

## بررسی تجربی رفتار کمانش و پس کمانش ورق‌های ترکدار تحت بار محوری فشاری

محمود شریعتی<sup>۱</sup>، امیر مسعود مجید ثابتی<sup>۲</sup>، حامد قارونی<sup>۳</sup>

ایران، شهرود، بلوار دانشگاه، واحد مکانیک دانشگاه صنعتی شهرود

### چکیده

ستیش کومار (Satish komar) [۲] و همکارانش به ارائه مقاله‌ای در زمینه کمانش ورق‌های ترکدار، تحت بار فشاری پرداختند. آنها با استفاده از توابع مثلثاتی مرتبه‌ای بار بحرانی مربوط به کمانش ورق‌های ترکدار را بدست آوردند و نتایج خود را با نتایج حاصل از روش المان محدود مقایسه نمودند که طبق قابل قبولی بین نتایج آنها و نتایج روش المان محدود وجود داشت. در سال ۲۰۰۵ بریقتی (Brighenti) [۴-۳] با ارائه دو مقاله در زمینه کمانش ورق‌های ترکدار تحت کشش و فشار، تأثیر طول ترک، زاویه‌ی ترک، نسبت پواسون و شرایط مرزی را بر بار بحرانی کمانش مورد بررسی قرار داد. یکی از این دو مقاله بر پایه حل با استفاده از روش عددی و مقاله‌ی دیگر مقایسه‌ی بین نتایج عددی و تحلیلی می‌باشد. در سال ۲۰۰۷ علی‌نیا [۶-۵] و همکارانش کمانش ورق‌های ترکدار تحت بار برشی را مورد بررسی قرار دادند. آنها از روش عددی المان محدود و از نرم‌افزار Ansys برای محاسبه نتایج خود استفاده کردند. آنها در دو مقاله‌ی متفاوت ابتدا تأثیر نوع مشبندی و سپس بار بحرانی کمانش را در شرایط مختلف تحت بررسی قرار دادند. در سال ۲۰۰۹ بریقتی (Brighenti) [۷] میزان حساسیت ورق‌های نازک ترکدار را تحت بار غشایی کششی و فشاری در برابر پدیده‌ی کمانش بررسی نمود. همچنین تأثیر عوامل مختلف را بر بار بحرانی کمانش مورد بررسی قرار داد. در سال ۲۰۰۹ شریعتی [۸] کمانش و پس‌کمانش ورق‌های ترکدار تحت بار محوری را در حالت الاستوپلاستیک به صورت عددی مورد بررسی قرار داد و تأثیر عواملی چون طول و زوایای مختلف ترک، شرایط مرزی متفاوت، نقص اولیه و جنس مختلف ورق را در این پدیده تبیین نمود.

با توجه به تحقیقات اشاره شده، مشاهده‌ی کنیم که تحقیقی جامع برروی کمانش ورق‌های ترکدار تحت فشار محوری، با طول و زوایا و موقعيت‌های مختلف ترک و عرض بار متفاوت به صورت تجربی انجام نشده است؛ لذا در این مقاله کمانش ورق‌های ترکدار تحت بار محوری فشاری با در نظر گرفتن تأثیر زاویه و طول ترک، ضخامت ورق، نقص اولیه ورق و عرض بار اعمالی بر روی بار بحرانی کمانش مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس هدف اصلی از ارائه این مقاله بررسی کمانش ورق‌های ترکدار تحت بار محوری فشاری با استفاده از روش‌های تجربی می‌باشد.

### خواص مکانیکی ورق‌ها

کلیه آزمایش‌های تجربی توسط دستگاه INSTRON انجام شده است. برای بدست آوردن خواص مکانیکی نمونه‌ها نیز تست کشش بر روی نمونه استاندارد ASTM E8 توسط دستگاه ذکور صورت گرفته است. مدول یانگ، نسبت پواسون و تنش تسلیم برای فولاد ضدزنگ مورد استفاده در نمونه‌ها به صورت زیر دست آمد:

$$\left\{ \begin{array}{l} E = 201 \text{ GPa} \\ v = 0.33 \\ \sigma_y = 340 \text{ MPa} \end{array} \right. \quad (1)$$

