

## اثر اندرکنش بارهای محوری، برشی و خمشی بر کمانش ورق های فولادی ساده و سوراخ کاری شده

امین یزدی، محمد عالم باقری\*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران  
دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۳-۰۱  
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۴-۱۱  
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۴-۲۷  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۵-۰۸

### کلمات کلیدی:

ورق های فولادی  
کمانش کلی و موضعی  
کمانش برشی  
اندرکنش بارها  
سوراخ کاری

**خلاصه:** امروزه استفاده از ورق ها در بسیاری از سازه های ساحلی و فراساحلی جایگاه مطلوبی پیدا نموده و به دلیل مزایای عملکردی و اقتصادی که این اعضا نسبت به سایر مقاطع فولادی دارا می باشد، از اقبال زیادی برخوردار شده اند. بنابراین نیاز به شناخت عملکرد ورق ها برای بهبود و ارتقاء عملکرد سازه ها احساس می شود. در این مطالعه، هدف بررسی اثر اندرکنش ترکیب بارهای خمشی، محوری و برشی در ورق های طولی فولادی روی بار کمانش و شکل آن و اثرپذیری آن ها از آسیب های فیزیکی می باشد. در پژوهش حاضر به کمک روش اجزاء محدود به بررسی ورق فولادی طولی پرداخته شده و اثر اندرکنش بارها در دو شرط مرزی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه ورق فولادی سوراخ کاری شده با آرایش ثابت و با قطرهای مختلف مورد بررسی قرار می گیرد. ارزیابی ها بر اساس اندرکنش هر یک از سه بار برشی، خمشی و محوری صورت گرفته که هدف از این ارزیابی یافتن نقاط ضعف و قوت ورق ها تحت ترکیبی از بارهای سه گانه است. در این بررسی مشخص شد که حساسیت ورق فولادی به سوراخ کاری در بار محوری بیشتر از دو بارگذاری دیگر است و کمترین تأثیر از سوراخ کاری را بار خمشی از خود نشان می دهد. همچنین مشخص شد که سوراخ کاری با نسبت قطر به عرض ورق برابر ۶٪ ظرفیت باربری ورق تحت ترکیب بارهای مختلف را کمتر از ۳٪ کاهش می دهد.

### ۱- مقدمه

نمی باشد، ورق ها بهترین راه حل برای ساخت مقاطع مناسب و مطلوب می باشند. کاربرد ورق ها عموماً به گونه ای است که استفاده از آن ها همراه با سوراخ کاری یا برشکاری می باشد. سوراخ کاری و برشکاری در ورق ها منجر به حذف مصالح فولاد به طور موضعی می شود و این مسئله باعث کاهش مقاومت نهایی ورق و یا کاهش بار کمانش آن تحت بارگذاری های مختلف می گردد. استفاده از روش های تحلیل عددی مانند روش المان محدود در حل مسائل مکانیک سازه عمومی و مقبولیت گسترده ای دارد. از این روش ها برای تحلیل سازه های ورقی فولادی تحت بارگذاری های مختلف استفاده شده است. کامران فرد و همکاران اثر بارهای

از ورق ها برای مصارف سازه ای به طور گسترده ای استفاده می شود. این سازه ها شامل سازه های هیدرولیکی، دریایی، ساحلی و فراساحلی، پل ها، خرپاها، برج های مخابراتی، صنایع هوافضا و کشتی سازی و همچنین ساخت مقاطع مختلف مانند ستون ها و تیرهای پیش ساخته می باشد. درکل می توان گفت ورق ها پرستفاده ترین عناصر در سازه های ساحلی و فراساحلی به شمار می روند. در شرایطی که مهندسان با سازه های خاص روبرو هستند و یا پروفیل های معمول ساختمانی یا در دسترس نبوده و یا کاربردی

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: alembagheri@modares.ac.ir



درون صفحه‌ای بر ارتعاشات ورق‌های قطاعی حلقوی متخلخل را مورد مطالعه قرار دادند. آنها با استفاده از اصل حداقل‌سازی انرژی پتانسیل و بر اساس میدان تغییر مکان تئوری کلاسیک، معادلات پایداری و حرکت ورق را بدست آورده و از آنجا که ورق مورد مطالعه تحت بارهای درون صفحه ای قرار گرفته است، قبل از انجام تحلیل ارتعاشات به تحلیل پایداری آن پرداخته و بار بحرانی کمانشی آن را محاسبه کردند. سپس با در نظر گرفتن شرایط مرزی تکیه‌گاه ساده برای لبه‌های شعاعی و انواع تکیه‌گاه دلخواه برای لبه‌های محیطی به حل معادلات پرداخته، و اثر پارامترهای مختلف بر فرکانس طبیعی ورق متخلخل تحت بارهای درون صفحه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که افزایش میزان بار اعمالی بر ورق، سبب کاهش فرکانس طبیعی آن شده و در لحظه‌ای که باری به اندازه بار بحرانی کمانش به ورق اعمال شود فرکانس طبیعی آن به صفر می‌رسد [۱]. سلیمی و همکاران تاثیر ایجاد حفره در ورق دیوارهای برشی فولادی و آرایش مختلف حفره‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. آنها پارامترهای لرزه‌ای مربوط به ضریب ناشی از شکل‌پذیری، ضریب ناشی از اضافه مقاومت، سختی اولیه، جذب انرژی سیستم دیوار برشی و در نهایت ضریب رفتار را برای ۲۵ نمونه بدست آورده و نشان دادند هرچه آرایش حفره‌ها در سطح ورق پراکنده و در راستای قطری قرار بگیرند، دیوار عملکرد لرزه‌ای مناسب‌تری خواهد داشت [۲]. تحقیقی توسط گراسیانو و همکاران بر روی ورق جان تیروورق‌ها که تحت تاثیر هم‌زمان ترکیبی از بارهای درون صفحه‌ای قرار می‌گیرد، صورت پذیرفت. این ترکیب بارگذاری شامل بار خمشی، برشی و بار متمرکز می‌شود که به کمک روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اعمال هم‌زمان هر سه بار می‌تواند مقاومت ورق را تا حد زیادی محدود نماید و همچنین رفتار ورق بسیار به بزرگ‌ترین بار وارده به ورق وابسته می‌باشد [۳]. کدخدایان و معارف دوست کمانش الاستیک و پلاستیک ورق‌های فولادی تحت بارهای درون صفحه را مورد ارزیابی قرار دادند. این ارزیابی شامل شرایط مرزی، نسبت ابعادی طول، عرض و ضخامت و همچنین نسبت بارهای وارده به ورق می‌شود. آنها نشان دادند که نسبت ابعادی ورق بر کمانش ورق تاثیر زیادی می‌گذارد و کمانش پلاستیک به شرایط مرزی ورق وابسته است [۴]. عاصمی و همکاران ورق مستطیل فولادی تحت بارگذاری هم‌زمان محوری و برشی را مورد ارزیابی قرار داده و رفتار ورق را تحت

شرایط مختلف بارگذاری محوری و برشی استخراج کردند [۵]. آنها از روش اجزاء محدود به صورت سه بعدی استفاده کردند.

ریچی و روودز رفتار ورق‌های مستطیلی و مربعی با تکیه‌گاه ساده را به دو صورت تحلیلی و آزمایشگاهی بررسی کردند. در این بررسی ورق دارای یک سوراخ به قطر ۰/۱ تا ۰/۷ عرض ورق بوده و نتایج نشان داد برای سوراخ‌های کوچک‌تر نتایج تحلیلی دقیق بوده و برای سوراخ‌های بزرگ‌تر دقت محاسبات کاهش می‌یابد [۶]. همچنین بررسی آزمایشگاهی روی ورق مربعی سوراخ شده نشان داد دقت مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی وجود دارد [۷]. بررسی کمانش ورق با رفتار غیرهمگن نیز تحت بارهای درون صفحه ورق مورد بررسی قرار گرفت که نتایج شامل شکل کمانش ورق‌ها و تاثیر رفتار غیر همگن ورق روی بار کمانش می‌باشد [۸]. لورنزی و همکاران به بررسی عددی اثر نوع و شکل سوراخکاری بر کمانش ورق‌های فولادی نازک پرداخته و اثر مهم این امر را بر رفتار کمانشی ورق‌ها نشان دادند [۹]. شپربور و همکاران کمانش موضعی ورق‌های فولادی و آلومینیومی را با شرایط مرزی تکیه‌گاهی ساده مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که اثر یک سوراخ مرکزی کمتر از سوراخ‌های متعدد پخش شده در ورق می‌باشد [۱۰]. کمور و سونمز رفتار کمانشی الاستیک ورق‌های مستطیلی سوراخ شده را تحت بارگذاری‌های لبه‌ای مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که ورق‌های مربعی بسیار به بارگذاری در میانه لبه‌ها حساس هستند [۱۱]. همچنین شولر و همکاران اثر پیش بارهای استاتیکی را بر پاسخ ضربه‌ای و کمانشی ورق‌های کامپوزیت بررسی کردند. آنها از روش عددی المان محدود استفاده کرده و نشان دادند پیش بارگذاری استاتیکی تاثیر بسزایی بر رفتار کمانشی ورق دارد [۱۲].

در پژوهش حاضر ابتدا به بررسی بار بحرانی کمانشی ورق‌های طویل فولادی با دو شرط مرزی لبه‌های طولی گیردار و مفصلی (ساده) تحت اعمال جداگانه بارهای خمشی، برشی و محوری با استفاده از روش اجزاء محدود پرداخته خواهد شد. سپس با اعمال هم‌زمان مقادیر متغیر از هر یک از سه بارگذاری، رفتار کمانشی ورق تحت اندرکنش بارها استخراج می‌گردد که این رفتار شناسی شامل شکل کمانش و بار کمانشی ورق تحت ترکیب بارها می‌باشد. همچنین در ادامه اثرپذیری ورق‌ها از ایجاد سوراخ کاری در آنها با ابعاد مختلف مورد بررسی و ارزیابی قرار خواهد گرفت.

