

کمانش پانل‌های ترک‌دار تحت بارگذاری محوری فشاری و کششی

رحمن سیفی^{۱*} و محمد فرخی^۲

۱. دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۶/۰۵ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۳/۱۱/۱۲)

چکیده - فروپاشی در اثر کمانش یکی از فرایندهای مهم در سازه‌های جدار نازک تحت فشار است. این سازه‌ها در شرایط خاصی می‌توانند تحت بار کششی به صورت موضعی کمانش کنند. در این مقاله، کمانش پانل‌های ترک‌دار بررسی شده است. اثر عوامل مختلف مانند طول و امتداد ترک، طول، عرض و ضخامت پانل و شرایط تکیه‌گاهی بر بار کمانشی فشاری و کششی تعیین شده است. ابعاد هندسی پانل، کمترین تأثیر و مشخصات ترک، بیشترین تأثیر را در کاهش استحکام کمانشی پانل ترک‌دار در مقایسه با پانل بدون ترک دارند.

واژگان کلیدی: کمانش، بارهای کششی و فشاری، پانل، ترک.

Buckling of Cracked Panels under Axial Compressive and Tensile Loading

R. Seifi^{1*} and M. Farrokhi²

1. Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan

2. Mechanical Engineering Faculty, Takestan Branch of Islamic Azad University

Abstract: *Buckling under compression is a common phenomenon for thin-walled structures. Under certain conditions, they can also buckle locally under tensile loads. In this paper, the buckling of cracked panels is investigated. Effects of some parameters such as the length and orientation of crack, length, width and thickness of the panel and boundary conditions on the compressive and tensile buckling loads are determined. The results show that the dimensions of panels have the least and characteristics of crack have the most effect on the buckling.*

Keywords: *Buckling, tensile and compressive loads, panel, crack.*

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: rseifi@basu.ac.ir

| | | | |
|----------|--------------------------|----------|-------------------------------|
| E | مدول الاستیک | R | شعاع پانل |
| L | طول پانل | t | ضخامت پانل |
| N | بار فشاری یکنواخت | β | زاویه مرکزی پانل |
| N_b | بار کمانشی پانل ترک‌دار | θ | زاویه امتداد ترک با جهت محیطی |
| N_{cr} | بار کمانشی پانل بدون ترک | ν | ضریب پواسون |

۱- مقدمه

امروزه، استفاده از سازه‌های جدارنازک در شاخه‌های مختلف مهندسی مانند مکانیک، عمران و کشتی سازی بسیار متداول است. وجود ترک در سازه‌ها می‌تواند رفتار مکانیکی آنها را از جنبه‌های گوناگون تحت تأثیر قرار داده و موجب کاهش قابل ملاحظه‌ای در ظرفیت باربری و مقاومت نهایی آنها گردد. از آنجایی که در فرآیندهای طراحی نیاز به ارزیابی میزان امنیت است، بسیاری از محققان در دهه اخیر به توصیف کمی کمانش تحت فشار یا کشش در سازه‌های مختلف پرداخته‌اند. در این راستا روش‌های بررسی تجربی، عددی و تحلیلی توسط محققان استفاده می‌گردد. زیلسدرف و کارلسون [۱]، بار کمانشی ورق ترک‌دار تحت بار کششی و ایجاد کمانش موضعی را با استفاده از آزمایش‌های تجربی بررسی کرده و اثر انحناء نوک ترک و طول آن را مطالعه کرده‌اند. سیه و لی [۲]، شکل‌های مختلف مود کمانش ورق با ترک مرکزی و اثر طول ترک بر بار کمانش را بررسی کرده‌اند. استکانچی و وفایی [۳] به بررسی رفتار کلی ورق‌ها و پوسته‌های ترک‌دار و اثر عوامل مختلف مانند درجه انحناء بندی در اطراف نوک ترک، شرایط مرزی، ضریب پواسون، طول ترک و انحناء پوسته پرداخته‌اند. دیشل و گاوز [۴] به بررسی کاهش پایداری و استحکام باقی‌مانده پانل‌های ترک‌دار در حالت بارگذاری کششی پرداخته‌اند. آنها نتایج تجربی افت موضعی پایداری و شکست صفحات ترک‌دار را با در نظر گرفتن اثر پارامترهای مختلف نظیر تغییر شکل پلاستیک، عرض پانل، خم ترک انحناء‌دار، جهت‌گیری ترک و انحناء سطح ورق به‌دست آورده‌اند. بریگنتی [۵ و ۶] به بررسی

ضرایب بار بحرانی کمانش در کشش و فشار در ورق‌های ترک‌دار پرداخته است. در محاسبه ضریب بار بحرانی کمانش، اثر طول و امتداد ترک و همچنین ضرایب پواسون بررسی شده است. علی‌نیا و همکاران [۷] به مطالعه روشی برای مدل‌سازی و آنالیز صفحات برشی با ترک‌های مرکزی و لبه‌ای پرداخته‌اند. خدمتی و همکاران [۸]، به بررسی کمانش ورق‌های ترک‌دار تحت بار فشاری با تکیه‌گاه‌های ساده پرداخته و اثر مکان ترک، جهت و طول آن و ضریب شکل ورق را بررسی کرده‌اند. سیفی و خدایاری [۹] با روش‌های تجربی و عددی بار کمانش ورق‌های ترک‌دار تحت بار فشاری یکنواخت و مقطعی را مطالعه نموده و اثر عواملی مانند طول و امتداد ترک و شرایط تکیه‌گاهی را مشخص نموده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه شد، بیشتر تحقیقات ذکر شده بر روی ورق‌های تخت انجام شده است.

