



دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد  
گرایش سازه

عنوان

مطالعه پارامترهای موثر بر منحنی لنگر-دوران و تعیین میزان صلبیت  
اتصال pinfuse

نگارش

رسول رضایی

استاد راهنما

دکتر مرتضی نقی پور

استاد مشاور

دکتر جواد واثقی امیری

زمستان ۹۳

## چکیده

پس از وقوع زلزله نرتریج (Northridge) در ۱۷ ژانویه سال ۱۹۹۴ قاب‌های خمشی بسیاری از ناحیه اتصال دچار شکست ترد (Brittle fracture) شدند. این زلزله باعث ویرایش مجدد آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای سازه‌های فلزی شد. برای تأمین شکل‌پذیری و جلوگیری از ایجاد شکست ترد در اتصالات، تغییرات زیادی در نحوه اجرای اتصالات سازه‌های فولادی پیشنهاد گردید.

اتصال pinfuse اشکالات اتصالات قبل از زلزله نرتریج را نداشته و می‌تواند گزینه مناسبی برای پذیرش آیین‌نامه‌ها باشد. این اتصال با استفاده از پیچ و سوراخ‌های لوبیایی شکل‌پذیری لازم را برای اتصال تأمین می‌کند و مانع از ایجاد تنش‌های بحرانی در ناحیه اتصال بال تیر به ستون می‌شود. در اتصالات پیچی مودهای گسیختگی غیر شکل‌پذیر شامل: گسیختگی پیچ تحت برش، کشش یا ترکیب آنها، گسیختگی فولاد بین سوراخ‌ها و کمانش موضعی شدید می‌باشد در حالیکه مودهای گسیختگی که شکل‌پذیر تلقی می‌شود عبارتند از لغزش اصطکاکی محدود و کنترل شده، تسلیم فولاد و کمانش موضعی کوچک، بنابراین باید تلاش کنیم رفتار سازه را به سمت مودهای گسیختگی شکل‌پذیر سوق دهیم. یکی از این روش‌های ساده، کارا و اقتصادی در این زمینه استفاده از سوراخ‌های لوبیایی در وسایل اتصال تیر به ستون (اعم از ورق، نبشی، سپری و...) است. اگر تحت بار سرویس لغزش رخ دهد ممکن است قابلیت بهره‌برداری سازه دچار مشکل شود و در المان‌های غیر سازه‌ای ترد، ترک ایجاد کند. به هر حال اگر لغزش تحت شرایط کنترل شده در طول زلزله رخ دهد در بسیاری از موارد باعث بهبود عملکرد لرزه‌ای می‌شود. در این تحقیق، براساس نتایج آنالیز به روش اجزای محدود که با استفاده از برنامه ABAQUS 6.11 انجام گرفته است، منحنی لنگر دوران، مقادیر درجه‌گیری و همچنین نحوه تغییر شکل و توزیع تنش در اجزای اتصال، برای ۱۴ مدل مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نتایج نشان می‌دهد که این اتصال می‌تواند تا دوران‌هایی تا ۰/۴ رادیان تیر و ستون را در حالت الاستیک نگه دارد و شکل‌پذیری لازم را تأمین کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که نیروی پیش‌تنیدگی تاثیر کمی در نیروی لغزش دارد.

کلمات کلیدی: اتصال pinfuse، اتصال تیر به ستون، منحنی لنگر- دوران

۱	فصل اول مقدمه	۱
۲	۱.۱ مقدمه	۲
۳	۲.۱ قابهای مقاوم خمشی فولادی	۳
۴	۳.۱ اتصال مقاوم خمشی رایج قبل از زلزله نرتریج ۱۹۹۴	۴
۴	۴.۱ آسیبهای ایجاد شده در اتصالات گیردار زلزله نرتریج	۴
۵	۱.۴.۱ آسیبهای تیر	۵
۵	۲.۴.۱ آسیبهای ستون	۵
۶	۳.۴.۱ آسیبهای مربوط به جوش شیار و چشمه اتصال	۶
۹	۵.۱ علل وقوع شکست در اتصالات خمشی رایج، قبل از زلزله نرتریج	۹
۱۱	۶.۱ راه حل	۱۱
۱۳	۷.۱ روش تحقیق	۱۳
۱۴	۸.۱ اهداف تحقیق	۱۴
۱۴	۹.۱ فرضیات پژوهش	۱۴
۱۵	فصل دوم کلیاتی در مورد اتصالات	۱۵
۱۶	۱.۲ طبقه بندی قابهای ساختمانی	۱۶
۱۷	۲.۲ اتصالات تیر به ستون در ساختمانهای فولادی	۱۷
۱۷	۱.۲.۲ اتصال صلب تیر به ستون	۱۷
۲۱	۲.۲.۲ اتصال مفصلی تیر به ستون (اتصال ساده)	۲۱
۲۳	۳.۲.۲ اتصال نیمه صلب تیر به ستون	۲۳
۲۶	۳.۲ طبقه بندی اتصالات بر اساس مقاومت	۲۶
۲۸	۴.۲ مفهوم درجه گیرداری اتصال	۲۸
۳۱	۵.۲ منحنی لنگر - دوران ( $M-\theta$ ) اتصالات	۳۱
۳۴	۶.۲ مفهوم خط تیر	۳۴
۴۰	۷.۲ اتصالات پیچی	۴۰
۴۰	۱.۷.۲ انواع پیچها	۴۰
۴۰	۱.۱.۷.۲ پیچهای معمولی	۴۰
۴۱	۲.۱.۷.۲ پیچهای پرمقاومت	۴۱
۴۲	۲.۷.۲ اتصالات اتکایی	۴۲
۴۲	۳.۷.۲ اتصالات اصطکاکی	۴۲
۴۳	۴.۷.۲ الزامات طراحی	۴۳
۴۵	۵.۷.۲ مشخصات و فواصل سوراخها در اتصالات پیچی	۴۵

