بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

بخش مهندسی عمران

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش سازه

خمش موضعی بال در اتصالات تیر به ستون های I شکل دارای دو جان

مولف:

رضا امانی

استاد راهنما:

دکتر حامد صفاری

استاد مشاور:

دکتر محمدجواد فدایی

دی ماه ۱۳۹۳

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

بخش مهندسی عمران

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو : رضا امانی

استاد راهنما : دکتر حامد صفاری

استاد مشاور : دکتر محمدجواد فدایی

داور ۱ : دکتر جواد سلاجقه

داور۲ : دکتر پیمان ترک زاده ماهانی

نماینده تحصیلات تکمیلی : دکتر سعید شجاعی باغینی

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده : دکتر مرتضی زند رحیمی

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است

تقدیم به :

پدر و مادر فداکار و مهربانم

تقدیر و سپاسگزاری

با سپاس از خداوند منان برای به پایان رسانیدن این رساله، لازم می دارم از زحمات استاد عزیز و گرانقدر جناب آقای دکتر صفاری که در تمام مدت با عنایت تمام و صعه صدر بنده را مورد راهنمایی قرار دادند تشکر کنم.

از داوران عزیز، جناب دکتر سلاجقه و جناب دکتر ترک زاده که زحمت داوری این رساله را بر عهده داشتند نهایت تشکر را دارم.

از خانواده ام که در تمام مدت تحصیل، یار و پشتیبان همیشگی ام بوده اند و حمایت و دلگرمیشان موجب پیشرفت من در مراحل مختلف تحصیل بوده است، نهایت سپاس و تشکر را دارم.

همچنین از تمامی دوستانم که مرا در به پایان رسانیدن این رساله همراهی و مساعدت کردند صمیمانه تشکر میکنم.

چکیده

تیرهای اتصالات صلب در قاب های خمشی، هنگام وقوع زلزله های شدید، زوج نیروهای متمرکز قابل توجهی را به بال ستون وارد می کنند. در صورتی که مقاومت خمشی بال ستون کمتر از نیرو های متمرکز ایجاد شده باشد، استفاده از ورق پیوستگی در ناحیه چشمه اتصال ضروری می باشد. نیاز یا عدم نیاز به ورق پیوستگی در ستون به پارامترهای متعددی بستگی دارد که خمش موضعی بال ستون از مهمترین آنهاست. خمش موضعی بال با توجه به مشخصات اجزای اتصال به اشکال متفاوتی روی میدهد. در رابطه با خمش موضعی بال در ستون های I شکل مطالعات وسیعی صورت پذیرفته و در دستور العمل ها به آنها اشاره شده که جهت طرح لرزه ای قابل اعتماد میباشند، اما روابط ارائه شده برای ستون های قوطی شکل نیازهای طرح لرزه ای را برآورده نمی کنند. بدلیل اجرای دشوار ورق های پیوستگی در ستون های قوطی شکل، می توان از ستون های دوجانه که اغلب به ورق پیوستگی نیاز ندارند، به عنوان یک جانشین مناسب برای ستون قوطی شکل در سازه های یک جهت قاب خمشی استفاده کرد. خمش موضعی بال ستون های دوجانه با توجه به نحوه ساخت، رفتاری بینابین ستون I شکل و قوطی شکل دارد. در این تحقیق ابتدا با استفاده از اصول تحلیل سازه و تئوری خط تسلیم روابطی جهت تخمین خمش موضعی بال در ستون های I شکل دارای دو جان و ستون های قوطی شکل ارائه شده، سپس با استفاده از آنالیز غیرخطی اجزا محدود و مقایسه آنها دقت روابط ارائه شده به اثبات رسیده است. نتایج روابط ارائه شده نشان می دهد که با تنظیم مناسب فاصله بین جانها، میتوان حداقل ضخامت بال ستون را در ستون دوجانه بدون ورق پیوستگی به میزان قابل توجهی نسبت به حالت مشابه در ستون قوطی شکل کاهش داد.