در این تحقیق به بررسی کمانش ورق‌های انحناء‌دار (پانل) با وجود ترک پرداخته شده و اثر عوامل مختلف بر مقدار بار کمانش به ازای اعمال بارهای محوری کششی و فشاری تعیین شده است.

۲- کمانش پانل‌های استوانه‌ای ترک‌دار تحت بار فشاری

زمانی که پانل ترک‌دار تحت بار فشاری قرار می‌گیرد، در بار معینی (بار بحرانی) ناپایدار شده و در آن کمانش رخ می‌دهد. پانل استوانه‌ای شکل همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، دارای ضلع‌های طولی و محیطی است. در جهت ضلع‌های طولی بار فشاری یکنواخت N با واحد نیرو بر واحد طول قرار دارد. در شکل (۱)، β زاویه مرکزی، L طول، t ضخامت پانل

دیفرانسیل جزئی مرتبه چهار بیان نمود [۱۰]. بر این اساس حداقل مقدار بار محوری فشاری، در پانل بدون ترک برای شروع کماتش متقارن به صورت زیر محاسبه می شود:

$$N_{cr} = \frac{Et^2}{R\sqrt{3(1-\nu^2)}} \quad (1)$$

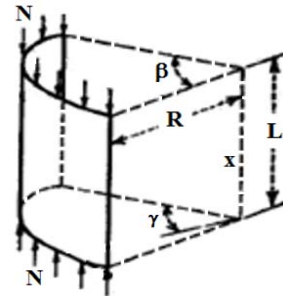
که در آن N_{cr} بار کماتش، ν ضریب پواسون، R شعاع پانل و E مدول الاستیک است. با توجه به رابطه (۱)، طول پانل و زاویه مرکزی آن تأثیری در بار کماتش بدون ترک ندارند.

پانل های ترک دار و بدون ترک به صورت نیم استوانه (پانل ۱) و استوانه کامل باز (پانل ۲) مانند در شکل (۲) در نظر گرفته شده است. لبه های طولی پانل ها آزاد است. در پانل ۱ زاویه مرکزی $\beta = \pi$ و در پانل ۲ برابر $\beta = 2\pi$ است. طول ترک به اندازه $2a$ و زاویه آن نسبت به جهت محیطی استوانه برابر θ است. این دو پارامتر و همچنین ضخامت و شعاع متغیر در نظر گرفته شده اند. پانل ها با خواص مکانیکی آلومینیوم فرض شده اند. ($E = 70\text{GPa}$, $\nu = 0.3$)

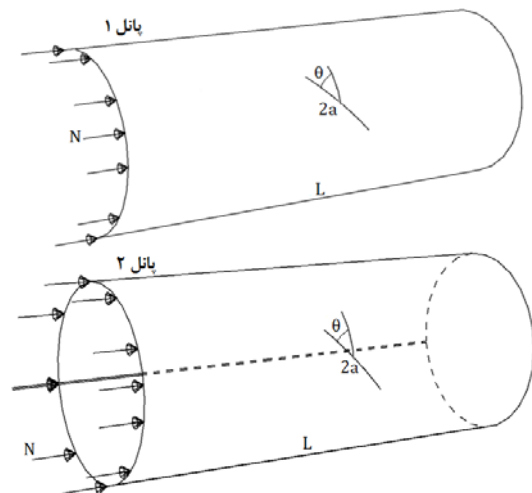
در تحلیل عددی از نرم افزار المان محدود آباکوس [۱۱] استفاده شده است. در هر دو پانل از المان های پوسته هشت گرهی با تعداد نقاط گوسی انتگرال گیری کاهش یافته (S8R) با شش درجه آزادی و پنج نقطه انتگرال گیری در جهت ضخامت استفاده شده است.

بار کماتش در نرم افزار از روش مقدار ویژه براساس اختلال خطی تعیین شده است. اثر تعداد و مرتبه المان های پوسته ای بر تغییرات نتایج بررسی شده است.

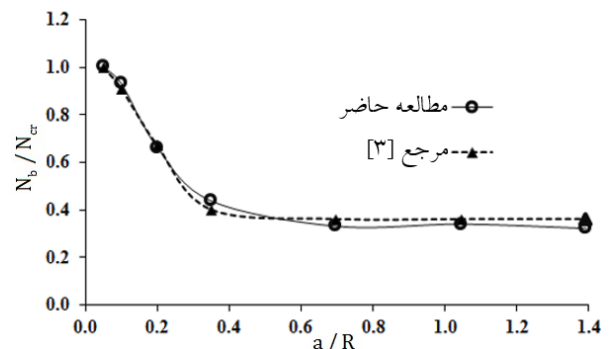
به منظور ارزیابی و صحت سنجی بار کماتش محاسبه شده در پانل های ترک دار، مقایسه ای بین کار حاضر و روش حل ارائه شده در مرجع [۳] بر روی پوسته استوانه ای ترک دار انجام شده است. پوسته استوانه ای به ابعاد $R = 500\text{mm}$, $t = 1\text{mm}$ و از جنس آلومینیوم در نظر گرفته شد. در شکل (۳)، نسبت بار کماتش پوسته ترک دار (N_b) با ترک محیطی ($\theta = 0$) به بار کماتش پوسته بدون ترک با تکیه گاه ساده از رابطه (۱)، برحسب طول ترک نسبی (a/R) تحت بارگذاری فشاری و با تکیه گاه گیردار ارائه شده است.



