R01-Minor modification

کمیتـه ایرانی نرم‌افزارهای مهندسی

در همکاری با دبیرخانه دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)

نشریه شماره ۹۰۰:

مجموعه دستنامه‌های کمیتـه ایرانی نرم‌افزارهای مهندسی
جلد اول (۱-۹۰۰):

طراحی دیافراگم‌های بتن آرمه



کارگروه بتن

آبان ۱۴۰۵

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
bhrc.ac.ir

نظام فنی و اجرایی کشور
nezamfanni.ir

iesc.bhrc.ac.ir

جمهوری اسلامی ایران

سازمان برنامه و بودجه کشور

مجموعه دستنامه‌های
کمیته ایرانی نرم‌افزارهای مهندسی

جلد اول:
طراحی دیافراگم‌های بتن آرمه
نشریه شماره ۱-۹۰۰

معاونت فنی، امور زیربنایی و تولیدی

امور نظام فنی و اجرایی

nezamfanni.ir

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

معاونت تحقیقات

bhrc.ac.ir

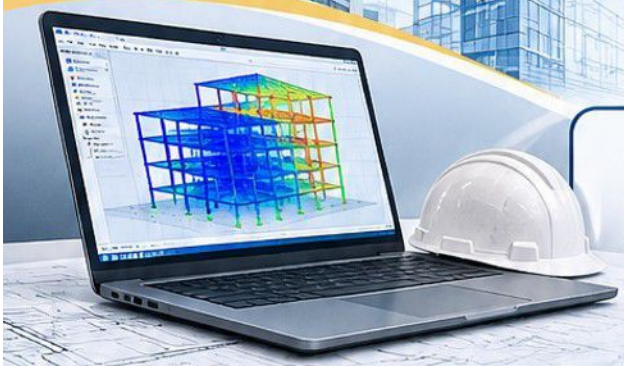
کمیته ایرانی نرم‌افزارهای مهندسی

iesc.bhrc.ac.ir

۱۴۰۵

کمیته ایرانی نرم‌افزارهای مهندسی

ساماندهی به کارگیری نرم‌افزارهای مهندسی در چارچوب ضوابط فنی



مأموریت محوری

هم‌راستاسازی فرآیند طراحی نرم‌افزاری
با آیین‌نامه‌ها و مقررات ملی

محورهای فعالیت

- تبیین ضوابط آیین‌نامه‌ای در فرآیند طراحی
- پاسخ به پرسش‌ها و ابهامات نرم‌افزارها
- انتقال دانش خبرگان از طریق تهیه راهنماهای کاربردی
- رصد و شناخت ظرفیت نرم‌افزارهای مهندسی

مسیر پاسخ‌گویی تخصصی

پرسش مهندس ← بررسی در کارگروه تخصصی ← پاسخ و راهنمای فنی

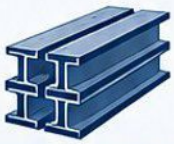
نمونه فعالیت‌ها



شناسایی نرم‌افزارهای ایرانی



کارگروه بتن و سازه‌های بتنی



کارگروه فولاد و سازه‌های فولادی



کارگروه اندرکنش سازه، خاک و پی

درگاه اطلاع‌رسانی: iesc.bhrc.ac.ir

پیشگفتار

با عنایت به الزام جامعه مهندسی به رعایت ضوابط مندرج در مقررات، آیین‌نامه‌ها، استانداردها و اسناد مرجع و ضرورت پیاده‌سازی این ضوابط در نرم‌افزارهای مهندسی؛ مناسب است با در نظر گرفتن نیازهای ایشان، ظرفیت نرم‌افزارهای موجود و قیدهای منظور شده در ضوابط مورد اشاره، ارائه راهکارهای مهندسی با هدف «ترویج استفاده صحیح از نرم‌افزار و استناد دقیق به سند مرجع» و همچنین، ارائه راهنماهای کاربردی با هدف «ایجاد وحدت رویه و کاهش سردرگمی مهندسین در پیاده‌سازی ضوابط» مورد توجه قرار گیرد. در همین راستا؛ «طرح ساماندهی نرم‌افزارهای مهندسی» در قالب تفاهم‌نامه همکاری مشترک فی ما بین امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور و مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی از سال ۱۳۹۹ و با بهره‌گیری از توان تخصصی و دانش فنی اساتید، صاحب‌نظران و متخصصان امر تعریف و تا کنون، در سه فاز متوالی عملیاتی شده است. این طرح که با تشکیل «کمیته ایرانی نرم‌افزارهای مهندسی» فعالیت خود را آغاز نموده، در گام نخست به موضوعات مرتبط با مهندسی عمران پرداخته و پیرو انتشار ویرایش‌های جدید مباحث هفتم، نهم و دهم مقررات ملی ساختمان، آیین‌نامه بتن ایران (آبا)-ضابطه شماره ۱۲۰ نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور و ویرایش پنجم آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) بر ارائه راه حل‌های کاربردی در خصوص پیاده‌سازی صحیح ضوابط و الزامات این اسناد در نرم‌افزارهای متعارف مهندسی عمران تمرکز نموده‌است.

نتیجه فعالیت‌های این کمیته طی سالیان گذشته در سامانه اطلاع‌رسانی کمیته ایرانی نرم‌افزارهای مهندسی به نشانی iesc.bhrc.ac.ir در دسترس مهندسین قرار گرفته و به طور کلی، پاسخ به پرسش‌ها، ارائه راهنماهای تفصیلی و انتشار نشریه‌های تخصصی را در بر می‌گیرد. پیرو انتشار ویرایش پنجم آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) و با هدف یکپارچه سازی موضوعات مرتبط با بارگذاری، تحلیل و طراحی، تدوین دستنامه‌های تخصصی کاربردی در پاسخ به نیاز جامعه مهندسی به عنوان اصلی ترین فعالیت فاز سوم طرح ساماندهی نرم‌افزارهای مهندسی مورد توجه قرار گرفت.

عطف به توضیحات فوق و پیرو اقدامات صورت گرفته در موضوع، دستنامه تخصصی «**طراحی دیافراگم‌های بتن آرمه**» جهت بهره‌برداری مهندسین منتشر می‌شود. در این دستنامه تلاش شده است ابتدا، بر اساس ویرایش پنجم آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)، نحوه بارگذاری دیافراگم‌ها در نرم‌افزار و چگونگی مدل‌سازی و پیاده‌سازی آن تشریح و سپس، ملاحظات طراحی اجزای اصلی دیافراگم شامل المان‌های یال (*Chord*)، جمع‌کننده‌ها (*Collector*) و همچنین طراحی برشی دیافراگم – با بررسی ضوابط حاکم بر طراحی دیافراگم‌ها بر مبنای آیین‌نامه بتن ایران و مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و با در نظر گرفتن قابلیت‌ها و محدودیت‌های نرم‌افزار *ETABS* – ارائه شود.

این دستنامه با شماره نشریه (۱-۹۰۰) امور نظام فنی و اجرایی، در ردیف راهنماهای کاربردی به شمار می‌رود و با هدف تصریح و تبیین رویه‌های صحیح پیاده‌سازی ضوابط مدلسازی، بارگذاری، تحلیل و طراحی تدوین شده است. امید است با بهره‌گیری مهندسین از این سند، گام مؤثری در راستای آموزش و ترویج پیاده‌سازی صحیح ضوابط طراحی سازه برداشته شود. ضمن آنکه، این مرکز آمادگی خود برای دریافت سوالات تخصصی در موضوع و نظرات تکمیلی در راستای تدقیق یا توسعه این سند – از طریق نشانی الکترونیکی سامانه ایرانی نرم‌افزارهای مهندسی به نشانی iesc@bhrc.ac.ir – را اعلام می‌دارد. همچنین، از کلیه علاقمندان دعوت می‌گردد جهت اطلاع از انتشار اسناد و راهنماهای کاربردی به تارنمای مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی به نشانی bhrc.ac.ir و تارنمای امور نظام فنی و اجرایی کشور به نشانی Nezamfanni.ir مراجعه نمایند.

فهرست مطالب

پیشگفتار ..... أ

۱- مقدمه: ۱

۲- ترازهای بحرانی در دیافراگم ۲

۳- دیافراگم و نیروهای وارده به آن ۳

۴- نحوه اعمال نیروی دیافراگم در نرم‌افزار ۶

۵- مدل‌سازی دیافراگم در نرم‌افزار ۱۱

۵-۱ ضریب ترک‌خوردگی دیافراگم ۱۱

۵-۲ ابعاد مش‌بندی در مدل‌سازی دیافراگم ۱۲

۶- طراحی دیافراگم ۱۲

۶-۱ طراحی یال‌های فشاری دیافراگم ۱۲

۶-۲ طراحی یال‌های کششی دیافراگم ۱۵

۶-۳ طراحی برشی دیافراگم ۱۶

۶-۴ طراحی جمع‌کننده‌ها ۱۹

۷- سقف تیرچه‌بلوک ۲۳

۸- مراجع ۲۵

مجریان طرح:

دکتر عاطفه جهان محمدی

مهندس سیدمحمد میرهاشمی

اعضای کمیته تدوین (به ترتیب حروف الفبا):

مهندس صمد آقازاده

دکتر سعید تاریوردیلو

دکتر محمدرضا جوانمردی

مهندس صمد دهقانی

دکتر رضا سلطان آبادی

دکتر امیرحسین شجاع

دکتر مهدی علیرضایی

دکتر کامیار کرباسی آرانی

اعضای کمیته داوری (به ترتیب حروف الفبا):

دکتر عاطفه جهان محمدی

دکتر مسعود داریوشی

دکتر مسعود سلطانی محمدی

دکتر امیرمسعود صالحی

مهندس رضا غفاری

زیر نظر کمیته راهبردی (به ترتیب حروف الفبا):

مهندس صمد آقازاده

دکتر اباذر اصغری

مهندس علیرضا توتونچی

دکتر عاطفه جهان محمدی

مهندس سجاد حیدری حسنکلو

دکتر عبدالرضا سروقد مقدم

دکتر مسعود سلطانی محمدی

دکتر امیرمسعود صالحی

مهندس رضا غفاری

دکتر محمدحسین غفاری

دکتر کامیار کرباسی آرانی

دکتر بهروز محمدکاری

مهندس سیدمحمد میرهاشمی

طراحی دیافراگم‌های بتن‌آرمه

۱- مقدمه:

دیافراگم‌ها از اجزای مختلفی تشکیل شده‌اند که هر یک نقش مشخصی در تحمل نیروهای وارد بر دیافراگم و انتقال آن‌ها به اجزای قائم سیستم باربر جانبی بر عهده دارند. از این‌رو، شناخت دقیق هر یک از این اجزا و آگاهی از نقش آن‌ها در رفتار و مقاومت دیافراگم، برای انجام طراحی مناسب و رعایت ضوابط مربوط به هر جزء از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

دیافراگم‌ها بر اساس میزان سختی درون‌صفحه‌ای نسبت به سختی اجزای قائم سیستم باربر جانبی به سه گروه صلب، نیمه‌صلب و نرم تقسیم می‌شوند. در دیافراگم‌های صلب، تغییرشکل درون‌صفحه‌ای دیافراگم ناچیز فرض شده و توزیع نیروهای جانبی میان اجزای قائم باربر جانبی، عمدتاً بر اساس سختی نسبی این اجزا انجام می‌شود.

در دیافراگم‌های نیمه‌صلب، تغییرشکل درون‌صفحه‌ای در دیافراگم وجود دارد و توزیع نیروهای جانبی تابعی از سختی درون‌صفحه‌ای دیافراگم و سختی اجزای قائم سیستم باربر جانبی است. در مقابل، در دیافراگم‌های نرم، به دلیل سختی کم دیافراگم، توزیع نیروها بیشتر بر اساس سطح بارگیر یا ناحیه مؤثر هر عضو قائم باربر جانبی صورت می‌گیرد.

