



تحلیل اثر بازشوی مدور در مقاومت برشی تیورق‌های فولادی

فرزاد شهابیان^۱، سلیمان قهستانی^۲

(دریافت: خرداد ۸۸، پذیرش: آذر ۸۸)

چکیده

برای بالا بردن مقاومت خمشی تیورق‌ها، تمایل به انتخاب جان با ارتفاع زیاد می‌باشد. برای کاهش وزن، ضخامت جان تیورق‌ها را کم در نظر می‌گیرند. از این رو قبل از فرا رسیدن مقاومت خمشی، صفحه جان تیورق تحت تأثیر نیروهای برشی دچار کماتش و یا تسلیم می‌شود. در این مقاله، مقاومت برشی تیورق‌های فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود نشان می‌دهد که مقاومت کماتشی تیورق‌ها به حالتی که در آن اتصال جان به بال‌ها به صورت گیردار فرض می‌شود، نزدیک‌تر است و این در حالی است که در نظریه‌های رایج، اتصال جان به بال‌ها به صورت ساده فرض می‌گردد. نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود غیرخطی تیورق‌های دارای بازشوی مدور نشان می‌دهد که با افزایش لاغری تیورق و ابعاد نسبی بازشو، مقاومت نهایی کاهش می‌یابد. این کاهش ممکن است تا ۵۰ درصد مقاومت اولیه برسد. بررسی‌های انجام شده در این پژوهش حاکی است که در صورت افزایش صلبیت نسبی بال، کاهش مقاومت تیورق‌ها در اثر وجود بازشو که ممکن است به دلایل اجرایی اجتناب‌ناپذیر باشد، به میزان ۳۰ درصد جبران می‌گردد.

کلمات کلیدی

تیورق‌های فولادی، مقاومت برشی، تحلیل اجزای محدود، بازشوی مدور

To Investigate the Effect of Circular Web Opening on the Shear Capacity of Plate Girders

F. Shahabian, S. Ghoostani

ABSTRACT

To increase the bending resistance of plate girders, it is advantageous to make the webs as deep as possible. To reduce the self-weight of the girders, the web thickness is usually limited, with the consequence that the webs are normally of slender proportions. The webs will then buckle at relatively low values of the applied shear loading. In this paper, the shear resistance of plate girders is investigated. The results of finite element analysis reveals that the boundary conditions at the flange-web juncture in practical designs is much closer to the fixity, but available theories assumes that the web panel is simply supported at the flange-web juncture. The nonlinear finite element analysis shows that the ultimate resistance of plate girders with circular web opening might be reduced up to 50 percents if the web slenderness or opening size is increased, but it could be compensated up to 30 percents when the flange stiffness is increased.

Key words

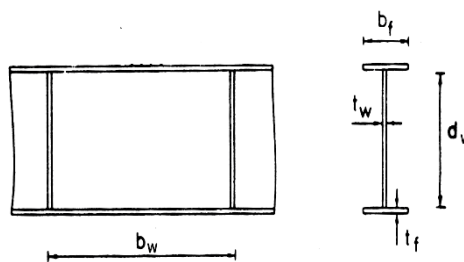
Steel Plate Girders, Shear Capacity, Finite Element Analysis, Circular Web Opening

۱. دانشجویار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، fshahabianm@yahoo.com (نویسنده مسئول)

۲. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، Solieman_539@yahoo.com



کار اصلی صفحه جان در یک تیرورق، ایجاد فاصله نسبی بین بال‌های بالا و پایین و مقاومت در برابر نیروهای برشی وارده می‌باشد. برای بالا بردن مقاومت خمشی تیرورق‌ها، تمایل به انتخاب جان با ارتفاع بیشتر می‌باشد. از طرفی برای کاهش وزن تیرورق‌ها، ضخامت جان را کم انتخاب می‌کنند. بدین ترتیب، قبل از فرا رسیدن مقاومت خمشی، جان تیرورق‌ها تحت تأثیر نیروهای برشی، دچار کمناش و یا تسلیم می‌شود. برای بالا بردن مقاومت برشی تیرورق‌ها، از سخت‌کننده‌های عرضی (قائم) استفاده می‌شود. با این کار جان تیرورق از یک صفحه طویل تبدیل به مجموعه صفحاتی با نسبت ابعاد کوچکتر می‌شود و در نتیجه مقاومت تیرورق بیشتر می‌گردد (شکل ۱).



