



# بررسی تأثیر موقعیت و وضعیت هندسی بازشو در مقاومت کمانشی تیورق‌های سوراخ‌دار با سخت‌کننده دلتا تحت تأثیر نیروی برشی

سلیمان قوهستانی<sup>۱\*</sup>، مهرداد شیری<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، بخش عمران، دانشگاه فسا، فسا،

۲- کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر، بوشهر،

\* فسا، صندوق پستی ۷۴۶۱۶-۸۶۱۳۱، ghouhestani@Fasau.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۱۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۴)

## چکیده

امروزه استفاده از تیورق‌ها در انواع مختلف سازه‌های ساختمانی گسترده وسیعی را به خود اختصاص داده است. یکی از انواع این تیورق‌ها، تیورق‌های با سخت‌کننده دلتا می‌باشد؛ که تحقیقات صورت گرفته حاکی از عملکرد بهتر این نوع تیورق در ظرفیت‌های خمشی و برشی نسبت به سایر تیورق‌های معمولی با مقاطع معادل است. تعبیه سوراخ‌های جان به منظور ایجاد فضایی برای سرویس، بازدید و یا عبور لوله‌های بزرگ امری اجتناب‌ناپذیر در تیورق‌ها می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار ANSYS v.12 و با مدل‌سازی و ایجاد سوراخ در جان تیورق دلتا و در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر مقاومت برشی کمانشی تیورق دلتای سوراخ‌دار، رفتارهای سازه‌ای آن‌ها بررسی شده و محدوده بهینه ایجاد سوراخ و بهترین شکل سوراخ از میان انواع رایج آن معرفی گردیده است. در این بررسی، بهترین محدوده اجرای سوراخ بین ۰/۳۰ الی ۰/۳۵ طول تیر و بهینه پارامتر (بدون بعد) ارتفاع مؤثر (نسبت قطر دایره به فاصله اتصال سخت‌کننده‌ها در محل برخورد با جان تا بال تحتانی مقطع) در محدوده ۰/۲۶ الی ۰/۲۷ به دست آمده است. همچنین رابطه مقاومت کمانشی نسبت به تغییر قطر بازشو به صورت خطی بوده و توسط یک رابطه بیان شده است. در بین شکل‌های بررسی شده با سطوح بازشو برابر (مربع، دایره و مثلث) بازشو مربعی شکل، دارای مقاومت برشی کمانشی بیشتری نسبت به سایر شکل‌ها می‌باشد.

## واژگان کلیدی

تیورق، سخت‌کننده دلتا، سوراخ‌دار، کمانش برشی

## Study the Effect of Opening Position and Shape on Shear Buckling Strength of Perforated Steel Plate Girder with Delta Stiffeners under Shear Force

S. Ghouhestani, M. Shiri

### Abstract

Nowadays, the use of plate girder in different kinds of structures has been increased. One of these is plate girder with delta stiffener. Investigations have shown that the bending and shearing behavior of plate girder with delta stiffener are better than usual plate girder with uniform sections. Preparing web openings to make space for service, inspection and passing the big pipes is unavoidable in plate girders. In this study, employing ANSYS v.12 software, the modeling of hole in the web of plate girder was done and the effective parameters on shear buckling strength of perforated steel plate girder was considered to study the structural behavior and optimum range for Preparation of web hole and the best form of ordinary kinds of hole. The results show that, the best web performance location is between 0.30 until 0.35 of length, optimum of effective height parameter (ratio of hole diameter to distance of stiffener connection from intersection at web to the bottom flange) is between 0.26 until 0.27, and there is a linear behavior between shear buckling strength versus changes in hole diameter of opening which is presented by an equation. The comparison between different opening shape with equal surface (square, circle and triangle) indicates that the square opening has the priority in buckling shear strength in comparison with other shapes.

### Keywords

Plate girder, Delta stiffener, Perforated, Shear buckling



نشان‌دهنده آن است که در صورت استفاده از سخت‌کننده‌های مایل (دلتا) با اتصال به بال و جان، باعث پایداری بیشتر در برابر بارهای وارده و جلوگیری از کماتش بال و جان تیورق گردیده و همچنین از کماتش پیچشی جانبی مقطع جلوگیری می‌نماید [۴ و ۵]. مطابق با تحقیقات صورت گرفته توسط Arabzade و Kaheh، استفاده از سخت‌کننده دلتا مقاومت کماتشی را تا ۶۰٪ نسبت به پانل سخت شده با سخت‌کننده طولی افزایش می‌دهد [۶].

نتایج حاصل از تحلیل‌های صورت گرفته توسط Ghouhestani و Shahabian نشان‌دهنده کاهش مقاومت تا میزان ۵۰ درصد در تیورق‌های دارای بازشوی مدور می‌باشد. بررسی‌های انجام شده توسط این محققین حاکی از آن است که در صورت افزایش صلبیت نسبی بال (نسبت ضخامت بال‌ها به ضخامت جان تیورق) تا ۳۰ درصد کاهش به وجود آمده را می‌توان جبران نمود [۷].

Erfani و Jafari Sahnehsaraei [۸] به بررسی رفتار کماتش الاستیک تیورق‌های دلتا پرداخته‌اند. در این پژوهش آن‌ها با مدل‌سازی تیورق در دو حالت با سخت‌کننده طولی و سخت‌کننده دلتا به بررسی رفتار این نوع تیورق‌ها تحت تأثیر خمش پرداخته‌اند. نتایج بیانگر آن است که این نوع سخت‌کننده‌ها تأثیر چندانی بر مقدار مقاومت کماتشی تیورق تحت اثر خمش ندارند. در پژوهشی دیگر Mohebkah و همکارانش [۹] در سال ۲۰۱۴ اقدام به بررسی کماتش پیچشی جانبی تیورق‌های دلتا تحت اثر خمش نمودند. آن‌ها با مقایسه نتایج تحلیل عددی با ضوابط آیین‌نامه AISC-LRFD [۱۰] به این نتیجه رسیدند که منحنی مقاومت خمشی بیان شده توسط آیین‌نامه در حالت غیر الاستیک غیر محافظه‌کارانه است. از این رو رابطه جایگزینی توسط آن‌ها ارائه گردید.