## ۲- مشخصات ورق فولادی

لحاظ کردن هرچه بهتر سوراخ‌های کوچک ایجادشده در ورق و تغییرات موضعی ایجاد شده در اطراف آن‌ها استفاده می‌گردد. در مقابل برای سوراخ‌کاری‌های بزرگ‌تر از مش درشت‌تر استفاده گردید. ابعاد مش بندی تا جایی ریز در نظر گرفته شد که در صورت استفاده از المان‌های ریزتر، نتایج با مش بندی جدید کمتر از ۳ درصد تغییر را نشان دهد.

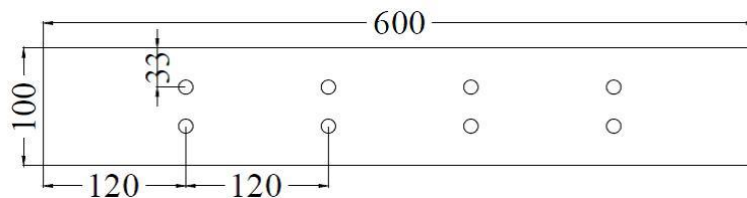
ورق‌های ساده و سوراخ‌کاری شده تحت بارگذاری مرکب خمشی، برشی و محوری قرار داده می‌شوند. هدف، بررسی رفتار و عملکرد ورق‌ها در مودهای کمانشی محتمل می‌باشد. در تمام روند تحقیق مود اول کمانشی، که بحرانی‌ترین مود می‌باشد، مدنظر بوده و نتایج مود اول استخراج شده است. بار محوری فشاری بر روی لبه‌ی بلند ورق و در راستای عمود بر آن در صفحه ورق اعمال می‌گردد. لنگر خمشی بر روی لبه‌های کوتاه ورق و درون صفحه ورق اعمال می‌گردد. بار برشی نیز روی لبه‌های کوتاه و بلند ورق و در راستای طولی آن‌ها وارد می‌شود. بارگذاری‌ها به شکل ترکشن به ورق‌ها اعمال می‌شوند. در گام نخست هرکدام از بارگذاری‌ها به شکل مجزا بر روی ورق‌های فولادی مدل‌سازی شده اعمال شده و مقدار بار بحرانی کمانشی هرکدام محاسبه می‌شود. سپس برای در نظرگیری اندرکنش بارگذاری‌ها به شکل مرکب، دو بارگذاری از سه بارگذاری (برای مثال خمشی و محوری) به‌طور همزمان به مقدار معین از پیش معلوم وارد شده و سپس بار سوم (برای مثال برشی) وارد شده و بار کمانشی بار سوم محاسبه می‌گردد. با این فرض، سه ترکیب مختلف از بارگذاری‌های اشاره شده به ورق‌های فولادی اعمال شده و منحنی تغییرات بارهای کمانشی به دست می‌آید.

## ۳- بررسی اولیه و صحت سنجی

در پژوهش حاضر بارهای خمشی، برشی و محوری مطابق شکل

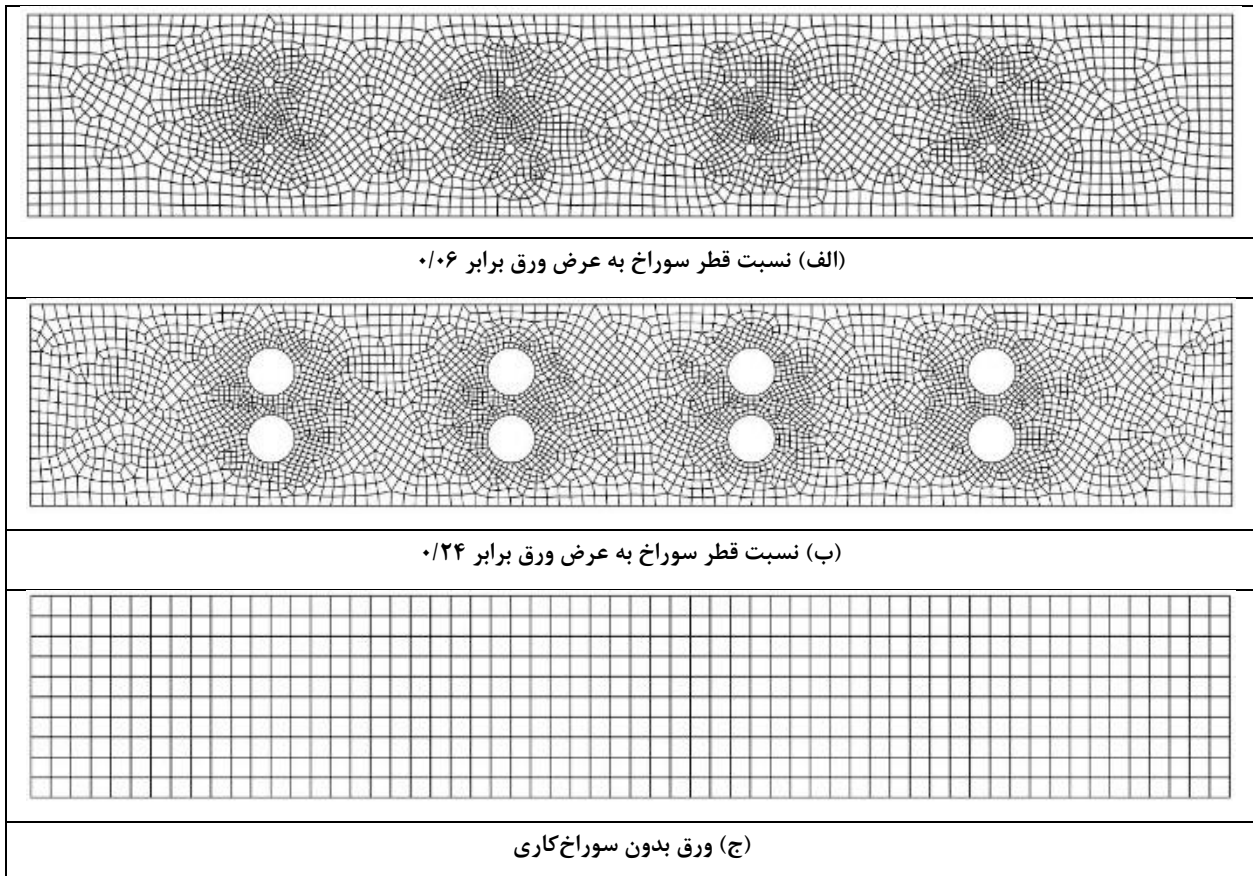
در این پژوهش، به عنوان ورق سوراخ‌کاری نشده از ورقی طویل به ضخامت ۱ سانتی‌متر و به ابعاد ۶۰۰ در ۱۰۰ سانتی‌متر استفاده می‌شود. طول ورق بگونه‌ای انتخاب گردیده که افزایش بیشتر طول ورق تأثیری در رفتار و پاسخ کمانشی آن نداشته باشد. تمام لبه‌های ورق در جهت برون صفحه مقید شده است. همچنین دو لبه‌ی کوتاه عرضی در راستای طولی ورق مقید شده تا علاوه بر عکس‌العمل برشی در ورق تعادل خمشی ورق را نیز حفظ نمایند. در این پژوهش برای لبه‌های بلند ورق دو نوع شرایط مرزی در نظر گرفته می‌شود: (۱) مقید شده در برابر دوران (گیردار) و (۲) بدون قید نسبت به دوران (مفصلی یا ساده). این دو شرط مرزی در ورق‌ها بسیار پرکاربرد است. به جهت بررسی اثر سوراخ‌کاری، هشت سوراخ با نسبت قطر به عرض ورق برابر با ۰/۰۶ (قطر سوراخ برابر با ۶ سانتی‌متر)، ۰/۱۲، ۰/۱۸ و ۰/۲۴ در ورق ایجاد می‌شود. محل این سوراخ‌ها در ورق طویل انتخاب شده ثابت بوده و در شکل ۱ نشان داده شده است. در تمام بررسی‌های صورت گرفته روی ورق سوراخ‌کاری شده از ورقی با لبه‌های بلند (طولی) ساده استفاده شده است.