از آنجا که سیستم کف در ساختمان معمولاً بخش قابل‌توجهی از جرم سازه را تشکیل می‌دهد، در هنگام وقوع زلزله نیروهای اینرسی قابل ملاحظه‌ای در صفحه دیافراگم ایجاد می‌شود. یکی از وظایف اصلی دیافراگم در سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، جمع‌آوری و انتقال این نیروهای اینرسی به اعضای قائم سیستم باربر جانبی نظیر دیوارهای برشی یا قاب‌های خمشی است.

علاوه بر این، در برخی شرایط نیروهایی موسوم به نیروهای انتقالی دیافراگم در سیستم کف به وجود می‌آید. این نیروها معمولاً زمانی ایجاد می‌شوند که اعضای قائم باربر جانبی در طبقات مختلف ساختمان بر روی یک امتداد قائم قرار نداشته باشند، یا در سختی جانبی نسبی آن‌ها تغییراتی وجود داشته باشد. در چنین حالتی مسیر انتقال نیروهای جانبی در ارتفاع سازه دچار تغییر شده و دیافراگم ناگزیر است نیروهای زلزله را از اعضای قائم واقع در طبقه بالاتر دریافت کرده و به اعضای قائم دیگر در طبقه پایین‌تر منتقل کند. این فرایند موجب ایجاد نیروهای انتقالی در دیافراگم می‌شود که باید در طراحی و تحلیل سازه مورد توجه قرار گیرد.

در این دستنامه تلاش شده است ابتدا، بر اساس ویرایش پنجم استاندارد ۲۸۰۰، نحوه بارگذاری دیافراگم‌ها در نرم‌افزار و چگونگی مدل‌سازی و پیاده‌سازی آن تشریح شود. سپس با بررسی ضوابط حاکم بر طراحی دیافراگم‌ها بر مبنای آیین‌نامه بتن ایران و مبحث نهم مقررات ملی ساختمان با در نظر گرفتن قابلیت‌ها و محدودیت‌های نرم‌افزار *ETABS*، طراحی اجزای اصلی دیافراگم شامل المان‌های یال (*Chord*)، جمع‌کننده‌ها (*Collector*) و همچنین طراحی برشی دیافراگم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

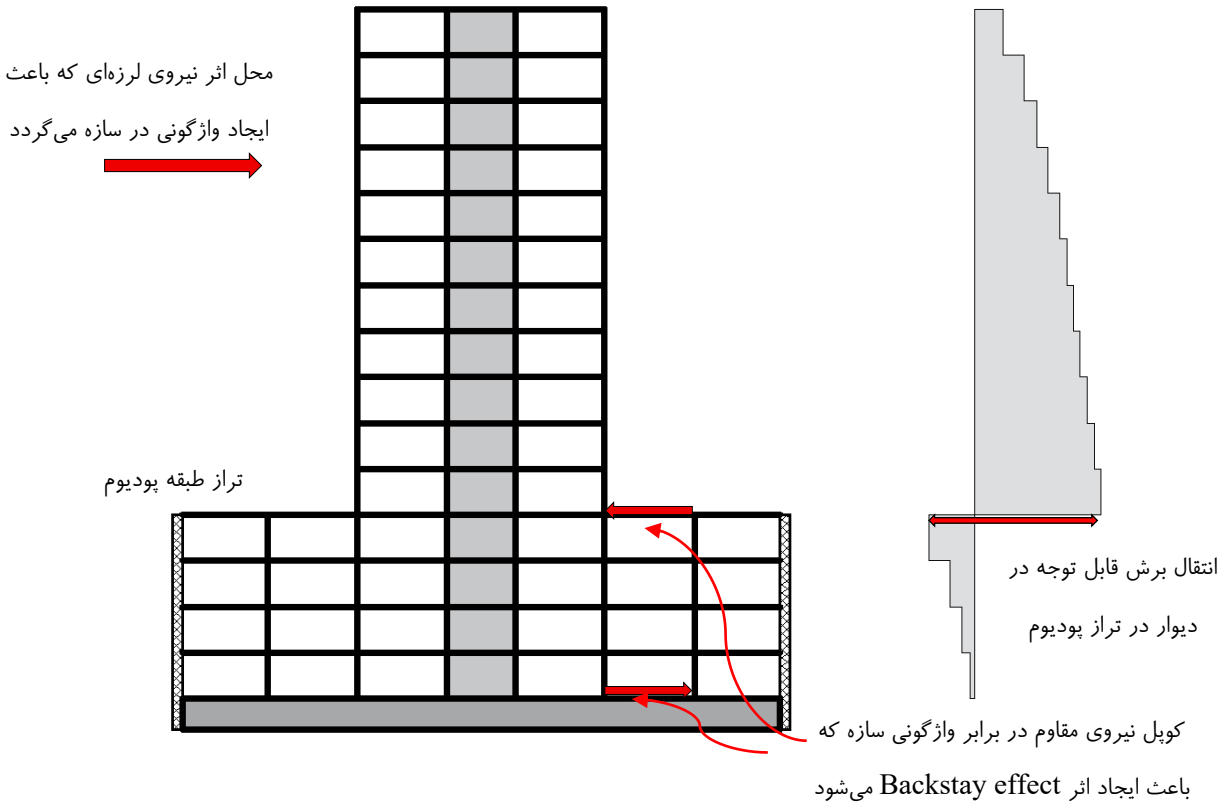
در ادامه، اندرکنش بین تلاش‌های خارج از صفحه و درون‌صفحه دیافراگم و اثر همزمان آن‌ها بر اجزای مختلف دیافراگم تحلیل شده و نحوه مدل‌سازی و اعمال این اثرات در نرم‌افزار نیز تشریح می‌شود.

۲- ترازهای بحرانی در دیافراگم

در برخی طبقات، نیروهای انتقالی در دیافراگم ممکن است به‌طور قابل‌توجهی بزرگ‌تر از سایر طبقات باشند؛ ازاین‌رو طراحی دیافراگم در این ترازها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از مهم‌ترین این موارد می‌توان به تراز پودیوم (*Podium*) و تراز عقب‌نشسته (*Setback*) اشاره کرد.

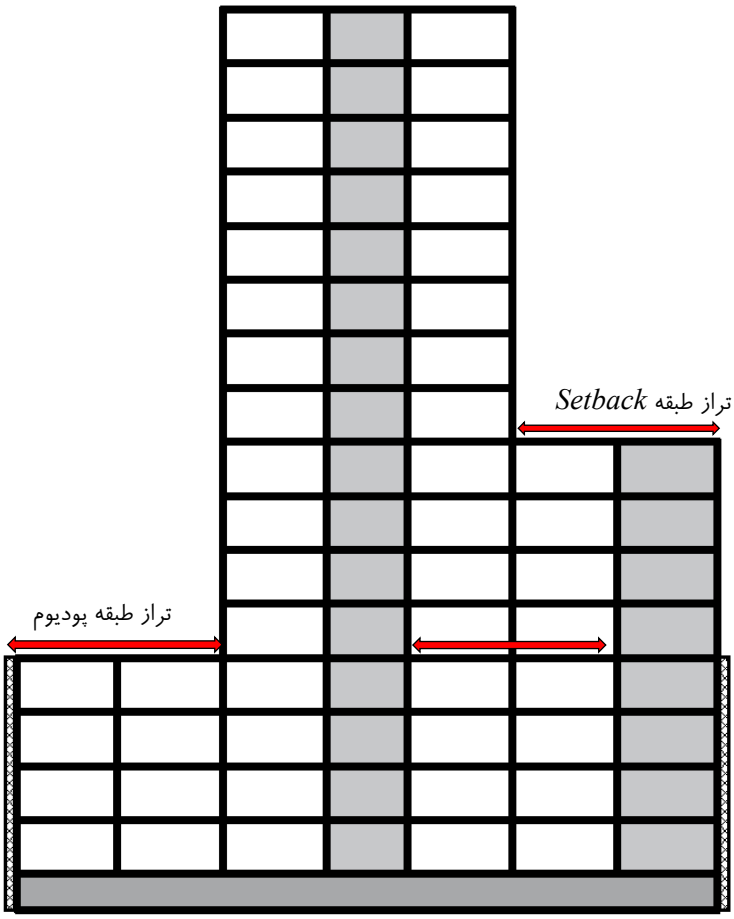
طبقه‌ای که در تراز بالاترین سطح دیوارهای حائل پیرامونی قرار دارد، تراز پودیوم (*Podium*) نامیده می‌شود. در این تراز، به دلیل انتقال نیروهای جانبی از سیستم باربر لرزه‌ای اصلی ساختمان به دیوارهای حائل پیرامونی، در دیافراگم تلاش‌های درون‌صفحه قابل توجهی ایجاد می‌شود که می‌تواند منجر به برش معکوس قابل توجه در دیوارهای برشی شود که از آن با عنوان *Backstay effect* یاد می‌شود.

منشأ اصلی این پدیده، کوپل نیروهایی است که در تراز پودیوم و طبقات پایین‌تر، در اثر مقاومت سازه در برابر واژگونی ناشی از نیروهای لرزه‌ای به وجود می‌آید. در نتیجه این مکانیزم، برش انتقالی دیافراگم در طبقه پودیوم به دیوارهای حائل در برخی موارد می‌تواند حتی از کل برش لرزه‌ای وارد بر همان دیوار نیز بزرگ‌تر شود (شکل ۱).



شکل ۱- انتقال قابل توجه برش در طبقه پودیوم و Backstay effect

در مواردی که در بالای یکی از طبقات، ابعاد پلان ساختمان نسبت به تراز پایین همان طبقه به‌طور ناگهانی کاهش یابد؛ به‌گونه‌ای که برخی از قاب‌ها یا دیوارهای برشی در طبقات بالاتر حذف شوند، آن تراز به عنوان طبقه عقب‌نشسته (*Setback Slab*) شناخته می‌شود. در چنین ترازهایی، دیافراگم نقش مهمی در انتقال نیروهای جانبی بین اجزای سیستم باربر لرزه‌ای ایفا می‌کند، زیرا باید نیروهای جانبی را از عناصر قائم موجود در طبقات بالاتر به عناصر لرزه‌بر در طبقات پایین‌تر منتقل نماید (شکل ۲).



شکل ۲- تراز Podium و Setback

در سازه‌هایی که دارای ستون‌های مایل هستند، علاوه بر بارهای جانبی، بارهای ثقلی نیز می‌توانند موجب ایجاد نیروهای داخلی قابل‌توجهی در دیافراگم شوند. ازاین‌رو، در چنین سازه‌هایی طراحی دیافراگم‌ها باید با دقت بیشتری انجام گیرد؛ به‌ویژه در ترازی که ستون از حالت قائم به مایل تغییر جهت می‌دهد، زیرا در این محل دیافراگم نقش مهمی در انتقال و توزیع نیروهای ایجادشده ایفا می‌کند.

۳- دیافراگم و نیروهای وارده به آن

در سازه‌های چندطبقه، به دلیل تأثیر مودهای بالاتر ارتعاشی، بیشینه نیروی جانبی ناشی از شتاب زلزله در تمام طبقات به‌طور همزمان رخ نمی‌دهد. به بیان دیگر، پاسخ شتاب در طبقات مختلف در زمان‌های متفاوتی به مقدار بیشینه خود می‌رسد. از این‌رو، طراحی همزمان تمامی دیافراگم‌های یک سازه بر اساس یک الگوی ثابت توزیع بار جانبی در ارتفاع امکان‌پذیر نیست. بر این اساس، برای طراحی دیافراگم هر طبقه باید الگوی توزیع بار جانبی متناظر با بیشینه پاسخ شتاب همان طبقه ملاک عمل قرار گیرد. بنابراین، برخلاف روال متداول در طراحی اعضای سیستم باربر جانبی قائم که معمولاً از یک الگوی توزیع بار جانبی زلزله در ارتفاع استفاده می‌شود، در طراحی دیافراگم‌ها لازم است برای هر طبقه یک الگوی توزیع بار جانبی مستقل به سازه اعمال گردد.