۴۸	مقاومت کششی طراحی و برشی طراحی در اتصالات اصطکاکی.....	۶.۷.۲
۴۹	اثر مشترک کشش و برش در اتصالات اصطکاکی.....	۷.۷.۲
۵۰	تاریخچه مطالعات انجام شده.....	۸.۲
۵۰	به کارگیری اتصالات پیچی لغزنده گیردار در مهاربندهای هم محور.....	۱.۸.۲
۵۱	اتصال لغزنده دوار.....	۲.۸.۲
۵۱	اتصال pin fuse.....	۹.۲
<b>۵۴</b>	<b>فصل سوم معرفی مدلها و نحوه مدلسازی.....</b>	<b>۳</b>
۵۵	معرفی قابلیت‌های نرم افزار ABAQUS.....	۱.۳
۵۹	مراحل شبیه سازی.....	۲.۳
۵۹	اجزای پنجره اصلی برنامه ABAQUS/CAE.....	۱.۲.۳
۶۰	ایجاد مدل هندسی (ماژول part).....	۲.۲.۳
۶۲	تعیین خواص ماده (ماژول Property).....	۳.۲.۳
۶۳	مونتاژ قطعات (ماژول Assembly).....	۴.۲.۳
۶۳	گامهای تحلیل (ماژول Step).....	۵.۲.۳
۶۳	تعیین تماس بین سطوح (ماژول Interaction).....	۶.۲.۳
۶۴	شرایط مرزی و بارگذاری (ماژول Load).....	۷.۲.۳
۶۶	المانبندی (ماژول Mesh).....	۸.۲.۳
۶۹	تحلیل فرآیند و گرفتن خروجی از نرم افزار (ماژول Job و Visualization).....	۹.۲.۳
۷۰	مشخصات اتصالات مدل شده در Abaqus.....	۳.۳
<b>۷۹</b>	<b>فصل چهارم: بحث و بررسی نتایج.....</b>	<b>۴</b>
۸۰	مقدمه.....	۱.۴
۸۰	تصدیق مدل.....	۲.۴
۸۲	رفتار نمونه‌های مدل شده:.....	۳.۴
۹۶	مقایسه رفتار اتصالات مدل شده.....	۴.۴
۹۶	تاثیر نیروی پیش تنیدگی.....	۱.۴.۴
۹۷	تاثیر ضخامت فلنجهها:.....	۲.۴.۴
۹۷	تاثیر شعاع فلنجهها:.....	۳.۴.۴
۹۸	تاثیر تعداد پیچ:.....	۴.۴.۴
۹۹	تاثیر قطر پیچ.....	۵.۴.۴
۱۰۰	مقایسه اتصال pinfuse و endplat.....	۶.۴.۴
۱۰۰	مقایسه اتصال pinfuse و rbs.....	۷.۴.۴
۱۰۱	میزان صلبیت اتصالات مدل شده:.....	۵.۴
<b>۱۰۳</b>	<b>فصل پنجم: نتایج و پیشنهادات.....</b>	<b>۵</b>

۱۰۴.....	نتیجه گیری.....	۱۰۵
۱۰۵.....	پیشنهادات.....	۲۰۵
۱۰۶.....	منابع و مراجع.....	

