# بخش سوم

## بهسازی سیستم

در قسمت دوم از این مجموعه و طی مباحث مختلف فصل دوم، با روش‌ها و تکنیک‌های مختلف تقویت موضعی اعضا آشنا شدیم. هر چند که سازه‌ها مجموعه‌ای از اعضا می‌باشند ولی لزوماً رفتار آنها مجموع رفتار اعضا نیست و سیستم کلی ساختمان دارای شخصیت رفتاری متفاوت می‌باشد. در بهسازی ساختمان، هدف اول، بهسازی سیستم است که در آن مهندس مسئول به دنبال بهترین راهبرد و راهکار برای بهسازی لرزه‌ای سیستم سازه مورد مطالعه است. حال در این راهبرد یا راهکار ممکن است نیاز به تقویت اجزایی از سازه و یا اضافه کردن اجزای جدید به سازه باشد.

راهبردهای زیر به عنوان نمونه می‌تواند به صورت منفرد یا در ترکیب با یکدیگر برای تعیین و انتخاب گزینه‌های بهسازی سیستم باربر جانبی سازه مورد استفاده قرار گیرد.

الف– حذف یا کاهش نامنظمی در سازه

۱– حذف یا کاهش نامنظمی در پلان

۲– حذف یا کاهش نامنظمی در ارتفاع

۳– حذف طبقه نرم

۴– حذف یا کاهش نامنظمی پیچشی

۵– حذف مکانیسم ستون کوتاه از سازه

۶– حذف یا اصلاح کنج‌های فرورفته

ب– تامین سختی جانبی لازم برای کل سازه؛

پ– تامین مقاومت لازم برای کل سازه؛

ت– کاهش جرم ساختمان؛

ث– کامل نمودن مسیر بار؛

ج– افزایش انسجام ساختمان با کلاف‌بندی؛

چ– تغییر کاربری به منظور کاهش سطح عملکرد مورد انتظار از ساختمان؛

ح– به کارگیری سیستم‌های جاذب انرژی؛

خ– به کارگیری سیستم جداساز لرزه‌ای؛

در بیشتر اوقات برای تعیین راهبردها و راهکارهای بهسازی سیستم باربر جانبی، محدودیت‌هایی وجود دارد که تاثیر عمده‌ای بر راهبرد و راهکار انتخابی برای بهسازی می‌گذارند. مجموعه این محدودیت‌ها را می‌توان به صورت زیر طبقه‌بندی نمود:

الف– اهداف عملکردی ساختمان

ب – محدودیت هزینه‌های اجرایی

پ – محدودیت‌های زمانی در امر بهسازی

ت – محدودیت‌های معماری (پلان و نما)

ث – ضرورت فعال بودن ساختمان در حین بهسازی

ج – پرهیز از ریسک در زمان بهسازی

چ – لزوم حفظ آثار باستانی

# فصل ۳

# حذف و یا کاهش نامنظمی در سازه

## ۳-۱- معرفی

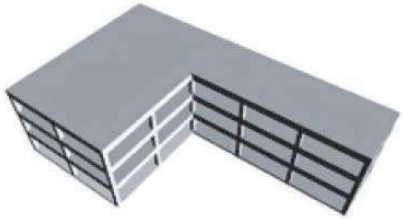
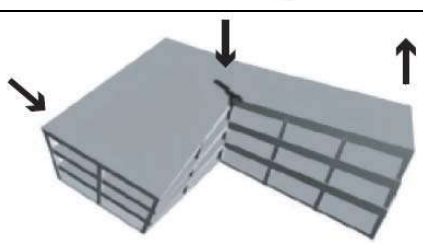
با توجه به عملکرد ساختمانها در زلزله‌های گذشته، اهمیت پیکربندی و منظم بودن ساختمان‌ها بر کسی پوشیده نیست. به همین جهت رعایت تقارن و تناسبات هندسی در سازه و معماری، می‌تواند از بسیاری از آسیب‌های لرزه‌ای وارد بر ساختمان‌ها جلوگیری کند. مطالعه رفتار ساختمان‌ها در زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد که عملکرد ساختمان‌ها نسبت به تغییرات کوچکی در تقارنِ شکل کلی ساختمان، بسیار حساس می‌باشد. این امر بویژه در ارتباط با دیوارهای برشی و سایر اجزای مقاوم در برابر نیروهای جانبی مطرح است.

در ساختمان‌هایی که به دلیل نامنظمی در پلان و ارتفاع، فاقد عملکرد لرزه‌ای مطلوب می‌باشند، با انجام اصلاحاتی در جهت رفع و یا کاهش نامنظمی (همراه با سایر راهبردهای بهسازی) می‌توان راهکارهای مناسبی برای بهسازی آنها ارائه کرد.

نامنظمی در ساختمان، معمولاً به دلیل ناپیوستگی در اجزاء باربر جانبی بوجود می‌آید. در چنین شرایطی با ایجاد تغییراتی در سیستم باربر جانبی، ممکن است بتوان نامنظمی ساختمان را کاهش داد. نامنظمی‌ها در ساختمان به دو دستهٔ نامنظمی‌ها در پلان و نامنظمی‌ها در ارتفاع تقسیم می‌شوند.

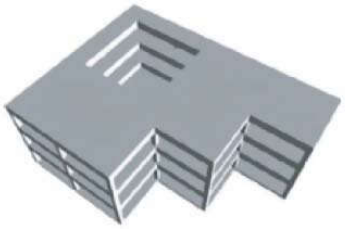
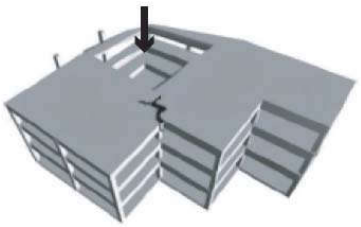
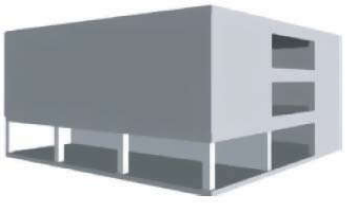
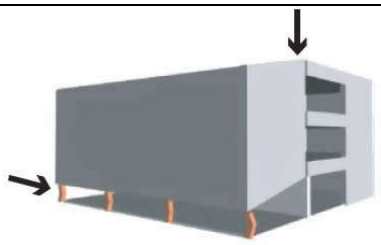
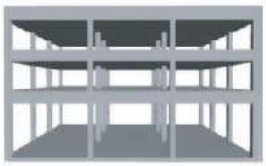
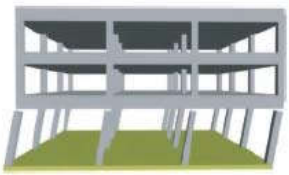
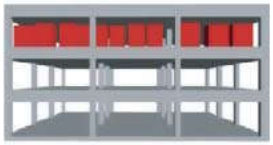
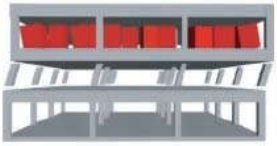
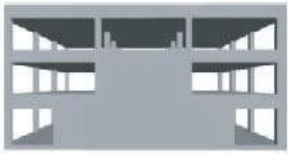
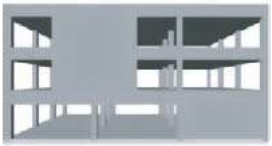
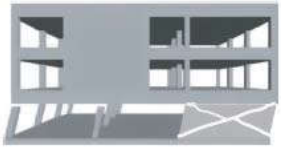
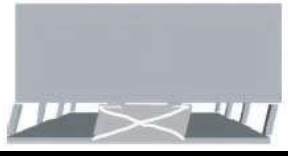
نامنظمی‌ها در پلان بطور عمده عبارتند از نامنظمی پیچشی، وجود بازشوهای بزرگ در دیافراگم‌ها، موازی و متعامد نبودن سیستم‌های باربر جانبی، وجود گوشه‌های فرورفته (پلانهای L,U,T و یا صلیبی شکل) و جابجایی و تغییرات سازه‌ای در پلان‌ها. نامنظمی‌های موجود در ارتفاع نیز عبارتند از وجود طبقهٔ نرم، وجود طبقهٔ ضعیف، توزیع نامنظم جرم در ارتفاع، تغییر صفحه اجزای باربر جانبی[1] و استفاده از سیستم‌های باربر جانبی متفاوت در ارتفاع. در جدول ۳-۱ انواع نامنظمی‌ها و مکانیسم‌های خرابی در آنها ارائه شده است.