شکل ۱- پانل استوانه ای تحت بارگذاری فشاری



شکل ۲- پانل نیم استوانه (پانل ۱) و استوانه کامل باز (پانل ۲)



شکل ۳- مقایسه نتایج مطالعه حاضر و مرجع [۳] برای تغییرات بار کماتش پوسته ترک دار برحسب طول ترک نسبی

استوانه ای و به همین ترتیب βR طول کمان پانل است. برای تعیین بار کماتش در پانل با تکیه گاه ساده در تمام لبه ها، همانند ورق می توان از توابع مثلثاتی متناسب با نوع تکیه گاه (در این حالت تابع سینوسی) برای تغییر شکل خارج صفحه ای استفاده نمود. رفتار پانل را می توان با یک معادله

جدول ۱- اثر تعداد المان‌ها بر بار کمانش مود اول در پانل ۲ (بر حسب N/mm)

| تعداد المان‌ها | تکیه‌گاه ساده و بار فشاری | تکیه‌گاه گیردار و بار فشاری | تکیه‌گاه ساده و بار کششی | تکیه‌گاه گیردار و بار کششی |
|----------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|----------------------------|
| ۱۳۸۲ | ۲۳۱/۸۱ | ۲۶۳/۵۸ | ۳۹۲۰/۴ | ۳۹۴۳/۸ |
| ۳۴۶۶ | ۲۳۱/۸۱ | ۲۶۳/۴۶ | ۳۸۶۹/۷ | ۳۸۹۱/۸ |
| ۴۶۹۱ | ۲۳۱/۸۰ | ۲۶۳/۴۶ | ۳۸۶۸/۵ | ۳۸۹۰/۶ |
| ۶۶۹۴ | ۲۳۱/۸۰ | ۲۶۳/۴۱ | ۳۸۶۶/۱ | ۳۸۸۶/۴ |

جدول ۲- مشخصات هندسی پانل‌های ترک‌دار در تحلیل عددی

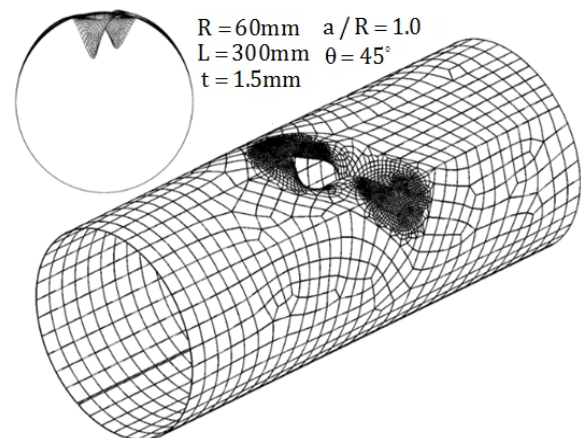
| طول (mm) L | ۳۰۰ | ۳۰۰ | ۲۵۰ | ۲۰۰ |
|--|------|-----|-----|-----|
| شعاع (mm) R | ۶۰ | ۵۰ | ۵۰ | ۴۰ |
| مقادیر a/R برای ترک محیطی و محوری | ۰/۰۵ | ۰/۵ | ۱ | ۱/۵ |
| ضخامت (mm) t | ۱/۵ | ۱ | ۰/۵ | ۰/۵ |
| زاویه ترک θ° فقط برای حالت a/R=1 | ۳۰ | ۴۵ | ۷۵ | ۷۵ |

است. همچنین برای جلوگیری از فررفتگی لبه‌های ترک در داخل سطح از روند تماس سطح با سطح در نرم افزار استفاده گردید. بنابراین دو لبه ترک بر اساس تعریف تماس عمودی، امکان تماس و برخورد در بار فشاری را خواهند داشت. نتایج تحلیل بار کمانش در مود اول در جدول ۱ آورده شده است.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود تغییر تعداد المان از حدود ۱۳۰۰ تا ۶۷۰۰ المان در نتایج کمانش فشاری تأثیر بسزایی نخواهد داشت؛ ولی نتایج کمانش کششی به مقدار اندکی (حدود ۱/۵ درصد) تغییر می‌کند. لذا به نظر می‌رسد که استفاده از حدود ۵۰۰۰ المان برای تحلیل در حالت‌های مختلف هر دو پانل دقت کافی را خواهد داشت. برای نمونه، کمانش کششی مود اول با ۳۴۶۶ المان در شکل (۴) آورده شده است.

در ادامه به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر مقدار بار بحرانی کمانش در پانل‌های ترک‌دار تحت بار محوری پرداخته شده است. متغیرهای مورد نظر و مقادیر آنها در جدول ۲ آورده شده است.

رابطه (۱) برای حالتی که بار در جهت محور پانل با



شکل ۴- مود اول کمانش کششی در پانل ۲ با ۳۴۶۶ المان

ملاحظه می‌گردد که نتایج به دست آمده از این تحقیق همخوانی مناسبی با نتایج مرجع دارد.

برای اطمینان از کفایت تعداد المان‌ها و عدم وابستگی نتایج به آنها یکی از نمونه‌ها از نوع پانل ۲ با ابعاد $L = 300\text{mm}, R = 60\text{mm}, t = 1.5\text{mm}$ با ترکیب زاویه $\theta = 45^\circ$ و طول $a/R = 1$ مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که براساس توصیه مرجع [۳] از المان‌های مستطیلی هشت گرهی مرتبه دو با فشردگی بیشتر در اطراف نوک ترک استفاده شده