شکل ۱-۱ : اتصال خمشی رایج قبل از زلزله نرتریج [۱].....	۴
شکل ۲-۱ : انواع آسیبهای تیر [۱].....	۵
شکل ۳-۱ : انواع آسیبهای ستون [۱].....	۶
شکل ۴-۱ : شکست بال ستون در طی زلزله نرتریج [۱].....	۶
شکل ۵-۱ : انواع آسیبهای جوش شیاری [۱].....	۷
شکل ۶-۱ : انواع آسیبهای چشمه اتصال [۱].....	۸
شکل ۷-۱ : تقسیم ستون به دو قسمت با گسترش ترک در ناحیه چشمه اتصال [۱].....	۸
شکل ۸-۱ : شکست کامل اتصال تیر به ستون در طی زلزله نرتریج [۱].....	۹
شکل ۹-۱ : مسیر واقعی تنش [۴].....	۱۰
شکل ۱۰-۱ : شکست جان ستون به دلیل ناحیه پانلی ضعیف [۱].....	۱۱
شکل ۱۱-۱ : انواع اتصال تقویت شده پس از زلزله نرتریج [۱].....	۱۳
شکل ۱-۲ : اتصالات صلب تیر به ستون از نوع جوشی [۱۰].....	۱۹
شکل ۲-۲ : اتصالات صلب تیر به ستون از نوع پیچی [۱۰].....	۲۰
شکل ۳-۲ : اتصالات نیمه صلب تیر به ستون از نوع جوشی که تیر به ستون متصل شده است [۸].....	۲۰
شکل ۴-۲ : دو نوع اتصال ساده اجرایی [۱۱].....	۲۲
شکل ۵-۲ : برش لبه آزاد سخت کننده [۱۰ و ۱۲].....	۲۲
شکل ۶-۲ : انواع قاب با سختی اتصالات متفاوت [۸].....	۲۴
شکل ۷-۲ : اتصال با نبشی فوقانی و نشیمن [۱۱].....	۲۵
شکل ۸-۲ : اتصال نیمه صلب با نبشیمین و ورق فوقانی [۱۱].....	۲۶
شکل ۹-۲ : رفتار تیر و اتصال [۱۳].....	۲۸
شکل ۱۰-۲ : زیر سازه آنالیز شده [۱۳].....	۲۸
شکل ۱۱-۲ : فرضیات شرایط تکیه گاهی.....	۲۹
شکل ۱۲-۲ : دیگرامهای تغییرات لنگر برای حالات مختلف گیرداری تکیه گاه و بارگذاریها [۱۱].....	۳۰
شکل ۱۳-۲ : تیر منفرد با تکیه گاه ی فبری [۱۴].....	۳۱
شکل ۱۴-۲ : تغییر شکل دورانی اتصال.....	۳۲
شکل ۱۵-۲ : انواع منحنی لنگر- دوران.....	۳۳
شکل ۱۶-۲ : منحنی لنگر - دوران برخی اتصالات رایج [۱۷].....	۳۴
شکل ۱۷-۲ : لنگر و دوران برای معادلات شیب - افت (جهت مثبت لنگرها) [۱۰ و ۱۲].....	۳۵
شکل ۱۸-۲ : منحنی لنگر- دوران و خطوط تیر [۱۹].....	۳۷
شکل ۱۹-۲ : تغییر مفدار لنگر با شرایط تکیهگاهی [۱۲ و ۱۹].....	۳۹

شکل ۲-۲۰: شکل ظاهری مجموعه پیچ.....	۴۰
شکل ۲-۲۱: اتصال لغزشی با ورق برنجی- اتصال لغزنده خطی- اتصال لغزنده دورانی.....	۵۰
شکل ۲-۲۲: اتصال لغزنده دوار [۲۳].....	۵۱
شکل ۲-۲۳: اتصال pinfuse [۲۴].....	۵۳
شکل ۳-۱: مراحل انجام کار توسط آباکوس.....	۵۸
شکل ۳-۳: اجزای پنجره اصلی برنامه آباکوس.....	۵۹
شکل ۳-۴: قطعات مدل شده در آباکوس.....	۶۱
شکل ۳-۵: قطعات مدل شده در آباکوس.....	۶۱
شکل ۳-۶: اعمال شرایط مرزی.....	۶۵
شکل ۳-۷: شرایط تکیه گاهی نمونه.....	۶۵
شکل ۳-۸: المانهای (a) خطی (b) غیرخطی.....	۶۷
شکل ۳-۹: اعضای مش خورده.....	۶۸
شکل ۳-۱۰: ایجاد یک job جدید.....	۶۹
شکل ۳-۱۱: پنجره کامل شدن آنالیز.....	۶۹
شکل ۳-۱۲: اتصال مدل con-01.....	۷۱
شکل ۳-۱۳: اتصال مدل con-02.....	۷۲
شکل ۳-۱۴: اتصال مدل con-03.....	۷۲
شکل ۳-۱۵: اتصال مدل con-04.....	۷۳
شکل ۳-۱۶: اتصال مدل con-05.....	۷۳
شکل ۳-۱۷: اتصال مدل con-06.....	۷۴
شکل ۳-۱۸: اتصال مدل con-07.....	۷۴
شکل ۳-۱۹: اتصال مدل con-08.....	۷۵
شکل ۳-۲۰: اتصال مدل con-09.....	۷۵
شکل ۳-۲۱: اتصال مدل con-10.....	۷۶
شکل ۳-۲۲: اتصال مدل con-11.....	۷۷
شکل ۳-۲۳: اتصال مدل con-12.....	۷۷
شکل ۳-۲۴: اتصال مدل con-13.....	۷۸
شکل ۳-۲۵: اتصال مدل con-14.....	۷۸
شکل ۴-۱: اتصال مورد بررسی توماس و همکاران [۲۷].....	۸۰
شکل ۴-۲: نمونه آزمایشگاهی [۲۷].....	۸۱
شکل ۴-۳: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نرم افزاری.....	۸۱
شکل ۴-۴: نمودار لنگر-دوران مدل con-01.....	۸۲
شکل ۴-۵: تنش (فونمیسز) برای مدل con-01.....	۸۲