شکل (۱): مشخصات هندسی تیرورق

هنگامی که صفحه جان تیرورق‌ها شروع به کمناش می‌کند، به دلیل وجود مقاومت پس کمناشی در صفحات، تیرورق‌ها قادر به تحمل نیروهای اضافی قابل ملاحظه‌ای می‌باشند. با در نظر گرفتن این واقعیت می‌توان تیرورق‌های با نسبت مقاومت به وزن مناسب طراحی کرد. به رغم این حقیقت که رفتار پس کمناشی صفحات در سال ۱۸۸۶ توسط ویلسون کشف شد و نظریه کشش قطری در سال ۱۹۳۱ توسط واگنر توسعه یافت، اما مقاومت کمناشی به عنوان یک مبنای مهم برای طراحی تیرورق‌ها تا سال ۱۹۶۰ مورد استفاده قرار داشت [۱]. در اواخر دهه ۱۹۵۰، تحقیقات گسترده‌ای روی رفتار پس کمناشی تیرورق‌ها توسط بسلر انجام شد [۲]. از آن پس با در نظر گرفتن مفاهیم طراحی حالت حدی در سازه‌های فولادی، کار بسلر توسط سایر محققین از جمله

راکی و پورتر ادامه یافت [۳]. بارو و همکاران با استفاده از نظریه واگنر، مقاومت کمناشی و پس کمناشی تیرورق‌ها را مورد بررسی قرار دادند [۴]. ویلکرسون [۵] با توجه به حالت گسیختگی تیرورق‌ها در حد کمناش و تسلیم، تابعی را برای تعیین مقاومت تیرورق‌ها پیشنهاد کرد. لی و یو [۶] با توجه به محدودیت‌های نظریه بسلر، مقاومت نهایی تیرورق‌های طویل را به دست آوردند.

وجود بازشو در جان تیرورق‌ها، توزیع تنش در عضو را دگرگون می‌کند. برای اولین بار هوگلاند [۷] آزمایشهایی را بر روی تیرورق‌های دارای بازشو انجام داد. نارایانان و راکی [۸] یک مدل تحلیلی را برای تعیین مقاومت نهایی این گونه تیرورق‌ها پیشنهاد کردند. لیان و شانگومان [۹] مقاومت تیرورق‌های خمیده دارای باز شو را مورد بررسی قرار دادند. سپس با انجام محاسبات پارامتریک، اثر شعاع خمیدگی و ابعاد بازشو، روی مقاومت این گونه تیرورق‌ها را تعیین نمودند. هاگن و لارنس اثر بازشوی بزرگ را روی مقاومت برشی تیرورق‌ها، تحقیق و پیشنهاداتی را برای توسعه و بهبود رابطه‌های موجود در آیین‌نامه اروپایی طراحی سازه‌های فولادی ارائه کردند [۱۰].

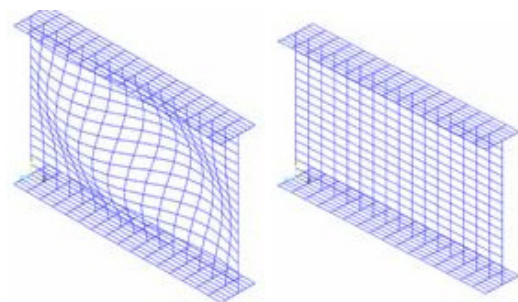
در این مقاله، مقاومت برشی تیرورق‌ها در کمناش و در حالت مقاومت نهایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این کار، از نرم‌افزار ANSYS که قادر به در نظر گرفتن رفتار غیرخطی است، استفاده می‌شود. نتایج تحلیل اجزای محدود با نتایج آزمایش‌ها و نظریه‌های موجود مقایسه می‌گردد. در ادامه، با تحلیل تیرورق‌های دارای گشودگی، اثر بازشوی مدور بر مقاومت نهایی این گونه تیرورق‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد و پیشنهاداتی برای جبران کاهش مقاومت ناشی از وجود بازشو ارائه می‌گردد.

۲- تحلیل تیرورق‌های بدون بازشو

در این پژوهش به منظور بررسی مقاومت تیرورق‌ها، از تحلیل اجزای محدود به کمک نرم‌افزار ANSYS استفاده می‌شود. ماده مورد استفاده، فولاد با ضریب کشسانی $E = 2.05 \times 10^5 \text{ MPa}$ و ضریب پواسون $\nu = 0.3$ می‌باشد.

رفتار فولاد به صورت کشسان- مومسان و در تعیین گسیختگی ماده، معیار فون میزس به کار گرفته می شود. برای تحلیل غیرخطی از روش نیوتن- رافسون استفاده می گردد. برای تعیین مقاومت نهایی تیورق ها (V_u)، لازم است که ابتدا تیورق تحلیل کمانشی شده و سپس اثرات تغییر شکل های ناشی از کمانش، به صورت ضربی از مود کمانشی به عنوان هندسه اولیه تیورق به نرم افزار معرفی و سپس یک تحلیل غیرخطی انجام گردد. در تحلیل کمانشی، جزء shell63 و در تحلیل مقاومت نهایی، جزء shell43 به کار گرفته می شود.

مطابق شکل (۲- الف) از شبکه بندی (16×16) برای جان و شبکه بندی (16×8) برای بالها استفاده می شود. برای بررسی دقت شبکه بندی، با انجام تحلیل، اختلاف بین نتایج تحلیل اجزای محدود و حل دقیق (تیموشنکو و گیر [۱۱]) کمتر از ۱ درصد می باشد. بنابراین الگوی شبکه بندی فوق مناسب است. در این تحلیل، شرایط مرزی لبه ها بنحوی تعریف می شود که اثر بازدارندگی سخت کننده ها در تغییر شکل های صفحه جان بدرستی الگوسازی گردد.