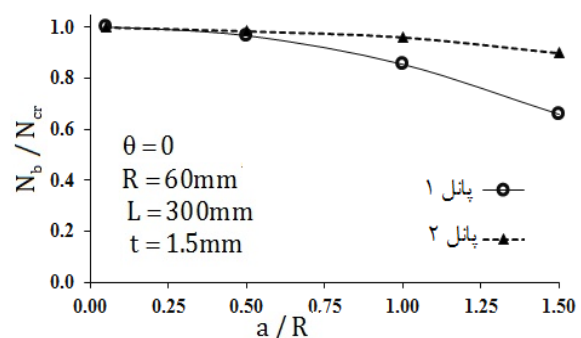
جدول ۳- بار فشاری کمانش بر واحد طول در پانل‌های بدون ترک با تکیه‌گاه گیردار

| طول L(mm) | شعاع R(mm) | ضخامت t(mm) | بار کمانش N_{cr} (N/mm) | پانل ۱ | پانل ۲ |
|-----------|------------|-------------|---------------------------|--------|--------|
| ۲۰۰ | ۴۰ | ۱/۵ | ۴۲۹/۶۱ | ۳۹۰/۷۶ | ۲ |
| ۲۵۰ | ۵۰ | ۱/۵ | ۳۳۳ | ۳۱۱/۶۱ | ۲ |
| ۳۰۰ | ۵۰ | ۰/۵ | ۳۱/۳۷ | ۳۰/۹۴ | ۲ |
| ۳۰۰ | ۵۰ | ۱/۰ | ۱۳۴/۸ | ۱۲۹/۴۹ | ۲ |
| ۳۰۰ | ۵۰ | ۱/۵ | ۳۱۸ | ۲۹۰/۶۱ | ۲ |
| ۳۰۰ | ۶۰ | ۱/۵ | ۲۷۱/۴۵ | ۲۶۱/۸۷ | ۲ |

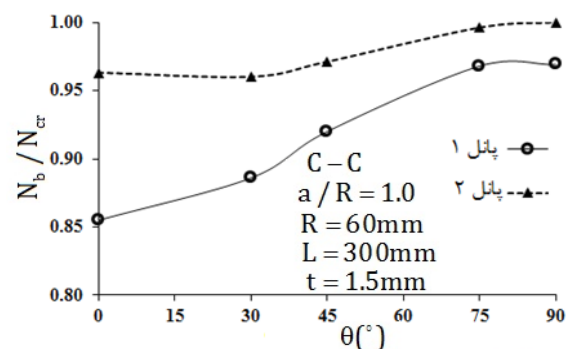
در شکل (۵) تأثیر طول ترک محیطی بر مقادیر بار کمانش فشاری نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد با افزایش طول ترک میزان بار کمانشی کاهش می‌یابد. میزان کاهش تا حدود $a/R < 0.5$ قابل ملاحظه نیست ولی در ترک‌های بزرگتر تغییرات شدیدتر است. همچنین در این شرایط حساسیت پانل ۱ به علت داشتن عرض کمتر، بیشتر خواهد بود.

در شکل (۶) به تأثیر امتداد ترک (θ) بر مقادیر نرمال شده بار کمانش به‌ازای طول ترک نسبی ثابت ($a/R=1$) پرداخته شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه ترک مقدار بار کمانش نیز افزایش می‌یابد. با وجود ترک در پانل، سطح مقطع مؤثر آن برای تحمل بار کاهش یافته و به همین دلیل بار کمانشی کاهش می‌یابد. با افزایش زاویه ترک، سطح مقطع کاهش یافته عمود بر بارگذاری کاهش و سطح مقطع حامل بار افزایش می‌یابد و بر این اساس مقاومت به کمانش نیز بیشتر خواهد شد. با توجه به این که طول ترک در هر دو پانل یکسان است، با افزایش زاویه، سطح مؤثر بدون ترک در پانل ۱ بیشتر افزایش می‌یابد و لذا شیب افزایش استحکام کمانشی آن بزرگتر است.

نمودارهای شکل (۷) اثر شرایط تکیه‌گاهی بر بار کمانش را نشان می‌دهند. ملاحظه می‌شود که همانند حالت پانل بدون ترک، با وجود تکیه‌گاه‌های گیردار (C-C) نسبت به تکیه‌گاه‌های ساده (S-S) استحکام پانل بیشتر است. هرچند که در هر دو نوع تکیه‌گاه، با افزایش طول ترک بار نرمال شده

