

ارزیابی و بهبود رفتار تیورق دلتای سوراخ‌دار تحت تأثیر نیروی برشی

سلیمان قوهستانی^۱، ابراهیم زمانی بیدختی^{۲*}، سید مجتبی موسوی نژاد^۳

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

۲- استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، بخش عمران، دانشگاه بیرجند، بیرجند

*شاهرود، صندوق پستی ۳۶۱۹۹۹۵۱۶۱، zamani.eb@shahroodut.ac.ir

چکیده

به دلیل محدودیت فضا، عبور لوله‌های تأسیسات، تجهیزات و کابل‌های الکتریکی و لوله‌های تهویه از میان جان تیورق‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است؛ بنابراین تحلیل رفتار این تیورق‌ها تحت تأثیر نیروهای خمشی و برشی و مقاومت آن‌ها به دلیل وجود سوراخ در جان مورد توجه محققین بوده است. هدف این پژوهش تحلیل تیورق‌هایی با سوراخ دایروی در جان با سخت‌کننده دلتا تحت تأثیر نیروی برشی با استفاده از روش اجزاء محدود است. ابتدا نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج آزمایش مقایسه شده تا از صحت مدل‌سازی اطمینان حاصل گردد. سپس با انجام مطالعه پارامتری، اثر صلبیت، لاغری و همچنین پارامترهای ارتفاع و ضخامت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در این بررسی، بهینه پارامتر ارتفاع (نسبت فاصله اتصال سخت‌کننده‌ها در محل برخورد با جان تا بال فوقانی، به ارتفاع کل مقطع تیورق) برابر $0/25$ ، بهینه پارامتر ضخامت (نسبت ضخامت سخت‌کننده‌ها به ضخامت جان تیورق) در محدوده $0/9$ الی $1/20$ و بهینه پارامتر لاغری (نسبت ارتفاع کل مقطع به ضخامت جان تیورق) در محدوده 200 الی 210 به دست آمد. با تعیین بهینه پارامتر صلبیت (نسبت ضخامت بال‌ها به ضخامت جان) در محدوده $0/9$ الی $1/0$ ، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش صلبیت بال، مقاومت برشی تیورق افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی

تیورق، سخت‌کننده دلتا، سوراخ‌دار، کمانش برشی، بهینه‌سازی

Geometric investigation of perforated delta plate girder under shear force

S. Ghouhestani, E. Zamani Beydokhti, S. Mosavi Nejad

Abstract

Because of space limitation, it is unavoidable to pass the installations pipes, equipment, electric cables, and ventilation pipes among the web of plate girders. Therefore, the researchers have paid attention to the analysis of this plate girder behavior on the effect of bending and shear, and their strength with preparation holes in the web. In this case, investigations are performed to study the function of bending and shear capacity of plate girder with delta stiffener. The purpose of this paper is to analyze the delta plate girders with a circular hole in the web under shear force by the finite element method. The finding of the simulation is compared with the findings of the experiment to assure the accuracy of modeling. Then, a parametric study is done to analyze the effect of rigidity, slenderness, and also height and thickness parameters. Also, it was concluded that the optimum height parameter (ratio of stiffeners connection distance from the intersection at the web to upper flange, than to total height of plate girder) is 0.25, the optimum thickness parameter (ratio of stiffener thickness to the thickness of plate girder web) in range of 0.9 ~ 1.20, the optimum slenderness (ratio of plate girders height to the thickness of plate girder web) in range of 200 ~ 210, and the optimum rigidity (ratio of flanges thickness to thickness of plate girders web) in range of 0.9 ~ 1. Finally, it shows that the shear strength of the plate girder is increased by an increase in flange rigidity.

Keywords

Plate girder, Delta stiffener, Perforated, Shear buckling, Optimization

به نوعی از تیورق که در آن به منظور افزایش مقاومت از دو ورق مایل (متهای لبه بال بالایی به جان) استفاده می‌شود، تیورق دلتا می‌گویند. با توجه به استفاده روزافزون از تیورق‌ها و لزوم تعبیه بازشوهای بزرگ در جان تیورق، اهمیت بررسی مقاومت کمانشی تحت اثر نیروی برشی بسیار ضروری می‌نماید. در خصوص بررسی رفتار مقاطع دلتا تحقیقات معدود و به ویژه آزمایش‌های عملی کمی صورت گرفته است. مطابق با آزمایش‌های صورت گرفته توسط **Homer** و **Hadley** با همکاری **AISC** و **PNFSA** در سال ۱۹۶۱ مشخص شد که این نوع مقطع مقاومت خمشی، پایداری جانبی و سختی پیچشی بهتری نسبت به مقاطع معمول I شکل دارد. مطابق این آزمایش ضخامت سخت‌کننده‌ها، حداقل به اندازه ضخامت جان تیورق و نسبت فاصله اتصال سخت‌کننده‌ها به ارتفاع کل مقطع برابر ۰/۲۵، جهت کسب بیشترین مقاومت پیشنهاد گردیده است [۱ و ۲].

تحقیقات انجام شده توسط **Arabzadeh** و **kahe** نشان می‌دهد که استفاده از سخت‌کننده دلتا افزایش نسبتاً بالایی در مقاومت کمانشی خمشی مقطع، نسبت به مقطع سخت‌شده با سخت‌کننده طولی ایجاد می‌کند. بر اساس نتایج این مطالعه آن‌ها بیان کردند که در میان حالت‌های مورد بررسی، هنگامی که فاصله محل اتصال سخت‌کننده به جان تا بال فشاری به ۰/۲ ارتفاع جان برسد؛ بهترین وضعیت برای مقاومت در برابر کمانش در پانل خمشی ایجاد می‌شود [۳].

بررسی‌های صورت گرفته توسط **Arabzadeh** و **Varmazyari**، جهت بهبود سختی و پایداری جانبی تیورق‌های فولادی، نشان‌دهنده آن است که استفاده از سخت‌کننده‌های مایل (دلتا) با اتصال به بال و جان، باعث پایداری بیشتر در برابر بارهای وارده و جلوگیری از کمانش بال و جان تیورق گردیده و همچنین از کمانش پیچشی جانبی مقطع جلوگیری می‌نماید [۴ و ۵].

Arabzadeh و **Varmazyari**، در پژوهشی دیگر مقاومت پیچشی تیورق‌های دلتا را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. بر اساس این تحقیق با استفاده از سخت‌کننده‌های دلتا می‌توان مقاومت پیچشی و سختی جانبی تیورق‌ها را بالا برده و در نتیجه از بروز کمانش در مقطع جلوگیری نمود. نتایج بررسی آن‌ها نشان می‌دهد که نسبت بهینه ضخامت سخت‌کننده به ضخامت جان با مقدار ۱/۵ تا ۲/۰ دارای بیشترین ظرفیت پیچشی، و مقدار بهینه پارامترهای ارتفاع (فاصله اتصال سخت‌کننده به جان تا بال

فوقانی مقطع) و ضخامت (نسبت ضخامت سخت‌کننده به ضخامت جان)، جهت دستیابی به حداکثر کمانش پیچشی جانبی در حدود ۰/۲۵ تا ۰/۴۰ می‌باشد. در این رابطه، پارامتر ارتفاع در محدوده ۰/۲۰ تا ۰/۲۵ تأثیر بیشتری را در افزایش لنگر بحرانی مقطع دلتا با توجه به وزن مقطع از خود نشان می‌دهد [۵ و ۶].

Hoglund آزمایش‌هایی بر روی ۱۲ تیورق با جان‌هایی دارای لاغری در محدوده ۲۰۰ تا ۳۰۰ انجام داده است. این آزمایش‌ها اهمیت نسبی معیار گسیختگی برشی در تیورق‌هایی با جان سوراخ‌دار را نشان می‌دهد [۷].