شکل (۲): الف) شبکه بندی اجزای محدود، ب) تیورق تغییر شکل یافته

۱-۲- مقاومت کمانشی

در مدل های بسلر و پورتر اتصال صفحه جان به بال ساده فرض می شود و مقاومت کمانشی از رابطه (۱) به دست می آید [۲ و ۳].

$$V_{cr} = \tau_{cr} d_w t_w \quad (1)$$

در این رابطه τ_{cr} تنش بوده که با رابطه زیر بیان می شود [۱۱]:

$$\tau_{cr} = K \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2) \left(\frac{d_w}{t_w}\right)^2} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، ضریب کمانشی K به صورت رابطه های (۳) تا (۶) تقریب زده می شود [۱۲]:

۱- اگر اتصال جان به دو بال و دو سخت کننده به صورت ساده فرض شود (SS):

$$K_{SS} = 5.34 + 4 \left(\frac{d_w}{b_w}\right)^2 \quad \frac{d_w}{b_w} \leq 1 \quad (3)$$

$$K_{SS} = 4 + 5.34 \left(\frac{d_w}{b_w}\right)^2 \quad \frac{d_w}{b_w} \geq 1 \quad (4)$$

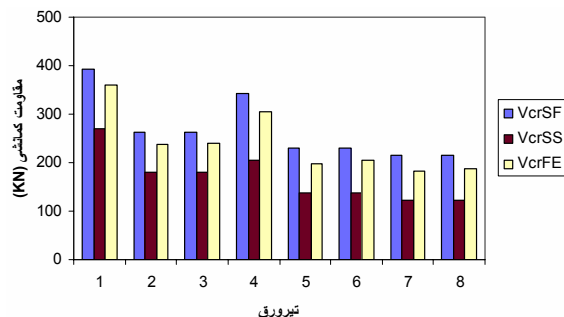
۲- اگر اتصال جان به بالها به صورت گیردار و به سخت کننده ها به صورت ساده فرض شود (SF):

$$K_{SF} = 9.98 + 5.61 \left(\frac{d_w}{b_w}\right)^2 - 1.99 \left(\frac{d_w}{b_w}\right)^3 \quad \frac{d_w}{b_w} \leq 1 \quad (5)$$

$$K_{SF} = 5.34 \left(\frac{d_w}{b_w}\right)^2 + 2.31 \left(\frac{d_w}{b_w}\right) - 3.44 + 8.39 \left(\frac{b_w}{d_w}\right) \quad (6)$$

$$\frac{d_w}{b_w} \geq 1$$

نتایج به دست آمده از تحلیل کمانشی تیورق ها با شرایط مرزی مختلف در جدول (۱) و شکل (۳) نشان داده شده است. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل (V_{cr}^{FE})، با نتایج حاصل از رابطه های فوق نشان می دهد که مقاومت کمانشی تیورق ها به حالتی که در آن اتصال جان به بالها به صورت گیردار فرض می شود (V_{cr}^{SF}) نزدیک تر است. بدین ترتیب، اگر اتصال جان به بالها به صورت ساده (V_{cr}^{SS}) در نظر گرفته شود، منجر به کمتر در نظر گرفتن مقاومت کمانشی تیورق ها به میزان ۳۰ تا ۵۰ درصد می گردد.



شکل (۳): مقایسه مقاومت کمانشی تیورق های تحلیل شده

با نظریه های موجود



جدول (۱): مقاومت کمانشی تیورق‌ها

تیورق	b_w/d_w	t_w (mm)	d_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	V_{cr}^{FE} (KN) (ANSYS)	V_{cr}^{SS} (KN) Eqs. (3,4)	V_{cr}^{SF} (KN) Eqs. (5,6)
G1	1.0	4.0	400	15	130	360	270	393
G2	1.0	4.0	600	10	200	236	180	262
G3	1.0	4.0	600	15	200	239	180	262
G4	1.5	4.0	400	15	130	304	205	343
G5	1.5	4.0	600	10	200	198	137	229
G6	1.5	4.0	600	20	200	205	137	229
G7	2.0	4.0	600	10	200	181	122	214
G8	2.0	4.0	600	15	200	187	122	214

۲-۲- مقاومت نهایی

در نظریه بسلا [۲] مقاومت برشی نهایی از جمع مقاومت کمانشی و پس کمانشی از رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$V_u = \tau_{yw} d_w t_w \left[\frac{\tau_{cr}}{\tau_{yw}} + \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{1 - \tau_{cr} / \tau_{yw}}{\sqrt{(1 + (b_w / d_w)^2)}} \right] \quad (۷)$$

که در آن τ_{yw} با رابطه (۸) بیان می‌شود.

$$\tau_{yw} = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (۸)$$

در رابطه (۷)، V_u مقاومت برشی نهایی، d_w ارتفاع تیورق، b_w فاصله بین سخت کننده‌ها، t_w ضخامت جان تیورق، τ_{cr} تنش برشی کمانشی، τ_{yw} تنش برشی حد جاری شدن و در رابطه (۸)، σ_y تنش حد تسلیم می‌باشد.