واژگان کلیدی: خمش موضعی بال، ورق های پیوستگی، ستون قوطی شکل، ستون I شکل دوجانه، تئوری خط تسلیم

فهرست

فصل اول: پیشگفتار ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ قاب خمشی فولادی ۴

۱-۳ چشمه اتصال ۵

۱-۴ شکل پذیری ۶

۱-۵ خط تسلیم(لولای گسیختگی) ۹

۱-۶ ساختار رساله ۱۲

فصل دوم: مروری بر تاریخچه تحقیقات ۱۳

۲-۱ مقدمه ۱۴

۲-۲ مطالعات و آزمایش های انجام شده بر روی اتصالات صلب فولادی ۱۴

۲-۳ مروری بر تاریخچه چشمه اتصال ۱۶

۲-۳-۱ آزمایشات انجام شده جهت بررسی رفتار چشمه اتصال ۱۷

۲-۴ مطالعات انجام شده روی طراحی و رفتار ورق پیوستگی ۱۸

فصل سوم: مدل های تحلیلی موجود برای خمش موضعی بال ستون ۲۳

۳-۱ مقدمه ۲۴

۳-۲ مدل گراهام ۲۴

۳-۳مدل پروچنو و همکاران ۲۷

۳-۴ مدل های موجود ستون قوطی شکل ۲۸

فصل چهارم: ارائه مدل ریاضی برای خمش موضعی بال ستون های قوطی شکل و I شکل دارای دوجان ۳۱

۴-۱ مقدمه ۳۲

۴-۲ مدل تحلیلی جهت تعیین خمش موضعی بال ستون I شکل ۳۴

۴-۲-۱ مدل گراهام ۳۴

۴-۲-۲ مدل ریاضی ارائه شده برای خمش موضعی بال در ستون های قوطی شکل ۳۴

۴-۲-۳ مدل ریاضی خمش موضعی بال برای ستون I شکل دارای دو جان ۳۹

۴-۳ مدل اجزا محدود ۴۴

۴-۳-۱ مدلسازی ۴۴

۴-۳-۲ صحت سنجی ۴۷

۴-۳-۳ معیار پذیرش شکست ۴۹

۴-۳-۴ مدل اجزا محدود برای ستون I شکل ۴۹

۴-۳-۵ مدل اجزا محدود برای ستون قوطی شکل ۵۰

۴-۳-۶ مدل اجزا محدود برای ستون I شکل دارای دو جان ۵۶

۴-۴ اثر همزمان کشش و فشار وارد بر بال ستون و تاثیر بر نتایج خمش موضعی بال ستون..... ۶۱

۴-۵ نیاز و عدم نیاز به ورق پیوستگی ۶۲

فصل پنجم: جمع بندی و پیشنهادات ٦٥

۵-۱ مقدمه ۶۶

۵-۲ نتیجه گیری کلی ۶۶

۵-۳ پیشنهادات ۶۶

فصل ششم: منابع و مراجع ٦٨

۶-۱ مراجع ۶۹

فهرست جداول

جدول ۳-۱: پارامترهای تعریف شده در رابطه گراهام ۲۵

جدول ۴-۱: مشخصات مصالح مورد استفاده در آزمایش سَک ۷ .....۴۷

جدول ۴-۲: مشخصات آزمایش انجام شده توسط گراهام برای خمش موضعی بال ستون I شکل ۵۰

جدول ۴-۳: مشخصات مدل های ستون قوطی شکل ساخته شده ۵۰

جدول ۴-۴: مشخصات مدل های ساخته شده برای ستون دوجانه ۵۶

جدول ۴-۵: :مقایسه حداقل ضخامت بال ستون در ستون قوطی شکل و دوجانه $\beta \le 0.5$ ۶۴