نتایج حاصل از تحلیل‌های صورت گرفته توسط قوهستانی و شهبان نشان‌دهنده کاهش مقاومت تا میزان ۵۰ درصد در تیورق‌های دارای بازشوی مدور می‌باشد. بررسی‌ها 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 [۸].

Shon و همکارانش [۹] به پژوهش در خصوص طراحی بهینه تیورق با جان موج‌دار با استفاده از آیین‌نامه اروپا [۱۰] پرداخته‌اند. آن‌ها روش بهینه طراحی و ویژگی‌های مقطع مطلوب را مورد بحث و بررسی قرار داده‌اند. به منظور بهینه‌سازی، تابع هدف کمینه کردن وزن تیورق بوده است؛ به نحوی که شرایط مرتبط با نسبت لاغری، تنش در بال‌ها و جان تیورق و تغییرمکان مطابق ضوابط آیین‌نامه تأمین شود. در پژوهشی دیگر، **Faluyi** و **Arum** [۱۱] به بحث در مورد بهینه‌سازی تیورق با استفاده از جعبه ابزار گرادیان عمومی کاهش‌یافته در نرم‌افزار **Excel** پرداخته‌اند. نتایج به صورت نمودارهایی از زوج‌های بهینه شامل پارامترهای عمق جان - ضخامت جان، عمق جان - ضخامت بال، عرض بال - ضخامت بال ارائه شده است. علاوه بر آن، یک نمودار که بیانگر عمق جان بر حسب ابعاد مقطع بهینه و سخت‌کننده می‌باشد؛ نیز از نتایج این پژوهش است.

Nabeel و **Fadhil** [۱۲] با استفاده از چند روش بهینه‌سازی اقدام به کمینه کردن وزن تیورق نموده‌اند. آن‌ها ضوابط آیین‌نامه انگلیس **Bs 5959:2000-1** [۱۳] را به عنوان قیدهای طراحی در روش بهینه‌سازی لحاظ کرده‌اند. نتایج بررسی نشان می‌دهد که روش درجه دوم متوالی^۱ در مقایسه با سایر روش‌ها آسان‌تر و سریع‌تر است. روش بهینه‌سازی چند سطحی^۲، دارای سرعت تحلیل بالایی است اما در این روش انتخاب مسئله در هر سطح و هماهنگی متغیرها در یافتن جواب صحیح، بسیار حائز اهمیت است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش



ارتفاع جان و کاهش ضخامت بال وزن کل تیوروق تا ۵۰ درصد کاهش می‌یابد.

مزیت اصلی استفاده از تیوروق با جان موج‌دار نسبت به تیوروق با جان معمولی آن است که در این نوع تیوروق نیاز به سخت‌کننده در حالت استفاده از جان نازک نیست. از سوی دیگر این نوع تیوروق دارای پایداری مناسبی در برابر کمانش برشی می‌باشد؛ بنابراین Sudeok و همکارانش [۱۴] اقدام به بهینه‌سازی وزن این نوع تیوروق با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک نموده‌اند. قیده‌های در نظر گرفته شده در تحلیل بر اساس آیین‌نامه‌های EN1993-1-5، DAST-R015 و DIN18800 [۱۰، ۱۵ و ۱۶] بوده است. نتایج نشان می‌دهد که متغیر وزن جان، پارامتر مهمی در تابع کاهش وزن تیوروق می‌باشد. همچنین با افزایش مقاومت تسلیم مقدار تابع هدف (وزن تیوروق) کاهش می‌یابد. Korkzan و Zandi [۱۷] به تحلیل رفتار برشی تیوروق فولادی با جان موج‌دار محلی تحت اثر بار استاتیکی افزایشی پرداخته‌اند. آن‌ها برای بررسی رفتار تیوروق‌های با جان موج‌دار محلی در مقایسه با تیوروق‌های با سخت‌کننده‌های عرضی برای کنترل کمانش برشی اقدام به تحلیل عددی نموده‌اند. نتایج مطالعه عددی نشان می‌دهد که تیوروق با جان موج‌دار محلی نسبت به یک تیوروق ساده بدون سخت‌کننده میانی عرضی، دارای مقاومت برشی بیشتری است.

Seung و Young [۱۸] به بررسی مقاومت برشی پانل‌های انتهایی جان تیوروق با توجه به عملکرد میدان کشش پرداختند. آنها اثر سخت‌کننده عرضی در دو طرف جان در محل تکیه‌گاه بر مقاومت پس‌کمانشی تیوروق در حالت کمانش برشی در پانل‌های انتهایی جان را بررسی کردند.

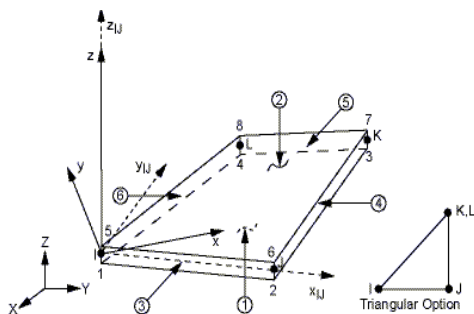
Hingnekar و Vyavahare [۱۹] رفتار تیوروق تحت اثر بارگذاری برشی را تشریح کردند. آنها به بیان تاریخیچه نحوه محاسبه مقاومت برشی نهایی تیوروق با سخت‌کننده عرضی پرداختند. نتایج مطالعه و بررسی آنها نشان می‌دهد که در تعیین مقاومت پس‌کمانشی تیوروق‌ها ایراداتی وجود دارد و مفروضات ارائه شده در این نظریه‌ها با مکانیزم پس‌کمانش واقعی مطابقت ندارد. این نظریه‌ها برخی از پارامترهای مهم را که بر مقاومت پس‌کمانش تأثیرگذار است را نادیده می‌گیرند.

در این مقاله، تحلیل تیوروق‌هایی با سوراخ در جان و دارای سخت‌کننده دلتا تحت تأثیر نیروی برشی با استفاده از روش اجزاء محدود صورت گرفته است. به منظور راست‌آزمایی مدل سه بعدی اجزاء محدود، نتایج تحلیل با نتایج آزمایش مقایسه شده است. در این پژوهش، با تحلیل پارامترهای مؤثر بر

مقاومت برشی کمانشی تیوروق، محدوده بهینه آن‌ها محاسبه شده است. به این منظور در ادامه پارامترهای بهینه ارتفاع، ضخامت، لاغری و صلیبیت مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- معرفی مدل عددی و بررسی دقت تحلیل کمانشی نرم‌افزار

روش المان محدود یک روش عددی قوی و کارآمد است که برای حل مسائل گوناگون با هندسه و شرایط مرزی مختلف در علوم مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به همین منظور جهت مقایسه و بررسی صحت نتایج حاصل از مدل‌سازی کامپیوتری، از نرم‌افزار ANSYS v.12 استفاده شده است. تیوروق دلتا به نحوی که تشریح گردیده، مدل‌سازی شده و نتایج حاصل از تحلیل اجزا محدود با گزارش‌های آزمایشگاهی [۱] مقایسه گردیده 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 [۲۰].



