بسم الله الرحمن الرحيم

کلیه‌ی حقوق مادی و معنوی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه/ رساله متعلق به دانشگاه یزد است و هرگونه استفاده از نتایج علمی و عملی از این پایان نامه / رساله برای تولید دانش فنی، ثبت اختراع، ثبت اثر بدیع هنری، همچنین چاپ و تکثیر، نسخه برداری، ترجمه و اقتباس و ارائه مقاله در سمینارها و مجلات علمی از این پایان‌نامه / رساله منوط به موافقت کتبی دانشگاه یزد است.

دانشگاه یزد

دانشکده فنی مهندسی

گروه عمران

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی عمران-سازه

بررسی کمانش موضعی و تغییرشکلی الاستیک و غیرالاستیک در مقاطع مرکب بتن- فولاد با استفاده از روش نوار محدود حبابی

استادراهنما: دکتر حسینعلی رحیمی- دکتر نادر عبدلی

استاد مشاور: دکتر مجتبی ازهری

پژوهش و نگارش: حمیدرضا عسکریه یزدی

تیرماه ۱۳۹۲

تقدیم به

پدر، مادر و

همسر عزیزم

تشکر و قدردانی

تشکر و سپاس فراوان از استاد عزیزم **جناب آقای دکتر حسینعلی رحیمی** که بدون راهنمایی و دلسوزی‌های ایشان انجام این پایان نامه هرگز برایم امکان پذیر نبود.

از **جناب آقای دکتر مجتبی ازهری**، مشاور محترم این پایان‌نامه که از محضر علمی ایشان در طول دوران تحصیلم بسیار بهره مند گشتم ، کمال تشکر را دارم.

همچنین از **خانواده** و همسر **عزیزم** که آرامش روحی و آسایش فکری فراهم نموده‌اند تا در محیطی مطلوب، مراتب تحصیلی خود را به نحو احسن به اتمام برسانم ، سپاسگزاری می‌نمایم .

حمیدرضا عسکریه یزدی

تابستان ۹۲

چکیده

در این پایان‌نامه، به بررسی انواع کمانش‌های موجود در تیرهای مرکب بتن- فولاد پرداخته می‌شود. در این راستا، ساختار و رفتار این گونه تیرها در برابر نیروهای خارجی، به تفصیل بیان می‌گردد. هم‌چنین به تاثیر برشگیرها در انتقال نیروی برشی در سطح تماس بتن و فولاد، به عنوان یکی از اجزای مهم به‌کار رفته در این تیرها، پرداخته می‌شود. سپس، انواع کمانش‌های محتمل در جان و بال مقاطع فولادی، از جمله کمانش موضعی، کمانش جانبی و ... مورد بحث قرار گرفته و معادلات حاکم بر ورق‌های نازک که به دلیل خصوصیات هندسی مناسب، بیشترین کاربرد را در این گونه تیرها دارند، ارائه می‌گردد. در ادامه، به منظور حل معادلات حاکم بر رفتار ورق ها با انواع شرایط مرزی، روش‌های عددی مختلف توضیح داده می‌شوند. از میان این روش‌ها، روش نوار محدود به دلیل مجهولات کمتر و هزینه محاسباتی معقول، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. از این رو، در این پایان‌نامه برروی روش نوار محدود تمرکز بیشتری شده‌است. در ادامه با استفاده از برنامه رایانه‌ای که در جهت تحلیل الاستیک و غیرالاستیک کمانش موضعی و تغییر شکلی تیرهای مرکب تدوین گردیده‌است، مثال‌های متعددی ارائه می‌شود. در نهایت کارایی این روش و نتایج آن، با توجه به نمودارهای حاصل شده، بررسی می‌گردد.

کلمات کلیدی: مقاطع مرکب بتن- فولاد، کمانش ورق، روش نوار محدود.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه وکلیات .....

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ تئوری ورق ۲

۱-۳ کمانش ورق ۷

۱-۳-۱ مفهوم کمانش ۸

۱-۳-۲ انواع کمانش ۱۰

۱-۴ تاریخچه‌ی ورق و تیر مرکب ۱۳

۱-۵ اهمیت تحقیق حاضر ۱۷

۱-۶ محتوای فصول آینده ۱۸

فصل دوم: آشنایی با مقاطع مرکب و رفتار آن‌ها .....