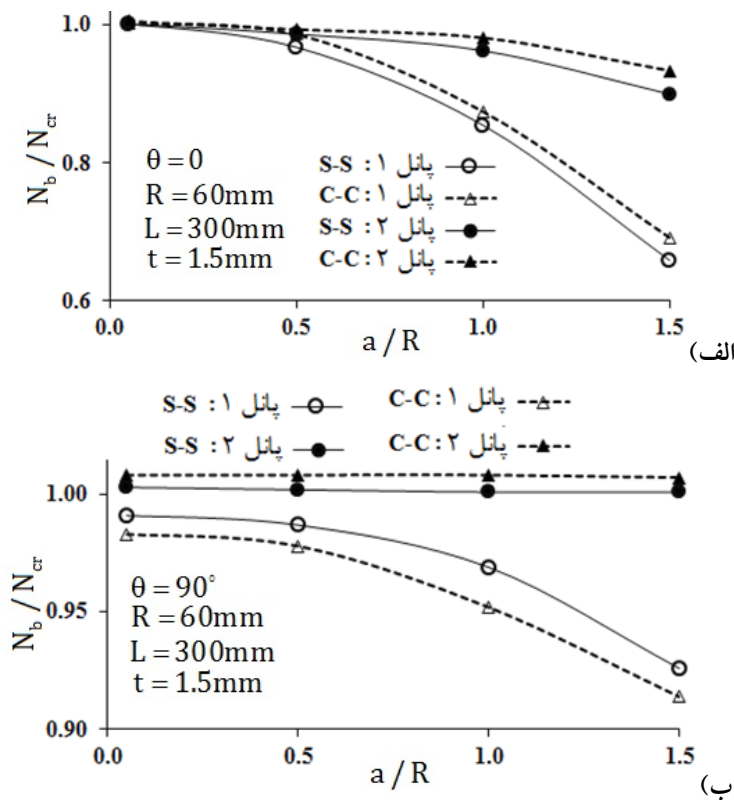


شکل ۵- بار کمانش فشاری برحسب طول ترک محیطی برای پانل‌هایی با تکیه‌گاه‌های گیردار



شکل ۶- بار کمانش برحسب امتداد ترک برای پانل‌هایی با تکیه‌گاه‌های گیردار

تکیه‌گاه‌های ساده وارد شود صادق است. در سایر شرایط مرزی رابطه ساده‌ای مانند این رابطه موجود نیست. به همین علت و برای بررسی اثر وجود ترک، مقادیر بار کمانش در پانل‌های بدون ترک N_{cr} با مشخصات ارائه شده در جدول ۲ با روش عددی تعیین و در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۷- اثر نوع تکیه‌گاه و زاویه ترک بر بار کمانش فشاری پانل‌ها، الف) با ترک محیطی ب) با ترک محوری

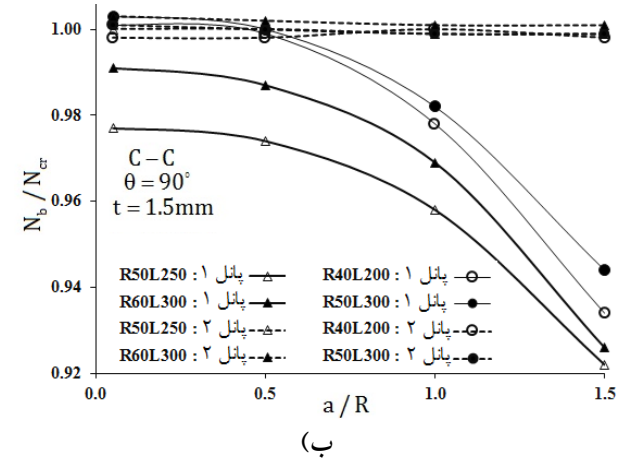
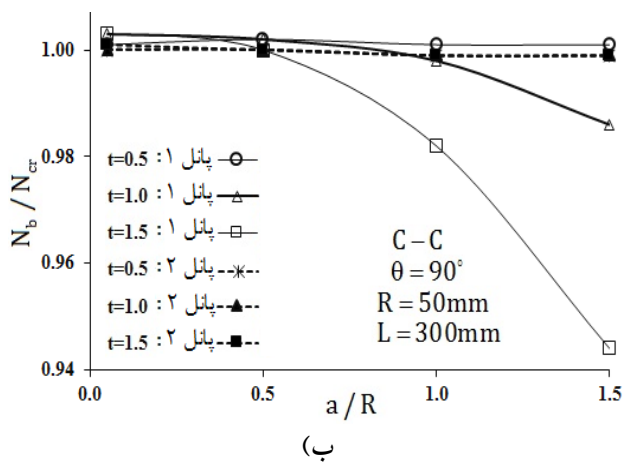
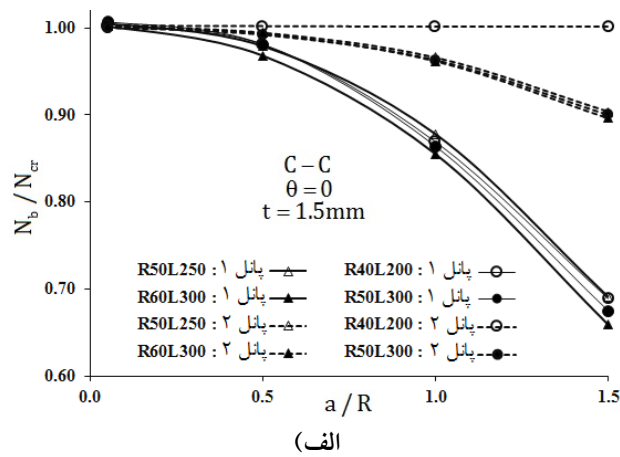
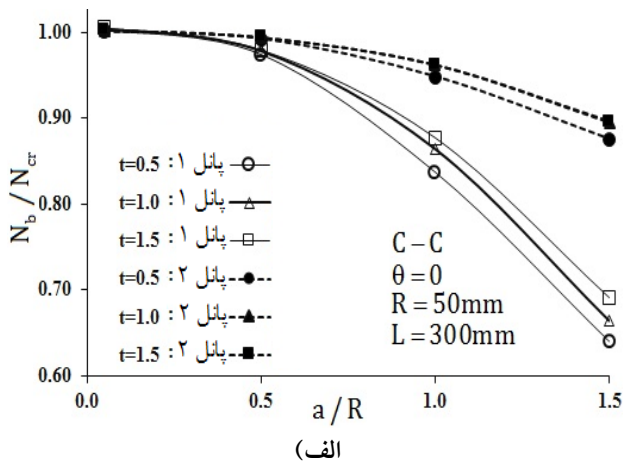
داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود با وجود ترک محیطی، تغییر طول و شعاع پانل ۱ تأثیر زیادی بر بار کمانشی نرمال شده ندارند و تغییر زیادی در آن ایجاد نمی‌کنند. لازم به یادآوری است که بار کمانشی به صورت نیرو بر واحد طول تعریف می‌شود. در پانل ۲ برای ترک محیطی با طول کمتر از نصف شعاع نیز این حالت حاکم است ولی در ترک‌های بزرگتر، با افزایش طول پانل بارکمانشی تا حدود ده درصد کاهش می‌یابد.