Sweetlin و همکارانش [۱۱] در سال ۲۰۱۷ اقدام به ارزیابی رفتار برشی تیورق دلتا در دو حالت دارای سخت‌کننده جان و بدون سخت‌کننده جان نمودند. آن‌ها با مدل‌سازی عددی یک تیورق با شرایط تکیه‌گاهی ساده تحت اثر بار متمرکز، تأثیر پارامترهای نقص هندسی و سخت‌کننده بر مقاومت برشی تیورق دلتا را بررسی کردند. Hatami و Esmaili [۱۲] در سال ۲۰۱۳ در پژوهشی مقدار بهینه ارتفاع در تیورق دلتا را ارائه کردند. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS مقدار بار بحرانی کماتش تیورق با سخت‌کننده دلتا تحت تأثیر نیروی برشی و لنگر خمشی محاسبه شده است. آن‌ها با تحلیل عددی، تأثیر تغییر موقعیت بار و ضخامت سخت‌کننده، بر مقاومت

تیورق به تیری گفته می‌شود که عناصر آن به منظور تأمین کارایی بهتر از نیم‌رخ‌های نورد شده از ورق ساخته شود. تیورق‌ها به طور معمول از دو ورق بال و یک ورق جان تشکیل می‌شوند که به منظورهای خاص سخت‌کننده‌هایی به صورت عرضی یا طولی در جان آن‌ها تعبیه می‌شود. در نوع دیگر تیورق به منظور افزایش مقاومت پیچشی بال، از دو ورق مایل استفاده می‌کنند که به این نوع تیورق، تیورق دلتا می‌گویند.

یکی از مهم‌ترین مراحل در طراحی تیورق‌ها بررسی پایداری و مقاومت کماتشی تیورق‌ها در برابر نیروهای برشی است. با توجه به لزوم تعبیه بازشوه‌های بزرگ در جان تیورق در بسیاری از سازه‌ها اهمیت بررسی مقاومت کماتشی تحت اثر نیروی برشی در این نوع تیورق‌ها بسیار ضروری به نظر می‌رسد.

در این پژوهش برای محاسبه مقاومت کماتشی برشی تیورق‌ها از نرم‌افزار ANSYS v.12 استفاده شده است [۱]. به منظور صحت‌سنجی نتایج تحلیل، میزان سازگاری نتایج آنالیز المان محدود با نتایج آزمایش‌های موجود مورد بررسی قرار گرفته است.

در ادامه با انجام تحلیل‌های پارامتری و با بررسی حالت‌های مختلف و در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر مقاومت برشی کماتشی، محدوده بهینه آن‌ها ارائه شده است. در این خصوص، در بخش‌های بعد بهترین محدوده اجرای سوراخ، بهینه پارامتر ارتفاع مؤثر سوراخ، رابطه مقاومت کماتشی نسبت به تغییر قطر بازشو و مقاومت بین بازشوه‌های دارای سطوح برابر با شکل‌های هندسی متفاوت (مربع، دایره و مثلث) بررسی شده است.

## ۲- سابقه و پیشینه تحقیقات و نتایج ارائه شده

در مورد بررسی رفتار مقاطع دلتا از زمان ارائه ایده ساخت و به‌کارگیری آن تاکنون، تحقیقات معدودی و علی‌الخصوص آزمایش‌های عملی بسیار اندک و حتی منحصربه‌فرد صورت گرفته است.

مطابق با آزمایش‌های صورت گرفته توسط HOMER و HADLEY با همکاری AISC در سال ۱۹۶۱، مشخص شد که این نوع مقطع مقاومت خمشی، پایداری جانبی و سختی پیچشی بهتری نسبت به مقاطع معمول I شکل دارد [۲ و ۳].

بررسی‌های صورت گرفته توسط Arabzade و Varmazyari جهت بهبود سختی و پایداری جانبی تیورق‌های فولادی،

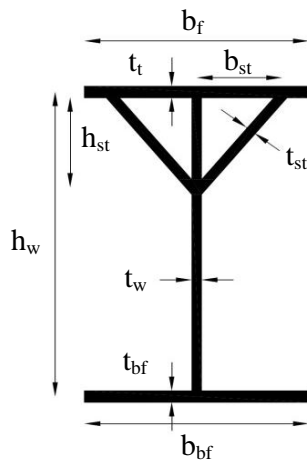


برشی تیوروق دلتا را بررسی کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان می‌دهد افزایش ضخامت جان تا درصد معینی از ارتفاع جان تیوروق، باعث بهینه شدن وزن تیوروق و مقاومت کمانشی بحرانی آن می‌گردد.

### ۳- معرفی مدل عددی و بررسی دقت تحلیل کمانشی

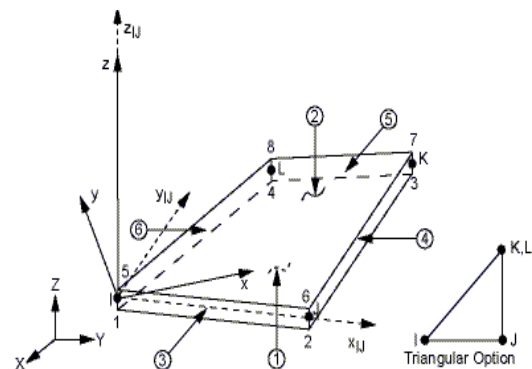
#### نرم افزار

روش المان محدود یک روش عددی قوی و کارآمد است که برای حل مسائل گوناگون با هندسه و شرایط مرزی متفاوت در علوم مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به همین منظور جهت مقایسه و بررسی صحت نتایج حاصل از مدل‌سازی کامپیوتری، از نرم افزار ANSYS v.12 استفاده شده است. تیوروق دلتا به نحوی که تشریح گردیده است، مدل‌سازی شده و نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود با گزارش‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. جان و بال‌ها و سخت‌کننده‌ها توسط المان‌های پوسته چهار گره‌ای الاستیک برای آنالیز کمانشی مدل شده‌اند. در شکل (۱) هندسه این نوع المان‌ها با استفاده از SHELL 63 در نرم‌افزار ANSYS نشان داده شده است. برای بررسی بیشتر در خصوص درجات آزادی و سایر مشخصه‌های این المان می‌توان به مرجع [۱] مراجعه کرد.



شکل ۲- مقطع تیوروق دلتا

همان طور که در ردیف چهارم جدول (۲) مشخص است همگرایی لازم بین تیب IV و III شبکه‌بندی فراهم گردیده است؛ و نتایج تحلیل و آزمایش دارای سازگاری مناسبی می‌باشد؛ بنابراین از شبکه‌بندی ۳۲×۳۲ برای جان و ۸×۳۲ برای بال به عنوان شبکه‌بندی مناسب در تحلیل این نوع تیوروق‌ها استفاده شده است.