۲-۱ مقدّمه ۲۱

۲-۲ مقاطع مرکب بتن-فولاد ۲۲

۲-۳ رفتار مقاطع مرکب در محل اتصال بتن و فولاد ۲۴

۲-۴ برش‌گیرها ۲۶

۲-۴-۱ نقش برش‌گیرها ۲۶

۲-۴-۲ انواع برش‌گیرها ۲۶

۲-۴-۳ رفتار برش‌گیرها و پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار آن‌ها ۲۸

فصل سوم: معادلات حاکم بر کمانش ورق و روابط انرژی .....

۳-۱ مقدمه ۳۱

۳-۲ فرض‌های حاکم بر رفتار ورق‌های نازک ۳۲

۳-۳ معادله‌ی دیفرانسیل حاکم بر کمانش ورق ۳۴

۳-۳-۱ بررسی تعادل المان ورق تحت خمش ۳۴

۳-۳-۲ روابط بین تنش، کرنش و تغییر مکان ۳۶

۳-۳-۳ محاسبه‌ی نیروهای داخلی بر حسب تغییر مکان w ۴۰

۳-۳-۴ اثرات بارگذاری داخل صفحه در معادله‌ی دیفرانسیل ورق ۴۲

۳-۴ روش‌های انرژی و روش‌های تغییراتی ۴۵

۳-۴-۱ روش انرژی ۴۶

۳-۴-۲ اصل کار مجازی ۴۸

۳-۴-۳ روش گالرکین ۴۹

۳-۵ روش‌های عددی ۴۹

۳-۵-۱ روش تفاضل‌های محدود ۴۹

۳-۵-۲ روش اجزاء محدود ۵۰

فصل چهارم: روش‌های نوار محدود **۵۳**

۴-۱ مقدمه ۵۳

۴-۲ مقایسه روش‌های اجزاء محدود و نوار محدود ۵۳
۴-۳ تاریخچه‌ی روش نوار محدود ۵۵
۴-۴ انواع نوارها و توابع شکل در روش نوار محدود ۵۷
۴-۴-۱ نوار مستطیلی مرتبه پایین ۵۸
۴-۴-۲ نوار مستطیلی مرتبه بالا با خط گره میانی ۵۹
۴-۴-۳ نوار مرتبه بالا مستطیلی با دو خط گره ۶۰
۴-۵ روش نوار محدود عادی ۶۱
۴-۶ روش نوار محدود مختلط ۶۲
۴-۷ روش نوار محدود اسپلاین ۶۳
فصل پنجم: معادلات روش نوار محدود برای بررسی کمانش موضعی و تغییر شکل .....
۵-۱ مقدمه ۶۵
۵-۲ بررسی کمانش موضعی ۶۵
۵-۲-۱ تابع تغییر مکان یک نوار ۶۶
۵-۲-۲ ماتریس سختی الاستیک نوار ۷۰
۵-۲-۳ ماتریس سختی هندسی نوار ۷۳
۵-۲-۴ روش نوار محدود حبابی ۷۸
۵-۳ بررسی کمانش تغییر شکلی ۸۱
۵-۳-۱ تعیین توابع شکل ۸۱
۵-۴ تعیین بار بحرانی ۸۳
فصل ششم: ارزیابی صحت روش و استخراج نتایج .....
۷-۱ مقدمه ۸۵
۷-۲ بررسی همگرایی و صحت نتایج ۸۵
۷-۲-۱ کمانش موضعی ورق تحت فشار یکنواخت ۸۶
۷-۲-۲ کمانش موضعی ورق تحت خمش خالص ۸۸
۷-۲-۳ کمانش تغییرشکلی ناودانی تحت خمش خالص ۸۹
۷-۳ بررسی کمانش موضعی در مقطع مرکب ۹۰
۷-۳-۱ حالت اتصال جان به دال بتنی گیردار ۹۱
۷-۳-۲ حالت بتن ترک خورده (اتصال جان به دال بتنی غیر گیردار) ۱۱۴
۷-۴ بررسی کمانش تغییر شکلی در مقطع مرکب ۱۲۰
فصل هفتم: کمانش غیر الاستیک در مقاطع مرکب .....
۹-۱ مقدمه و تاریخچه ۱۲۷
۹-۲ تئوری کمانش غیر الاستیک ورق ۱۳۰
۹-۳ آنالیز نوار محدود برای کمانش غیر الاستیک ۱۳۳
۹-۳-۱ کمانش موضعی غیر الاستیک ورق چهار طرف مفصل ۱۳۵
فصل هشتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات .....
۱۰-۱ مقدمه ۱۳۹
۱۰-۲ نتیجه گیری ۱۴۰
۱۰-۳ پیشنهادات ۱۴۲

