Archive of SID

ظرفیت باربری کمانشی ورقهای خورده شده

محمدرضا بهاری

استادیار گروه مهندسی عمران – دانشکده فنی – دانشگاه تهران

علی اکبر رحمتی پور

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران – دانشکده فنی – دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۷۸/۲/۲۵، تاریخ تصویب ۷۹/۷/۹)

چکیده

در این مقاله رفتار یک ورق با ضخامت متغیر و بالبه های مفصلی تحت تاثیر بارهای فشاری صفحه أی به کمک روش انرژی، تفاوتهای محدود و المانهای محدود تحلیل گردیده و پارامترهای موثر در تعیین ظرفیت باربری ورق مورد بحث قرار می گیرند. این عوامل عبارتند از موقعیت خوردگی در سطح ورق ، سطح خورده شده و ضخامت ناحیه خورده شده ورق که با تغییر هرکدام از آنها تاثیر مربوطه در ظرفیت باربری ورق مطالعه گردیده و بحرانی ترین نوع خوردگی در یک ورق ارائه می گردد. برای این منظور در ابتدا بار بحرانی ورق که پارامتری اساسی برای تعیین باربری فشاری آن می باشد به کمک روش انرژی و تفاوت محدود بدست می آید. واضح است که خوردگی در ورق باعث تغییر موقعیت میان صفحه گردیده و صفحه مسطح به صفحه نامسطح تبدیل می شود بطوریکه ضخامت ورق در ناحیه خوردگی کاهش می یابد. بنابراین تغییر شکلهای عمود بر صفحه ورق ایجاد می شود و متناسبا" تنشهای خمشی اضافی را در ورق باعث می گردد. در این حالت با روش اجزاء محدود و به کمک نرم افزار ALGOR رفتار غیرخطی هندسی و مادی ورق ردیابی می گردد و تاثیر پیشرفت خوردگی در باربری ورق بررسی می گردد.

واژه های کلیدی : خوردگی، کمانش، ورق، تفاوت های محدود، ALGOR ، آنالیز غیرخطی

مقدمه

از جمله مسائلی که ظرفیت باربری سازه ها را با گذشت زمان تحت تاثیر قرار می دهد خوردگی[1] است. این خوردگی می تواند در تمام سازه هایی که در معرض آب دریا، بخار آب هوا، گازهای شیمیایی و حتی اکسیژن موجود در هوا قرار دارند، از جمله سازه های دریایی کنار و یا فراساحلی ، بدنه کشتی ها، جان تیر ورق پلها و غیره اتفاق افتد.

هزینه بالایی که برای ساخت و بهره برداری از سکوهای دریایی صرف می شود کنترل خوردگی آنها را ضروری می نماید. سکو از نظر خوردگی به سه ناحیه تقسیم می شود: ناحیه داخل آب، ناحیه پاشش آب[2] و ناحیه آتمسفر. لیکن با توجه به تاثیر فزاینده هوای محلول در آب دریا، ناحیه پاشش آب شدیدتر خورده میشود. این ناحیه بحرانی ترین قسمت از نظر حفاظت بوده و باید مقدار فولاد در آن به حداقل ممکن برسد و حتی الامکان از داشتن اعضای مهار افقی پرهیز گردد[۱] .

اطلاع از قابلیت بهره برداری و ظرفیت باقی مانده سازه ها (سازه های خورده شده) برای مهندسین و شرکت های بیمه گذار پروژه های صنعتی و گرانقیمت از اهمیت خاصی برخوردار است و آنان را در تصمیم گیری برای تعویض و یا تقویت قطعه موردنظر یاری میرساند. از این رو ضرورت انجام تحقیقات و ارائه نتایج مهندسی در این زمینه از گذشته احساس می شده است.

سازه های فولادی معمولا" تحت خوردگی عمومی[3] قرار دارند. این خوردگی طی اکسیداسیون سطح مواد در یک ناحیه بزرگ و یا بصورت موضعی[4] خود را نشان می دهد ولی گسترش آن همیشه به جای عمق در جهت سطح انجام می گیرد. مقدار خوردگی عمومی در سازه های دریایی[5] در گزارش ارائه شده توسط Ohyagi [۲] منعکس شده است که بر مبنای بررسی های انجام شده بر روی کشتی ها و اندازه گیری ضخامتهای میانه و

1 – Corrosion 2 – Splash Zone 3 – General Corrosion 4 – Patch 5 – Marine Structures

www.SID.ir

Archive of SID

حداکثر[1] در هر بازرسی بهمراه پارامترهای آماری مربوطه تهیه شده است. مطابق این گزارش شناورهای حامل بار[2] بیشتر از همه تحت اثر خوردگی قرار دارند و در خود این شناورها نیز مکانهای قرارگیری محموله[3] بیشترین موضعهای خوردگی بوده اند.

تاثیر خوردگی را می توان بر مبنای مقدار مواد از بین رفته در مدت زمانی مشخص ارزیابی نمود. کاهش یکنواخت معادل در ضخامت متعاقبا" از روی کاهش وزن محاسبه می گردد. در مورد یک ورق، این را می توان بصورت عددی بدین صورت بیان کرد:

$$t_n = t_o - t_c = t_o - \left[\frac{W_o - W_n}{ab\rho g}\right] \quad (1)$$

که در آن t_n ضخامت یکنواخت معادل متناظر با ورق خورده شده پس از n سال بهره برداری بوده ، t_0 ضخامت ورق سالم، t_c کاهش یکنواخت در ضخامت (یا عمق میانه خوردگی) پس از n سال، W_0 و W_n به ترتیب وزن ورق سالم و وزن ورق خورده شده پس از n سال است. a و b ابعاد ورق و ρ چگالی فولاد است.

مرجع [۲] یک مدل خطی میانگین برای تخمین سرعت حداکثر خوردگی ، بر مبنای توزیع نرمال ارائه می دهد:

$$t_c = 0.34 n_y \quad (2)$$

که در آن n_y تعداد سالهای در معرض خوردگی عضو است و t_c کاهش یکنواخت ضخامت برحسب سانتیمتر است.

شایان ذکر است که مدل فوق براساس اعضای سازه های فولادی بوده و نسبت به برخی مدلهای دیگر که بر مبنای نمونه های ورق فولادی[4] ارائه شده اند (مثل گزارش Melchers and Ahmmed [۳]) مقدارهای خوردگی بیشتری را نتیجه می دهد. بعبارت دیگر، ورق بعنوان یک عضو سازه أی تحت تنش های چرخه أی قابل توجهی بهمراه تغییرشکلها و ارتعاشات حاصل از بارگذاری واقعی واقع می شود. اکسید آهن که با خوردگی تشکیل می شود یک ماده نسبتا" شکننده است و می تواند طی تغییرشکل خمشی از سطح ورق جدا بشود. جداشدن لایه های اکسید آهن بخودی خود به نرخ خوردگی پیش رونده ورق کمک می کند و کاهش در ضخامت موثر سازه أی ورق افزون تر بوجود می آید.

Dinno و Birkemo [۴] جهت بررسی کاهش باربری پانل های شاه تیرها در اثر خوردگی و تاثیر پارامترهای مختلف خوردگی از مدل اجزاء محدود غیرخطی استفاده نمودند. ایشان بارگذاری پانلها را بصورت اعمال تغییرمکانهای کنترل شده در نظر گرفتند و معادله ای را برای ارزیابی مقاومت کمانشی این ورق ها ارائه نموده اند. البته این معادله بسیار ساده بوده و قابل تعمیم نیست. معادله پیشنهادی بصورت

$$\frac{P_{cor}}{P} = \left(\frac{A_r}{A_{orig}}\right)^2 \quad (3)$$

می باشد که در آن A_r سطح مقطع کاهش یافته در اثر خوردگی و A_{orig} سطح مقطع اولیه است. طبیعی است که این معادله تاثیر موقعیت خوردگی نسبت به پانل را درنظر نمی گیرد و مهمتر از آن، سطح خورده شده ورق در آن لحاظ نشده است.