شکل ۱- هندسه المان SHLL63 در نرم‌افزار ANSYS [۱]

در تحلیل مدل ایجاد شده، از تحلیل کمانشی مقادیر ویژه بهره گرفته شده است. مشخصات مکانیکی فولاد St37 برای

جدول ۱- مشخصات تیوروق دلتا نمونه آزمایشی [۲]

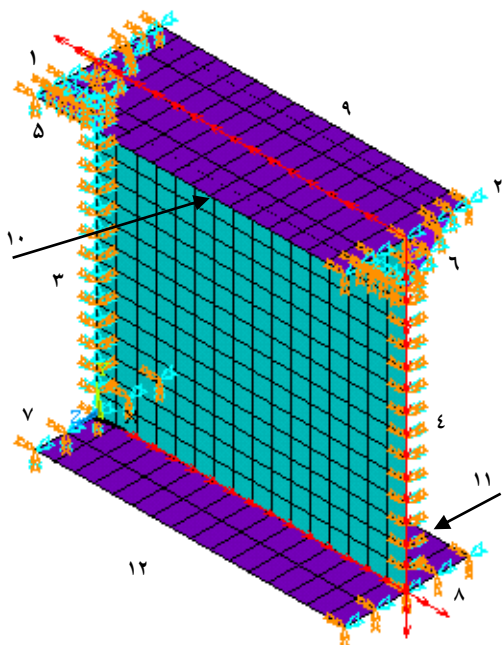
برش کمانشی	مشخصات مکانیکی		سخت کننده دلتا (cm)			بال پایین (cm)		بال بالا (cm)		جان (cm)		طول (m)
	$\nu$	$E$ (GPa)	$t_{st}$	$b_{st}$	$h_{st}$	$t_{bf}$	$b_{bf}$	$t_{tf}$	$b_{tf}$	$t_w$	$h_w$	$L$
$V_{cr}$ (MN)	۰٫۳	۲۰۰	۰٫۶۳۵	۱۷٫۸	۲۲٫۹	۰٫۶۳۵	۴۱	۰٫۶۳۵	۶۱	۰٫۶۳۵	۹۱٫۴	۶٫۲۰

جدول ۲- تأثیر شبکه‌بندی بر مقاومت کمانشی برشی تیوروق دلنا

تیپ	I	II	III	IV
شبکه‌بندی بال	۴×۴	۴×۴	۸×۱۶	۸×۳۲
شبکه‌بندی جان	۴×۴	۸×۸	۱۶×۱۶	۳۲×۳۲
مقاومت برشی (MN)	۰/۹۷	۱/۰۲	۱/۰۶	۱/۱۳

#### ۴- تعریف مسئله و روش تحلیل

با توجه به مطابقت قابل قبول نتایج تحلیل کمانشی در نرم‌افزار ANSYS با نتایج آزمایشگاهی، در ادامه مدل‌های اصلی با ایجاد سوراخ در جان تیوروق دلنا ایجاد شده است. در این پژوهش با بررسی حالت‌های گوناگون و در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر مقاومت برشی کمانشی تیوروق دلتای سوراخ‌دار رفتارهای سازه‌ای آن‌ها بررسی شده و محدوده بهینه آن‌ها ارائه گردیده است. شکل (۳) موقعیت مکانی پارامترهای تعریف شده برای نصف طول تیوروق را در طول یک تیوروق مقارن که دارای دو بازشو می‌باشد؛ را نشان می‌دهد.



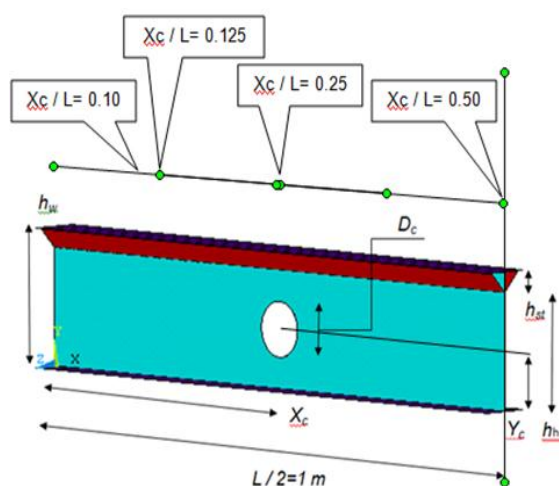
شکل ۴- شرایط مرزی و بارگذاری اعمال شده برای مدل سه بعدی

#### ۵- نتایج تحلیل و بررسی آن‌ها

##### ۵-۱- تعیین پارامتر موقعیت طولی $(X_c/L)$ بهینه

نسبت موقعیت طولی مرکز سوراخ از ابتدای تیوروق به کل طول تیوروق  $(X_c/L)$  پارامتر موقعیت طولی نامیده شده است. با توجه به مطالب ارائه شده در این خصوص با مدل‌سازی ۳۹ نمونه و تحلیل کمانشی مقاومت برشی، نتایج مطابق با شکل (۵-الف) ترسیم شده است که بیانگر نحوه رفتار مقاومت کمانشی برشی برای تیوروق دلتا دارای سوراخ جان بر اساس پارامتر موقعیت طولی سوراخ می‌باشد. نقاط قوت و ضعف تیوروق در این خصوص کاملاً مشخص است. جهت بررسی دقیق‌تر، شکل (۵-ب) بر روی قسمت‌های دارای حداکثر مقاومت برشی کمانشی ترسیم شده است.

با در نظر گرفتن مسائل اجرایی می‌توان گفت بهترین محدوده اجرای سوراخ برای پارامتر موقعیت طولی سوراخ در محدوده ۰/۲۰ الی ۰/۳۵ و به طور خاص ایده‌آل‌ترین محل اجرای بازشو در محدوده ۳۰ الی ۳۵ درصد از طول تیر می‌باشد.



شکل ۳- موقعیت مکانی پارامترهای تعریف شده برای نصف طول تیوروق (تیوروق مقارن می‌باشد).

برخی مشخصات مقاطع که در طول تحلیل ثابت باقی مانده و برای تمام مدل‌ها یکسان می‌باشد در جدول (۳) نشان داده شده است و از ذکر مجدد به جهت جلوگیری از ازدیاد پارامترها در جدول‌های بعدی خودداری گردیده است.