ضمیمه .....
دستور العمل کار با برنامه (منطق پروژه) ۱۴۳
فهرست مراجع **۱۵۱**

فصل اول
مقدمه و کلیات

۱-۱ مقدمه

تیرهایی که از فولاد و بتن ساخته می‌شوند، به تیرهای مرکب[1] معروف هستند. این نوع سیستم سازه‌ای از مقاومت فشاری بتن و مقاومت کششی فولاد به طور هم‌زمان و در جهتی مقرون به صرفه استفاده می‌نماید. برای سال‌های متمادی این نوع مقاطع بدون هیچ‌گونه اتصال اساسی بین دال بتنی و تیر فولادی در ساختمان‌سازی مورد استفاده قرار می‌گرفتند. در سال‌های اخیر استفاده از تیرهای مرکب که در آن‌ها تیر فولادی و دال بتنی با وسایل و تمهیدات مناسب به یکدیگر متصل می‌شوند، رواج زیادی یافته است. استفاده از تیرهای فولادی مدفون در بتن با حداقل پوشش، یکی از روش‌های ساخت تیرهای مرکب بود که تا مدت‌ها مورد توجه مهندسان و طراحان قرار داشت. هرچند در طراحی این‌گونه تیرها اصولا عملکرد بتن و فولاد به صورت توأم مورد توجه قرار نمی‌گرفت، ولی پوشش بتن برای محافظت و دوام تیر فولادی در مقابل خوردگی و آتش‌سوزی بسیار موثر بود [۱].

[1] Composite Beams

با استفاده از تیرهای مرکب در ساخت سقف‌ها و کف پل‌ها مقاومت بیشتری به‌دست خواهیم آوردو می‌توان از آن‌ها برای دهانه‌های بزرگ استفاده نمود. همچنین با استفاده از این مقاطع صرفه‌جوئی زیادی در زمینه مصرف مصالح صورت می‌گیرد. با ایجاد همکاری دال بتنی با تیر فولادی، نیرو توسط دال نیز انتقال می‌یابد و در نتیجه از مصرف فولاد کاسته خواهد شد. در اثر این عمل مشترک، ممان‌اینرسی نیمرخ مرکب بزرگتر می‌شود و در نتیجه خیز و تغییر شکل در تیرهای مرکب کاهش می‌یابد.

یکی از مسائل مهمی که هنگام استفاده از تیرهای مرکب باید به آن توجه نمود، رفتار کمانشی این تیرها در ممان منفی است. پایداری بال و جان فولادی تیرهای I شکل در ممان منفی مسأله‌ای مهم در طراحی این تیرها می‌باشد. از آن‌جا که هدف اصلی این پایان‌نامه مطالعه و بررسی کمانش در این نوع مقاطع فولادی می‌باشد، لذا آشنایی با ورق و مقاطع ساخته شده از ورق اجتناب ناپذیر است. در ادامه به توصیف ورق و خصوصیات مکانیکی آن خواهیم پرداخت.

۱-۲ تئوری ورق

ورق‌ها اجزاء سازه‌ای مسطح دو بعدی هستند که در آن‌ها بعد ضخامت نسبت به سایر ابعاد بسیار کوچکتر است و از لحاظ هندسی توسط خطوط و یا منحنی‌هایی به نام مرز ورق محصور می‌شوند. ورق‌ها نه تنها می‌توانند به عنوان عضوی از سازه به کار روند بلکه کل سازه می‌تواند توسط ورق ساخته شود، مانند عرشه‌ی پل‌ها (شکل۱-۱). همچنین ورق‌ها از لحاظ شرایط مرزی می‌توانند دارای لبه‌های آزاد، مفصلی، گیردار، تکیه‌گاه الاستیک و یا تکیه‌گاه نقطه‌ای باشند.

شکل۱-۱ عرشه‌ی پل

از آن‌جایی که عمل حمل بار توسط ورق تا حد زیادی مشابه این عمل در تیرها می‌باشد، رفتار ورق‌ها را می‌توان با توجه به رفتار تیرها پیش‌بینی نمود. با وجود چنین تشابهی، تحلیل ورق به صورت سازه‌ای یک بعدی منجر به پاسخ‌هایی نادرست می‌شود، لذا لازم است در حل مسائل ورق از مدل‌های دو بعدی استفاده کنیم. عملکرد دو بعدی ورق‌ها به دلیل در نظر گرفتن همه‌ی قابلیت‌های ورق، از جمله خاصیت پس از کمانش[1]، سازه‌ای سبک‌تر به‌وجود می‌آورند، لذا کاربرد این اعضا از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشد.