نیروی طراحی دیافراگم (F_{px}) که وابسته به شتاب بیشینه طبقه است، از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود [1,2]:

$$F_{px} = \frac{\sum_{i=x}^{n} F_i}{\sum_{i=x}^{n} W_i} W_{px} \qquad (۱)$$

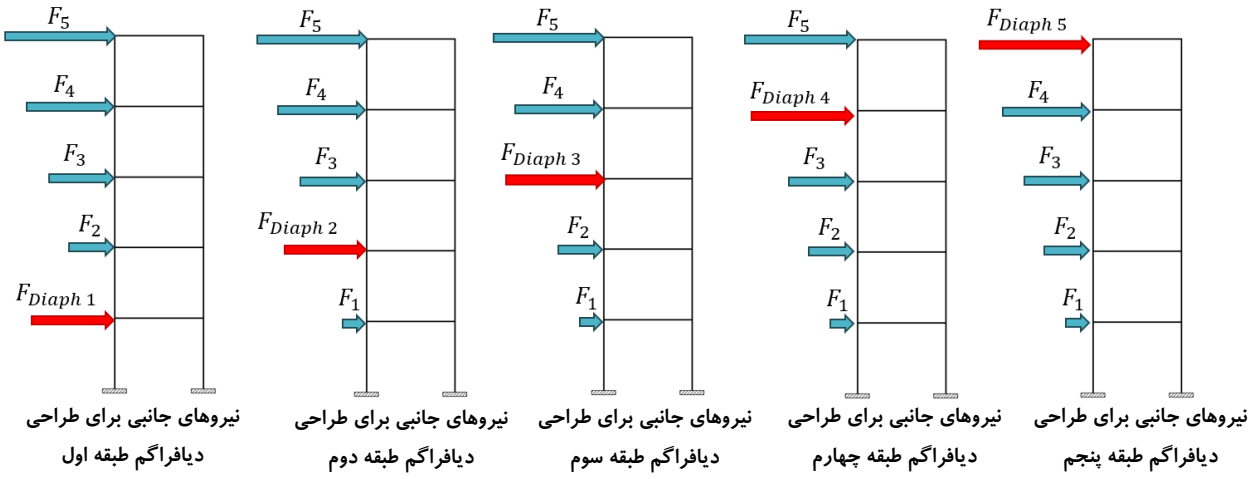
مقدار این نیرو لازم نیست بیشتر از $(F_{px})_{max} = 0.4 I_e S_{DS} W_{px}$ و نباید کمتر از $(F_{px})_{min} = 0.2 I_e S_{DS} W_{px}$ در نظر گرفته شود. اعمال ضریب نامعینی ρ به نیروی F_{px} لازم نمی‌باشد، اما در صورت وجود نیروهای انتقالی در دیافراگم لازم است ضریب ρ مشابه با سیستم باربر جانبی به نیروهای انتقالی وارد گردد [3]. همچنین در مواردی که طراحی سازه بر اساس روش دینامیکی طیفی انجام می‌شود، می‌توان نیروی طراحی دیافراگم را به‌صورت استاتیکی اعمال کرد. در این حالت، با وجود آنکه نیروهای مورد استفاده در طراحی کلی سازه و طراحی دیافراگم از دو روش متفاوت به دست می‌آیند، معمولاً اختلاف قابل ملاحظه‌ای در نتایج طراحی و محاسبات ایجاد نمی‌شود [4]. چنانچه سازه مشمول اعمال خروج از مرکزیت تصادفی باشد، این اثر باید در نیروی طراحی دیافراگم نیز در نظر گرفته شود [6, 5, 4].

در طراحی اتصالات دیافراگم به اعضای باربر جانبی سازه‌هایی که دارای نامنظمی هندسی، پیچشی، دیافراگم و نامنظمی خارج از صفحه در پلان یا نامنظمی قطع سیستم باربر جانبی در ارتفاع هستند، مقدار نیروی طراحی وارد بر دیافراگم (F_{px}) باید به میزان ۲۵ درصد افزایش یابد. لازم به ذکر است، در خصوص اعضایی که با زلزله تشدیدیافته Ω_0 طراحی شده‌اند، اعمال این افزایش ۲۵ درصدی الزامی نخواهد بود. همچنین در سازه‌هایی که مشمول نامنظمی پیچشی یا نامنظمی سیستم‌های غیرموازی هستند، اثر ترکیب ۳۰–۱۰۰ در طراحی دیافراگم باید لحاظ شود [1, 2].

توزیع نیروی طراحی دیافراگم در شکل ۳ برای یک سازه پنج طبقه نمایش داده شده است، لازم به ذکر است نیروی طراحی دیافراگم (F_{px}) نباید کمتر از مقدار نیروی جانبی ناشی از تحلیل استاتیکی سازه (F_x) و همچنین $(F_{px})_{min}$ در نظر گرفته شود، به عبارت دیگر نیروی طراحی دیافراگم $(F_{Diaph\,x})$ به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$F_{Diaph\,x} = max(F_{px}, F_x, (F_{px})_{min}) \qquad (۲)$$

لازم به ذکر است مقدار این نیرو لازم نیست بیشتر از $(F_{px})_{max}$ لحاظ گردد.



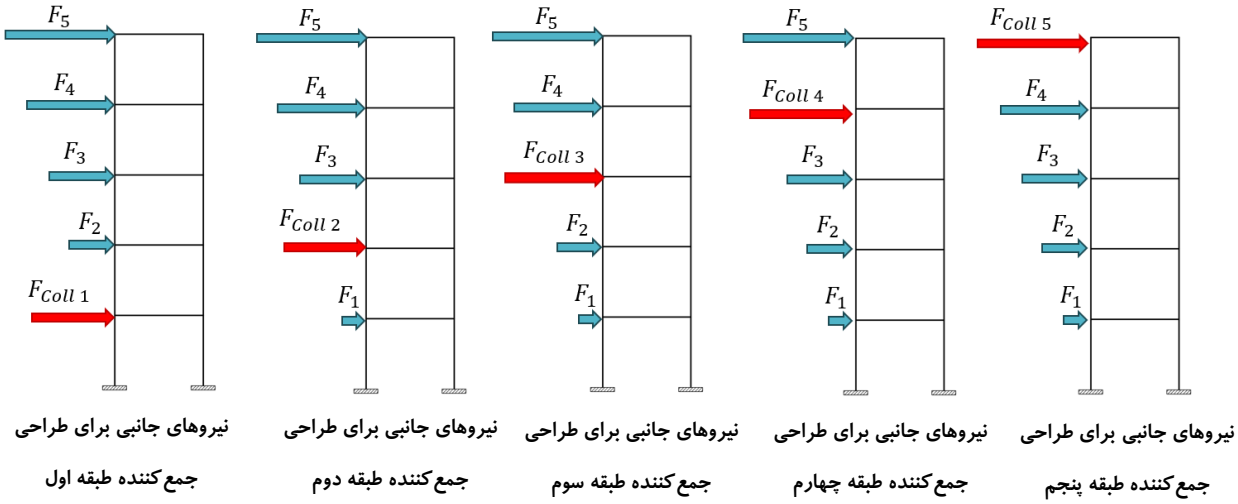
شکل ۳- توزیع نیروی دیافراگم در ارتفاع سازه برای طراحی دیافراگم

جمع‌کننده‌ها و اتصالات آن‌ها باید برای نیروی $(F_{Coll\,x})$ که به تراز دیافراگم مورد نظر وارد می‌گردد طراحی شوند. این نیرو به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathrm{F}_{Coll\,x} = \max\left(\left(\Omega_0 F_{px}\right), \left(\Omega_0 F_x\right), \left(F_{px}\right)_{min}\right) \qquad (۳)$$

همچنین در طراحی جمع‌کننده به سایر ترازهای سازه نیروی جانبی ناشی از تحلیل استاتیکی (F_x) باید وارد گردد. نحوه توزیع این نیروها برای طراحی جمع‌کننده‌ها در شکل ۴ نمایش داده شده است.

شایان ذکر است اگرچه رابطه (۳) حداکثر بار وارد بر دیافراگم برای طراحی جمع‌کننده را محاسبه می‌کند، اما ممکن است اعمال یکی دیگر از حالات بار این رابطه، منجر به ایجاد تلاش‌های داخلی بزرگ‌تری در برخی از اعضای جمع‌کننده شود. بنابراین روش دقیق‌تر این است که تلاش‌های داخلی اعضای جمع‌کننده تحت هر سه حالت بار تعریف شده در این رابطه محاسبه شده و طراحی بر اساس پوش بیشترین نیروی ایجادشده در هر جمع‌کننده انجام پذیرد.



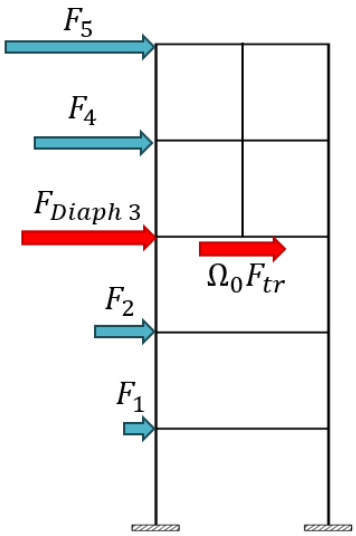
شکل ۴- توزیع نیروی دیافراگم در ارتفاع سازه برای طراحی جمع‌کننده‌ها

در صورت وجود نامنظمی خارج از صفحه در ارتفاع سازه، لازم است در طراحی دیافراگم، علاوه بر اعمال نیروی طراحی دیافراگم در تراز مورد نظر $(F_{\mathrm{Diaph},x})$، اثر نیروهای جانبی طبقات (F_x) نیز در مدل سازه لحاظ شود.

اعمال نیروهای جانبی طبقات (F_x) موجب ایجاد نیروهای انتقالی (F_{tr}) در دیافراگم می‌شود؛ نیروهایی که به‌واسطه جابجایی، ناپیوستگی یا تغییر مسیر سیستم باربر جانبی در ارتفاع سازه در دیافراگم ایجاد می‌شوند. بنابراین، در چنین شرایطی دیافراگم باید علاوه بر نیروهای اینرسی خود، برای نیروهای انتقالی ناشی از تغییر محل اجزای قائم سیستم باربر جانبی نیز طراحی شود.

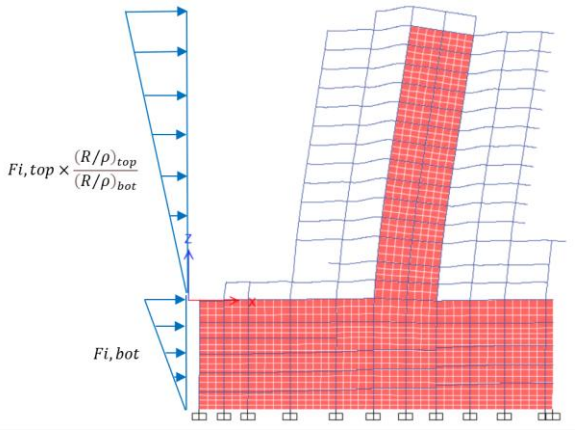
از آنجا که این نیروها ماهیت انتقالی دارند، لازم است اثر آن‌ها در طراحی دیافراگم به‌صورت تشدیدیافته در نظر گرفته شود. به‌عنوان یک راهکار اجرایی و محافظه کارانه در مدل‌سازی، می‌توان نیروهای جانبی طبقات (F_x) را به‌صورت تشدیدیافته به مدل اعمال کرد تا اثر نیروی انتقالی ناشی از ناپیوستگی یا تغییر محل سیستم باربر جانبی، در طراحی دیافراگم به‌درستی لحاظ شود.

