استحکام کمانشی ورقها در ساختمان کف کشتی

محمدرضا خدمتی[1]

۱- استادیار، عضوهیئت علمی دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

به منظور بررسی رفتار کمانشی و استحکام نهایی ورق کف کشتی، یک سری تحلیلهای الاستوپلاستیک به کمک روش اجزای محدود بر روی ورقهای تقویت نشده در ساختمان کف کشتی انجام می‌شود. بدین منظور بخشی از ورق کف کشتی با احتساب شرایط مرزی تقارن در نظر گرفته می‌شود. همچنین یک سری تحلیلهای الاستیک به کمک روش اجزای محدود بر روی ورقهای ممتد بدون تقویت کننده انجام می‌گردد تا بدان وسیله اثر فشار جانبی بر روی رفتار کمانشی ورق ممتد مشخص شود.

واژه‌های کلیدی: ورق ممتد- رفتار کمانشی- استحکام نهایی

BUCKLING STRENGTH OF PLATES IN SHIP BOTTOM STRUCTURE

Abstract

To investigate buckling/ultimate strength of ship bottom plates, a series of elastoplastic large deflection analyses is performed applying finite element method. To achieve this purpose, symmetrical conditions are imposed on the plate boundaries. Also a series of elastic large deflection analyses is done in order to assess buckling behaviour and strength of continuous plates under combined lateral pressure and inplane compression.

Keywords: Continuous Plate – Buckling Behaviour – Ultimate Strength

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.2.3.5]

مقدمه

اخیرا فولادهای با استحکام کششی بالا [1] به طور گسترده ای در ساختمان کشتی ها بکار گرفته می شوند که نتیجه آن امکان استفاده از ورقهای نازکتر می باشد. از سویی دیگر ، فاصله بین تقویت کننده ها را نمی توان بدلیل محدودیت ناشی از فرآیند ساخت ، چندان کم کرد. نتیجتا ضریب لاغری پانل های ورقه ای محصور میان تقویت کننده های طولی و عرضی رفته رفته زیاد شده و ضخامت ورق را می بایست از شرط عدم وقوع کمانش موضعی ورق تعیین کرد. ورقهای کف کشتی در حالت کلی تحت تنشهای فشاری درون صفحه ای دو محوری ناشی از خمش دو محوری ساختمان کف و همچنین فشار جانبی قرار دارند.

در بسیاری از کارهای تحقیقاتی انجام شده، مطالعه به بررسی رفتار ورقهای محصور میان تقویت کننده های طولی و عرضی (ورق ایزوله شده) محدود شده و تاثیر فشار جانبی بر روی رفتار ورق با احتساب شرایط مرزی ساده [2] در امتداد لبه های ورق مورد توجه قرار گرفته است. هر گاه چنین شرایط مرزی در اطراف ورق در نظر گرفته شود ، تنش تسلیم اولیه (ترازی از تنش که در آن اولین تسلیم شدگی در ورق بدست می آید) و استحکام نهایی ورق با افزایش فشار جانبی مؤثر بر ورق ، به شدت تنزل می کند.[1]

هرگاه فشار جانبی بزرگی بر ورق کف کشتی اعمال شود ، ورق در دو طرف تقویت کننده ها به یک سمت تغییر شکل می یابد. در این حالت می توان فرض کرد که ورق به هنگام اعمال بارهای فشاری درون صفحه ای (علاوه بر فشار جانبی مذکور) ، به مثابه یک ورق با شرایط مرزی گیر دار رفتار می کند. نتیجتا استحکام کمانشی ورق افزایش می یابد. این اثر در حقیقت اثر فشار جانبی بر روی استحکام کمانشی ورق می باشد. از سویی دیگر ، تقویت کننده ها در محل اتصال به ورق موجب اعمال نوعی محدودیت دورانی بر روی مرز اتصال ورق با خود شده که نتیجتا استحکام کمانشی ورق در اثر وجود تقویت کننده ها افزایش می یابد. این اثر نیز موسوم به اثر تقویت کننده ها میباشد. از اینروست که برخی محققین به مطالعه رفتار ورقهای گیر دار مبادرت ورزیده اند[3-1]

در این تحقیق ، رفتار ورقها در ساختمان کف کشتی ها بر اساس یک سری تحلیل های الاستیک و الاستو ـ پلاستیک با کمک روش اجزای محدود، مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد

منظور از تحلیل الاستیک یک ورق ، بررسی رفتار کمانشی الاستیک و تعیین تنش کمانشی الاستیک آن ورق می باشد. در این تحلیل ، مصالح ورق از رفتاری کاملا خطی و الاستیک برخوردارند (به عبارتی دیگر منحنی تنش – کرنش مصالح ورق ، بصورت خطی با شیبی برابر با مدول الاستیسیته مصالح ورق (E) در نظر گرفته می شود).

از سویی دیگر هرگاه پس از وقوع کمانش الاستیک در ورق همچنان بارگذاری درون صفحه ای بر روی ورق افزوده گردد ، تسلیم شدگی در ورق دیده می شود. با افزایش بیشتر بار درون صفحه ای فشاری ، دامنه تسلیم شدگی در ورق گسترش یافته و ورق به استحکام نهایی خود دست می یابد.

تحلیل رفتار ورق پس از نقطه کمانش الاستیک و تا نقطه استحکام نهایی و حتی فراتر از آن نقطه ، اصطلاحا به تحلیل الاستوپلاستیک موسوم است.