همچنین برای هر یک از ورق‌ها با ضخامت متفاوت، آزمایش کشش

از جمله پدیده‌هایی که سبب بروز خرابی در ورق‌ها می‌شود، کمانش می‌باشد. هنگامی که این سازه بر اثر گذر زمان دچار نقص‌هایی همچون خوردگی و ترک می‌گردد نسبت به وقوع این پدیده بسیار حساس می‌گردد و بر بحرانی آن به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. ترک را می‌توان یکی از عوامل اصلی فروپاشی در سازه‌های مختلف بشمار آورد. از طرفی تخمین استحکام باقیمانده در سازه‌ها یکی از فاکتورهای مهم در طراحی طول عمر آنها می‌باشد و بر این اساس محاسبه استحکام باقیمانده در سازه‌های ترکدار نیز امری الزامی و ضروری است. ترک را می‌توان از زوایای دید متغیری مورد بررسی قرار داد که از آن جمله می‌توان به طراحی بر اساس مکانیک شکست و یا طراحی بر اساس خستگی اشاره کرد. اما در دهه‌ای اخیر نگاه دیگری نسبت به وجود ترک در سازه بوجود آمده است و آن بررسی استحکام باقیمانده در سازه‌های ترکدار بر اساس وقوع پدیده‌ی کمانش می‌باشد. از این رو در این مقاله پدیده کمانش و پس‌کمانش ورق‌های مستطیلی ترکدار با ترکهای مرکزی و لبه‌ای از جنس فولاد ضد زنگ تحت بار محوری فشاری به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته و بر بحرانی کمانش مربوط به هر نمونه تعیین شده است. همچنین تأثیر عوامل هندسی و مکانیکی مانند طول ترک، زاویه‌ی ترک، موقعیت ترک، نقص اولیه ورق، ضخامت ورق و عرض بار اعمالی بر روی رفتار پس‌کمانشی نمونه‌ها بررسی شده و نهایتاً میزان اثرگذاری هر کدام از این عوامل به خصوص نقص اولیه بر روی بار بحرانی کمانش تعیین شده است. در نهایت نتیجه‌گیری‌های مفید و مهمی از بررسی‌های انجام گرفته ارائه شده است که بیان می‌کنند هر یک از پارامترهای اشاره شده در بالا تأثیرات قابل توجهی بر بار بحرانی کمانش می‌گذارد.

**واژه‌های کلیدی:** ورق ترکدار- روش تجربی- کمانش- پس‌کمانش

### مقدمه

سازه‌های فرسوده از جمله سازه‌هایی می‌باشند که به سرعت دچار خرابی می‌شوند؛ چرا که این سازه‌ها مستعدند تا در معرض عیوبی همچون خردگی، ترک و یا فرورفتگی قرار بگیرند. در میان سازه‌های مختلف، ورق‌ها از اهمیت بالایی برخوردار هستند و فراوانی کاربرد آنها در صنایع مختلف ساختمانی و مکانیکی بر کسی پوشیده نیست. کاربرد در ساختمان هواپیماها، فضایپیماها، زیردریایی‌ها، مخازن تحت فشار و سیلوهای بلند از جمله مثالهایی هستند که گویای استفاده‌ی فراوان از ورق‌ها و پوسته‌ها در صنایع مختلف می‌باشد.

در سال ۲۰۰۳ دیشل (Dyshel) [۱] و همکارش به بررسی ورق‌های دولایه‌ای (آهن و آلیاژ آلミニوم) ترکدار، تحت بار کششی پرداختند. آنها تنش‌های بحرانی متناظر با شروع کمانش را بدست آوردند و نیز تأثیر کمانش را بر روی شاخص‌های شکست مورد مطالعه قراردادند. روش بررسی آنها مبتنی بر دو روش تجربی و تحلیلی بوده است. در سال ۲۰۰۴

۱- استاد و عضو هیات علمی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شهرود، mshariati@shahroodut.ac.ir

۲- کارشناس ارشد مکانیک فارغ‌التحصیل از دانشگاه صنعتی شهرود

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک دانشگاه صنعتی شهرود، گرایش طراحی کاربردی