با فرض رفتار کمانشی الاستیک، مصالح فولاد مورد استفاده در ورق با رفتار الاستیک خطی با مدول الاستیسیته ۲۱۰ گیگاپاسکال و نسبت پواسون ۰/۳ در نظر گرفته شده است. ورق‌های سوراخ‌کاری شده و نشده با استفاده از روش المان محدود مدل‌سازی می‌شوند. جهت مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. مش المان محدود مورد استفاده برای ورق ساده (سوراخ‌کاری نشده) و ورق سوراخ‌کاری شده با نسبت قطر به عرض ورق برابر با ۰/۰۶ و ۰/۲۴ در شکل ۲ نشان داده شده است. المان مورد استفاده به منظور مش بندی در مدل‌سازی، المان پوسته چهارگرمی (درجه اول، خطی) می‌باشد. برای سوراخ‌کاری‌های ریزتر از چگالی مش بالاتر به‌منظور



شکل ۱. ورق مدل شده در پژوهش حاضر و محل سوراخ‌ها (ابعاد به سانتی‌متر می‌باشد)

Fig. 1. Modeled plate and the place of the holes (dimension are in cm)



شکل ۲. مش بندی ورق های فولادی سوراخ کاری نشده (ساده) و سوراخ کاری شده

Fig. 2. Finite element mesh of simple and perforated plates

جدول ۱. مقادیر بار بحرانی کمانشی ورق سوراخ کاری نشده تحت بارگذاری های جداگانه

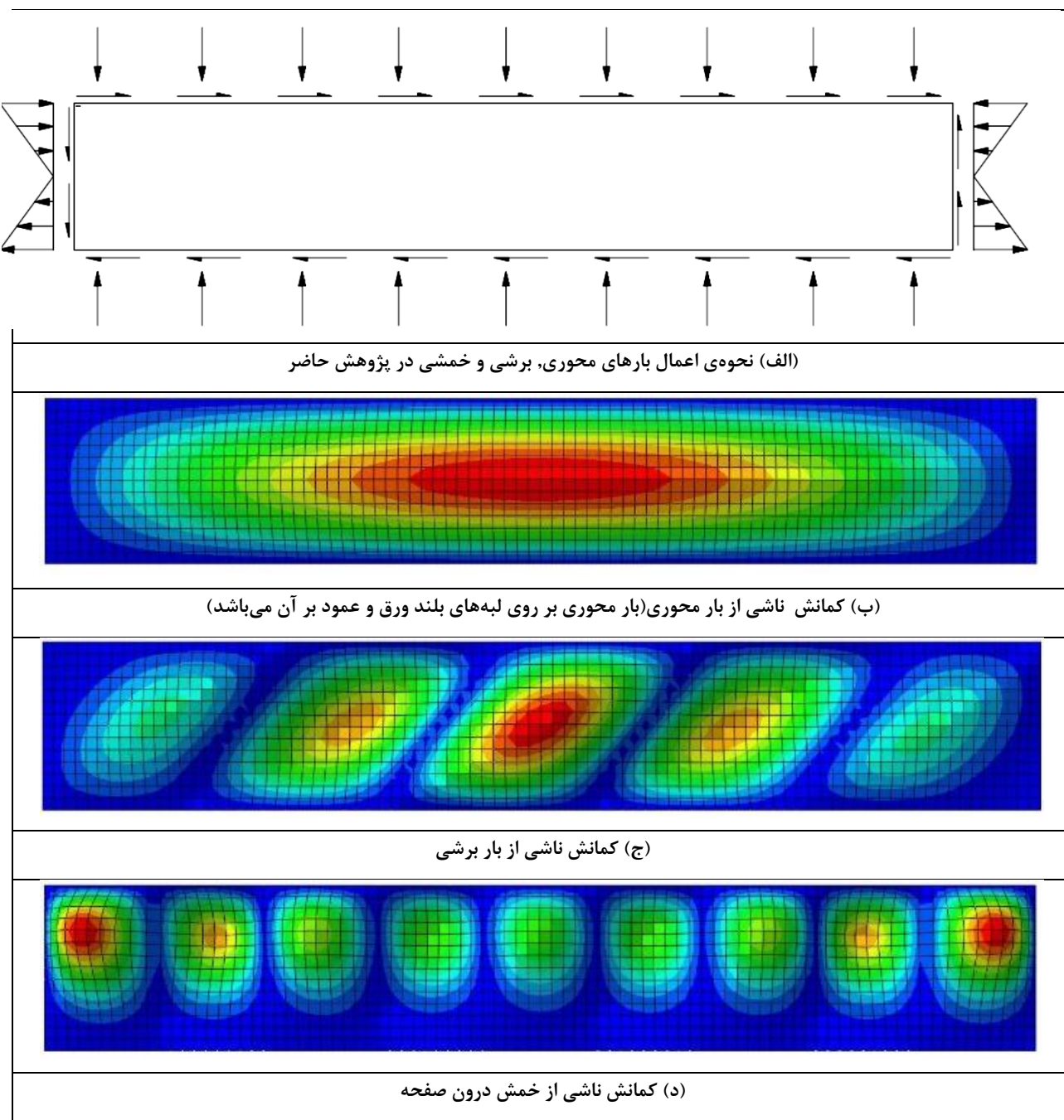
Table 1. Critical buckling load of non-perforated plates

	بار محوری بحرانی (kN/m)	بار برشی بحرانی (kN/m)	بار خمشی بحرانی (kN)
ورق با لبه طولی ساده	۲۰۲/۱	۱۰۶۸/۴	۷۵۰/۷
ورق با لبه طولی گیردار	۷۸۱/۶۲	۱۷۶۷	۱۲۵۵

طولی گیردار و لبه های طولی مفصلی (ساده) در جدول ۱ لیست شده است. همانگونه که انتظار می رود با گیردار شدن لبه های طولی ورق بار کمانشی خمشی و برشی به ترتیب ۶۷ و ۶۵ درصد افزایش می یابد، ولی این بهبود عملکرد در مورد بار محوری بسیار چشمگیر بوده و تا بیش از ۳ برابر بار کمانش محوری را افزایش می دهد. علت این امر شکل کمانش محوری و تمایل ورق به دوران حول لبه های طولی ورق می باشد که با گیردار شدن آن ها بار کمانش ورق به شکل قابل ملاحظه ای افزایش یافته است. کمانش ناشی از اندرکنش سه بار مذکور همواره ترکیبی از سه شکل مود اول کمانشی نشان داده شده

۳- الف به ورق اعمال شده است به طوری که بار محوری روی لبه های بلند ورق و بصورت عمود بر آن وارد می شود. قابل ذکر است که در بخش صحت سنجی بار محوری روی لبه های کوتاه ورق و در راستای طولی ورق وارد شده است و نحوه ی کمانش آن نیز مطابق شکل ۶ خواهد بود.

مود اول (اصلی) کمانشی ورق سوراخ کاری نشده ناشی از اعمال جداگانه هر یک از بارهای محوری، برشی و خمشی در شکل ۳ نشان داده شده است. مقادیر بارهای بحرانی کمانشی ورق در مود اول تحت اعمال جداگانه هر یک از بارگذاری ها در دو حالت لبه های



شکل ۳. مود اول کماتش ورق سوراخ‌کاری نشده ناشی از اعمال جداگانه بارگذاری‌های محوری، خمشی و برشی  
 Fig. 3. First buckling mode of non-perforated plate under separate shear, axial and bending loadings

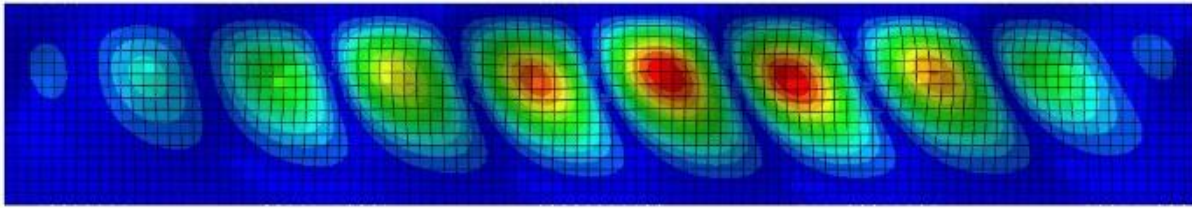
برشی  $\tau_{cr}$  به ترتیب به کمک روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌گردد به طوری که بار محوری در راستای طولی ورق اعمال می‌گردد:

$$\sigma_{cr} = K_{axial} \times \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (1)$$

$$\tau_{cr} = K_{shear} \times \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (2)$$

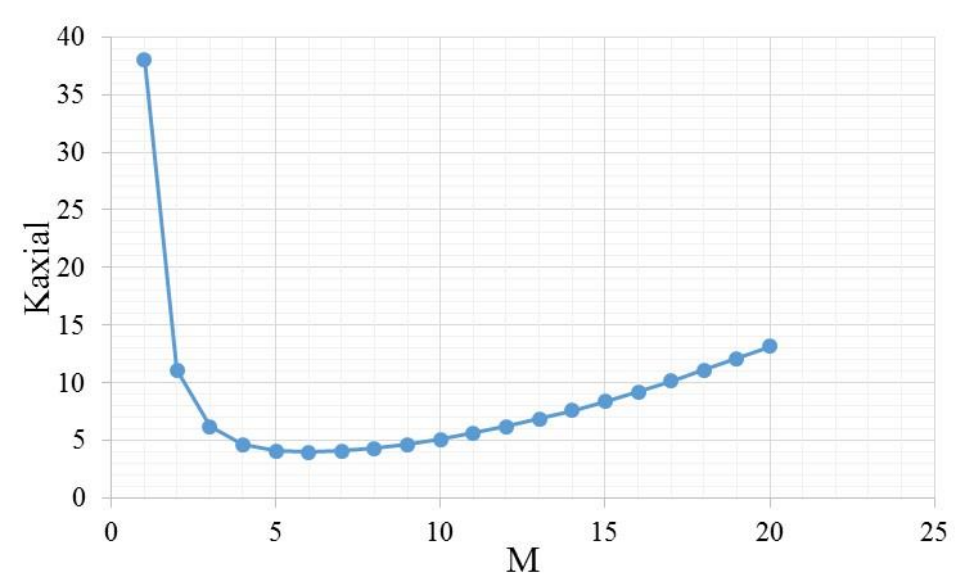
در شکل ۳ می‌باشد. برای مثال، شکل ۴ ترکیبی از کماتش برشی و خمشی ورق سوراخ‌کاری نشده را نشان می‌دهد.