شکل ۱- مشخصات المان SHELL 63 در نرم‌افزار ANSYS

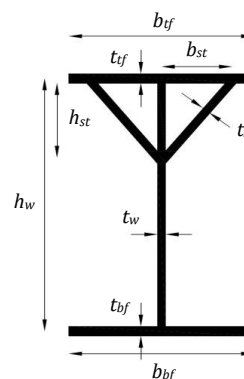
در تحلیل مدل تولید شده، از تحلیل کمانشی مقادیر ویژه بهره گرفته شده است. مشخصات مکانیکی فولاد St37 برای مصالح معرفی شده و نوع رفتار ماده نیز ایزوتروپیک ارتجاعی تعریف گردیده است. برای مدل‌سازی بهتر و سرعت انجام بالاتر تحلیل، از شرایط مرزی موجود در نرم‌افزار برای ایجاد تقارن و در نتیجه مدل‌سازی نصف طول تیر، استفاده شده است. شبکه‌بندی مدل نیز به گونه‌ای انجام گرفته که دقت حل در حد مطلوب بوده و از طرفی حجم و زمان عملیات تحلیل کمینه باشد. شرایط مرزی لبه‌های تیوروق به صورت دو سر گیردار معرفی شده است (شکل ۲). برای تخمین دقت شبکه‌بندی در مدل ارائه شده (تحت تأثیر برش خالص) و به منظور اطمینان از صحت نتایج، بر روی یک تیوروق نمونه شکل (۳) با مشخصات

از شبکه‌بندی 32×32 برای جان و 8×32 برای بال به عنوان شبکه‌بندی مناسب در تحلیل این نوع تیرورق‌ها استفاده شده است. این حالت، خطای در حدود ۴ درصد با نتایج آزمایش را نشان داد؛ که با توجه به خطای موجود در محاسبات مدل عددی و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، قابل قبول بوده و می‌توان به نتایج تحلیل برنامه اعتماد نمود.

۳- 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 تیرورق دلتا ایجاد شده است. در بررسی حالت‌های گوناگون، با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر مقاومت برشی کمانشی تیرورق دلتای سوراخ‌دار، رفتارهای سازه‌ای آن‌ها بررسی شده است. در این پژوهش، با مطالعه پارامترهای مؤثر محدوده بهینه آن‌ها نیز محاسبه شد.

مندرج در جدول (۱)، پس از مدل‌سازی با شبکه‌بندی‌های مختلف، آنالیز کمانشی صورت گرفته و نتایج تحلیل در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل ۲- مقطع تیرورق دلتا

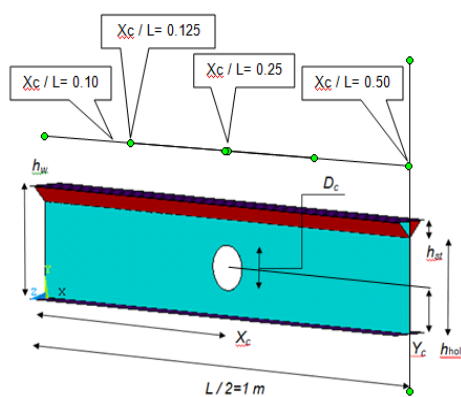
همان‌طور که در ردیف چهارم جدول (۲) مشخص است، همگرایی لازم بین تیپ III و IV شبکه‌بندی وجود دارد؛ بنابراین

جدول ۱- مشخصات تیرورق دلتا نمونه آزمایشی مورد نظر جهت صحت‌سنجی [۱]

برش کمانشی (MN)	مشخصات مکانیکی			سخت‌کننده دلتا (cm)			بال پایین (cm)		بال بالا (cm)		جان (cm)		طول (m)
	V_{cr}	ν	E (GPa)	t_{st}	b_{st}	h_{st}	t_{bf}	b_{bf}	t_{tf}	b_{tf}	t_w	h_w	
۱/۱۱۲	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 تیرورق دلتا

تیپ	I	II	III	IV
شبکه‌بندی بال	4×4	4×4	8×16	8×32
شبکه‌بندی جان	4×4	8×8	16×16	32×32
مقاومت برشی (MN)	۰/۹۷	۱/۰۲	۱/۰۶	۱/۱۳



شکل ۳- موقعیت مکانی پارامترهای تعریف شده

شکل (۳) موقعیت مکانی پارامترهای تعریف شده برای نصف طول تیر را در طول یک تیر متقارن که دارای دو بازو می‌باشد؛ نشان می‌دهد. برخی مشخصات مقاطع که در طول تحلیل ثابت باقی مانده و برای تمام مدل‌ها یکسان می‌باشد در جدول (۳) نشان داده شده است.

۴- نتایج تحلیل و بررسی

۴-۱- بهینه پارامتر ارتفاع (h_{st}/h_w)

نسبت فاصله اتصال سخت‌کننده‌ها در محل برخورد با جان تا بال فوقانی، به ارتفاع کل مقطع تیرورق (h_{st}/h_w) پارامتر

ارتفاع نامیده شده است. جهت بررسی پارامتر ارتفاع سوراخ، با در نظر گرفتن مقاطع مشابه بخش قبل و فقط با تغییر در مقدار پارامتر ارتفاع سوراخ در محدوده ۱۰ الی ۳۵ درصد طول تیر به جهت رعایت مسائل اجرایی، مقاومت کمانشی برشی در هر مورد با تحلیل و استفاده از نرم‌افزار به دست آمده است. این تحلیل برای پنج مقطع با موقعیت طولی سوراخ برابر با ۱۲/۵، ۱۷/۵، ۲۰، ۳۰ و ۳۵ درصد از طول تیر انجام شده است. نتایج برای موقعیت طولی سوراخ برابر با ۲۰ درصد طول تیر در

جدول (۴) ارائه شده است. برای سایر حالت‌ها با موقعیت‌های طولی دیگر نیز نتایج در جدول‌هایی مشابه جدول (۴) تنظیم گردیده است.

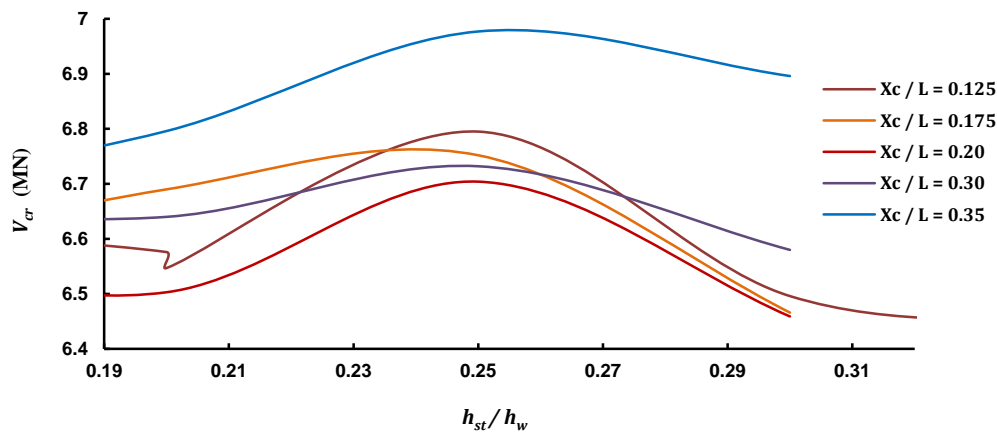
با توجه به داده‌های حاصل از تحلیل در جدول (۴) و سایر نتایج برای موقعیت‌های طولی دیگر، منحنی تغییرات پارامتر ارتفاع سوراخ بر حسب مقاومت برشی کمانشی در شکل (۴) ترسیم شده است. با بررسی شکل (۴) ملاحظه می‌گردد که بهینه پارامتر ارتفاع (h_{st}/h_w)، برابر با ۰/۲۵ می‌باشد.