به عنوان مثال نحوه توزیع این نیروها برای سازه‌ای که دارای نامنظمی خارج از صفحه در تراز سقف سوم می‌باشد در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵- توزیع نیروی دیافراگم در ارتفاع سازه برای طراحی سازه در تراز سقف سوم که دارای نامنظمی خارج از صفحه می‌باشد

در سازه‌هایی که تراز پایه در تراز پودیوم قرار دارد، از نظر محاسباتی مقدار نیروهای F_{px} و F_x در تراز پودیوم برابر با صفر خواهد بود. با این حال، با توجه به اهمیت این تراز در انتقال و توزیع نیروهای جانبی، توصیه این کارگروه آن است که برای تعیین نیروی طراحی دیافراگم در این تراز از ضوابط تحلیل دومرحله‌ای یا ضوابط طراحی زیر تراز پایه مندرج در استاندارد ۲۸۰۰ استفاده شود (شکل ۶).



شکل ۶- نیروهای جانبی طراحی سازه برای تراز پودیوم در سازه‌ای که تراز پایه در سطح زمین قرار دارد

۴- نحوه اعمال نیروی دیافراگم در نرم‌افزار

طراحی دیافراگم را می‌توان در نرم‌افزارهای $ETABS$ یا $SAFE$ انجام داد. با توجه به دقت بالاتر و سهولت بیشتر در این دستنامه نحوه اعمال بارها در نرم‌افزار $ETABS$ بیان شده است. لازم به ذکر است در طراحی دیافراگم باید در نرم‌افزار دیافراگم به‌صورت نیمه‌صلب مدل‌سازی گردد.

برای اعمال نیروی طراحی دیافراگم در نرم‌افزار *ETABS* می‌توان در ابتدا الگوهای بار زلزله استاتیکی را به صورت *User Coefficient* در نرم‌افزار تعریف نمود. لازم به ذکر است که اعمال بار به صورت *User Load* در دیافراگم نیمه‌صلب توصیه نمی‌شود؛ زیرا در این حالت بار به‌صورت متمرکز در مرکز جرم طبقه اعمال شده و این موضوع می‌تواند منجر به بروز خطا در تحلیل و در نتیجه عدم صحت نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزار شود [7].

در مدل تحلیلی که اعمال نیروی $F_{Diaph\,i}$ در طبقه i ام مدنظر باشد، به عنوان یک راهکار می‌توان نیروی زلزله استاتیکی معادل F_i را در کلیه طبقات اعمال نمود و نیروی اضافه $F_{Diaph\,i} - F_i$ را به صورت یک نیروی مازاد در تراز i ام حساب کرد. به طور مثال در شکل ۷ اعمال و محاسبه این نیرو در تراز دیافراگم دوم نمایش داده شده است.

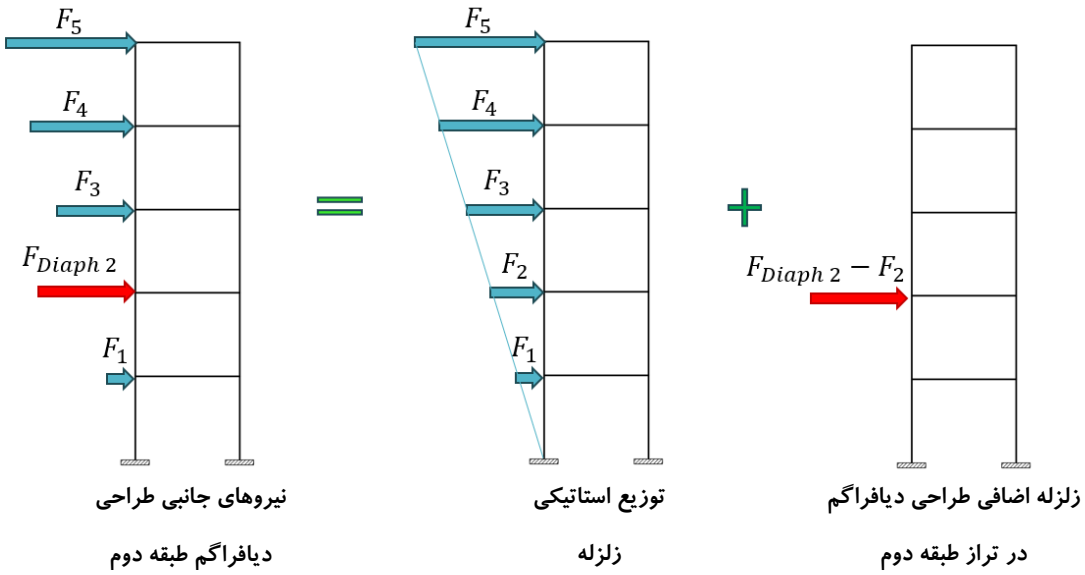
ضریب زلزله نیروی طراحی اضافی دیافراگم در تراز i ام (C_{pi}) می‌تواند مطابق رابطه زیر محاسبه گردد:

$$C_{pi} = \frac{F_{Diaph\,i} - F_i}{W_i} \qquad (۴)$$

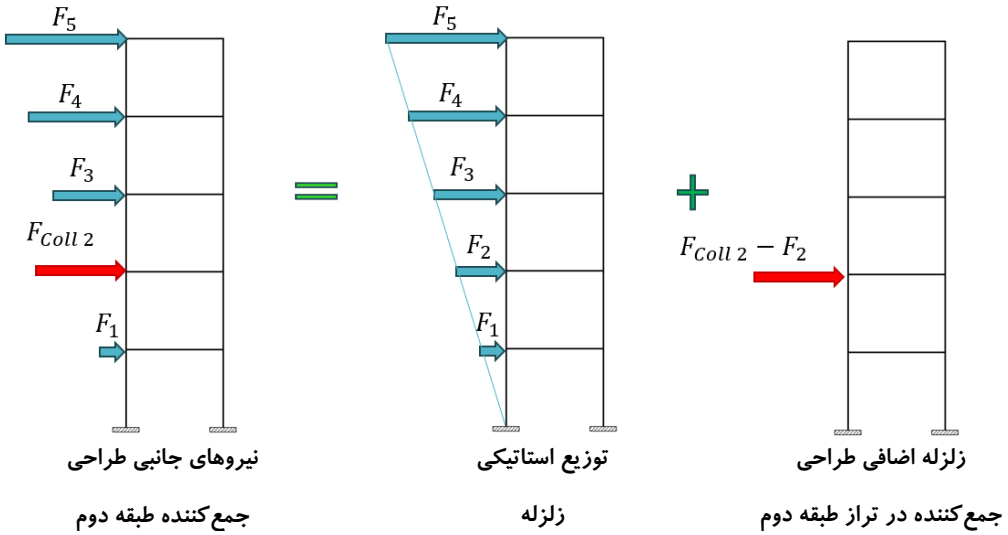
همچنین ضریب زلزله نیروی طراحی اضافی جمع‌کننده‌ها در تراز i ام $(C_{pi\ collector})$ می‌تواند مطابق رابطه زیر محاسبه گردد:

$$C_{pi\ collector} = \frac{F_{Coll\,i} - F_i}{W_i} \qquad (۵)$$

این دو ضریب زلزله به‌صورت جداگانه در *Load Pattern* به‌صورت *User Coefficient* تعریف می‌شوند. *Story Range* برای این نیرو از طبقه *i-1* تا i ام در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۸ اعمال و محاسبه نیروی طراحی جمع‌کننده در تراز سقف دوم نمایش داده شده است.



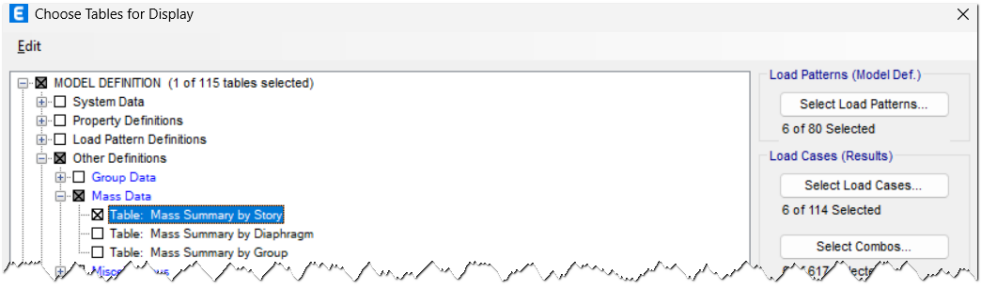
شکل ۷- نحوه اعمال نیروی طراحی دیافراگم در مدل سازه



شکل ۸- نحوه اعمال نیروی طراحی جمع‌کننده در مدل سازه

برای پیاده‌سازی روش پیشنهاد شده مراحل گام به گام زیر برای اعمال نیروی جانبی دیافراگم در نرم‌افزار *ETABS* پیشنهاد می‌شود:

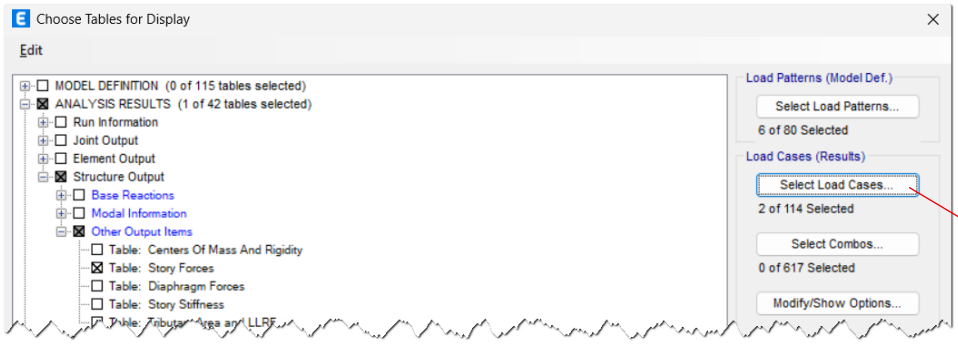
گام اول: از منوی *Model Definition>Other Definitions> Mass Data> Mass Summary by Story* جرم لرزه‌ای طبقات را استخراج نموده، با ضرب کردن جرم لرزه‌ای در شتاب جاذبه (g) وزن لرزه‌ای محاسبه می‌گردد. (شکل ۹)



شکل ۹- استخراج جرم لرزه‌ای طبقات

لازم به ذکر است با راهکار بالا، تنها وزن مؤثر لرزه‌ای در قسمت‌هایی که به سقف متصل هستند گزارش می‌شود. در صورتیکه اجزایی از سازه به دیافراگم طبقه متصل نباشند (مانند نیم طبقه)، می‌توان به عنوان یک راهکار جایگزین یک ترکیب بار مشابه با *Mass Source* تعریف کرده و سپس از منوی *Analysis Results>Other Output Items>Story Forces* و انتخاب این ترکیب بار، نیروی محوری موجود در *Bottom* هر طبقه را به عنوان وزن مؤثر لرزه‌ای در نظر گرفت.

گام دوم: از منوی *Analysis Results>Other Output Items>Story Forces* مطابق شکل ۱۰ برش طبقات تحت زلزله EX و EY استخراج می‌گردد. توضیح اینکه نیروی جانبی وارد بر هر طبقه (F_i) از کم کردن برش طبقات متوالی قابل محاسبه است ($F_i=V_i-V_{i+1}$).