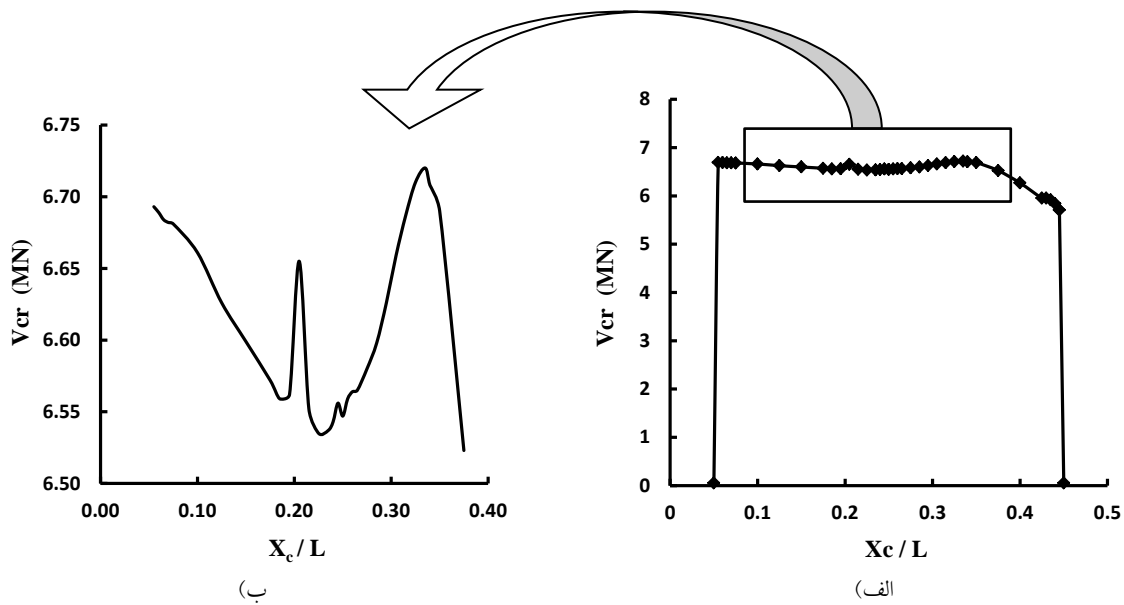
شرایط مرزی لبه‌های تیوروق همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، در جدول (۴) معرفی می‌شود. در این جدول  $w$  و  $v$  درجات آزادی انتقالی و  $\theta_x$ ،  $\theta_y$  و  $\theta_z$  درجات آزادی دورانی حول محورهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  می‌باشند. عدد صفر بیانگر آزاد بودن و عدد یک بیانگر مقید بودن درجه آزادی است.

جدول ۳- مشخصات ثابت برای تمام مقاطع تیورورق‌های دلتای مدل‌سازی شده

مشخصات مکانیکی		سخت کننده دلتا (cm)	بال بالا و پایین (cm)	جان (cm)	طول (m)
$\nu$	$E$ (GPa)	$b_{st}$	$b_f$	$h_w$	$L$
۰/۳	۲۰۰	۱۵	۴۰	۱۰۰	۲۰۰

جدول ۴- شرایط مرزی اعمال شده برای مدل سه بعدی در شکل (۴)

$\theta_z$	$\theta_y$	$\theta_x$	$w$	$v$	$u$	شماره لبه تیورورق
۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱ لبه بال بالا سمت چپ
۱	۱	۱	۱	۰	۱	۲ لبه بال بالا سمت راست
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۳ لبه جان سمت چپ
۱	۱	۰	۰	۱	۱	۴ لبه جان سمت راست
۰	۰	۰	۱	۱	۰	۵ لبه سخت کننده بالا سمت چپ
۱	۱	۱	۱	۰	۱	۶ لبه سخت کننده بالا سمت راست
۰	۰	۰	۱	۱	۰	۷ لبه بال پایین سمت چپ
۱	۱	۱	۱	۰	۱	۸ لبه بال پایین سمت راست
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ لبه‌های آزاد بال پایین و بال



شکل ۵- الف) مقاومت کماتش برشی بر اساس پارامتر موقعیت طولی سوراخ، ب) بزرگ‌نمایی نقاط اوج

۵-۲- تعیین پارامتر ارتفاع مؤثر سوراخ ( $D_c/h_{hol}$ ) بهینه  
نسبت قطر دایره به فاصله اتصال سخت کننده‌ها در محل برخورد با جان تا بال تحتانی مقطع ( $D_c/h_{hol}$ ) پارامتر ارتفاع مؤثر سوراخ نامیده شده است. با توجه به بررسی صورت گرفته، جهت بررسی در خصوص پارامتر ارتفاع مؤثر سوراخ با

در ادامه شکل (۶) و (۷) مربوط به تحلیل و نحوه توزیع تنش در برخی مدل‌ها آمده است. در این خصوص نحوه توزیع تنش به صورت قطری در جان تیورورق که مورد انتظار می‌باشد؛ و توجه به موقعیت طولی مرکز بازشو و جابجایی سوراخ در طول تیر نشان داده شده است.

سوراخ بر حسب مقاومت برشی کمانشی در شکل (۸) ترسیم شده است. با بررسی شکل (۸) ملاحظه می‌گردد که بهینه پارامتر ارتفاع مؤثر سوراخ یعنی نسبت قطر دایره به فاصله اتصال سخت‌کننده‌ها در محل برخورد با جان تا بال تحتانی مقطع یا  $(D_c/h_{noi})$  در محدوده  $0/۲۶$  الی  $0/۲۷$  قرار دارد.

### ۳-۵- بررسی میزان تغییرات کاهش مقاومت نسبت به افزایش قطر سوراخ

جهت بررسی این موضوع، بر روی یک مقطع با موقعیت مکانی ثابت (یا بنا به عبارت تعریف شده، پارامتر موقعیت طولی سوراخ)، با تغییر قطر سوراخ میزان تغییر مقاومت کمانشی برشی تیروورق محاسبه شده است. مشابه روش تحلیل در بخش قبل، این مسئله برای دو مقطع و با پارامتر موقعیت طولی سوراخ برابر با  $۱۲/۵$  و  $۲۵$  درصد از طول تیر انجام شده است.

نتیجه‌ها برای پارامتر موقعیت طولی سوراخ برابر با  $۲۵$  درصد در جدول (۶) تنظیم گردیده است. برای حالت‌های با موقعیت طولی دیگر نیز نتیجه‌ها در جدولی مشابه جدول (۶) به دست آمده است.

