بسم الله الرحمن الرحيم

١٣٧٠١٨

مجتمع فنی مهندسی
دانشکده عمران

پایان نامه
جرای دریافت درجه کارشناسی ارشد
مهندسی عمران – سازه

مودهای کمانشی مقاطع جدار نازک باز با استفاده از روش نوارهای محدود

اساتید راهنما: دکتر مجتبی ازهری
دکتر نادر عبدلی

استاد مشاور: دکتر حمیدرضا رونق

پژوهش و نگارش: حمیدرضا نادریان

۱۳۸۸/۹/۱۱

خرداد ۱۳۸۸

۱۲۷۰۱۸

در آیاتی از کتاب آسمانی قرآن کریم، واژه پایداری صریحا به چشم می خورد[1]. حضور این معنا در کلام خدا هر چند در حوزه رفتارهای انسانی دیده میشود؛ ولی به مصداق تناظر بسیاری از نشانه های فیزیکی و مادی با رفتارهای فردی و اجتماعی بشر، میتوان درسهایی از حضور این معنا و کلمه در قرآن حکیم نیز به دست آورد. به این ترتیب پایداری نه تنها در علوم کاربردی و مهندسی تعریف میشود؛ بلکه در زندگی معنوی آدمی نیز جایگاه بسیار ویژه خود را همواره داشته و دارد؛ چنان که در حدیث معروفی آمده است پیامبر اکرم اسلام پس از نزول آیه مبارکه "فاستقم کما امرت" پیر شدند. هم چنین در روایت دیگری نبی مکرم پس از نزول این آیه فرموده اند: "شمروا، شمروا، فما رئی ضاحکا" (دامن به کمر زنید، دامن به کمر زنید –کنایه از وقت کار و تلاش- و از آن پس پیامبر صلوات الله علیه هرگز خندان دیده نشدند).

امید آن که همگی ما همان طور که در فنون مهندسی، پایداری در سازه ها را مد نظر قرار میدهیم؛ در زندگی معنوی خویش نیز بتوانیم بر اساس آن چه که حق تعالی -عظم شانه- امر فرموده است، پایدار بمانیم. چنین بادا.

–خداوند را سپاسگزارم که علیرغم کوتاهی های بنده ناسپاس خود در راه بندگی، باز هم با بخشندگی و مهربانی بی منتهای خویش، عنایات خود را به او دریغ نورزید. به راستی زبانم قاصر از حمد و سپاس حق تعالی است و شاید دو بیت ذیل بتواند قسمتی از منویات قلبی مرا بازگوید:

شبی را که تنها به گرداب غم ها در افتاده بودم
در آن دم که خود را به امواج بحر فنا داده بودم
کسی کو ز موجم ربودی، تو بودی، تو بودی
به تاب و توانم فزودی، تو بودی، تو بودی

در این جا از پدر و مادرم به خاطر تمامی زحمات و دلسوزی هایی که در راه ترقی من کشیده اند تشکر میکنم.

از استاد عزیزم، دکتر مجتبی ازهری که کمک های فراوانی در به ثمر رسیدن این پایان نامه به اینجانب داشته اند؛ صمیمانه سپاسگزاری میکنم. بایستی اذعان کنم که آشنایی با ایشان باعث پیدایش نقطه عطفی در زندگی علمی من شد. هم چنین از دکتر نادر عبدلی به سبب

---

[1]- سوره بقره آیه ۱۴۳، هود ۱۱۲، ابراهیم ۲۷، نمل ۸۸، فصلت ۳۰و ۳۵، قمر ۱۹، مجادله ۲۲، صف ۴، عصر ۳، جن ۱۶

الطافی که به بنده داشته اند تشکر می کنم. حقیقتا حضور نام دکتر حمیدرضا رونق در این پایان نامه باعث افتخار من شد. لذا از ایشان با وجود حضور در خارج از کشور، خالصانه قدردانی میکنم.

هر دانشجو افزون بر کمک های علمی به پشتوانه معنوی اساتید نیز نیازمند است. بنابراین از دکتر سید مهدی ابطحی، استاد گرانقدر دانشکده عمران دانشگاه صنعتی اصفهان که همواره پشتیبان و مایه دلگرمی بنده بوده اند، تشکر ویژه میکنم. از سایر اساتید خود همچون دکتر سید سعید مهینی که باعث تشویق من به کسب علم و دانش شده اند سپاسگزارم. سرانجام از خانواده ام، دوستان عزیزم و سایر مشوقان و منتقدان خود که باعث پیشرفت اینجانب بوده اند سپاسگزاری می کنم.

