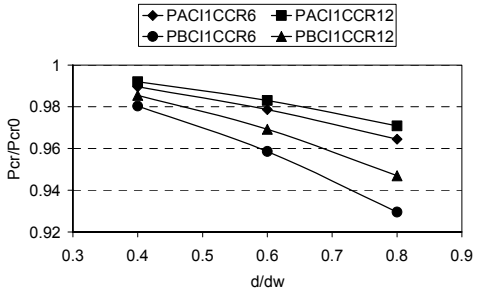


شكل (۱۲): اثر مساحت بازشو براي گشايش مربعي

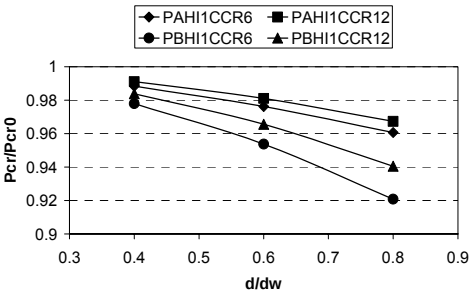
٥-٤- اثر طول تير

مطابق‌شكل‌هاي۱۴، ۱۵ و۱۶ درمنحني‌هاي تيرهاي ۱۲متري، P_{cr}/P_{cr0} نسبت به‌منحني تيرهاي ۶متري، بيش‌تر است. همچنين مي‌توان حالتي‌رابررسي‌كرد كه هرچندطول تيرها متفاوت است، اماتعداد سوراخ‌ها در واحدطول براي‌تمامي تيرها يكسان‌است و يا به‌بيان‌ديگر، نسبت سطح سوراخ‌ها به سطح كل‌تير مقدارثابتی است. دراين‌حالت، بااين‌فرض‌كه سوراخ‌ها درطول تير به‌صورت همگن‌پخش شده‌باشند(فاصله سوراخ‌ها برابر وفاصله تكيه‌گاه تا نزديک‌ترين بازشو نصف فاصله‌سوراخ‌باشد) و بعد وشكل سوراخ نيزيكسان‌باشد، درحالتي كه‌طول‌تير بيش‌تراست، ميزان افت بارکمانش نسبت به‌تير بدون گشايش، مقدار بالاتری است.

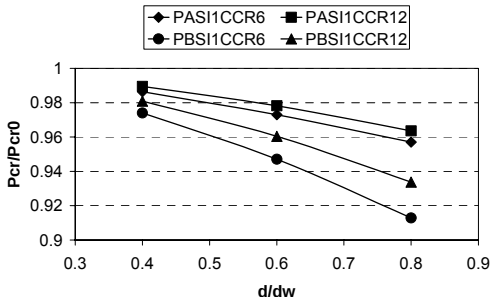
بنابراين، هراندازه طول‌تير بيش‌ترباشد، بافرض ثابت بودن سايرشرايط، اگرتعداد وابعادسوراخ‌ها درتير ثابت‌باشند، درصد كاهش بار نسبت به‌حالتي كه درتيرگشايش وجودندارد، كمتر مي‌شود. همچنين، وقتي‌كه نسبت سطح‌سوراخ‌ها به سطح كل‌تير ثابت‌باشد و سوراخ‌ها درتيربه صورت همگن‌پخش‌شده‌باشند و بعد و شكل‌سوراخ‌ها نيزبرابرباشد، هرقدركه دهانه افزايش يابد، درصدكاهش بارتير نسبت به‌حالت وجودگشايش بيشتر است.



شكل (۱۳): اثر طول تير، گشايش دايره‌اي



شكل (۱۴): اثر طول تير، گشايش شش‌ضلعي



شكل (۱۵): اثر طول تير، گشايش مربعي

٥-٥- اثر محل قرارگيري گشايش در طول تير

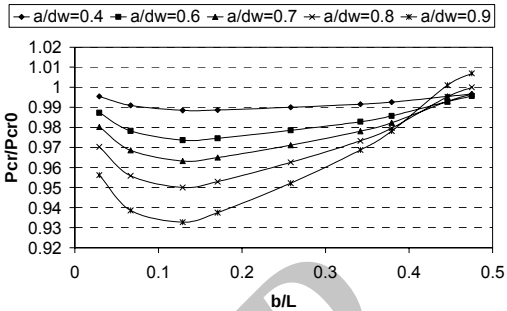
تاثير محل قرارگيري گشايش بر بار كمانش براي حالت‌هاي مختلف تكيه‌گاهي در اين بخش بررسی می‌شود.

