

تقویت تیوروقها در برابر بارهای موضعی*

مهدی شاهسوندی^(۲)فرزاد شهابیان^(۱)

چکیده در قسمت‌های مختلف تیوروقها، ممکن است بارهای بزرگی وجود داشته باشند که در نظر نگرفتن اثرات موضعی آن‌ها در طراحی، می‌تواند منجر به خرابی تیوروق گردد. این گونه بارها را که در یک محدوده کوچک بر تیر اثر می‌کند، بارهای موضعی (patch loading) می‌نامند. بارهای موضعی یکی از چندین نوع بارگذاری است که می‌تواند باعث بروز ناپایداری در جان تیوروق شود؛ هر چند با پیش‌بینی یک جفت سخت‌کننده فشاری عرضی (قائم) در محل اعمال این گونه بارها، می‌توان از بروز این ناپایداری جلوگیری کرد؛ ولی در بعضی سازه‌ها نظیر پل، نمی‌توان در تمام طول تیر، سخت‌کننده تعبیه کرد. یکی از راه‌های تقویت این گونه تیوروقها، استفاده از سخت‌کننده‌های طولی (افقی) است. در این مقاله، روش‌های تعیین مقاومت نهایی تیوروقها تحت اثر بارهای موضعی، بررسی و مدلی برای تحلیل اجزای محدود آن‌ها به کمک نرم‌افزار ANSYS ارائه شده، که با نتایج آزمایش‌های موجود، سازگاری مناسبی دارد. در پژوهش حاضر، تیر ورق‌های تقویت شده با سخت‌کننده‌های طولی نیز مدل سازی و تحلیل گردیده است. در ادامه، با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل، روابطی برای تعیین مقاومت نهایی این نوع تیوروقها پیشنهاد گردیده که با نتایج آزمایش‌های در دسترس، تطابق خوبی دارد. افزون بر این موقعیت بهینه سخت‌کننده طولی برای بیشترین افزایش در مقاومت نهایی تیر ورق تعیین و رابطه‌ای نیز برای آن ارائه شده که در مقایسه با نتایج تحلیل، از دقت قابل قبولی برخوردار است.

واژه‌های کلیدی تیوروقها، بارهای موضعی، سخت‌کننده‌های طولی.

Strengthening of plate girders subjected to patch loading

F. Shahabian

M. Shahsavandi

Abstract Localized edge loading or patch loading of bridge girders, is frequently encountered in practice. The behavior of girders under patch loading represents complex stability and elastoplastic problems. In situation where the location of the patch load is fixed, transverse web stiffeners can be used to provide increased resistance, but for economic reasons should be avoided wherever possible. For moving load in some structures such as bridges, it is not possible to provide transverse stiffeners at all critical locations. One option is to use longitudinal stiffeners in these situations. In this article, ANSYS finite element software was used for structural analysis to investigate the ultimate resistance of plate girders subjected to patch loading. The finite element model was validated with experimental results taken from literature and found to be more accurate. Extensive parametric study was also performed to investigate the ultimate resistance of longitudinally stiffened plate girders. Furthermore, the ultimate resistance and the optimum position of the longitudinal stiffeners were presented in closed-form which showed satisfactory correlation with the theoretical results.

Key Words Plate girders, patch loading, longitudinal stiffeners.

* تاریخ دریافت نسخه نهایی اصلاح شده ۸۷/۱۱/۱۹ و تاریخ تصویب مقاله ۸۷/۱۲/۲۴.

(۱) دانشیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۲) کارشناس ارشد سازه، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

شکل ۱ بار موضعی و مشخصات هندسی تیر ورق.

در طول چند دهه گذشته، نگاه محققان به پدیده بارهای موضعی مؤثر بر تیر ورقها معطوف گشته و کارهای زیادی نیز در این زمینه انجام گرفته است که در تمام آن تها مخصع بره (t_w^2 و ی پهنرا ب م یقتسمه طبار ، ا ه ل م اوعه یقبه کی ل ا ح رد ؛ دوشی م ه د ی د ح و ض و ه ب) ن ا ج ا ه a h e d n n k t x s n y i r o v s c h e n a j z r e (b_w ر یظن ل و ط (c) ، ن ا ج م ی ل س ت ش ت (σ_w) ، ن ا ج ع ا ف ت ر ا) ی ر ت م ک ت ی م ه ا ی ا ر ا د (ل ا ب ا ت م ا خ ض) (t_f و) ی ر ا د گ ر ا ب ا د ش ا ب ی م ن ا ج ا ت م ا خ ض ه ب ت ی س ن د .

در این مقاله، فعالیت های محققان برای پیدا کردن مقاومت نهایی تیرورقها تحت اثر بارهای موضعی مرور گردیده و مدلی برای تحلیل آنها به کمک نرم افزار ANSYS ارائه شده است. یکی از راه های تقویت این گونه تیرورقها، استفاده از سخت کننده های طولی (افقی) است. با استفاده از مدل توسعه یافته فوق الذکر، مقاومت تیرورقهای تقویت شده با سخت کننده های طولی بررسی، و روابطی برای تعیین آن ارائه گردیده است. همچنین موقعیت بهینه سخت کننده طولی برای بیشترین افزایش در مقاومت نهایی تیر ورق تعیین، و رابطه ای نیز برای آن پیشنهاد شده است.

مقاومت نهایی تیرورقها تحت اثر بارهای

موضعی

در سال ۱۹۶۰، گرانهم [1] آزمایش هایی را به منظور بررسی رفتار جان تیرورقهای لاغر تحت اثر بار موضعی به انجام رسانید. وی با استفاده از نتایج آزمایش، رابطه (۱) را پیشنهاد کرد.