غرض نقشی است کز ما باز ماند

که هستی را نمیبینم بقایی

اصفهان ، بهار یک هزار و سیصد هشتاد و هشت هجری شمسی

حمیدرضا نادریان

این اثر ناچیز را

به روح آسمانی پدربزرگ عزیزم

زنده یاد **حاج اکبر دهقانفر**

مردی که به حقیقت در زندگانی دنیا، اسوه پایداری و تواضع و مهربانی بود

تقدیم می کنم

بسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

صورتجلسه دفاعیه پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

جلسه دفاعیه پایان نامه تحصیلی آقای حمیدرضا نادریان

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده فنی مهندسی دانشگاه یزد ، دررشته/ گرایش : عمران- سازه

تحت عنوان : « *مودهای کمانشی مقاطع جدار نازک باز با استفاده از روش نوارهای محدود* »

وتعداد واحد: ۶ درتاریخ ۱۳۸۸/۳/۲۷

باحضور اعضای هیات داوران متشکل از :	نام ونام خانوادگی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر مجتبی ازهری – دکتر نادر عبدلی یزدی	
۲- استاد مشاور	دکتر حمیدرضا رونق	
۳-داورخارج از گروه	دکتر منصور رفیعیان	
۴-داور داخل گروه	دکتر حسینعلی رحیمی	

تشکیل گردید و پس از ارزیابی پایان نامه توسط هیات داوران ، با درجه عالی و نمره

به عدد ۱۸/۷۵ به حروف هجده و هفتاد و پنج صدم مورد تصویب قرارگرفت.

نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه (ناظر)

نام ونام خانوادگی: دکتر عباسعلی حیدری

امضاء:

چکیده

امروزه، مقاطع جدار نازک به خاطر مزایای ویژه آن ها سهم عمده ای را در سازه های مختلف به خود اختصاص داده اند. از طرف دیگر، با توجه به لاغری زیاد این اعضاء، مهم ترین بحث درباره آن ها موضوع کمانش است. در میان روش های مختلف تحلیل کمانش، روش نوارهای محدود به خاطر سرعت و دقت بالا و اقتصادی بودن نسبت به سایر روش های عددی، ابزاری مناسب برای حل این گونه مسائل می باشد. در روش نوارهای محدود از قضیه مینیمم انرژی پتانسیل کل برای تشکیل ماتریس های سختی و پایداری استفاده می شود. در این جا بار بحرانی از حل یک مسئله مقادیر ویژه به دست می آید.

کمانش در سازه ها با توجه به نوع تغییر مکان های ایجاد شده و انرژی ذخیره شده در مقاطع آن ها به فرم های مختلفی ایجاد می شود که به آن ها اصطلاحا مودهای کمانشی گفته می شود. مقاطع جدار نازک عموما به دو دسته باز و بسته تقسیم می شوند. در بین این دو دسته، مقاطع باز از تنوع و کاربرد بیشتری برخوردار هستند.

با توجه به آن چه گفته شد، در این پایان نامه مودهای کمانشی مقاطع گوناگون جدار نازک باز با استفاده از روش نوارهای محدود تحت بارگذاری های فشاری، خمشی، برشی و بارگذاری هم زمان فشاری و خمشی مورد بررسی قرار می گیرند. لازم به ذکر است کلیه مطالعات انجام گرفته در این تحقیق در ناحیه الاستیک می باشند. در این جا داصنه کاربرد روش نوارهای محدود علاوه بر مقاطع فولادی گرم نورد شده و یا ساخته شده از ورق ها به مقاطع فولادی سرد نورد شده و مقاطع اورتوتروپیک نیز تعمیم داده می شود. یکی از مهم ترین کارهای صورت گرفته، بررسی موشکافانه دقت روش نوارهای محدود نسبت به سایر روش ها اعم از دقیق و تقریبی در تعیین تنش های بحرانی در مودهای کمانشی مختلف نظیر موضعی، تغییر شکلی و پیچشی-خمشی است. تصحیح رابطه آیین نامه AISC درباره کمانش تغییر شکلی و ارائه رابطه ای ساده، قابل کاربرد و اقتصادی از دیگر دستاوردهای این تحقیق است. تفکیک یا مجزا سازی مودهای کمانشی جدیدترین پیشرفت در روش نوارهای محدود است که در این پایان نامه بدان نیز پرداخته شده است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول- مقدمه ای بر کمانش اعضای جدار نازک