شکل ۴-۶: نمودار لنگر-دوران مدل con-02	۸۳
شکل ۴-۷: تنش(فون میسز) برای اتصال con-02	۸۳
شکل ۴-۸: نمودار لنگر- دوران مدل con-03	۸۴
شکل ۴-۹: تنش(فون میسز) برای اتصال con-03	۸۴
شکل ۴-۱۰: نمودار لنگر- دوران مدل con-04	۸۵
شکل ۴-۱۱: تنش(فون میسز) برای اتصال con-04	۸۵
شکل ۴-۱۲: نمودار لنگر- دوران اتصال con-05	۸۶
شکل ۴-۱۳: تنش(فون میسز) برای اتصال con-05	۸۶
شکل ۴-۱۴: نمودار لنگر دوران اتصال con-06	۸۷
شکل ۴-۱۵: تنش(فون میسز) برای اتصال con-06	۸۷
شکل ۴-۱۶: نمودار لنگر دوران اتصال con-07	۸۸
شکل ۴-۱۷: تنش(فون میسز) برای اتصال con-06	۸۸
شکل ۴-۱۸: نمودار لنگر دوران اتصال con-08	۸۹
شکل ۴-۱۹: تنش(فون میسز) برای اتصال con-07	۸۹
شکل ۴-۲۰: نمودار لنگر دوران اتصال con-09	۹۰
شکل ۴-۲۱: تنش(فون میسز) برای اتصال con-09	۹۰
شکل ۴-۲۲: نمودار لنگر دوران اتصال con-10	۹۱
شکل ۴-۲۳: تنش(فون میسز) برای اتصال con-10	۹۱
شکل ۴-۲۴: نمودار لنگر دوران اتصال con-11	۹۲
شکل ۴-۲۵: تنش(فون میسز) برای اتصال con-11	۹۲
شکل ۴-۲۶: نمودار لنگر- دوران مدل con-12	۹۳
شکل ۴-۲۷: تنش(فون میسز) برای اتصال con-12	۹۳
شکل ۴-۲۸: نمودار لنگر- دوران اتصال con-13	۹۴
شکل ۴-۲۹: تنش(فون میسز) برای اتصال con-13	۹۴
شکل ۴-۳۰: نمودار لنگر- دوران اتصال con-14	۹۵
شکل ۴-۳۱: تنش(فون میسز) برای اتصال con-14	۹۵
شکل ۴-۳۲: تاثیر نیروی پیش تنیدگی بر منحنی لنگر- دوران	۹۶
شکل ۴-۳۳: تاثیر ضخامت فلنج بر نمودار لنگر-دوران	۹۷
شکل ۴-۳۴: تاثیر شعاع فلنجهها بر منحنی لنگر- دوران	۹۸
شکل ۴-۳۵: تاثیر تعداد پیچ بر منحنی لنگر- دوران	۹۹
شکل ۴-۳۶: تاثیر قطر پیچ بر منحنی لنگر-دوران	۹۹
شکل ۴-۳۷: مقایسه اتصال pinfuse و end plate	۱۰۰
شکل ۴-۳۸: مقایسه اتصال pinfuse و rbs	۱۰۱



شکل ۴-۳۹: نمودار لنگر- دوران اتصال con-04 و خط تیر مربوطه..... ۱۰۲

## صفحه

## فهرست جداول

جدول ۱-۲: لنگر و دوران برای انواع مختلف بارگذاری و وضعیت تیر [۱۹ و ۱۸].....	۳۸
جدول ۲-۲: مشخصات پیچ های تولید یا موجود در ایران [۵].....	۴۴
جدول ۳-۲: حداقل نیروی پیش تنیدگی در اتصالات اصطکاکی [۵].....	۴۵
جدول ۴-۲: ابعاد اسمی سوراخ پیچ بر حسب میلیمتر [۵].....	۴۶
جدول ۵-۲: حداقل فاصله مرکز سوراخ استاندارد تا لبه در هر راستا [۵].....	۴۷
جدول ۶-۲: مقادیر افزایش حداقل فاصله سوراخ تا لبه [۵].....	۴۷
جدول ۱-۳: مقادیر تنش- کرنش پیچ پر مقاومت [۲۵].....	۶۲
جدول ۲-۳: مقادیر تنش- کرنش st37 [۲۶].....	۶۲
جدول ۳-۳: جزئیات نمونه ها.....	۷۰

## فهرست علائم

## علائم لاتین

ارتفاع	$h$
طول موج توربولانس	$L$
پریود توربولانس	$T$
سرعت تعادل وسیله پرنده	$U_0$
مولفه سرعت تندباد در راستای محور طولی دستگاه مختصات بدنی نسبت به اینرسی	$u_g^B$

## علائم یونانی

چگالی طیفی قدرت توربولانس	$\Phi(\omega)$
شدت توربولانس	$\sigma$
بسامد توربولانس	$\omega$
بسامد فاصله‌ای	$\Omega$

## بالانویس‌ها

دستگاه مختصات بدنی	$B$
--------------------	-----

## زیرنویس‌ها

تندباد (گاست)	$g$
---------------	-----

۱

## فصل اول

مقدمه

## ۱.۱ مقدمه

ضوابط موجود در آئین‌نامه زلزله ایران، هدف از طراحی لرزه‌ای برای ساختمان‌ها را به صورت زیر بیان می‌دارد:

۱- زلزله با شدت کم را بدون خسارت تحمل کنند؛ از یک سازه انتظار می‌رود که این تحریک‌های کوچک را که در طول عمر سازه به دفعات اتفاق می‌افتد، به صورت ارتجاعی و بدون ایجاد تسلیم تحمل کند.