خرابی اعضای سازه أی در دریا بدلیل خوردگی پیشرونده علیرغم آنکه طراحی آنها بر مبنای انجمنهای کلاس دهنده[5] معتبر بوده اند، نشان می دهد که ارزیابی مقاومت فشاری مولفه های سازه أی خورده شده و خصوصا" دریافت تاثیر پارامترهای مختلف بر آن چه از نظر موقعیت، سطح یا عمق خوردگی و چه مدلهای بکار گرفته شده برای بررسی شکل ضخامت خورده شده به مطالعات بیشتر و مفصل تری نیاز دارد.

هدف این مقاله تعیین کاهش مقاومت ورقهای خورده شده نسبت به ورقهای سالم و همچنین بدست آوردن نمودارهایی است که اثر پارامترهای مختلف خوردگی را در کاهش مقاومت ورق نشان دهند. اثر خوردگی در ورقهای مستطیلی و بلند بررسی شده و ضمن بحث در نتایج در پایان قضاوتی مهندسی درباره قابلیت بهره برداری از ورق خورده شده ارائه می گردد.

معادلات حاکم بر رفتار ورقهای خورده شده

معادله دیفرانسیل کمانشی ورق

مطابق روابط کلاسیک ورق، تعادل در راستای عمود بر صفحه برای ورقی با تغییر شکلهای کوچک که

1 – Mean & Max. Thickness 2 – Cargo Carriers 3 – Cargo Holds 4 – Steel Specimens 5 – Classification Societies

www.SID.ir

تحت اثر نیروهای فشاری لبه أی قرار دارد به صورت زیر می باشد [۵].

$$D\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial y^2}+\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right)+\frac{\partial^2 D}{\partial x^2}\cdot\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+$$

$$\frac{\partial^2 D}{\partial y^2}\cdot\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+2\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\cdot\frac{\partial^2 D}{\partial x\partial y}+2\frac{\partial D}{\partial x}\cdot\frac{\partial}{\partial x}$$

$$\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)+2\frac{\partial D}{\partial y}\cdot\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)$$

$$+\mu\left(\frac{\partial^2 D}{\partial x^2}\cdot\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 D}{\partial y^2}\cdot\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}-2\frac{\partial^2 D}{\partial x\partial y}\cdot\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\right)=$$

$$N_x\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+N_y\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+2N_{xy}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}$$

(۴)

معادله فوق معادله دیفرانسیل کمانشی ورق می باشد که جهت محاسبه بار کمانشی آن مورد استفاده می باشد.

انرژی تغییر شکل صفحه

انرژی پتانسیل کل یک ورق با تغییر شکلهای کوچک عبارت از جمع انرژی پتانسیل تغییر شکلهای خمشی و انرژی پتانسیل بارهای خارجی می باشد. در مقیاس تغییر شکلهای کوچک ورق از انرژی پتانسیل مربوط به تغییر شکلهای غشایی صرفنظر می گردد[۶].

$$U_t = U_m + U_w$$

(۵)

= انرژی پتانسیل کل

$$\iint_A \frac{D}{2}[(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2})^2+(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2})^2+2\mu\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\cdot\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$$
$$+2(1-\mu)(\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y})^2]dx\,dy$$
$$-\frac{1}{2}\iint_A[N_x(\frac{\partial w}{\partial x})^2+2N_{xy}(\frac{\partial w}{\partial x})(\frac{\partial w}{\partial y})+N_y(\frac{\partial w}{\partial y})^2]\,dxdy$$

(۶)

در معادله فوق ترم اول انرژی پتانسیل تغییرشکلهای خمشی و ترم دوم آن انرژی پتانسیل بارهای خارجی می باشد.

دسته بندی پارامترهای خوردگی ورق

باتوجه به اینکه چگونگی در نظر گرفتن تاثیر خوردگی در ورق از اهمیت خاصی برخوردار می باشد، سعی شده است تا مشخصات خوردگی در یک ورق خورده شده به نحوی تنظیم گردد که اولا" پتانسیل خوردگی در سطح ورق لحاظ شده و با مدلی واقع بینانه مسئله خوردگی بررسی گردد و ثانیا" جهت بررسی ورق خورده شده با مشخصات معلوم نتایج آنالیز به سادگی در اختیار مراجعه کننده قرار گیرد. خوردگی در یک ورق مسطح می تواند با چند پارامتر مشخص گردد، که عبارتند از :

۱ – موقعیت یا موضع ناحیه خورده شده در سطح ورق

۲ – سطح ناحیه خورده شده

۳ - ضخامت ناحیه خورده شده

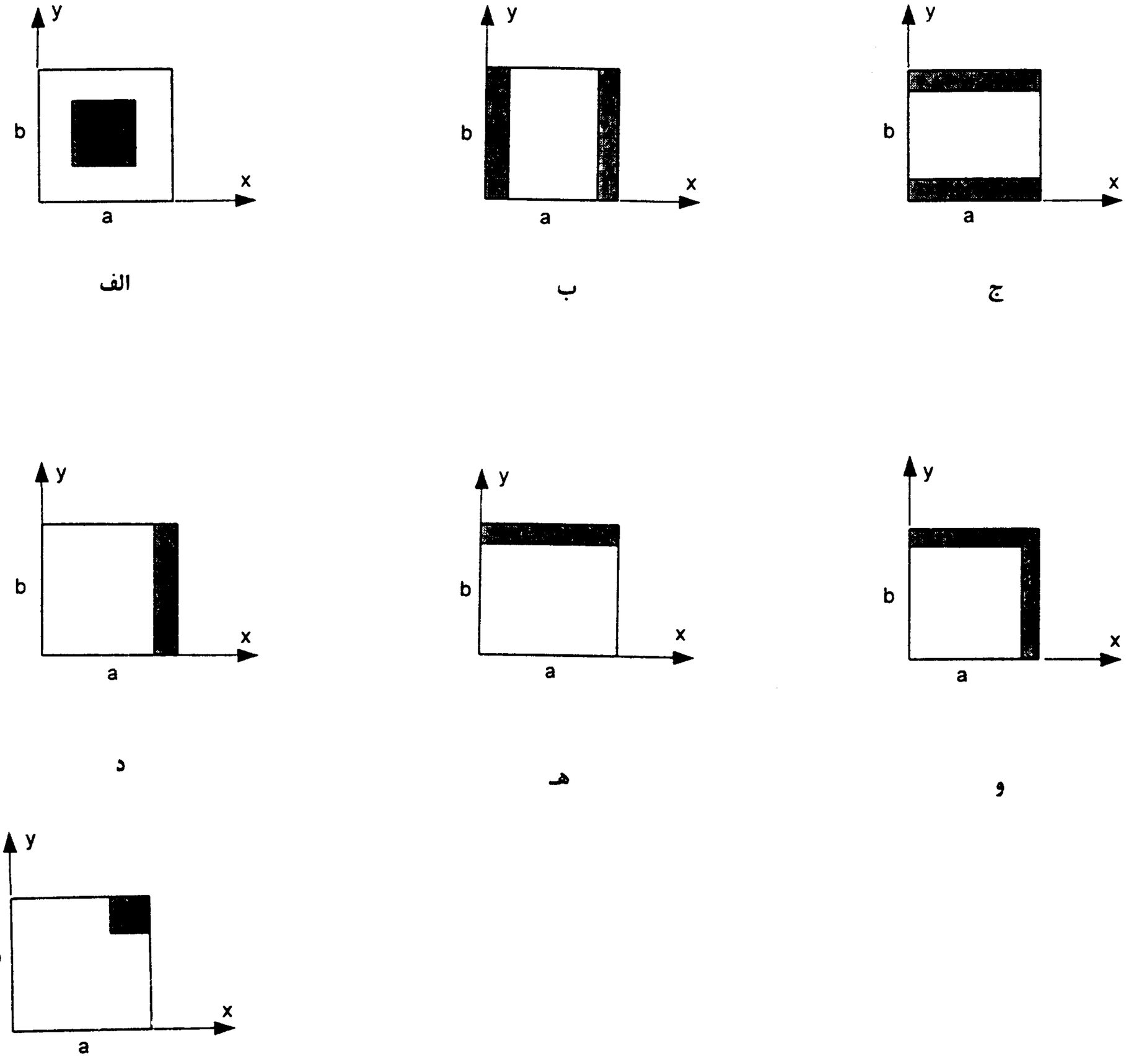
لیکن پارامتر دیگری که مستقل از پارامترهای فوق نبوده، و در مطالعه خوردگی ورق به مراتب از دو پارامتر اخیر شاخص تر می نماید حجم خوردگی می باشد که قابلیت مقایسه چند خوردگی را به سادگی فراهم می سازد. درصد حجم خوردگی عبارت است از حجم ناحیه خورده شده ورق به حجم کل ورق و در شرایطی که ضخامت ناحیه خورده شده ثابت باشد، حجم خوردگی برابر حاصلضرب سطح خوردگی در ضخامت خوردگی ورق می باشد.