۱-۱مقدمه..... ۲

۱-۲تئوری ورق..... ۳

۱-۲-۱ انواع ورق..... ۴

۱-۲-۱-۱ ورق های نازک با تغییرشکل های کوچک..... ۵

۱-۲-۱-۲ ورق های نازک با تغییر شکل های بزرگ..... ۵

۱-۲-۱-۳ ورق های با ضخامت زیاد..... ۶

۱-۲-۲ معادله دیفرانسیل حاکم بر رفتار ورق..... ۶

۱-۲-۳ انواع روش های تحلیل ورق..... ۸

۱-۲-۳-۱ روش های حل دقیق..... ۹

۱-۲-۳-۱-۱ روش حل ناویه..... ۹

۱-۲-۳-۱-۲ روش حل لوی..... ۹

۱-۲-۳-۱-۳ روش انرژی..... ۹

۱-۲-۳-۲ روش های تقریبی..... ۹

۱-۲-۳-۲-۱ روش تفاضل های محدود..... ۹

۱-۲-۳-۲-۲ روش المان های های محدود..... ۱۰

۱-۲-۳-۲-۳ روش نوارهای های محدود..... ۱۰

۱-۳ کمانش ورق ها..... ۱۰

۱-۳-۱ تارخچه بررسی کمانش ورق ها..... ۱۲

۱-۳-۲ انواع کمانش..... ۱۲

۱-۳-۲-۱ کمانش الاستیک..... ۱۲

۱-۳-۲-۲ کمانش غیر الاستیک..... ۱۳

۱-۳-۲-۳ پدیده پس از کمانش..... ۱۳
۱-۳-۳ انواع مودهای کمانشی..... ۱۳
۱-۳-۴ معادله دیفرانسیل کمانش ورق..... ۱۸
۱-۳-۵ روش های عددی در تحلیل کمانش ورق..... ۱۹

فصل دوم - روش نوارهای محدود در تحلیل کمانش

۲-۱مقدمه..... ۲۱
۲-۱-۱ روند حل مسائل در روش نوارهای محدود..... ۲۳
۲-۱-۲ انتخاب توابع جابجایی..... ۲۵
۲-۱-۳ توابع جابجایی موجود..... ۲۶
۲-۱-۳-۱ قسمت سری تابع جابه‌جایی..... ۲۶
۲-۱-۳-۲ قسمت تابع شکل تابع جابه‌جایی..... ۲۹
۲-۱-۴ فرمول سازی مشخصات نوار از طریق قضیه مینیمم انرژی پتانسیل کل..... ۳۲
۲-۱-۴-۱ توابع جابه‌جایی..... ۳۲
۲-۱-۴-۲ کرنش‌ها..... ۳۳
۲-۱-۴-۳ تنش‌ها..... ۳۴
۲-۱-۴-۴ مینیمم سازی انرژی پتانسیل کل..... ۳۵
۲-۱-۴-۴-۱ انرژی کرنشی..... ۳۵
۲-۱-۴-۴-۲ انرژی پتانسیل..... ۳۵
۲-۱-۴-۴-۳ انرژی پتانسیل کل..... ۳۵
۲-۱-۴-۴-۴ پروسه مینیمم سازی..... ۳۵
۲-۲ روش نوارهای محدود در تحلیل کمانش سازه ها..... ۳۸
۲-۲-۱ تاریخچه روش نوارهای محدود در تحلیل کمانش..... ۳۸
۲-۲-۲ انواع روش های نوارهای محدود در تحلیل کمانش..... ۳۹
۲-۳ روش نوارهای محدود معمولی..... ۴۱
۲-۳-۱ مراحل تحلیل کمانش به روش نوارهای محدود معمولی..... ۴۳
۲-۳-۱-۱ انتخاب درجات آزادی و تعیین توابع شکل..... ۴۳
۲-۳-۱-۲ استخراج ماتریس سختی..... ۴۵
۲-۳-۱-۳ استخراج ماتریس پایداری..... ۴۶

۲-۳-۱-۴ تشکیل ماتریس سختی کل و حل معادلهٔ پایداری..... ۴۷
۲-۳-۳ جمع بندی روش نوارهای محدود معمولی..... ۴۸
۲-۴ روش نوارهای محدود مختلط نیمه تحلیلی..... ۴۸
۲-۴-۱ نواقص روش نوارهای محدود معمولی..... ۴۹
۲-۴-۲ درجات آزادی در روش نوارهای محدود مختلط نیمه تحلیلی..... ۵۰
۲-۴-۳ تشکیل ماتریس های سختی و هندسی برای درجات آزادی خارج از صفحه..... ۵۳
۲-۴-۴ تشکیل ماتریس‌های سختی و پایداری برای درجات آزادی داخل صفحه..... ۶۰
۲-۴-۵ ترکیب ماتریس‌های سختی و پایداری..... ۶۵
۲-۵ روش نوارهای محدود حبابی..... ۶۶

فصل سوم – مودهای کمانشی مقاطع جدارنازک باز ساخته شده از ورق ها

۳-۱ مقدمه..... ۷۱
۳-۲ کمانش مقاطع صلیبی ۷۱
۳-۲-۱ کمانش مقاطع صلیبی تحت تنش های یکنواخت فشاری ۷۳
۳-۲-۲ کمانش مقاطع صلیبی تحت تنش های خمشی ۸۷
۳-۲-۳-۱ کمانش برشی ۸۷
۳-۲-۳-۲ کمانش برشی در مقاطع صلیبی ۸۸
۳-۳ مقایسه رفتارکمانشی مقاطع جدار نازک باز..... ۹۰
۳-۳-۱ مقایسه مودهای کمانشی مقاطع باز در فشار خالص ۹۱
۳-۳-۲ مقایسه مودهای کمانشی مقاطع باز در خمش خالص ۹۴
۳-۳-۳ مقایسه مودهای کمانشی مقاطع باز در برش خالص ۹۶
۳-۴ رفتار کمانشی ستون ها با مقطع صلیبی سخت شده ۹۸
۳-۴-۱ بررسی رفتار کمانشی مقاطع صلیبی سخت شده تحت تنش های فشاری ۹۹
۳-۴-۲ جمع بندی ۱۰۴
۳-۵ کمانش مقاطع فولادی تحت اثر توام فشار و خمش ۱۰۵
۳-۵-۱ کمانش مقاطع I تحت اثر هم زمان فشار و خمش ۱۰۶
۳-۵-۱-۱ جمع بندی ۱۱۴
۳-۵-۲ کمانش مقاطع صلیبی تحت اثر هم زمان فشار و خمش ۱۱۵
۳-۵-۲-۱ جمع بندی ۱۲۲