اکثر مسائل ورق توسط تئوری‌های الاستیسیته حاکم بر رفتار ورق تحلیل می‌شوند. حل دقیق معادلات دیفرانسیل حاکم بر ورق تنها برای شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری خاصی امکان‌پذیر است. در اغلب موارد روش‌های انرژی راه حل‌های تحلیلی کارآمدی برای مسائل ورق ارائه می‌دهند. امروزه با گسترش کاربرد رایانه، به‌کارگیری روش‌های حل عددی اهمیت قابل توجهی یافته است و در مواردی تنها راه حل مناسب محسوب می‌شوند.

[1] Post Buckling

به دلیل پیچیدگی‌های گوناگونی که بر رفتار واقعی سازه‌ها حـاکم اسـت، لازم اسـت کـه در کلیه‌ی تحلیل‌های سازه‌ای، سازه به شکل ساده‌تری مدل‌سازی شود به گونه‌ای که در مدل استفاده شده مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار استاتیکی و یا دینامیکی سازه درنظر گرفته شده باشد. در مسائل ورق این روند باید با توجه به عوامل زیر صورت گیرد:

۱- هندسه‌ی ورق و نوع تکیه‌گاه‌های آن

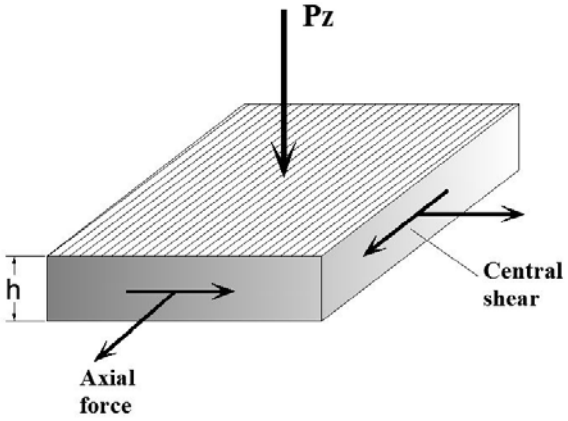
۲- رفتار و ویژگی‌های ماده‌ی بکار رفته در ساخت ورق

۳- نوع بارهای وارد به ورق و طریقه‌ی اعمال آن‌ها

به منظور تحلیل دقیق ورق لازم است آن را به صورت یک محیط پیوسته سه بعدی در نظر بگیریم. چنین نگرشی به مسائل ریاضی پیچیده و همچنین منجر به صرف هزینه‌های زیاد می‌شود. از این‌رو ورق‌ها را از دیدگاه‌های متفاوتی دسته‌بندی می‌کنند. دو نمونه از پرکاربردترین دسته‌بندی‌ها عبارتند از: دسته‌بندی بر اساس مشخصات مکانیکی ورق از جمله ایزوتروپیک و یا ارتوتروپیک بودن آن، و دسته‌بندی دیگر بر حسب نسبت ضخامت به عرض ورق. در نتیجه، به منظور منطقی و اقتصادی کردن تحلیل ورق‌ها، با توجه به رفتارهای سازه‌ای متفاوتی که ورق‌ها از خود بروز می‌دهند، آنها را به چهار دسته تقسیم می‌نمایند، که هر یک معادله‌ی دیفرانسیل مربوط به خود را دارد. اساس این تقسیم‌بندی تا حدود نسبتا زیادی متکی بر نسبت ضخامت به عرض ورق، (h/b)، است.