نرم افزار محاسباتی

کلیه محاسبات اجزای محدود باکمک نرم افزار ULSAS انجام شده است .قابلیت های ULSAS درتحلیل رفتارکمانشی وانهدام سازه های جدارنازک طی محاسبات مختلف چند معیاری درکمیته های فنی کنگره بین المللی سازه کشتیها وسازه های فراساحلی تشریح شده است[4,5]. درULSAS ازیک المان پوسته ای ایزوپارامتریک با چهارگره استفاده می شود [6]. غیرخطی های هندسی ومواد دررابطه سازی این نوع المان مورداستفاده قرارگرفته است. ویژگیهای تحلیل به کمک این المان عبارتنداز:

[1]-High Tensile Strength Steels

[2] - Simply-Supported Boundary Conditions

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.2.3.5]

(۱) معادله کارمجازی برحسب مؤلفه های کرنش تصحیح شده گرین[1] ومؤلفه های تنش تصحیح شده کیرشوف[2] نوشته شده اندتابه کمک آن ماتریس سختی المان بدست آید .

(۲) نموهای محاسبه شده تنش کیرشوف[3] درهرمرحله ازمحاسبات به نموهای تنش ژاومن[4] تبدیل می شوند [7] دراین نوع تبدیل ، نموهای کرنش قائم درامتداد ضخامت المان به گونه ای تعیین می شوند که شرایط تنش صفحه ای حفظ گردد. این نوع تبدیل تنش موجبات انجام تحلیلهایی باتغییرشکلهای بزرگ رافراهم می آورد.

(۳) ازتئوری جریان خمیری[5] با معیارتسلیم فون مایزز[6] به کارگرفته می شود.

(۴) رفتارماده مورداستفاده درالمانها بصورت الاستیک ، همراه با سخت شدگی های پس ازنقطه تسلیم درنظرگرفته می شود.

(۵) سختی پیشنهاشده توسط کانوک ونوکولچای [8] به منظورجلوگیری ازسینگولاریتی مرتبط با دوران جسم صلبی درصفحه به ماتریس سختی المانها اضافه می شوند.

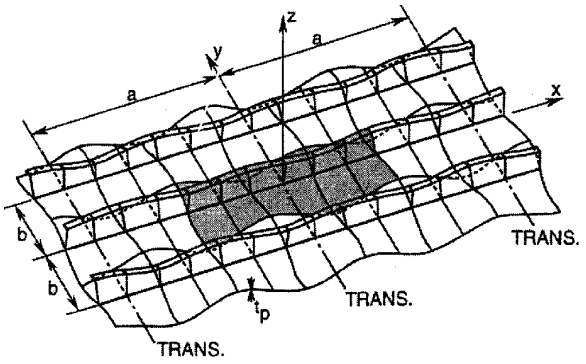
(۶) همچنین سختی پیشنهادشده توسط فلاناگون و بلیچکو[9] به منظورجلوگیری ازناپایداری درمودآورگلس[7] درماتریس سختی المانها درنظرگرفته می شود.

(۷) ازروش کریسفیلد[8] به منظور بررسی ودستیابی به پاسخها درمحدودفراکمانشی دربرنامه ULSAS استفاده می گردد.

[1] - Updated Green's strain components
[2] - Updated Kirchhoff's stress components
[3] - Kirchhoff's stress increments
[4] - Jaumann's stress increments
[5] - Plastic flow theory
[6] - Mises's yield condition
[7] - Hourglass mode instability
[8] - Crisfield method

مدل در نظر گرفته شده

ورق کف کشتی را می توان به صورت یک ورق ممتد تقویت شده با تقویت کننده هایی همسان که بطور متحد الفاصله نسبت به یکدیگر قرار گرفته اند ، در نظر گرفت. در حالت عمومی ، پانلهای ورقه ای واقع بین تقویت کننده ها دارای تغییر شکل های اولیه هستند. این تغییر شکل های اولیه از یک مود زین اسبی[9] بر خوردار هستند. ناحیه هاشور خورده در شکل(۱) که اصطلاحا به مدل DS/DB [10] موسوم است ، در محاسبات اجزای محدود در نظر گرفته شده است. در امتداد هر یک از مرزهای این مدل ، شرط یکنواخت بودن حرکت درون صفحه ای مرز در راستای عمود بر مرز اعمال شده است. از سویی برای تغییر شکلهای خارج از صفحه ای ، شرایط تقارن در امتداد مرزها در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- ورق ممتد تقویت شده

در این تحقیق ، ورقهایی از ساختمان کف یک کشتی فله بر[11] و یک نفتکش غول پیکر[12] موجود انتخاب شده اند. ابعاد ورقها و تقویت کننده ها در جدول (۱) جمع بندی شده است. ورقهای ممتد تقویت شده توسط المانهای Shell ، المان بندی می شوند.

[9] - Hungry-Horse Mode Initial deflection
[10] - Double Span-Double Bay Model
[11] - Bulk Carrier
[12] - VLCC

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.2.3.5]

جدول ۱ - ابعاد ورقهای کف انتخاب شده برای تحلیل

Type Of Ship	*Plate Panel Dimensions* (mm)	*Stiffener Dimensions* (mm)
Bulk Carrier	$a \times b \times t = 2400 \times 800 \times 13.5$	$h_w \times b_f \times {}^{t_w}\!/_{t_f} = 250 \times 90 \times {}^{9}\!/_{15}\ (angle\ bar)$
VLCC	$a \times b \times t = 4200 \times 840 \times 19$	$h_w \times t_w + b_f \times t_f = 625 \times 14 + 200 \times 30\ (tee\ bar)$

قاب عرضی و تقویت کننده در مدلهای تحلیل شده در نظر گرفته نمی شود، منتها تغییر شکلهای ورق در امتداد محل استقرار قاب عرضی و تقویت کننده محدود می گردد. تغییر شکل ورقهای ممتد در مود زین اسبی، توسط رابطه زیر بیان می گردد:

$$w_0 = \alpha_1 \left| \sum A_{om} Sin \frac{m\pi x}{a} Sin \frac{\pi y}{b} \right| \qquad (۱)$$

ماکزیمم مقدار تغییر شکل موضعی پانلهای ورقه ای برابر با $0.01t$ ، با احتساب ضرائب ارائه شده در جدول(۲) ، در نظر گرفته می شود[2]. از سویی مقدار α_1 برای چهار پانل ورقه ای تفکیک شده توسط تقویت کننده طولی و قاب عرضی ، برابر با ۱/۰، ۱/۰۱، ۱/۰۲و ۱/۰۳ می باشد. در تحلیل های حاضر ، تاثیر تنشهای پس ماند ناشی از جوشکاری در نظر گرفته نشده است.