EX و EY انتخاب گردد

شکل ۱۰- استخراج برش طبقات

گام سوم: به منظور سهولت کار، می‌توان از نرم‌افزار *Excel* برای محاسبه مقادیر $F_{Diaph\,i}$ و $F_{Coll\,i}$ استفاده نمود. همچنین مقادیر $(F_{pi})_{max}$ و $(F_{pi})_{min}$ بر اساس بند ۳ محاسبه می‌گردند.

با استفاده از داده‌های موجود، ضریب C_{pi} را می‌توان بر اساس رابطه ۴ برای طبقه مورد نظر (مثلاً طبقه چهارم) محاسبه کرد (جدول ۱). توضیح اینکه C_{pi} ضریب زلزله اضافی در تراز طبقه مورد نظر می‌باشد.

در خصوص جمع‌کننده‌ها نیز می‌توان ضریب $C_{pi\,collector}$ را بر اساس رابطه ۵ به طور مشابهی محاسبه کرد.

تعیین نیروی وارد بر دیافراگـــــــم

Story	Mi (ton-s²/m)	Fi (tonf)	Wi (ton)	∑Fi (tonf)	∑Wi (tonf)	Fpx (ton)	Fpx min.	Fpx max.	FDiaph i (ton)	FColl i (ton)	Cpi	Cpi Collector
10	71.8	182.498	704.5	182.5	704.5	182.5	131.5	262.9	182.5	456.2	0.000	0.389
9	79.4	176.777	778.5	359.3	1483.0	188.6	145.3	290.5	188.6	471.5	0.015	0.379
8	79.7	153.171	781.5	512.4	2264.5	176.9	145.8	291.7	176.9	442.1	0.030	0.370
7	81.0	131.786	794.6	644.2	3059.1	167.3	148.3	296.5	167.3	418.3	0.045	0.361
6	81.7	109.659	801.6	753.9	3860.7	156.5	149.6	299.2	156.5	391.3	0.058	0.351
5	82.5	88.146	809.3	842.0	4670.0	145.9	151.0	302.0	151.0	364.8	0.078	0.342
4	84.1	67.956	824.7	910.0	5494.7	136.6	153.9	307.8	153.9	341.4	0.104	0.332
3	85.0	47.939	833.5	957.9	6328.2	126.2	155.5	311.1	155.5	315.4	0.129	0.321
2	86.3	29.331	846.6	987.3	7174.8	116.5	158.0	315.9	158.0	291.2	0.152	0.309
1	130.6	18.664	1281.3	1005.9	8456.1	152.4	239.1	478.2	239.1	381.0	0.172	0.283

ضریب $C_{pi\ collector}$ برای تراز چهارم

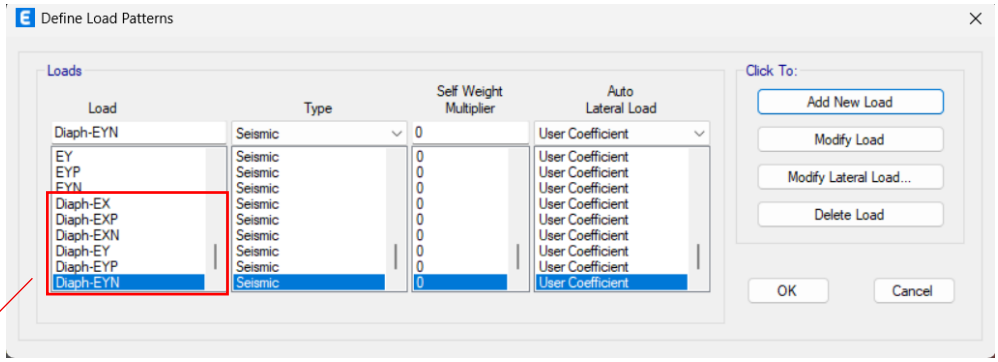
ضریب C_{pi} برای تراز چهارم

جدول ۱- نحوه محاسبه ضریب Cpi و Cpi Collector

گام چهارم: از منوی Define> Load Patterns می‌توان حالات بار مورد نیاز برای اعمال نیروی طراحی دیافراگم در نرم‌افزار را تعریف کرد. لازم به ذکر است برای در نظر گرفتن پیچش تصادفی حداقل شش حالت بار برای طراحی دیافراگم و شش حالت بار دیگر برای طراحی جمع‌کننده‌ها مطابق زیر باید تعریف شوند:

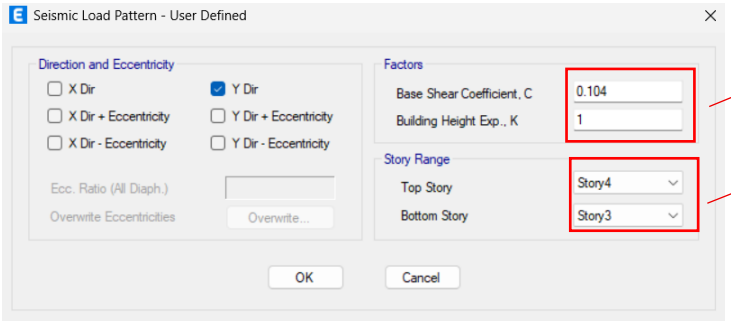
توضیحات	حالت بار تعریف شده در نرم‌افزار
زلزله اضافی راستای X برای طراحی دیافراگم	*Diaph-EX, Diaph-EXN, Diaph-EXP*
زلزله اضافی راستای Y برای طراحی دیافراگم	*Diaph-EY, Diaph-EYN, Diaph-EYP*
زلزله اضافی راستای X برای طراحی جمع‌کننده	*Coll-EX, Coll -EXN, Coll -EXP*
زلزله اضافی راستای Y برای طراحی جمع‌کننده	*Coll-EY, Coll -EYN, Coll -EYP*

در قسمت *Story Range* تنها طبقه‌ای که در نظر است دیافراگم آن طراحی شود، وارد می‌شود. (شکل ۱۱ و ۱۲)



حالات بار تعریف شده در راستای محور X و Y نرم‌افزار با اعمال پیچش تصادفی

شکل ۱۱- نحوه تعریف Load Pattern برای زلزله اضافی در تراز دیافراگم

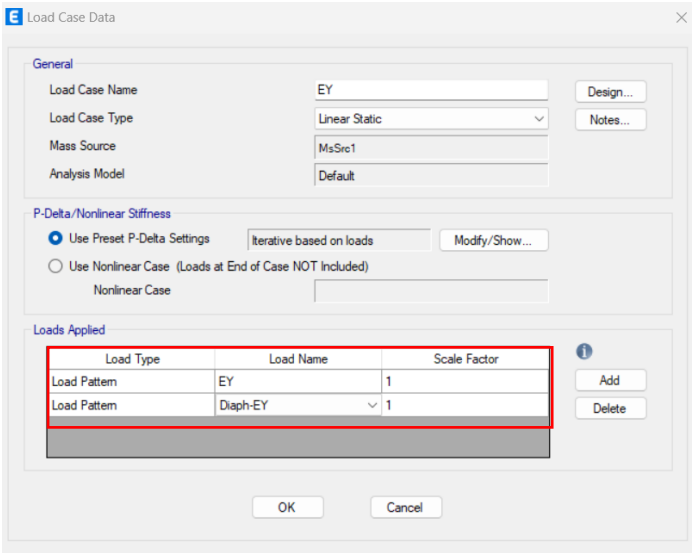


ضریب زلزله C_{p4}

محدوده اعمال نیروی اضافی زلزله طبقه چهارم

شکل ۱۲- تنظیمات Load Pattern برای زلزله اضافی در تراز دیافراگم

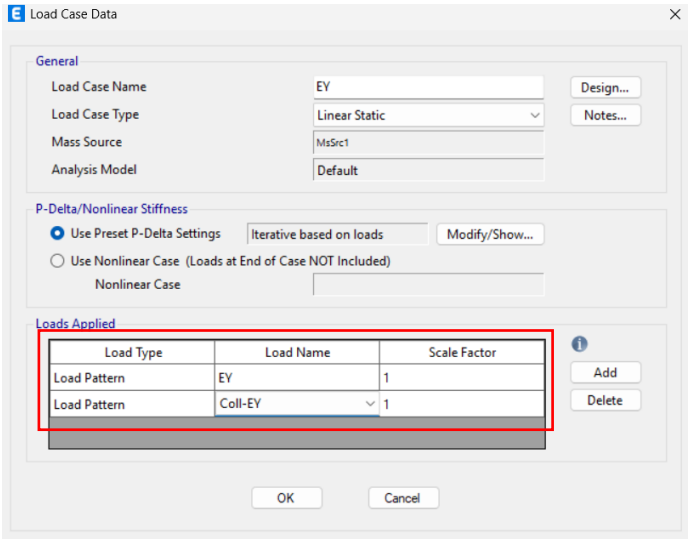
گام پنجم: تجمیع مقادیر زلزله‌های استاتیکی و زلزله اضافی محاسبه شده طراحی دیافراگم (*Diaph-EX, Diaph-EY* , ...) در بخش *Load Case* مطابق شکل ۱۳. لازم به ذکر است با جمع کردن این دو زلزله، نیروی $F_{Diaph\,i}$ در تراز دیافراگم i ام اعمال می‌شود (شکل ۷). با این تعریف می‌توان از ترکیبات بار طراحی سازه برای طراحی دیافراگم استفاده کرد.



شکل ۱۳- نحوه اضافه کردن زلزله اضافی طراحی دیافراگم در Load Case

گام ششم: طراحی برشی دیافراگم و طراحی یال‌های کششی و فشاری با ترکیبات بار استاتیکی طراحی سازه.

گام هفتم: تجمیع مقادیر زلزله‌های استاتیکی و زلزله اضافی محاسبه شده طراحی جمع‌کننده (*Coll-EX, Coll-EY, ...*) در بخش *Load Case* مطابق شکل ۱۴. لازم به ذکر است با جمع کردن این دو زلزله، نیروی $F_{coll\,i}$ در تراز دیافراگم i ام اعمال می‌شود(شکل ۸). با این تعریف می‌توان از ترکیبات بار طراحی سازه برای طراحی جمع‌کننده استفاده کرد.



شکل ۱۴- نحوه اضافه کردن زلزله اضافی طراحی جمع‌کننده در Load Case

گام هشتم: طراحی جمع‌کننده‌ها و اتصالات آن‌ها، با ترکیبات بار استاتیکی طراحی سازه.

۵- مدل‌سازی دیافراگم در نرم‌افزار

برای به‌دست‌آوردن نیروهای درون‌صفحه‌ای دیافراگم، لازم است مدل‌سازی آن در نرم‌افزار با استفاده از المان‌های Shell انجام شده و دیافراگم طبقه به صورت نیمه‌صلب (*Semi-Rigid*) تعریف شود.

در المان *Shell*، مؤلفه‌های f بیانگر سختی‌های درون‌صفحه‌ای بوده و در توزیع نیروهای داخل صفحه دیافراگم مؤثر هستند، در حالی‌که مؤلفه‌های m بیانگر رفتار خارج از صفحه بوده و سختی خمشی دیافراگم را در مدل‌سازی عددی در نظر می‌گیرند.

۵-۱ ضریب ترک‌خوردگی دیافراگم

سختی درون‌صفحه‌ای دیافراگم نه‌تنها بر مقدار نیروهای داخلی آن اثرگذار است، بلکه نقش مهمی در نحوه توزیع نیروهای جانبی بین عناصر قائم سیستم باربر لرزه‌ای نیز ایفا می‌کند. این موضوع به‌ویژه در شرایطی که سازه با تغییرات قابل‌توجه در جرم یا سختی عناصر عمودی مواجه باشد، از اهمیت بیشتری برخوردار است؛ از جمله در تراز پودیوم یا در طبقاتی که در آن‌ها عقب‌نشستگی در سیستم باربر جانبی (*Setback*) وجود دارد. در چنین مواردی، اعمال ضرایب کاهش سختی درون‌صفحه‌ای به دیافراگم می‌تواند تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر نحوه توزیع نیروهای جانبی میان المان‌های باربر لرزه‌ای داشته باشد.