رفتار ورق برای هفت وضعیت مختلف خوردگی روی ورق مطابق شکل (۱) بررسی می شود. لازم به ذکر است در کلیه موقعیتهای نشان داده شده بارگذاری در لبه های x=0 و x=a بصورت بار فشاری یکنواخت در نظر گرفته شده است. در هریک از حالات خوردگی درصد حجم خوردگی برابر ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵، ۱۵ انتخاب گردیدند ضمن آنکه سطح و ضخامت ناحیه خورده شده نیز متغیر خواهد بود. به عنوان مثال برای خوردگی در وسط ورق و با حجم ۱۵٪ خوردگی درصد سطح ناحیه خورده شده از ۱۵٪ شروع شده و تا ۱۰۰٪ افزایش می یابد و تاثیر افزایش در بار بحرانی ورق بررسی می گردد.

در این مطالعه ناحیه خورده شده دارای ضخامتی ثابت در نظر گرفته شده است، که در عمل می تواند به متوسط ضخامت در ناحیه خورده شده تعبیر شود. لذا برای محاسبه بار بحرانی ورق دوناحیه با ضخامتهای متفاوت در

Archive of SID
www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱: موقعیت و توزیع خوردگی های مورد مطالعه در سطح ورق.

سطح ورق خواهیم داشت.

توابع تغییرشکل ورق خورده شده

برای محاسبه بار بحرانی در روش انرژی نیاز به توابع تغییرشکل عمود بر صفحه ورق ((W(x,y)) می باشد. لذا باتوجه به نوع خوردگی در ورق و موقعیت آن در سطح ورق می توان با ترکیب مودهای اصلی تغییرشکل ورق توابع تغییرشکل را بدست آورد [۹]. بدیهی است هرچه تعداد توابع پایه بیشتر باشد تغییرشکل ورق دقیقتر بوده و جوابها نیز دقیقتر می باشند.

در این تحقیق توابع مورد استفاده در معرفی تغییر شکل پس از کمانش ورق خورده شده باتوجه به موضع خوردگی در سطح ورق تعیین شده است توابع سینوسی به جهت دارا بودن خاصیت تعامد خود محاسبات مربوط به انتگرالگیری برای رسیدن به جواب را ساده تر می نمایند. توابع تغییر شکل در حالت کلی بصورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$w(x,y) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} w_{ij} Sin \frac{i\pi x}{a} Sin \frac{j\pi y}{b} \qquad (۷)$$

باتوجه به نوع خوردگی در سطح ورق می توان توابع ساده تری نسبت به حالت فوق برای تغییر شکل کمانشی ورق بیان نمود. به عنوان مثال برای حالت (ب) خوردگی

www.SID.ir

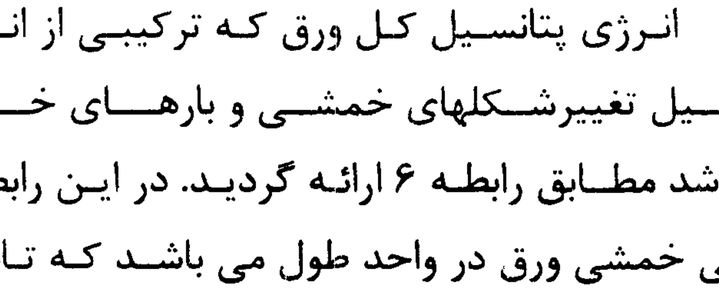
تابع تغییر شکل را به صورت زیر می نویسیم.

$$w(x,y)=\sum_{i=1}^{n} w_i Sin\frac{(2i-1)\pi x}{a}\ Sin\frac{\pi y}{b} \qquad (۸)$$

و برای حالت (هـ) خوردگی تابع تغییر شکل بصورت زیر در می آید.

$$w(x,y)=w_1\ Sin\frac{\pi x}{a}\ Sin\frac{\pi y}{b}+\sum_{i=1}^{n} w_{i+1} Sin\frac{\pi x}{a}\ Sin\frac{2i\pi y}{b} \qquad (۹)$$

برای سایر حالات در نظر گرفته شده نیز می توان تابع ساده تری برای تغییر شکل کمانشی ورق درنظر گرفت [۹]. واضح است که هرچه تعداد مودهای تغییر شکل بیشتر باشد جوابها دقیق تر است و خطای کمتری را در محاسبه بار بحرانی خواهیم داشت.



شکل ۲: تغییر موقعیت میان صفحه ورق در اثر خوردگی.

روش انرژی در محاسبه بار بحرانی ورق خورده شده

انرژی پتانسیل کل ورق که ترکیبی از انرژی پتانسیل تغییرشکلهای خمشی و بارهای خارجی می باشد مطابق رابطه ۶ ارائه گردید. در این رابطه D سختی خمشی ورق در واحد طول می باشد که تابعی از توان سوم t می باشد. و به علت تغییر t در سطح ورق انتگرال گیری در دو ناحیه از ورق با ضخامتهای معلوم انجام می گیرد. بنابراین با استفاده از توابع تغییر شکل ارائه شده انرژی کل ورق با انتگرال گیری از توابع تغییر شکل و مشتقات آن برحسب بارهای خارجی و ضرائب تغییر شکل ورق بدست می آید. انرژی کل پتانسیل در نقطه بار بحرانی مینیمم خود را یافته و این نقطه بعنوان یکی از نقاط ایستا در تابع انرژی پتانسیل مطرح می باشد.

حال باتوجه به این مطلب و اینکه انرژی کل ورق برحسب ضرائب نامعلوم تغییر شکل (a, b, c, ...) بدست آمده است

$$\frac{\partial U_t}{\partial a}=\frac{\partial U_t}{\partial b}=\frac{\partial U_t}{\partial c}=\ldots=0 \qquad (۱۰)$$

که پس از انجام مشتق گیری تعداد معادلات برابر تعداد ضرایب تغییر شکل ورق خواهد بود. دستگاه معادلات بدست آمده دستگاهی همگن می باشد که دارای جوابهایی است که همان بارهای خارجی ورق می باشد و بنابراین جواب های دستگاه مخالف صفر خواهند بود.
شرط فوق لزوم صفر بودن دترمینان ماتریس ضرایب را ایجاب می نماید ، لذا به تعداد معادلات این دستگاه جواب غیرصفر برای بارهای خارجی ورق بدست می آید که کوچکترین آنها همان بار کمانشی ورق می باشد. روش انرژی بدلیل مقید کردن تغییر شکل ورق به توابع محدودی از تغییر شکل، جوابهای دست بالایی را نتیجه خواهد داد. تعداد جملات تغییر شکل کمانشی ورق را آنقدر افزایش می دهیم که کمترین خطا را در بار بحرانی داشته باشیم.

شکل ۳: رابطه تنش – کرنش فولاد مصرفی.

روش تفاوتهای محدود در محاسبه بار بحرانی ورق خورده شده

معادله دیفرانسیل کمانشی ورق یعنی معادله (۵) را می توان با روش تفاوتهای محدود حل نمود. در این

روش معادله دیفرانسیل در نقـاط محـدودی از سـطح ورق ارضاء می گردد و طبیعتا" هرچه تعداد نقاط مذکور بیشتر باشد جوابها دقیقـتر خواهنـد بـود. در ایـن روش مشـتقات مراتب بالای w در هر نقطه برحسـب تغییرشـکلهای نقـاط اطـراف قـابل بیـان بـوده و پـس از جمـع ترمـهای معادلـه دیفرانسیـل حاکم می توان تعادل در هر نقطه را برحسب تغییرشکلهای نقاط اطراف بیان نمود.