به منظور صحت سنجی نتایج بدست آمده، ورق موردنظر تحت دو نوع بارگذاری مختلف به روش عددی اجزاء محدود بررسی شده و با روابط تحلیلی ریاضی موجود در ورق‌ها مورد صحت سنجی قرار می‌گیرد. بار کماتش ورق‌ها تحت دو نوع بارگذاری محوری  $\sigma_{cr}$  و



شکل ۴. مود اول کمانشی ورق سوراخ کاری نشده تحت ترکیب بارگذاری خمشی و برشی

Fig. 4. First buckling mode of non-perforated plate under combined bending-shear loading



شکل ۵. تغییرات ضریب کمانش تحت بار محوری براساس تعداد نیم موج (M)

Fig. 5.  $K_{axial}$  coefficient for buckling under axial load based on half-wave number (M)

در ورق بدون سوراخ کاری با ابعاد ۶۰۰ در ۱۰۰ سانتی متر مقدار  $\varphi = 6$  بوده و در نتیجه مقدار  $K$  به کمک رابطه ۳ برای بار محوری محاسبه می شود که مقادیر بدست آمده به ازای مقادیر مختلف  $M$  در شکل ۵ نشان داده شده است. تحت بار برشی نیز مقدار ضریب  $K$  معادل با  $K_{shear} = 5.34 + \frac{4}{\varphi^2} = 5.45$  محاسبه می شود.

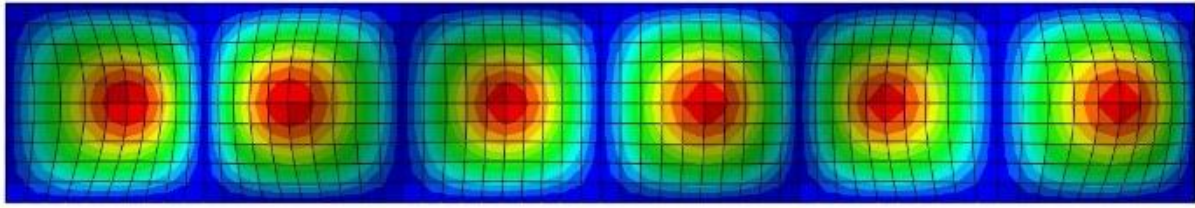
حاصل ضرب ضرایب  $K$  در عبارت  $\left(\frac{t}{b}\right)^2 \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)}$  که برای ورق انتخابی مقداری ثابت است، برابر با بار کمانشی بحرانی خواهد بود. بنابراین مقادیر حداقل  $K$  به معنای حداقل بار کمانشی (مود اول) می باشد. حداقل مقادیر ضرایب  $K$  بار بحرانی کمانشی تحت بارگذاری های برشی و محوری به ترتیب برابر ۵/۴۵ و ۴ (برای تعداد نیم موج  $M = 6$ ) محاسبه می شود. نتایج عددی بدست آمده از تحلیل اجزاء محدود برای ورق سوراخ کاری نشده انتخابی، مقدار  $K_{axial}$  را برابر با ۴/۰۶ و  $K_{shear}$  را برابر با ۵/۶۳ نشان می دهد

در روابط فوق  $t$  و  $b$  نشانگر ضخامت و عرض ورق است. همان گونه که ملاحظه می شود، بار کمانشی در دو حالت بارگذاری محوری و برشی ضریبی از  $\left(\frac{t}{b}\right)^2 \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)}$  بوده که این ضریب با نماد  $K$  نشان داده شده است. این ضریب ارتباطی بین هندسه و مصالح ورق با بار کمانشی برقرار می کند و برای بارگذاری محوری و برشی به ترتیب مطابق روابط ۳ و ۴ بیان می شود [۲]:

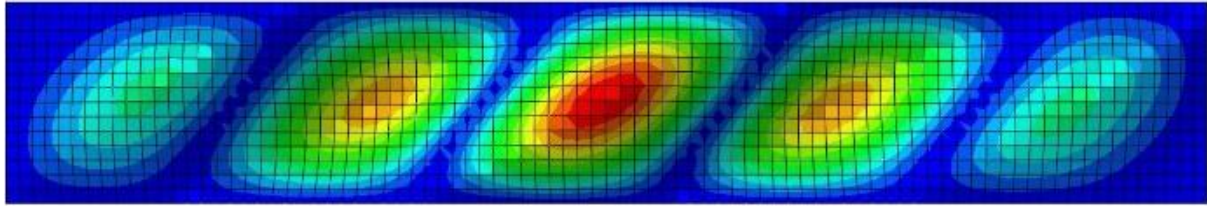
$$K_{axial} = \left( \frac{\varphi^2}{M^2} + \frac{M^2}{\varphi^2} + 2 \right) \quad (3)$$

$$K_{shear} = 5.34 + \frac{4}{\varphi^2} \quad (4)$$

در روابط فوق  $\varphi$  برابر نسبت طول به عرض ورق بوده و  $M$  برابر با تعداد نیم موج رخ داده در راستای طولی ورق فولادی است. برای



شکل ۶. مد اول (اصلی) کمانش ورق طویل تحت بارگذاری محوری  
 Fig. 6. Principal buckling mode of the long plate under axial loading



شکل ۷. مد اول (اصلی) کمانش ورق طویل تحت بارگذاری برشی  
 Fig. 7. Principal buckling mode of the long plate under shear loading

بحرانی و در مجموع بارهای تحمل شده توسط ورق افزایش چشمگیری داشته است. با وجود افزایش ظرفیت باربری ورق با لبه‌های طولی گیردار در مقایسه با لبه‌های طولی ساده، مقدار نرمال شده‌ی بارها در ورق با لبه‌ی طولی گیردار مقداری کوچک‌تر در مقایسه با ورق با لبه‌های طولی ساده نشان می‌دهد. این مسئله بیانگر این موضوع است که حساسیت ورق با لبه‌های طولی گیردار نسبت به ترکیب بارگذاری بیشتر از ورق با لبه‌های طولی ساده می‌باشد. در شکل‌های ۸-الف دو بار محوری و برشی همزمان تا مقدار مشخصی به ورق اعمال گردیده و ظرفیت باربری خمشی ورق محاسبه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که اعمال بار محوری صرف در نهایت ظرفیت باربری خمشی ورق را حداکثر ۱۰ درصد کاهش می‌دهد ولی در صورت اعمال همزمان هر دو بار اثر کاهش ظرفیت باربری خمشی ورق محسوس خواهد بود. این مسئله در شکل‌های ۸-ب و ۸-ج نیز مشهود است. در شکل ۸-ب ورق همزمان تحت دو بار برشی و خمشی قرار گرفته و ظرفیت باربری محوری آن محاسبه گردیده و در شکل ۸-ج ورق همزمان تحت دو بار محوری و خمشی بوده و ظرفیت باربری برشی ورق محاسبه گردیده است

۴-۲- ورق فولادی سوراخ‌کاری شده

۴-۲-۱- سوراخ‌کاری با نسبت قطر سوراخ به عرض ورق ۰/۰۶

برای بررسی ورق فولادی سوراخ‌کاری شده مشابه ورق بدون

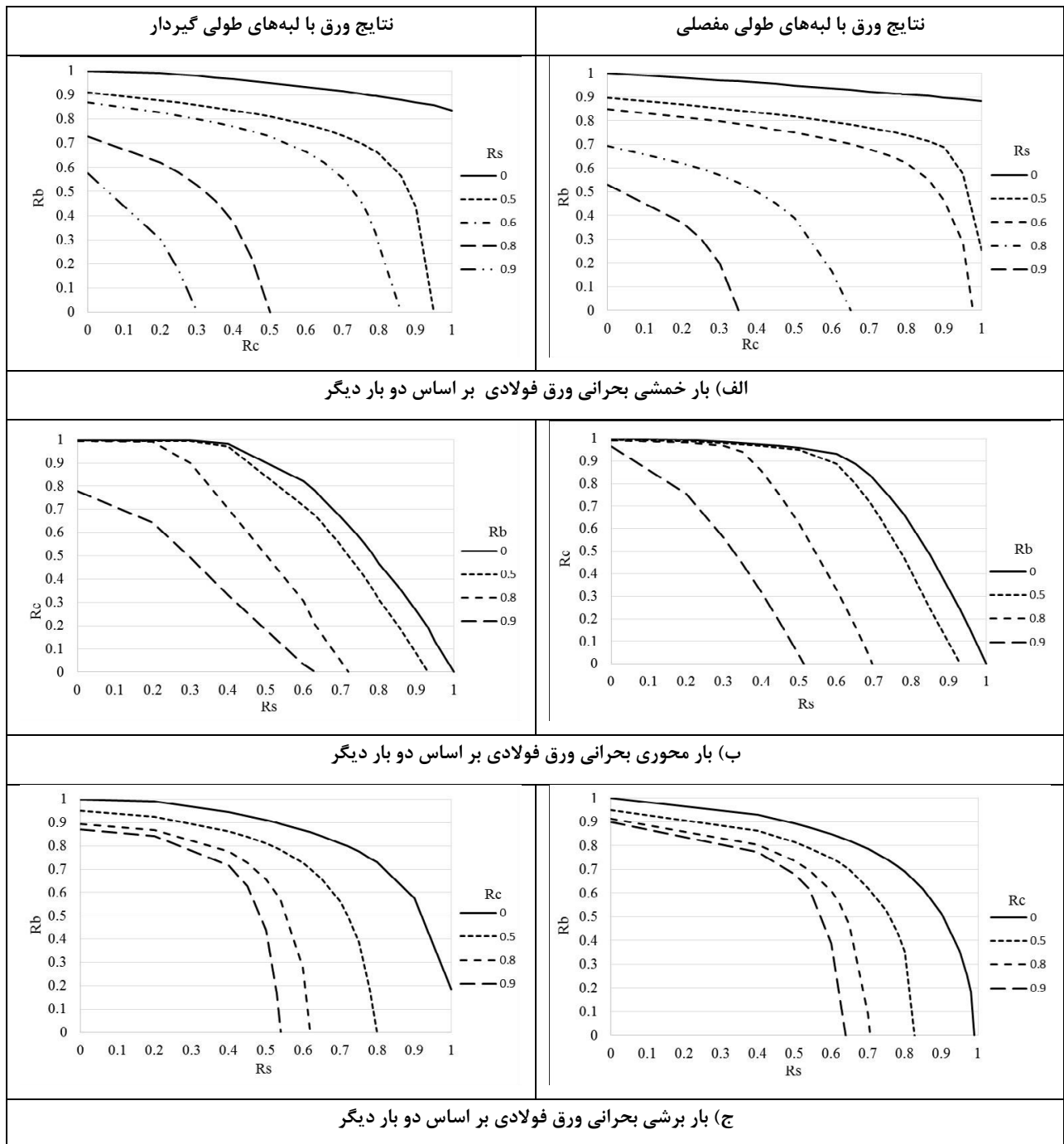
که بیانگر انطباق مناسب نتایج عددی با نتایج بدست آمده از روش تحلیلی می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود تعداد نیم موج شکل گرفته در کمانش تحت بارگذاری محوری تعداد ۶ نیم موج می‌باشد. شکل مود اول (اصلی) کمانشی ورق سوراخ‌کاری نشده تحت بار برشی نیز در شکل ۷ نشان داده شده است.