بر اساس مطالعات و مراجع موجود، ضریب کاهش سختی درون‌صفحه‌ای برای دیافراگم‌های بتن‌آرمه معمولاً در بازه‌ای معادل ۰/۱۵ تا ۰/۵۰ برابر مقطع ترک‌نخورده قرار می‌گیرد [3]. در طبقه پودیوم، طبقات زیرین و نیز در ترازهای دارای *Setback*، نیروهای درون‌صفحه‌ای دیافراگم معمولاً نسبت به مقدار این ضریب حساسیت بیشتری دارند. از این‌رو توصیه می‌شود تحلیل و

طراحی دیافراگم و سیستم باربر جانبی با استفاده از هر دو کران پایین و بالای سختی درون‌صفحه‌ای انجام شود و پوش نتایج حاصل از هر دو تحلیل مبنای طراحی قرار گیرد. در این راستا، پیشنهاد می‌شود برای کران پایین سختی، ضریب ترک‌خوردگی ۰/۱۵ به مؤلفه‌های f_{11}، f_{22} و f_{12} اعمال شود. همچنین برای کران بالای سختی، می‌توان ضریب ترک‌خوردگی ۰/۵۰ را به همین مؤلفه‌ها اختصاص داد. در مقابل، دیافراگم‌های سایر طبقات معمولاً حساسیت کمتری به مقدار ضریب ترک‌خوردگی دارند؛ از این‌رو برای این دیافراگم‌ها می‌توان ضریب ۰/۵۰ را به مؤلفه‌های f_{11}، f_{22} و f_{12} اعمال کرد و عموماً نیازی به انجام تحلیل حساسیت در آن‌ها وجود نخواهد داشت. لازم به ذکر است در دال‌های پیش تنیده با توجه به وجود نیروی محوری فشاری در دیافراگم، می‌توان از ضرایب ۰/۳۵ برای کران پایین ترک‌خوردگی و ۰/۸ برای کران بالا استفاده کرد.

در مواردی که دال سقف در باربری سیستم قائم جانبی مشارکت داشته باشد، ضرایب کاهش سختیِ مربوط به خمش خارج از صفحه دیافراگم (شامل مؤلفه‌های m_{11}، m_{22}و m_{12}) می‌تواند برابر با ۰/۲۵ اعمال گردد.

در مقابل، در مواردی که دال سقف در باربری سیستم قائم جانبی مشارکت نداشته باشد، نیازی به مشارکت آن در تحمل تلاش‌های خارج از صفحه ناشی از بارهای جانبی وجود ندارد. در این حالت، برای مدل‌سازی دقیق‌تر می‌توان با استفاده از قابلیت تحلیل مراحل ساخت (Staged Construction) در نرم‌افزار *ETABS*، ضرایب اصلاح سختی خمشی خارج از صفحه (m) را برای بارهای ثقلی برابر با ۰/۲۵ و برای بارهای جانبی برابر با ۰/۰۱ (در حد صفر جهت عدم جذب نیرو) در نظر گرفت.

به عنوان یک راهکار جایگزین و محافظه‌کارانه (بدون استفاده از تحلیل مراحل ساخت)، می‌توان ضریب کاهش سختی خمش خارج از صفحه دیافراگم را در تمامی حالت‌های بارگذاری برابر با ۰/۲۵ فرض نمود. هرچند این فرض منجر به ایجاد تلاش‌های خارج از صفحه بالاتری در دال می‌شود، اما از نظر کلیات محاسباتی، رویکردی محافظه‌کارانه و قابل‌قبول می‌باشد.

۵-۲ ابعاد مش‌بندی در مدل‌سازی دیافراگم

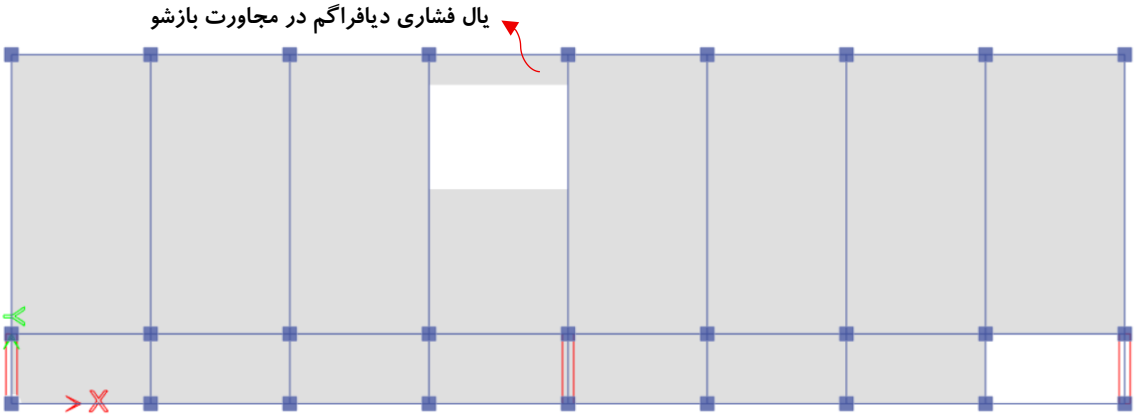
جهت شبیه‌سازی صحیح رفتار دیافراگم، توصیه می‌شود ابعاد مش‌بندی کف‌ها حداکثر در حدود یک‌دهم طول دهانه یا طول دیوار در نظر گرفته شود[3] . همچنین هندسه‌ی مش‌بندی باید به‌گونه‌ای تنظیم گردد که نسبت ابعاد اعضای مش رعایت شده و بعد بزرگ‌تر هر قطعه، حداکثر دو برابر بعد کوچکتر آن باشد. علاوه بر این، پیشنهاد می‌شود جهت کاهش وابستگی و حساسیت نتایج آنالیز به ابعاد مش‌بندی، بیشینه بعد مش‌بندی به ۵۰ سانتی‌متر محدود گردد.

۶- طراحی دیافراگم

مطابق بند ۱-۴-۱۴ آیین‌نامه بتن ایران، دیافراگم‌ها باید بر اساس ترکیبات بار طراحی با در نظر گرفتن اثر همزمان نیروهای خارج از صفحه و نیروهای درون‌صفحه‌ای (ناشی از عملکرد دیافراگمی) طراحی شوند.

۶-۱ طراحی یال‌های فشاری دیافراگم

کنترل یال‌های فشاری دیافراگم در شرایطی که این یال‌ها در مجاورت بازشو قرار داشته باشند (شکل ۱۵) و تحت تأثیر نیروهای فشاری قابل‌توجه قرار گیرند، ضروری است. در چنین حالتی، لازم است این یال‌ها مشابه اعضای جمع‌کننده (*Collector*) مورد ارزیابی قرار گرفته و کنترل‌های لازم در آن‌ها انجام گردد. در مقابل، در صورت عدم وجود بازشو و نبود تمرکز تنش یا نیروی قابل‌ملاحظه در یال فشاری، انجام کنترل ویژه‌ای برای یال فشاری دیافراگم الزامی نخواهد بود.



شکل ۱۵- یال دیافراگم در مجاورت بازشو

در کنترل نیروهای محوری در دیافراگم معمولاً از نیروی در واحد طول دال (F) استفاده می‌شود. در این روش، نیروی محوری در واحد طول با ظرفیت‌های فشاری و کششی دیافراگم مقایسه می‌گردد. در نرم‌افزار $ETABS$ نیز تنش‌های فشاری با علامت منفی و تنش‌های کششی با علامت مثبت نمایش داده می‌شوند.

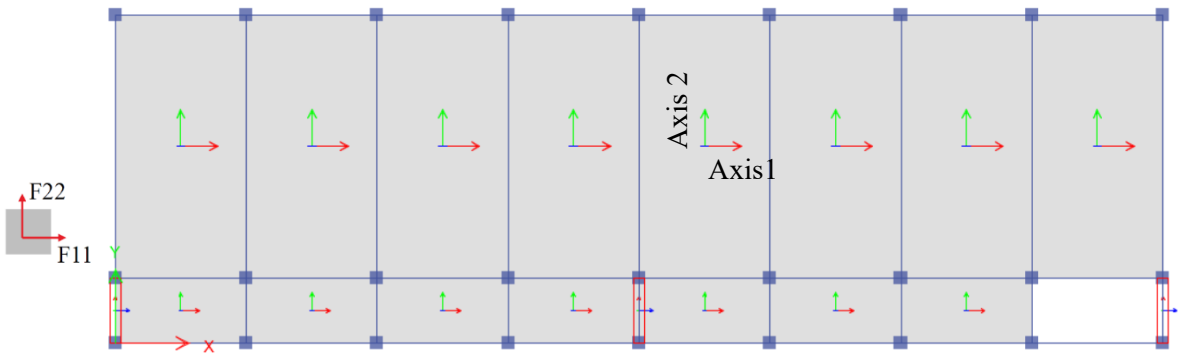
چنانچه نیروی محوری فشاری در واحد طول در یال فشاری مجاور با بازشو بیشتر از $0.2f'_c \times ts$ تحت زلزله تشدیدنشده یا بیشتر از $0.5f'_c \times ts$ تحت زلزله تشدیدیافته باشد لازم است در یال فشاری مجاور بازشو المان مرزی مطابق ضوابط بند ۲۰-۵-۷-۸ آیین‌نامه بتن ایران تعبیه گردد. در این رابطه، t_s بیانگر ضخامت دال بتنی است [10, 9, 8].

به عنوان مثال برای یک دال توپر با ضخامت 20cm و $f'_c = 250 \frac{kgf}{cm^2}$ می‌توان حد مجاز نیرو در واحد طول فشاری (منفی) را به‌صورت زیر محاسبه کرد:

$$-0.2f'_c \times ts = -0.2 \times 250 \times 20 = -1000 \frac{kgf}{cm}$$

برای مشاهده نیروهای موجود در دیافراگم، لازم است مؤلفه‌های نیرو در راستای محورهای محلی (Local Axis) المان‌های کف مورد بررسی قرار گیرد. در نرم‌افزار $ETABS$، محور قرمز رنگ بیانگر راستای محلی ۱ و محور سبز رنگ بیانگر راستای محلی ۲ برای المان $Shell$ است.