۲- زلزله‌های با شدت متوسط را با ایجاد خسارات بسیار جزئی سازه‌ای و مقداری خسارات غیرسازه‌ای تحمل نمایند که با طرح و اجرای مناسب، انتظار می‌رود که خسارات سازه‌ای در این محدوده قابل تعمیر باشد.

۳- زلزله‌های شدید را بدون فروریزی (Collapse) تحمل کنند و تلفات جانی نداشته باشند. که با ساختمان‌های با اهمیت زیاد باید علاوه بر ایستایی در سطح بهره‌برداری خود نیز قرار داشته باشند.

برای رسیدن به این هدف یکی از اصولی که در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای سازه‌ها وجود دارد، استفاده از اشکال، سیستم‌ها و موادی که از رفتار شکل‌پذیر برخوردار می‌باشند.

در واقعیت سازه‌های شکل‌پذیرتر تحت زلزله‌هایی قرار خواهند گرفت که از حد مقاومت الاستیک آنها بیشتر است [۱].

در دهه ۱۹۶۰ مهندسين سازه به این باور رسیدند که سیستم قاب مقاوم خمشی فولادی با اتصالات جوشی، (Steel Moment Resisting Frame) در رده یکی از شکل‌پذیرترین سیستم‌های سازه‌ای قرار دارد. بسیاری از مهندسين سازه بر این باور بودند که قاب‌های خمشی فولادی اصولاً در مقابل زلزله‌ها حساس نمی‌باشند و فروریزی در آنها رخ نمی‌دهد و اگر خسارت سازه‌ای رخ دهد، محدود به جاری شدن اعضای قاب بوده و اتصالات آن به صورت الاستیک باقی می‌مانند به واسطه همین تفکر در آن سالها، سازه‌های صنعتی، آموزشی و تجاری بزرگی که سیستم آنها قاب خمشی فولادی با اتصالات جوشی بود در غرب ایالات متحده بنا گردید.

با وقوع زلزله نرتریج در ۱۷ ژانویه سال ۱۹۹۴ این ایده و تفکر کاملاً عوض شد. بعد از وقوع این زلزله بسیاری از ساختمانها که سیستم سازه ای آنها از قاب مقاوم خمشی فولادی بود، دچار شکست ترد در ناحیه اتصال تیر به ستون شدند. ساختمانهای مذکور بین ۱ تا ۲۶ طبقه و عمری حداکثر تا ۳۰ سال داشتند. حتی ساختمانهایی که در زمان زلزله در حال احداث بودند نیز دچار اینگونه خسارات شده بودند. سازه‌ها در مناطقی که حرکت زمین در آنجا شدید بود، بیشترین خسارات سازه ای را متحمل شده بودند و حتی در مناطقی که حرکت زمین در حد متوسط بود، خسارات سازه ای شدیدی مشاهده می‌شد [۱].

شکست ترد اتصال تیر به ستون در اثر این زلزله، یک زنگ خطر برای مهندسين به حساب می‌آمد. همچنین این موضوع باعث نگرانی در مورد خسارات احتمالی وارده به سازه‌هایی که در مناطق دیگر و تحت زلزله‌های قدیمی تری واقع شده بودند، گشت. در زلزله نرتریج سازه‌ها بگونه‌ای که از قبل در طراحی‌ها پیش‌بینی شده بودند، رفتار نکردند. خسارات وارده به اتصالات، حتی در سازه‌هایی که نیروی لرزه‌ای وارده به آنها کوچکتر از نیروی طراحی بود مشاهده می‌شد [۱].

## ۲.۱ قابهای مقاوم خمشی فولادی

قاب مقاوم خمشی فولادی، سیستمی می‌باشد که اتصالات بین تیر و ستون آن بگونه ای طراحی میشوند که انرژی زیادی تلف نمایند و کمک اساسی به شکل‌پذیری سیستم کنند. ساختمانهای با قاب مقاوم خمشی فولادی، به گونه‌ای طراحی میشوند که بتوانند در برابر لرزش زمین، با فرض انجام تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ، مقاومت کنند و زوال مقاومت خمشی نداشته باشند. تغییر شکل‌های پلاستیک شامل دوران پلاستیک در تیرها و در ناحیه اتصال تیر به ستون می‌باشد که باید قادر به اتلاف انرژی زلزله که به سازه وارد می‌شود، باشند. خسارات سازه‌ای نیز باید بصورت جاری شدن و کمانش موضعی اعضای سازه و نه از طریق شکست ترد اتصال و اعضاء سازه باشند.