### تغییر در طول ترک

همانطور که در شکل (۷-الف) مشاهده می‌شود با افزایش طول ترک بار بحرانی کمانشی کاهش می‌باید، البته تفاوت چندانی میان بار بحرانی ورق با طول ترک نسبی  $0/2$  و  $0/3$  وجود ندارد. این مسئله به دلیل تفاوت در مقادیر نقص اولیه‌ی آنها به وجود آمده است. با توجه به جدول (۲) مشاهده می‌شود که نقص اولیه‌ی مربوط به ورق با طول ترک نسبی  $0/2$  تقریباً دو برابر نقص اولیه‌ی ورق با ترک  $0/3$  است و در نتیجه بار بحرانی کمانش در ورق با طول ترک نسبی  $0/2$  کاهش بیشتری داشته و سبب شده بارهای بحرانی به هم نزدیک شوند.

شکل (۷-ب) افزایش طول ترک را براي ورقهای با زاویه‌ی ترک  $90^\circ$  درجه نشان داده است. در حقیقت نباید تفاوت چندانی میان بارهای بحرانی آنها وجود داشته باشد ولی در اینجا نیز به دلیل مقدار نقص اولیه‌ی زیاد در نمونه‌ی با طول نسبی  $0/5$ ، بار بحرانی کمانش آن کاهش قابل توجهی نسبت به دو نمونه‌ی دیگر داشته است.

### تغییر در زاویه‌ی ترک

در شکل (۸) مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه‌ی ترک بار بحرانی کمانش نیز افزایش می‌باید و دلیل وجود برخی ناهمانگی‌ها در ایجاد این روند، نقصهای اولیه‌ی متفاوت برای آنها می‌باشد.

### تغییر در مکان ترک

همانطور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود ورق با ترک مرکزی دارای کمترین بار بحرانی کمانش می‌باشد ولی روند موجود در کاهش بار بحرانی کمانش کمی با روند به دست آمده از تحلیل‌های عددی متفاوت است؛ چرا که در اینجا بار بحرانی کمانش برای ورق با ترک لبه‌ای دو طرفه بیشتر از بار بحرانی کمانش برای ورق با ترک لبه‌ای یک طرفه می‌باشد که دلیل آن بیشتر بودن مقدار نقص اولیه ورق با ترک لبه‌ای یک طرفه از ورق با ترک لبه‌ای دو طرفه می‌باشد. البته مشاهده می‌شود که در اینجا مانند نتایج بدست آمده از تحلیل‌های عددی کمترین بار بحرانی کمانش متعلق به ورق با ترک مرکزی می‌باشد.

### تغییر در ضخامت ورق

با توجه به شکل (۱۰) با افزایش ضخامت بار بحرانی کمانش به شدت افزایش می‌باید؛ به طوریکه بار بحرانی کمانش برای ورق با ضخامت  $2\text{mm}$  برابر  $6/9\text{kN}$  و برای ورق با ضخامت  $4\text{mm}$  دارای مقدار  $5/3\text{kN}$  می‌باشد.

### تغییر در عرض بار

شکل (۱۱) نمودار بار-جایگاهی مربوط به ورق با طول ترک نسبی  $0/2$  و زاویه‌ی ترک صفر درجه را که در معرض بار با نسبت‌های عرضی متفاوت قرار گرفته را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با کاهش عرض بار از میزان بار بحرانی کمانش کاسته می‌شود.

### نتیجه‌گیری

به طور کلی ایجاد ترک در ورق‌ها به هر شکل و زاویه موجب کاهش بار بحرانی کمانش می‌گردد ولی تأثیر چندانی بر رفتار پس کمانش نمی‌گذارد. افزایش زاویه‌ی ترک از صفر درجه به  $90^\circ$  درجه سبب افزایش بار بحرانی کمانش می‌گردد. در زوایای نزدیک به  $90^\circ$  درجه تأثیر ترک بشدت کاهش می‌باید؛ بطوریکه با افزایش طول ترک تغییر چندانی در بار بحرانی کمانش

به صورت جداگانه انجام گرفته است که نتایج بدست آمده در شکل‌های (۱ تا ۳) آورده شده است. این نتایج برای پیش‌بینی رفتار ماده در ناحیه‌ی پلاستیک به منظور انجام تحلیل‌های عددی مفید می‌باشند. طریقه‌ی نصب نمونه‌ی استاندارد کشش بر روی دستگاه در شکل (۴) آورده شده است.