٥-٥-١ شرط تكيه‌گاهي گيردار با تكيه‌گاه پيچشي گيردار

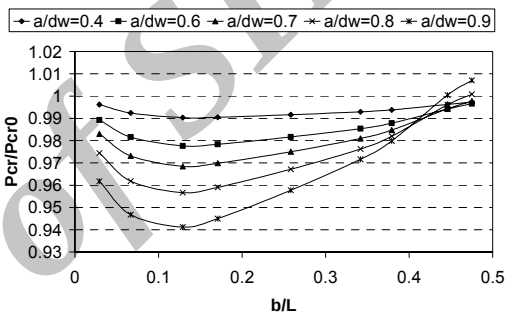
شكل‌هاي۱۷، ۱۸، ۱۹ براي‌تيرورق I۳ به‌طول ۱۲متر وتوزيع گشايش نوع C مي‌باشند كه‌براي‌گشايش‌های مختلف رسم‌شده است. درهرنمودار، مقدارb(شكل ۴) وبعد گشايش a متغير است. براي‌اين تكيه‌گاهي، بيشينه بارکمانش درحالتي رخ‌مي‌دهد كه گشايش درنزديك وسط تير قرارداشته‌باشد وحداقل آن‌درحالتي رخ‌مي‌دهد كه گشايش در محلي بين تكيه‌گاه و وسط‌تير (بيشتر نزديك‌به‌تكيه‌گاه) قرارداشته‌باشد. با بزرگ شدن اندازه گشايش، اختلاف‌بين حداقل و حداكثربارکمانش بيشترمي‌شود. برای‌نمونه به‌ازاي a/d_w=۰/٤ (بعد گشايش به ارتفاع جان‌مقطع)، اين اختلاف ۲/۱درصد و به‌ازاي a/d_w=۰/۹، نزديک ٦/٥درصدمي‌باشد. همچنين، با بزرگ‌شدن نسبت ابعاد بال به جان (و كم شدن نقش جان در كمانش كلي) و يا بزرگ شدن نسبت L/d_w (طول تير به ارتفاع جان مقطع تير)، اين درصد اختلاف نيز كمتر مي‌شود.

شايان ذكراست كه برای اين‌تكيه‌گاه، براي سه نوع گشايش، در سه‌حالت، بارکمانش تير داراي‌گشايش ازبار كمانش تيربدون گشايش بيشتراست. اين‌سه حالت عبارتند ازتير بابعد گشايش a/dw=۰/۸ با b/L=۰/۴۴۵، تير با بعد گشايش a/dw=۰/۹ با b/L=۰/۴۴۵ وb/L=۰/۴۷۵. اين‌مسئله به‌دليل شكل خاص‌كمانش

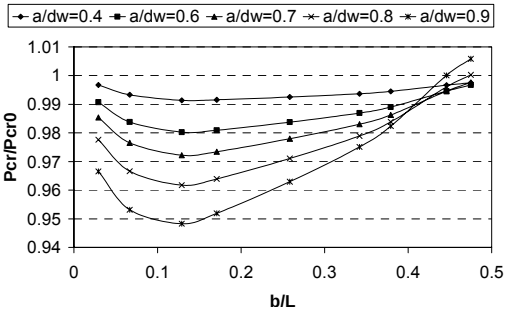
است. ازآنجا که‌گشايش‌ها درمحل اعمال‌بارقراردارند، با افزايش نيرو، درابتداي‌کار، تير درمحل‌نيرو تغييرشکل‌بزرگي‌مي‌دهد. سپس تاانتهاي‌کمانش‌تغييرشکل زيادي رخ‌نمي‌دهد. مقدارحداکثر بارکمانش براي‌گشايش شش‌ضلعي به ميزان ۰/۷ درصد است.