جدول ۴-۶: مقایسه حداقل ضخامت بال ستون در ستون قوطی شکل و دوجانه $\beta > 0.5$ ۶۴

فهرست اشکال

شکل ۱-۱: قاب خمشی فولادی ۵

شکل ۱-۲: چشمه اتصال فولادی ۶

شکل ۱-۳: شکل پذیری و استهلاک انرژی ۸

شکل ۱-۴: : ایجاد تغییرشکل های غیرالاستیک (مفاصل پلاستیک) در سازه شکل پذیر ۸

شکل ۱-۵: مقایسه خط تسلیم فرضی با مشاهدات نرم افزاری ۱۰

شکل ۱-۶: شمای گسیختگی با انجام آزمایش ۱۰

شکل ۳-۱: پارامترهای فرض شده توسط گراهام برای خمش موضعی بال ستون I شکل ۲۵

شکل ۳-۲: خط تسلیم فرضی توسط پروچنو و همکاران ۲۷

شکل ۳-۳: خط تسلیم فرضی برای ستون قوطی شکل ۲۸

شکل ۳-۴: توزیع تنش در بال ستون های قوطی شکل و I شکل ۲۹

شکل ۴-۱: تغییرشکل بال ستون در مقابل کششی ۳۳

شکل ۴-۲: خط تسلیم فرضی در مدل ارائه شده ۳۵

شکل ۴-۳: محل برآیند نتایج نیمه گیردار حاصل از ترکیب نتایج گیردار و مفصلی ۳۸

شکل ۴-۴: ستون دوجانه ارائه شده توسط مرجع [۲]..... ۳۹

شکل ۴-۵: مدل تیر برای ستون بال پهن و بال پهن قوطی شده ۴۰

شکل ۴-۶: مدل تیر برای ستون بال پهن و دوجانه ۴۱

شکل ۴-۷: بال ستون دوجانه در مقابل بال کششی تیر ۴۳

شکل ۴-۸: مدلسازی ستون دوجانه در نرم افزار آباکوس ۴۵

شکل ۴-۹: مشخصات ستون دوجانه برای مقایسه المان شل و سالید ۴۶

شکل ۴-۱۰: مشخصات آزمایش سَک ۷ ..... ۴۸

شکل ۴-۱۱: آزمایش خمش موضعی بال توسط گراهام..... ۴۹

شکل ۴-۱۲: اثر همزمان کشش و فشار به بال ستون..... ۶۱

فصل اول

پیشگفتار

۱-۱ مقدمه

امروزه برای مقابله با نیرو های جانبی ناشی از باد و زلزله، استفاده ازیکی از سیستم های باربرجانبی در سازه ها ضروری است. سیستم های مختلفی برای مقابله با نیروهای جانبی وجود دارد که هرکدام با توجه به شرایط و نوع کاربری سازه مورد استفاده قرار می گیرند. سیستم های قاب خمشی فولادی و بتنی، دیوار برشی فولادی و بتنی و سیستم های مهاربندی همگرا و واگرا از جمله سیستم هایی هستند که بیشترین سهم را در سازه های امروزی دارند. سیستم قاب خمشی فولادی یکی از سیستم های رایج و پرکاربرد برای مقابله با نیروی های ناشی از باد و زلزله به شمار می رود. از آنجا که در این سیستم، چشمه اتصال نقش مهمی در شکل پذیری و عملکرد سازه دارد، بررسی نحوه انتقال نیروها به چشمه اتصال ضروری است.در هنگام وجود نیروهای جانبی، اتصال صلب تیر به ستون در معرض لنگرهای خمشی بزرگی قرار می گیرد که این لنگرها بصورت زوج نیروی متمرکز به بال ستون وارد می شوند. نیروهای متمرکز کششی و فشاری ایجاد شده ناشی از لنگر تیر، بال ستون را در معرض خمش قرار می دهند. خمش ایجاد شده که با نام خمش موضعی بال ستون شناخته شده است، عملکرد چشمه اتصال را تحت الشعاع قرار می دهد. در صورتی که مقاومت خمشی بال ستون از نیروی متمرکز ایجاد شده توسط بال تیر کمتر باشد، بال ستون تغییرشکل زیادی از خود نشان می دهد. این تغییرشکل که بعضا با کمانش و اعوجاج بال ستون همراه است، موجب تغییرشکل زیاد چشمه اتصال، شکست جوش و عملکرد ناقص این قسمت می شود. بنابراین بررسی عملکرد بال ستون در مقابل نیروهای متمرکز ایجاد شده از اهمیت بالایی برخودار است.