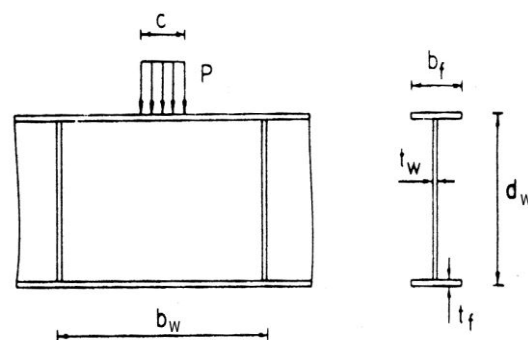
$$P_u = 0.85t_w^2 \quad (1)$$

در این رابطه، P_u مقاومت نهایی به تن و t_w ضخامت جان به میلی متر می باشد. جالب توجه است که این رابطه ساده، علی رغم رفتار پیچیده مسأله، نتیجه

مقدمه

وظیفه اصلی تیرورقها، تحمل لنگرها و برش های بزرگ در سازه های فولادی است. کار اصلی صفحه جان در تیرورقها، ایجاد فاصله نسبی بین بال های بالا، پایین، و مقاومت در برابر نیروی برشی موجود می باشد. صفحه جان از ورق هایی با ضخامت کم و با ارتفاع زیاد ساخته شده که به علت لاغری در معرض خطر کمانش قرار دارند.

بارهای وارد بر تیرورقها می تواند به شکل های گوناگون و با طول های متفاوت بر آن اثر کند. هنگامی که بار وارده، طول کوچکی واقع در حد فاصل بین سخت کننده های قائم را بپوشاند، بار موضعی (patch loading) نامیده می شود، شکل (۱). بارهای موضعی یکی از چندین نوع بارگذاری است که می تواند باعث بروز ناپایداری در جان تیرورق شود. هر چند با پیش بینی یک جفت سخت کننده فشاری قائم زیر بار موضعی می توان از بروز این ناپایداری جلوگیری کرد، ولی در بعضی سازه ها نظیر پل، نمی توان در تمام طول تیر، سخت کننده تعبیه کرد. از طرف دیگر، افزایش ضخامت جان نیز موجب ازدیاد هزینه می شود. از این رو، باید با آگاهی کامل و دقیق از رفتار تیرورقها تحت اثر بارهای موضعی به یک طراحی مناسب دست یافت.



مقاومت نهایی ارائه کردند. آن‌ها با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی، فرض کردند که اندکی قبل از رسیدن به بار نهایی، چهارمفصل خمیری در بال، و سه خط تسلیم در جان به وجود می‌آید. با مساوی قراردادن کار انجام شده داخلی و خارجی در لحظه گسیختگی، بار نهایی به صورت زیر به دست می‌آید [4]:

$$P_u = 0.5t_w^2 \left(E\sigma_w \frac{t_f}{t_w} \right)^{0.5} \left[1 + \frac{3c}{d_w} \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \quad (۴)$$

مارکوویچ و هاجدین [5]، کارایی رابطه‌هایی که برای محاسبه P_u ارائه شده، را بررسی کردند. آن‌ها از آزمایش‌ها و تحقیقات سایرین استفاده کرده و پس از مقایسه نتایج، مشاهده نمودند که رابطه (۴)، متعلق به رابرتز، بهترین نتیجه را می‌دهد. آن‌ها با انجام آزمایش‌هایی، اثر سخت‌کننده‌های طولی را نیز بررسی کردند. مارکوویچ و هاجدین [5] برای منظور نمودن اثر سخت‌کننده‌های طولی، شکل (۳)، پیشنهاد کردند که مقدار مقاومت نهایی P_u به دست آمده از رابطه (۴)، در ضریب $f(s)$ ضرب شود.

خوبی را به دست می‌دهد. قابل توجه است که این رابطه سال‌ها در آیین‌نامه سوئیس به کار گرفته شده.

برگفلت [2] بر روی مدلی کارکرد که بر اساس تحلیل یک تیر (بال) بر روی تکیه‌گاه کشسان (جان) بنا شده بود. برگفلت، رابطه زیر را پیشنهاد کرد:

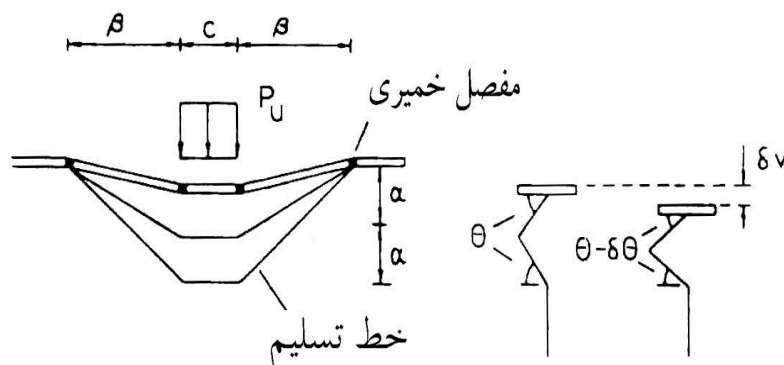
$$P_u = 0.045Et_w^2 \quad (۲)$$

مشکل روش برگفلت، پیدا کردن سختی فخر معادل جان بوده که برای محاسبه طول کشسان لازم است. برگفلت و لیندگرن [1]، بحث شبیه‌سازی تیر بر روی تکیه‌گاه کشسان را بسط دادند و سعی کردند سختی فخر شبیه‌سازی شده جان را با دقت بالاتری تعیین کنند. معادله زیر، توسط آن‌ها پیشنهاد شده است.

$$P_u = 0.68t_w^2 (E\sigma_w)^{0.5} \left(\frac{t_f}{t_w} \right)^{0.6} f(c) \quad (۳)$$

در این رابطه، $f(c)$ مشخص می‌کند که مقاومت نهایی به c (طول بارگذاری) بستگی دارد.

رابرتز و راکی [3] و رابرتز [4] بر اساس ساز و کار گسیختگی مطابق شکل (۲) راه حلی برای تعیین



شکل ۲ سازوکار گسیختگی پیشنهاد شده توسط رابرتز و راکی [3] و رابرتز [4]

تقویت تیوروق ها در برابر بارهای موضعی

نرم افزار ANSYS استفاده گردیده که تیوروق مدل شده، در شکل (۴) نشان داده شده است.