شکل (۱۶): اثر محل گشايش، تير دو سر گيردار با تکيه‌گاه‌هاي پيچشي گيردار، گشايش مربعي



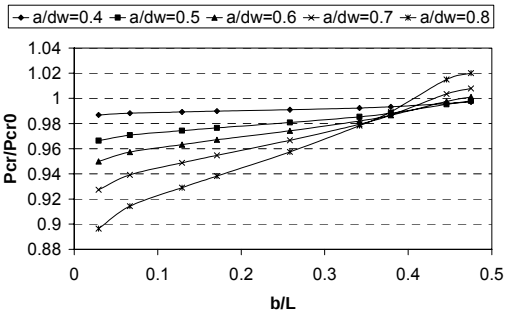
شکل (۱۷): اثر محل گشايش، تير دو سر گيردار با تکيه‌گاه‌هاي پيچشي گيردار، گشايش شش‌ضلعي



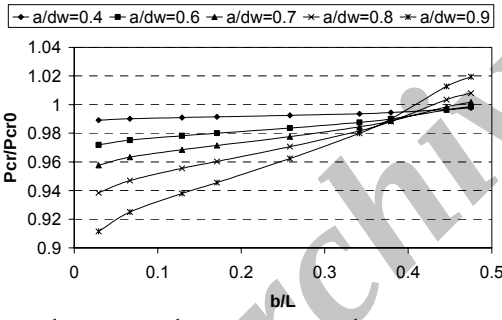
شکل (۱۸): اثر محل گشايش، تير دو سر گيردار با تکيه‌گاه‌هاي پيچشي گيردار، گشايش دايره‌اي

۵-۵-۲ شرط تکيه‌گاهي گيردار با تکيه‌گاه پيچشي ساده

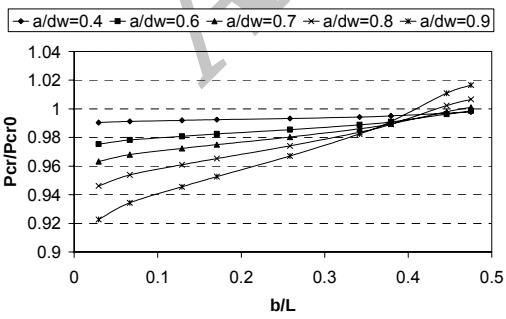
شکل‌هاي ۲۰، ۲۱، ۲۲، براي‌تيرورق I۳، طول ۱۲متر و توزيع گشايش‌نوعC مي‌باشدکه‌براي‌گشايش‌هاي‌مختلف‌رسم شده‌است. درهرنمودار مقدارb (شکل ۴) و بعدگشايش a متغييراست. دراين‌حالت، زمانيکه‌گشايش‌نزديك‌وسط تيرقراردارد، بارکمانش بيشينه است و وقتي که گشايش نزديك تکيه‌گاه قراردارد، بار کمانش کمينه‌است. دراين‌جانيزبابزرگ شدن‌نسبت a/d_w، اختلاف بين‌حداکثرو حداقل بارکمانش بيشتر مي‌شود. براي نمونه‌به‌ازاي a/d_w=۰/٤ اختلاف بين حداکثر و حداقل بار کمانش‌نزديک ۰/۷ درصد وبراي a/d_w=۰/۹ نزديک ۱۲درصداست. دراينجا بابزرگ شدن نسبت‌ابعاد بال‌به‌جان و يابزرگ شدن‌نسبت L/d_w، اختلاف کمترمي‌شود. گفتني‌است‌که‌در اين‌شرط تکيه‌گاهي‌نيز، درمواردی بارکمانش‌تير باگشايش‌از تيربدون‌گشايش‌بيشتراست‌که عبارتند ازتيربا بعد گشايش a/dw=۰/۸ و b/L=۰/۴۴۵ و b/L=۰/۴۷۵ و تير با بعدگشايش a/dw=۰/۹ با b/L=۰/۴۴۵ و b/L=۰/۴۷۵. حداکثر بارکمانش براي گشايش‌مربع به ميزان ۲درصداست.



شکل (۱۹): اثر محل گشايش، تير دو سر گيردار با تکيه‌گاه‌هاي پيچشي ساده، گشايش مربعي



شکل (۲۰): اثر محل گشايش، تير دو سر گيردار با تکيه‌گاه‌هاي پيچشي ساده، گشايش شش ضلعي



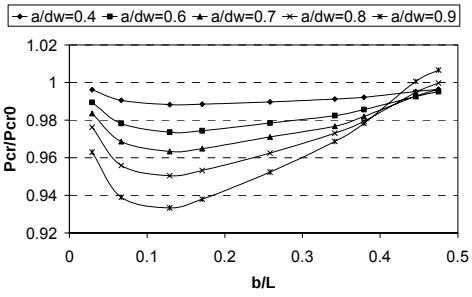
شکل (۲۱): اثر محل گشايش، تير دو سر گيردار با تکيه‌گاه‌هاي پيچشي ساده، گشايش دايره‌اي