**جدول ۳-۱ انواع نامنظمی ها و مکانیسم خرابی در آنها**

| نوع نامنظمی | شکل و موقعیت ساختمان در پلان | مکانیسم خرابی |
|---|---|---|
| نامنظمی پیچشی | | |
| وجود کنج‌های فرو رفته (L شکل) |  |  |

[1] طبق آیین‌نامه ۲۸۰۰ تغییر صفحه اجزای باربر جانبی منجر به نامنظمی سازه می‌شود ولی طبق نشریه ۳۶۰ جابجایی در اجزای باربر جانبی در صفحه نیز باعث نامنظمی سازه می‌گردد.

**جدول ۳-۱ انواع نامنظمی ها و مکانیسم خرابی در آنها (ادامه)**

| نوع نامنظمی | شکل و موقعیت ساختمان در پلان | مکانیسم خرابی |
|---|---|---|
| وجود بازشوهای بزرگ در دیافراگم‌ها |  |  |
| موازی و متعامد نبودن سیستم‌های باربر جانبی | | |
| قطع دیوارهای برشی (سیستم باربر جانبی) در ارتفاع |  |  |
| وجود طبقهٔ نرم |  |  |
| توزیع نامنظم جرم در ارتفاع |  |  |
| بکارگیری سیستمهای متفاوت در ارتفاع |  | |
| نامنظمی در مسیر انتقال بار* |  |  |
| وجود طبقهٔ ضعیف | |  |

* چون جابجایی سیستم باربر در صفحه است طبق نشریه ۳۶۰ سازه نامنظم می‌باشد.

سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی که بتواند بار ناشی از زلزله را از طبقات به پی منتقل کند، باید بین پی و دیافراگم‌های طبقات وجود داشته باشد. نیروهای جانبی بوجود آمده در ساختمان از طریق سقف به دیوارها و سپس به پی منتقل می‌شود. چنانچه در مسیر انتقال بار، ناپیوستگی وجود داشته و مسیر انتقال بار کامل نباشد، علیرغم وجود اعضای جانبی مناسب در ساختمان، سازه توانایی مقاومت در برابر نیروهای لرزه‌ای را نخواهد داشت.

## ۳-۲- تقسیم‌بندی ساختمان‌ها بر حسب شکل

### ۳-۲-۱- نامنظمی در پلان

نامنظمی در پلان ساختمان، باعث تولید نیروهای پیچشی در ساختمان تحت اثر نیروهای جانبی می‌گردد. این نیروهای پیچشی به همراه نیروهای افقی ناشی از انتقال جانبی ساختمان، باعث وارد آمدن نیروهای اضافی قابل ملاحظه ای برعناصر باربر سازه‌ای گشته و می‌تواند منجر به خرابی گردد. مطابق با بند ۱-۸-۱-۱ آیین‌نامه ۲۸۰۰، ساختمان‌هایی با مشخصات ذیل در گروه ساختمان‌های منظم در پلان قرار می‌گیرند:

۱- پلان ساختمان دارای شکل متقارن و یا تقریباً متقارن نسبت به محورهای اصلی ساختمان، که معمولاً عناصر مقاوم در برابر زلزله، در امتداد آن‌ها قرار دارند، باشد و در صورت وجود فرورفتگی یا پیشامدگی در پلان، اندازه آن در هر امتداد از ۲۵ درصد بعد خارجی ساختمان در آن امتداد تجاوز ننماید.

۲- در هر طبقه فاصله بین مرکز جرم و مرکز سختی در هر یک از دو امتداد متعامد ساختمان از ۲۰ درصد بعد ساختمان در آن امتداد بیشتر نباشد.

۳- تغییرات ناگهانی در سختی دیافراگم هر طبقه نسبت به طبقات مجاور از ۵۰ درصد بیشتر نبوده و مجموع سطوح بازشو در آن از ۵۰٪ سطح کل دیافراگم تجاوز ننماید.

۴- در مسیر انتقال نیروی جانبی به زمین، انقطاعی مانند تغییر صفحه اجزای باربر جانبی در طبقات وجود نداشته باشد.

۵- در هر طبقه حداکثر تغییرمکان نسبی در انتهای ساختمان، با احتساب پیچش تصادفی، بیشتر از ۲۰ درصد با متوسط تغییر مکان نسبی دو انتهای ساختمان در آن طبقه اختلاف نداشته باشد.

### ۳-۲-۲- نامنظمی در ارتفاع

نامنظمی قائم در ساختمانها شامل طبقه ضعیف، نامنظمی هندسی و نامنظمی در وزن طبقات می باشد که سبب اعمال نیروی قابل ملاحظه اضافی به برخی از اعضا در این طبقات می گردد.

مطابق بابند۱-۸-۱-۲ ساختمان‌های بامشخصات زیردر گروه ساختمان‌های منظم در ارتفاع قرار می‌گیرند:

۱- توزیع جرم در ارتفاع ساختمان، تقریباً یکنواخت باشد به طوری که جرم هیچ طبقه‌ای، به استثنای بام و خرپشته بام نسبت به جرم طبقه زیر خود بیشتر از ۵۰٪ تغییر نداشته باشد.

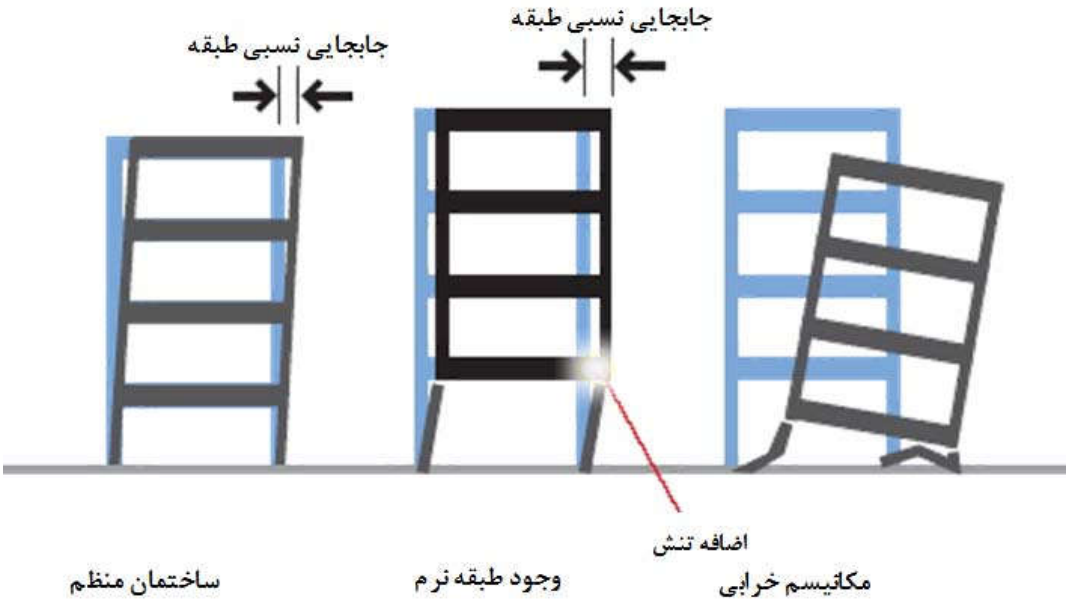
۲- سختی جانبی در هیچ طبقه‌ای کمتر از ۷۰ درصد سختی جانبی طبقه روی خود و یا کمتر از ۸۰ درصد متوسط سختی سه طبقه روی خود نباشد، به عبارت دیگر هیچ طبقه‌ای نرم نباشد.