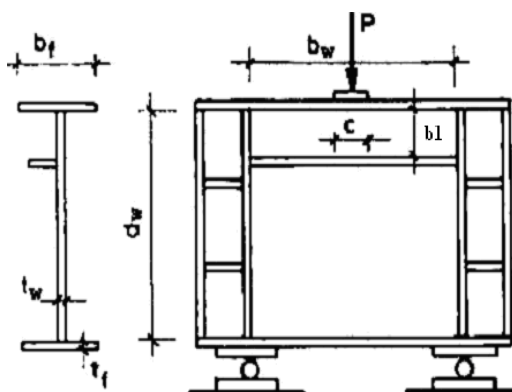
ماده مورد استفاده فولاد با ضریب کشسانی $E = 2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ و ضریب پواسون $\nu = 0.3$ بوده است. فولاد به صورت ماده کشسان - مومسان کامل در نظر گرفته شده و در تعیین گسیختگی ماده، معیار فون میزس به کار گرفته شده است. با توجه به اینکه گسیختگی تیوروق در حالت بارگذاری به صورت موضعی (محلی) است، برای بالا بردن دقت محاسبات، تعداد جزء ها در مدل اجزای محدود تیوروق در محل بارها و نزدیک آن بیشتر، و شبکه بندی ریزتر شده است. با توجه به متقارن بودن تیوروق، تنها نیمی از آن، مدل سازی گردیده است. در آزاد سازی و یا مقید کردن درجات آزادی گره های هر جزء، به شرایط مرزی تیوروق مدل شده، شامل ساده بودن تکیه گاه ها، لزوم ایجاد قیدهای جانبی و در نظر گرفتن تقارن، توجه گردیده است. برای جلوگیری از کمانش موضعی و لهیدگی تیوروق در دو انتها از سخت کننده های عرضی (قائم) استفاده شده است. برای تحلیل غیر خطی، روش نیوتن-رافسون به کار گرفته شده است.

برای تعیین مقاومت نهایی تیوروق (P_{u1})، لازم است که ابتدا تیوروق تحلیل کمانشی شده، و سپس اثرات تغییر شکل های ناشی از کمانش، به صورت ضریبی از مود اول کمانش به عنوان هندسه اولیه تیوروق: به نرم افزار معرفی شده و آن گاه یک تحلیل غیر خطی انجام گردد. در تحلیل کمانشی، جزء shell63 و در تحلیل مقاومت نهایی، جزء shell43 به کار گرفته شده است.

نتایج حاصل از تحلیل ($P_{u,FE}$) تعدادی از تیوروق ها در جدول (۱) ارائه و با نتایج حاصل از آزمایش های موجود ($P_{u,ex}$) مقایسه شده است.

$$0.1 < \frac{b_1}{d_w} < 0.4 \quad f(s) = 1.28 - 0.7 \frac{b_1}{d_w} \quad (5)$$

در این رابطه، b_1 فاصله بین سخت کننده طولی و بالی است که بار به آن اعمال می شود.



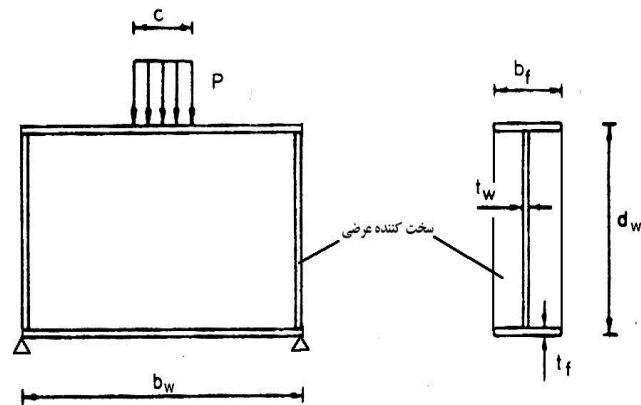
شکل ۳ تیوروق با سخت کننده طولی

گراث [6] با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود، برای طراحی تیوروق های بدون سخت کننده طولی بر مبنای حالت حدی بهره برداری، روشی را پیشنهاد نمود.

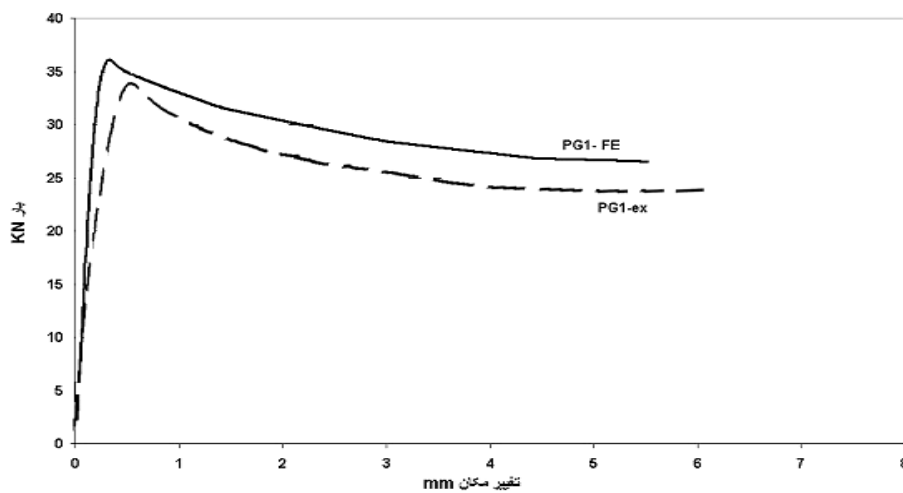
گراسیانو [7,8] اثر سخت کننده های طولی را بررسی و روابطی را برای تعیین مقاومت تیر ورق ها ارائه داد که اگرچه نسبت به رابطه (۵) عوامل بیشتری را در نظر گرفت، ولی از پیچیدگی زیادی برخوردار بود. این پیچیدگی، ناشی از در نظر گرفتن عوامل متعدد به جای تنها عامل مؤثر در رابطه (۵) یعنی عامل (b_1/d_w) و روند طولانی انجام محاسبات برای تعیین مقاومت تیوروق ها در مقایسه با روش مارکوویچ و هاجدین، بود.