۵-۵-۳ شرط تکیه‌گاهي ساده با تکیه‌گاه پیچشي گیردار

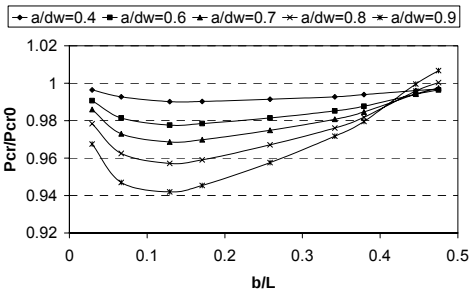
براساس‌شکل‌های ۲۳، ۲٤، ۲۵ رفتارتیرتاحدي‌مشابه تکیه‌گاه گیرداربا تکیه‌گاه‌پیچشي‌گیردارمي‌باشد. حداکثربارکمانش زماني رخ‌مي‌دهدکه گشایش‌درنزدیکي‌وسط‌تیرقرارداشته‌باشد و حداقل آن درحالتي رخ‌مي‌دهدکه‌گشایش‌درمحلي‌بین‌تکیه‌گاه و وسط تیر (بیشتر نزدیك به تکیه‌گاه) قرار داشته‌باشد. بابزرگ شدن نسبت a/d_w اختلاف‌بین‌ماکزیمم ومي‌نیمم بارکمانش افزایش‌مي‌یابد. براي نسبت a/d_w=۰/٤ این اختلاف نزدیک ۰/۵درصد و براي a/dw=۰/۹ نزدیک ۳درصد مي‌باشد. مشابه حالت قبل بارکمانش براي بعضي از حالت‌ها بیش از بار تیر بدون گشایش است.

۵-۵-٤ شرط تکیه‌گاهي ساده با تکیه‌گاه پیچشي ساده:

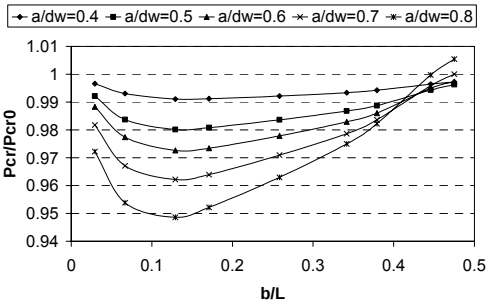
براساس‌شکل‌های ۲۶، ۲۷، ۲۸ ماکزیمم بارکمانش زمانی رخ مي‌دهدکه‌گشایش‌دروسط‌تیرقرارداشته‌باشد. درحالتیکه گشایش نزدیك تکیه‌گاه قراردارد، بارکمانش کمترین مقدارخودرا دارد. در اینجانیزبا افزایش نسبت a/d_w اختلاف بین ماکزیمم ومي‌نیمم بار کمانش بیشتر مي‌شود. در این حالت، براي a/d_w=۰/٤ این اختلاف‌نزدیک ۰/۵ درصدوبراي a/d_w=۰/۹ نزدیک ۳درصد است.



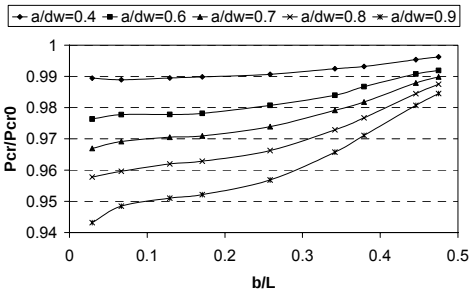
شکل (۲۲): اثر محل گشایش، تیر دو سر ساده با تکیه‌گاه‌هاي پیچشي گیردار، گشایش مربعي



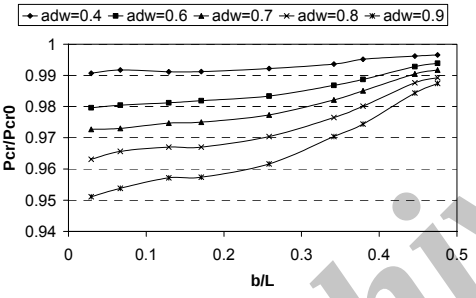
شکل (۲۳): اثر محل گشایش، تیر دو ساده با تکیه‌گاه‌هاي پیچشي گیردار، گشایش شش‌ضلعي