روش نمایشی برای نشان دادن نسبتهای تفاوت به صورت عملگرهایی از ضرایب تغییرشکل بیان مـی گردد. چنانچـه پارامترهـای D_x، D_y، D_{xx}، D_{yy}، D_{xy} بـرای جـایگزینی مشتقات موردنیاز معادله دیفرانسیل حاکم بـه صـورت زیـر تعریف گردند [۷]:

$$D_{i,j} = D$$

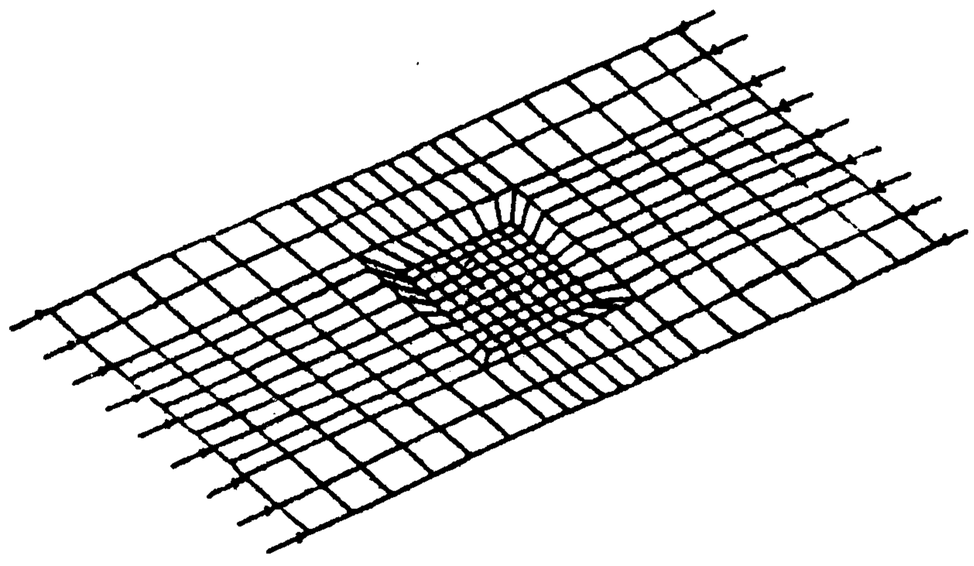
$$D_x = \frac{D_{i+1,j} - D_{i-1,j}}{2D}$$

$$D_y = \frac{D_{i,j+1} - D_{i,j-1}}{2D}$$

$$D_{xx} = \frac{D_{i-1,j} - 2D_{i,j} + D_{i+1,j}}{D}$$

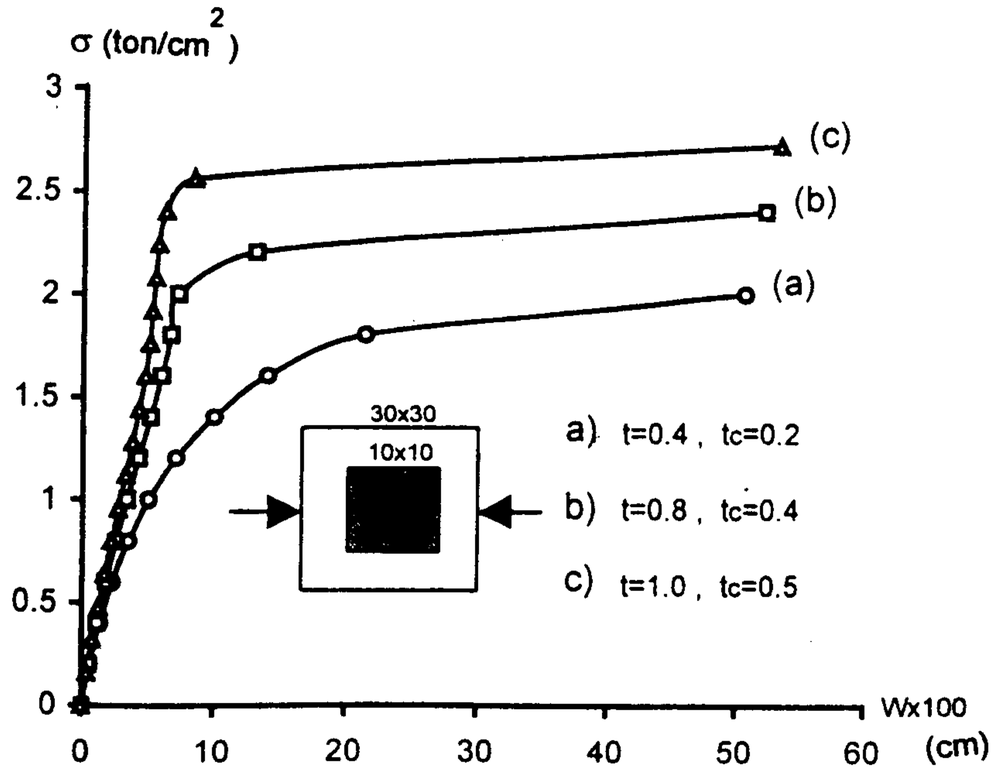
$$D_{yy} = \frac{D_{i,j-1} - 2D_{i,j} + D_{i,j+1}}{D}$$

$$D_{xy} = \frac{D_{i-1,j-1} + D_{i+1,j+1} - D_{i+1,j-1} - D_{i-1,j+1}}{8D} \qquad (۱۱)$$



شکل ۴: مدل تحلیلی اجزاء محدود ورق خورده شده.

$$\frac{D}{h^4}\begin{vmatrix} & 1-D_y & \\ 2-D_x-D_y+(1-\mu)D_{xy} & -8+4D_y+D_{yy}+\mu D_{xx} & 2+D_x-D_y-(1-\mu)D_{xy} \\ -8+4D_x+D_{xx}+\mu D_{yy} & 20-2(1+\mu)(D_{xx}+D_{yy}) & -8-4D_x+D_{xx}+\mu D_{yy} \\ 2-D_x+D_y-(1-\mu)D_{xy} & -8-4D_y+D_{yy}+\mu D_{xx} & 2+D_x+D_y+(1-\mu)D_{xy} \\ & 1+D_y & \end{vmatrix} \qquad (۱۲)$$



شکل ۵: مقایسه رفتار کمانشی ورقهای نازک و ضخیم خورده شده.