### هندسه‌ی نمونه‌ها

هندسه‌ی نمونه‌های مورد آزمایش در شکل (۵) نشان داده شده‌اند که در آن  $2L$  طول ورق،  $2W$  عرض ورق،  $2a$  طول ترک،  $t$  ضخامت ورق،  $\theta$  زاویه‌ی ترک و  $2p$  عرض بار اعمالی می‌باشد. نمونه‌ها از ورقهای مستطیلی با طول  $200$  میلی‌متر و عرض  $100$  میلی‌متر و ضخامت‌های مختلف تشکیل شده‌اند. ترکهای مورد بررسی دارای نسبت طولی ( $\lambda=a/W$ ) با نسبت‌های  $0/1$ ،  $0/2$ ،  $0/3$ ،  $0/4$  و  $0/5$  می‌باشند. نسبت ضخامت ورق‌ها ( $t/W$ ) نیز متغیر بوده و دارای مقادیر  $0/04$ ،  $0/06$  و  $0/08$  می‌باشد؛ در حقیقت ورق‌ها دارای ضخامت‌های  $2$ ،  $4$  و  $6$  میلی‌متر می‌باشند. ترکهای مورد نظر در سه موقعیت ترک مرکزی (شکل ۵-الف)، ترک لبه‌ای یک‌طرفه (شکل ۵-ب) و ترک لبه‌ای دو‌طرفه (شکل ۵-ج) ایجاد شده‌اند. قابل ذکر است که برای تمامی ترکهای لبه‌ای زاویه‌ی ترک صفر درجه می‌باشد. برای بررسی تاثیر عرض بار، اعمال بار در عرض بارهای متفاوتی صورت گرفته است که نسبت‌های آن ( $W=2P/2W$ ) برابر  $0/75$ ،  $0/50$ ،  $0/25$  و  $0/1$  می‌باشد. شرایط مزدی برای لبه‌های  $1$  و  $2$  گیردار و برای لبه‌های  $3$  و  $4$  آزاد می‌باشد. چگونگی نصب ورق بر روی دستگاه و نحوه انجام آزمایشات تجربی در شکل (۶) نشان داده شده است. نقص اولیه‌ی مربوط به نمونه‌ها بعنوان پارامتر مؤثر بر بار بحرانی کمانش نیز بصورت درصدی از ضخامت ورق اندازه‌گیری شده‌است. در جدول (۱) کلیه‌ی نمونه‌های مورد آزمایش به همراه نقص اولیه‌ی آن‌ها به صورت اختصاری نامگذاری شده‌اند. این نمونه‌ها با نسبت عرض بار  $0/5$  مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در جدول (۱) علامت CC نشان‌دهنده‌ی ترک‌های مرکزی و علامت‌های UEC و BEC به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ترک لبه‌ای یک‌طرفه و دو‌طرفه می‌باشند.