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

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

جدول ۴- مشخصات تیورق‌های دلتای مدل‌سازی شده برای $X_c/L = 0.20$

نام مقطع	مشخصات جان	مشخصات بال بالا و پایین	مشخصات سخت کننده دلتا		مشخصات سوراخ و محل موقعیت طولی			ضخامت پارامتر	پارامتر ارتفاع	پارامتر ارتفاع موثر سوراخ	برش کمانشی
			t_{st} (cm)	h_{st} (cm)	D_c (cm)	Y_c (cm)	X_c (cm)				
بازشو دایره‌ای شکل	t_w (cm)	t_f (cm)									
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 ۴- مقاومت کمانشی برشی بر اساس پارامتر ارتفاع سوراخ

۲-۴- بهینه پارامتر ضخامت (t_{st}/t_w) نسبت ضخامت سخت کننده‌ها به ضخامت جان تیورق، تغییر ضخامت سخت کننده‌های تیورق به بررسی و تعیین بهینه در این رابطه با پارامتر ضخامت نامیده شده است.

۰/۱۲۵ طول تیر نیز، نتایج در جدولی مشابه جداول (۵) و (۶) تنظیم شده است. با توجه به داده‌های حاصل از تحلیل در جداول (۵) و (۶) و سایر نتایج برای موقعیت‌های طولی دیگر، منحنی تغییرات پارامتر ضخامت بر حسب مقاومت برشی کمانشی در شکل‌های (۵) و (۶) ترسیم شده است.

پارامتر ضخامت پرداخته شده است. برای این منظور، دو مقطع با موقعیت طولی سوراخ برابر با ۰/۱۲۵ و ۰/۳۰ طول تیر تحلیل شده است. نتایج برای موقعیت طولی سوراخ برابر با ۰/۳۰ طول تیر در جداول (۵) و (۶) تنظیم گردیده است. برای موقعیت طولی

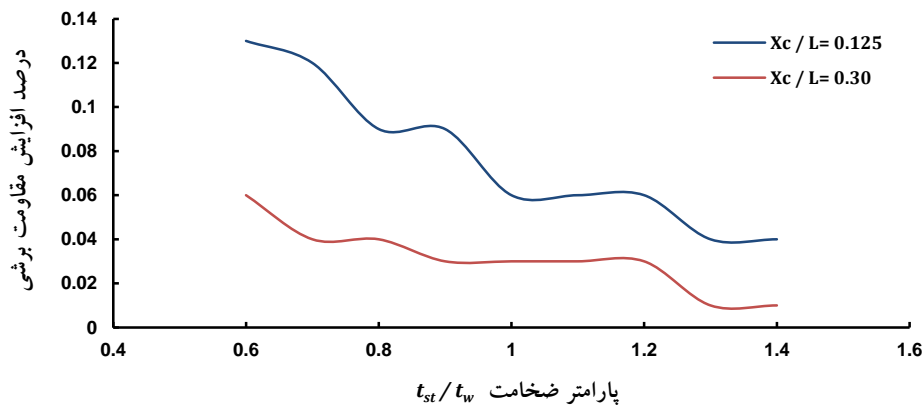
جدول ۵- مشخصات تیرورق‌های دلتای مدل‌سازی شده برای $X_c/L = 0.30$

نام مقطع	مشخصات جان	مشخصات بال بالا و پایین	مشخصات دلتا		مشخصات سوراخ و محل موقعیت طولی			پارامتر ضخامت	پارامتر ارتفاع	پارامتر ارتفاع موثر سوراخ	برش کمانشی
			t_{st} (cm)	h_{st} (cm)	D_c (cm)	Y_c (cm)	X_c (cm)				
بازشو دایره‌ای شکل	t_w (cm)	t_f (cm)	t_{st} (cm)	h_{st} (cm)	D_c (cm)	Y_c (cm)	X_c (cm)	t_{st}/t_w	h_{st}/h_w	D_c/h_{hol}	V_{cr} (MN)
DPGC147	۱	۱	۰/۵	۲۵	۲۰	۳۷/۵	۶۰	۰/۵	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۶/۷۱۸
DPGC148	۱	۱	۰/۶	۲۵	۲۰	۳۷/۵	۶۰	۰/۶	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۶/۷۲۲
DPGC149	۱	۱	۰/۷	۲۵	۲۰	۳۷/۵	۶۰	۰/۷	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۶/۷۲۵
DPGC150	۱	۱	۰/۸	۲۵	۲۰	۳۷/۵	۶۰	۰/۸	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۶/۷۲۸
DPGC151	۱	۱	۰/۹	۲۵	۲۰	۳۷/۵	۶۰	۰/۹	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۶/۷۳۰
DPGC152	۱	۱	۱/۰	۲۵	۲۰	۳۷/۵	۶۰	۱/۰	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۶/۷۳۲
DPGC153	۱	۱	۱/۱	۲۵	۲۰	۳۷/۵	۶۰	۱/۱	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۶/۷۳۴
DPGC154	۱	۱	۱/۲	۲۵	۲۰	۳۷/۵	۶۰	۱/۲	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۶/۷۳۶
DPGC155	۱	۱	۱/۳	۲۵	۲۰	۳۷/۵	۶۰	۱/۳	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۶/۷۳۷
DPGC156	۱	۱	۱/۴	۲۵	۲۰	۳۷/۵	۶۰	۱/۴	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۶/۷۳۸

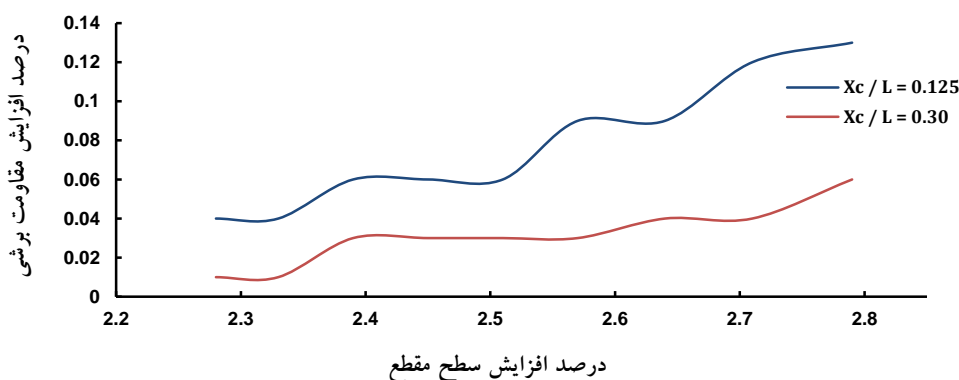
جدول ۶- درصد افزایش سطح مقطع و افزایش مقاومت با توجه به جدول (۵)

نام مقطع	مشخصات جان	مشخصات سخت‌کننده دلتا				پارامتر ضخامت	سطح مقطع	درصد افزایش سطح مقطع	برش کمانشی	درصد افزایش برش کمانشی
		t_{st} (cm)	L_{st} (cm)	b_{st} (cm)	h_{st} (cm)					
بازشو دایره‌ای شکل	t_w (cm)	t_{st} (cm)	L_{st} (cm)	b_{st} (cm)	h_{st} (cm)	t_{st}/t_w	S (cm ²)	(%)	V_{cr} (MN)	(%)
DPGC147	۱	۰/۵	۲۹/۱۵	۱۵	۲۵	۰/۵	۲۰۹/۱۵	-	۶/۷۱۸	-
DPGC148	۱	۰/۶	۲۹/۱۵	۱۵	۲۵	۰/۶	۲۱۴/۹۸	۲/۷۹	۶/۷۲۲	۰/۰۶
DPGC149	۱	۰/۷	۲۹/۱۵	۱۵	۲۵	۰/۷	۲۲۰/۸۱	۲/۷۱	۶/۷۲۵	۰/۰۴
DPGC150	۱	۰/۸	۲۹/۱۵	۱۵	۲۵	۰/۸	۲۲۶/۶۴	۲/۶۴	۶/۷۲۸	۰/۰۴
DPGC151	۱	۰/۹	۲۹/۱۵	۱۵	۲۵	۰/۹	۲۳۲/۴۷	۲/۵۷	۶/۷۳۰	۰/۰۳
DPGC152	۱	۱/۰	۲۹/۱۵	۱۵	۲۵	۱/۰	۲۳۸/۳	۲/۵۱	۶/۷۳۲	۰/۰۳
DPGC153	۱	۱/۱	۲۹/۱۵	۱۵	۲۵	۱/۱	۲۴۴/۱۳	۲/۴۵	۶/۷۳۴	۰/۰۳
DPGC154	۱	۱/۲	۲۹/۱۵	۱۵	۲۵	۱/۲	۲۴۹/۹۶	۲/۳۹	۶/۷۳۶	۰/۰۳
DPGC155	۱	۱/۳	۲۹/۱۵	۱۵	۲۵	۱/۳	۲۵۵/۷۹	۲/۳۳	۶/۷۳۷	۰/۰۱
DPGC156	۱	۱/۴	۲۹/۱۵	۱۵	۲۵	۱/۴	۲۶۱/۶۲	۲/۲۸	۶/۷۳۸	۰/۰۱