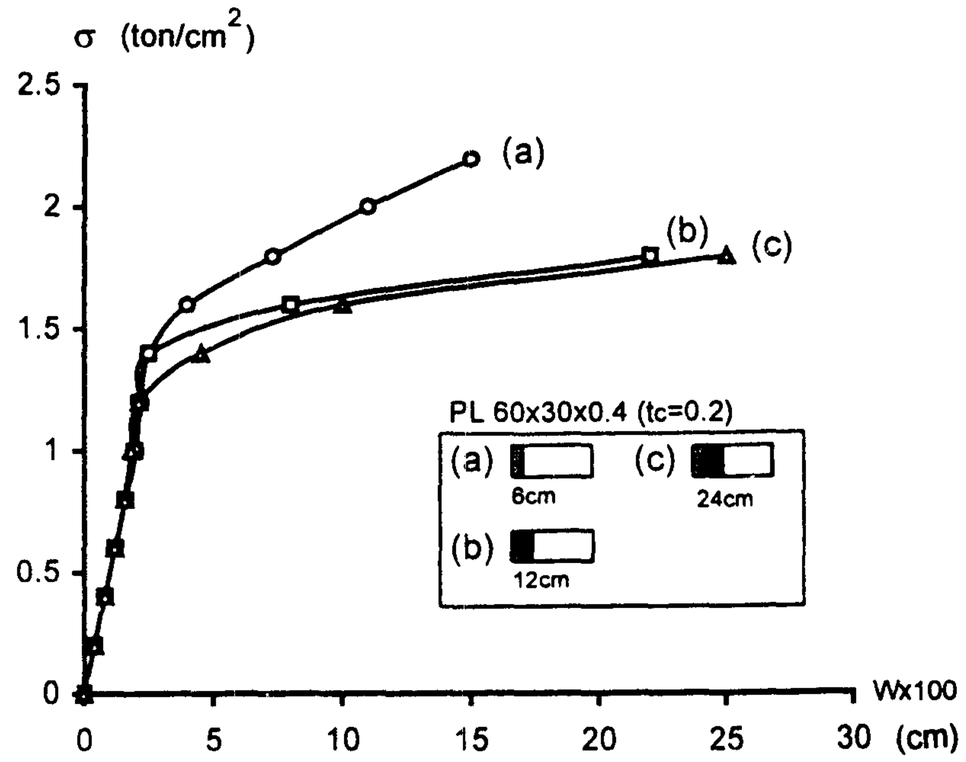
بدین ترتیب عملگر سمت چپ معادله حاکم بر رفتار ورق خورده شده، به صورت ماتریس ارائه شده در معادلـه (۱۲) نتیجـه می شود . در روابـط فـوق D سختی خمشی در نقطه (i,j) می باشد که در هر نقطه با داشـتن ضخـامت آن نقطه قابل محاسبه می باشد. با نوشـتن معادلـه تعـادل در سطح ورق به تعداد نقـاط انتخـاب شـده در سـطح ورق معادلـه خواهیـم داشـت و مجـهولات نـیز تغییرشـکلهای متناظر با آن نقاط می باشند. برای داشتن جواب غـیرصفر برای w دترمینان ماتریس ضرایب را برابر صفر قـرار داده و از آنجا بارهای خـارجی محاسـبه مـی شـوند. کـوچکـترین جواب معادله بار کمانشی ورق می باشد. همانطور که گفته شد تعادل ورق برای تعـداد محـدودی از نقـاط ارضـاء مـی گردد، و سایر نقاط آزاد می باشند. همین امـر موجـب مـی شود جوابهایی دست پایین نتیجه شوند

Archive of SID
www.SID.ir

Archive of SID

آنالیز غـیرخطی ورق خـورده شـده بـه روش اجزاء محدود

با کمـــک نرم افزار عمومی ALGOR ورق خورده شده که دارای ضخامتی متغیر در سطح خود مـی باشـد و خوردگی باعث تغییـر موقعیـت میـان صفحـه در آن شـده است (شکل ۲) آنالیز گردیـده و رفتـار ورق تـا تخریـب آن ردیابی شده است.



شکل ۶: تاثیر پیشرفت خوردگی لبه در ظرفیت باربری کمانشی ورق مستطیلی.

المان به کار رفته در آنالیز ورق خورده شده المـان پوسـته چهار گرهی می باشد که در هر گره دارای ۶ درجـه آزادی است. شرایط مرزی ورق به صورت ساده (چهار لبه مفصل) در نظر گرفته شده است و بار فشاری یکنواخت در دو لبـه آن اعمال گردیده است. بار فشاری در ۵۰ مرحله افزایشـی از صفر تا بار ماکزیمم به ورق وارد شده است.

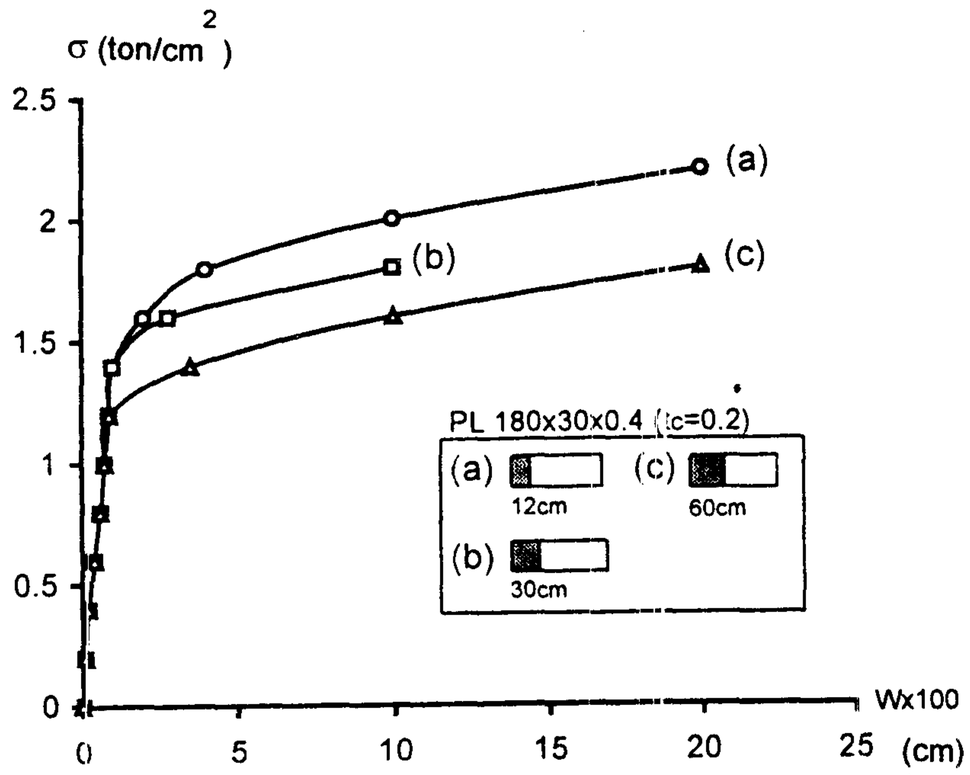
تغییرشـکلهای ورق ترکیبـی از تغییرشـــکلهای خمشـــی و غشایی می باشـد و بـه دلیـل بـزرگ بـودن تغییرشـکلهای خمشـی در ورق خـورده شـده رفتـــار هندســـی ایـــن ورق غیرخطی می باشد. غیرخطی بـودن مـاده تشـکیل دهنـده ورق (فـولاد) نـیز در ایـن تحلیـل بصـورت رابطـه تنـش – کرنش شکل (۳) لحاظ شده است. شکل (۴) المـان بنـدی یک ورق خورده شده را نشان می دهد.

در تحلیل اخیر ، موارد زیر مورد مطالعه قرار گرفته اند:

۱ – تغییر رفتار ورق خورده شده نازک و ضخیم

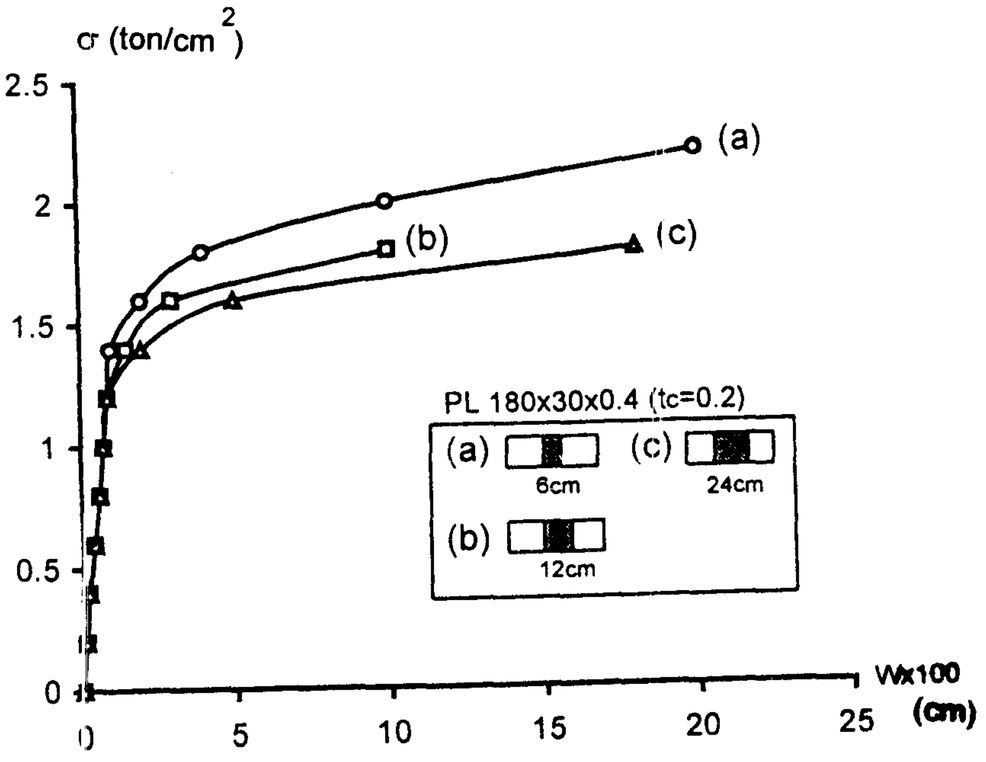
۲ – تاثیر پیشـــرفت خوردگی در باربری ورقهای مربعی و مستطیلی

۳ – تاثیر موقعیت، موضع خورده شـده در بـاربری ورقـهای مستطیلی و بلند



شکل ۷: تاثیر پیشرفت خوردگی لبه در ظرفیت باربری کمانشی ورق بلند.