جدول ۲ - ضرائب مؤلفه های مختلف در مود تغییر شکل اولیه

${}^{A_{011}}\!/_{t}$	${}^{A_{09}}\!/_{t}$	${}^{A_{07}}\!/_{t}$	${}^{A_{05}}\!/_{t}$	${}^{A_{03}}\!/_{t}$	${}^{A_{01}}\!/_{t}$	*Type of Ship*
-0.00118	0.0	0.004725	0.01674	0.045955	0.1675	*Bulk Carrier*
0.0054892	0.011514	0.021335	0.038317	0.074683	0.241676	*VLCC*

تغییر شکل ورقهای ممتد در مود کمانشی[1] ، توسط رابطه زیر بیان می گردد:

$$w_0 = A_{om} Sin \frac{m\pi x}{a} Sin \frac{\pi y}{b} \qquad (۲)$$

مقدار m برای پانلهای ورقه ای کف کشتی فله بر برابر با ۳ و برای پانلهای ورقه ای کف نفتکش برابر با ۵ در نظر گرفته شده است. تنش تسلیم ورق در مورد کشتی فله بر برابر با ۳۱۳،۶ مگاپاسکال و در مورد نفتکش برابر با ۳۵۲،۸ مگاپاسکال در نظر گرفته شده اند. همچنین در تحلیل های الاستوپلاستیک فرض می شود که مصالح دارای یک منحنی تنش- کرنش خطی تا نقطه تسلیم بوده ، پس از آن ، منحنی تنش- کرنش به طور خطی یک حالت صعودی با شیبی برابر با ${}^{E}\!/_{65}$ پیدا میکند. در کلیه موارد ، فشار جانبی بطور تدریجی تا تراز مورد نظر اعمال شده است. آنگاه تنشهای درون صفحه ای طولی ، عرضی بطور تدریجی بر مدلهای تحلیل شده واردشده اند.

[1] -Buckling Mode Initial Deflection

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.2.3.5]

اثر فشار جانبی بر کمانش موضعی پانل‌های ورقه ای ممتد

تحلیل مولفه های تغییر شکل

در حالت کلی ، تغییر شکل یک ورق ممتد کمانه کرده را می توان توسط رابطه زیر بیان نمود:

$$w = \sum_i \sum_j A_{ij} Sin\ \frac{\pi i x}{a} Sin\ \frac{\pi j y}{b} + \frac{1}{2} \sum_k \sum_l B_{kl} Sin\ \frac{\pi k x}{a} \times \left(1 - Cos\ \frac{2\pi l y}{b}\right) + \frac{1}{2} \sum_m \sum_n C_{mn} \left(1 - Cos\ \frac{2\pi m x}{a}\right) \times Sin\ \frac{\pi n y}{b} + \frac{1}{4} \sum_p \sum_q D_{pq} \left(1 - Cos\ \frac{2\pi p x}{a}\right) \times \left(1 - Cos\ \frac{2\pi q y}{b}\right) \quad (۳)$$

که در آن : جمله اول ، معرف تغییر شکل پانل ورقه ای با مرزهای ساده ، جمله دوم ، معرف تغییر شکل پانل ورقه ای با مرزهای طولی گیر دار و مرزهای عرضی ساده ، جمله سوم ، معرف تغییر شکل پانل ورقه ای با مرزهای طولی ساده و مرزهای عرضی گیردار ، جمله چهارم ، معرف تغییر شکل پانل ورقه ای با مرزهای گیردار می باشد

از آنجا که تحلیل اجزای محدود تنها مقادیر تغییر شکلها در نقاط گرهی را می دهد ، لذا ضرایب مؤلفه های مختلف در رابطه (۳) را نمی توان بطور مستقیم بدست آورد. بدین منظور در صورتیکه تغییر شکلهای اولیه و نهایی در نقطه گرهی $r(x_r, y_r)$ را بترتیب برابر با w_r, w_{0r} فرض کنیم ، با استفاده از روش کمترین مربعات می توان به روابط زیر دست یافت :

$$\frac{\partial}{\partial A_{ij}} \sum_{r=1}^{n_{node}} \left\{w(x_r, y_r) - (w_r - w_{0r})\right\}^2 = 0 \quad (۴)$$

$$\frac{\partial}{\partial B_{kl}} \sum_{r=1}^{n_{node}} \left\{w(x_r, y_r) - (w_r - w_{0r})\right\}^2 = 0 \quad (۵)$$

$$\frac{\partial}{\partial C_{mn}} \sum_{r=1}^{n_{node}} \left\{w(x_r, y_r) - (w_r - w_{0r})\right\}^2 = 0 \quad (۶)$$

$$\frac{\partial}{\partial D_{pq}} \sum_{r=1}^{n_{node}} \left\{w(x_r, y_r) - (w_r - w_{0r})\right\}^2 = 0 \quad (۷)$$

روابط (۴) تا (۷) در حقیقت تشکیل یک دستگاه معادلات خطی همزمانی نسبت به ضرائب A_{ij} ، B_{kl} ، C_{mn} و D_{pq} می دهند.منظور از n_{node} ، تعداد نقاط گرهی در نظر گرفته شده در مدل اجزای محدود ورق می باشد.