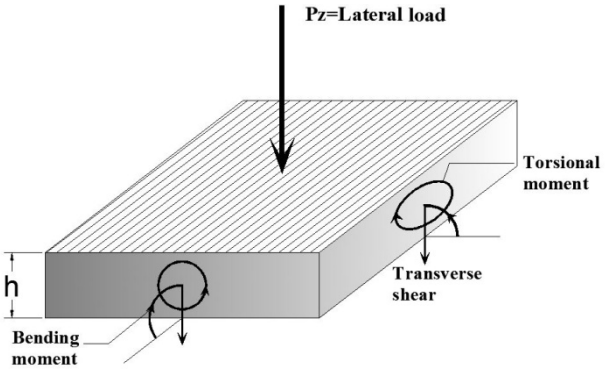
۱- غشاءها[1] یا پوسته‌ها ($h/b \leq 1/50$): ورق‌های بسیار نازکی هستند که هیچ‌گونه عملکـرد خمشی ندارند و بار را توسط نیروهای محوری و برشی درون صفحه‌ای منتقل می‌کننـد (شکل ۱-۲). این ورق‌ها را می‌توان مشابه کابل در نظر گرفت.

[1] Membranes



شکل ۱-۲ المان پوسته [۲]

۲- ورق‌های سخت[1] یا نازک ($1/10 \le h/b \le 1/50$) : صفحات نازکی هستند که دارای سختی خمشی بوده و بارهای اعمالی را توسط لنگرهای پیچشی و خمشی داخلی و نیروهای برشی عرضی انتقال می‌دهند. این گروه از لحاظ عملکرد رفتاری مشابه تیرها دارند. لازم به ذکر است که در این ورق‌ها به دلیل ضخامت کم از تغییر شکل‌های برشی صرف نظر می‌شود. این نوع ورق‌ها در بیشتر کارهای مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل ۱-۳).

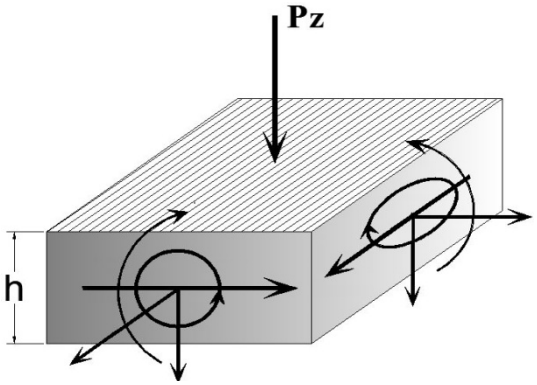


شکل ۱-۳ المان ورق نازک [۲]

۳- ورق‌های نسبتا ضخیم[2] ($1/5 \le h/b \le 1/10$): این صفحات از بسیاری جهات مشابه ورق‌های سخت هستند، با این تفاوت که در آن‌ها لازم است اثر نیروی برشی عرضی بر

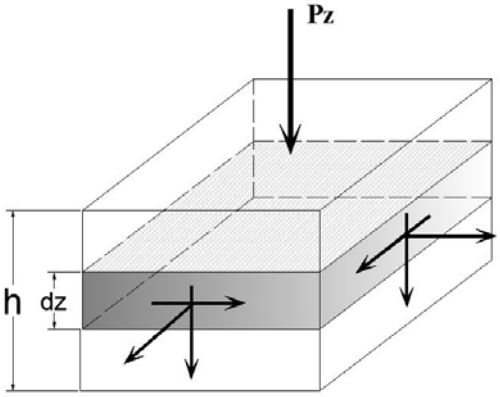
[1] Stiff Plates
[2] Moderately Thick Plates

روی مولفه‌های تنش قائم در محاسبات در نظر گرفته شود. در صورت وارد نکردن اثر تغییر شکل‌های برشی در محاسبات، تحلیل‌ها و نتایج بدست آمده قابل اطمینان نمی‌باشد (شکل ۱-۴).



شکل ۱-۴ المان ورق نسبتا ضخیم [۲]

۴- ورق‌های ضخیم[1] ($h/b \geq 1/5$): در این صفحات شرایط حاکم بر میدان تنش همانند یک محیط پیوسته سه بعدی در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱-۵).



شکل ۱-۵ المان ورق ضخیم [۲]

نکته قابل توجه در تحلیل مسائل مربوط به ورق آن است که اگر تغییر شکل‌های ورق نازک به مقادیر خاصی محدود نگردد، عملکرد غشائی نیز در آن توسعه می‌یابد و به این ترتیب بارهای خارجی اعمالی بر آن به واسطه ترکیبی از لنگرهای خمشی و پیچشی، نیروهای برشی عرضی و

[1] Thick Plates

درون صفحه‌ای و نیز نیروهای محوری انتقال می‌یابد (شکل ۱-۴). بنابراین تئوری‌های الاستیک ورق‌ها، تمایز زیادی بین ورق‌های با تغییر شکل‌های کوچک و بزرگ قائل است.