تحلیل تیوروق

در این پژوهش به منظور بررسی مقاومت تیوروق ها در اثر بارهای موضعی، از تحلیل اجزای محدود به کمک



شکل ۴ تیورق مدل شده در تحلیل اجزای محدود ANSYS



شکل ۵ منحنی نیرو- تغییر مکان تیورق PG1

جدول ۱ مقایسه نتایج تحلیل اجزای محدود و آزمایش

تیورق	b_w mm	d_w mm	t_w mm	σ_w N/mm ²	b_f mm	t_f Mm	σ_t N/mm ²	c mm	$P_{u,FE}$ kN	$P_{u,ex}$ kN [4,7]
PG1	600	500	2.12	224	150	3.05	221	50	36.09	34.08
PG2	800	800	2.00	266	300	15.0	295	40	65.33	60
PG3	800	800	2.00	266	120	5.07	285	40	40.74	38
PG4	600	250	0.99	193	149	3.05	221	50	10.09	9.02
PG5	600	500	2.12	224	150	6.75	279	50	42.02	37.92

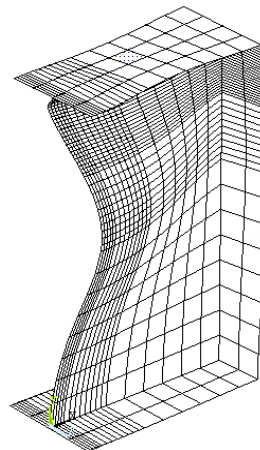
مقاومت تیرورق ها بررسی، و روابطی برای محاسبه فاصله بهینه سخت کننده طولی تا بال فشاری پیشنهاد شده است. تیرورق مدل شده، در شکل (۷) نمایش داده شده است.

جدول ۲ مقایسه نتایج تحلیل اجزای محدود و آزمایش

تیر ورق	b_1 (mm)	b_{st} (mm)	t_{st} (mm)	$P_{u,FE}$ (kN)	$P_{u,ex}$ [7] (kN)
PG2-1	160	60	6	66.98	71
PG3-1	160	40	4	41.64	45

فرآیند تحلیل، مشابه حالت قبل است. تیر ورق های PG2-1 و PG3-1، به ترتیب دارای مشخصاتی نظیر تیرورق های PG2 و PG3 بوده و علاوه بر آن دارای سخت کننده طولی هستند. نتایج حاصل از تحلیل این تیرورق ها، که در آن سخت کننده های طولی به فاصله ۱۶ میلی متر از بال فشاری قرار گرفته است، در جدول (۲) ارائه، و با نتایج حاصل از آزمایش [7] مقایسه شده است. به عنوان نمونه، منحنی نیرو- تغییر مکان گره میانی برای تیرورق PG2-1 در شکل (۸) نشان داده شده است.

به عنوان نمونه، منحنی نیرو- تغییر مکان گره میانی زیر بار، برای تیر ورق PG1 در شکل (۵) و مدل تغییر شکل یافته آن در شکل (۶) نشان داده شده است.

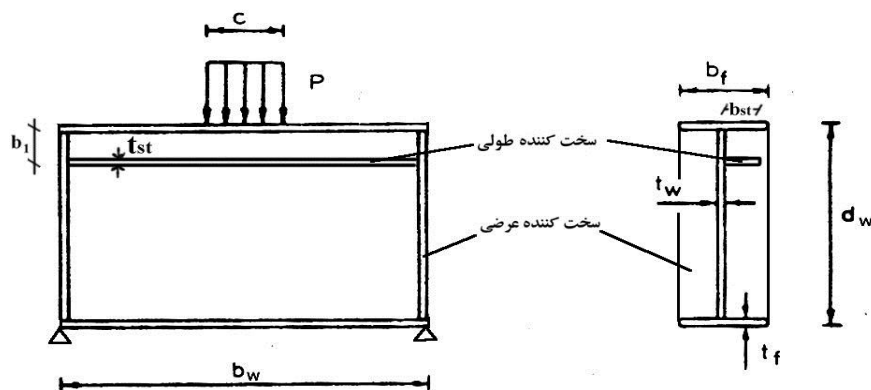


شکل ۶ تیر ورق تغییر شکل یافته PG1

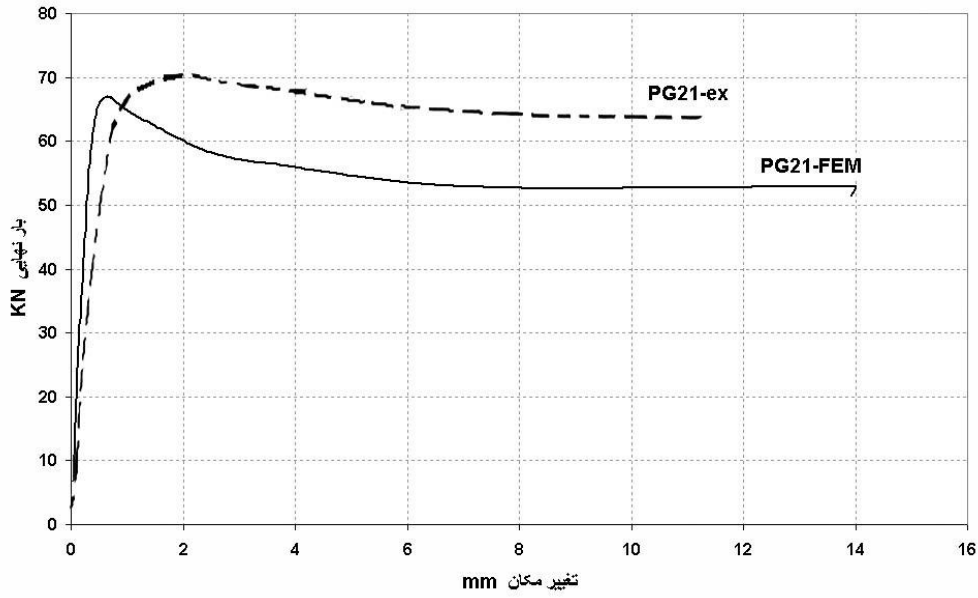
با توجه به نتایج حاصل، جدول (۱) و شکل (۵)، مشخص می گردد که مدل فوق به خوبی می تواند رفتار تیرورق ها را تحت اثر بار موضعی تبیین کند.