#### ۴- نتایج و بحث

در ادامه طبق آنچه پیش تر شرح داده شد ترکیب بارگذاری‌های محوری، برشی و خمشی به ورق‌ها اعمال شده و در هر ترکیب بارگذاری، دو بار اعمال شده و بار بحرانی مربوط به بار سوم محاسبه می‌گردد. مقادیر بارگذاری‌های محوری، برشی و خمشی نسبت به مقادیر بحرانی ناشی از اعمال تک‌تک بارگذاری‌ها، که در بخش قبل محاسبه و نرمال شده و ارائه خواهد شد. در اشکال ادامه این نسبت‌های نرمال شده برای بار برشی، بار محوری فشاری، و بار خمشی به ترتیب با  $R_c$  و  $R_b$  نشان داده شده است.

۴-۱- ورق فولادی ساده (سوراخ‌کاری نشده)

نتایج حاصل از تحلیل ورق فولادی ساده بدون سوراخ‌کاری با لبه‌های طولی گیردار و ساده در شکل ۸ نشان داده شده است. با مقایسه‌ی نمودارهای اندرکنشی برای ورق با لبه‌های طولی ساده و گیردار می‌توان گفت که با گیردار کردن لبه‌های طولی ورق، بارهای



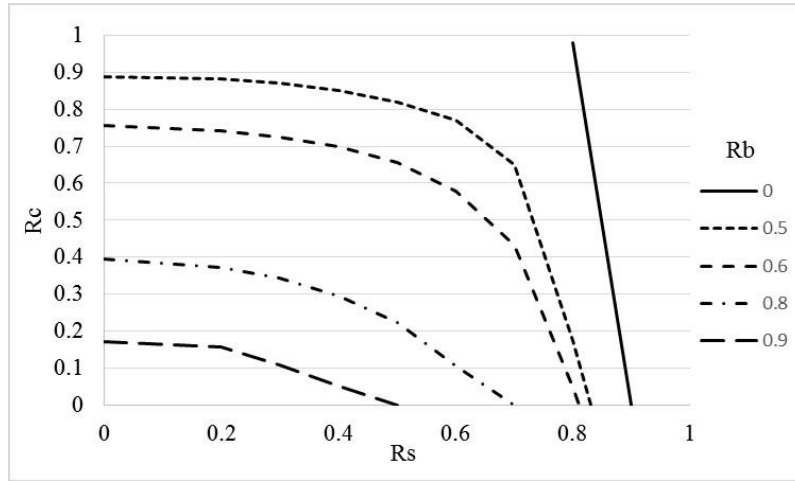
شکل ۸. اندرکنش بارهای خمشی، برشی و محوری ورق ساده (سوراخ کاری نشده) با لبه‌های طولی گیردار و ساده

Fig. 8. Interaction of axial, shear and bending loads for non-perforated plates with fixed and simple edges

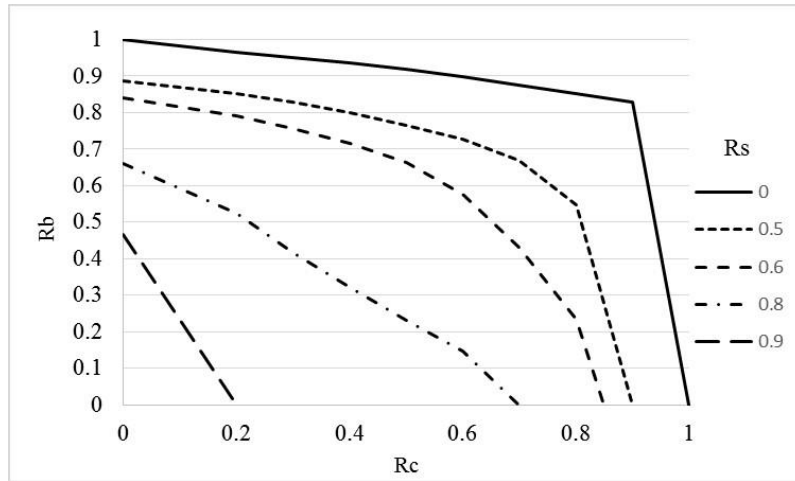
محوری ورق ندارد. اما با عبور از نسبت  $0/8$  بار موردنیاز برای کمانش برشی، ظرفیت باربری محوری ورق به شدت کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۹-ب که بیانگر باربری خمشی ورق در حضور دو بار دیگر است می‌توان مشاهده کرد که تا اعمال بارهای محوری برابر با  $0/6$  مقدار بحرانی اثرپذیری بار کمانش خمشی کمتر است ولی با عبور

سوراخ کاری، ورق تحت ترکیبی از بارگذاری‌های فشاری و خمشی و برشی قرار گرفته و نتایج حاصل از این بررسی در شکل ۹ مقایسه می‌شود. مطابق شکل ۹-الف باربری محوری ورق با عبور از نسبت  $0/6$  با شدت بیشتری کاهش می‌یابد و اگر بار خمشی به ورق اعمال نگردد بار برشی تا حدود ۸۰ درصد بار کمانش برشی تأثیری روی باربری