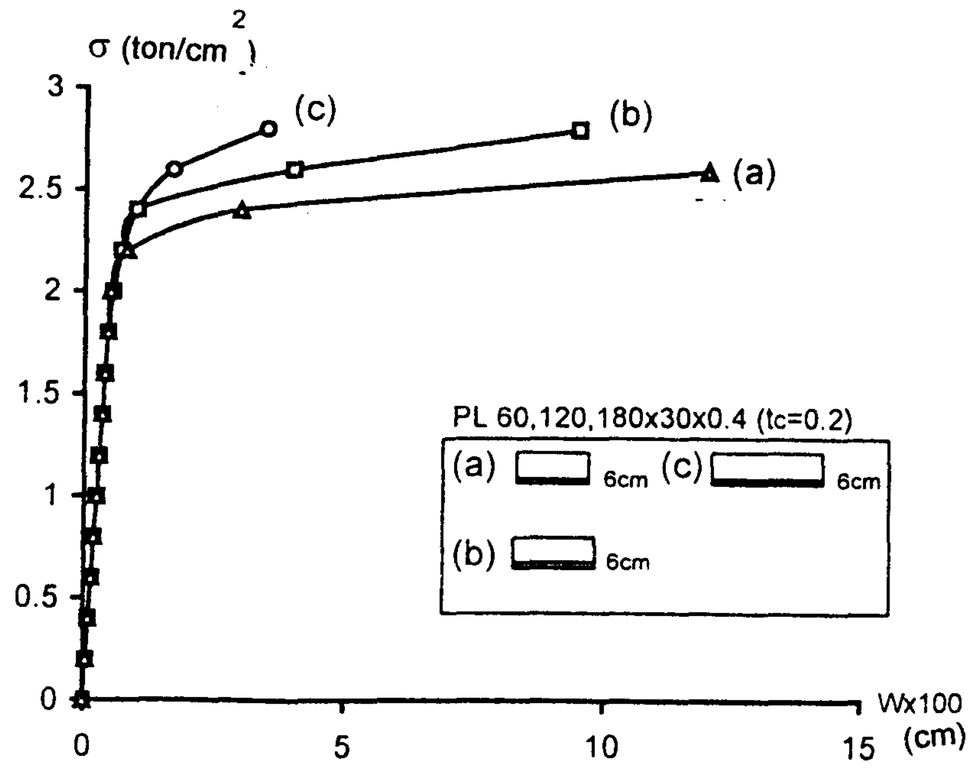
برای این منظور ورقعی مربعی به ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی مـتر و با ضخامتهای مختلف و همچنین ورقهای مستطیلـــی با با عرض ۳۰ سانتی متر و با طولهای از ۶۰ تـا ۱۸۰ سـانتی مـتر تحلیـل شـده اسـت. موضـع خـوردگی در ایـن ورقـها بصورت متغـیر در نظـر گرفتـه شـده و تـاثیر تغییـر آن در سـطح ورق بررسـی گردیـده اسـت. لازم بـــه ذکـــر اســـت بارگذاری بـه صـورت بـار فشـاری یکنواخـت در لبـه هـای عرضی ورق می باشد.



شکل ۸: تاثیر پیشرفت خوردگی وسط ورق در ظرفیت باربری کمانشی ورق بلند.

www.SID.ir

در شکلهای (۵) الی (۱۰) منحنی های نیرو- تغییرمکان حاصل از آنالیز ورق خورده شده آمده است. در این شکلها محور افقی تغییر شکل عمود بر صفحه ورق بر حسب cm و محور قائم تنش لبه ورق بر حسب Kg/cm^2 می باشد.



شکل ۹ : تاثیر پیشرفت خوردگی لبه موازی بار در ظرفیت باربری کمانشی ورق های مستطیلی و بلند.

بحث در نتایج

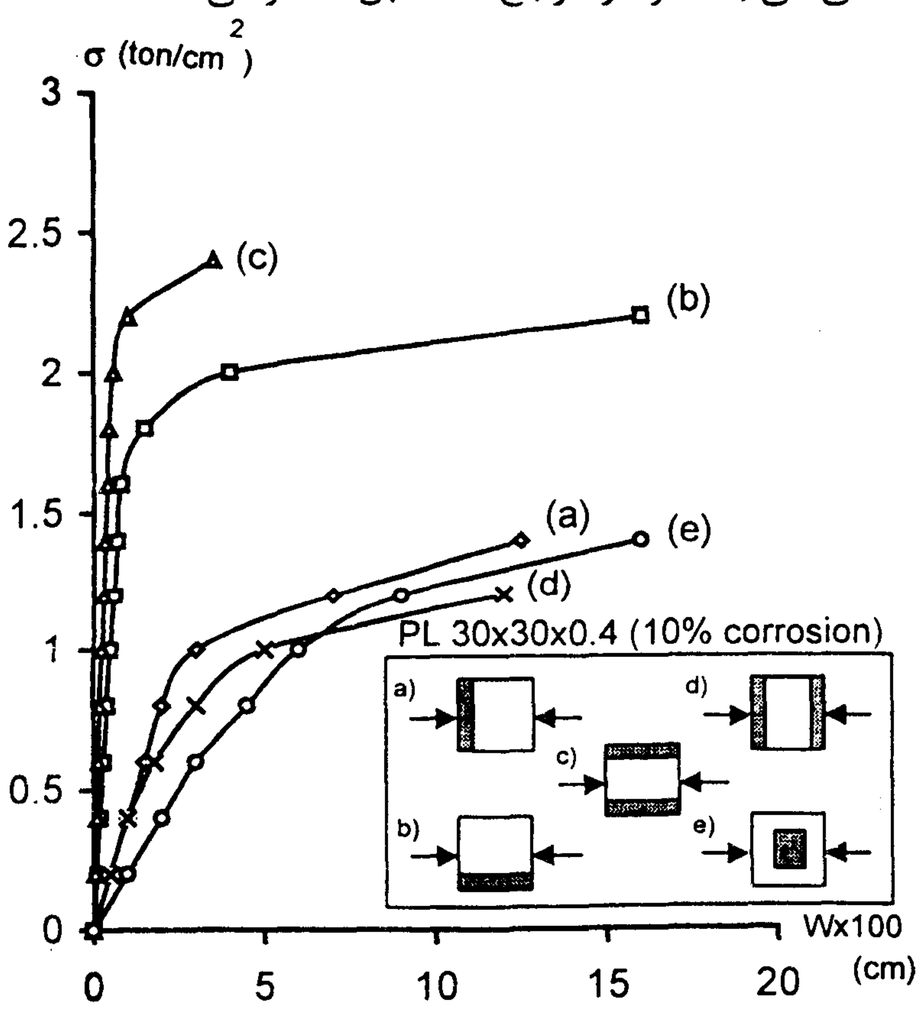
در این مطالعه باربری کمانشی ورقهای خورده شده بررسی و پارامترهای تاثیرگذار در باربری این ورقها شناسایی گردیدند.