از سوی دیگر تئوری‌های حاکم بر رفتار ورق‌ها را با توجه به روابط حاکم بین تنش و کرنش نیز می‌توان دسته‌بندی نمود. تئوری‌های الاستیک خطی مبتنی بر فرض وجود یک رابطه‌ی خطی بین تنش و کرنش هستند (قانون هوک)، در حالی که در تئوری‌های الاستیک غیر خطی، پلاستیک و ویسکو الاستیک رابطه پیچیده‌تری بین تنش‌ها و کرنش‌ها حاکم است. از این رو، با توجه به رفتار مصالح تشکیل دهنده‌ی ورق می‌توان کمانش را به دو دسته‌ی کمانش الاستیک و غیر الاستیک تقسیم بندی نمود. در کمانش الاستیک، فرض بر آن است که ماده‌ی تشکیل دهنده‌ی ورق از قانون هوک پیروی می‌کند و تنش‌های بحرانی کمتر از تنش تسلیم مصالح هستند؛ در حالی که در کمانش غیر الاستیک، تنش بحرانی ورق از تنش تسلیم مواد سازنده‌ی آن فراتر رفته و مدول الاستیسیته ماده بر مبنای تنش موجود در ورق تغییر می‌نماید. در این حالت مسأله پیچیده‌تر است و لازم است که معادلات حاکم بر رفتار ماده در نظر گرفته شود و در ناحیه‌ی پس از تسلیم از مدول الاستیسیته‌ی مناسب استفاده شود. ضمن این‌که بعضی از مصالح مانند آلومینیوم ذاتا دارای منحنی تنش-کرنش غیر خطی بوده و مدول الاستیسیته‌ی مشخصی ندارند. در این پایان‌نامه در فصل جداگانه‌ای به بررسی کمانش غیرالاستیک اجزای تیر فولادی که بخشی از تیر مرکب است، پرداخته خواهد شد.

۱-۳ کمانش ورق

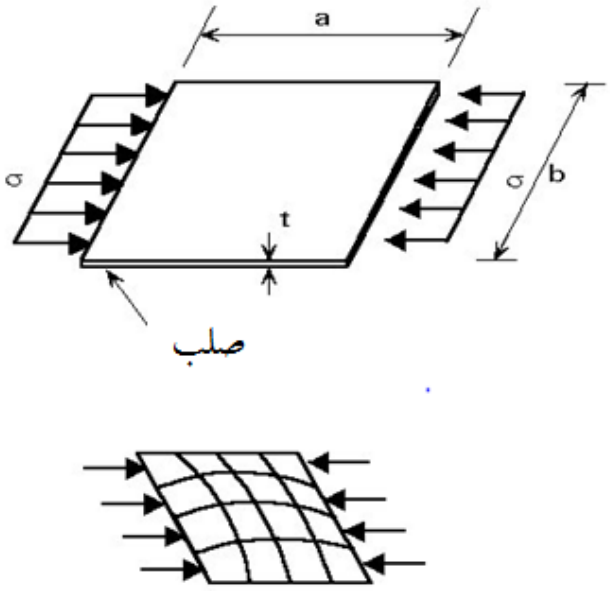
همان‌طورکه گفته شد، مقاطع مرکب در محل‌های به کارگیری معمولا در معرض بارگذاری‌های فشاری یا برشی داخل صفحه قرار می‌گیرند، در نتیجه پدیده‌ی کمانش برای آن‌ها بسیار محتمل است. مقادیر کوچک تنش‌های اعمالی منجر به تغییر شکل‌های بزرگ می‌شود، در نتیجه بررسی مسأله‌ی کمانش ورق‌های استفاده شده در مقاطع مرکب از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین برای طراحی ورق‌ها کنترل معیار پایداری علاوه بر دو معیار مقاومت و سختی الزامی

است. در ادامه‌ی این فصل به بررسی اجمالی مبحث کمانش و روش‌های حل مسائل مربـوط بـه آن می‌پردازیم.

۱-۳-۱مفهوم کمانش

هنگامی که عضو لاغر سازه‌ای (مانند ستون) تحت نیروی فشاری قـرار مـی‌گیـرد، در مقابـل بارهای کوچک فشاری مقاومت قابل توجهی از خود نشان می‌دهد و هندسه‌ی آن دچار تغییر شکل قابل توجهی نمی‌شود. اما به محض رسیدن به بار بحرانی مشخصی، سازه دچـار تغییـر شـکل‌هـای بزرگ شده و در آستانه‌ی از دست دادن قابلیت باربری قرار می‌گیرد. به ایـن نیـروی مشـخص کـه آستانه‌ی تحمل است نیروی بحرانی کمانش و به این پدیده کمانش گفته می‌شود.