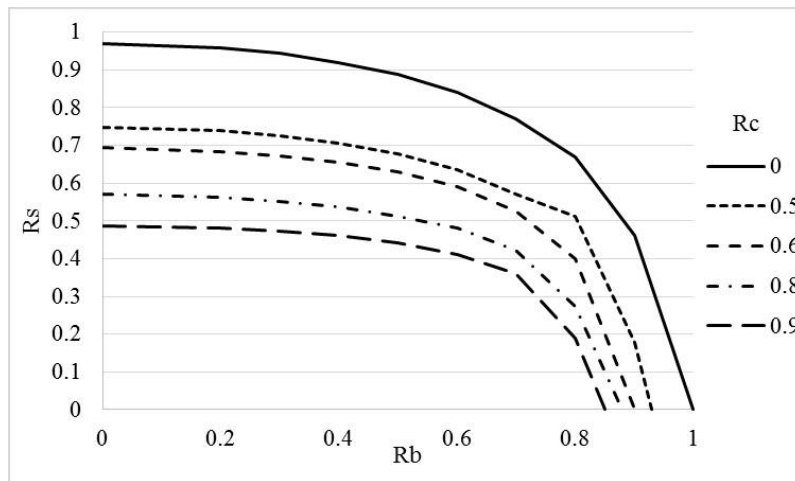




الف) بار فشاری بحرانی

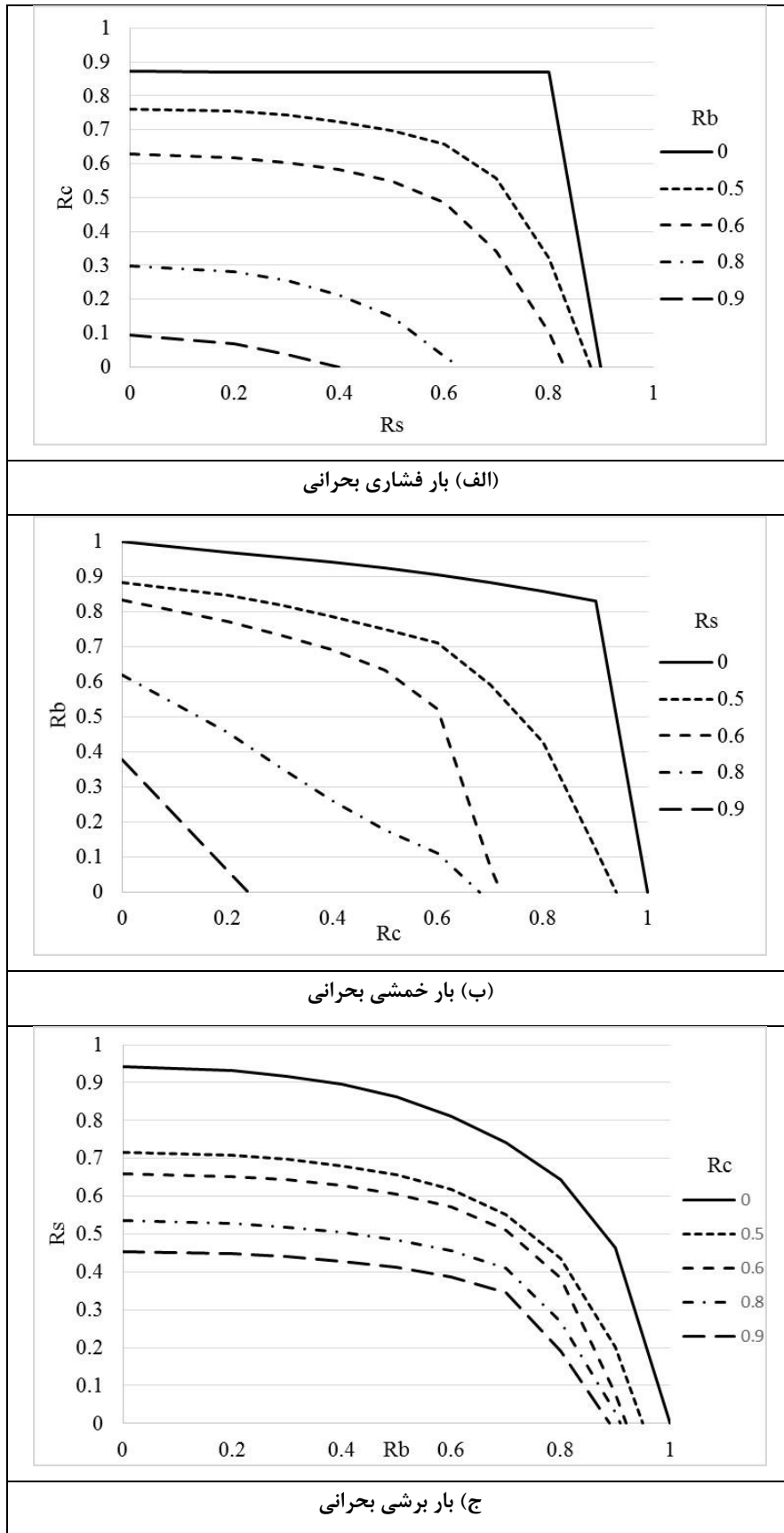


ب) بار خمشی بحرانی



ج) بار برشی بحرانی

شکل ۹. منحنی‌های اندرکنشی کمانشی برای ورق سوراخ‌کاری شده با نسبت قطر سوراخ به عرض ورق برابر با ۰/۰۶  
 Fig. 9. Interaction buckling diagrams for perforated plates with hole diameter to width ratio of 0.06



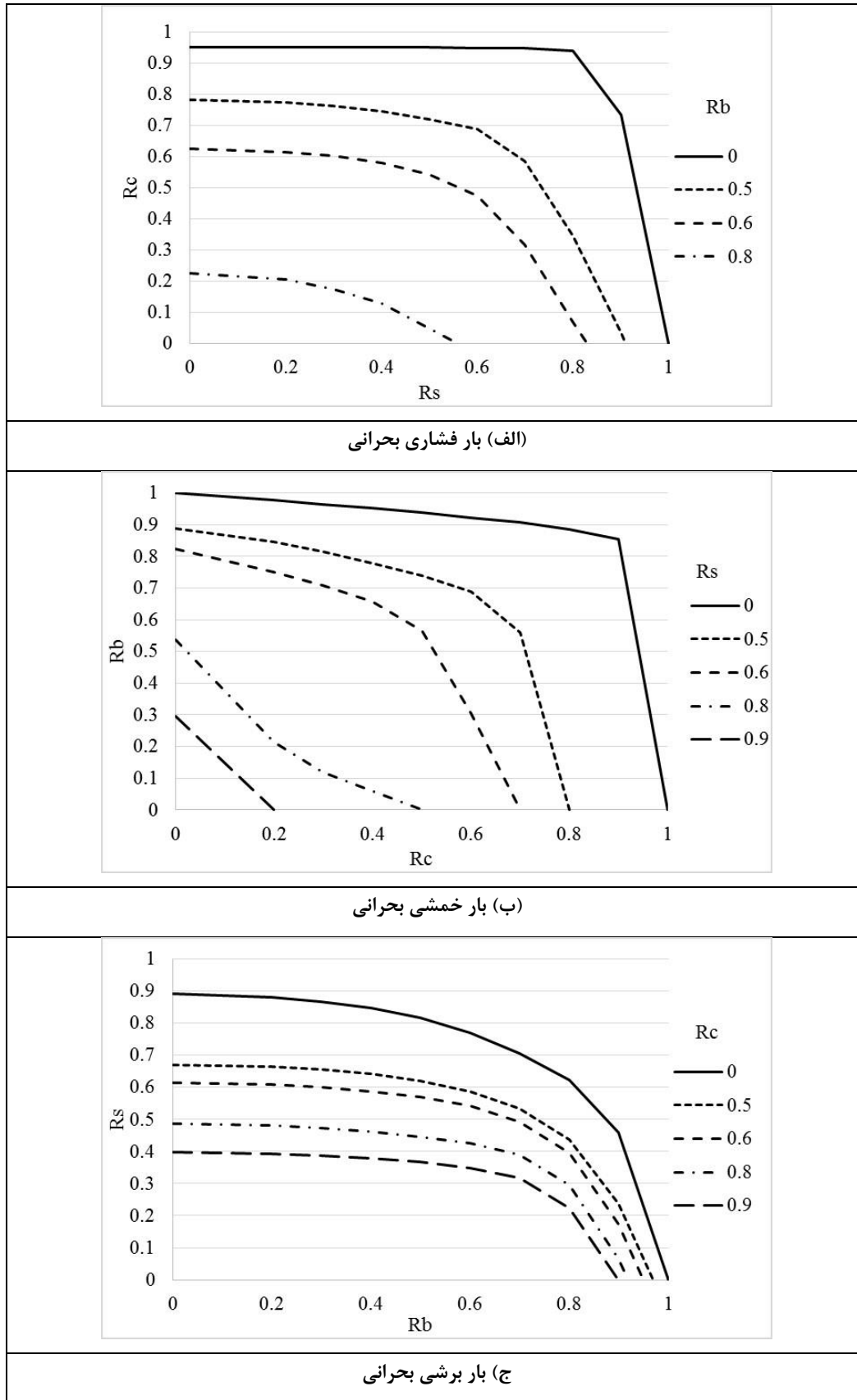
شکل ۱۰. منحنی‌های اندرکنشی کمانشی برای ورق سوراخ‌کاری شده با نسبت قطر سوراخ به عرض ورق برابر با ۰/۱۲  
 Fig. 10. Interaction buckling diagrams for perforated plates with hole diameter to width ratio of 0.12

۴-۲-۳- سوراخ کاری به نسبت قطر سوراخ به عرض ورق برابر ۰/۱۸ نمودارهای اندرکنشی کمانشی ورق سوراخ کاری شده با قطر سوراخ برابر با ۰/۱۸ عرض ورق در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش قطر سوراخ کاری به ۰/۱۸ عرض ورق شاهد کاهش بیشتر ظرفیت باربری‌ها خمشی، محوری و برشی هستیم و با عبور از بار برشی نرمال شده‌ی ۰/۶ افت باربری خمشی زیاد بوده و حداقل ۴۰ درصد حالت سوراخ کاری نشده را شامل می‌شود. از طرفی مانند قبل اثرپذیری بار محوری نسبت به سوراخ کاری در ورق بسیار بیشتر از دو بار دیگر است به طوری که در صورت سوراخ کاری به نسبت قطر سوراخ به عرض ورق برابر ۰/۱۸ عملاً امکان اعمال خمش نرمال شده‌ی ۰/۹ نبوده و باربری محوری به طور کامل از دست می‌رود. با بررسی ورق سوراخ کاری شده با قطری برابر ۰/۱۸ عرض ورق مشخص شد که سوراخ کاری روی ظرفیت باربری محوری بیشترین تأثیر را گذاشته و بعد از آن بیشترین تأثیر را روی باربری برشی می‌گذارد و در پایان نیز کمترین تأثیر را باربری خمشی دارد.