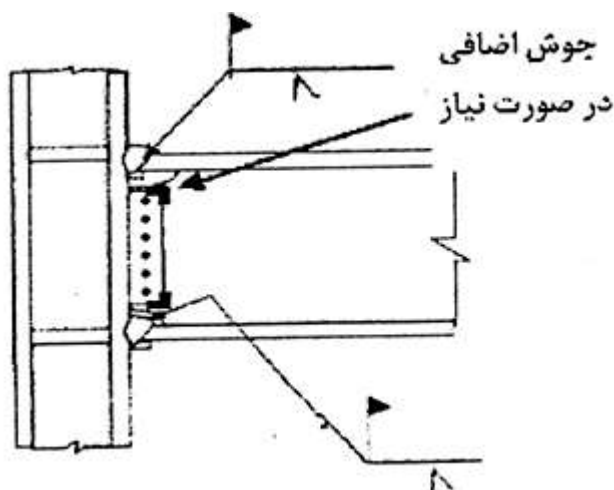
بر اساس همین اصل، آیین‌نامه‌های طراحی اجازه می‌دهند که قابهای خمشی فولادی، با مقاومتی کمتر از مقاومت حد الاستیک خود در مقابل زلزله‌های طرح، طراحی شوند.

فرض اساسی در قاب‌های مقاوم خمشی فولادی این است که شکل‌پذیری این سیستمها از طریق جاری شدن ناحیه اتصال تیر به ستون تامین شود. جاری شدن این ناحیه ممکن است از طریق بوجود آمدن

مفصل پلاستیک در تیرها (یا در ستون‌ها که مطلوب نمی‌باشد) یا از طریق جاری شدن برشی (Shear Yielding) ناحیه چشمه اتصال تیر به ستون و یا ترکیبی از حالات فوق اتفاق بیافتد.

### ۳.۱ اتصال مقاوم خمشی رایج قبل از زلزله نرتریج ۱۹۹۴

بر اساس آئین‌نامه UBC1988، در اتصال مقاوم خمشی رایج قبل از زلزله نرتریج، برای اتصال بال تیر به ستون باید از جوش شیاری با نفوذ کامل (Complete Joint Penetration Groove weld) استفاده شده و جان تیر از طریق صفحه برشگیر (Shear Tab) پیچی به همراه جوش اضافی (در صورت نیاز بر اساس ابعاد عضو) به ستون متصل شود (شکل ۱-۱).



شکل ۱-۱: اتصال خمشی رایج قبل از زلزله نرتریج [۱]

فرض اساسی در مورد این اتصالات این بود که می‌توانند دوران‌های پلاستیک تا  $0.02$  رادیان و بزرگتر را بدون زوال در مقاومت خمشی تحمل کنند، ولی بررسی‌های بعدی نشان داد که بر خلاف این فرض، در بسیاری از حالات شکست ترد در مراحل اولیه از تغییر شکل‌های پلاستیک و حتی در بعضی از حالات دیگر، در مراحل تغییر شکل‌های الاستیک اتفاق افتاده بود [۱].

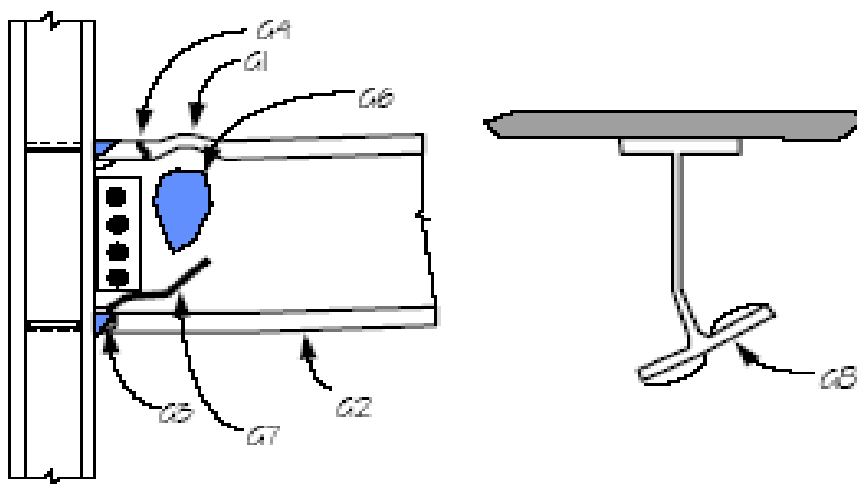
### ۴.۱ آسیب‌های ایجاد شده در اتصالات گیردار زلزله نرتریج

با اینکه در زلزله نرتریج هیچ سازه‌ای دچار فروریزش نشد، ولی در بیش از ۲۰۰ ساختمان بلند مرتبه