شکل ۵- درصد افزایش مقاومت کمانشی برشی بر اساس پارامتر ضخامت



شکل ۶- درصد افزایش مقاومت کمانشی برشی بر اساس درصد افزایش سطح مقطع

شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب درصد افزایش مقاومت برشی را نسبت به پارامتر ضخامت و درصد افزایش سطح مقطع یا به عبارت دیگر وزن تیروورق را نمایش می‌دهند. از این نمودارها جهت بررسی و درک بهتر نحوه تغییرات استفاده شده است. با بررسی شکل (۵) ملاحظه می‌گردد که برای هر دو حالت موقعیت طولی بازشو، پارامتر ضخامت در محدوده ۰/۹ الی ۱/۲ بیشترین کشیدگی در نمودار و یا به عبارت دیگر، بهینه همگرایی با نرخ یکنواخت درصد افزایش مقاومت برشی کمانشی را دارا می‌باشد. در شکل (۶) محدوده ۲/۴ الی ۲/۵۵ برای درصد افزایش سطح مقطع و متناظر با محدوده ۰/۹ الی ۱/۲ برای پارامتر ضخامت، مطابق با جدول (۶) نتیجه فوق را تایید می‌نماید.

۳-۴- بررسی اثر صلبیت نسبی بال (t_f/t_w) بر مقاومت برشی تیروورق

نسبت ضخامت بال‌ها به ضخامت جان تیروورق

شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب درصد افزایش مقاومت برشی را نسبت به پارامتر ضخامت و درصد افزایش سطح مقطع یا به عبارت دیگر وزن تیروورق را نمایش می‌دهند. از این نمودارها جهت بررسی و درک بهتر نحوه تغییرات استفاده شده است. با بررسی شکل (۵) ملاحظه می‌گردد که برای هر دو حالت موقعیت طولی بازشو، پارامتر ضخامت در محدوده ۰/۹ الی ۱/۲ بیشترین کشیدگی در نمودار و یا به عبارت دیگر، بهینه همگرایی با نرخ یکنواخت درصد افزایش مقاومت برشی کمانشی را دارا می‌باشد. در شکل (۶) محدوده ۲/۴ الی ۲/۵۵ برای درصد افزایش سطح مقطع و متناظر با محدوده ۰/۹ الی ۱/۲ برای پارامتر ضخامت، مطابق با جدول (۶) نتیجه فوق را تایید می‌نماید.

۳-۴- بررسی اثر صلبیت نسبی بال (t_f/t_w) بر مقاومت برشی تیروورق

نسبت ضخامت بال‌ها به ضخامت جان تیروورق

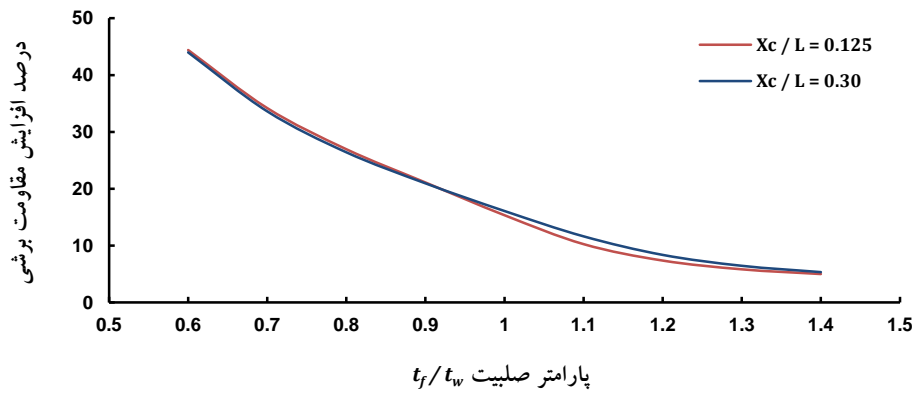
جدول ۷- مشخصات تیرورق‌های دلتای مدل‌سازی شده برای $X_c/L = 0.30$

نام مقطع	مشخصات جان	مشخصات بال بالا و پایین	مشخصات دلتا		مشخصات سوراخ و محل موقعیت طولی			پارامتر ضخامت	پارامتر ارتفاع	پارامتر ارتفاع موثر سوراخ	برش کمانشی
			t_{st} (cm)	h_{st} (cm)	D_c (cm)	Y_c (cm)	X_c (cm)				
بازشو دایره‌ای شکل	t_w (cm)	t_f (cm)	t_{st} (cm)	h_{st} (cm)	D_c (cm)	Y_c (cm)	X_c (cm)	t_{st}/t_w	h_{st}/h_w	D_c/h_{hol}	V_{cr} (MN)
DPGC167	۱	۰/۵	۱	۲۵	۲۰	۳۷/۵	۶۰	۰/۵	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۱/۹۷۱
DPGC168	۱	۰/۶	۱	۲۵	۲۰	۳۷/۵	۶۰	۰/۶	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۲/۸۳۸
DPGC169	۱	۰/۷	۱	۲۵	۲۰	۳۷/۵	۶۰	۰/۷	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۳/۷۹۲
DPGC170	۱	۰/۸	۱	۲۵	۲۰	۳۷/۵	۶۰	۰/۸	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۴/۷۹۴
DPGC171	۱	۰/۹	۱	۲۵	۲۰	۳۷/۵	۶۰	۰/۹	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۵/۷۹۹
DPGC172	۱	۱/۰	۱	۲۵	۲۰	۳۷/۵	۶۰	۱/۰	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۶/۷۳۲
DPGC173	۱	۱/۱	۱	۲۵	۲۰	۳۷/۵	۶۰	۱/۱	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۷/۵۱۵
DPGC174	۱	۱/۲	۱	۲۵	۲۰	۳۷/۵	۶۰	۱/۲	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۸/۱۴۴
DPGC175	۱	۱/۳	۱	۲۵	۲۰	۳۷/۵	۶۰	۱/۳	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۸/۶۶۹
DPGC176	۱	۱/۴	۱	۲۵	۲۰	۳۷/۵	۶۰	۱/۴	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۹/۱۳۲

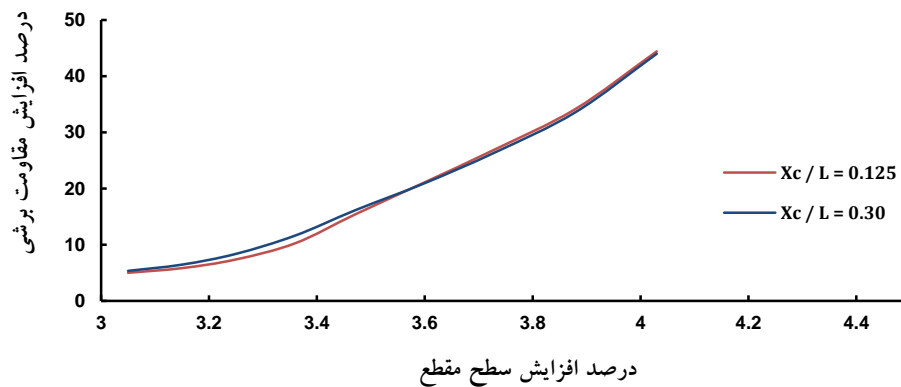
جدول ۸- درصد افزایش سطح مقطع و افزایش مقاومت با توجه به جدول (۷)