الف – بار بحرانی ورق خورده شده

اگر موقعیت میان صفحه ورق را ثابت در نظر گرفته و تغییر ضخامت ورق را در نتیجه خوردگی در دو طرف ورق بدانیم در این صورت ورق دارای بار بحرانی در نقطعه انشعابی[1] و یا بار کمانشی می باشد که به ازای آن تغییرشکلهای عمود بر صفحه ورق دچار تغییر ناگهانی می گردند. این بار بحرانی اهمیت اساسی در باربری ورق دارا می باشد، زیرا در مورد ورقهای خورده شده که میان صفحه ورق نامسطح می باشد و رفتار ورق مانند رفتار ورقی با تغییر شکلهای اولیه است، در صورت رسیدن بار فشاری وارد بر لبه های ورق به بار کمانشی آن ورق تغییر شکلها با شیب بیشتری افزایش می یابد و منجر به افزایش تنشهای خمشی در ورق و در نتیجه تسلیم ورق خواهد گردید. لذا مطالعه در خصوص بار بحرانی ورق از اهمیت خاصی برخوردار خواهد بود.

با کمک روشهای "انرژی" و "تفاوتهای محدود" بار بحرانی ورقهای خورده شده محاسبه شده و با میانگیری از جوابهای بدست آمده از دو روش تفاوت محدود و انرژی نتایج آنالیز مشخص می گردد.

در شکل (۱۱) نتایج آنالیز برای ورقی که در وسط دچار خوردگی شده است برحسب درصد حجم های مختلف خوردگی آمده است. سایر نتایج برای ورقهایی که در لبه ها دچار خوردگی شده اند نیز از نظر کیفی نظیر این منحنی می باشد و در مرجع [۸] قابل دسترسی است.



شکل ۱۰: تاثیر موقعیت خوردگی در باربری کمانشی ورق مربعی.

پس از محاسبه بار بحرانی برای ورق مربعی خورده شده که تحت اثر بار فشاری در لبه های خود قرار دارد و تغییر مشخصات خوردگی نسبت به یکدیگر در محدوده نمونه های مورد مطالعه چنین استنباط می شود که :

۱ – بحرانی ترین موضع خوردگی در سطح ورق ناحیه وسط ورق می باشد.

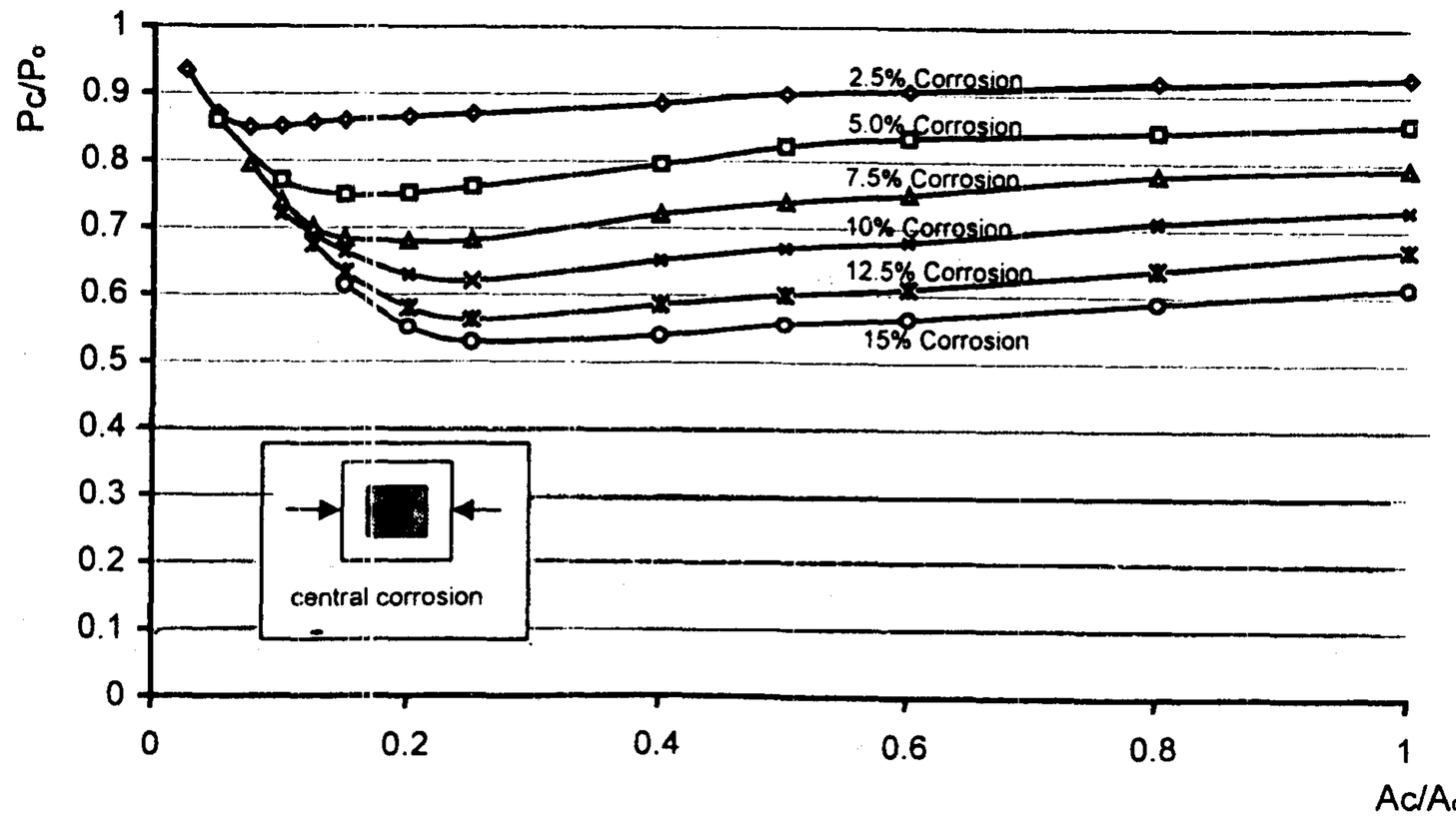
۲ – هرچه خوردگی به سمت لبه های ورق هدایت شود از اثر آن در کاهش بار بحرانی کاسته می شود.

۳ – خوردگی در لبه های عمود بر بارگذاری بسیار بحرانی تر از خوردگی در لبه های موازی با بارگذاری می باشد.

۴ – برای حجم ثابتی از خوردگی باربری ورق به ازای سطح و ضخامت خاصی حالت بحرانی تری پیدا می کند.

1 – Bifurcation Point

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱۱: مقایسه بار بحرانی ورق با حجم های خوردگی مختلف.

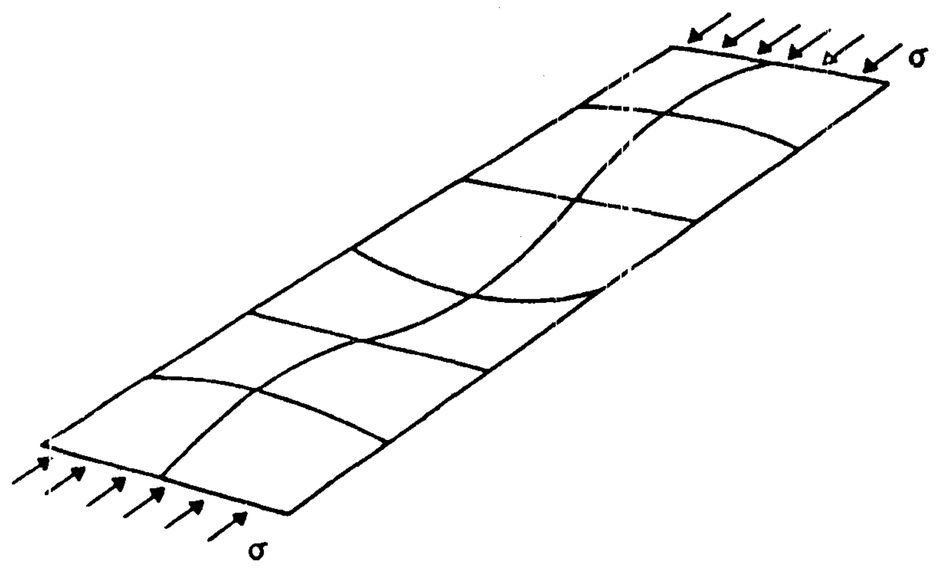
به این معنی که برای خوردگی با حجم ثابت مثلا" ۱۰٪ در وسط ورق به ازای سطح خورده شده ۲۵٪ از سطح کل و ضخامت خورده شده ۴۰٪ از ضخامت کل ورق بحرانی ترین حالت خوردگی را داشته و باربری حداقل است و این گونه نیست که هرچه سطح افزایش یابد و یا هرچه ضخامت افزایش یابد وضعیت بحرانی تری ایجاد گردد.