در نظریه راکي و پورتر [۳]، مقاومت برشی نهایی، مجموع مقاومت کمانشی جان، برش تحمل شده توسط میدان کششی و مقاومت بال‌ها تا لحظه تشکیل مفصل‌های پلاستیک می‌باشد این مقدار در رابطه (۹) آمده است.

$$V_u = \tau_{cr} d_w t_w + \sigma_t t_w \sin^2 \theta (d_w \cot \theta - b_w) + 4 d_w t_w \sin \theta \sqrt{(\sigma_{yw} M_p^* \sigma_t)} \quad (۹)$$

که پارامترهای رابطه (۹) در رابطه‌های (۱۰) تا (۱۳) تعریف شده‌اند:

$$\sigma_t = -\frac{3}{2} \tau_{cr} \sin 2\theta + \quad (۱۰)$$

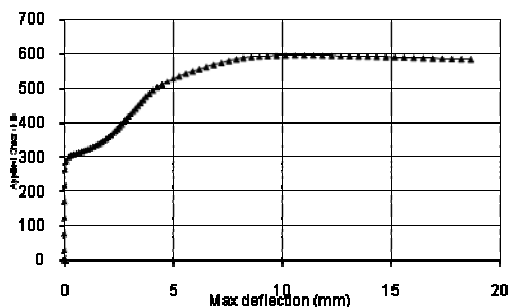
$$\theta = \frac{2}{3} \tan^{-1} \left(\frac{d_w}{t_w} \right) \quad (۱۱)$$

$$M_p^* = \frac{M_{pf}}{d_w^2 t_w \sigma_y} \quad (۱۲)$$

$$M_{pf} = 0.25 b_f t_f^2 \sigma_y \quad (۱۳)$$

در این رابطه‌ها θ زاویه میدان کشش، τ_{cr} مقاومت برشی کمانشی، σ_y تنش حد تسلیم، σ_t تنش میدان کشش، t_f ضخامت بال و b_f عرض بال تیورق می‌باشند.

برای محاسبه مقاومت نهایی تیورق‌ها، تحلیل غیرخطی اجزای محدود انجام و معیار تسلیم فون-میزس به عنوان معیار تسلیم ماده به کار برده می‌شود. منحنی نیرو-تغییر مکان یک تیورق نمونه در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل (۴): منحنی نیرو-تغییر مکان تیورق G9

نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود (V_u^{FE}) با نتایج آزمایش (V_u^{ex}) و نظریه‌های مختلف (V_u) در جدول (۲)

توجه کرد، که چون هر دو نظریه اتصال جان به بالها را به صورت ساده فرض می‌کنند، سهم مقاومت کمانشی را به‌طور محافظه کارانه‌ای کم در نظر می‌گیرند.

مقایسه شده است. همان‌طور که در جدول (۲) دیده می‌شود، نظریه‌های بسلر رابطه (۷) و راکی و پورتر رابطه (۹)، مقاومت نهایی (مجموع مقاومت کمانشی و پس کمانشی) را به‌طور نسبی خوب ارزیابی می‌کنند. اما باید به این واقعیت

جدول (۲): مقاومت نهایی تیورق‌ها

تیورق	b_w/d_w	F_{yf} (Mpa)	F_{yw} (Mpa)	V_u^{ex} (KN)	V_u^{FE} (KN)	V_u (KN) Eq. (1)	V_u (KN) Eq. (3)
G2	1.0	303	318	333	312	340	343
G3	1.0	303	318	337	318	340	379
G5	1.5	303	318	286	275	283	277
G6	1.5	303	318	313	286	283	336
G7	2.0	303	285	259	236	228	226
G8	2.0	303	285	276	248	228	252
G9	1.0	280	200	645	591	632	658

اگر چه، سازوکار گسیختگی این نوع تیورق‌ها مشابه تیورق‌های بدون بازشو می‌باشد، اما، با توجه به وجود بازشو در جان تیورق، در این حالت مقاومت کمانشی نیاز به اصلاح دارد. نارایانان و دراوانسیان [۱۳] مقاومت

کمانشی صفحات دارای بازشو را با رابطه (۱۴) پیشنهاد کردند.

$$V_{cr} = (\tau_{cr})_{red} d_w t_w = \quad (14)$$

$$K \left(1 - \frac{D}{d_w}\right) \times \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_w}{d_w}\right)^2 d_w t_w$$