۳-۵-۲-۲ کارهایی که بایستی انجام شوند ۱۲۴

فصل چهارم – کمانش تغییر شکلی در مقاطع باز جدار نازک

۴-۱ مقدمه ۱۲۶
۴-۲ کمانش تغییر شکلی مقاطع I شکل فولادی با جان لاغر ۱۲۸
۴-۲-۱ رابطه کمانش الاستیک تغییرشکلی براد فورد ۱۳۴
۴-۲-۳ مقایسه نتایج ۱۳۵
۴-۲-۳-۱ اثر تغییرات طول در کمانش تغییر شکلی ۱۳۶
۴-۲-۳-۲ اثر تغییرات ضخامت جان در کمانش تغییر شکلی ۱۴۱
۴-۲-۳-۳ اثرات تغییرعرض بال در کمانش تغییر شکلی ۱۴۵
۴-۲-۳-۴ اثرات تغییر تنش تسلیم در کمانش تغییر شکلی ۱۴۹

فصل پنجم – کمانش پیچشی و کمانش خمشی مقاطع جدار نازک باز

۵-۱ مقدمه ۱۵۴
۵-۲ کمانش پیچشی ستون ها با مقطع باز ۱۵۴
۵-۳ کمانش پیچشی و کمانش خمشی مقاطع صلیبی ۱۵۷
۵-۳-۱ جمع بندی ۱۶۴
۵-۴ کمانش پیچشی و کمانش خمشی مقاطع صلیبی سخت شده ۱۶۵
۵-۴-۱ جمع بندی ۱۷۲

فصل ششم – مودهای کمانشی مقاطع جدارنازک باز فولادی سرد نورد شده

۶-۱ مقدمه ۱۷۴
۶-۱-۱ انواع مقاطع سردنوردشده وکاربردهای آن ها ۱۷۶
۶-۱-۱-۱ اعضای سازه ای منفرد قابی ۱۷۶
۶-۱-۲ ملاحظات عمومی در طراحی ساختمانهای فولادی سرد نورد شده ۱۷۸
۶-۱-۲-۱ کمانش موضعی ومقاومت پس ازکمانش اجزای نازک فشاری ۱۷۸
۶-۱-۲-۲ سختی پیچشی ۱۷۸
۶-۱-۲-۳ سخت کننده ها دراجزای فشاری ۱۷۸

۶-۱ -۲-۴ محدودیت های ضخامتی ۱۷۸
۶-۲ مشخصات مکانیکی مقاطع فولادی سرد نورد شده ۱۷۹
۶-۳ کمانش مقاطع سرد نورد شده فولادی ۱۷۹
۶-۳-۱ اهداف ۱۸۲
۶-۴ کمانش مقاطع فولادی سرد نورد شده U شکل ۱۸۳
۶-۴-۱ مقاطع سخت شده و سخت نشده U تحت تنش های یکنواخت فشاری ۱۸۴
۶-۴-۲ مقاطع سخت شده و سخت نشده U تحت تنش های خمشی ۱۹۱
۶-۵ مقایسه رفتار کمانشی مقاطع فولادی سرد نورد شده U، C و C سخت شده ۱۹۶
۶-۵-۱ مقایسه مقاطع U، C و C سخت شده در فشار خالص ۱۹۶
۶-۵-۲ مقایسه مقاطع U، C و C سخت شده در خمش خالص ۱۹۹
۶-۶ کمانش مقاطع فولادی سرد نورد شده Z شکل ۲۰۳
۶-۶-۱ مقایسه مقاطع U، C ، Z و Z در بارگذاری های فشاری و خمشی ۲۰۴
۶-۶-۲ کمانش برشی در مقاطع سرد نورد شده Z و Z ۲۰۶
۶-۷ کمانش مقاطع فولادی سرد نورد شده I شکل ۲۰۹
۶-۷-۱ مقاطع فولادی سرد نورد شده I تحت تنش های فشاری یکنواخت ۲۱۱
۶-۷-۲ مقاطع فولادی سرد نورد شده I تحت تنش های خمشی ۲۱۶
۶-۸ کمانش مقاطع سخت شده I دارای یک محور تقارن ۲۱۹
۶-۹ مقایسه دقت روش نوارهای محدود با روش GBT ۲۲۴
۶-۹-۱ ستون های با مقطع E شکل ۲۲۵
۶-۹-۲ تیر های با مقطع I شکل سخت شده دارای یک محور تقارن ۲۳۰