نام مقطع	مشخصات جان	مشخصات بال بالا و پایین	مشخصات سخت‌کننده دلتا			پارامتر ضخامت	سطح مقطع	درصد افزایش سطح مقطع	برش کمانشی	درصد افزایش برش کمانشی
			t_{st} (cm)	b_{st} (cm)	h_{st} (cm)					
بازشو دایره‌ای شکل	t_w (cm)	t_{st} (cm)	t_{st} (cm)	b_{st} (cm)	h_{st} (cm)	t_{st}/t_w	S (cm ²)	(%)	V_{cr} (MN)	(%)
DPGC167	۱	۰/۵	۱	۱۵	۲۵	۰/۵	۱۹۸/۳	-	۱/۹۷۱	-
DPGC168	۱	۰/۶	۱	۱۵	۲۵	۰/۶	۲۰۶/۳	۴/۰۳	۲/۸۳۸	۴۳/۹۹
DPGC169	۱	۰/۷	۱	۱۵	۲۵	۰/۷	۲۱۴/۳	۳/۸۸	۳/۷۹۲	۳۲/۶۶
DPGC170	۱	۰/۸	۱	۱۵	۲۵	۰/۸	۲۲۲/۳	۳/۷۳	۴/۷۹۴	۲۶/۴۲
DPGC171	۱	۰/۹	۱	۱۵	۲۵	۰/۹	۲۳۰/۳	۳/۶۰	۵/۷۹۹	۲۰/۹۶
DPGC172	۱	۱/۰	۱	۱۵	۲۵	۱/۰	۲۳۸/۳	۳/۴۷	۶/۷۳۲	۱۶/۰۹
DPGC173	۱	۱/۱	۱	۱۵	۲۵	۱/۱	۲۴۶/۳	۳/۳۶	۷/۵۱۵	۱۱/۶۳
DPGC174	۱	۱/۲	۱	۱۵	۲۵	۱/۲	۲۵۴/۳	۳/۲۵	۸/۱۴۴	۸/۳۷
DPGC175	۱	۱/۳	۱	۱۵	۲۵	۱/۳	۲۶۲/۳	۳/۱۵	۸/۶۶۹	۶/۴۵
DPGC176	۱	۱/۴	۱	۱۵	۲۵	۱/۴	۲۷۰/۳	۳/۰۵	۹/۱۳۲	۵/۳۴





شکل ۷- درصد افزایش مقاومت کمانشی برشی بر اساس پارامتر صلبیت



شکل ۸- درصد افزایش مقاومت کمانشی برشی بر اساس درصد افزایش سطح مقطع

جان تیوروق به بررسی این موضوع پرداخته‌ایم. این مورد برای دو مقطع با موقعیت طولی سوراخ برابر با ۰/۱۲۵ و ۰/۳۰ طول تیر انجام شده است. برای موقعیت طولی دیگر نیز نتایج در جدولی مشابه جداول (۹) و (۱۰) ارائه شده است.

نتایج برای موقعیت طولی سوراخ برابر با ۰/۳۰ طول تیر در جدول‌های (۹) و (۱۰) تنظیم گردیده است. برای موقعیت طولی دیگر نیز نتایج در جدولی مشابه جدول‌های (۹) و (۱۰) تنظیم می‌گردد. با توجه به داده‌های حاصل از تحلیل در جدول‌های (۹) و (۱۰) و سایر نتایج برای موقعیت‌های طولی دیگر، منحنی تغییرات پارامتر لاغری بر حسب مقاومت برشی کمانشی در شکل‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) ترسیم شده است. شکل‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) درصد افزایش مقاومت برشی، پارامتر لاغری و درصد افزایش سطح مقطع یا به عبارت دیگر وزن تیوروق را نسبت به یکدیگر نمایش می‌دهند.

با بررسی شکل (۹) ملاحظه می‌گردد که برای هر دو حالت موقعیت طولی بازشو، پارامتر لاغری در محدوده ۲۰۰ الی ۲۱۰ دارای یک نقطه عطف ماکزیمم در نمودار می‌باشد.

شکل‌های (۷) و (۸) به ترتیب درصد افزایش مقاومت برشی را نسبت به پارامتر صلبیت و درصد افزایش سطح مقطع یا به عبارت دیگر وزن تیوروق را نمایش می‌دهند. از این نمودارها جهت بررسی و درک بهتر نحوه تغییرات استفاده شده است. با بررسی شکل (۷) ملاحظه می‌گردد که برای هر دو حالت موقعیت طولی بازشو، پارامتر صلبیت در محدوده ۰/۹۰ الی ۱/۰ بیشترین انحنا در نمودار را دارا می‌باشد.

در شکل (۸) محدوده ۳/۴ الی ۳/۶ برای درصد افزایش سطح مقطع و متناظر با محدوده ۰/۹۰ الی ۱/۰ برای پارامتر صلبیت، مطابق با جدول (۸) نتیجه فوق را تایید می‌نماید. بنابراین با توجه به مطالب فوق می‌توان گفت، بهینه پارامتر صلبیت (t_f/t_w)، در محدوده ۰/۹۰ الی ۱/۰ تخمین زده می‌شود.

۴-۴- بررسی اثر لاغری جان بر مقاومت برشی (پارامتر لاغری) (h_w/t_w)

نسبت ارتفاع کل مقطع به ضخامت جان تیوروق (h_w/t_w)، پارامتر لاغری نامیده شده است. در این رابطه با تغییر ضخامت

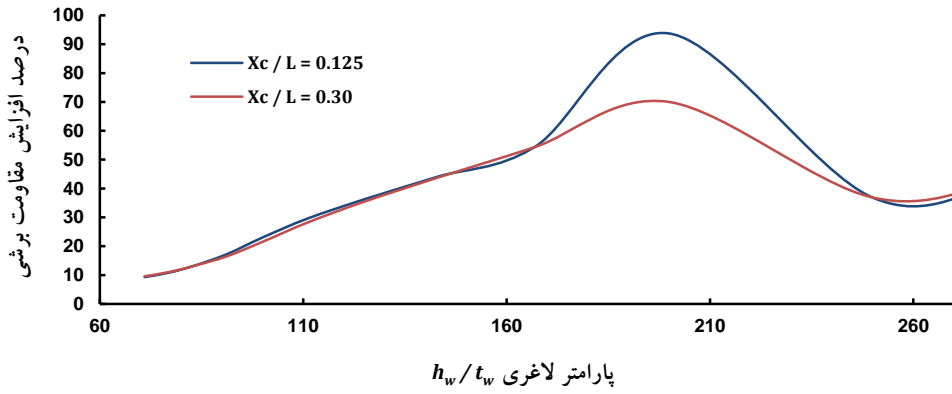
جدول ۹- مشخصات تیورق‌های دلتای مدل‌سازی شده برای $X_c/L = 0.30$