به طور مشابه، هنگامی که ورق تحت نیروهای فشاری داخل صفحه قـرار مـی‌گیـرد (شـکل ۱-۶)، اگر نیروهای اعمالی به ورق در حدی باشد که تغییر شکل خارج از صـفحه در آن رخ ندهـد، گفته می‌شود ورق در حالت تعادل پایدار است. چنان‌چه این نیروها افزایش یابند و به مقدار بحرانی برسند علاوه بر تغییر شکل‌های داخل صفحه، تغییر شکل‌های عمود بر صفحه نیز رخ مـی‌دهـد. در این صورت اصطلاحا گفته می‌شود ورق کمانش کرده‌است.

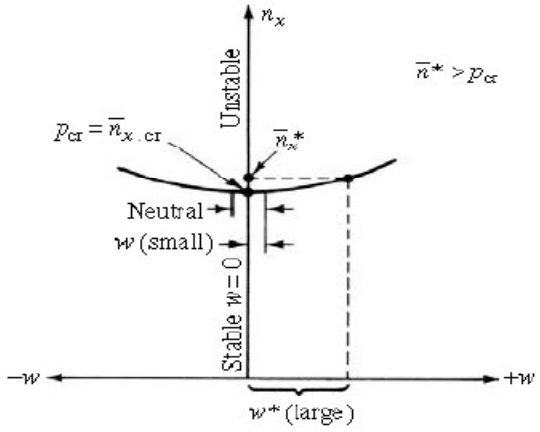


شکل ۱-۶ ورق مستطیلی تحت اثر بار لبه‌ای فشاری

باری که باعث ایجاد این شرایط در ورق شده‌است را بار بحرانی می‌نامند. اهمیت بارهای بحرانی، در تعیین نقطه‌ی آغازین تغییر شکل‌های بزرگ خارج از صفحه است که در نهایت منجر به گسیختگی ورق خواهد شد. به همین دلیل در طراحی ورق‌ها همواره عدم رسیدن ورق به چنین حالتی مد نظر قرار می‌گیرد.

نکته‌ی قابل توجه در مبحث کمانش آن است که سازه در مسیر گذار از حالت تعادل پایدار به حالت تعادل ناپایدار، همواره حالت تعادل خنثی را تجربه می‌کند. کلیه‌ی فرمول‌بندی‌های ریاضی که برای تحلیل پایداری الاستیک خطی ورق‌ها توسعه یافته است بر پایه‌ی این نکته‌ی مهم استوار است.

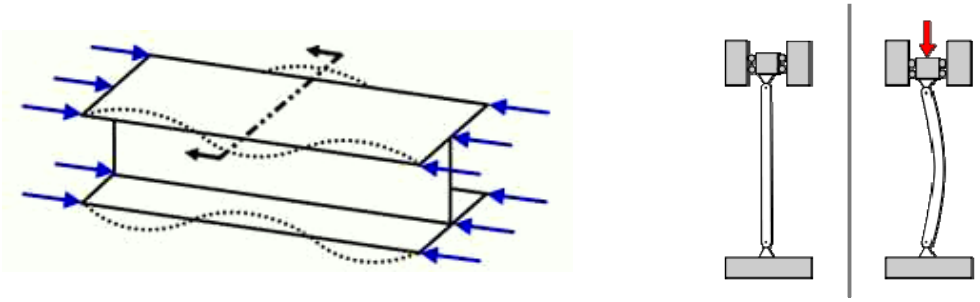
در استخراج روابط مربوط به مسائل کمانش الاستیک ورق‌ها، از حالت تعادل پایدار به عنوان نقطه‌ی دو شاخه‌ای شدن[1] تغییر شکل یاد شده‌است. هنگامی که ورق بار بحرانی را تجربه می‌کند، از میان دو مسیر ممکن برای ادامه‌ی تغییر شکل (که یکی از آن‌ها مربوط به حالت تعادل پایدار و دیگری مربوط به تعادل ناپایدار است)، ورق همواره مسیر منتهی به شکل کمانش یافته را انتخاب می‌کند (شکل ۱-۷).