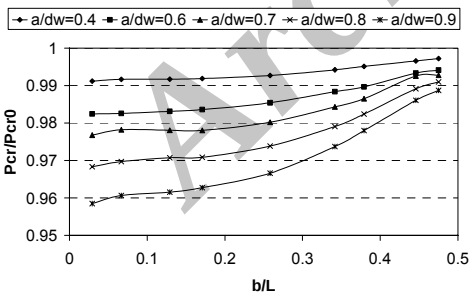
شکل (۲۴): اثر محل گشایش، تیر دو سر ساده، با تکیه‌گاه‌هاي پیچشي گیردار، گشایش دایره‌اي



شکل (۲۵): اثر محل گشایش، تیر دو سر ساده با تکیه‌گاه‌هاي پیچشي ساده، گشایش مربعي



شکل (۲۶): اثر محل گشایش، تیر دو ساده با تکیه‌گاه‌هاي پیچشي ساده، گشایش شش‌ضلعي



شکل (۲۷): اثر محل گشایش، تیر دو سر ساده با تکیه‌گاه‌هاي پیچشي گیردار، گشایش دایره‌اي

۶ - نتایج

این‌مقاله، به بررسي اثر پارامترهاي مختلف بر بارکمانش جانبي- پیچشي تیرهاي حاوي گشایش درجان با شرایط تکیه‌گاهي دوسرساده و دوسرگیردار پرداخته است. نتایجي که

از این مقاله حاصل شده است به شرح زیر مي‌باشد:

- طبق بررسي‌هايي كه انجام شد، براي مقاطع I شكل، ضخامت مقطع اثر قابل توجهي بر روي درصد كاهش بار كمانش نسبت به حالتي كه در تير گشايشي وجود ندارد، نمي گذارد.(البته اين موضوع به شرطي درست است كه نسبت ضخامت جان به ضخامت بال تغيير نكند.)
- براي مقاطع I شكل، بار كمانش با تغييرات سطح بازشو، رابطه‌اي تقريباً خطي دارد.
- با فرض توزيع‌متقارن‌و همگن‌گشايش با افزايش طول تير(بدون‌تغيير درپارامترهاي ديگر) هرگاه تعداد گشايش‌ها در طول‌تيرثابت‌باشد، با افزايش طول‌تير درصدكاهش بار بحراني كمانش‌نسبت به‌حالتي كه درتير گشايشي وجودندارد، افزايش و درحالتي‌كه تعدادگشايش‌ها درطول‌تير ثابت‌باشد،كاهش مي‌يابد.
- يكي ديگر از مسائلي كه در اين مقاله بررسي شده است، اثر محل قرارگيري بازشو بر روي بار بحراني كمانش مي‌باشد. در مورد تيرهاي I شكل در حالت تكيه‌گاه‌هاي پيچشي گيردار (در هر دو حالت تكيه‌گاه ساده و گيردار)، بار كمينه‌ي كمانش وقتي رخ مي‌دهد كه گشايش در فاصله‌ي نزديكL/4 از تكيه‌گاه قرار داشته باشد و هر چه محل گشايش از اين نقطه به سمت وسط تير و يا تكيه‌گاه حركت كند، به بار بحراني كمانش افزوده مي‌شود. در حالت تكيه‌گاه‌هاي پيچشي ساده (در هر دو حالت تكيه‌گاهي) بار بيشينه‌ي كمانش، وقتي رخ مي‌دهد، كه گشايش در نزديک وسط تير قرار داشته باشد و با دور شدن گشايش از وسط تير و نزديک شدن به تكيه‌گاه از بار بحراني كمانش كاسته مي‌شود. علاوه بر مطالب ياد شده، به جز حالت تكيه گاه ساده با تكيه‌گاه پيچشي ساده، در ساير موارد در زماني كه گشايش درست در زير بار متمركز قرار دارد و بعد گشايش زياد باشد، بار كمانش تير با گشايش از بار كمانش تير بدون گشايش بيش‌تر خواهد شد كه جزئيات 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, V0l. 43, No. 2, 1992, pp. 247-254

[٤] Chen, W.F. and Lui, E.M., "Structural Stability, Theory and Implementation", 1st Edition, Elsevier, 1987

[٥] Tong, G. and Zhang, L., "A new derivation of the buckling theory of thin walled beams", Journal of Advances in Stell Structures, ICASS, 2002,pp129-137

[٦] Chu, X. and Rickard, J. and Li, L., "Influence of lateral restrain on lateral tortional buckling of cold formed steel purlins", Journal of Thin-Walled Structures, V. 43, Issue 5, 2005, pp800-810