تحلیل تیرورق های با سخت کننده طولی

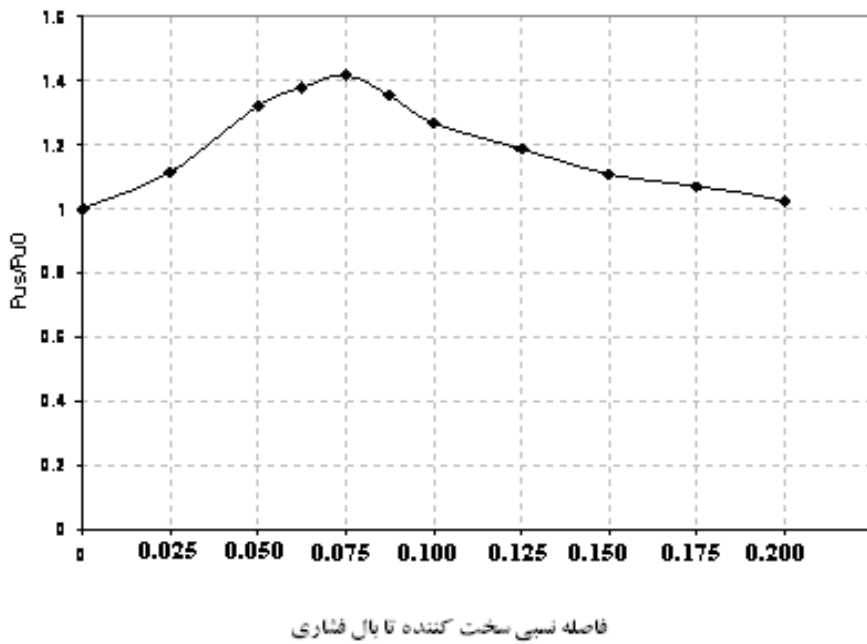
در این بخش با استفاده از تحلیل اجزای محدود توسط نرم افزار ANSYS، اثر سخت کننده های طولی بر



شکل ۷ تیر ورق با سخت کننده طولی مدل شده در تحلیل اجزای محدود ANSYS



شکل ۸ منحنی نیرو - تغییر مکان تیورق PG2-1



شکل ۹ منحنی تغییرات اثر فاصله نسبی سخت کننده تا بال فشاری (b_1/d_w) بر مقاومت تیورق PG2

تقویت تیورق ها در برابر بارهای موضعی

همان طور که در شکل (۹) و جدول (۳) دیده می شود، چنانچه سخت کننده طولی در فاصله نسبی $(b_1/d_w = 0.075)$ قرار گیرد، بیشترین افزایش مقاومت نهایی (۴۲ درصد) حاصل می گردد. مقدار مقاومت تیورق بدون سخت کننده در ردیف اول جدول آورده شده است.

بررسی نتایج تحلیل نشان می دهد که با افزایش فاصله نسبی سخت کننده از بال فشاری (b_1/d_w) ، اثر سخت کننده در افزایش مقاومت، کاهش می یابد. علت این پدیده واضح است؛ چرا که گسیختگی تیورق های تحت اثر بارهای موضعی یک پدیده موضعی (محلی) می باشد و وجود سخت کننده در خارج از ناحیه گسیختگی و دور از بال فشاری، اثری بر افزایش مقاومت تیورق ندارد. پس از بررسی نتایج مشابه آنچه که در شکل (۹) و جدول (۳) دیده می شود، رابطه (۶) برای موقعیت مؤثر سخت کننده طولی، پیشنهاد می شود:

$$0.025d_w < b_1 < 0.25d_w \quad (6)$$

رابطه پیشنهادی برای تخمین فاصله بهینه سخت کننده طولی تا بال فشاری. در بخش قبل ملاحظه شد که مقدار فاصله سخت کننده طولی تا بال فشاری، بر روی مقاومت تیورق مؤثر است. هم چنین مشخص شد چنانچه سخت کننده طولی در یک فاصله مشخص (فاصله بهینه $b_{1,opt}$) قرار گیرد، بیشترین اثر را در افزایش مقاومت دارا می باشد.

در این پژوهش، برای تعیین میزان تأثیر کمیت های مختلف بر فاصله بهینه سخت کننده طولی $(b_{1,opt})$ ، تعداد زیادی از تیورق های دارای سخت کننده، تحلیل شده است. در این تحلیل ها به منظور امکان بررسی اثر عوامل مختلف، هر بار یک عامل

جدول ۳ تغییرات مقاومت تیورق PG2 با فاصله های نسبی

مختلف (b_1/d_w)

تیورق	b_1 (mm)	$\frac{b_1}{d_w}$	$P_{u,FE}$ (kN)	نسبت افزایش مقاومت نهایی
PG2	-	-	65.33	1.00
PG2-2	20	0.025	72.96	1.12
PG2-3	40	0.050	86.32	1.32
PG2-4	50	0.0625	90.16	1.38
PG2-5	60	0.0750	92.62	1.42
PG2-6	70	0.0875	88.50	1.35
PG2-7	80	0.100	82.80	1.27
PG2-8	100	0.125	77.59	1.19
PG2-9	120	0.150	72.48	1.11
PG2-10	140	0.175	69.99	1.07
PG2-11	160	0.200	66.98	1.03

همان طور که در جدول (۲) و شکل (۸) دیده می شود، نتایج تحلیل در مقایسه با نتایج آزمایش از دقت بالایی برخوردار است و می توان نتیجه گرفت که مدل فوق، به خوبی می تواند رفتار تیورق های دارای سخت کننده را تبیین کند.