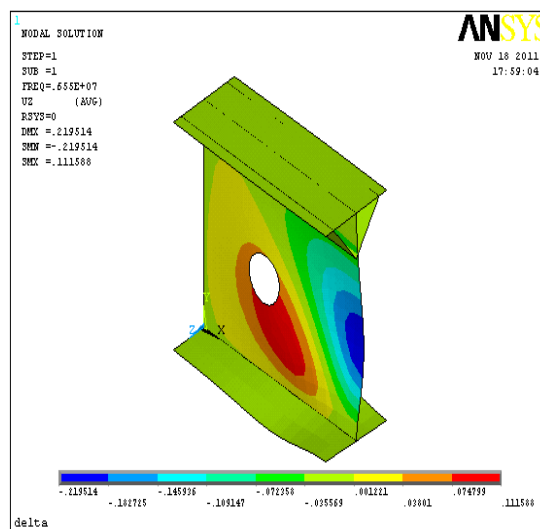
مقاومت برشی کمانشی مقطع مفروض، بدون در نظر گرفتن سوراخ جان و بر اساس آیین‌نامه فولاد ایران برابر با  $V_0 = ۷/۰۲۷۷ \times ۱۰^۶$  MN به دست آمده است. در نتیجه نسبت مقاومت برشی مقاطع دارای بازشو نسبت به حالت مقطع بدون بازشو با تقسیم مقادیر جدول (۶) بر  $V_0$  میزان نسبی کاهش مقاومت را در هر حالت مشخص می‌کند.

با توجه به داده‌های حاصل از تحلیل در جدول (۶) و سایر نتیجه‌ها برای موقعیت‌های طولی دیگر و محاسبه نسبت آن‌ها به  $V_0$ ، منحنی تغییرات پارامتر ارتفاع مؤثر سوراخ بر حسب مقاومت برشی کمانشی نسبی، در شکل (۹) ترسیم شده است.

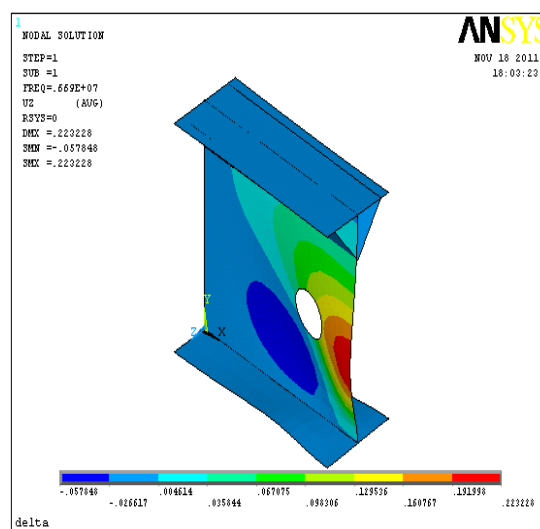
با بررسی شکل (۹) ملاحظه می‌گردد که نحوه تغییر نسبت مقاومت برشی کمانشی تیروورق دلتای سوراخ‌دار به مقاومت برشی کمانشی تیروورق بدون سوراخ  $(V_{cr}/V_0)$  در برابر پارامتر ارتفاع مؤثر سوراخ  $(D_c/h_{noi})$ ، با دقت بسیار خوب به صورت خطی می‌باشد. در این خصوص رابطه (۱) بین پارامترهای معرفی شده به صورت زیر پیشنهاد شده است.

$$V_{cr}/V_0 = -0.38 \times (D_c/h_{noi}) + 1 \quad (1)$$

این رابطه بیانگر صحت و ارزشمندی پارامتر معرفی شده با عنوان "پارامتر ارتفاع مؤثر سوراخ  $(D_c/h_{noi})$ " می‌باشد. نکته حائز اهمیت این است که این پارامتر دارای رابطه‌ای مشخص با یکی از معیارهای مقاومتی مقطع  $(V_{cr}/V_0)$  می‌باشد.



شکل ۶- توزیع تنش به صورت قطری در جان تیروورق  $(X_c/L = 0/۲)$



شکل ۷- توزیع تنش به صورت قطری در جان تیروورق  $(X_c/L = 0/۳)$

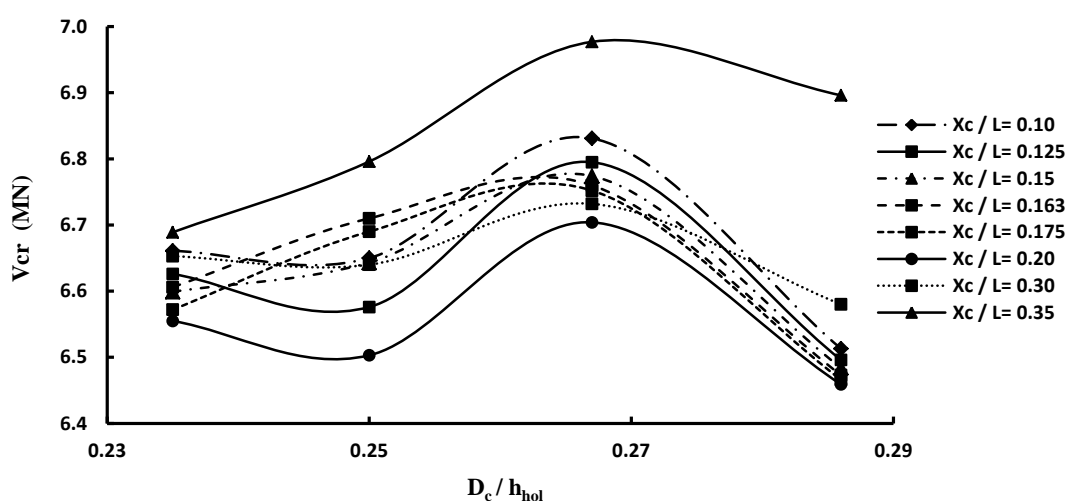
در نظر گرفتن مقاطع مشابه بخش قبل و فقط با تغییر در مقدار پارامتر ارتفاع مؤثر سوراخ و در محدوده  $۱۰$  الی  $۳۵$  درصد طول تیر، مقاومت کمانشی برشی در هر مورد با تحلیل و استفاده از نرم‌افزار به دست آمده است.

این مسئله برای هشت مقطع و با پارامتر موقعیت طولی سوراخ برابر با  $۱۰$ ،  $۱۲/۵$ ،  $۱۵$ ،  $۱۶/۳$ ،  $۱۷/۵$ ،  $۲۰$ ،  $۳۰$  و  $۳۵$  درصد از طول تیر انجام شده است. نتایج برای پارامتر موقعیت طولی سوراخ برابر با  $0/۲۰$  در جدول (۵) تنظیم گردیده است.