۳- مقاومت جانبی هیچ طبقه‌ای کم‌تر از ۸۰٪ مقاومت جانبی طبقه روی خود نباشد (هیچ طبقه‌ای ضعیف نباشد). مقاومت هر طبقه برابر با مجموع مقاومت جانبی کلیه اجزای مقاومی است که برش طبقه را در جهت موردنظر تحمل می‌نمایند.

## ۳-۳- طبقه نرم

وجود طبقه نرم یکی از معایب بسیار متداول در ساختمان‌ها می‌باشد. مطابق آیین‌نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش سوم)، طبقه‌ای که سختی جانبی آن کمتر از ۷۰ درصد سختی جانبی طبقه روی خود و یا کمتر از ۸۰ درصد متوسط سختی سه طبقه روی خود باشد، طبقهٔ نرم نامیده می‌شود.

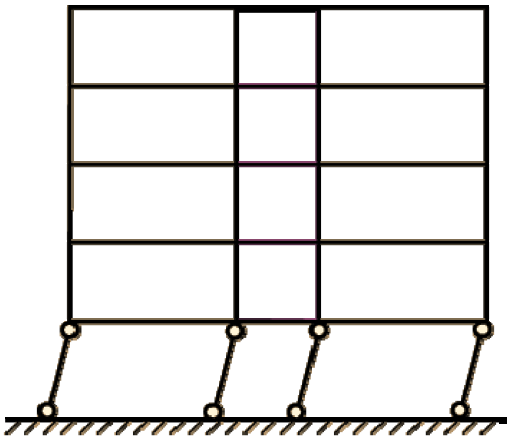
یکی از مشخصه‌های اصلی طبقه نرم ناپیوستگی در استحکام یا سختی است که در اتصالات ایجاد می‌شود. این ناپیوستگی بدین سبب ایجاد می‌شود که هرچه طبقهٔ نرم ساختمان، استحکام کمتر و یا انعطاف‌پذیری بیشتری داشته باشد، تغییر شکل‌های بیشتری در آن ایجاد می‌شود که به نوبهٔ خود به تمرکز نیروها در اتصالات می‌انجامد (شکل۳-۱).



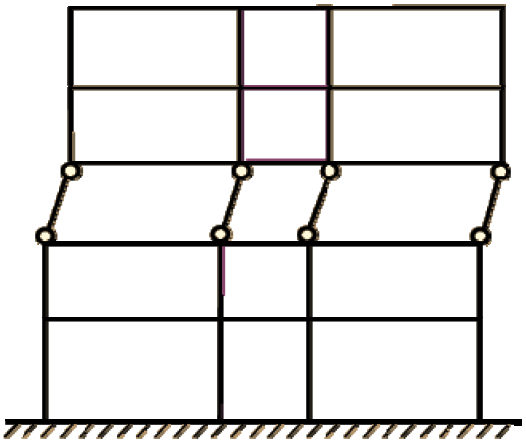

**شکل ۳-۱- مکانیسم ایجاد طبقه نرم**

طبقه نرم معمولا در اولین تراز ساختمان بوجود می‌آید، ولی در موارد خاصی می‌تواند در یکی از طبقات بالایی نیز اتفاق افتد (شکل۳-۲).

به منظور اصلاح طبقه نرم، می‌توان از راهکارهایی نظیر اضافه کردن مهاربندهای فلزی، اضافه کردن دیوارهای برشی بتنی و یا فلزی، اضافه نمودن قابهای خمشی، ایجاد دیوارهای حائل و ... استفاده نمود. در این حالت با حذف نامنظمی فوق سختی طبقه و در نتیجهٔ آن توزیع نیروی زلزله اصلاح می‌گردد (شکل۳-۵).



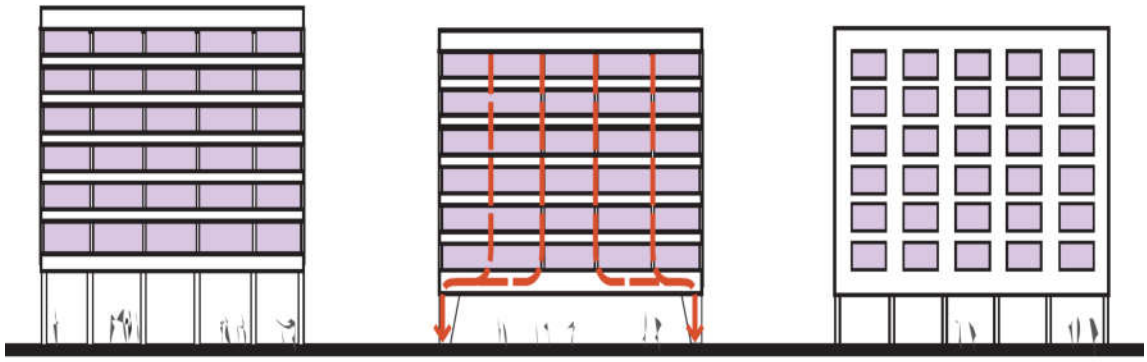
(الف)



(ب)

**شکل ۳-۲- الف- وجود طبقه نرم در اولین تراز، ب- وجود طبقه نرم در طبقات بالایی**

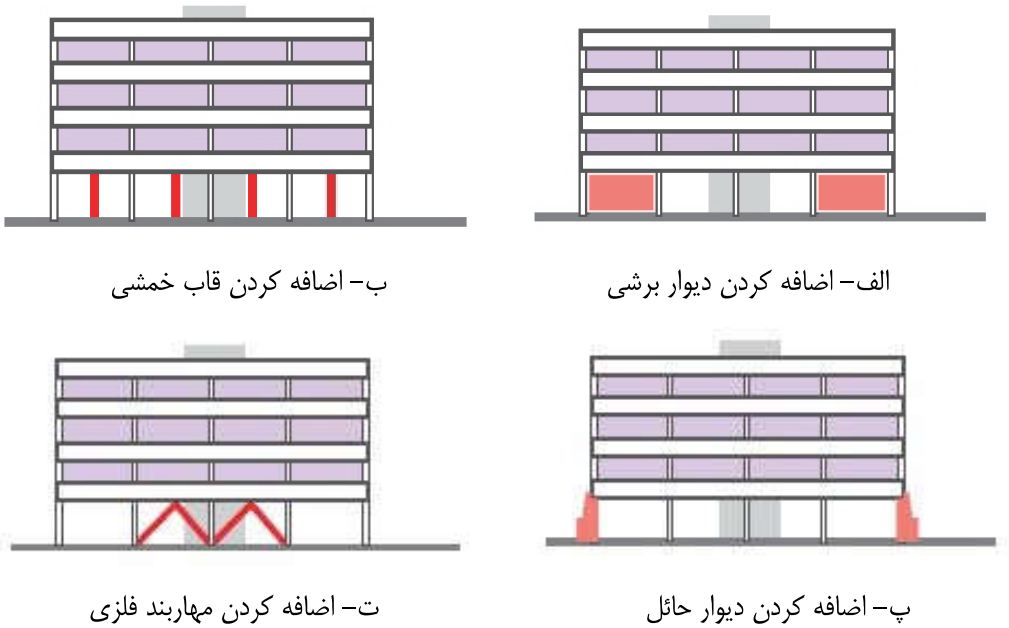
متداول‌ترین علت به وجود آمدن طبقه نرم اختلاف سختی جانبی طبقه فوقانی و تحتانی سازه می‌باشد به طوری که اگر سختی جانبی در طبقه‌ای کمتر از ۷۰ درصد سختی جانبی طبقه روی خود و یا کمتر از ۸۰ درصد متوسط سختی سه طبقه روی خود باشد طبقه نرم به وجود می‌آید. ولی علاوه بر انعطاف‌پذیری زیاد طبقات تحتانی، ناپیوستگی در مسیرهای بارثقلی و جانبی و همچنین وجود طبقات فوقانی سنگین نیز از عوامل به وجود آمدن طبقه نرم می‌باشد. بعضی از عوامل ایجاد طبقه نرم در شکل (۳-۳) نشان داده شده است.