کمانش ورق ممتد واقع در معرض ترکیب تنشهای فشاری درون صفحه ای طولی و فشار جانبی

یک سری تحلیل های الاستیک به کمک روش اجزای محدود بر روی ورق ممتد بدون حضور تقویت کننده انجام شده است. در این تحلیلها ورق ممتد در معرض ترکیبی از تنشهای فشاری درون صفحه ای و فشار جانبی واقع است. هدف از تحلیلها نیز بررسی تاثیر فشار جانبی بر روی رفتار کمانشی ورق ممتد (که در آن از چهار پانل ورقه ای مجاور هم استفاده می گردد) می باشد.

منحنی های تنش متوسط – تغییر شکل برای حالت کشتی فله بر ، برای مقادیر مختلف فشار جانبی در شکل (۲) نمایش داده شده اند. تغییر شکلها در دو نقطه A و B (مراکز پانلهای مجاور) در نظر گرفته شده اند. منحنی های نمایش داده شده با خطوط توپر ، مربوط به حا لاتی می شوند که در آن ها تغییر شکل اولیه پانلهای ورق ممتد در یک مود زین اسبی می باشد. از سویی دیگر ، منحنی های نمایش داده شده توسط خطوط چین دار معرف نتایج در حالاتی هستند که در آن ها تغییر شکل اولیه پانلهای ورق ممتد در یک مود کمانشی می باشد.

فشار جانبی برابر با ۰ ، ۱۵ ، ۳۰ ، ۴۵ و ۶۰ متر ارتفاع آب در نظر گرفته شده است. در این منحنی ها ، مقدار تنش متوسط نسبت به استحکام کمانشی یک ورق متکی بر تکیه گاه های ساده و هم اندازه با پانلهای ورق ممتد ، بی بعد گردیده است.

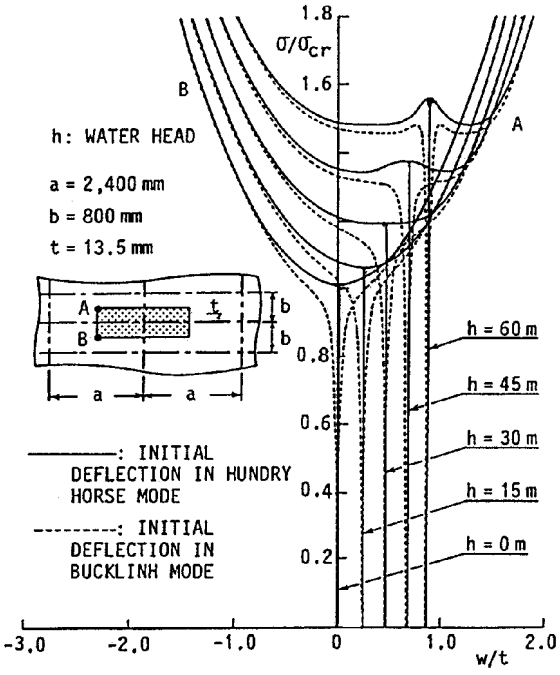
در غیاب فشار جانبی ، برای ورقهایی که تغییر شکل اولیه آنها در یک مود کمانشی است ، تغییر شکل ورق با میل کردن تنش متوسط مؤثر بر آن به سمت استحکام کمانشی ورق متکی بر تکیه گاه ساده، افزایش می یابد. از سویی دیگر ، برای حالتی که تغییر شکل

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.2.3.5]

اولیه ورق در یک مود زین اسبی است ، زمانیکه مقدار تنش متوسط متجاوز از استحکام کمانشی ورق متکی بر تکیه گاه ساده است ، تغییر شکل زین اسبی ورق تبدیل به تغییر شکلی از مود ساده یا کمانشی می شود. این نوع کمانش که در آن به طور آنی یا لحظه ای تغییر شکل ورق ممتد از یک مود زین اسبی (متشکل از مؤلفه های تغییر شکل مود گیر دار ، D_{pq}) به یک مود کمانشی یا ساده (متشکل از مؤلفه های تغییر شکل مود ساده ، A_{ij}) تبدیل می شود ، را اصطلاحا کمانش دو شاخه[1] می نامند.

با مراجعه به شکل (۲) دیده می شود که استحکام کمانشی ورق ممتد با افزایش فشار جانبی افزوده می گردد ، جدا از آنکه تغییر شکل اولیه پانلهای آن در چه مودی هستند. زمانیکه تغییر شکل اولیه پانلهای ورق ممتد در مود زین اسبی است ، کمانش از نوع دو شاخه ای در حضور فشار جانبی همچنان دیده می شود.

این در حالی است که چنین نوع کمانشی برای حالتی که پانلها از یک مود کمانشی تغییر شکل بهره مندند ، دیده نمی شود. علت افزایش استحکام کمانشی ورق ممتد با افزایش فشار جانبی را می توان در حالتی که ورق کف کشتی فله بر دارای مود زین اسبی تغییر شکل است ، چنین تفسیر کرد که با افزایش مقدار فشار جانبی مؤثر بر ورق ممتد ، تغییر شکل اولیه زین اسبی پانلهای ورق ممتد نیز به گونه ای افزایش می یابند که در آن مؤلفه های تغییر شکل مود گیر دار (D_{pq}) تقویت می شوند. زمانیکه کمانش دو شاخه روی می دهد ، مقدار تنش درون صفحه ای طولی بیشتری نیاز است که تغییر شکل ورق ممتد را از یک مود زین اسبی (یا تقریبا گیردار) به مود کمانشی (ساده) تبدیل کند.بنابر این استحکام کمانشی ورق ممتد افزایش می یابد.



شکل ۲- رفتار کمانشی یک ورق ممتد از کف یک کشتی فله بر قرار گرفته در معرض ترکیب فشار جانبی و تنش های درون صفحه ای طولی.