جدول ۱- نامگذاری نمونه‌های مورد بررسی در آزمایشات تجربی

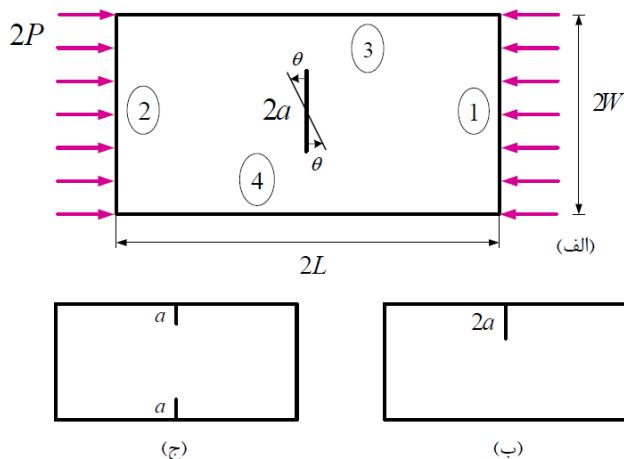
نام اختصاری نمونه	طول ترک (میلی‌متر)	ضخامت ورق (میلی‌متر)	زاویه‌ی ترک (درجه)	نقص اولیه
CC-200-100-0-4-0	.	۴	.	$0/295$
CC-200-100-0-2-4-0	۲۰	۴	.	$0/4554$
CC-200-100-0-3-4-0	۳۰	۴	.	$0/29$
CC-200-100-0-3-4-30	۳۰	۴	۳۰	$0/2692$
CC-200-100-0-3-4-45	۳۰	۴	۴۵	$0/2857$
CC-200-100-0-3-4-60	۳۰	۴	۶۰	$0/235$
CC-200-100-0-3-4-90	۳۰	۴	۹۰	$0/29$
CC-200-100-0-5-4-90	۵۰	۴	۹۰	$0/5$
CC-200-100-0-7-4-90	۷۰	۴	۹۰	$0/2215$
CC-200-100-0-3-3-0	۳۰	۳	.	$0/125$
CC-200-100-0-3-2-0	۳۰	۲	.	$0/34$
UEC-200-100-0-2-4-0	۲۰	۴	.	$0/4$
BEC-200-100-0-2-4-0	۲۰	۴	.	$0/2654$

تأثیر عوامل مختلف بر بار بحرانی کمانش در ادامه با استخراج نمودارهای بار-جایگاهی حاصل از نتایج تجربی، تأثیر عوامل مختلف همچون طول ترک، زاویه‌ی ترک، مکان ترک، ضخامت ورق و نیز عرض بار اعمالی بر بار بحرانی کمانش بررسی شده است.

شکل ۳- نمودار تنش-کرنش برای ورق با ضخامت ۴mm



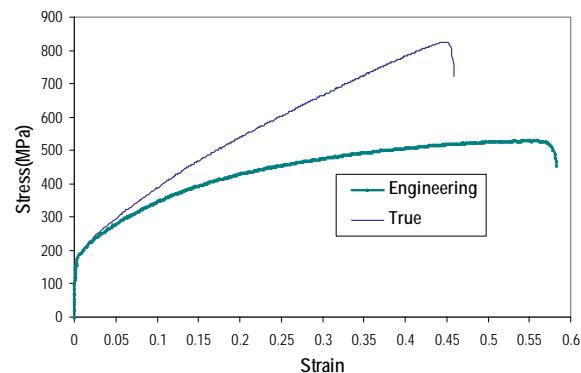
شکل ۴- طریقه‌ی نصب نمونه‌ی استاندارد کشش بر روی دستگاه