**شکل ۳-۳- عوامل به وجود آمدن طبقه نرم**

در شکل (۳-۴) زیر مراحل اضافه نمودن قاب خمشی برای یک ساختمان با طبقه نرم، به عنوان راهکار بکار گرفته شده در جهت حذف نامنظمی، نشان داده شده است. این مراحل شامل ایجاد فونداسیون جدید و شناژبندی، نصب ستون‌ها و تیرهای قاب خمشی جدید و اتصال آن به سیستم اولیه می‌باشد.

**شکل ۳-۴- مراحل اضافه نمودن قاب خمشی برای اصلاح طبقه نرم**




**شکل ۳-۵- راهکارهای بکار گرفته شده برای حذف نامنظمی و اصلاح طبقه نرم**

## ۳-۴- نامنظمی پیچشی

یکی از دلایل عمده خرابی‌های شدید تحت زلزله ، ایجاد پیچش در ساختمان می‌باشد. در صورتی که فاصلهٔ بین مرکز جرم و مرکز سختی در هر کدام از امتدادهای اصلی ساختمان زیاد باشد، ساختمان دچار پیچش گردیده و نیروی پیچشی ایجاد شده می‌تواند باعث خرابی در سازه شود (شکل ۳-۶).

مطابق آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش سوم) ، فاصلهٔ بین مرکز جرم و مرکز سختی در هر کدام از دو امتداد متعامد ساختمان، نباید از ۲۰ درصد بُعد ساختمان در آن امتداد بیشتر باشد.

**شکل ۳-۶- فاصله زیاد بین مرکز جرم و مرکز سختی و خرابی ناشی از ایجاد پیچش**

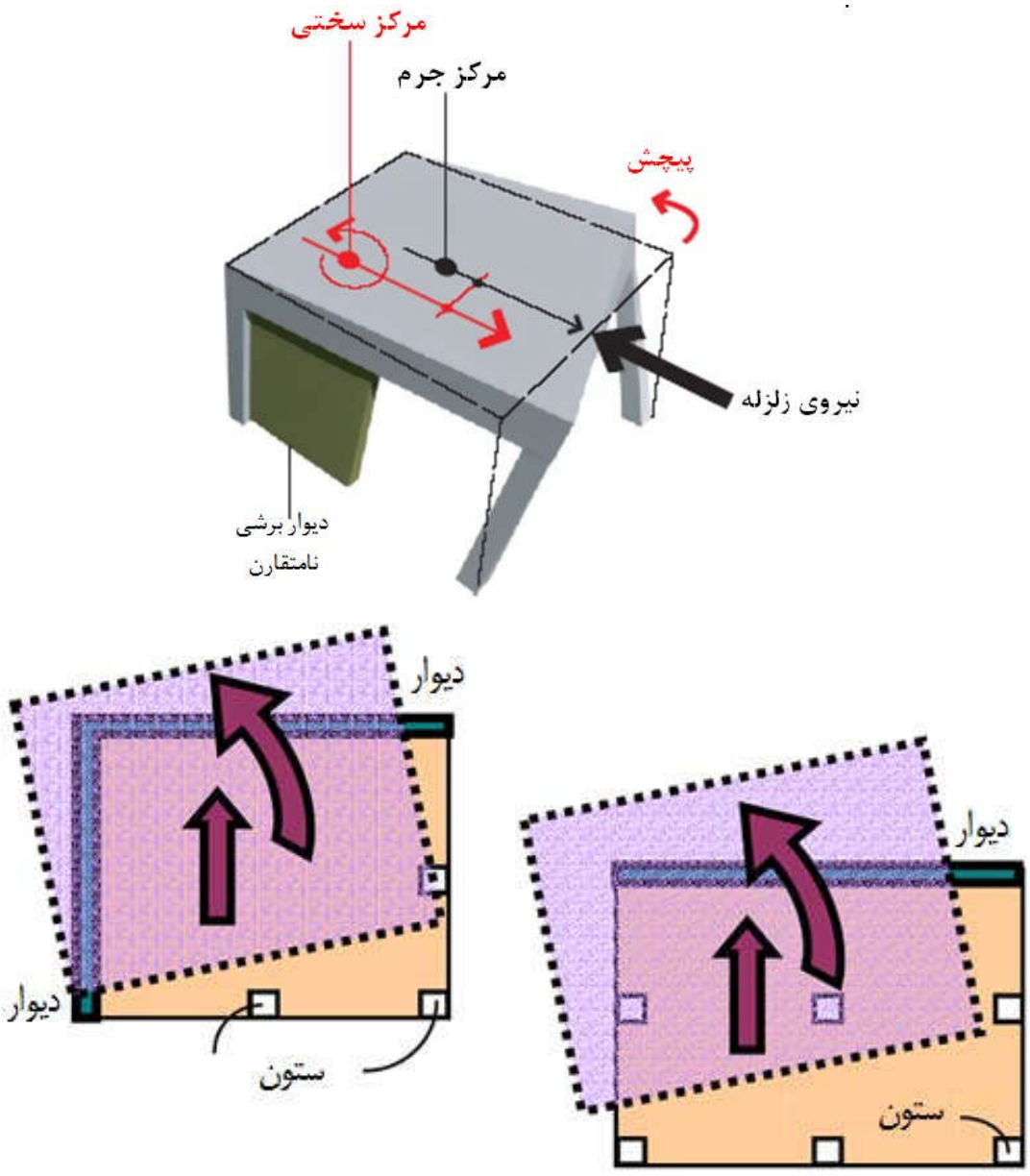
برخی از دلایل وجود فاصله بین مرکز جرم و مرکز سختی عبارتند از:

– قرارگیری نامتقارن اعضای قائم

– قرارگیری جرم‌های بزرگ بصورت نامتقارن

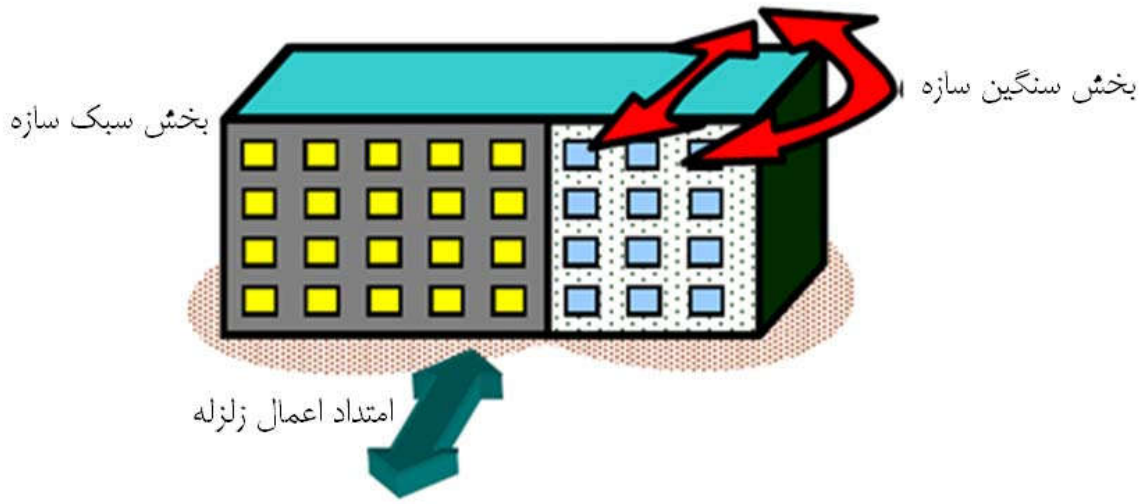
– اثر نامتقارن میان قابها و افزایش سختی ناشی از آنها

در شکل (۳–۷) نحوهٔ ایجاد نیروهای پیچشی در یک سازه، به دلیل وجود دیواربرشیِ نامتقارن و در نتیجه ایجاد فاصله بین مرکز جرم و مرکز سختی، نشان داده شده است. برای اصلاح نامنظمی پیچشی نیز می توان از راهکارهای اضافه کردن دیوار برشی و مهاربند بصورت متقارن در پلان استفاده کرد.



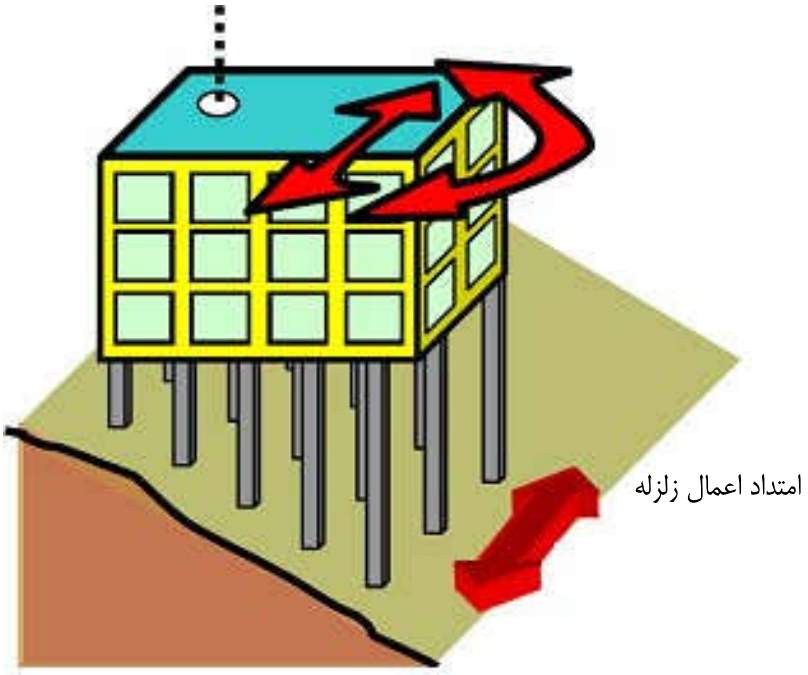

**شکل ۳–۷– نحوه ایجاد پیچش به دلیل وجود دیوار برشی نامتقارن**

در شکل (۳–۸) سازه‌ای که در آن عناصر قائم به شکل نامنظمی در پلان قرار گرفته و منجر به افزایش وزن قسمتی از سازه شده نشان داده شده است. این شرایط موجب به وجود آمدن پیچش در سازه در اثر زلزله می‌گردد.



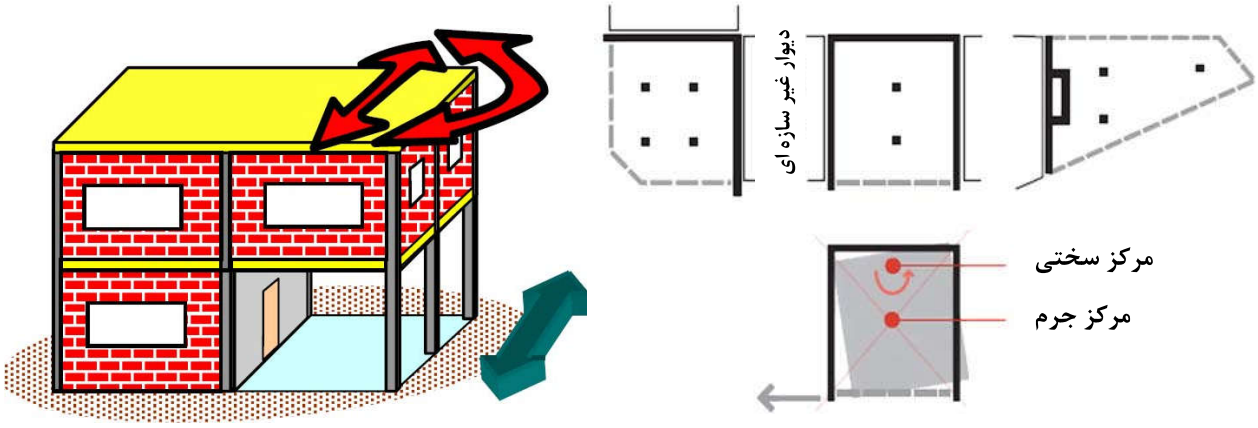

**شکل ۳–۸- نحوه ایجاد پیچش به علت توزیع نامتقارن جرم ساختمان**

سازه‌هایی که دارای المان‌های قائم سازه‌ای با اندازه‌های مختلف هستند شکل (۳–۹) مانند سازه‌هایی که بر روی زمین‌هـای شیبدار احداث می‌گردند نیز دچار پیچش می‌شوند. این امر را می‌توان به کودکی که بر روی تابی با طناب‌های نامساوی نشسته تشبیه نمود. علت این امر، تغییر سختی در قاب‌های مختلف می‌باشد.