در این رابطه K ضریب کمانش در حالت بدون بازشو و D قطر بازشو می‌باشد. بدین ترتیب، مقاومت نهایی تیورق‌های دارای بازشو از رابطه (۱۵) به‌دست می‌آید:

$$V_{ult} = 2c \sigma_t^y t_w \sin^2 \theta \quad (15)$$

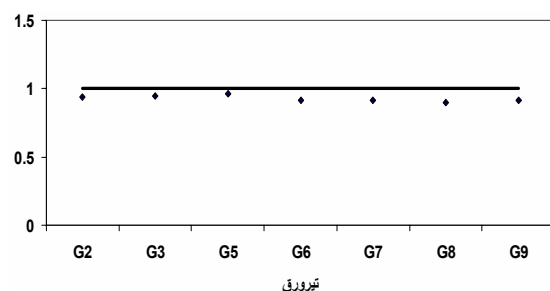
$$+ \sigma_t^y t_w d_w (\cot g \theta - \cot g \theta_d) \sin^2 \theta$$

$$- \sigma_t^y t_w d_w \sin \theta + (\tau_{cr})_{red} d_w t_w$$

۴- تحلیل تیورق‌های دارای بازشوی مدور

در این مقاله، با بهره‌گیری از نرم‌افزار اجزای محدود ANSYS، مقاومت برشی تیورق‌های دارای بازشو به‌دست می‌آید (شکل ۸). آنگاه با انجام محاسبات پارامتریک، تاثیر عوامل مهمی نظیر لاغری جان (d_w/t_w)، سختی نسبی ال (t_f/t_w) و قطر

از این‌رو، واضح است که به همان نسبت سهم مقاومت پس کمانشی را بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌کنند. نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود با نتایج آزمایش در شکل (۵) مقایسه شده است. دیده می‌شود که نسبت مقادیر محاسبه شده از تحلیل (V_u^{FE}) به آزمایش (V_u^{FE}) در حدود ۱ می‌باشد، که نشان‌دهنده دقت بسیار خوب تحلیل اجزای محدود می‌باشد. بنابراین می‌توان از این مدل در محاسبات پارامتریک و تحلیل تیورق‌های دارای بازشو استفاده کرد.



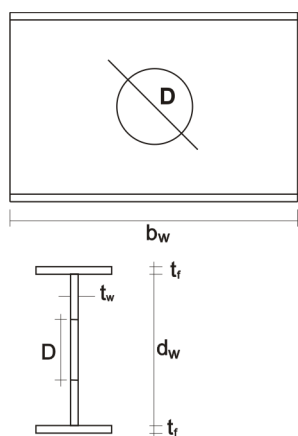
شکل (۵): مقایسه مقاومت تیورق‌های تحلیل شده با آزمایش

۳- رفتار تیورق‌های دارای بازشوی مدور در کمانش و پس از کمانش

نارایانان و راکی [۸] آزمایش‌هایی را بر روی تیورق‌های دارای بازشو انجام دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که



شکل (۶)، نشان داده شده است. همان‌طور که در بخش ۳ بیان گردید، به هنگام تحلیل مقاومت نهایی توسط ANSYS، برای هر تیورق، دو بار تحلیل مورد نیاز می‌باشد. در اجرای اول، تحلیل کمانشی روی سازه کامل و بدون نقص برای تعیین مود کمانشی به‌کار می‌رود (شکل ۷). در اجرای دوم، یک نقص هندسی به صورت ضریبی از تغییر شکل مود کمانشی به تیورق اولیه اعمال می‌شود. منحنی نیرو- تغییر مکان برای دو تیورق نمونه در شکل ۸ نشان داده شده است.