فصل هفتم – جدا سازی مودهای کمانشی با استفاده از روش نوارهای محدود مقید شده

۷-۱ مقدمه ۲۳۷
۷-۲ اساس روش نوارهای محدود مقید شده ۲۳۸
۷-۳ تفکیک سازی مودهای کمانشی ۲۴۰
۷-۳-۱ ستون با مقطع C ۲۴۰
۷-۳-۲ ستون با مقطع صلیبی ۲۴۶
۷-۳-۳ تیر با مقطع صلیبی ۲۵۱

فصل هشتم – رفتار کمانشی مقاطع جـدار نازک ساخته شده از مواد اورتوتروپیک

۸-۱ مقدمه ۲۵۷
۸-۲ کمانش مقاطع I شکل ساخته شده از FRP حول محور ضعیف ۲۵۹

فصل نهم – نتیجه گیری

۹-۱ کارهایی که انجام گرفت ۲۶۴
۹-۲ نتیجه گیری ۲۶۵
۹-۳ کارهایی که بایستی انجام شوند ۲۶۷

مراجع ۲۷۰

فصل اول

مقدمه ای بر کمانش اعضای جدار نازک

۱-۱ مقدمه

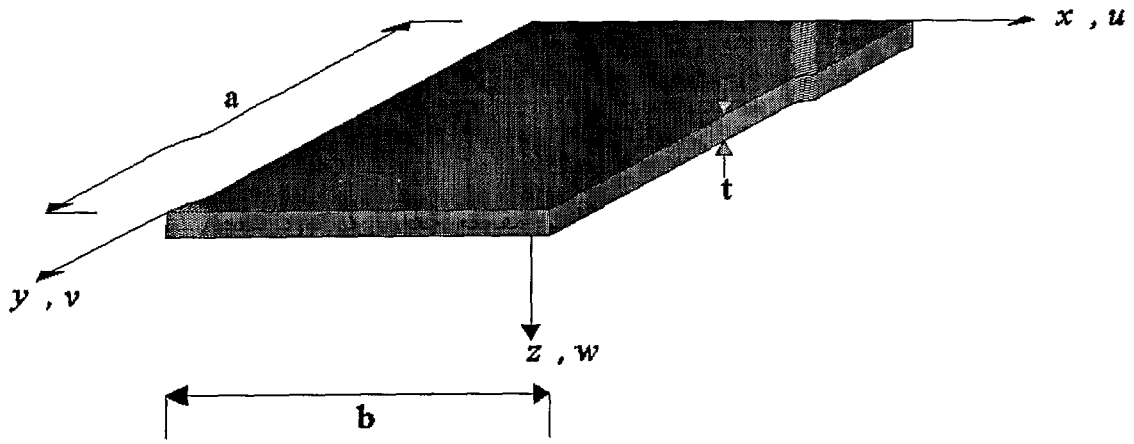
امروزه استفاده از سازه های جدار نازک به واسطه محاسن فراوان سازه ای و اقتصادی قسمت وسیعی از صنعت ساختمان و دیگر صنایع را به خود اختصاص داده است. از طرفی نازک بودن این اعضاء باعث بحرانی شدن مسئله کمانش در آن ها می شود. با وجود تحقیقات فراوانی که طی سالیان متمادی انجام یافته ، هنوز ابهامات زیادی درباره رفتار کمانشی این اعضاء به خصوص در حوزه مقاطع ساخته شده از ورق های جدار نازک وجود دارد. هم چنین با مطرح شدن بحث بهینه سازی سازه ها این مقاطع به سمت نازک تر شدن پیش می روند، چنان که در اعضای فولادی سرد نورد شده مقاطعی با ضخامت دهم میلیمتر نیز یافت می شوند[۳۱]. محققین ثابت کرده اند در اعضای جدارنازک تحت بارگذاری های مختلف،امکان رخداد انواع گوناگونی از کمانش یا به اصطلاح مودهای کمانشی وجود دارد. زمانی گمان بر این بود که اعضای جدار نازک دارای تنها سه نوع مود کمانشی شامل موضعی ، تغییر شکلی و کلی هستند. ولی امروزه با مطالعات فراوان، وجود انواع زیادی از مودهای کمانشی و ترکیبات مختلفی از آن ها در اعضای جدارنازک به اثبات رسیده است.

طراحی بهینه و مقاوم سازه ها در برابر کمانش ، تابع شناخت صحیح و دقیق رفتارکمانشی آن ها در شرایط گوناگون بارگذاری، تکیه گاهی و ابعادی است. برای دست یافتن به این هدف روش های مختلفی نظیر تحقیقات آزمایشگاهی، مطالعات تئوریک از طریق حل دقیق معادلات دیفرانسیل حاکم بر رفتار کمانشی ، راه حل های نیمه تحلیلی و روش های عددی موجودند. در میان سایر روش ها، روش نوارهای محدود به عنوان یک روش عددی و نیمه تحلیلی ابزار مناسبی برای تحلیل کمانش سازه ها می باشد. از مزایای اصلی روش نوارهای محدود، سرعت ، دقت بالا و سادگی هستند. امروزه این روش به عنوان یکی از قدرتمندترین و دقیق ترین روش های تحلیل کمانش سازه ها مورد توجه بسیاری از محققین است.