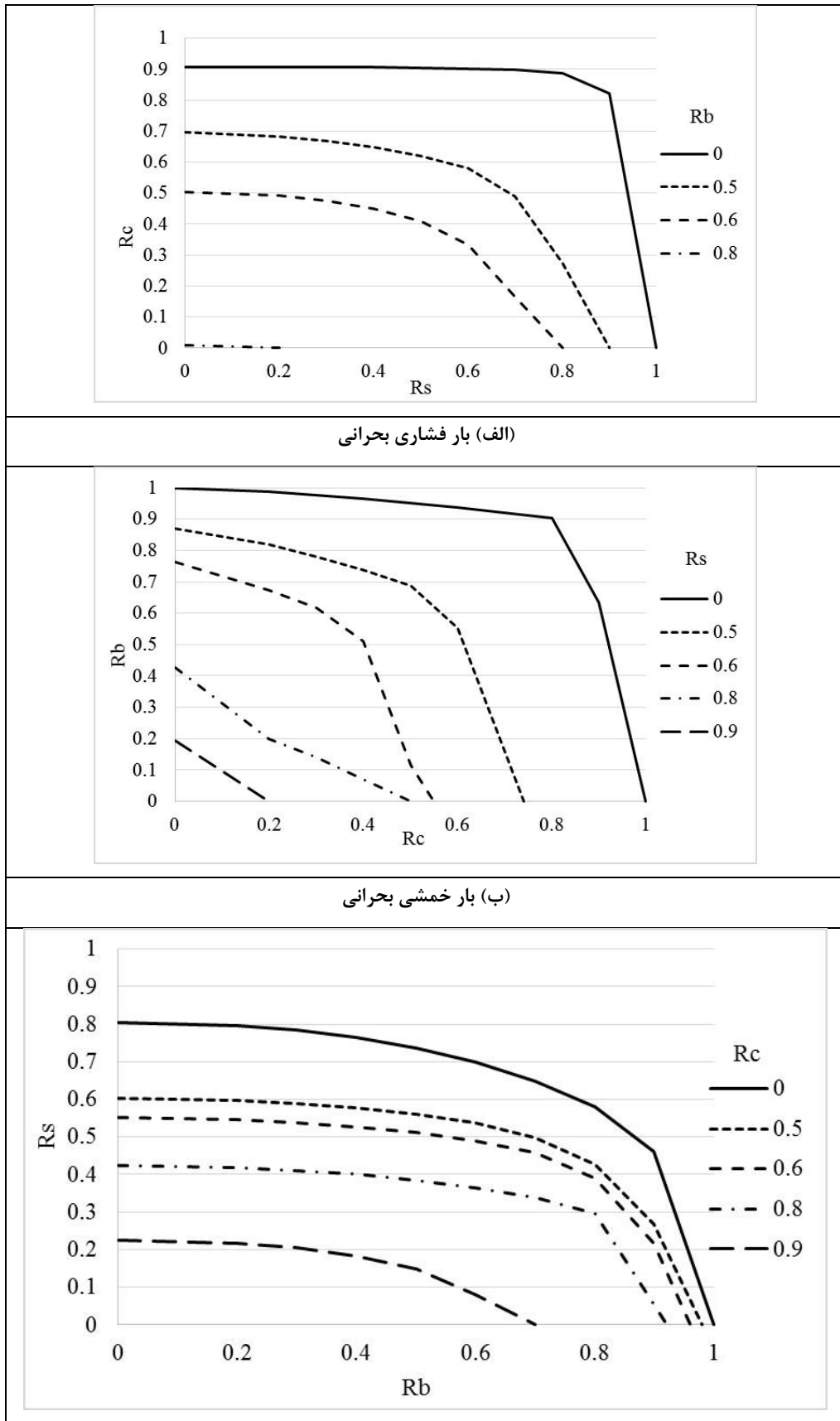
۴-۲-۴- سوراخ کاری به نسبت قطر سوراخ به عرض ورق برابر ۰/۲۴ با سوراخ کاری به نسبت قطر سوراخ به عرض ورق برابر ۰/۲۴ (شکل ۱۲) باربری محوری ورق کاهشی محسوس یافته، به طوری که عملاً امکان اعمال بارگذاری‌های خمشی نرمال شده‌ی بالاتر از ۰/۶ امکان پذیر نمی‌باشد. این کاهش باربری محوری در مواقعی که ترکیبی از دو بار دیگر وجود داشته باشد بیشتر بوده و ممکن است ظرفیت باربری محوری به طور کامل از دست می‌رود. ولی در مواقعی که تنها بار برشی به همراه بار محوری وجود داشته باشد باربری محوری حدود ۱۰ درصد کاهش می‌یابد (برای نیروهای برشی کمتر از ۰/۸ مقدار بحرانی) که این مهم در شکل ۱۲-الف مشهود است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که در ورق فولادی سوراخ کاری شده با قطر سوراخ ۰/۲۴ عرض ورق در صورت اعمال بار خمشی بیش از ۰/۶ بار خمشی نهایی، امکان تحمل بار محوری برای ورق وجود ندارد. از طرفی سوراخ کاری روی ورقی که تحت بار برشی و محوری قرار ندارد می‌تواند کمترین اثرگذاری را روی ظرفیت باربری خمشی ورق گذارد. علت آن می‌تواند ناشی از افزایش تعداد نیم موج‌ها در ورق سوراخ کاری شده نسبت به ورق سوراخ کاری نشده باشد. در مقابل، سوراخ کاری در ورق می‌تواند حداقل ۲۰ درصد ظرفیت باربری برشی ورق را کاهش دهد که علت

از این مقدار افت ظرفیت باربری خمشی ورق به شدت افزایش یافته و محسوس است. این کاهش شدید باربری خمشی ورق در حالتی که بار برشی اعمال نمی‌شود نیز دیده می‌شود. نتایج در شکل ۹ نشان می‌دهد که تأثیر سوراخ کاری با نسبت قطر سوراخ به عرض ورق برابر با ۰/۰۶ بر عملکرد کمانشی ورق تحت بارهای سه‌گانه کمتر از ۴ درصد بوده و با اطمینان خوبی می‌توان از اثر آن چشم‌پوشی نمود. این عدم اثرگذاری در شکل ۹-ب نیز دیده می‌شود که در آن نمودار در حالت بدون نیروی برشی و نیروی محوری به عددی نزدیک به ۱ رسیده است که بیانگر عدم تأثیرگذاری سوراخ کاری روی ظرفیت خمشی ورق است. همچنین در شکل ۹-ج مشاهده می‌شود اثر سوراخ کاری باعث کاهش ۳٪ در ظرفیت باربری برشی ورق نسبت به ورق سوراخ کاری نشده می‌باشد.

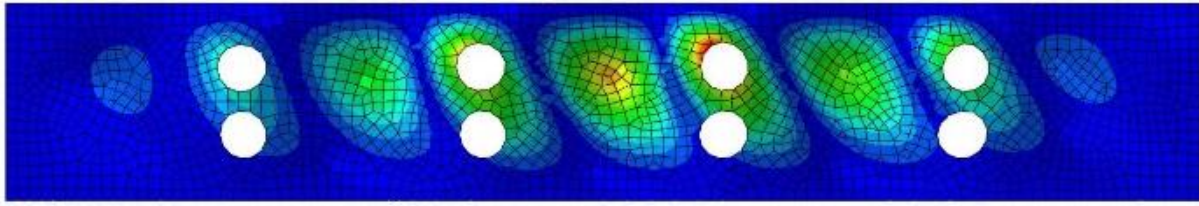
۴-۲-۴- سوراخ کاری با نسبت قطر سوراخ به عرض ورق ۰/۱۲ با توجه به اثرگذاری زیر ۴٪ ناشی از سوراخ کاری در ورق با سوراخ‌های به قطر ۰/۰۶ عرض ورق، بنابراین ابعاد بزرگ‌تری از سوراخ کاری مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی شکل ۱۰ این نکته قابل برداشت است که سوراخ کاری‌هایی که روی ورق انجام شده و نسبت قطر سوراخ به عرض ورق بالاتر از ۰/۰۶ است می‌تواند روی کاهش باربری ورق اثرگذار باشد به طوری که این سوراخ کاری باربری ورق را در ترکیب بارگذاری‌های متعدد حداقل ۱۰ درصد کاهش می‌دهد. با توجه به شکل ۱۰-الف نمودارهای مربوط به لنگر خمشی نرمال شده برابر با صفر تا ۰/۶ مقادیری نزدیک به هم داشته اما با افزایش لنگر به مقادیری بالاتر از ۰/۶ بار نهایی لنگر خمشی، مقاومت محوری ورق با شدت بیشتری کاهش می‌یابد. شکل ۱۰-الف شرایط مشابهی برای نیروهای برشی نرمال شده بزرگ‌تر از ۰/۶ نشان می‌دهد که در این حالت ظرفیت خمشی ورق حدود ۳۰ درصد کاهش نسبت به نیروی برشی نرمال شده ۰/۵ نشان می‌دهد. سوراخ کاری انجام شده روی ورق که نسبت قطر سوراخ به عرض ورق برابر ۰/۱۲ است تأثیر چندانی روی باربری خمشی ورق ندارد و همان‌طور که در شکل ۱۰-الف و ۱۰-ج مشاهده می‌شود این عمل روی ظرفیت باربری برشی و محوری ورق تأثیر گذاشته و منجر به کاهش برابر ۶ و ۱۱ درصد به ترتیب برای بار برشی و محوری می‌شود که این نشان‌دهنده حساسیت بیشتر بار محوری نسبت به سوراخ کاری در ورق است.



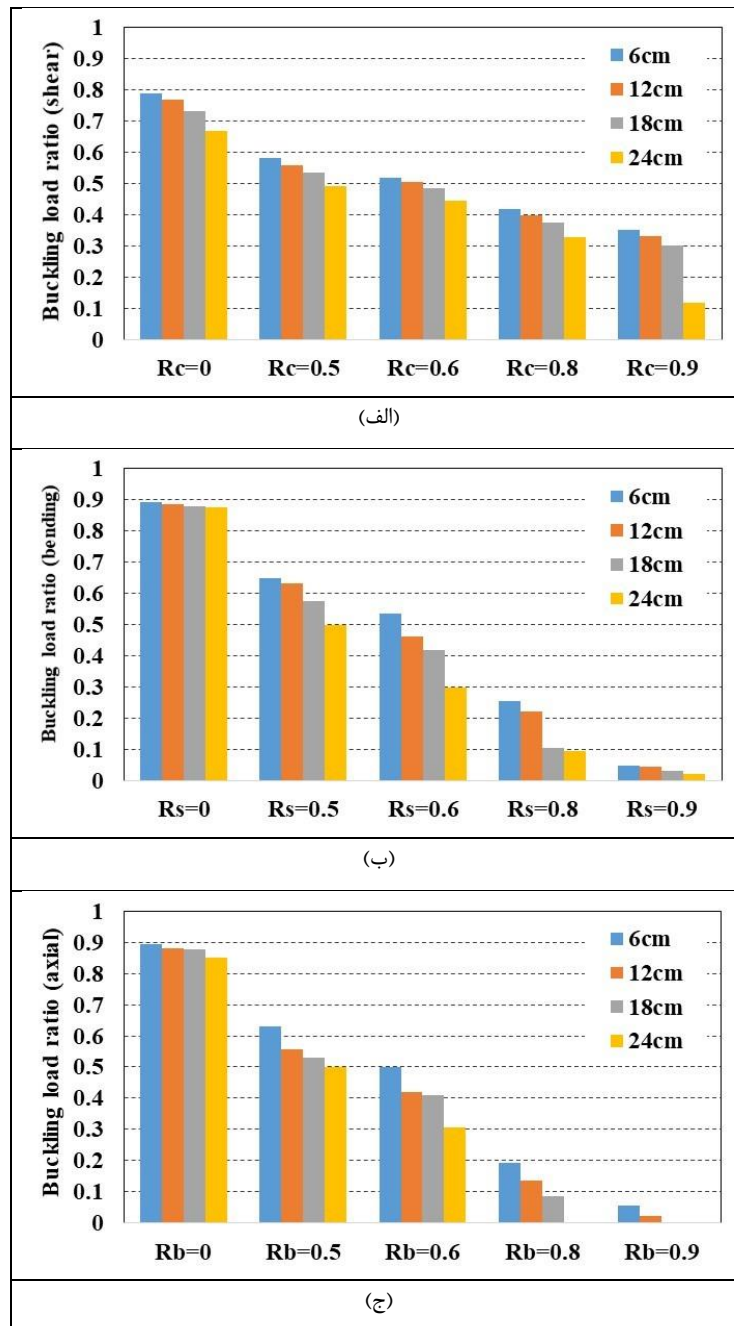
شکل ۱۱. منحنی‌های اندرکنشی کمانشی برای ورق سوراخ‌کاری شده با نسبت قطر سوراخ به عرض ورق برابر با ۰/۱۸  
 Fig. 11. Interaction buckling diagrams for perforated plates with hole diameter to width ratio of 0.18