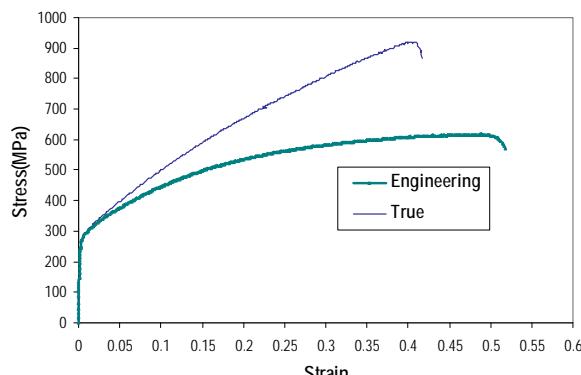
شکل ۵- هندسه‌ی نمونه‌های مورد بررسی



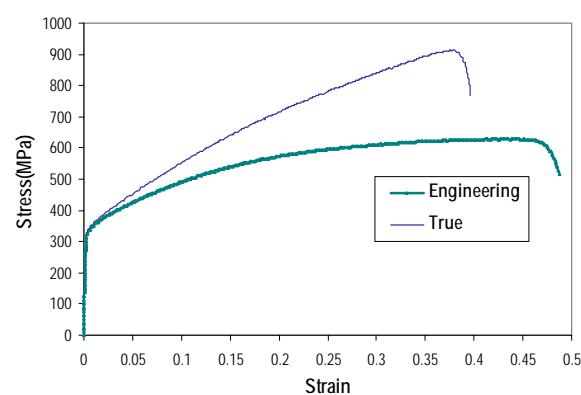
به وجود نمی‌آید. تغییر مکان ترک از مرکز ورق به لبه‌ها موجب افزایش بار بحرانی کمانش می‌گردد و برای ورق‌های با ترک لبه‌ای یک طرفه این افزایش بار نسبت به ورق‌های با ترک لبه‌ای دو طرفه بیشتر خواهد بود. قابل ذکر است که این تغییرات چندان قابل توجه نمی‌باشد. همچنین تغییر در ضخامت ورق‌ها بشدت بر روی بار بحرانی کمانش تأثیر می‌گذارد. در این مقاله تأثیر عرض بار اعمالی نیز بر بار بحرانی کمانش مورد بررسی قرار گرفت و کاهش عرض بار از نسبت ۱ به ۰/۲۵ سبب کاهش شدید در بار بحرانی کمانش می‌گردد. وجود نقص اولیه در ورق ترکدار تحت بار محوری فشاری سبب کاهش بار بحرانی کمانش می‌شود. این عامل به دلیل عدم برابری نقص اولیه نمونه‌ها، تأثیر بیشتری در بار بحرانی کمانش مربوط به نمونه‌های تجربی نسبت به عوامل دیگر دارد.



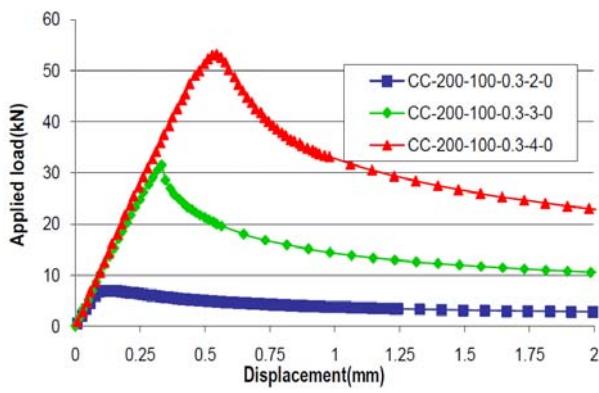
شکل ۱- نمودار تنش-کرنش برای ورق با ضخامت ۴mm



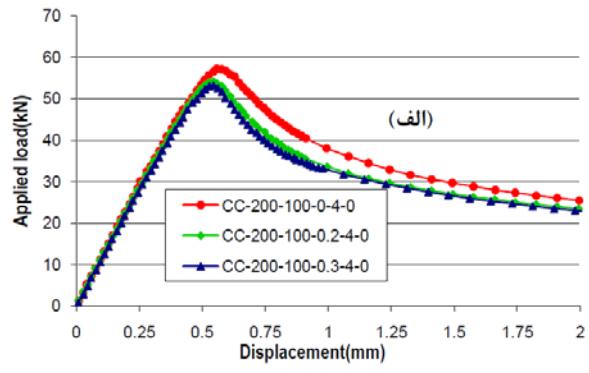
شکل ۲- نمودار تنش-کرنش برای ورق با ضخامت ۳mm