در میان سایر اعضای جدار نازک، مقاطع باز با توجه به کاربرد فراوان، تنوع زیاد و ویژگی های بارزشان سهم عمده ای از مطالعات کمانشی را به خود اختصاص داده اند. با توجه به آن چه گفته شد در این تحقیق سعی بر آن است که مطالعات جامع و تازه ای بر روی مودهای کمانشی مقاطع باز جدار نازک با استفاده از روش نوارهای محدود صورت گیرد.

۱-۲ تئوری ورق

حجم عمده ای از اعضـای جدارنازک از ورق ها ساخته می شوند که به آن ها در اصطلاح تیر-ورق می گویند. علاوه بر آن برای تحلیل کمانش مقاطع جدارنازک نورد شده نیز از تئوری ورق استفاده می شود. به بیان دیگر در تحلیل کمانش این مقاطع ، آن ها را به صورت اعضای ساخته شده از ورق فرض می کنند. لازم به ذکر است روش نوارهای محدود نیز با همین فرضیه قادر به تحلیل مقاطع مختلف است. بنابراین داشتن یک سری اطلاعات کلی درباب تئوری ورق ضروری به نظر می رسد. در شکل (۱-۱) نمای یک ورق به همراه مشخصات ابعادی آن دیده می شود.



شکل (۱-۱) شمای یک ورق

فرضیات اولیه در تحلیل ورق ها به اختصار به شرح زیر می باشند:

۱. ماده ورق همگن- ایزوتروپ و در ناحیه الاستیک است. (این سه فرض برای راحتی کار است و به راحتی می توان آن ها را تغییر داد)

۲. رفتار ورق با میان صفحه ای که از وسط ضخامت عبور می کند بیان می شود. (در واقع ورق را به صورت المان دوبعدی فرض می کنند)

۳. میان صفحه مسطح و بدون تغییر شکل اولیه است. (این مورد نیز می تواند درنظر گرفته نشود)

۴. صفحات عمود بر میان صفحه پس از اعمال بار، صفحه ای و عمود باقی می مانند(یعنی کرنش در عمق ورق، بصورت خطی تغییر می کند و ارتباطی با جنس ماده ندارد). لازم به ذکر است که این فرض توسط "کیرشهف" و" برنولی" ارائه شده است و با معتبر دانستن آن، اثر تمامی تنش های برشی که در سطح ورق اثر می کنند نادیده گرفته می شود.

۵. ضخامت ورق در مقایسه با ابعاد آن کوچک است:

$$t \leq \left(\frac{1}{50} - \frac{1}{10}\right) \min(a, b) \qquad (۱-۱)$$

دراین رابطه t ضخامت ورق و a و b به ترتیب طول وعرض ورق می باشند. بر این اساس ورق ها به دو دسته ورق نازک و ورق ضخیم که به ترتیب توسط "برنولی" و "تیموشنکو" معرفی شدند تقسیم می شوند.

۶. تغییر شکل ورق در برابر ضخامت آن ناچیز است:

$$w \leq \frac{1}{10} t \qquad (۲-۱)$$

در این رابطه منظور از w خیز ورق در راستای عمودی می باشد. بر این اساس ورق ها در محدوده دو نوع تغییر شکل به نام های تغییر شکل کوچک و تغییر شکل بزرگ قرار می گیرند.

۷. از تنش های محوری σ_z عمود بر صفحه ورق صرفنظر می شود.

۸. شیب ورق در برابر واحد قابل صرفنظر است.

با استفاده از فرضیات فوق می توان همه مولفه های تنش وارد بر ورق را بر حسب تغییر شکل w که خود تابعی از دو متغیر x و y است، به دست آورد. روند به دست آوردن مولفه های تنش وارد بر ورق بدین صورت است که تابع $w = f(x,y)$ بایستی در معادله دیفرانسیل ورق موردنظر،که یک معادله دیفرانسیل از مرتبه چهارم است، با اعمال شرایط تکیه گاهی ورق صدق کند. از حل این معادله دیفرانسیل محاسبه گشتاورهای خمشی و مولفه های تنش وارد بر صفحه امکان پذیر می شود.