بررسی اثر فاصله سخت کننده طولی تا بال فشاری (b_1) . تیورق PG2 که با سخت کننده طولی تقویت شده، در نظر گرفته می شود. چنانچه ضخامت سخت کننده طولی (t_{st}) و پهنای آن (b_{st}) به ترتیب برابر با ۶ و ۶۰ میلی متر ثابت نگاه داشته شود، می توان با تغییر مقدار فاصله نسبی سخت کننده طولی تا بال فشاری (b_1/d_w) ، اثر آن را روی مقاومت تیورق ملاحظه کرد. برای این کار، نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود در جدول (۳)، و منحنی تغییرات اثر فاصله نسبی سخت کننده بر مقاومت نهایی تیر ورق PG2 در شکل (۹) نشان داده شده است.

و ترسیم نقاط در دستگاه مختصات و رسم منحنی‌های مناسب بین آن‌ها، مانند شکل (۱۰)، میزان تأثیر هر یک از کمیت‌ها بر $b_{1,opt}$ بررسی شده است که در نتیجه رابطه (۷) برای $b_{1,opt}$ پیشنهاد می‌شود.

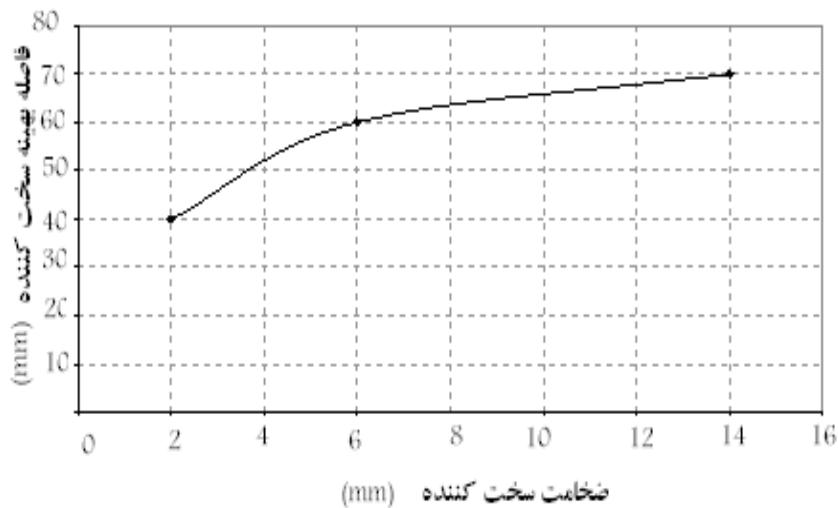
$$b_{1,opt} = 1.8t_f \sqrt[4]{\frac{t_{st}d_{W}^{0.15}}{t_f}} \quad (7)$$

مقادیر به دست آمده از رابطه (۷) و مقادیر حاصل از تحلیل اجزای محدود، در جدول (۵) مقایسه گردیده است.

همان‌طور که در جدول (۵) دیده می‌شود، نسبت مقادیر محاسبه شده از رابطه پیشنهادی (۷)، به نتایج تحلیل $(b_{1,opt,P} / b_{1,opt,FE})$ در حدود ۱ می‌باشد که نشان دهنده دقت بسیار خوب رابطه پیشنهادی در تخمین موقعیت بهینه سخت کننده‌های طولی می‌باشد.

متغیر، و بقیه عوامل ثابت فرض شده است. به عنوان مثال، با ثابت نگاه داشتن پهنای سخت کننده طولی (b_{st})، برابر با ۶۰ میلی‌متر و تغییر ضخامت سخت کننده (t_{st})، تحلیل انجام گردیده و نتایج آن برای یکی از تیورق‌ها در جدول (۴) ارائه شده است.

بررسی جدول (۴) نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت سخت کننده، مقدار فاصله بهینه تا بال فشاری نیز افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، برای سخت کننده‌ای به ضخامت ۲ میلی‌متر، مقدار فاصله بهینه برابر با ۴۰ میلی‌متر و برای سخت کننده‌ای با ضخامت ۱۴ میلی‌متر، مقدار فاصله بهینه برابر با ۷۰ میلی‌متر می‌باشد. بدین ترتیب پس از تحلیل تعداد زیادی از تیورق‌های دارای سخت کننده، طبقه‌بندی موردی داده‌ها شامل فاصله بهینه ($b_{1,opt}$) و کمیت مورد مطالعه



شکل ۱۰ منحنی تغییرات فاصله بهینه بر حسب ضخامت سخت کننده تیورق PG2

جدول ۴ مقاومت تیورق PG2 با سخت کننده طولی با ضخامت های مختلف

تیورق	b_1 (mm)	$\frac{b_1}{d_w}$	t_{st} (mm)	$P_{u,FE}$ kN	نسبت افزایش مقاومت نهایی
PG2	-	-	-	65.33	1.00
PG2-3	40	0.050	6	86.32	1.32
PG2-4	50	0.0625	6	90.16	1.38
PG2-5	60	0.0750	6	92.62	1.42
PG2-6	70	0.0875	6	88.50	1.35
PG2-7	80	0.100	6	82.80	1.27
PG2-15	20	0.025	2	72.24	1.11
PG2-16	30	0.0375	2	79.65	1.22
PG2-17	40	0.050	2	87.00	1.33
PG2-18	50	0.0625	2	83.04	1.27
PG2-19	60	0.0750	2	80.42	1.23
PG2-20	70	0.0875	2	77.05	1.18
PG2-21	80	0.100	2	75.02	1.15
PG2-22	20	0.025	14	75.49	1.16
PG2-23	40	0.050	14	84.23	1.29
PG2-24	60	0.0750	14	96.15	1.47
PG2-25	70	0.0875	14	98.35	1.51
PG2-26	80	0.100	14	94.95	1.45
PG2-27	100	0.125	14	87.40	1.34
PG2-28	120	0.150	14	84.38	1.29

جدول ۵ مقایسه نتایج تحلیل با مقدار حاصل از رابطه (۷)