[1] - Bifurcation Buckling

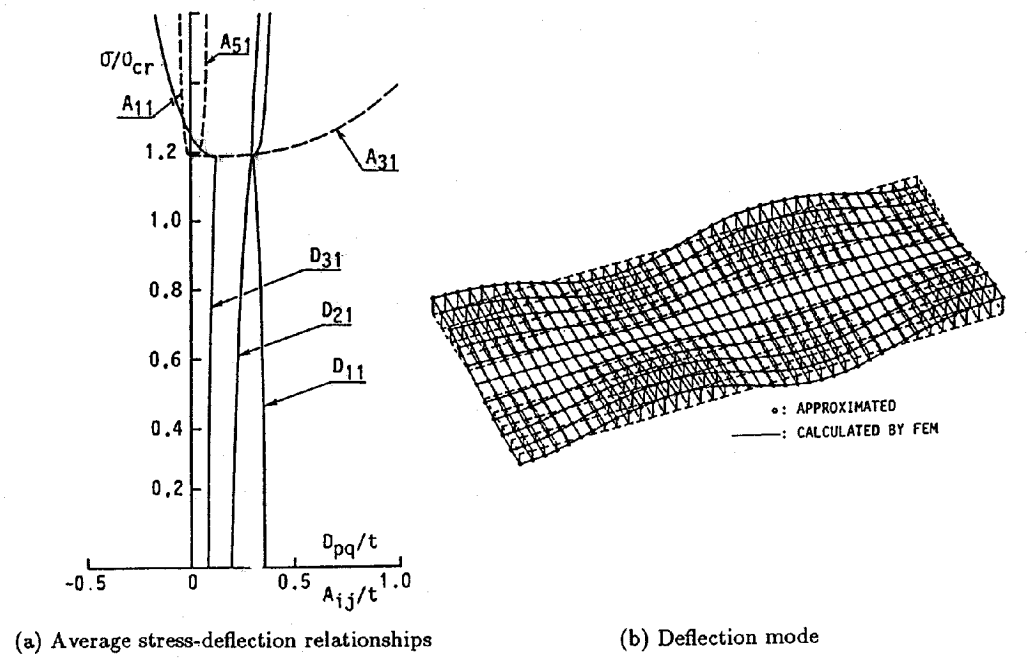
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.2.3.5]

افزایش استحکام کمانشی در حضور فشار جانبی برای ورق ممتد کف کشتی فله بر با تغییر شکل اولیه در مود کمانشی را نیز می توان چنین تعبیر نمود که ، افزایش مقدار فشار جانبی مؤثر بر ورق ممتد باعث می گردد که مؤلفه های مود گیر دار (D_{pq}) افزایش یافته علی رغم آنکه مؤلفه های مود ساده (A_{ij}) نیز با مقادیر اندک حضور دارند. نتیجتا مؤلفه های مود گیر دار با پیدایش مود ساده کمانشی مقابله نموده و یا به عبارتی دیگر پدید آمدن مود ساده کمانشی را به تاخیر می اندازد . این مقابله (مقاومت) و یا تاخیر با افزایش فشار جانبی بیشتر شده و نهایتا استحکام کمانشی ورق ممتد نیز افزوده می گردد. رفتاری مشابه با آنچه که در مورد ورق کف کشتی فله بر تشریح شد ، در مورد ورق کف کشتی نفتکش نیز تایید می گردد منتها با این تفاوت که تعداد نیم موجها در حالت اخیر ۵ می باشد ، به عبارتی مود کمانشی ورق ممتد کف کشتی نفتکش متشکل از ۵ نیم موج است.منحنی های تنش متوسط – مؤلفه های تغییر شکلی ، برای حالتی که ورق ممتد کف کشتی فله بر از یک مود زین اسبی تغییر شکل اولیه برخوردار بوده و در معرض فشار جانبی $h_{water} = 30\ m$ قرار دارد ، در شکل(۳) (a) آورده شده اند. همچنین شکل (۳) (b) ، مود تغییر شکل را در حالت مذکور ، زمانیکه $\sigma_x / \sigma_{x_{Cr}} = 1.54$ می گردد ، به نمایش می گذارد. σ_x ، تنش متوسط طولی مؤثر بر ورق ممتد بوده و $\sigma_{x_{Cr}}$ ، استحکام کمانشی آن را در حالتی که $h_{water} = 30\ m$ است ، نشان می دهد.

از شکل(۳) (a) دیده می شود ، زمانیکه $\sigma = 0$ است ، تنها مؤلفه های تغییر شکل D_{pq} حضور دارند. این امر بدان علت است که فشار جانبی موثر ($h_{water} = 30\ m$) منجر به افزایش تغییر شکل اولیه ورق ممتد (که در یک مود زین اسبی بوده) می گردد و چون مود تغییر شکل اولیه ورق ممتد (مود زین اسبی) تقریبا مشابه با مود تغییر شکل ورق ممتد واقع در معرض فشار جانبی مؤثر (مود گیردار) می باشد ، لذا تنها مؤلفه ها ی تغییر شکلی D_{pq} دیده می شوند. با افزایش تنش متوسط مؤثر (σ) بر ورق ممتد مذکور، تغییرات شدیدی در این مؤلفه ها دیده نمی شود . در لحظه وقوع کمانش دو شاخه ، مولفه تغییر شکل A_{31} بطور ناگهانی پیدا شده و رشد می کند ، در حالی که برخی از مؤلفه های D_{pq} کاهش یافته ، برخی از آنها ثابت مانده ، همچنین برخی از دیگر مؤلفه های تغییر شکلی مود ساده مثلا A_{11} و A_{51} نیز با مقادیر کم وجود دارند . علت عدم حذف کامل مولفه های مود گیر دار (D_{pq}) را می توان چنین تفسیر کرد که در لحظه وقوع کمانش و پس از آن ، فشار جانبی همچنان بر ورق ممتد اعمال میگردد و حذف نشده است .