لنگر ایجاد شده در ستون ناشی از نیروی زلزله یا باد توسط زوج نیروی متمرکز توسط بال تیر به بال ستون انتقال پیدا می کند. چنانچه ظرفیت خمشی بال ستون کمتر از حداکثر نیروی ایجاد شده توسط بال تیر باشد، می توان با قرار دادن یک جفت ورق پیوستگی در امتداد بال تیر در اتصال صلب مستقیم و یا در امتداد ورق های روسری و زیرسری در اتصال صلب غیرمستقیم، اختلاف مقاومت بین بال ستون و نیروی ایجاد شده توسط تیر را جبران نمود. ورق پیوستگی باید برای اختلاف نیروی ایجاد شده توسط بال تیر و نیروی متناظر با ظرفیت خمشی بال ستون طراحی شود.

اجرای ورق پیوستگی در ستون های I شکل با توجه به دسترسی کامل به ناحیه چشمه اتصال، به سادگی امکان پذیر است. اما در ستون های قوطی شکل اجرای این ورق ها بخصوص اجرای جوش ضلع چهارم ورق پیوستگی با مشکلاتی همراه است که بعضا این مشکلات باعث اجرا نشدن

این عضو مهم در این نوع ستون می گردد. صفاری و همکاران [1] با ارائه راهکارهایی که جایگزین اجرای فعلی ورق پیوستگی در بال ستون قوطی شکل می باشد، مشکل درست اجرا نشدن ورق پیوستگی در ستون قوطی شکل را رفع نمودند.

صفاری و همکاران [2] به منظور حذف ورق پیوستگی در ستون های قوطی شکل، ستون های I شکل دارای دو جان را ارئه کردند. ستون دوجانه از سختی پیچشی به مراتب بالاتری در مقایسه با ستون های I شکل برخوردار بوده و در عین حال به علت کاهش خمش موضعی به راحتی امکان حذف ورق پیوستگی در آن وجود دارد.

مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی در زمینه بال و جان ستون و رفتار آن ها در اتصالات صلب، توسط شربورن و جنسن[3] وگراهام [4] آغاز شد. جانسون [7-5] در سه سری آزمایش روی چشمه اتصال با و بدون ورق پیوستگی، نشان داد جوش گوشه برای اتصال ورق پیوستگی و بال ستون کافی است. پوپوف[8] نشان داد اتصالات با ورق پیوستگی چرخش غیر ارتجاعی تیر را بسیار افزایش می دهد. در ادامه ترمبلی [9] ، کافمن [10]، رودِر [11]، انگلهارت، شی و سالبل [12]، یی [13]، ال تاویل [14]، جورهوفد [15]، انگلهارت [16] ، دکستر و ملندرز [17] ، ریکلز [18] نیز در زمینه اتصالات با و بدون ورق پیوستگی تحقیقات گسترده ای را انجام دادند که نتایج تحقیقاتشان در بند های آیین نامه های معتبر مشاهده می شود [19].

منصوری و صفاری [20] مدل جدیدی از مقاومت برشی چشمه اتصال را که برای ضخامت های کم تا زیاد بال ستون نتایج با دقت قابل قبولی را داشت، ارائه کردند.