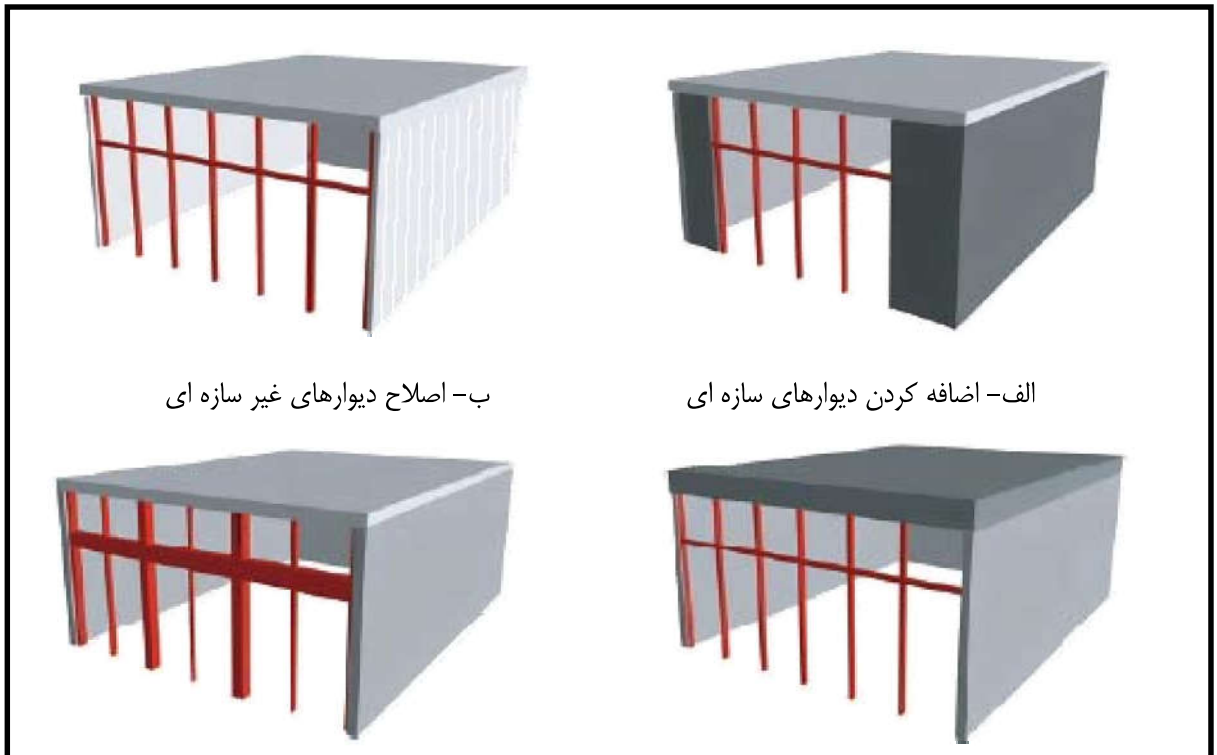

**شکل ۳–۹- نحوه ایجاد پیچش به علت وجود المان‌های قائم سازه‌ای با اندازه‌های مختلف**

شکل متداول‌تری از نامنظمی پیچشی مربوط به تغییرات مقاومت و سختی در طول محیط ساختمان‌ها می‌باشد که نتیجه آن مستعد بودن سازه برای پیچش است. این تغییرات می‌تواند ناشی از بازشوهای اجتناب‌ناپذیر و یا فرم مثلثی و گوه‌ای در ساختمان باشد (شکل ۳-۱۰).




**شکل ۳-۱۰- نامنظمی به دلیل تغییرات مقاومت و سختی در طول محیط ساختمان**

در شکل (۳-۱۱) برخی از راهکارهای متداول برای حالتی که در یک وجه ساختمان عضو باربر جانبی با سختی زیاد و در دو وجه دیگر دیوارهای غیر سازه ای و انعطاف پذیر وجود دارد ، نشان داده شده است.



الف- اضافه کردن دیوارهای سازه ای

ب- اصلاح دیوارهای غیر سازه ای

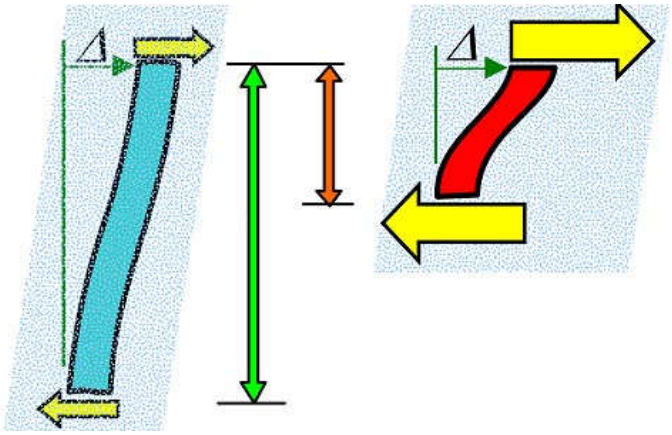
ج- اصلاح سختی دیافراگم

د- اضافه کردن قاب خمشی

**شکل ۳-۱۱- راهکارهای ارائه شده برای اصلاح نامنظمی پیچشی**

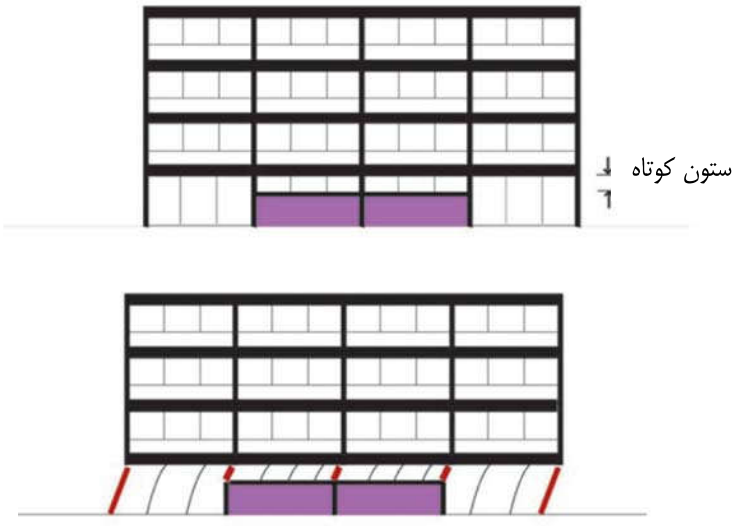
## ۳-۵- ستون کوتاه

شکست تُرد و برشی ستون‌ها به دلیل ماهیت ناگهانی آن بدترین نوع شکست می‌باشد. به همین دلیل همواره سعی بر آن است که مکانیسم کنترل کننده خرابی ستون بصورت خمشی باشد و ستون نباید به عنوان عضو ضعیفی در قاب سازه‌ای عمل نماید. شکست برشی ستون را اصطلاحاً ستون کوتاه می‌گویند و باید همواره سازه به گونه‌ای طراحی و یا مقاوم‌سازی گردد که از وقوع چنین امری دوری شود (شکل ۳-۱۲).