برای سایر حالت‌ها با موقعیت‌های طولی دیگر، نتایج در جدول‌هایی مشابه جدول (۵) ارائه شده است. با توجه به داده‌های حاصل از تحلیل در جدول (۵) و سایر نتایج برای موقعیت‌های طولی دیگر، منحنی تغییرات پارامتر ارتفاع مؤثر

جدول ۵- مشخصات تیرورق‌های دلتای مدل‌سازی شده برای  $X_c/L = 0.2$

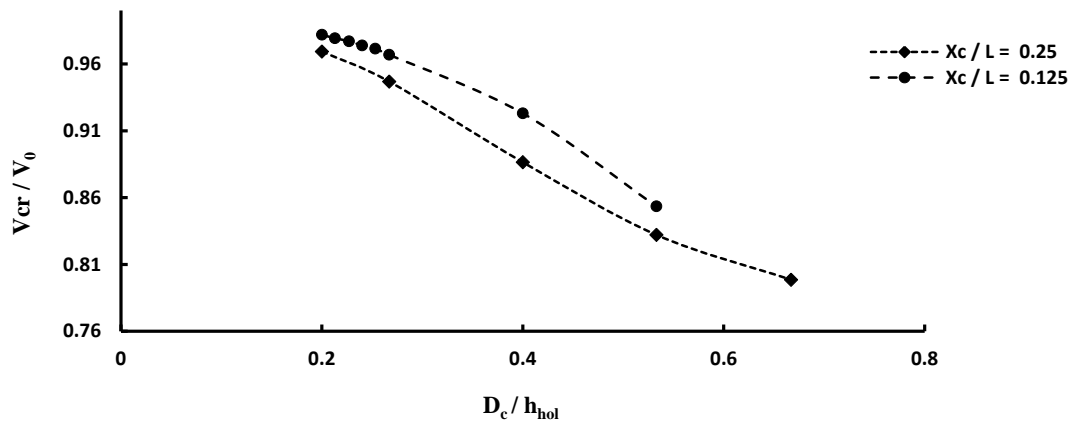
نام مقطع	مشخصات جان (cm)	مشخصات بال بالا و پایین (cm)	مشخصات دلتا سخت‌کننده دلتا (cm)		مشخصات سوراخ و محل موقعیت طولی (cm)			پارامتر ضخامت	پارامتر ارتفاع	پارامتر ارتفاع مؤثر سوراخ	برش کمانشی (MN)
			$t_{st}$	$h_{st}$	$D_c$	$Y_c$	$X_c$				
بازشو دایره‌ای شکل	$t_w$	$t_f$	$t_{st}$	$h_{st}$	$D_c$	$Y_c$	$X_c$	$t_{st}/t_w$	$h_{st}/h_w$	$D_c/h_{hol}$	$V_{cr}$
DPGC135	۱	۱	۱	۱۵	۲۰	۴۲/۵	۴۰	۱	۰/۱۵	۰/۲۳۵	۶/۵۵۵
DPGC136	۱	۱	۱	۲۰	۲۰	۴۰	۴۰	۱	۰/۲۰	۰/۲۵	۶/۵۰۳
DPGC137	۱	۱	۱	۲۵	۲۰	۳۷/۵	۴۰	۱	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۶/۷۰۴
DPGC138	۱	۱	۱	۳۰	۲۰	۳۵	۴۰	۱	۰/۳۰	۰/۲۸۶	۶/۴۵۹



شکل ۸- مقاومت کمانش برشی بر اساس پارامتر ارتفاع مؤثر سوراخ

جدول ۶- مشخصات تیرورق‌های دلتای مدل‌سازی شده برای  $X_c/L = 0.25$

نام مقطع	مشخصات جان (cm)	مشخصات بال بالا و پایین (cm)	مشخصات دلتا سخت‌کننده دلتا (cm)		مشخصات سوراخ و محل موقعیت طولی (cm)			پارامتر ضخامت	پارامتر ارتفاع	پارامتر ارتفاع مؤثر سوراخ	برش کمانشی (MN)
			$t_{st}$	$h_{st}$	$D_c$	$Y_c$	$X_c$				
بازشو دایره‌ای شکل	$t_w$	$t_f$	$t_{st}$	$h_{st}$	$D_c$	$Y_c$	$X_c$	$t_{st}/t_w$	$h_{st}/h_w$	$D_c/h_{hol}$	$V_{cr}$
DPGC111	۱	۱	۱	۲۵	۱۵	۳۷/۵	۵۰	۱	۰/۲۵	۰/۲۰۰	۶/۸۱۲
DPGC112	۱	۱	۱	۲۵	۲۰	۳۷/۵	۵۰	۱	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۶/۶۵۴
DPGC113	۱	۱	۱	۲۵	۳۰	۳۷/۵	۵۰	۱	۰/۲۵	۰/۴۰۰	۶/۲۳۰
DPGC114	۱	۱	۱	۲۵	۴۰	۳۷/۵	۵۰	۱	۰/۲۵	۰/۵۳۳	۵/۸۴۸
DPGC115	۱	۱	۱	۲۵	۵۰	۳۷/۵	۵۰	۱	۰/۲۵	۰/۶۶۷	۵/۶۱۲



شکل ۹- مقاومت کمانش برشی بر اساس پارامتر ارتفاع مؤثر سوراخ

از تحلیل را ارائه می‌نمایند. در شکل (۱۰) با توجه به جدول‌های (۸) تا (۱۰) منحنی‌های پارامتر ارتفاع مؤثر بازشو برای شکل‌های با مساحت برابر نسبت به تغییرات مقاومت برشی کمانشی ترسیم شده است. با توجه به شکل (۱۰) مشاهده می‌گردد که به ترتیب بازشوی مربع، دایره و مثلث شکل از لحاظ مقاومت کمانشی در اولویت قرار دارند.

شکل (۱۱) جهت مقایسه بصری این شکل‌ها با مساحت برابر ارائه شده است. همان گونه که دیده می‌شود به دلیل ارتفاع بیشتر بازشو به ترتیب در مثلث، دایره و مربع کاهش مقاومت برشی کمانشی  $V_{cr}$  توجیه پیدا می‌کند.