با داشتن رابطه خمش موضعی بال می توان به حداقل ضخامت بال ستون که مقطع نیازی به ورق پیوستگی نداشته باشد، دست پیداکرد. بدست آوردن ظرفیت خمشی بال ستون، با توجه به نوع مقطع ستون و تغییر شکل بال مقطع در مقابل این نیرو، باعث ایجاد تفاوت در روابط بدست آمده برای مقاطع مختلف ستون شده است.

آیین نامه های معتبر دنیا از جمله آیین نامه فولاد آمریکا [19] با توجه به تحقیقات محققین برای خمش موضعی بال در ستون های I شکل روابط قابل قبولی را ارائه کرده اند. این روابط بر اساس نتایج گراهام [4] و ریکلز [18] که بر اساس تئوری خط تسلیم [21] و آزمایش بدست آمدند، ارائه شده است. ستون های قوطی شکل با توجه به عملکرد متفاوت نسبت به ستون I شکل در مقابل بار متمرکز تیر، نیاز به روابط و آزمایش جداگانه ای دارند. آیین نامه فولاد آمریکا برای ستون های HSS مستطیلی، رابطه ای را بر اساس نتایج دیویس و پاکر [22] ارائه کرد، اما این روابط در آیین نامه لرزه ای آمریکا [23] جایی نداشت.

در این تحقیق، با توجه به نبود رابطه خمش موضعی بال برای ستون های قوطی شکل که نیاز های لرزه ای را در نظر گرفته باشد، و همچنین با توجه به ارائه اخیر ستون دوجانه و نبود رابطه خمش موضعی بال، با استفاده از تئوری خط تسلیم و استفاده از مدل های تحلیلی، روابطی جهت تخمین مقاومت خمشی بال ستون برای ستون های قوطی شکل و ستون های دوجانه ارائه شده است.

با مدلسازی ستون های قوطی شکل و دوجانه در نرم افزار آباکوس و آنالیز غیرخطی اجزا محدود روی طیف گسترده ای از ضخامت و ابعاد، دقت روابط ارائه شده مورد تصدیق قرار گرفته است.

۲-۱ قاب خمشی فولادی[1]

یکی از سیستم های مورد استفاده برای مقابله با نیروی های جانبی، قاب خمشی فولادی می باشد. قاب خمشی به دلیل استفاده نکردن از مهاربند فضای مناسبی را برای طراحی فضا در اختیار معماران قرار می دهد و از این رو از سیستم های پر طرفدار می باشد. اتصالات صلب در این سیستم نقش اصلی را ایفا می کنند. این اتصالات در مدل های مختلف از جمله اجرا با ورق روسری و زیرسری، اجرا با اتصال مستقیم تیر به ستون، اجرا با ورق لچکی،اتصال با مقطع کاهش یافته و ... قابلیت اجرا دارند. اتصال تمام صلب باید به نحوی دوران داشته باشد تا زاویه بین تیر و ستون از حالت قائم خارج نشود. به اتصالی که زاویه بین تیر و ستون در حین دوران کاهش می یابد، اتصال نیمه صلب می گویند. عملکرد مطلوب سیستم قاب خمشی ارتباط مستقیمی با دوران اتصال تیر به ستون دارد. اگر اتصال نتواند دوران مورد انتظار را فراهم کند، اتصال در دوارنی کمتر از حد مورد انتظار گسیخته شده و قاب شکل پذیری و مقاومت لازم را در برابر نیروی جانبی نخواهد داشت.

1- Steel moment frame

شکل ۱-۱: قاب خمشی فولادی

به منظور استفاده از قاب خمشی در همه پهنه های لرزه خیزی، سه نوع سیستم قاب خمشی پیشنهاد شده است:

۱) قاب خمشی معمولی

۲) قاب خمشی متوسط

۳) قاب خمشی ویژه

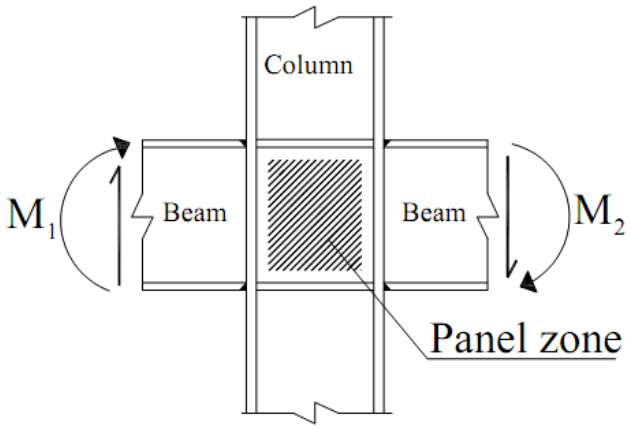
مهمترین تفاوت در سیستم های بالا، دوران اتصال تیر به ستون می باشد. بر اساس آیین نامه های معتبر موجود، قاب خمشی ویژه باید بتواند دورانی در حدود ۴ درصد رادیان را فراهم کند تا سیستم قاب خمشی ویژه قابل قبول باشد. استفاده از قاب خمشی معمولی در پهنه لرزه خیزی زیاد و خیلی زیاد ممنوع می باشد. خرابی های معمول در این سازه معمولا بدلیل شکست در ناحیه جوش اتصال تیر به ستون می باشد. ارائه مدل تیر با مقطع کاهش یافته برای دور کردن تمرکز تنش از ناحیه اتصال تیر به ستون می باشد. قاب خمشی نسبت به قاب های مهاربندی شده از لحاظ اقتصادی به صرفه نمی باشند.

۱-۳ چشمه اتصال[1]

به ناحیه ای از جان ستون که از بالا و پایین به ورق پیوستگی و از اطراف به بال ستون منتهی می شود، به اصطلاح چشمه اتصال گفته می شود. با توجه به آنکه خمش ایجاد شده در انتهای تیر

1- Panel zone

توسط زوج نیروی متمرکز به بال ستون وارد می شود، چشمه اتصال تحت اثر نیروهای بزرگ متمرکز قرار می گیرد.



شکل ۱-۲: چشمه اتصال فولادی

نتایج تحقیقات بر روی چشمه اتصال نشان می دهد برش ایجاد شدهدر چشمه اتصال که با هاشور در شکل قبل نمایش داده شد، تقریبا ثابت است. در زلزله های شدید مقدار این برش قابل توجه می باشد. در صورتی که چشمه اتصال پاسخگوی نیاز لرزه ای نباشد، استفاده از ورق مضاعف در این ناحیه ضروری می باشد.

نیروی متمرکز انتقال یافته از بال تیر به بال ستون باعث ایجاد خمش موضعی در بال ستون می شود که در صورت تامین نشدن مقاومت خمشی لازم توسط بال ستون، استفاده از ورق پیوستگی لازم می گردد.

۱-۴ شکل پذیری[1]

مصالح شکل پذیر به موادی گفته می شود که در حین تحمل بار، کرنش های زیادی را از خود نشان می دهند .یک عضو شکل پذیر باید اولاً قادر باشد به قدر کافی تغییرشکل های غیر ارتجاعی زیادی را تحمل کند بدون اینکه مقاومتش به طور چشمگیری کاسته شود و ثانیاً قادر باشد مقدار قابل توجهی از انرژی زلزله را از طریق چرخه های رفتاری پایدار، جذب و مستهلک نماید.