اتصالات خمشی دچار شکست ترد شدند. آسیب‌های وارده به المانهای قاب‌های خمشی فولادی بصورت آسیب‌های مربوط به تیر، ستون، جوش، ورق اتصال و چشمه اتصال طبقه‌بندی می‌شوند که مشاهده وسیع اینگونه آسیب‌ها در اتصالات علی‌رغم آسیب‌های جدی در اجزای غیر سازه‌ای هشدار دهنده بود که چند مورد از آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد

### ۱.۴.۱ آسیب‌های تیر

آسیب‌دیدگی تیر ممکن است شامل کمانش بال (G1)، تسلیم بال (G2)، شکست بال در ناحیه Heat Affected zone (HAZ) و یا خارج از آن (G3, G4)، شکست بال (G5)، تسلیم یا کمانش جان (G6)، شکست جان (G7) و یا کمانش جانبی مقطع تیر (G8) باشد [۲] (شکل ۲-۱). با وجود اینکه تعدادی از آسیب‌های مربوط به تیر در بال فوقانی گزارش شده‌اند ولی اغلب آسیب‌های تیر در زلزله نرتریج در ریشه جوش شیاری بال تحتانی تیر به ستون اتفاق افتاده و در مسیرهای متفاوتی انتشار یافتند [۳].



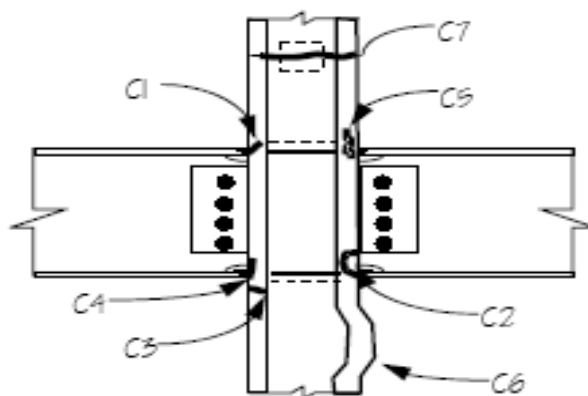
شکل ۲-۱: انواع آسیب‌های تیر [۱]

### ۲.۴.۱ آسیب‌های ستون

آسیب‌های گزارش شده در ستون علاوه بر اینکه مقاومت سازه را در برابر بارهای ثقلی کاهش می‌دهد. سازه را در تحمل بارهای جانبی ضعیف می‌کند. آسیب‌های ستون شامل ترک بال (C1)، قله‌کن شدن



بال (C2)، ترک در داخل یا خارج از ناحیه HAZ (C3, C4)، پارگی لایه‌ای بال (C5)، کمانش بال (C6) و زوال وصله ستون (C7) در شکل (۳-۱) نشان داده شده است. در شکل (۴-۱) تصویری از شکست بال ستون در طی زلزله نرتریج مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۱: انواع آسیب‌های ستون [۱]

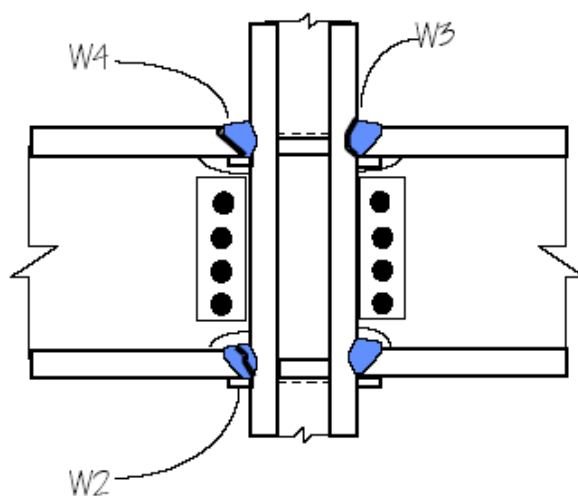


شکل ۴-۱: شکست بال ستون در طی زلزله نرتریج [۱]

### ۳.۴.۱ آسیب‌های مربوط به جوش شیاری و چشمه اتصال

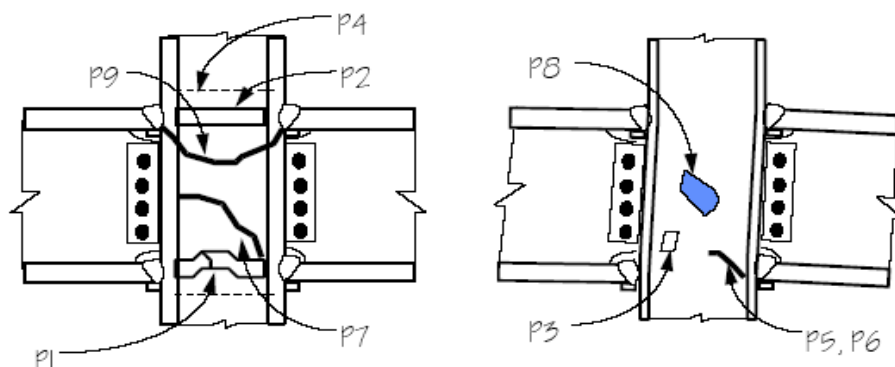
آسیب‌های جوش شامل قطع شدگی و نقص در ریشه جوش، (W1)، ترک در ریشه جوش (W2)، شکست در وجه ستون (W3)، شکست در وجه جوش (W2)، شکست در وجه تیر (W4)، که در شکل

(۵-۱) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که مراحل مختلف جوشکاری در فرآیند جوش بسیار مؤثر می‌باشند. در اغلب حالات شروع شکست ترد، در ناحیه جوش نفوذی کامل، که بال پایین تیر را به بال ستون متصل می‌کند، اتفاق افتاده بود و بعد از تشکیل ترک در این ناحیه، با توجه به شرایط اتصال، در چند جهت پیشرفت می‌کرد (شکل ۵-۱).