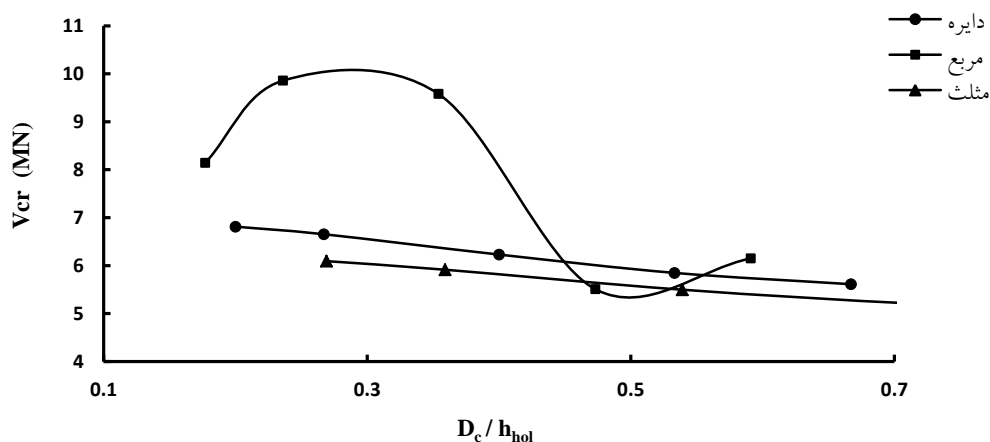
#### ۴-۵- بررسی و مقایسه تأثیر شکل سوراخ بر مقاومت کمانشی برشی

در این بخش ابتدا برای بازشوی دایره‌ای شکل مدل شده مطابق با جدول (۷)، اندازه ضلع مربع ( $D_s$ ) و اندازه ضلع مثلث متساوی‌الاضلاع ( $D_t$ ) هم مساحت با آن محاسبه شده است. سپس با استفاده از نرم‌افزار ANSYS، به بررسی تغییرات مقاومت کمانشی برشی در سه نوع متفاوت از شکل بازشو پرداخته شده است.

در ادامه جدول‌های (۸) تا (۱۰) برای سه شکل متفاوت مورد نظر، مطابق با پارامترهای در نظر گرفته شده، نتایج حاصل

جدول ۷- بازشوی با مساحت معادل در شکل‌های متفاوت

۵۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱۵	قطر بازشو دایره‌ای شکل ( $D_c$ ) (cm)
۱۹۶۲/۵	۱۲۵۶	۷۰۶/۵	۳۱۴	۱۷۶/۶	مساحت بازشو ( $cm^2$ )
۴۴/۳۰	۳۵/۴۴	۲۶/۵۸	۱۷/۷۲	۱۳/۳	بعد بازشو مربع شکل ( $D_s$ ) (cm)
۶۷/۳۲	۵۳/۸۶	۴۰/۳۹	۲۶/۹۳	۲۰/۲	بعد بازشو مثلث شکل متساوی‌الاضلاع ( $D_t$ ) (cm)



شکل ۱۰- مقاومت کمانشی برشی با توجه به شکل هندسی بازشو با استفاده از جدول (۸)



جدول ۸- مشخصات تیورق‌های دلتای مدل‌سازی شده با بازشو دایره‌ای برای  $X_c/L = 0/25$

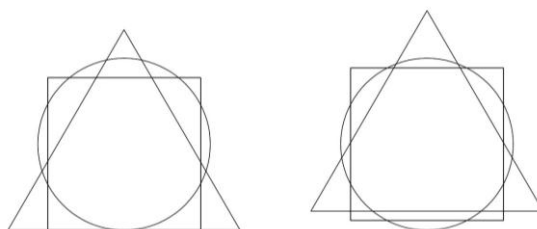
نام مقطع	مشخصات جان (cm)	مشخصات بال بالا و پایین (cm)	مشخصات سخت‌کننده دلتا (cm)		مشخصات سوراخ و محل موقعیت طولی (cm)			پارامتر ضخامت	پارامتر ارتفاع	پارامتر ارتفاع مؤثر سوراخ	برش کمانشی (MN)
			$t_{st}$	$h_{st}$	$D_c$	$Y_c$	$X_c$				
بازشو دایره‌ای شکل	$t_w$	$t_f$	$t_{st}$	$h_{st}$	$D_c$	$Y_c$	$X_c$	$t_{st}/t_w$	$h_{st}/h_w$	$D_c/h_{hol}$	$V_{cr}$
DPGC111	۱	۱	۱	۲۵	۱۵	۳۷/۵	۵۰	۱	۰/۲۵	۰/۲۰۰	۶/۸۱۲
DPGC112	۱	۱	۱	۲۵	۲۰	۳۷/۵	۵۰	۱	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۶/۶۵۴
DPGC113	۱	۱	۱	۲۵	۳۰	۳۷/۵	۵۰	۱	۰/۲۵	۰/۴۰۰	۶/۲۳۰
DPGC114	۱	۱	۱	۲۵	۴۰	۳۷/۵	۵۰	۱	۰/۲۵	۰/۵۳۳	۵/۸۴۸
DPGC115	۱	۱	۱	۲۵	۵۰	۳۷/۵	۵۰	۱	۰/۲۵	۰/۶۶۷	۵/۶۱۲

جدول ۹- مشخصات تیورق‌های دلتای مدل‌سازی شده با بازشو مربعی برای  $X_c/L = 0/25$

نام مقطع	مشخصات جان (cm)	مشخصات بال بالا و پایین (cm)	مشخصات سخت‌کننده دلتا (cm)		مشخصات سوراخ و محل موقعیت طولی (cm)			پارامتر ضخامت	پارامتر ارتفاع	پارامتر ارتفاع مؤثر سوراخ	برش کمانشی (MN)
			$t_{st}$	$h_{st}$	$D_s$	$Y_s$	$X_s$				
بازشو مربعی شکل	$t_w$	$t_f$	$t_{st}$	$h_{st}$	$D_s$	$Y_s$	$X_s$	$t_{st}/t_w$	$h_{st}/h_w$	$D_s/h_{hol}$	$V_{cr}$
DPGS96	۱	۱	۱	۲۵	۱۳/۳	۳۷/۵	۵۰	۱	۰/۲۵	۰/۱۷۷	۸/۱۴۲
DPGS97	۱	۱	۱	۲۵	۱۷/۷	۳۷/۵	۵۰	۱	۰/۲۵	۰/۲۳۶	۹/۸۵۷
DPGS98	۱	۱	۱	۲۵	۲۶/۶	۳۷/۵	۵۰	۱	۰/۲۵	۰/۳۵۴	۹/۵۸۰
DPGS99	۱	۱	۱	۲۵	۳۵/۴	۳۷/۵	۵۰	۱	۰/۲۵	۰/۴۷۳	۵/۵۰۹
DPGS100	۱	۱	۱	۲۵	۴۴/۳	۳۷/۵	۵۰	۱	۰/۲۵	۰/۵۹۱	۶/۱۵۰