1- Ductility

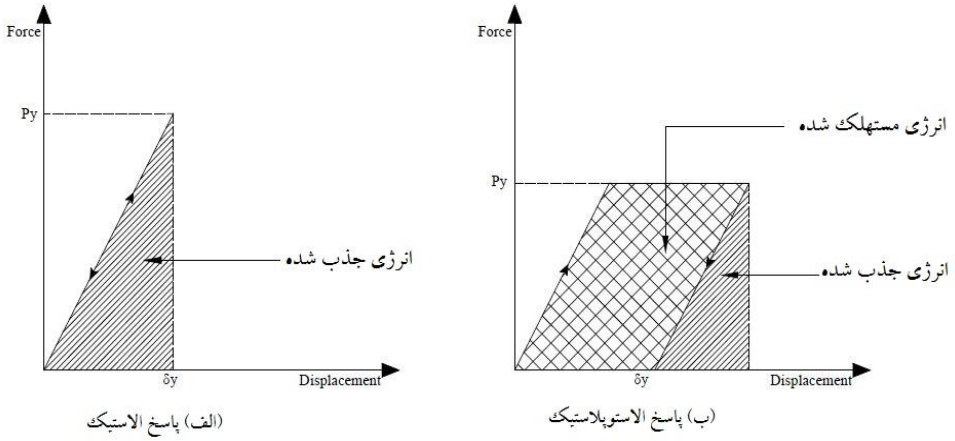
شکل پذیری قاب ها به صورت نسبت تغییر مکان نهایی انتهای قاب به تغییر مکان نظیر حد تسلیم انتهای قاب به صورت رابطه زیر تعریف می شود:

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y}$$ *رابطه ۱-۱*

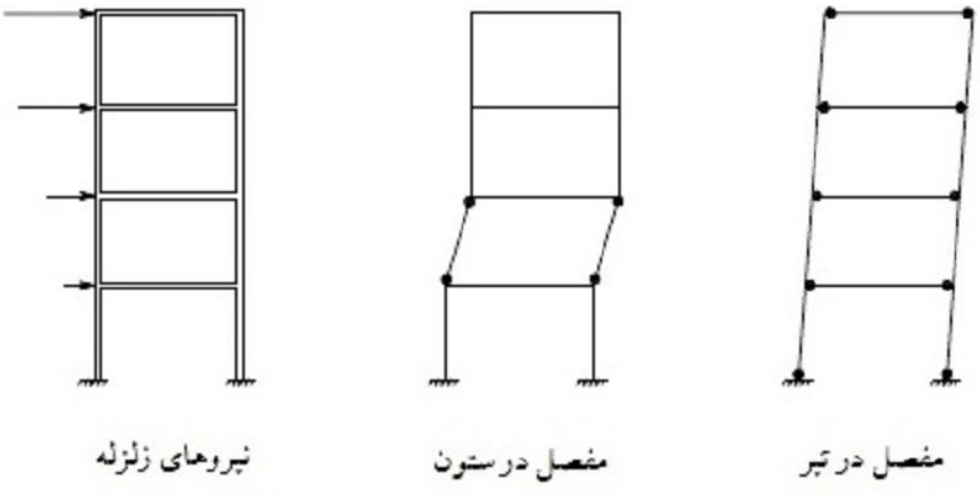
در اغلب موارد شکل پذیری مقاطع را با انحناء بیان می کنند. در این صورت فاکتور شکل پذیری به صورت نسبت انحناء در بار نهایی حالت پلاستیک به انحناء در اولین تسلیم به صورت رابطه زیر تعریف می شود:

$$\mu = \frac{\phi u}{\phi y}$$ *رابطه ۱-۲*

شکل پذیری به کاهش نیروها در اعضا کمک می‌کند و انرژی حاصل از اثرات زلزله را مستهلک می‌نماید. این موضوع به صورت شماتیک در شکل ۱-۳، برای حالت سادهٔ یک سیکل بارگذاری و بار برداری استاتیک، نشان داده شده‌است. به ازای اعمال انرژی یکسان، حداکثر نیروی بوجود آمده، P_u، در یک سیستم دارای رفتار الاستیک از سیستم دارای رفتار الاستوپلاستیک بزرگتر خواهد بود. علاوه بر این، سیستم اخیر بخش عمده ای از انرژی را با تغییر شکل های غیر الاستیک مستهلک می سازد. اما حداکثر تغییر مکان، δu، سیستم الاستوپلاستیک (شکل پذیر) از مقدار آن در سیستم الاستیک(خطی) بزرگتر خواهد بود. بدین ترتیب، در حالی که شکل پذیری به کاهش نیروها و استهلاک انرژی کمک می‌کند، همچنین ملزم می دارد که سیستم توان ایجاد تغییر شکل های بزرگرا بدون تخریب های بزرگتر داشته باشد.