با وجود ترک محوری، شرایط تغییر می‌کند. به گونه‌ای که در پانل ۲ تغییر طول و شعاع پانل اثری بر بار کمانشی ندارند. در پانل ۱ نیز تغییرات زیادی وجود ندارد به گونه‌ای که تغییر شعاع از ۴۰ به ۶۰ میلیمتر و تغییر طول از ۲۰۰ به ۳۰۰ میلیمتر باعث تغییر بارکمانشی در حدود دو درصد شده است.

در نمودارهای شکل (۹) به بررسی اثر ضخامت پانل‌ها بر بار کمانشی نرمال شده برحسب طول ترک نسبی محیطی و

کمانش کاهش می‌یابد. اما این کاهش در پانل ۱ در هر دو نوع تکیه‌گاه بیشتر از پانل ۲ است. با وجود ترک محیطی ($\theta = 0^\circ$) با طول کمتر از نصف شعاع، نوع تکیه‌گاه، پهنای پانل و همچنین وجود ترک تأثیر زیادی بر بار کمانش ندارند، ولی با افزایش طول ترک، اثر آنها نیز افزایش می‌یابد. ترک‌های محوری ($\theta = 90^\circ$) به علت آن که موازی با بار اعمالی هستند، باعث کاهش سطح مقطع حامل بار نمی‌شوند؛ لذا منطقی است که فرض کنیم اثر آنها بر مقدار بار کمانش ناچیز است. حتی در مواردی به علت ایجاد تغییر شکل اضافی در محل ترک و لزوم صرف انرژی بیشتر، بار کمانشی از حالت بدون ترک نیز بیشتر می‌شود. این موضوع در شکل (۱۰) برای پانل ۲ وجود دارد و حدود یک درصد افزایش به وجود می‌آید. با کاهش عرض پانل (پانل ۱) و افزایش طول ترک، در این حالت نیز بار کمانشی کاهش می‌یابد البته نه به اندازه حالت ترک محیطی.

در شکل (۸) اثر طول و شعاع پانل‌ها بر بار کمانشی نشان



شکل ۹- اثر ضخامت پانل بر بار کمانشی،
(الف) با ترک محیطی (ب) با ترک محوری

شکل ۸- اثر طول و شعاع پانل بر بار کمانشی،
(الف) با ترک محیطی (ب) با ترک محوری

تنش فشاری در جهت عمود بر بار کششی ایجاد می‌گردد. اگر مقدار این تنش فشاری از حد استحکام کمانشی سازه بیشتر شود، پانل در این محل دچار کمانش موضعی در جهت عمود بر بار کششی ماکزیمم خواهد شد. به دلیل اینکه مقدار بار فشاری کوچکتر است لذا برای ایجاد کمانش نیروی کششی بزرگی لازم است. حتی ممکن است مقدار این نیرو به حدی باشد که قبل از کمانش، ترک شروع به رشد نموده و پانل را دچار شکست نماید. در شکل (۱۰) مود اول کمانش تحت بار کششی در پانل ۱ به‌عنوان نمونه آورده شده است. در نمودارهای ارائه شده، برای مقایسه رفتار پانل تحت کشش، مقدار بار بر واحد طول برای کمانش کششی (N_b) با مقدار بار کمانشی فشاری برای همان پانل ولی بدون ترک (N_{cr}) از

محوری پرداخته شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در پانل‌هایی با طول ترک یکسان مقدار کاهش استحکام کششی نرمال شده (N_b/N_{cr}) متأثر از تغییر ضخامت نیست و حداکثر تغییرات حدود چهار درصد با تغییر ضخامت از ۵/۰ به ۱/۵ میلیمتر است. با وجود ترک محیطی تغییرات در هر دو نوع پانل کمتر ولی با ترک محوری تغییرات در پانل ۱ بیشتر است.

۳- کمانش پانل‌ها با وجود ترک تحت بار محوری کششی

زمانی که پانل ترک‌دار تحت بار کششی قرار می‌گیرد، به دلیل آن که در محل ترک سطح آزاد بدون نیرو و قید قرار دارد، این ناحیه بدون بار عمودی خواهد بود. ناحیه کناره ترک تحت کشش قرار می‌گیرد و به علت وجود اثر پواسون، در ناحیه ترک

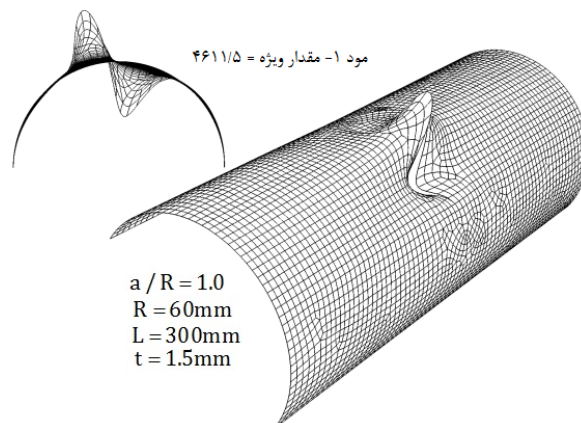
جدول ۳ بی بعد شده است. هرچه طول ترک کوچکتر باشد سطح بدون تنش نرمال در اطراف ترک کوچکتر شده و به همین نسبت تنش فشاری القا شده نیز کاهش می یابد. نتیجه آن که، افزایش بار کمانش در پانل با ترک کوچکتر خواهد بود. به همین دلیل در این قسمت فرض شده که ترک به اندازه کافی بزرگ است.