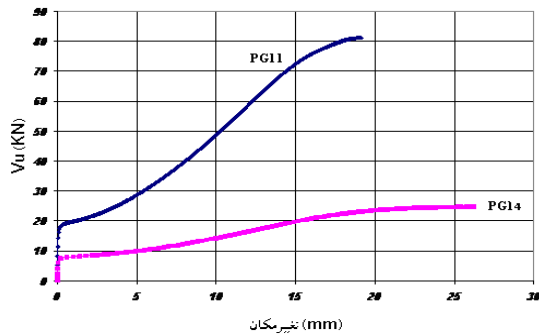


شکل (۶): مدل تحلیلی تیورق‌های دارای بازشوی مدور

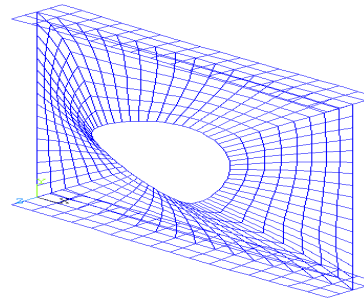
بازشو (D) بر مقاومت این‌گونه تیورق‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای مطالعه هر عامل، سایر پارامترها ثابت نگه‌داشته می‌شوند. ماده مورد استفاده فولاد با ضریب کشسان $E = 2.05 \times 10^5$ Mpa و ضریب پواسون $\nu = 0.3$ می‌باشد. رفتار ماده کشسان- مومسان پنداشته می‌شود و معیار گسیختگی فون میزس به‌کار گرفته می‌شود. در مدلسازی جان و بال‌ها از جزء shell63 برای تحلیل کمانشی و از جزء shell43 برای تحلیل غیرخطی استفاده می‌شود. مشخصات تیورق‌های تحلیل شده در جدول (۳) و مدل تحلیلی آنها در شکل (۶)، نشان داده شده است. بال (t_f / t_w) و قطر بازشو (D) بر مقاومت این‌گونه تیورق‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای مطالعه هر عامل، سایر پارامترها ثابت نگه‌داشته می‌شوند. ماده مورد استفاده فولاد با ضریب کشسان $E = 2.05 \times 10^5$ Mpa و ضریب پواسون $\nu = 0.3$ می‌باشد. رفتار ماده کشسان- مومسان پنداشته می‌شود و معیار گسیختگی فون میزس به‌کار گرفته می‌شود. در مدلسازی جان و بال‌ها از جزء shell63 برای تحلیل کمانشی و از جزء shell43 برای تحلیل غیرخطی استفاده می‌شود. مشخصات تیورق‌های تحلیل شده در جدول (۳) و مدل تحلیلی آنها در

جدول (۳): مشخصات تیورق‌های دارای بازشو

تیورق	D/d_w	b_w/d_w	مشخصات نمونه‌ها					
			جان		بال		تنش تسلیم	
			t_w (mm)	d_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	F_{yf} (Mpa)	F_{yw} (Mpa)
PG1	0	1	2.5	1000	5.06	160	280	200
PG2	0.05	1	2.5	1000	5.06	160	280	200
PG3	0.2	1	2.5	1000	5.06	160	280	200
PG4	0.35	1	2.5	1000	5.06	160	280	200
PG5	0.5	1	2.5	1000	5.06	160	280	200
PG6	0.65	1	2.5	1000	5.06	160	280	200
PG7	0.75	1	2.5	1000	5.06	160	280	200
PG8	0	1	2.5	1000	10	160	280	200
PG9	0.05	1	2.5	1000	10	160	280	200
PG10	0.2	1	2.5	1000	10	160	280	200
PG11	0.35	1	2.5	1000	10	160	280	200
PG12	0.5	1	2.5	1000	10	160	280	200
PG13	0.65	1	2.5	1000	10	160	280	200
PG14	0.75	1	2.5	1000	10	160	280	200
PG17	0.5	1	5	1000	10	160	280	200
PG18	0.5	1	4	1000	10	160	280	200
PG19	0.5	1	3.33	1000	10	160	280	200
PG20	0.5	1	2.86	1000	10	160	280	200
PG21	0.5	1	2.5	1000	10	160	280	200



شکل (۸): منحنی نیرو- تغییر مکان تیرورق‌های نمونه

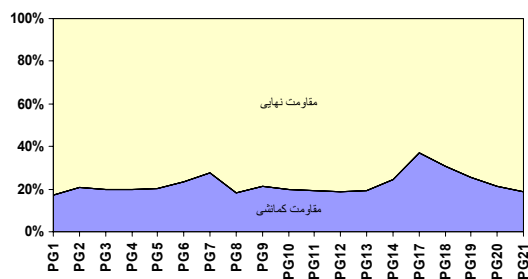


شکل (۷): تیرورق کمانش یافته

جدول (۴): مقاومت برشی تیرورق‌های دارای بازشوی مدور بر حسب کیلو نیوتن

تیرورق	$\frac{d_w}{t_w}$	$\frac{D}{d_w}$	$\frac{t_f}{t_w}$	V_{cr} Eq. (14)	V_{cr}^{FE}	V_u Eq. (15)	V_u^{FE}	V_u^{FE} / V_u
PG1	400	0	2.02	26.4	32.4	141.0	156	1.10
PG2	400	0.05	2.02	25.1	32.1	131.7	122	0.92
PG3	400	0.2	2.02	21.1	25.4	102.3	103.3	1.01
PG4	400	0.35	2.02	17.15	18.35	75.5	73.3	0.97
PG5	400	0.5	2.02	13.2	12.98	51.8	51.2	0.98
PG6	400	0.65	2.02	9.2	9.41	31.4	30.6	0.97
PG7	400	0.75	2.02	6.9	7.52	20.1	19.7	0.98
PG8	400	0	4	26.4	34.83	160.9	159	0.98
PG9	400	0.05	4	25.1	34.25	150.0	126.2	0.97
PG10	400	0.2	4	21.1	26.73	118.8	107.8	0.90
PG11	400	0.35	4	17.15	19.66	90.0	81.1	0.90
PG12	400	0.5	4	13.2	14.12	64.0	61.9	0.96
PG13	400	0.65	4	9.2	10.27	41.4	42.4	1.02
PG14	400	0.75	4	6.9	8.03	28.5	24.7	0.86
PG17	200	0.5	2	105.5	103.6	186.5	177	0.94
PG18	250	0.5	2.5	54	55.37	124.4	126	1.01
PG19	300	0.5	3	31.2	32.68	93.3	95.7	1.02
PG20	350	0.5	3.5	19.7	20.97	75.7	76.5	1.01
PG21	400	0.5	4	13.2	14.12	64	61.85	0.96