شکل ۱-۳: شکل پذیری و استهلاک انرژی



شکل ۱-۴: : ایجاد تغییرشکل های غیرالاستیک (مفاصل پلاستیک) در سازه شکل پذیر

در ساختمانهای متشکل از قابهای شکل پذیر ایجاد رفتار غیر الاستیک در اعضاء، مطابق شکل ۱-۳ انجام پذیر است. در مورد قابهای شکل پذیر، مفصل های پلاستیک ممکن است در تیرها یا ستونها تشکیل شوند، مطابق شکل ۱-۴ مفصل های پلاستیک در تیرها ظرفیت چرخشی بیشتری در مقایسه با مفصل های ستونی دارا می‌باشند و مکانیسم‌های شامل مفصل های تیر، با توجه به تعداد افزون تر مفصل‌های تیری، ظرفیت جذب انرزی بالاتری از خود نشان می دهند . اضافه بر این، در

صورت رخ دادن تغییر شکل‌های پسماند و ایجاد خسارت، مستقیم کردن و تعمیر ستون در مقایسه با تیر مشکل‌تر است. بنابراین ترجیح داده می شود که قاب به صورتی طراحی شود که تغییر شکل‌های غیرالاستیک به جای ستون‌ها در تیرها ایجاد شود.

۱-۵ خط تسلیم(لولای گسیختگی)[1]

در تحلیل سازه، هنگامی که یک یا چند نقطه از سازه به مقاومت خمشی خود می رسند تغییراتی در منحنی های الاستیک آنها بوجود می آید که دیگر نمی توان از آنالیز الاستیک استفاده نمود. اگر سازه شکل پذیری کافی داشته باشد، هر بار که یک مقطع به ظرفیت خمشی خود می رسد، بازتوزیع لنگر اتفاق می افتد تا اینکه تعدادی مفصل پلاستیک در سازه ایجاد شود و سازه به مکانیزم تبدیل شود. به آنالیزی که در آن لنگر های خمشی در لحظه فرو ریختگی مبنای طراحی قرار می گیرد آنالیز پلاستیک گفته می شود. تئوری خط تسلیم نیز یک روش بر مبنای آنالیز پلاستیک است که مقدمات آن از سال ۱۹۲۰ توسط اینگرسلف [24] آغاز شد، اما از سال های ۱۹۴۰ بصورت مدون توسط جانسِن [25] مورد استفاده قرار گرفت. در این روش فرض می شود که مقاومت صفحه بر اساس خمش تعیین می شود.

هنگامی که یک دال به مکانیزم تبدیل می شود، تغییر شکل های پلاستیک در امتداد خطوط تسلیم بسیار بیشتر از تغییر شکل های الاستیک بین خطوط تسلیم است، ازین رو می توان با دقت کافی فرض کرد که قطعات مذکور به صورت سطح مستوی اند.

اولین قدم در آنالیز دال ها به روش خطوط تسلیم، تعیین شمای گسیختگی است. شمای گسیختگی را می توان به کمک تجربه، آزمایش و یا نتایج مدلسازی، مشخص کرد. ممکن است برای یک صفحه چند شمای گسیختگی وجود داشته باشد که در این صورت طراح باید از خطوط تسلیم صحیح استفاده کند. امروزه می توان بدون انجام آزمایش که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست، از مدلسازی نرم افزارهای اجزا محدود استفاده کرد. برای مثال مقایسه شمای خط تسلیم بین یک دال چهار وجهی که با نرم افزار اجزا محدود مدل شده است نشان می دهد که خط تسلیم فرضی صحیح می باشد.

1-Yield line theory