تیورق	t_f (mm)	d_w (mm)	t_{st} (mm)	$b_{1,opt,FE}$ (mm)	b_{1,opt,P_r} (mm)	$\frac{b_{1,opt,P_r}}{b_{1,opt,FE}}$
PG1-1	3.05	500	2.12	12.5	12.73	1.02
PG2-29	15.0	800	14	70	72.33	1.03
PG2-30	15.0	800	6	60	58.47	0.97
PG2-31	15.0	800	2	40	44.47	1.10
PG3-2	5.07	800	4	22	23.44	1.07

$$b_1 < b_{1,opt}$$

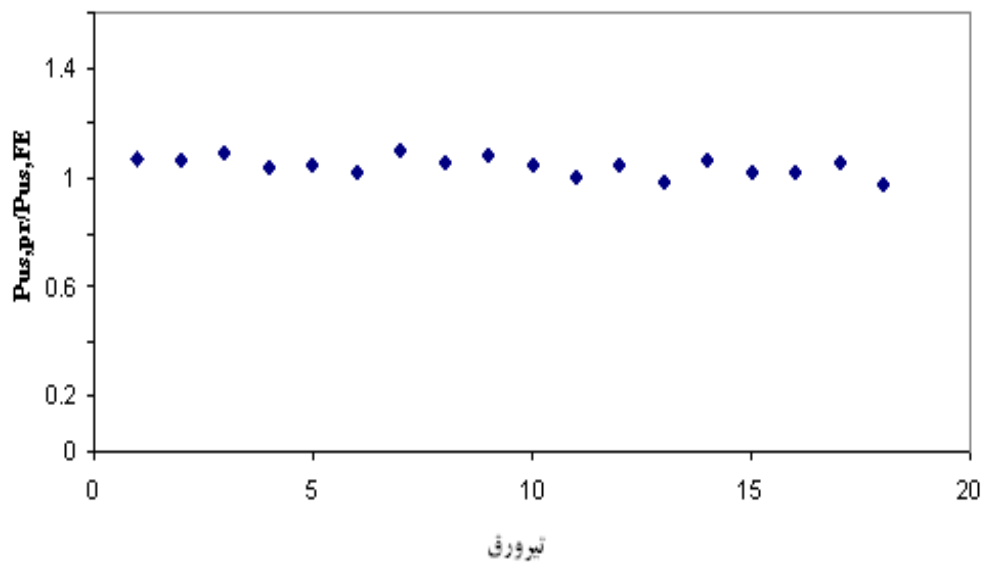
$$P_{us} = 0.87t_{st}^{0.1} [1.42 - 0.008(b_{1,opt} - b_1)] P_u \quad (۸)$$

$$b_1 > b_{1,opt}$$

$$P_{us} = 0.87t_{st}^{0.1} [1.54 - 0.110 \ln(b_1 - b_{1,opt})] P_u \quad (۹)$$

در این روابط، P_u مقاومت تیرورق‌های بدون سخت‌کننده بوده که از تحلیل و یا از رابطه (۴) محاسبه می‌شود. $b_{1,opt}$ نیز فاصله بهینه بوده که از رابطه (۷) به دست می‌آید. نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود ($P_{us,FE}$) برای تعدادی از نمونه‌ها با مقادیر به دست آمده از روابط پیشنهادی ($P_{us,Pr}$) در جدول (۶) و شکل (۱۱) مقایسه شده است.

روابط پیشنهادی برای تعیین مقاومت تیرورق‌های دارای سخت‌کننده طولی. در بخش‌های قبل مشخص گردید که در صورت استفاده از سخت‌کننده، افزایش قابل توجهی در مقاومت تیرورق‌ها به وجود می‌آید. در این پژوهش، برای تعیین مقاومت تیرورق‌های دارای سخت‌کننده طولی، کاری مشابه بخش قبل انجام گردید. بدین ترتیب، پس از تحلیل تعداد زیادی از تیرورق‌های دارای سخت‌کننده که نمونه‌هایی از آن‌ها در جدول (۶) ارائه شده است، طبقه‌بندی موردی داده‌ها شامل مقاومت تیرورق‌های دارای سخت‌کننده طولی (P_{us}) و کمیت مورد مطالعه و ترسیم نقاط در دستگاه مختصات و رسم منحنی‌های مناسب بین آن‌ها، میزان تأثیر هر یک از کمیت‌ها بر P_{us} بررسی شده است که در نتیجه، روابط (۸) و (۹) برای آن پیشنهاد می‌گردد:



شکل ۱۱ مقایسه نسبت نتایج حاصل از روابط پیشنهادی (۸) و (۹) برای $P_{us,Pr}$ با مقادیر به دست آمده از تحلیل اجزای محدود ($P_{us,FE}$)

جدول ۶ مقایسه نتایج حاصل از روابط پیشنهادی (۸) و (۹) برای $P_{us,Pr}$ با مقادیر به دست آمده از تحلیل اجزای محدود برای $P_{us,FE}$

تیرورق	t_f (mm)	d_w (mm)	t_{st} (mm)	$b_{1,opt}$ (mm)	b_1 (mm)	$P_{us,Pr}$ (kN)	$P_{us,FE}$ (kN)	$\frac{P_{us,Pr}}{P_{us,FE}}$
PG1-2	3.05	500	2.12	12.73	12	47.87	44.61	1.07
PG1-3	3.05	500	2.12	12.73	25	42.80	40.35	1.06
PG1-4	3.05	500	2.12	12.73	15.63	48.17	43.88	1.09
PG1-5	3.05	500	2.12	12.73	37.5	40.18	38.72	1.03
PG1-6	3.05	500	2.12	12.73	50	38.66	36.95	1.04
PG1-7	3.05	500	2.12	12.73	75	36.75	35.8	1.02
PG2-32	15	800	6	58.52	160	70.15	66.98	1.04
PG2-33	15	800	6	58.52	80	81.76	82.8	0.98
PG2-34	15	800	6	58.52	200	67.66	63.59	1.06
PG2-35	15	800	2	44.46	60	75.43	80.42	0.93
PG2-36	15	800	2	44.46	80	69.88	75.02	0.93
PG2-37	15	800	14	72.33	40	85.94	84.23	1.02
PG2-38	15	800	14	72.33	80	97.38	94.95	1.02
PG2-39	15	800	14	72.33	120	82.50	84.38	0.97
PG2-40	15	800	6	58.52	60	97.34	92.62	1.05
PG2-41	15	800	20	79.07	60	97.19	99.31	0.97
PG3-3	5.07	800	4	23.44	18	56.04	52.18	1.05
PG3-4	5.07	800	4	23.44	22	56.69	52.87	1.08
PG3-5	5.07	800	4	23.44	60	46.58	44.49	1.04
PG3-6	5.07	800	4	23.44	120	42.23	42.01	1.00
PG3-7	5.07	800	4	23.44	160	40.67	41.64	0.97