۱-۲-۱ انواع ورق

به طور کلی، در علوم مهندسی منظور از ورق یا صفحه جسمی است سه بعدی که بعد ضخامت آن در مقایسه با دو بعد دیگر که بیانگر سطح صفحه هستند بسیار کوچک است. خمش و تغییر شکل حاصل از بارگذاری ورق ها بستگی زیادی به بعد ضخامت دارند تا دو بعد دیگر. ورق ها را از نظر ضخامت و تغییر شکل می توان به صورت زیر تقسیم بندی کرد:

۱. ورق های نازک با تغییرشکل های کوچک

۲. ورق های نازک با تغییرشکل های بزرگ

۳. ورق های با ضخامت زیاد

در این جا برای آشنایی و درک تفاوت بین این سه نوع ورق به معرفی مختصر هر یک از آن ها پرداخته می شود. لازم به ذکر است که کل مطالعات انجام گرفته در این تحقیق مربوط به مقاطعی هستند که ورق های تشکیل دهنده آن ها جزء ورق های نازک با تغییر شکل های کوچک محسوب می شوند.

۱-۲-۱-۱ ورق های نازک با تغییرشکل های کوچک

چنانچه نسبت ضخامت ورق (t) به کوچکترین بعد سطح آن (b) کمتر یا مساوی $\frac{1}{10}$ باشد، ورق را نازک می نامند :

$$\frac{t}{b} \leq \frac{1}{10} \qquad (۱-۳)$$

تغییر شکل خمشی یا خیز w این ورق زمانی کوچک فرض می شود که نسبت آن به ضخامت کمتر یا مساوی $\frac{1}{5}$ باشد :

$$\frac{w}{t} \leq \frac{1}{5} \qquad (۱-۴)$$

البته نتایج حاصل از فرض تغییر شکل های کوچک را می توان با تقریب خوبی برای ورق های با $\frac{w}{t} \leq 1$ نیز به کار برد.

۱-۲-۱-۲ ورق های نازک با تغییر شکل های بزرگ

در واقعیت، در تئوری تغییر شکل های کوچک نیز سطح میانی دچار تغییر شکل می شود. ولی در ورق های نازک می توان اثر آن را نادیده گرفت. از طرفی چنانچه تغییر شکل خمشی یا خیز ورق w در حدود ضخامت صفحه و یا بیشتر از آن باشد نمی توان از تغییر شکل سطح میانی صرفنظر نمود و باید آن را در محاسبات وارد کرد. بدین منظور شرط تغییر شکل های بزرگ مطابق رابطه زیر تعیین می گردد:

$$\frac{w}{t} \geq 1 \qquad (۱-۵)$$

در این حالت فرض چهارم قسمت ۱-۲ در مورد فرضیات اولیه تحلیل ورق ها معتبر نبوده و معادله دیفرانسیل خیز w به صورت غیرخطی در می آید. در حالتی که خیز بزرگ باشد شرایط انتهایی نیز تغییر می کند و لبه های آزاد یا گیردار ورق در تنش های کششی موثر می شوند. هم چنین سطح میانی در دو جهت x و y تغییر طول می دهد و به علت بزرگ بودن خیز، انحنای صفحه زیاد خواهد بود. به عبارت دیگر تنش های غشایی سطح میانی در خمش، موثر بوده و تغییر شکل ورق به صورت ترکیبی از خمش معمولی و تغییر شکل های غشایی بیان می شود.

۱-۲-۱-۳ ورق های با ضخامت زیاد

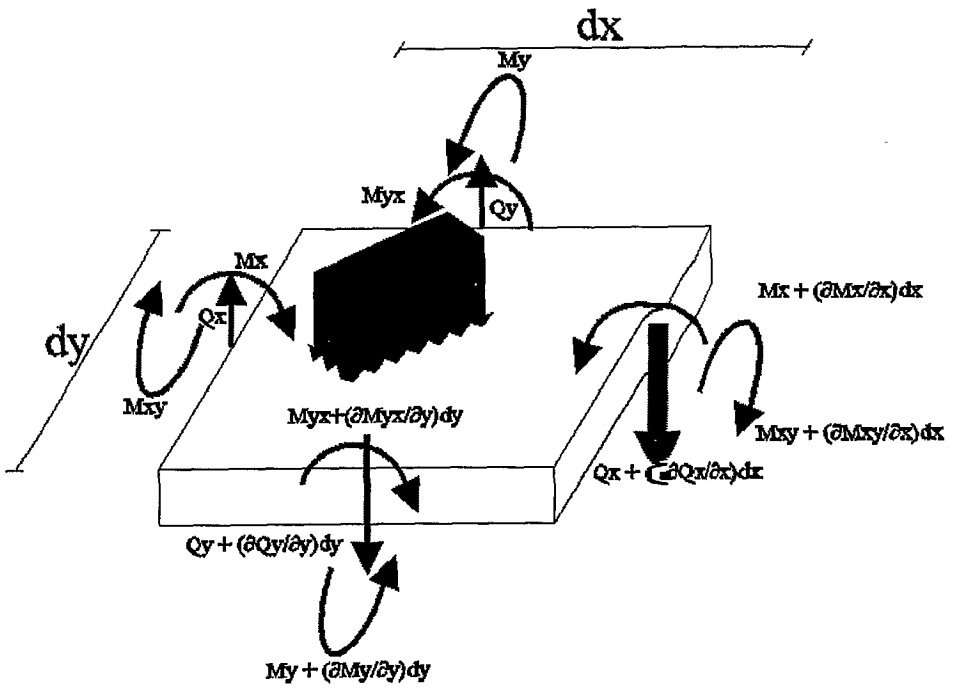
چنانچه ضخامت ورق نسبت به ابعاد دیگر آن قابل ملاحظه باشد فرضیات در نظر گرفته شده درمورد ورق های نازک با تغییر شکل های کوچک معتبر نبوده و به کارگیری معادلات دیفرانسیل مربوطه تقریب زیادی را به همراه خواهد داشت. در این حالت نیز فرض چهارم قسمت ۱-۲ در مورد فرضیات اولیه تحلیل ورق ها کاملاً غلط بوده ، به طوری که تنش های برشی در سطح ورق به خصوص در حالتی که بارهای متمرکز بزرگی وجود داشته باشند قابل ملاحظه می باشند. برای تحلیل این نوع از ورق ها از تئوری های الاستیسیته سه بعدی با در نظر گرفتن همه مولفه های تنش برشی استفاده می شود، در حالی که برای صفحات نازک تئوری الاستیسیته دو بعدی مورد استفاده قرار می گیرد.