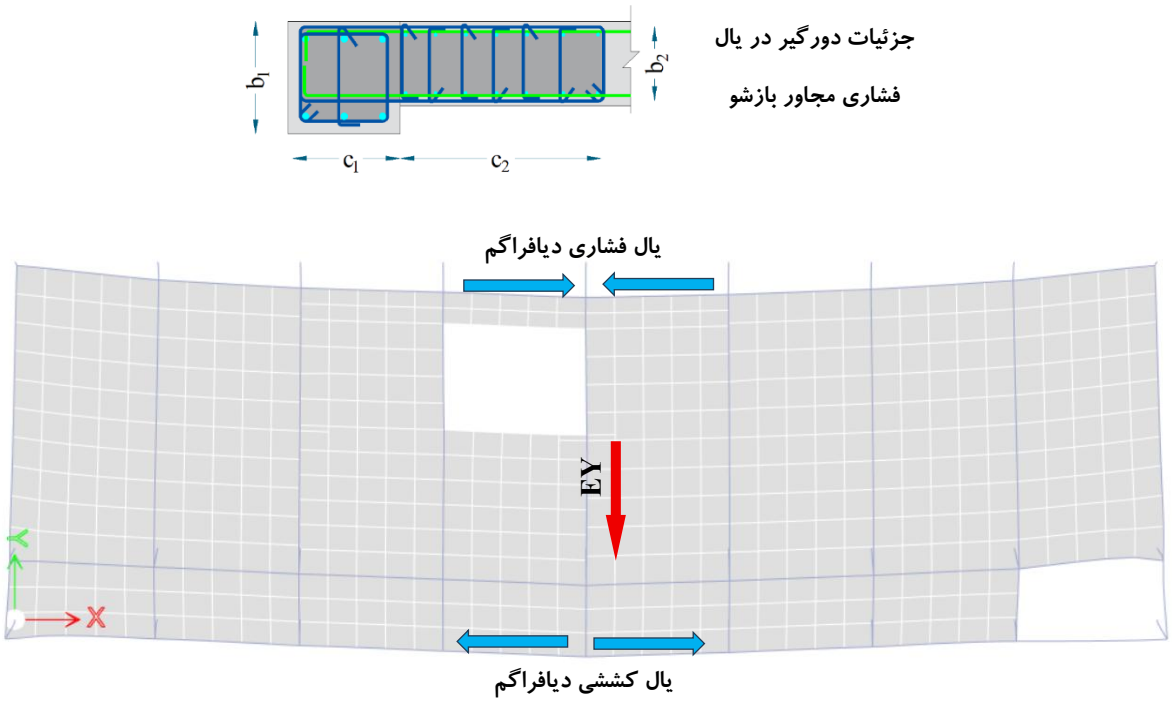
به عنوان نمونه، در شکل ۱۶ راستای این محورها برای دیافراگم، بدون اعمال چرخش در دستگاه محورهای محلی، نمایش داده شده است. در خروجی نرم‌افزار، مؤلفه نیروی هم‌راستا با محور محلی ۱ با نماد F_{11} و مؤلفه نیروی هم‌راستا با محور محلی ۲ با نماد F_{22} گزارش می‌شود.



شکل ۱۶- راستای محورهای محلی در دیافراگم

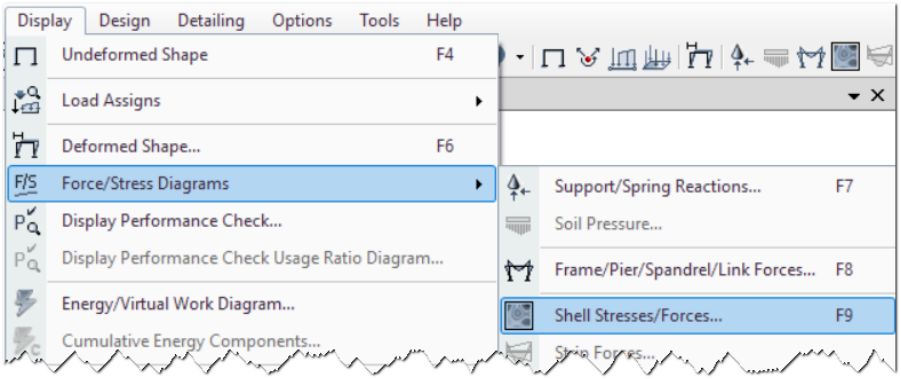
بنابراین در صورتیکه طراحی دیافراگم برای زلزله راستای Y مدنظر باشد($100\%\ E_Y+30\%\ E_X$)، با توجه به جهت محورهای محلی المان، باید مؤلفه F_{11} مورد بررسی و طراحی قرار گیرد. به طور مشابه، اگر طراحی برای زلزله در راستای X مدنظر باشد ($100\%\ E_X+30\%\ E_Y$)، در این صورت مؤلفه F_{22} ملاک کنترل و طراحی خواهد بود.

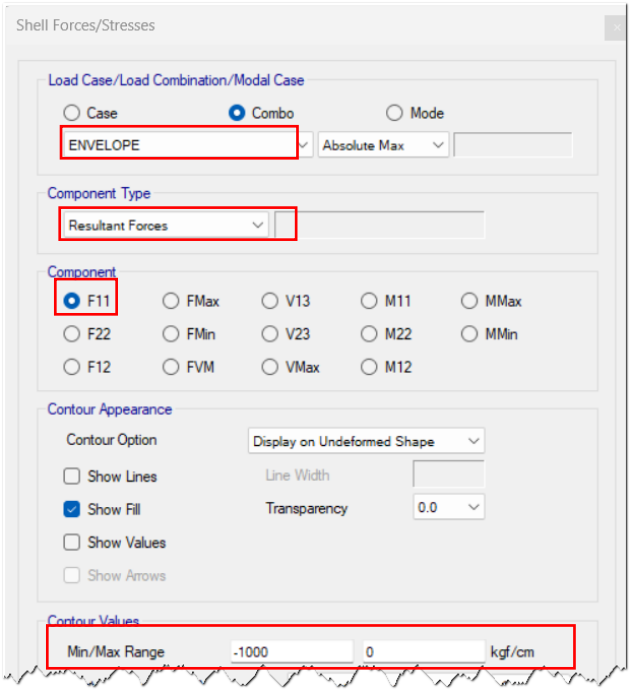
در مثال حاضر، ترکیب بار انتخاب‌شده شامل زلزله غالب در راستای محور Y است که منجر به تغییرشکل دیافراگم مطابق شکل ۱۷ شده است.



شکل ۱۷- تغییرشکل دیافراگم تحت ترکیب بار با زلزله EY-

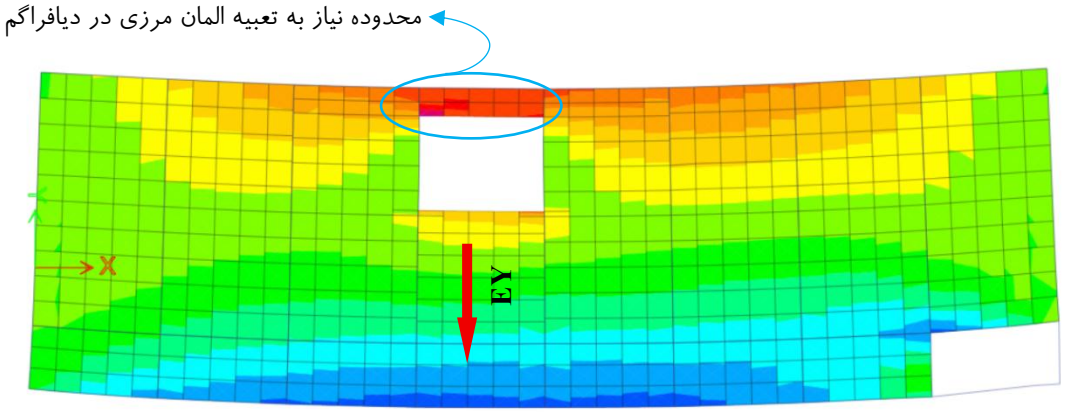
برای کنترل یال‌ها، لازم است در نرم‌افزار *ETABS* از منوی *Display* و مطابق شکل ۱۸، محدوده حداقل و حداکثر نیروی محوری در واحد طول دیافراگم را مشخص کرد:





شکل ۱۸- تنظیم نرم‌افزار برای نمایش نیروی محوری در واحد طول در دیافراگم

نیروی محوری فشاری در واحد طول و محدوده‌ای که نیرو از حد مجاز بیشتر شده است در شکل ۱۹ نمایش داده شده است، در نواحی‌ای از یال فشاری که نیروی فشاری در واحد طول بیشتر از $0.2f_c' \times ts$ تحت زلزله تشدیدنشده باشد، لازم است المان مرزی در دیافراگم تعبیه گردد.



شکل ۱۹- نیروی محوری در واحد طول F_{11} در دیافراگم

۶-۲ طراحی یال‌های کششی دیافراگم

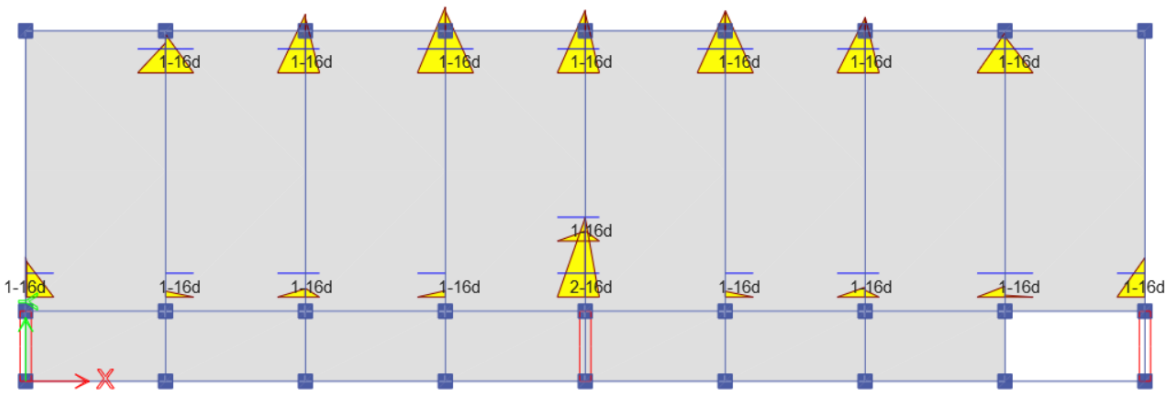
با ترسیم نوارهای طراحی (*Design Strip*) بر روی دال، الگوریتم طراحی در نرم‌افزارهای *ETABS* و *SAFE* قادر است اثر همزمان اندرکنش نیروهای درون‌صفحه‌ای و خارج از صفحه را در نظر بگیرد. بنابراین، با ترسیم نوارهای طراحی بر روی دیافراگم و اعمال نیروی طراحی دیافراگم $(F_{Diaph\,i})$ در تراز مورد نظر و طراحی دال در نرم‌افزار تحت کلیه ترکیبات بارگذاری ثقلی و

لرزه‌ای (بارهای طراحی سازه)، آرماتورهای طولی شبکه بالا و پایین گزارش‌شده توسط نرم‌افزار پاسخگوی اثر اندرکنش همزمان نیروهای خارج از صفحه و نیروهای درون‌صفحه‌ای ناشی از رفتار دیافراگمی خواهند بود.

به بیان دیگر، در این حالت نیازی به افزودن آرماتور اضافی برای تأمین مقاومت درون‌صفحه‌ای دیافراگم از طریق محاسبات دستی وجود ندارد.

شایان ذکر است که برای طراحی تلاش‌های خارج از صفحه دیافراگم، کافی است تلاش‌ها بر اساس نیروی جانبی طبقه (F_i) محاسبه شوند. این در حالی است که در این روش نیروی $(F_{Diaph\,i})$ به دیافراگم تراز مورد نظر وارد می‌شود که معمولاً اندکی بزرگ‌تر از نیروی جانبی طبقه (F_i)است؛ از این‌رو طراحی خارج از صفحه دیافراگم بر مبنای $F_{Diaph\,i}$ اندکی محافظه‌کارانه خواهد بود.

به عنوان مثال، در پلان موردی بند قبل، آرماتورهای طولی تقویتی طراحی‌شده توسط نرم‌افزار مطابق شکل ۲۰ گزارش شده‌اند. این آرماتورها توسط نرم‌افزار به‌گونه‌ای تعیین شده‌اند که تحمل همزمان تلاش‌های خارج از صفحه (به‌صورت آرماتورهای خمشی) و نیروهای درون‌صفحه‌ای ناشی از رفتار دیافراگمی (یال‌های کششی) را تأمین کنند.