نام مقطع	مشخصات جان		سخت‌کننده دلتا		مشخصات سوراخ و محل موقعیت طولی			پارامتر لاغری	پارامتر ارتفاع	پارامتر ارتفاع موثر سوراخ	برش کمانشی
	t_w (cm)	h_w (cm)	t_{st} (cm)	h_{st} (cm)	D_c (cm)	Y_c (cm)	X_c (cm)				
DPGC301	۰/۲۰	۱۰۰	۱	۶۰	۲۰	۳۷/۵	۲۵	۵۰۰	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۰/۱۷۱
DPGC302	۰/۲۵	۱۰۰	۱	۶۰	۲۰	۳۷/۵	۲۵	۴۰۰	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۰/۲۸۴
DPGC303	۰/۳۰	۱۰۰	۱	۶۰	۲۰	۳۷/۵	۲۵	۳۳۳	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۰/۴۳۲
DPGC304	۰/۳۵	۱۰۰	۱	۶۰	۲۰	۳۷/۵	۲۵	۲۸۶	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۰/۶۱۸
DPGC305	۰/۴۰	۱۰۰	۱	۶۰	۲۰	۳۷/۵	۲۵	۲۵۰	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۰/۸۴۶
DPGC190	۰/۵۰	۱۰۰	۱	۶۰	۲۰	۳۷/۵	۲۵	۲۰۰	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۱/۴۳۸
DPGC191	۰/۶۰	۱۰۰	۱	۶۰	۲۰	۳۷/۵	۲۵	۱۶۷	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۲/۲۲۰
DPGC192	۰/۷۰	۱۰۰	۱	۶۰	۲۰	۳۷/۵	۲۵	۱۴۳	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۳/۱۹۱
DPGC193	۰/۸۰	۱۰۰	۱	۶۰	۲۰	۳۷/۵	۲۵	۱۲۵	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۴/۳۲۲
DPGC194	۰/۹۰	۱۰۰	۱	۶۰	۲۰	۳۷/۵	۲۵	۱۱۱	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۵/۵۴۰
DPGC195	۱/۰	۱۰۰	۱	۶۰	۲۰	۳۷/۵	۲۵	۱۰۰	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۶/۷۳۲
DPGC196	۱/۱	۱۰۰	۱	۶۰	۲۰	۳۷/۵	۲۵	۹۱	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۷/۸۳۶
DPGC197	۱/۲	۱۰۰	۱	۶۰	۲۰	۳۷/۵	۲۵	۸۳	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۸/۸۶۶
DPGC198	۱/۳	۱۰۰	۱	۶۰	۲۰	۳۷/۵	۲۵	۷۷	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۹/۸۴۷
DPGC199	۱/۴	۱۰۰	۱	۶۰	۲۰	۳۷/۵	۲۵	۷۱	۰/۲۵	۰/۲۶۷	۱۰/۷۹

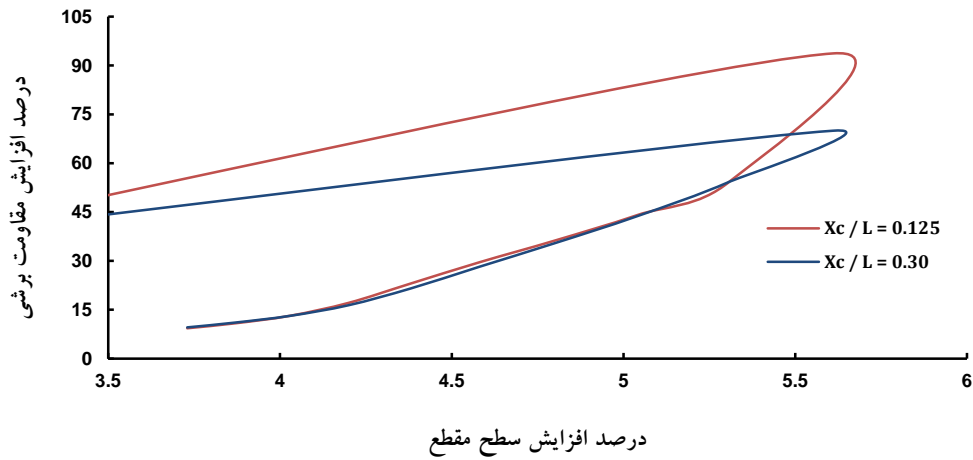
جدول ۱۰- درصد افزایش سطح مقطع و افزایش مقاومت با توجه به جدول (۵)

نام مقطع	مشخصات جان	مشخصات سخت‌کننده دلتا			پارامتر لاغری	سطح مقطع	درصد افزایش سطح مقطع	برش کمانشی	درصد افزایش برش کمانشی
		t_{st} (cm)	L_{st} (cm)	b_{st} (cm)					
DPGC301	۰/۲۰	۱	۲۹/۱۵	۱۵	۱۵۸	-	۰/۱۷۱	-	
DPGC302	۰/۲۵	۱	۲۹/۱۵	۱۵	۱۶۳	۳/۱۶	۰/۲۸۴	۶۶/۰۸	
DPGC303	۰/۳۰	۱	۲۹/۱۵	۱۵	۱۶۸	۳/۰۶	۰/۴۳۲	۵۲/۱۱	
DPGC304	۰/۳۵	۱	۲۹/۱۵	۱۵	۱۷۳	۲/۹۷	۰/۶۱۸	۴۳/۰۶	
DPGC305	۰/۴۰	۱	۲۹/۱۵	۱۵	۱۷۸	۲/۸۹	۰/۸۴۶	۳۶/۸۹	
DPGC190	۰/۵۰	۱	۲۹/۱۵	۱۵	۱۸۸	۵/۶۱	۱/۴۳۸	۶۹/۹۸	
DPGC191	۰/۶۰	۱	۲۹/۱۵	۱۵	۱۹۸	۵/۳۱	۲/۲۲۰	۵۴/۳۸	
DPGC192	۰/۷۰	۱	۲۹/۱۵	۱۵	۲۰۸	۵/۰۴	۳/۱۹۱	۴۳/۷۴	
DPGC193	۰/۸۰	۱	۲۹/۱۵	۱۵	۲۱۸	۴/۸۰	۴/۳۲۲	۳۵/۴۴	
DPGC194	۰/۹۰	۱	۲۹/۱۵	۱۵	۲۲۸	۴/۵۸	۵/۵۴۰	۲۸/۱۸	
DPGC195	۱/۰	۱	۲۹/۱۵	۱۵	۲۳۸	۴/۳۸	۶/۷۳۲	۲۱/۵۲	
DPGC196	۱/۱	۱	۲۹/۱۵	۱۵	۲۴۸	۴/۲۰	۷/۸۳۶	۱۶/۴۰	
DPGC197	۱/۲	۱	۲۹/۱۵	۱۵	۲۵۸	۴/۰۳	۸/۸۶۶	۱۳/۱۴	
DPGC198	۱/۳	۱	۲۹/۱۵	۱۵	۲۶۸	۳/۸۷	۹/۸۴۷	۱۱/۰۶	
DPGC199	۱/۴	۱	۲۹/۱۵	۱۵	۲۷۸	۳/۷۳	۱۰/۷۹	۹/۵۸	

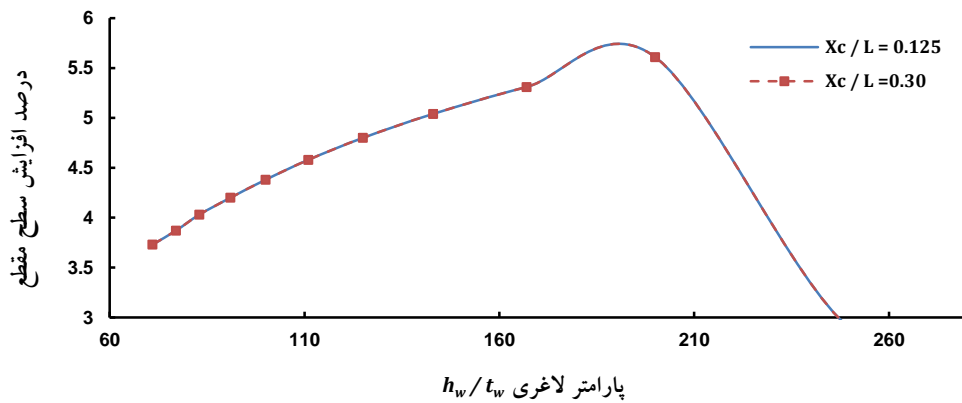




شکل ۹- درصد افزایش مقاومت کمانشی برشی بر اساس پارامتر لاغری



شکل ۱۰- درصد افزایش مقاومت کمانشی برشی بر اساس درصد افزایش سطح مقطع



شکل ۱۲- درصد افزایش سطح مقطع بر اساس پارامتر لاغری

لاغری، در هر دو حالت موقعیت طولی بازشو دارای یک نقطه عطف ماکزیمم در نمودار می‌باشد. بنابراین با توجه به مطالب فوق می‌توان گفت، بهینه پارامتر لاغری (h_w/t_w)، در محدوده ۲۰۰ الی ۲۱۰ تخمین زده می‌شود.