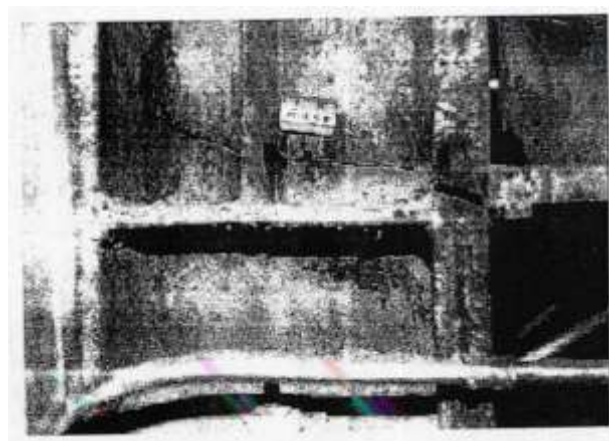
شکل ۵-۱: انواع آسیب‌های جوش شیاری [۱]

آسیب‌های مربوط به چشمه اتصال عبارتند از: شکست، کمانش یا تسلیم ورق پیوستگی (p1)، شکست جوش ورق پیوستگی (p2)، تسلیم جان (p3)، شکست جوش ورق تقویتی جان (p4)، شکست جزیی عمقی ورق تقویتی جان (p5)، شکست جزیی عمقی جان (p6)، شکست کامل یا نزدیک به کامل جان یا ورق تقویتی جان (p7)، کمانش جان ستون در ناحیه چشمه اتصال (p8)، انفصال ستون (p9) (شکل ۶-۱).



شکل ۶-۱: انواع آسیب‌های چشمه اتصال [۱]

در بعضی از حالات، ترک ناشی از شکست ترد، کاملاً وارد ناحیه چشمه اتصال ستون می‌شدند و ستون را در بعضی از حالات به دو قسمت تقسیم می‌کردند [۱] (شکل ۷-۱).



شکل ۷-۱: تقسیم ستون به دو قسمت با گسترش ترک در ناحیه

چشمه اتصال [۱]

زمانی که اینگونه ترک‌ها اتفاق می‌افتند، ناحیه اتصال تیر به ستون دچار زوال شدید سختی خمشی و مقاومت برای تحمل بارها می‌شود و بارها از طریق بال بالایی و جان تیر منتقل می‌شوند. حتی در این میان جان تیر نیز ممکن است دچار شکست شود.

در شکل (۸-۱) تصویری از شکست کامل اتصال تیر به ستون در طی زلزله نرتریج مشاهده می‌شود.



شکل ۸-۱: شکست کامل اتصال تیر به ستون در طی زلزله نرتریج [۱]

## ۵.۱ علل وقوع شکست در اتصالات خمشی رایج، قبل از زلزله نرتریج

پس از بررسی‌ها و آزمایشات فراوان، مشخص گردید که، جزییاتی که در مورد اتصال مقاوم خمشی رایج قبل از زلزله نرتریج استفاده می‌شده است، دارای کاستی‌هایی بود که باعث وقوع شکست ترد در این اتصال شده است.

مهمترین این کاستی‌ها عبارتند از:

(۱) شدیدترین تنش‌ها دقیقاً در محل اتصال تیر به ستون اتفاق می‌افتد که متأسفانه این ناحیه ضعیف‌ترین بخش اتصال می‌باشد.

(۲) اتصال بال پایینی تیر به بال ستون معمولاً از طریق جوش سرپایینی و با نشستن جوشکار بر روی بال فوقانی تیر صورت می‌گرفته است. در این وضعیت، در هر پاس با رسیدن جوش به جان تیرآهن، جوشکار مجبور به قطع جوش و ادامه دادن آن از سمت دیگر جان می‌باشد، که این نحوه جوشکاری معمولاً باعث کیفیت پایین جوش می‌شود که خود عاملی برای ترک خوردن است.

(۳) هندسه و ترکیب اتصال خود عاملی در جهت تولید اشکالاتی در ریشه جوش نفوذی بال بود. از جمله آنها می‌توان به وجود تسمه پشت‌بند اشاره کرد. که بعد از جوشکاری در محل باقی می‌ماند و بررسی چشمی ریشه جوش نفوذی را غیر ممکن می‌ساخت. تنها راه ممکن برای کنترل جوش، انجام آزمایشات التراسونیک بود که باز هم به دلیل هندسه نادرست اتصال در محل اتصال جان تیر به بال آن، بسیار