۱-۲-۲ معادله دیفرانسیل حاکم بر رفتار ورق

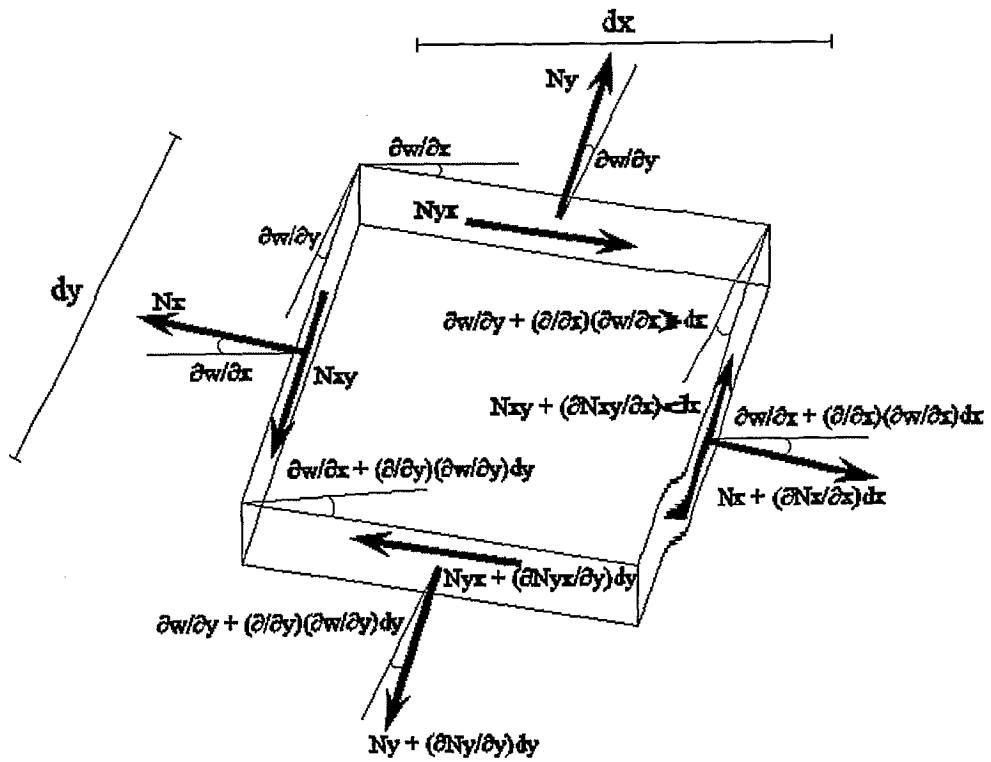
برای به دست آوردن معادله دیفرانسیل حاکم بر رفتار ورق، روابطی به ترتیب زیر نیاز می باشند:

۱. روابط بین جابجایی-کرنش (روابط هم سازی)
۲. روابط بین کرنش- تنش
۳. روابط بین نیروها و تنش ها (معادلات تعادل)

از آن جا که هدف اصلی این تحقیق در مورد کمانش اعضای جدار نازک است، لذا از ذکر جزئیات مربوط به بدست آوردن معادله دیفرانسیل ورق صرف نظر شده است. برای اطلاعات کامل در این زمینه مطالعه مرجع [۷۹] توصیه می شود. روابط فوق بر پایه تئوری الاستیسیته دو بعدی به دست می آیند. شکل های (۱ -۲) و (۱-۳) به ترتیب نیروهای خارج از صفحه (و ممان ها) و داخل صفحه



شکل (۱-۲) نیروها ی خارج از صفحه و ممان ها ی وارد بر المان ورق



شکل (۱-۳) نیروهای داخل صفحه وارد بر المان ورق و تغییر شکل های خمشی حاصل از آن ها