شکل(۳) (b) نیز مقایسه ای میان تغیر شکل بدست آمده در حالت تشریح شده اخیر از آنالیز اجزای محدود و تغییر شکل شبیه سازی شده همان ورق با استفاده از رابطه (۳) ، را به نمایش می گذارد . تطابق خوبی میان آنها دیده می شود و می توان گفت که دقت مولفه های تغیر شکلی استخراج شده از روش کمترین مربعات ، مطلوب و رضایت بخش می باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.2.3.5]



(a) Average stress-deflection relationships (b) Deflection mode

شکل ۳- مولفه ها ی تغییرشکلی و مود کمانشی یک ورق ممتد از کف کشتی فله بر ، واقع در معرض ترکیب فشار جانبی $(h = 30\ m)$ و تنشهای درون صفحه ای طولی

کمانش ورق ممتد واقع در معرض ترکیب تنشهای فشاری درون صفحه ای عرضی و فشار جانبی

شکل(۴) منحنی های تنش متوسط- تغییر شکل را برای حالتی که در آن ورق ممتد کف کشتی فله بر در معرض ترکیب تنشهای فشاری درون صفحه ای عرضی و فشار جانبی قرار گرفته ، نشان می دهد. منحنی های کشیده شده با خط پر ، مربوط به مواردی می گردند که در آنها ورق ممتد از پانلهایی با تغییر شکل اولیه زین اسبی بر خوردار است ، در حالیکه منحنی های کشیده شده با خط چین ، نماینده نتایج برای ورق ممتد با پانلهایی که دارای تغییر شکل اولیه کمانشی هستند ، می باشند.

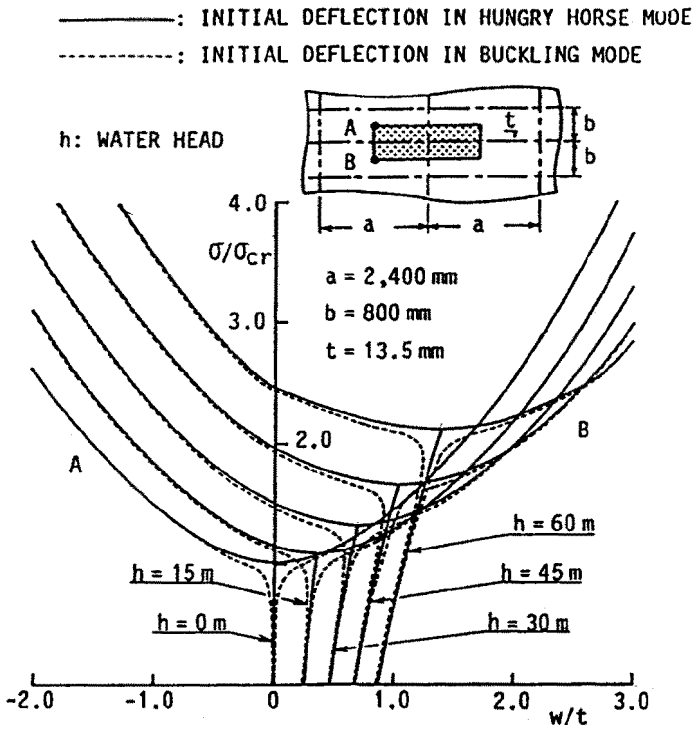
منحنی های تنش متوسط- مؤلفه های تغییر شکلی برای حالتی که ورق ممتد کف کشتی فله بر در معرض ترکیب تنشهای فشاری درون صفحه ای عرضی و فشار جانبی معادل با $h_{water} = 30\ m$ ، قرار گرفته ، در شکل (۵) (a) آورده شده اند. مود تغییر شکل ورق ممتد تشریح شده نیز در هنگامیکه $\sigma / \sigma_{y_{Cr}} = 1.72$ می باشد ، در شکل(۵) (a) نمایش داده شده است.

هنگامیکه ورق (ممتد) در معرض تنش فشاری درون صفحه ای عرضی (σ) قرار گرفته ، مود کمانشی شامل یک نیم موج در امتداد طول ورق و یک نیم موج در امتداد عرض ورق خواهد بود.این مود اساسا مشابه با مود تغییر شکل ورق ممتد واقع در معرض فشار جانبی تنها می باشد ، اگر چه شرایط مرزی چندان مشابه به یکدیگر نمی باشد ، همانطور که در شکل (۵) (b) نمایش داده شده است.این امر می تواند معرف علت این مطلب باشد که چرا تغییر شکل مراکز پانلها از همان ابتدای بارگذاری درون صفحه ای افزایش می یابد.