نتیجه گیری

بارهای موضعی، یکی از چندین نوع بارگذاری بوده که می تواند باعث بروز خرابی در تیرورق ها گردد. هر چند با قرار دادن سخت کننده های عرضی (قائم) در محل اعمال این گونه بارها، می توان از بروز خرابی جلوگیری کرد؛ ولی جایی که بارها متحرک باشد، نمی توان در

همان طور که در جدول (۶) و شکل (۱۱) ملاحظه می شود، با توجه به مناسب بودن نسبت مقادیر محاسبه شده از روابط پیشنهادی، و نتایج تحلیل ($P_{us,pr}/P_{us,FE}$) که در حدود ۱ می باشد، می توان از این روابط برای محاسبه مقاومت تیرورق های تقویت شده با سخت کننده های طولی استفاده کرد.

دستیابی مقاومت بیشتر، بسیار مهم است که سخت کننده‌های طولی در فاصله مناسبی از بال فشاری تیوروق قرار داده شود.

۳- با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل تعداد زیادی تیوروق، رابطه ای برای تخمین فاصله بهینه سخت کننده های طولی پیشنهاد گردیده است. از مقایسه نتایج، مشخص می شود که نسبت مقادیر محاسبه شده از رابطه پیشنهادی به نتایج تحلیل $(b_{1,opt,P_r} / b_{1,opt,FE})$ ، در حدود ۱ می باشد که نشان دهنده دقت بالای رابطه پیشنهادی در تخمین موقعیت بهینه سخت کننده های طولی است.

۴- با انجام محاسبات پارامتری گسترده، روابطی برای تعیین مقاومت نهایی تیوروق های تقویت شده با سخت کننده طولی پیشنهاد گردیده است. با توجه به مناسب بودن مقادیر محاسبه شده از روابط پیشنهادی در مقایسه با نتایج تحلیل که دارای خطای حداکثری در حدود ۱۰ درصد و میانگین خطایی در حدود ۲ درصد می باشد، می توان از این روابط برای محاسبه مقاومت تیوروق های تقویت شده با سخت کننده های طولی استفاده کرد.

تمام طول تیر، سخت کننده عرضی تعبیه نمود. یکی از راه های تقویت این گونه تیرها، استفاده از سخت کننده های طولی (افقی) است.

در این مقاله، روش های تعیین مقاومت نهایی تیوروق ها، تحت اثر بارهای موضعی بررسی، و مدلی برای تحلیل اجزای محدود آن ها به کمک نرم افزار ANSYS ارائه شد. هم چنین تیوروق های تقویت شده با سخت کننده های طولی نیز مدل سازی و تحلیل گردید. بررسی کارهای انجام شده نشان می دهد که:

- ۱- نتایج حاصل از تحلیل مقاومت نهایی $(P_{u,FE})$ تیوروق های بدون سخت کننده با نتایج حاصل از آزمایش $(P_{u,ex})$ مطابقت بسیار خوبی دارد. با توجه به آن که تفاوت مقادیر به دست آمده از تحلیل اجزای محدود با نتایج آزمایش کم تر از ۱۰ درصد می باشد، می توان نتیجه گرفت که مدل فوق به خوبی می تواند رفتار تیوروق ها را تحت اثر بارهای موضعی تبیین کند.
- ۲- مقاومت تیوروق ها در برابر بارهای موضعی با تعبیه سخت کننده های طولی به میزان قابل توجهی افزایش می یابد. این مقدار افزایش، می تواند در بعضی موارد به بیش از ۴۰ درصد برسد. برای

مراجع

1. Bergfelt, A., and Lindgren, S., "Local Web Crippling in Thin-Walled Plate Girders under Concentrated Loads", Summary in English, Chalmers University of Technology, Goteberg, Sweden, pp 43-50, (1974).
2. Bergfelt, A., "Studies and Tests on Slender Plate Girders Without Stiffeners-Shear Strength and Local Web Crippling", Proceedings, IABSE Colloquium on Design of Plate and Box Girders for Ultimate Strength, London, pp. 67-83, (1971).
3. Roberts, T. M., and Rockey, K. C., "A Mechanism Solution for Predicting the Collapse Loads of Slender Plate Girders when Subjected to in-plane Patch Loading", Proceedings, Institution of Civil Engineers, Part2, V.67, pp 155-175, (1979).

4. Roberts, T. M., "Slender Plate Girders Subjected to Edge Loading ", *Proceedings, Institution of Civil Engineers* , Part 2, V.71, pp. 805-819, (1981).
5. Markovic, N., and Hajdin , N., "A Contribution to the Analysis of the Behaviour of Plate Girders Subjected to Patch Loading", *Journal of Constructional Steel Research*, V.21, pp. 163-173, (1992).
6. Granath, P., " Serviceability Limit State of I-Shaped Steel Girders Subjected to Patch Loading", *Journal of Constructional Steel Research*, V. 54, pp. 387-408, (2000).
7. Graciano, C.A. and Edlund , B., "Nonlinear FE Analysis of Longitudinally Stiffened Girder Webs under Patch Loading ", *Journal of Constructional Steel Research*, V. 58, pp. 231-245, (2002).
8. Graciano, C. A., "Ultimate Resistance of Longitudinally Stiffened Webs Subjected to Patch Loading", *Thin-Walled Structures*, V. 41(6), pp. 529-541, (2003).