شکل ۱۲. منحنی‌های اندرکنشی کمانشی برای ورق سوراخ‌کاری شده با نسبت قطر سوراخ به عرض ورق برابر با ۰/۲۴  
 Fig. 12. Interaction buckling diagrams for perforated plates with hole diameter to width ratio of 0.24



شکل ۱۳. کماتش ورق سوراخ کاری شده (نسبت قطر سوراخ به عرض ورق برابر ۰/۲۴) تحت ترکیب بارهای سه گانه  
 Fig. 13. Buckling of perforated plate (hole diameter to width ratio of 0.24) under triple loading combinations



شکل ۱۴. مساحت زیر منحنی نمودارهای کماتشی اندرکنشی (نسبت ظرفیت بار کماتشی) تحت ترکیب‌های مختلف بارگذاری  
 Fig. 14. Area under buckling interaction diagrams for different loading combinations

بار بحرانی شامل برش، لنگر و بار محوری نشان می‌دهد.

۳- حساسیت ورق تحت بار محوری روی سوراخ کاری در ورق بیشتر از دو بار دیگر است. همچنین اثرپذیری ورق از سوراخ کاری در بار برشی بیشتر از بار محوری می‌باشد.

۴- با بررسی کلیه نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که با عبور از ۶۰ درصد بار بحرانی در هر یک از بارهای سه‌گانه انتظار می‌رود برای دو بار دیگر ظرفیت باربری به‌طور چشم‌گیری کاهش یابد.

۵- سوراخ کاری به نسبت قطر به عرض ورق برابر ۰/۰۶ تأثیر چندانی روی ظرفیت باربری ورق تحت هر یک از بارگذاری‌ها ندارد.

۶- تأثیرپذیری ظرفیت باربری‌های سه‌گانه ورق از سوراخ کاری‌ها زمانی تشدید می‌شود که علاوه بر بار اصلی، دو بار دیگر نیز مشارکت داشته باشد. این به این معنی است که در صورت وجود دو نوع بارگذاری در ورق تأثیرپذیری آن از سوراخ کاری‌های انجام شده به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد.

۷- نتایج حاکی از این اصل است که در ورق‌های فولادی در صورتی که نسبت قطر سوراخ به عرض ورق برابر ۰/۱۸ باشد، ظرفیت باربری کمانش برای هر سه نوع بار با روندی سریع‌تر کاهش می‌یابد.

## مراجع

- [1] Kamranfard M, Naderi A, Saeid A. Effect of in plane loads on vibration of circular perforated plates. 2nd International Conference for Mechanical Engineering, 1396
- [2] Salimi A, Gholampoor S, Hosseinin S, Yadollahi Y. Assessment of holes in steel middle plate of combined shear wall systems. 3rd Annual Conference for Architectural and Housing Research, 1396.
- [3] C. Graciano and A. Ayestarán, "Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear," Journal of Constructional Steel Research, vol. 80, pp. 202-212, 2013/01/01/ 2013.
- [4] M. Kadkhodayan and M. Maarefdoust, "Elastic/plastic buckling of isotropic thin plates subjected to uniform and linearly varying in-plane loading using incremental and deformation theories," Aerospace Science and

آن قطع شدن باندهای کشش در کمانش برشی توسط سوراخ‌ها باشد. در شکل ۱۳ نمونه‌ای از کمانش ورق سوراخ کاری شده با نسبت قطر سوراخ‌ها به عرض ورق برابر با ۰/۲۴ تحت ترکیبی از بارهای برشی و خمشی و محوری، نشان داده شده است. بارهای وارده شامل ۸۰ درصد ظرفیت خمشی و ۵۰ درصد ظرفیت برشی ورق می‌باشد.

## ۵- مقایسه نتایج در ترکیب بارهای مختلف

با توجه به نتایج بدست آمده در قسمت قبل، در این بخش به مقایسه نتایج پرداخته می‌شود. جهت مقایسه کمی افت ظرفیت باربری کمانشی ورق‌های سوراخ کاری شده، مساحت زیر منحنی‌های اندرکنشی به‌عنوان معیاری از ظرفیت باربری استفاده می‌شود. مساحت کل یک نمودار اندرکنشی برابر واحد بوده که نشان از باربری تمام ظرفیت مطابق با بارگذاری مجزای بارهای محوری، برشی و خمشی دارد. مساحت کمتر از واحد نشان از افت ظرفیت باربری تحت هر بارگذاری ناشی از اعمال اولیه و همزمان دو بارگذاری دیگر دارد. بنابراین مساحت زیر هر منحنی به‌نوعی نمایش‌دهنده نسبت ظرفیت بار کمانشی می‌باشد. مساحت زیر نمودارهای اندرکنشی در حالت‌های مختلف ترکیب بارگذاری به ترتیب برای بار بحرانی کمانشی برشی، خمشی و محوری در شکل‌های ۱۴-الف، ب و ج نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، اعمال بارگذاری اولیه اساساً از ظرفیت باربری کمانشی می‌کاهد. با افزایش بارگذاری اولیه نسبت ظرفیت باربری کمانشی کاهش یافته به‌نحوی که در برخی موارد سبب از دست رفتن کامل ظرفیت باربری می‌شود (شکل ۱۴-ج). همچنین تحت نسبت‌های بارگذاری اولیه مساوی، افزایش قطر سوراخ سبب افت ظرفیت باربری کمانشی می‌شود.

## ۶- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از مطالعات عددی صورت گرفته روی ورق‌های طویل فولادی سوراخ کاری شده و نشده می‌توان به گزارش زیر به‌عنوان جمع‌بندی و نتیجه‌گیری این پژوهش اشاره نمود:

- ۱- اثرپذیری ورق‌ها با لبه‌ی طولی گیردار نسبت به ترکیبی از بارگذاری‌ها بیشتر از ورق با لبه‌ی طولی ساده می‌باشد.
- ۲- ورق با لبه‌ی طولی گیردار افزایش مقاومت چشم‌گیری در میزان

- D. V., Dos Santos, E. D., Isoldi, L. A., & Rocha, L. A. O. (2016). Numerical evaluation of the effect of type and shape of perforations on the buckling of thin steel plates by means of the constructal design method. *International Journal of Heat and Technology*, 34(1), 9-20.
- [10] Scheperboer, I. C., Efthymiou, E., & Maljaars, J. (2016). Local buckling of aluminium and steel plates with multiple holes. *Thin-Walled Structures*, 99, 132-141.
- [11] Komur, M. A., & Sonmez, M. (2015). Elastic buckling behavior of rectangular plates with holes subjected to partial edge loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 112, 54-60.
- [12] Schueler, D., Toso-Pentecôte, N., & Voggenreiter, H. (2016). Effects of static preloads on the high velocity impact response of composite plates. *Composite Structures*, 153, 549-556.
- Technology, vol. 32, pp. 66-83, 2014/01/01/ 2014.
- [5] K. Asemi, M. Shariyat, M. Salehi, and H. Ashrafi, "A full compatible three-dimensional elasticity element for buckling analysis of FGM rectangular plates subjected to various combinations of biaxial normal and shear loads," *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 74, pp. 9-21, 2013/10/15/ 2013.
- [6] D. Ritchie and J. Rhodes, "Buckling and post-buckling behaviour of plates with holes," *The Aeronautical Quarterly*, vol. 26, pp. 281-296, 1975.
- [7] A. L. Schlack, "Experimental critical loads for perforated square plates," *experimental mechanics*, vol. 8, pp. 69-74, 1968.
- [8] M. P. Nemeth, "Buckling of long compression-loaded anisotropic plates restrained against inplane lateral and shear deformations," *Thin-walled structures*, vol. 42, pp. 639-685, 2004.
- [9] Lorenzini, G., Helbig, D., Da Silva, C. C. C., Real, M.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Yazdi, M. Alembagheri, *Interaction of axial, shear and bending loads in buckling behavior of pierced and non-pierced long steel plates*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(6) (2020) 1297-1312.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14483.5668](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14483.5668)