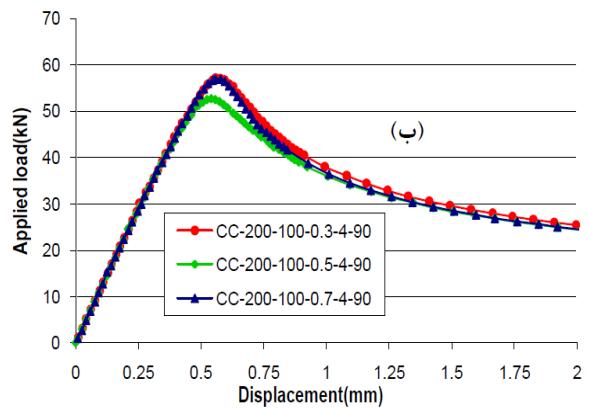
شکل ۶- نحوه انجام آزمایشات تجربی



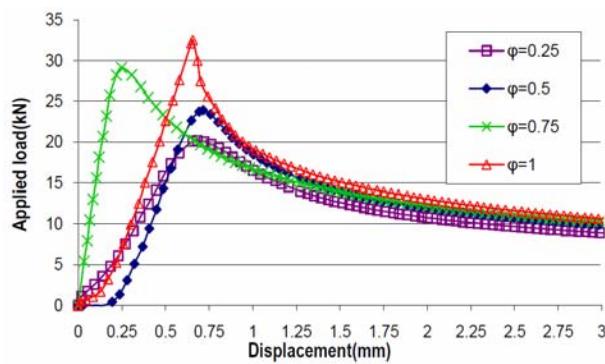
شکل ۱۰- تأثیر ضخامت ورق بر بار بحرانی کمانش



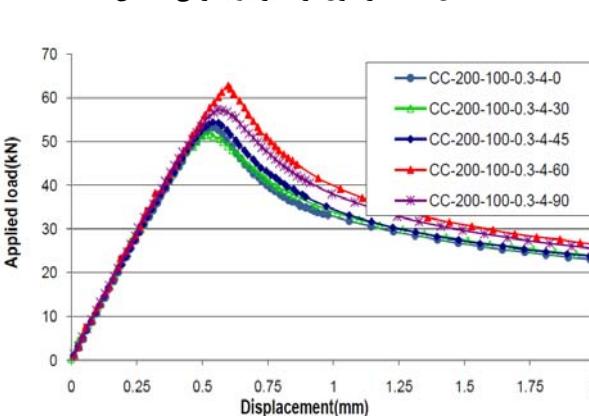
(الف)



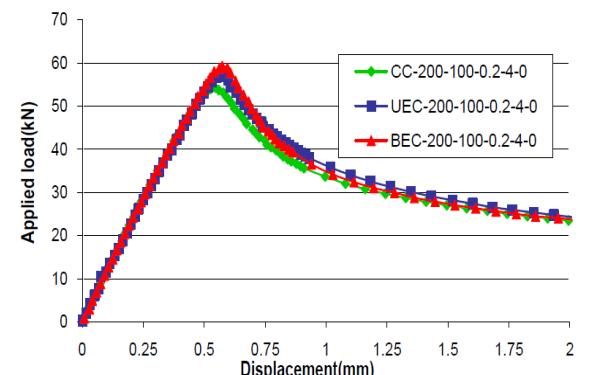
(ب)



شکل ۱۱- تأثیر عرض نوار بار اعمالی بر بار بحرانی کمانش



شکل ۸- تأثیر زاویه ترک بر بار بحرانی کمانش



شکل ۹- تأثیر موقعیت ترک بر بار بحرانی کمانش

## مراجع

1. Guz A.N. and Dyshel M.S.h., Fracture and buckling of thin panels with edge crack in tension. *Theor. Appl. Fract. Mech.*, v. 36, 2001 , 57–60.
2. Satish Kumar Y.V. and Paik J.K., Buckling analysis of cracked plates using hierarchical trigonometric functions. *Thin-Walled Struct.*, v. 42, 2004 ,687–700.
3. Brighenti R., Numerical buckling analysis of compressed or tensioned cracked thin plates. *Eng. Struct.*, v. 27, 2005, pp. 265–76.
4. Brighenti R., Buckling of cracked thin-plates under tension or compression. *Thin-Walled Struct.*, v. 43,2005, pp. 209–24.
5. Alinia M.M., Hoseinzadeh S.A.A. and Habashi H.R., Influence of cracks on buckling and post- buckling behavior of shear panels. *Thin-Walled Struct.*, v. 42,2007,pp. 422-431.
6. Alinia M.M., Hoseinzadeh S.A.A. and Habashi H.R., Numerical modeling for buckling analysis of cracked shear panels. *Thin-Walled Struct.*, v. 45, 2007, pp. 1058–1067.
7. Brighenti R., Buckling sensitivity analysis of cracked thin plates under membrane tension or compression loading. *Nuclear Eng. and Design*, 239, 2009 ,965–980.
8. Shariati M. and Majd A.M., Numerical Buckling and post-buckling of cracked plates under axial compression load. *Journal of Aerospace Eng.*, v. 22, 2009, pp. 84–90.