کمانشی



شکل (۹): مقایسه درصد مقاومت کمانشی و نهایی

تیرورق‌های دارای بازشوی مدور

می‌باشد و در بعضی از حالت‌ها به ۴ برابر نیز می‌رسد. نتایج

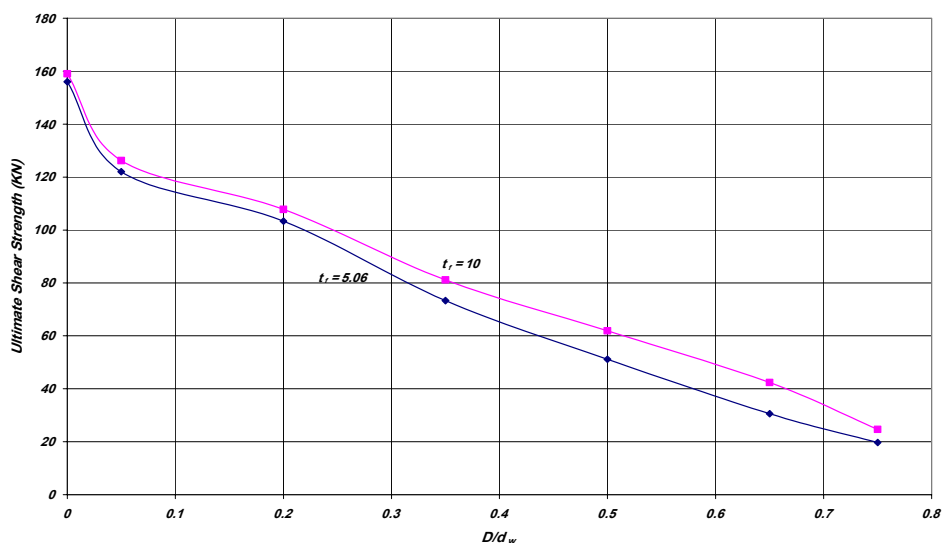
نتایج حاصل از تحلیل تعدادی از تیرورق‌ها در جدول (۴) ارائه شده است. از بررسی جدول (۴) مشخص می‌گردد که نسبت مقادیر محاسبه شده از تحلیل اجزای محدود غیرخطی به مقادیر حاصل از رابطه (۱۵) در حدود ۱ می‌باشد، که نشان‌دهنده دقت بسیار خوب تحلیل می‌باشد.

با توجه به جدول (۴)، نسبت درصد هریک از مقاومت‌های کمانشی (V_{cr}^{FE}) و نهایی (V_u^{FE}) (مجموع مقاومت کمانشی و پس از کمانش) حاصل از تحلیل اجزای محدود در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود سهم مقاومت پس از کمانش به مراتب بیشتر از مقاومت



تحلیل در جدول (۴) نشان می‌دهد که با افزایش قطر بازشو، مقاومت نهایی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. چگونگی تغییرات مقاومت نهایی برای دو نوع تیوروق در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، این تغییرات نسبتاً خطی است. با بررسی نتایج مشخص می‌شود که با زیادتر شدن صلبیت نسبی بال، مقاومت کمانشی و مقاومت نهایی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، با افزایش این نسبت از ۲۰۰ در PG17 به ۳۰۰ در PG19، مقاومت نهایی به میزان ۵۰ درصد کمتر می‌شود و این درحالی است که صلبیت نسبی بال زیادتر شده است.

تحلیل در جدول (۴) نشان می‌دهد که با افزایش قطر بازشو، مقاومت نهایی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. چگونگی تغییرات مقاومت نهایی برای دو نوع تیوروق در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، این تغییرات نسبتاً خطی است. با بررسی نتایج مشخص می‌شود که با زیادتر شدن صلبیت نسبی بال، مقاومت کمانشی و مقاومت نهایی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، با تغییر صلبیت نسبی بال از ۲ در



شکل (۱۰): تغییر مقاومت برشی تیوروق‌ها با افزایش نسبی بعد سوراخ

صورت ساده در نظر گرفته شود، مقاومت کمانشی تیوروق‌ها به میزان ۳۰ تا ۵۰ درصد کمتر از مقدار واقعی، برآورد می‌شود.