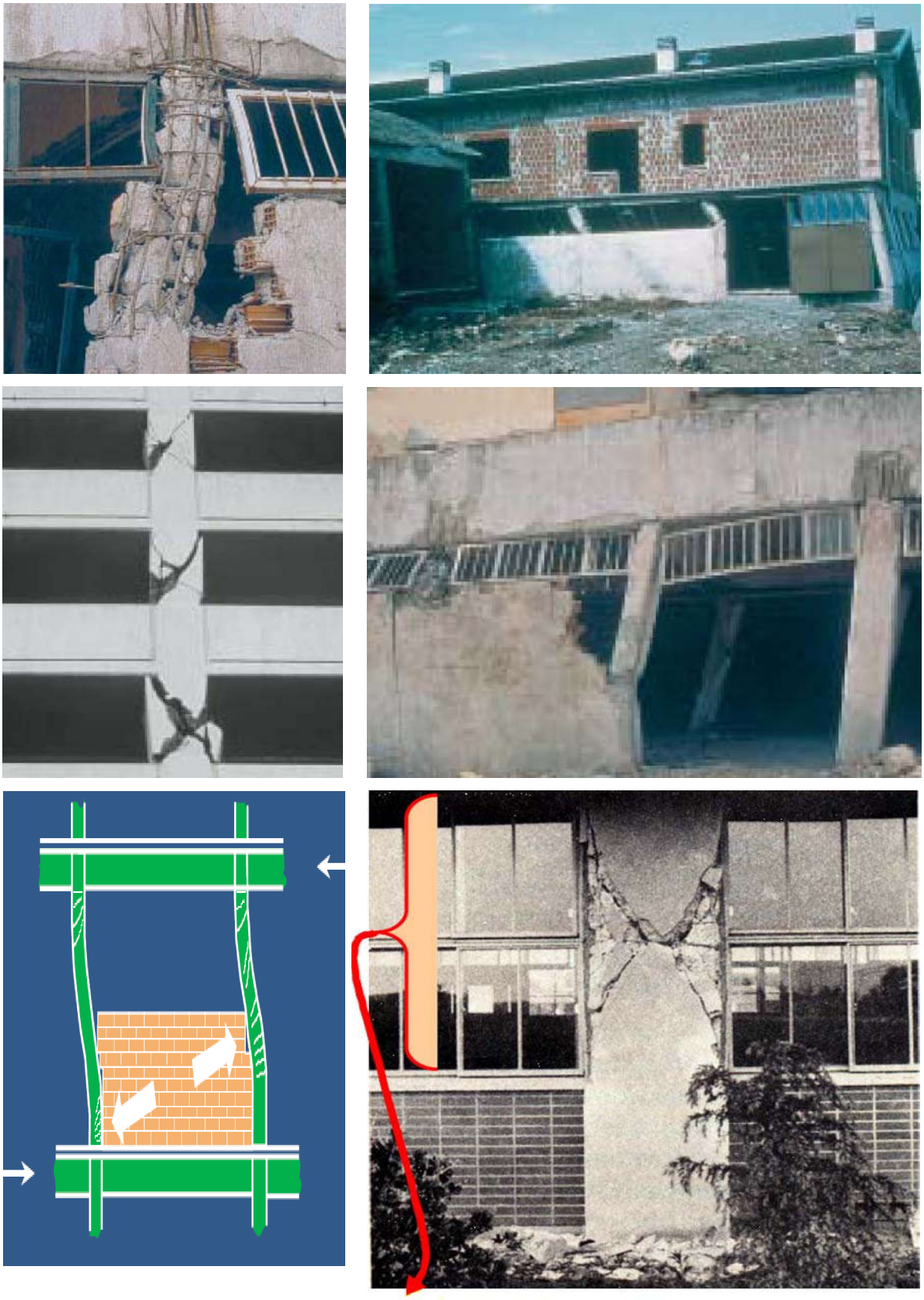



**شکل ۳-۱۲- ایجاد برش و دوران‌های زیاد در ستون‌های کوتاه**

تشکیل مکانیسم ستون کوتاه معمولاً باعث انهدام سازه می‌گردد. در صورتی که دیوار مخصوصاً دیوار باربر تنها در قسمتی از ستون اجرا شود، در هنگام زلزله در ستون نیروی برشی بزرگی به وجود می‌آید که این امر منجر به مکانیسم ستون کوتاه می‌گردد. در این موارد که به علت وجود بازشو ناگزیر به اجرای دیوار در قسمتی از ستون هستیم باید ستون بر اساس نیروهای برشی بزرگ طراحی و یا مقاوم‌سازی شود (شکل‌های ۳-۱۳ و ۳-۱۴).




**شکل ۳-۱۳- تشکیل مکانیسم ستون کوتاه**



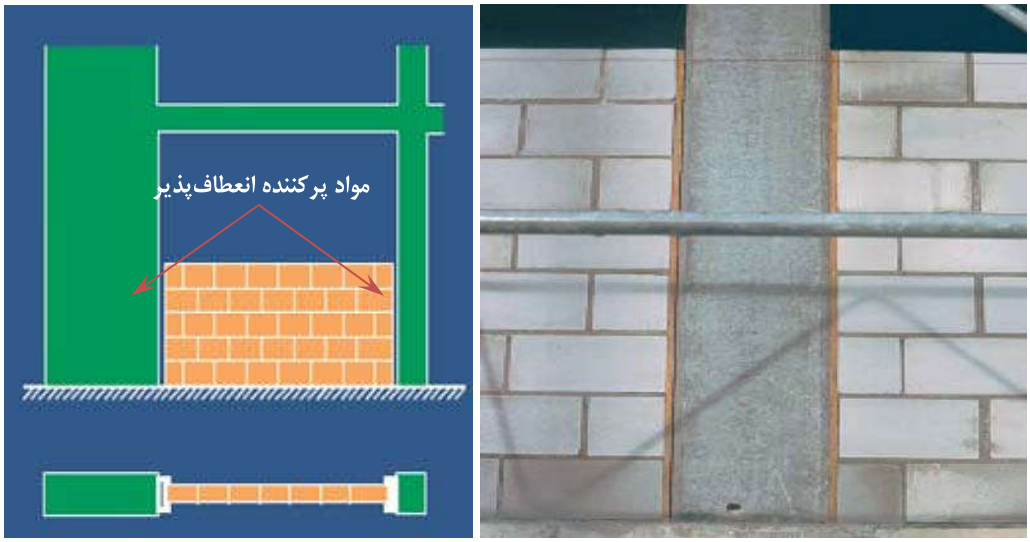
ستون کوتاه

**شکل ۳-۱۴- مکانیسم ستون کوتاه و در نتیجه خرابی سازه**

راهکارهای حذف ستون کوتاه شامل دو دسته کلی می‌باشد:

الف- جداسازی دیوار و ستون:

در این روش با ایجاد فاصله بین دیوار و ستون و پر نمودن آن با مواد پرکننده انعطاف‌پذیر از ایجاد نیروهای برشی در ستون و در نتیجه ایجاد مکانیسم ستون کوتاه جلوگیری می‌گردد. برای محاسبه فاصله بین دیوار و ستون باید اثر P-Δ سازه را منظور نمود (شکل ۳-۱۵).




**شکل ۳-۱۵- جداسازی دیوار و ستون**

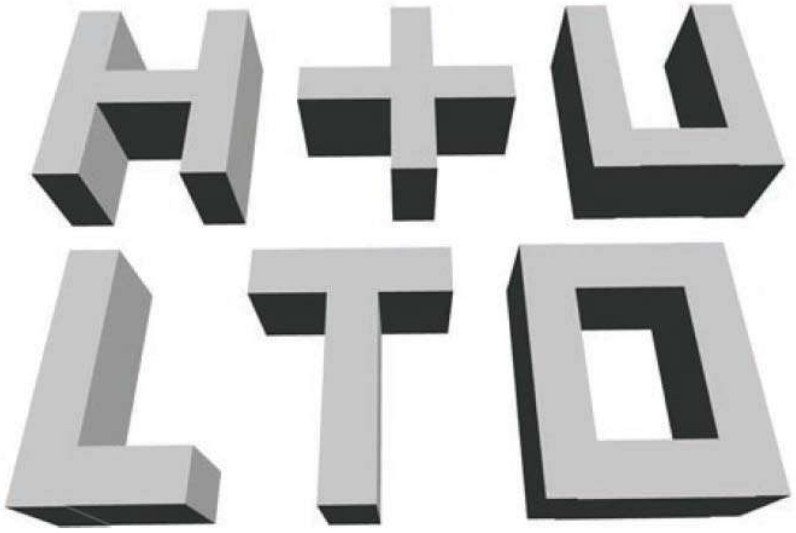
ب- اجرای جزئیات مناسب و شکل‌پذیر در ستون‌ها:

با اجرای جزئیات مناسب و شکل‌پذیر در ستون‌ها می‌توان توانایی ستون در برابر نیروهای برشی و تغییرشکل‌های بزرگ را افزایش داد (شکل ۳-۱۶).