در شکل (۱۱) اثر طول ترک محیطی ($\theta = 0$) بر بار کمانش کششی در پانل ها بررسی شده است. مشاهده می شود که با افزایش طول ترک، بار کمانشی کاهش محسوسی دارد اما با افزایش بیشتر طول ترک ($a/R > 1.0$)، بار کمانش به مقدار خاصی همگرا می شود. می توان گفت که این مقدار خاص مستقل از عرض پانل است. این رفتار به شرطی قابل قبول است که ترک شروع به رشد نکند.

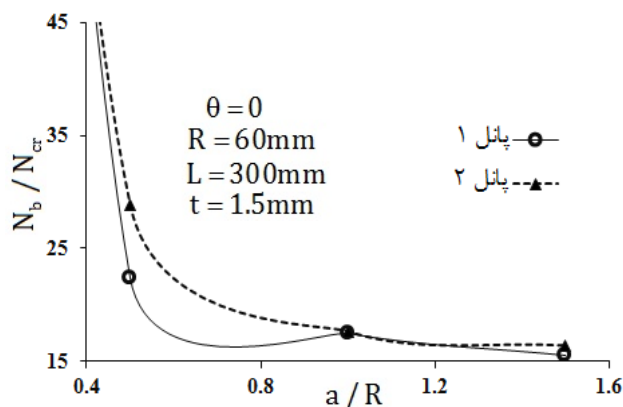
در شکل (۱۲) به اثر امتداد ترک نسبت به جهت محیطی (θ) بر مقادیر نرمال شده بار کمانش به ازای طول ترک ثابت ($a/R = 1.0$) پرداخته شده است. در این حالت بار کمانش با افزایش زاویه ترک تا حدود ۴۵ درجه تقریباً ثابت است ولی با افزایش زاویه ترک، بار کمانش به طور قابل ملاحظه ای افزایش پیدا می کند. لازم به ذکر است که پانل با ترک محوری ($\theta = 90^\circ$) تحت بار کششی کمانش نمی کند.

در شکل (۱۳) نشان داده شده است که با افزایش طول ترک محیطی، بار کمانشی نرمال شده نیز کاهش می یابد. این کاهش برای طول ترک های کمتر از نصف شعاع ($a/R < 0.5$) با هر دو نوع شرط تکیه گاهی و در هر دو پانل بسیار چشمگیر است. در این حالت اثر نوع تکیه گاه مهم است و بار کمانشی نسبی با تکیه گاه ساده بزرگتر خواهد بود (اثر ترک در تکیه گاه ساده کمتر است). با افزایش طول ترک اثر نوع تکیه گاه کم می شود.

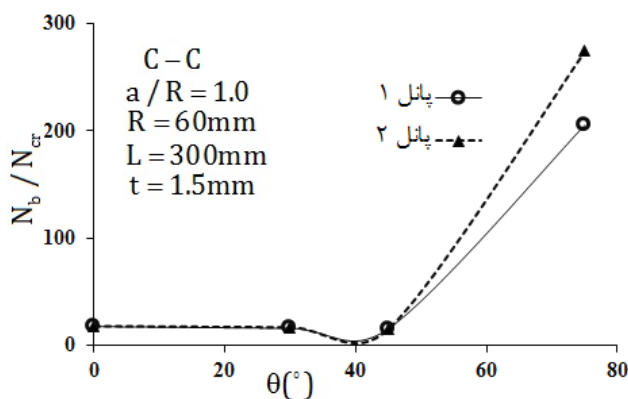
در شکل (۱۴) به بررسی اثر شعاع و طول پانل ها بر بار کمانشی پرداخته شده است. دیده می شود که تغییرات بار کمانشی در پانل ۲ به ازای تغییرات ابعادی بیشتر از پانل ۱ است. با افزایش طول ترک، بار کمانشی نرمال شده حساسیت



شکل ۱۰- مود اول کمانش تحت بار کششی در پانل ۱ با تکیه گاه گیردار



شکل ۱۱- تغییرات بار کمانش کششی بر حسب طول ترک در پانل با تکیه گاه گیردار



شکل ۱۲- اثر امتداد ترک بر بار کمانش محوری کششی با تکیه گاه گیردار

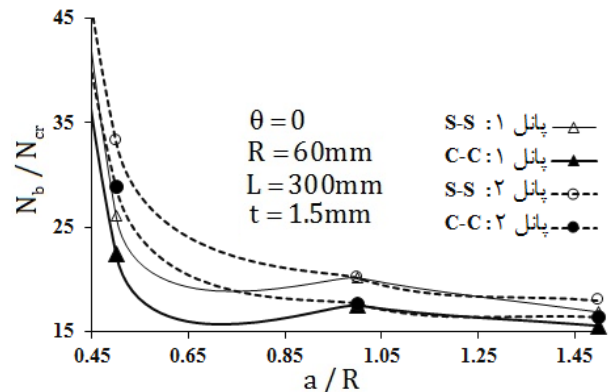
تأثیری بر بار کمانش نرمال شده ندارد. این به آن معنی است که در یک طول ترک مشخص، بار کمانش بر واحد طول همان تغییرات بر حسب ضخامت را دارد که در پانل بدون ترک تحت بار فشاری می‌تواند داشته باشد. با توجه به رابطه (۱) و شکل (۱۵) می‌توان نتیجه گرفت که در پانل ترک‌دار بار کلی کمانش با مجذور ضخامت متناسب است.