۲- مقایسه نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود غیرخطی و آزمایش با نظریه‌های موجود نشان می‌دهد که این نظریه‌ها مقاومت نهایی (مجموع مقاومت کمانشی و پس‌کمانشی) را به‌طور نسبی خوب ارزیابی می‌کنند. اما باید به این واقعیت توجه کرد که چون این نظریه‌ها اتصال جان به بال‌ها را به‌صورت ساده فرض می‌کنند، سهم مقاومت کمانشی را به‌طور محافظه کارانه‌ای کم در نظر می‌گیرند، از این‌رو واضح است که به همان نسبت سهم مقاومت پس‌کمانشی را بیشتر از مقدار واقعی

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مقاومت برشی تیوروق‌های فولادی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل اجزای محدود با آزمایش و نظریه‌های موجود مقایسه گردید. در ادامه، با تحلیل تیوروق‌های دارای گشودگی، اثر بازشوی مدور بر مقاومت نهایی این‌گونه تیوروق‌ها مشخص گردید. نتایج حاصل به قرار زیر است:

۱- مقایسه نتایج تحلیل کمانشی تیوروق‌های بدون بازشو با رابطه‌های موجود نشان می‌دهد که مقاومت کمانشی تیوروق‌ها به حالتی که در آن اتصال جان به بال‌ها به صورت گیردار فرض می‌شود، نزدیک‌تر است. محاسبات نشان می‌دهد که اگر اتصال جان به بال‌ها به

- 3- Porter, D.M., Rockey, K.C. and Evans, H.R., "The collapse behavior of plate girders loaded in shear", *Structural Engineering*, Vol. 53, pp. 313-325, 1975.
- 4- Barrau, J., Creze, S. and Castanie, B., "Buckling and post-buckling of beams with flat webs", *Thin-Walled Structures*, Vol. 43(6), pp. 877-894, 2005.
- 5- Wilkerson, S., "A smooth shear strength function for steel flexural members", *Engineering Structures*, Vol. 27(8), pp. 1268-1277, 2005.
- 6- Lee, S.C., Lee, D.S. and Yoo, C.H., "Ultimate shear strength of long web panels", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 64(12), pp. 1375-1365, 2008.
- 7- Hoglund, T., "Strength of thin plate girders with circular or rectangular web holes without web stiffeners", *Proceedings of the London Colloquium of the International Association of Bridge and Structural Engineering*, 1971.
- 8- Narayanan, R. and Rockey, K.C., "Ultimate Load Capacity of plate girders with webs containing circular cutouts", *Proc. Inst. Civil Eng.*, Vol. 2(71), pp. 845-862, 1981.
- 9- Lian, V.T. and Shanmugam, N.E., "Opening in horizontally curved plate girder webs", *Thin-Walled Structures*, Vol. 41(2-3), pp. 245-269, 2003.
- 10- Hagen, N.C. and Larsen, P.K., "Shear capacity of steel plate girders with large web openings, Part II: Design Guidelines", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65 (1), pp.151-158, 2009.
- 11- Timoshenko, S.P. and Gere, J.M., "Theory of elastic stability", McGraw-Hill, 1988.
- 12- Lee, S.C., Davidson, J.S, and Yoo, C.H., "Shear buckling coefficients of plate girder web panels", *Computers and Structures*, Vol. 59(5) , pp. 789-795, 1996.
- 13- Narayanan, R. and Avanesian, D., "Elastic buckling of perforated plates under shear", *Thin-Walled Structures*, Vol. 52, pp. 51-73, 1984.

برآورد می‌کنند.

- ۳- بررسی رفتار تیرورق‌های دارای بازشو نشان می‌دهد که سهم مقاومت پس از کمانش (تفاوت بین مقاومت نهایی و مقاومت کمانشی) ممکن است در بعضی از حالت‌ها به ۴ برابر مقاومت کمانشی برسد و این در حالی است که این تفاوت در تیرورق‌های بدون بازشو کمتر است.
- ۴- نتایج حاصل از تحلیل تیرورق‌های دارای بازشو نشان می‌دهد که با افزایش لاغری، مقاومت نهایی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. به عنوان مثال با افزایش این نسبت از ۲۰۰ در PG17 به ۳۰۰ در PG19 مشاهده می‌شود که مقاومت نهایی به میزان ۵۰ درصد کاهش می‌یابد.
- ۵- نتایج تحلیل نشان می‌دهد که با افزایش ابعاد نسبی بازشو، مقاومت نهایی کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، با افزایش این نسبت از ۰/۲ در PG3 به ۰/۳۵ در PG4 دیده می‌شود که مقاومت نهایی به میزان ۳۰ درصد کاهش می‌یابد.
- ۶- با بررسی نتایج تحلیل مشخص می‌گردد که با افزایش صلبیت نسبی بال، مقاومت نهایی تیرورق‌های دارای بازشو افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، با افزایش این نسبت از ۲/۰۲ در PG5 به ۴ در PG12 دیده می‌شود که مقاومت نهایی به میزان ۲۱ درصد افزایش می‌یابد. بدین ترتیب، برای جبران کاهش مقاومت ناشی از ایجاد بازشو که ممکن است به دلایل اجرایی اجتناب ناپذیر باشد، می‌توان با افزایش صلبیت نسبی بال، مقاومت نهایی این‌گونه تیرورق‌ها را افزایش داد.

مراجع

- 1- Lee, S.C., and Yoo, C.H, "Experimental study on ultimate shear strength of web panels", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 124(2) , pp. 184 –194, 1999.
- 2- Basler, K., "Strength of plate girders in shear", *Journal of Structural Division*, ASCE, Vol. 87(7), pp. 151-180, 1961.