جدول ۱۰- مشخصات تیورق‌های دلتای مدل‌سازی شده با بازشو مثلثی برای  $X_c/L = 0/25$

نام مقطع	مشخصات جان (cm)	مشخصات بال بالا و پایین (cm)	مشخصات سخت‌کننده دلتا (cm)		مشخصات سوراخ و محل موقعیت طولی (cm)			پارامتر ضخامت	پارامتر ارتفاع	پارامتر ارتفاع مؤثر سوراخ	برش کمانشی (MN)
			$t_{st}$	$h_{st}$	$D_c$	$Y_c$	$X_c$				
بازشو مثلث شکل متساوی‌الاضلاع	$t_w$	$t_f$	$t_{st}$	$h_{st}$	$D_c$	$Y_c$	$X_c$	$t_{st}/t_w$	$h_{st}/h_w$	$D_c/h_{hol}$	$V_{cr}$
DPGT201	۱	۱	۱	۲۵	۲۰/۲	۳۷/۵	۵۰	۱	۰/۲۵	۰/۲۶۹	۶/۰۹۳
DPGT202	۱	۱	۱	۲۵	۲۶/۹	۳۷/۵	۵۰	۱	۰/۲۵	۰/۳۵۹	۵/۹۱۴
DPGT203	۱	۱	۱	۲۵	۴۰/۴	۳۷/۵	۵۰	۱	۰/۲۵	۰/۵۳۹	۵/۴۹۷
DPGT204	۱	۱	۱	۲۵	۵۳/۹	۳۷/۵	۵۰	۱	۰/۲۵	۰/۷۱۹	۵/۲۰۲
DPGT205	۱	۱	۱	۲۵	۶۷/۳	۳۷/۵	۵۰	۱	۰/۲۵	۰/۸۹۷	۵/۰۲۹



شکل ۱۱- مقایسه شکل‌های هندسی با مساحت برابر

## ۶- نتیجه گیری

مطابق با بررسی‌های انجام شده جمع‌بندی کلی نتیجه‌های حاصل از آنالیز عددی مقاومت برشی کمانشی تیورق‌های دلتا دارای سوراخ در جان راه، برای حالت‌ها و پارامترهای در نظر گرفته شده، به طور خلاصه به صورت زیر می‌توان بیان نمود.

- با در نظر گرفتن مسائل اجرایی می‌توان گفت بهترین محدوده اجرای سوراخ برای پارامتر موقعیت طولی سوراخ ( $X_c/L$ )، در محدوده  $0/30$  الی  $0/35$  است.
- بهینه پارامتر ارتفاع مؤثر سوراخ یعنی نسبت قطر دایره به فاصله اتصال سخت‌کننده‌ها در محل برخورد با جان تا بال تحتانی مقطع ( $D_c/h_{hol}$ ) در محدوده  $0/26$  الی  $0/27$  قرار دارد.
- رابطه پارامتر ارتفاع مؤثر سوراخ ( $D_c/h_{hol}$ ) و مقاومت برشی کمانشی ( $V_{cr}$  (MN)) با دقت بسیار خوب به ویژه در مورد بازشو دایره‌ای شکل به صورت خطی می‌باشد؛ که توسط رابطه (۱) بیان شده است.
- مطابق با نتیجه تحلیل و بررسی نمودارها، به دلیل ارتفاع بیشتر بازشوها به ترتیب در مثلث، دایره و مربع دارای سطوح معادل، میزان مقاومت برشی کمانشی  $V_{cr}$  نیز تحت تأثیر این پارامتر می‌باشد؛ بنابراین از لحاظ میزان مقاومت برشی کمانشی به ترتیب بازشو مربع، دایره و مثلثی شکل در اولویت قرار دارند.

## ۷- مراجع

- [1] ANSYS User's Manual Version 12.0.
- [2] Homer, M. and Hadley, S. (1961), "Exploratory Tests on a Steel Delta Girder", Civil Engineering Magazine.
- [3] Homer, M. and Hadley, S. (1964), "The Bridge Delta Girder-Single-Webbed and Double-Webbed", AISC National Engineering Conference, Omaha.
- [4] عربزاده، ا. و ورزمیاری، م. (۱۳۸۶)، "ارزیابی مقاومت پیچشی تیورق‌های با سخت‌کننده دلتا"، سومین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز.
- [5] عربزاده، ا. و ورزمیاری، م. (۱۳۸۴)، "کنترل کمانش پیچشی جانبی تیورق‌های فولادی به وسیله سخت‌کننده دلتا"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
- [6] عربزاده، ا. و کاهه، م. (۱۳۸۴)، "رفتار کمانشی یک پانل از تیورق سخت شده با سخت‌کننده دلتا تحت اثر بار خمشی"، دومین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- [7] قوهستانی، س. و شهپایان، ف. (۱۳۸۸)، "تحلیل اثر بازشوی مدور در مقاومت برشی تیورق‌های فولادی"، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد، سال پنجم، شماره پنجم، ص. ۷۲-۶۴.

- [8] Jafari Sahnhsaraei, M. and Erfani, S. (2014), "Analysis of Elastic Buckling Behavior of Steel Delta Girders", International Journal of Engineering and Technology, Vol. 3, pp. 372-377.
- [9] Mohebkah, A. and G. Azandariani, M. (2014), "Lateral-Torsional Buckling of Delta Hollow Flange Beams under Moment Gradient", Thin-Walled Structures, Vol. 86, pp. 167-173.
- [10] AISC 360-16., (2016), Specification for structural steel buildings. Chicago, IL: American Institute of Steel Construction.
- [11] Sweetlin, R., Annlin, J. and Ramalingam, D. (2017), "Shear Behavior of Delta Hollow Flange Beam with and without Web Stiffener", International Journal of Science and Technology, Vol. 5, pp. 157-169.
- [12] Hatami, F. and Esmaeili, N. (2013), "Optimization of Height at Delta Stiffened in Steel Girders by Numerical Modeling", Journal of American Science, Vol. 9, pp. 1-5.