**شکل ۳-۱۶- اجرای جزئیات مناسب و شکل‌پذیر در ستون‌ها**

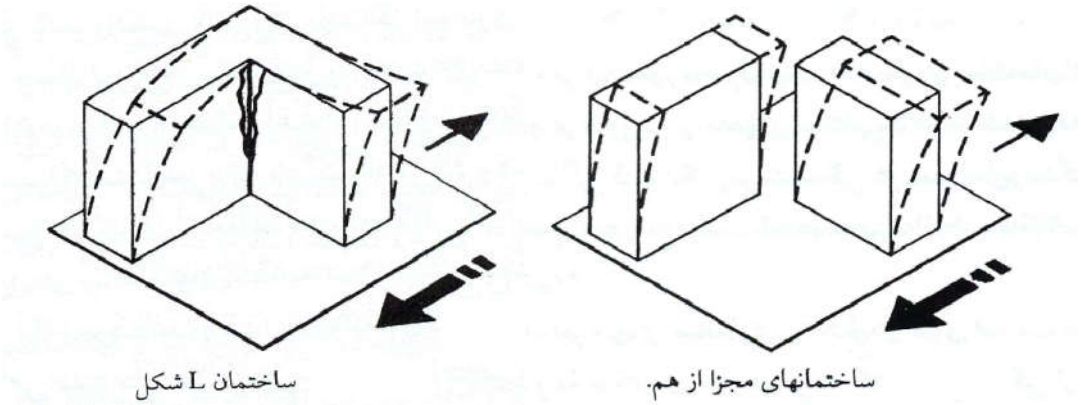
## ۳-۶- گوشه‌های فرورفته

نامنظمی گوشه فرورفته، مشخصهٔ مشترک کلیه پیکربندی‌های ساختمانی است که در پلان، شکل‌هایی به صورت T, U, L, +, □, H، صلیبی و یا ترکیبی از این شکل‌ها را دارند.



**شکل ۳-۱۷- انواع پلان با گوشه‌های فرورفته**

در این نوع سازه‌ها سختی عناصر در کنج ها، در هر یک از جهات متفاوت بوده و در نتیجه قسمتهای مختلف بصورت کاملاً متفاوت نوسان می‌کنند، که این امر باعث ایجاد تمرکز تنش در گوشه‌های فرورفته می‌شود. (شکل ۳-۱۸).

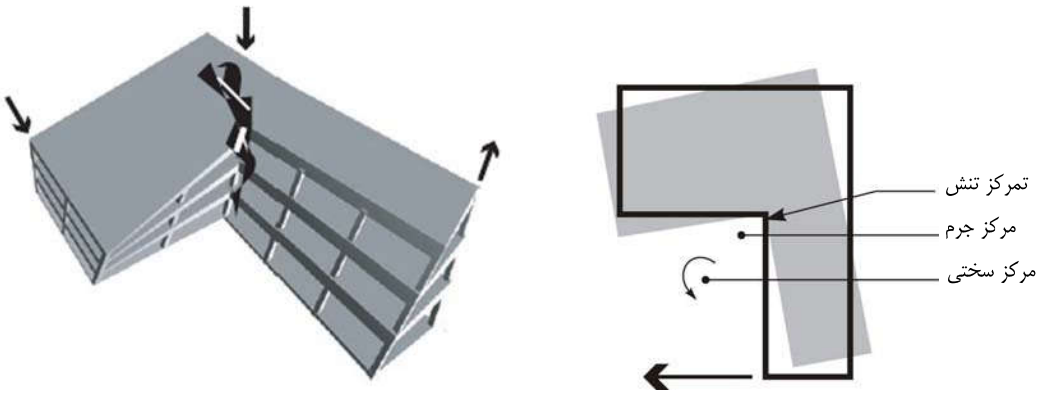



**شکل ۳-۱۸- عملکرد ساختمان‌های L شکل تحت نیروهای زلزله**

مشکل دیگر این نوع سازه ها مربوط به پیچش ایجاد شده در آنها می‌باشد. تمرکز تنش در محل شکاف و آثار ناشی از پیچش به هم مرتبط اند شکل (۳-۲۰). در مجموع اندازه نیروها و تنش های مخرب به عوامل زیر بستگی دارد:

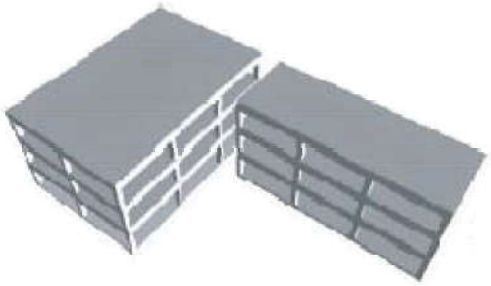
- جرم ساختمان
- سیستم سازه ای
- طول بال‌ها و نسبت‌های جناحی آنها
- ارتفاع بال‌ها و نسبت (ارتفاع/ عمق) آنها

**شکل ۳-۱۹- تمرکز تنش در کنج یک ساختمان L شکل**

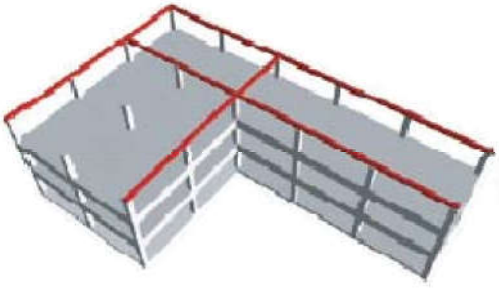



**شکل ۳-۲۰- ایجاد پیچش و تمرکز تنش در ساختمانهای با نامنظمی گوشه‌های فرورفته**

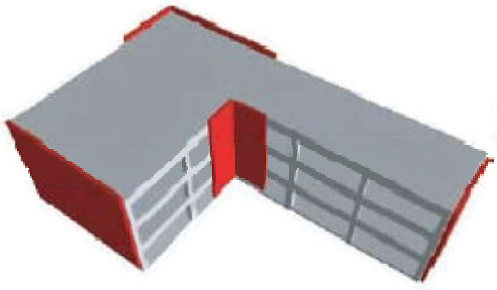
راهکارهایی که می‌تواند برای بهسازی این نوع از نامنظمی بکار گرفته شوند شامل جداسازی سازه ای ساختمان به دو بخش منظم، تقویت موضعی اجزا در محل خطوط تمرکز تنش، کمک به یکپارچه عمل کردن سازه با استفاده از مقاوم سازی عناصر محیطی، حذف کنج با استفاده از پخی ها و رفع نامنظمی پیچشی توسط راهکارهایی که در قبل ارائه شد می باشد (شکل ۳-۲۱).



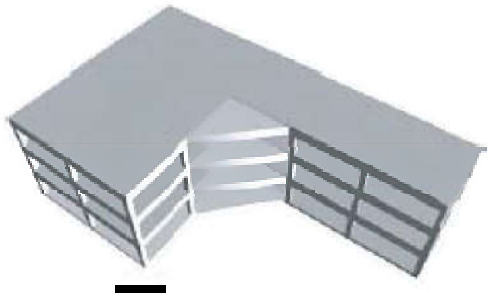
الف– جداسازی ساختمانها



ب– یکپارچه سازی با مقاوم سازی عناصر محیطی



ج– تقویت موضعی اجزا درمحل خطوط تمرکز تنش



د– حذف کنج های فرورفته با استفاده از پخی‌ها

**شکل ۳-۲۱- بعضی از راهکارهای ارائه شده برای رفع پیچش و تمرکز تنش در ساختمانهای با نامنظمی گوشه‌های فرورفته**

# فصل ۴

# افزایش مقاومت و سختی جانبی سازه