۴- نتیجه‌گیری

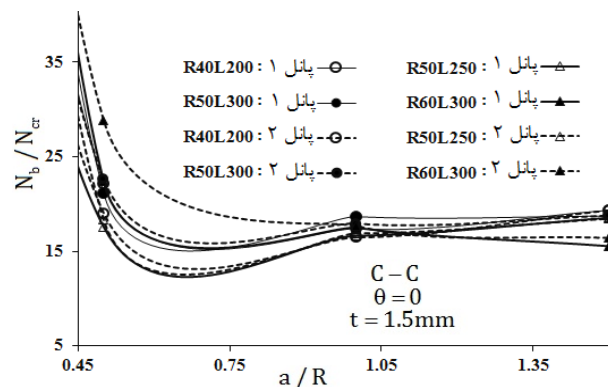
در این تحقیق به بررسی بار کمانشی پانل‌های ترک‌دار تحت بارگذاری محوری کششی و فشاری پرداخته شد. با بررسی اثر عوامل مختلف مانند شعاع، طول، پهنا و ضخامت پانل، نوع تکیه‌گاه و طول و امتداد ترک نتایج زیر به دست آمد:

- در پانل‌های ترک‌دار، ترک‌هایی با طول کمتر از نصف شعاع اثر ناچیزی بر بار کمانشی کششی و فشاری دارند؛ اما با افزایش طول ترک اثر آنها افزایش می‌یابد. هرچه طول ترک نسبت به پهنای پانل کوچکتر باشد، اثر بیشتری در کاهش بار کمانش نسبت به حالت بدون ترک خواهد داشت. ترک‌های محیطی بیشترین تأثیر و ترک‌های محوری کمترین تأثیر را در کاهش بار کمانش کششی و فشاری در پانل‌ها خواهند داشت.

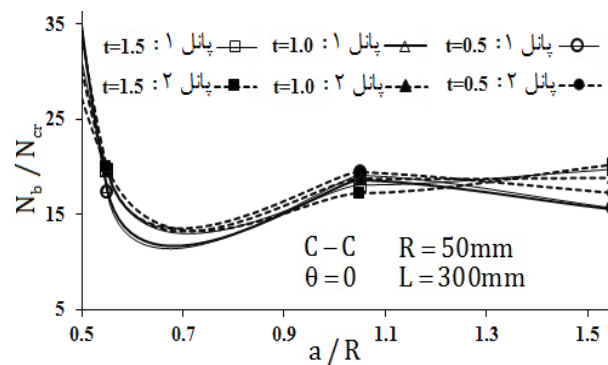
- شعاع، ضخامت، پهنا و طول پانل کمترین اثر را بر بار کمانش کششی و فشاری در پانل‌های ترک‌دار در مقایسه با پانل‌های بدون ترک خواهند داشت. در پانل‌های ترک‌دار، بار کمانش کششی همواره بسیار بزرگتر از بار کمانش فشاری است؛ به همین علت، کمانش کششی معمولاً به ازای وجود ترک‌های بزرگ (با طولی در حدود نصف شعاع یا بزرگتر) می‌تواند اتفاق بیفتد. در ترک‌های کوچکتر معمولاً رشد ترک و شکست قبل از کمانش اتفاق می‌افتد. با توجه به نتایج می‌توان گفت که در هر دو حالت کشش و فشار، مقدار بار کمانش در پانل ترک‌دار همانند پانل بدون ترک با مجذور ضخامت متناسب است.



شکل ۱۳- اثر نوع تکیه‌گاه بر بار کمانش کششی بر حسب طول ترک محیطی



شکل ۱۴- اثر ابعاد پانل بر بار کمانشی کششی با تکیه‌گاه گیردار



شکل ۱۵- اثر تغییرات ضخامت بر بار کمانش کششی

زیادی به تغییرات ابعاد نخواهد داشت و به مقدار معینی همگرا می‌شود.

اثر تغییرات ضخامت بر بار کمانش کششی در شکل (۱۵) آورده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود تغییر ضخامت

1. Zielsdorff, G. F., and Carlson, R. L., "On the Buckling of Thin Tensioned Sheets with Cracks and Slote", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 4, pp. 939-950, 1972.
2. Sih, G. C., and Lee, Y. D., "Tensile and Compressive Buckling of Plates Weakened by Cracks", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 6, pp. 129-138, 1986.
3. Estekanchi, H. E., and Vafai, A., "On the Buckling of Cylindrical Shells with Through Cracks under Axial Load", *Thin-walled Structures*, Vol. 35, pp. 255-274, 1999.
4. Dyschel, M. Sh., and Guz, A. N., "Stability and Residual Strength of Panels with Straight and Curved Cracks", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 41, pp. 95-100, 2004.
5. Brighenti, R., "Numerical Buckling Analysis of Compressed or Tensioned Cracked Thin Plates", *Engineering Structures*, Vol. 27, pp. 265-276, 2005.
6. Brighenti, R., "Buckling of Cracked Thin-Plates under Tension or Compression", *Thin-Walled Structures*, Vol. 43, pp. 209-224, 2005.
7. Alinia, M. M., Hosseinzadeh, S. A. A., and Habashi, H. R., "Numerical Modeling for Buckling Analysis of Cracked Shear Panels", *Thin-Walled Structures*, Vol. 45, pp. 1058-1067, 2007.
8. Khedmati, M. R., Edalat, P., and Javidruzi, M., "Sensitivity Analysis of the Elastic Buckling of Cracked Plate Elements under Axial Compression", *Thin-Walled Structures*, Vol. 47, pp. 522-536, 2009.
9. Seifi, R., and Khoda-Yari, N., "Experimental and Numerical Studies on Buckling of Cracked Thin-Plates under Full and Partial Compression Edge Loading", *Thin-Walled Structures*, Vol. 49, pp. 1504-1516, 2011.
10. Timoshenko, S. P., and Gere, J. M., *Theory of Elastic Stability*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1963.
11. Abaqus Manual Version 6.14, Dassault Systemes, France, 2014.