۵ – باتوجه به منحنی های رسم شده برای حجم های مشخص خوردگی اگر در شاخه نزولی منحنی قرار داشته باشیم باید از پیشروی سطحی خوردگی در مقابل پیشروی عمقی آن جلوگیری نمود و اگر در شاخه صعودی منحنی قرار داشته باشیم باید از پیشروی عمقی خوردگی در مقابل پیشروی سطحی آن جلوگیری شود.

۶ – حساسیت بار بحرانی نسبت به تغییر ضخامت خوردگی در سطوح بالای خوردگی بسیار بیشتر از سطوح پایین خوردگی است. به عنوان مثال اگر سطح خوردگی برابر ۵۰٪ سطح کل ورق باشد و ضخامت ناحیه خورده شده از ۵۰٪ ضخامت کل به ۴۰٪ تغییر یابد بار بحرانی کاهش چشمگیرتری نسبت به حالتی خواهد داشت که سطح خوردگی ۲۰٪ سطح کل ورق باشد و ضخامت ناحیه خورده از ۵۰٪ ضخامت کل ورق به ۴۰٪ تغییر یابد.

ب – ظرفیت باربری ورق خورده شده

با استفاده از نرم افزار ALGOR و با کمک روش اجزاء محدود و ردیابی تغییرشکل غیرخطی کمانشی



شکل ۱۲: تغییر شکل کمانشی ورق مستطیلی.

ورق که از نوع غیرخطی هندسی و نیز غیرخطی مادی می باشد مشاهدات، زیر انجام گرفت :

۱ – در ورقهای ضخیم قبل از رسیدن به بار بحرانی ورق تخریب کلی با تسلیم ورق صورت می گیرد به عبارت دیگر در ورقهای نازک بار بحرانی پشت سرگذاشته می شود و در اثر تغییرشکلهای زیاد پس از بار بحرانی و ایجاد تنشهای خمشی تسلیم، تخریب در ورق صورت می گیرد. منظور از تخریب ورق افزایش ناگهانی تغییرشکلها می باشد.

۲ – در کلیه حالات خوردگی ضریب اطمینان در ورقی که تحت اثر خوردگی قرار می گیرد کاهش می یابد و این کاهش می تواند تا رسیدن به ضریب اطمینان یک و در نتیجه از رده خارج شدن ورق ادامه یابد.

۳ – در یک جمع بندی می توان گفت ورقهای مربعی که حجم خوردگی در وسط آنها بیشتر از ۱۵٪ حجم کل

Archive of SID
www.SID.ir

Archive of SID

باشد و همچنین ورقهایی که حجم خوردگی در لبه های موازی بارگذاری در آنها بیشتر از ۳۰٪ حجم کل و نیز ورقهایی که حجم خوردگی در لبه های عمود بر بارگذاری در آنها بیشتر از ۲۰٪ حجم کل ورق باشد نیاز به چاره اندیشی دارند. (ضریب اطمینان تقریبی یک دارند)

۴ – ورقهایی که طبق آیین نامه طراحی فولاد دارای نسبت عرض به ضخامت مناسب می باشند (ورقهای ضخیم) حساسیت کمتری نسبت به خوردگی در باربری خود نشان می دهند و تاثیر خوردگی در ورقهای نازک بسیار چشمگیر است. این مطلب را می توان نتیجه همان تغییرشکلهای بزرگ در ناحیه پس از کمانش ورق و در نتیجه سریعتر تسلیم شدن ورق دانست.

۵ – به علت تغییرشکل کمانشی ورقهای بلند و مستطیلی که ورق را به چندین ورق مربعی تقسیم می کند، می توان گفت بررسی باربری ورقهای بلند خورده شده بسیار نزدیک به ورقهای مربعی می باشد و کاهش باربری هرکدام از قطعات مربعی منجر به کاهش باربری در کل ورق بلند می گردد. (شکل ۱۲)

۶ – خوردگی در لبه های عمود بر بارگذاری در ورقهای بلندبسیار بحرانی تر از خوردگی در لبه های موازی بارگذاری ورق می باشد.

۷ – خوردگی در ورق بلند به شرطی که کل عرض کوچک ورق را در برگیرد در هر کجا از طول ورق که باشد تاثیر چندانی در مقدار باربری نخواهد داشت.

۸ – در ورقهای بلند، ابعاد خوردگی و نه درصد سطح خورده شده پارامترهای مهمی در باربری آنها می باشد. مثلا" خوردگی با بعد طولی ۱۲ سانتی متر در کل عرض ورقهای ۳۰×۶۰، ۳۰×۱۲۰ و ۳۰×۱۸۰ سانتی متر دارای تاثیر یکسانی می باشند حال آنکه حجم خوردگی در هرکدام متفاوت است.

به عبارت بهتر می توان گفت پارامتر مهم در خوردگی ورقهای مستطیلی و بلند حاصلضرب درصد خوردگی ورق در نسبت طول به عرض ورق $(\frac{a}{b})$ می باشد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق بخشی از یک پروژه تحقیقاتی است. لذا بدینوسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه و دانشکده فنی جهت ایجاد زمینه لازم برای انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می شود.

معرفی نمادها

h,t : ضخامت ورق

N_x : نیروی فشاری وارد بر واحد طول ورق در جهت x

N_y : نیروی فشاری وارد بر واحد طول ورق در جهت x

$N_{xy}=N_{yx}$: نیروی برشی وارد واحد طول ورق

w : تغییرمکان عمود بر صفحه ورق

μ : ضریب پواسون

D : سختی خمشی ورق در واحد طول ورق

U_t: انرژی کل ورق

U_m : انرژی پتانسیل تغییر شکلهای خمشی

U_w : انرژی پتانسیل بارهای خارجی

A_c : سطح خورده شده ورق

t_0 : ضخامت اولیه ورق

t_c : ضخامت خورده شده ورق

h_c : ضخامت ورق در ناحیه خورده شده

a : طول ورق

b : عرض ورق

P_c : بار بحرانی ورق خورده شده

P_0 : بار بحرانی ورق سالم

E : مدول الاستسیته

E_t : مدول مماسی

مراجع

1 - Graff, William J. (1981), Introduction to Offshore Structures, Design, Fabrication, Installation. Gulf Publication Co., Houston, Texas,.

2 - Ohyagi, M. (1987). "Statistical Survey on Wear of Ship's Structural Members." *N.K. Technical Bulletin*, Tokyo

www.SID.ir

Archive of SID

3 - Melchers, R.E. and Aharnmed, M.(1994). "Nonlinear Modeling of Corrosion of Steel in Marine Environments." *Research Report No. 106.09.1994*, University of Newcastle, New South Wales, Australia, ISBN 0-7259-0849-1.

4 - Dinno, D.K. and Birkemoe, P.C. (1997)."Degradation of Strength Resulting From Corrosion of Girder Webs." SSRC Annual Technical Session & Meeting, Toronto, Canada, 295-306.

5 - Timoshenko, S. and Woinowsky-Krieger, S. (1959). Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill Book Co.

6 - Timoshenko, S. and Gere, J. (1961). Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill Book Co.

7 - Murray, N. W. (1984). Introduction To The Theory Of Thin-Walled Structures, Oxford Science Publication.

۸ - رحمتی پور، ع. ا. "بررسی ظرفیت باربری کمانشی ورقهای خورده شده." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی ، دانشگاه تهران، اردیبهشت (۱۳۷۸).

واژه نامه :

1 – Corrosion	خوردگی
2 – Splash Zone	ناحیه پاشش آب
3 – General Corrosion	خوردگی عمومی
4 – Marine Structures	سازه های دریایی
5 – Mean & Max. Thickness	ضخامتهای میانه و حداکثر
6 – Steel Specimens	ورق فولادی
7 – Classification Societies	انجمنهای کلاس دهنده
8 – Bifurcation Point	نقطع انشعابی

www.SID.ir