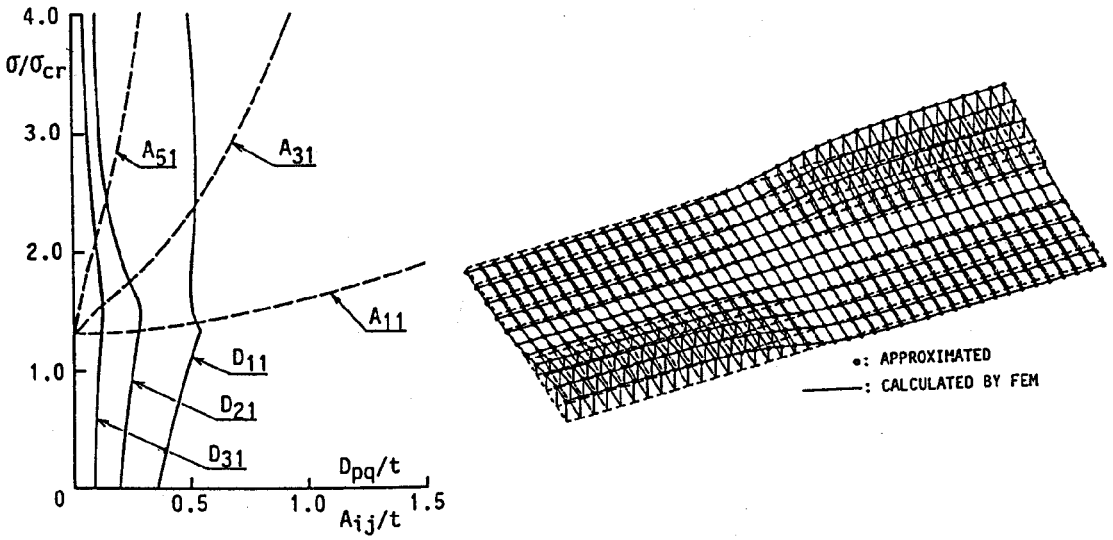
همانند آنچه که در مورد یک ورق ممتد واقع در معرض ترکیب تنشهای فشاری درون صفحه ای طولی و فشار جانبی تشریح گردید ، کمانش از نوع دو شاخه برای حالتی که ورق ممتد از پانلهایی با تغییر شکل اولیه در مود زین اسبی تشکیل شده است ، روی می دهد. پس از وقوع کمانش دو شاخه ، مؤلفه تغییر شکلی A_{11} شروع به افزایش ناگهانی می کند ، شکل (۵) (a). در همان زمان دیگر مؤلفه های تغییر شکلی مود ساده (A_{31} , A_{51}) نیز شروع به افزایش نموده ،

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.2.3.5]

به طوری که بخش میانی پانلها به فرم استوانه ای در می آیند. در حالت اعمال تنش های فشاری درون صفحه ای عرضی نیز همانند حالت اعمال تنش های فشاری درون صفحه ای طولی ، استحکام کمانشی ورق ممتد با افزایش فشار جانبی ، افزوده می گردد ، شکل (۴).



شکل ۴- رفتار کمانشی یک ورق ممتد از کف یک کشتی فله بر واقع در معرض ترکیب فشار جانبی و تنش های درون صفحه ای عرضی.



(a) Average stress-deflection relationships

(b) Deflection mode

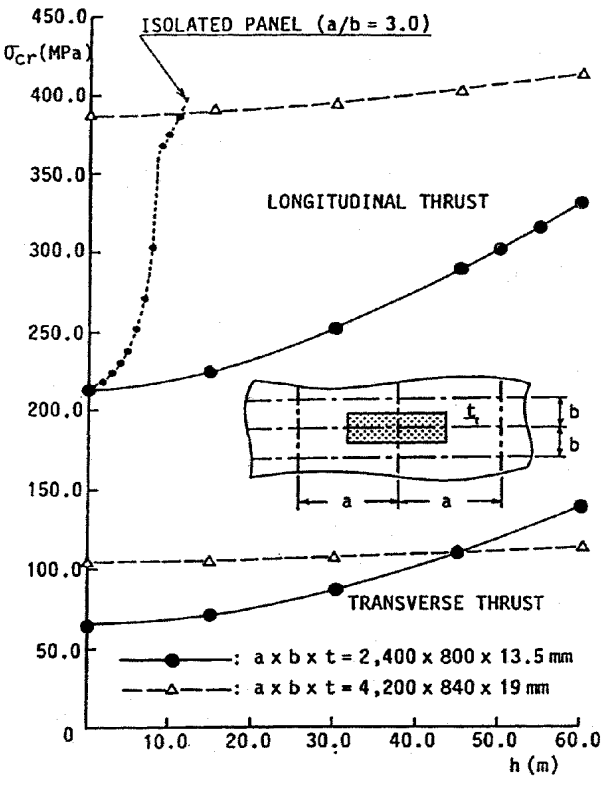
شکل ۵- مولفه های تغییر شکلی و مود تغییر شکل یک ورق ممتد از کف یک کشتی فله بر واقع در معرض فشار جانبی و تنشهای درون صفحه ای عرضی.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.2.3.5]

تاثیر فشار جانبی بر روی استحکام کمانشی

مقادیر عددی استحکام کمانشی بدست آمده از تحلیلهای الاستیک اجزای محدود انجام شده بر روی ورقهای ممتد کف کشتی فله بر و کشتی نفتکش ، برای دو حالت اعمال تنش های فشاری درون صفحه ای طولی و عرضی ، در شکل (۶) در مقابل فشار جانبی (ارتفاع آب) ترسیم شده اند. در هر دو حالت با افزایش فشار جانبی ، مقدار استحکام کمانشی نیز افزایش می یابد. علت این امر آن است که اعمال فشار جانبی بر روی یک ورق ممتد موجب می شود که پانلهای متعدد تشکیل دهنده ورق ممتد به یک سمت تغییر شکل یابند. به عبارتی دیگر ، فشار جانبی مؤثر بر ورق ممتد ، شرایط مرزی حاکم بر اطراف پانلها را از حالت تکیه گاه ساده به حالت تکیه گاه گیردار تغییر می دهد. با افزایش فشار جانبی ، مقدار تغییر شکل پانلهای ورق ممتد نیز (درمود گیردار) افزوده شده و نتیجتا به مقدار بیشتری تنش فشاری درون صفحه ای طولی و یا عرضی برای تبدیل مود مذکور به مود کمانشی (در امتداد طول و یا عرض) نیاز خواهد بود ، یعنی استحکام کمانشی افزوده می گردد.