شکل ۱-۷ نقطه‌ی دو شاخه‌ای [۲]

[1] Bifurcation

در ستون‌ها به عنوان اعضای فشاری، تا زمانی که بار اعمال شده بـه آن‌هـا از مقـدار معینـی کمتر باشد، افزایش بار فقط به کاهش طول محوری عضو منجر می‌شود، ولی هنگامی که بار به آن مقدار معین یا همان بار بحرانی برسد، عضو ناگهان کمانه می‌کند. کمیت‌هـایی نظیـر تغییـر شـکل جانبی و لنگر خمشی در ستون‌ها، تابعی از یک متغیر مستقل هستند و رفتـار سـتون توسـط یـک معادله دیفرانسیل معمولی بیان می‌شود، در حالی که این کمیت‌ها در ورق هـا تـابعی از دو متغیـر مستقل می‌باشند و برای بیان رفتـار ورق، معـادلات دیفرانسـیل پـاره‌ای نیـاز اسـت. درشـکل ۱-۸ چگونگی کمانش یک ستون و یک تیر با مقطع I شکل نشان داده شده‌است.



(ب) (الف)

شکل ۱-۸ الف) کمانش ستون تحت بار محوری ، ب) کمانش ورق بال مقطع I شکل تحت بار محوری

تفاوت عمده‌ی کمانش ستون و ورق در این است که بار بحرانی، بیشـترین بـاری اسـت کـه ستون می‌تواند تحمل کند، اما صفحات قادرند بار فشاری بیش از بار بحرانـی را تحمـل کننـد و در واقع دارای قدرت پس از کمانش می‌باشند.

۱-۳-۲ انواع کمانش

پدیده‌ی کمانش از دو دیـدگاه قابـل بررسـی اسـت. دیـدگاه اول براسـاس مـاده‌ی تشـکیل دهنده‌ی سازه و دیدگاه دوم براساس فرم تغییر شکل یافته‌ی سازه می‌باشد.

در دیدگاه اول، با توجه به رفتار ماده‌ای سازه، کمانش به دو دسته تقسیم می‌شود:

۱- کمانش الاستیک

۲- کمانش غیرالاستیک

در کمانش الاستیک، ماده‌ی تشکیل دهنده‌ی سازه از قانون هوک پیروی می‌کند و تنش بحرانی از تنش تسلیم مصالح کمتر خواهد بود.

در کمانش غیر الاستیک، تنش بحرانی از تنش تسلیم مواد سازنده فراتر می‌رود. در این کمانش علاوه بر موثر بودن تنش‌های پسماند، مدول الاستیسیته‌ی ماده تابع تنش موجود می‌باشد. کمانش موضعی الاستیک برای ورق‌های با نسبت های بزرگ b/h رخ می‌دهد، این در حالی است که ورق‌های با نسبت‌های کوچک b/h کمانش موضعی غیر الاستیک را تجربه می‌کنند.

در دیدگاه دوم، با توجه به فرم تغییر شکل یافته‌ی سازه در زمان ناپایداری، کمانش به چهار دسته تقسیم می‌شود:

۱- کمانش جانبی[۱]

۲- کمانش پیچشی- جانبی[۲]

۳- کمانش موضعی[۳]

۴- کمانش تغییر شکلی[۴]

در کمانش جانبی، خطوط اتصال بین ورق ها مستقیم باقی نمی‌مانند و تغییر شکل جانبی رخ می‌دهد، اما مقطع مورد نظر هیچ‌گونه تغییر شکلی نمی‌دهد و فقط به صورت صلب تغییر مکان خواهد داد. این نوع کمانش هنگامی که عضو سازه‌ای بدون مهار جانبی کافی تحت خمش قرار گیرد، اتفاق می‌افتد. کمانش جانبی معمولا در تیرها و ستون‌ها رخ می‌دهد. برای بررسی مود کمانش جانبی تنها کافی است جابجایی‌های داخل صفحه منظور شود.

کمانش پیچشی- جانبی اغلب در تیرها، هنگامی که مقاومت مقطع در مقابل خمش جانبی کمتر از مقاومت خمشی آن در صفحه‌ی تقارن باشد، رخ می‌دهد. در تغییر شکل عضو پس از کمانش دیده می‌شود که خطوط اتصال ورق‌ها از حالت مستقیم خارج شده و انحناء می‌یابند.

[1] Lateral Buckling
[2] Lateral Tortional Buckling
[3] Local Buckling
[4] Distortional Buckling