در شکل (۱۰) محدوده ۵/۵ الی ۵/۷ برای درصد افزایش سطح مقطع و متناظر با محدوده ۲۰۰ الی ۲۱۰ برای پارامتر لاغری، مطابق با جدول ۱۰ نتیجه فوق را تایید می‌نماید. همچنین در شکل (۱۱) محدوده ۲۰۰ الی ۲۱۰ برای پارامتر

با سخت‌کننده دلنا^۱، سومین کنگره ملی مهندسی عمران، تبریز، دانشگاه تبریز.

[۴] عربزاده، ا. و کاهه، م. (۱۳۸۴)، "رفتار کمانشی یک پانل از تیرورق سخت شده با سخت‌کننده دلنا تحت اثر بار خمشی"، دومین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران، دانشگاه علم و صنعت.

[۵] عربزاده، ا. و ورمزیاری، م. (۱۳۸۷)، "کنترل کمانش پیچشی جانبی تیرورق‌های فولادی به وسیله سخت‌کننده دلنا"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران، دانشگاه تهران.

[۶] عربزاده، ا. و ورمزیاری، م. (۱۳۸۷)، "رفتار تیرورق‌های با سخت‌کننده دلنا تحت بارهای متمرکز با خروج از مرکزیت"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران، دانشگاه تهران.

[7] Hoglund, T. (1971), "Strength of thin plate girders with circular or rectangular web holes without web stiffeners", In International Association for Bridge and Structural Engineering, Zurich, Switzerland.

[8] Shahabian, F. and Ghouhestani, S. (2009), "To investigate the effect of Circular Web Opening on the Shear Capacity of Plate Girder", Journal of Structure & Steel, Vol.5, pp. 64-72.

[9] Shon, S., Yoo, M. and Lee, S. (2012), "A Study on Optimum design of Corrugated web girder using Eurocode. Journal of Korean Association for Spatial Structures", Vol. 12, pp. 47-56.

[10] EN 1993-1-5, Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-5 Plated structural elements.

[11] Faluyi, F. and Arum, C. (2012), "Design optimization of plate girder using generalized reduced gradient and constrained artificial bee colony algorithms", International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 2, pp. 304-312.

[12] Nabeel, A. and Fadhil, A. (2016), "Optimum design of plate girder", Journal of Mechanical and Civil Engineering, Vol. 13, pp. 24-34.

[13] British Standard, (2000), Structural use of steelwork in building, BS 5950, Part 1: Code of practice for design Rolled and Welded sections.

[14] Sudeok, S. Sangwook, J. and Seungjae, L. (2017), "Minimum weight design of sinusoidal corrugated web beam using real-coded genetic algorithms", Mathematical Problems in Engineering, pp. 1-13.

[15] DAST-richtlinie 015, (1990), In Trager Mit Schlancken Stegen, StahlbauVerlag Koln, Germany.

[16] DIN 18800 Steel structures Part 1-3, (1990), German institute for standardization, Berlin.

[۱۷] کرک‌زن، س. و آتشبار، س. (۱۳۹۷)، "تحلیل رفتار برشی تیرورق فولادی با جان موج‌دار محلی تحت بارگذاری استاتیکی افزایشی"، مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، دوره ۸، شماره ۳، ص. ۷۷-۹۰.

[18] Young, B.K. and Seung, W.R. (2016), "The shear strength of end web panels of plate girders with tension field action", Thin-Walled Structures, Vol. 98, pp. 578-591.

[19] Hingekar, D.R. and Vyavahare, A.Y. (2022), "Steel plate girders behaviour under shear loading", Materials Today: Proceedings. Doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.173

[20] ANSYS User's Manual Version 12.0.

نتایج آنالیز نشان می‌دهد که با افزایش صلبیت بال مقاومت برشی تیرورق افزایش می‌یابد؛ این مسئله ناشی از افزایش قابل ملاحظه سختی بال در مقایسه با سختی جان و ایجاد عملکرد قاب‌گونه قوی در تیرورق‌های دارای سوراخ بزرگ می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

مطابق با بررسی‌های انجام شده، جمع‌بندی کلی نتایج حاصل از بررسی مقاومت برشی کمانشی تیرورق‌های دلنا دارای سوراخ در جان را، برای حالت‌ها و پارامترهای در نظر گرفته شده به طور خلاصه به صورت زیر می‌توان بیان نمود.

۱- بهینه پارامتر ارتفاع (نسبت فاصله اتصال سخت‌کننده‌ها در محل برخورد با جان تا بال فوقانی به ارتفاع کل مقطع) (h_{st}/h_w) برابر با ۰/۲۵ می‌باشد.

۲- بهینه پارامتر ضخامت (نسبت ضخامت سخت‌کننده‌ها به ضخامت جان) (t_{st}/t_w) از لحاظ برش در محدوده ۰/۹ الی ۱/۲۰ قرار می‌گیرد.

۳- بهینه پارامتر صلبیت (نسبت ضخامت بال‌ها به ضخامت جان تیرورق) (t_f/t_w) از لحاظ درصد تغییرات مقاومت برشی با توجه به درصد تغییرات سطح مقطع و یا به عبارت دیگر وزن تیرورق در محدوده ۰/۹ الی ۱/۰ تخمین زده می‌شود. نتایج آنالیز نشان می‌دهد که با افزایش صلبیت بال، مقاومت برشی تیرورق افزایش می‌یابد. این مسئله ناشی از افزایش قابل‌ملاحظه سختی بال در مقایسه با سختی جان و ایجاد عملکرد قاب‌گونه قوی در تیرورق‌های دارای سوراخ بزرگ می‌باشد.

۴- با افزایش پارامتر لاغری (نسبت ارتفاع کل مقطع به ضخامت جان تیرورق) (h_w/t_w) ، مقاومت برشی کاهش می‌یابد. بهینه پارامتر لاغری از لحاظ درصد تغییرات مقاومت برشی با توجه به درصد تغییرات سطح مقطع و یا به عبارت دیگر وزن تیرورق، در محدوده ۲۰۰ الی ۲۱۰ تخمین زده می‌شود.

۶- مراجع

[1] Hadley, H.M. (1961), "Exploratory test on a steel delta girder", Civil Engineering Magazine, pp.50-52.

[2] Homer, M. and Hadley, S. (1964), "The bridge delta girder-single-webbed and double-webbed", AISC National Engineering Conference, Omaha.

[۳] عربزاده، ا. و ورمزیاری، م. (۱۳۸۶)، "ارزیابی مقاومت پیچشی تیرورق‌های

پی‌نوشت

¹ Sequential quadratic programming

² Multilevel optimization methods