تغییرات استحکام کمانشی یک پانل ورقه ای مجزا از کف کشتی فله بر ، با فرض شرایط مرزی ساده در اطراف ، نسبت به افزایش فشار جانبی در شکل (۶) توسط خط چین با دایره های توپر کوچک نمایش داده شده است . پانل ورقه ای مجزا یا ایزوله شده در حالت مذکور در معرض ترکیب تنشهای فشاری درون صفحه ای طولی و فشار جانبی قرار گرفته است . با اعمال فشار جانبی بر روی پانل ورقه ای مجزا ، مود تغییر شکل ورق شامل یک نیم موج طولی ویک نیم موج عرضی خواهد بود . به عبارتی دیگر با اعمال فشار جانبی ، مقدار مؤلفه تغیر شکلی A_{11} به شدت افزایش می یابد . از سویی دیگر ، پس از تکمیل بارگذاری جانبی ، اعمال تنشهای فشاری درون صفحه ای طولی موجب رشد بیشتر مقدار مؤلفه تغیر شکلی A_{11} می گردد . بدین ترتیب پیدایش مؤلفه تغیر شکلی A_{31} به تاخیر افتاده و یا به عبارتی استحکام کمانشی به شدت افزوده می گردد .



شکل ۶- اثر فشار جانبی بر استحکام کمانشی یک ورق ممتد

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.2.3.5]

در حالیکه یک پانل ورقه ای مجزا یا ایزوله شده با شرایط مرزی ساده در معرض ترکیب تنشهای فشاری درون صفحه ای عرضی و فشار جانبی قرار گیرد ، از آنجاییکه مودهای تغیر شکل پانل در حالت اعمال تنشهای فشاری درون صفحه ای عرضی تنها و یا در حالت اعمال فشار جانبی تنها ، کاملا مشابه با یکدیگرند (هر دو مود شامل یک نیم موج در جهت طول و یک نیم موج در جهت عرضی می باشند) ، کمانش از نوع دو شاخه ای روی نمی دهد و تعریف و یا تعیین مقدار دقیق بار کمانشی قدری دشوار است .

از آنچه که تا اینجا تشریح شده می توان این نتیجه را گرفت که به هنگام ارزیابی استحکام کمانشی ورق کف کشتیها ، می بایست آنها را به صورت ورق ممتد در نظر گرفت و مطالعه نمود . همچنین می بایست به این نکته اشاره نمود که کلیه تحلیلهای اجزای محدود بررسی شده در اینجا از نوع تحلیل الاستیک بوده و با این فرض افزایش فشار جانبی موجب افزایش استحکام کمانشی ورق ممتد شد. در عمل ، اعمال فشار جانبی ، موجب افزایش تغیر شکلهای ورق ممتد شده و از سوی دیگر ، وقوع تسلیم شدگی را از طریق افزایش تنشهای خمشی ، تسریع می کند . به عبارتی دیگر ، افزایش فشار جانبی تا سقف مشخص و محدودی ، می تواند موجبات افزایش استحکام کمانشی را فراهم آورد .

بحث و نتیجه گیری

از بحث های بالا می توان چنین نتیجه گرفت که :

۱- کمانش دو شاخه ای تنها در حالتی اتفاق می افتد که تغییر شکل اولیه در مود زین اسبی باشد و این پدیده در حالتی که تغییر شکل اولیه ورق در مود کمانشی باشد ، دیده نمی شود.

۲- با افزایش فشار جانبی ، استحکام کمانشی افزایش می یابد.

۳- هنگامیکه ورق در مود تغییر شکل اولیه زین اسبی مورد بررسی قرار می گیرد ، پس از وقوع کمانش دو شاخه ای تغییر شکل از مود زین اسبی به مود کمانشی تغییر می یابد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.2.3.5]

مراجع:

1-Yao,T., Fujikubo, M. and Mizutani, K: " Collapse Behaviour or Rectangular Plates Subjected to Combined Thrust and Lateral Pressure," Trans. West-Japan Soc. Naval Arch., No.92 (1996) ,pp.249-262.
2-Okada, H., Ohshima, K. and Fukumoto Y.: " Compressive Strength of Long Rectangular Plates under Hydrostatic Pressure (3rd Report) – A Case of Plates with All Clamped Edges -," J.Soc. Naval Arch. of Japan, Vol.149 (1981), pp.144-155.
3-Yao, T., Fujikubo, M., Nie, C. and Kamiyama, S.: " Development and Application of Simple Plate Model to Simulate Collapse Behaviour under Thrust," J.Soc. Naval Arch. of Japan, Vol.178 (1995), pp.439-449 .
4-Jensen, J.J., et al.: Report of Committee III.1, Ultimate Strength, Proceedings of the 13th International Ship and Offshore Structures Congress, Trondheim, Norway (1997), pp. 233-283.
5- Yao, T., et al.: Report of Committee VI.2, Ultimate Hull Girder Strength, Proceedings of the 14th International Ship and Offshore Structures Congress, Nagasaki, Japan (2000), pp. 321-391.
6-Toi, Y. Yuge, K., Nagayama, T., and Obata, K.: Numerical and Experimental Studies on the Crashworthiness of Structural Members, Naval Arch. and Ocean Eng., Vol. 26(1988), pp. 91-101.
7-Yamada,Y.: Plasticity and Visco-Elasticity, Tokyo, Baifukan (1980), pp. 44-51.
8- Kanok-Nukulchai: A Simple and Efficient Finite Element For General Shell Analysis, Int J Numer Methods Eng, Vol. 14 (1979), pp. 179-200.
9- Flanagon, D.P., Belytschko, A.: A uniform Strain Hexahedron and Quadrilateral With Orthogonal Hourglass Control, Int J Numer Methods Eng, Vol. 17 (1981),pp. 679-706.
10- Yao, T., Nikolov, P.I. and Miyagawa, Y.: " Influences of Welding Imperfections on Stiffness of Rectangular Plate Under Thrust," in " Mechanical Effects of Welding," Karlsson, L., Lindgren, L.-E. and Jonsson, M. (Eds), IUTAM Symp., Lule Swelden, Springer-Verlag (1992), pp.261-268.
11- Japan Shipbuilding Ressearch Association:" Research on Strength Assessment and Quantitisation of Quality Control Standard of Ship Structure", No.207 Research Committee Report (1993), pp.323-327.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1383.1.2.3.5]