شکل ۲۰- نتایج آرماتورهای طولی تقویتی شبکه بالا دیافراگم در راستای X

۳-۶ طراحی برشی دیافراگم

در الگوریتم طراحی دال در نرم‌افزار (*Concrete Slab Design*)، در صورتی که نوارهای طراحی (*Design Strip*) بر روی دال ترسیم شده باشد، نرم‌افزار تنش‌های برشی موجود در دال را بر اساس تئوری *Wood–Armer* به تنش‌های کششی معادل تبدیل کرده و طراحی دال را برای مجموع این تنش‌ها انجام می‌دهد. به عبارت دیگر طراحی نرم‌افزار همواره برای $F_{11} + |F_{12}|$ و $F_{22} + |F_{12}|$ انجام می‌شود. در نتیجه، آرماتورهای طولی گزارش شده توسط نرم‌افزار برای مجموع نیروهای درون‌صفحه‌ای و خارج از صفحه‌ای گزارش می‌شود.

شایان ذکر است که در طراحی برش درون‌صفحه‌ای دال، نرم‌افزار از ظرفیت برشی بتن دال صرف‌نظر کرده و فرض می‌کند که کل برش باید توسط آرماتورهای طولی تحمل شود. همچنین نرم‌افزار آرماتور برشی محاسبه‌شده را در هر دو راستای متعامد توزیع می‌کند. از این‌رو می‌توان گفت آرماتورهای طولی گزارش‌شده توسط نرم‌افزار برای تحمل برش در بسیاری از موارد قابل قبول و حتی محافظه‌کارانه هستند.

ضریب کاهش مقاومت برشی (ϕ_v) در طراحی دیافراگم‌ها باید معادل ضریب کاهش مقاومت برشی سیستم باربر جانبی سازه در نظر گرفته شود. لذا مقدار این ضریب برای کنترل برش در دیافراگم در سازه‌های با سیستم باربر جانبی قاب خمشی متوسط و ویژه و نیز در دیوارهای برشی بلند $\phi_v = 0.75$ و در سازه‌های دارای دیوارهای برشی کوتاه (مانند تراز پودیوم متصل به دیوارهای حائل) $\phi_v = 0.6$ در نظر گرفته می‌شود [8, 9].

در دیافراگم‌هایی با ضریب کاهش مقاومت برشی $\phi_v = 0.75$ آرماتورهای طولی گزارش‌شده توسط نرم‌افزار برای کنترل برش عموماً محافظه‌کارانه و در جهت اطمینان خواهند بود و نیازی به اضافه کردن آرماتور ناشی از برش درون صفحه در دیافراگم وجود ندارد. اما در دیافراگم‌هایی با $\phi_v = 0.6$، چنانچه برش موردنیاز دیافراگم از مقدار۰/۷۶۵ برش حداکثر مجاز بیشتر نشود، نتایج آرماتورهای برشی همچنان محافظه‌کارانه باقی می‌ماند. اما اگر برش موردنیاز دیافراگم از مقدار۰/۷۶۵ برش حداکثر مجاز بیشتر شود، آرماتورهای طولی گزارش‌شده توسط نرم‌افزار ممکن است تا حدود ۸ درصد کمتر از مقدار موردنیاز واقعی باشند؛ در این حالت توصیه می‌شود کنترل برش به‌صورت دستی انجام شده و آرماتورهای برشی لازم محاسبه و در صورت نیاز به آرماتورهای طولی گزارش شده نرم‌افزار اضافه گردد.

نرم‌افزار کنترل حد نهایی برش ایجادشده در دیافراگم را انجام نمی‌دهد. بنابراین لازم است این کنترل به‌صورت جداگانه و بدون توجه به آرماتورهای طولی گزارش شده توسط نرم‌افزار انجام گیرد تا اطمینان حاصل شود که برش ایجادشده در دیافراگم از حداکثر ظرفیت نهایی آن تجاوز نمی‌کند. بر اساس ضوابط آیین‌نامه بتن ایران و مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، حد نهایی مقاومت برشی دیافراگم باید مطابق رابطه زیر کنترل شود [8, 9]:

$$V_{u,\max} \le 0.66\,\phi_v\,A_{cv}\sqrt{f'_c} \qquad (۶)$$

در این رابطه، A_{cv} (سطح مقطع ناخالص بتن برشی دیافراگم) می‌باشد و وابسته به نوع سقف است. مقدار A_{cv} برای انواع دیافراگم‌ها به شرح زیر تعیین می‌شود:

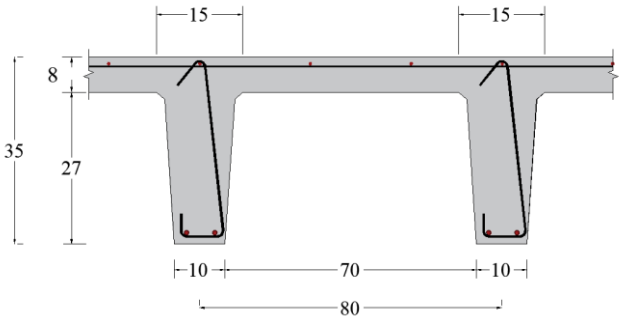
- دال‌های توپر: A_{cv} برابر با سطح مقطع کل دال در نظر گرفته می‌شود.
- سقف‌های تیرچه‌ای و دال‌های مشبک (تک‌پوش) یک‌طرفه: در این سقف‌ها A_{cv} به راستای برش وابسته است؛ به‌صورت محافظه کارانه می‌توان مقدار A_{cv} در هر دو راستا را برابر با سطح مقطع دال رویه در نظر گرفت.
- دال‌های مشبک (تک‌پوش) دوطرفه: A_{cv} برابر با مجموع سطح مقطع دال رویه و سطح جان تیرچه‌ها در راستای برش مورد نظر لحاظ می‌شود.
- سقف‌های مجوف (دوپوش): A_{cv} برابر با مساحت کل مقطع دال منهای سطح حفره‌های خالی از آن در نظر گرفته می‌شود.

لازم به ذکر است در دال‌های مشبک (تک‌پوش) و مجوف (دوپوش)، می‌توان یک ضخامت معادل (t_{eq}) جهت محاسبه و کنترل نیروی برشی در واحد طول دیافراگم (F_{12}) تعیین نمود. به عنوان مثال، برای یک دال مشبک با فواصل محور به محور ۸۰ سانتی‌متر و عرض متوسط جان ۱۲.۵ سانتی‌متر (مشابه شکل ۲۱)، مساحت خالص بتن در عرض ۸۰ سانتی‌متر برابر است با:

$$A_{cv} = 80 \times 35 - \left(80 - \left(\frac{15+10}{2}\right)\right) \times 27 = 977.5\ cm^2$$

و در نهایت ضخامت معادل این دال مشبک برای کنترل برش دیافراگم برابر است با:

$$t_{eq} = \frac{A_{cv}}{S} = \frac{977.5}{80} = 12.21\ cm$$



شکل ۲۱-ابعاد هندسی مقطع دال مشبک در تعیین ضخامت معادل و کنترل F_{12}

در صورتیکه در دیافراگم مورد نظر مقدار $\phi_v = 0.75$ باشد، حد نهایی برش قابل قبول برای نیروی برشی در واحد طول دیافراگم (F_{12}) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F_{12} \leq 0.66 \times \emptyset_v \times t_{eq} \times \sqrt{f_c'} = 0.66 \times 0.75 \times 122.1 \times \sqrt{25} = 302.1 \frac{N}{mm} \approx 308.1 \frac{kgf}{cm}$$

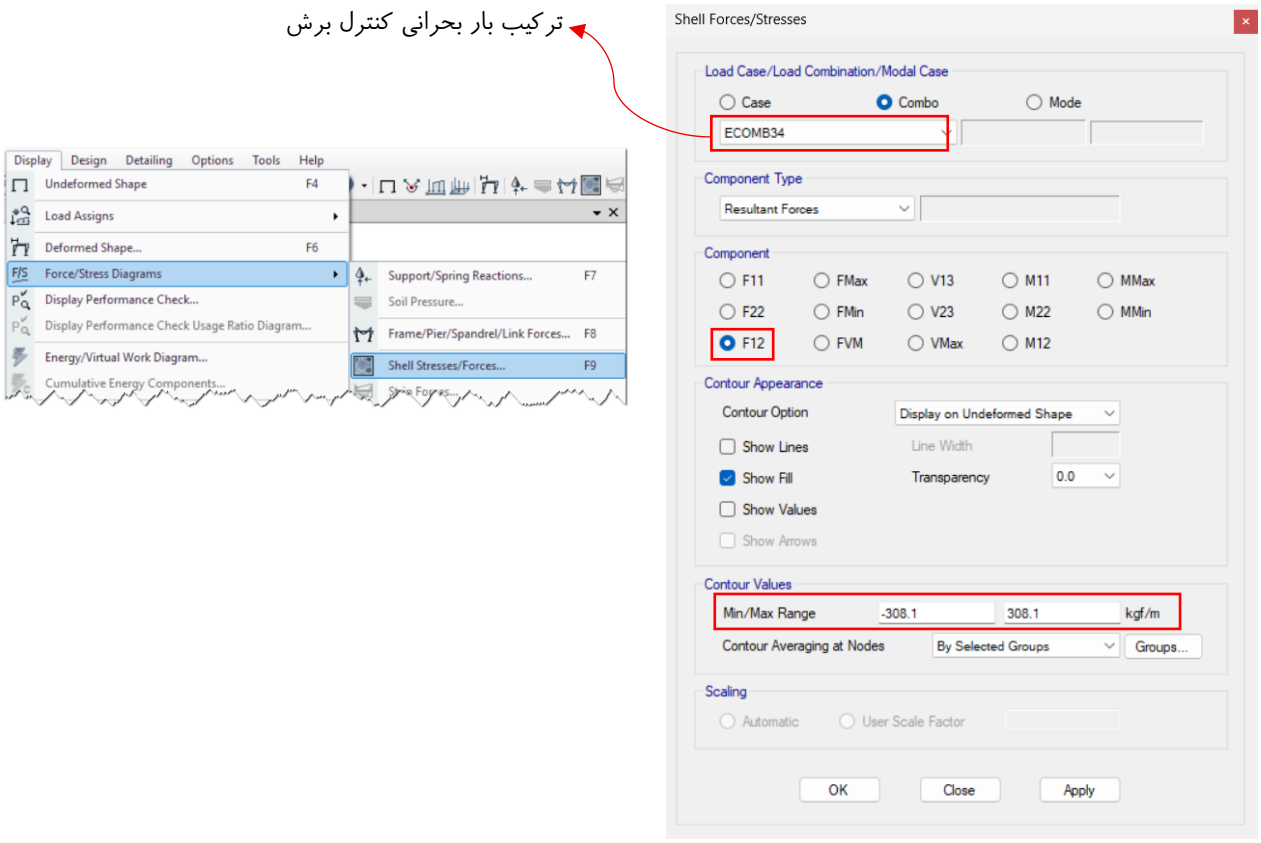
این مقدار باید با F_{12} حداکثر گزارش شده توسط نرم‌افزار تحت ترکیب بار بحرانی مقایسه شود تا اطمینان حاصل گردد که برش از حد مجاز تجاوز نمی‌کند.

برای کنترل برش در دیافراگم، می‌توان از منوی *Display* در نرم‌افزار (مطابق شکل ۲۲) استفاده کرد و محدوده نیروی برشی در واحد طول دال را مشاهده نمود. در این بخش، با انتخاب مؤلفه F_{12} (برش درون‌صفحه‌ای دیافراگم) و وارد کردن حداقل و حداکثر نیروی برشی در واحد طول، می‌توان دیاگرام توزیع برش در دیافراگم را مشاهده و نواحی‌ای از دیافراگم که مقدار نیروی برشی در آن‌ها از حد مجاز فراتر رفته است را مشخص کرد.

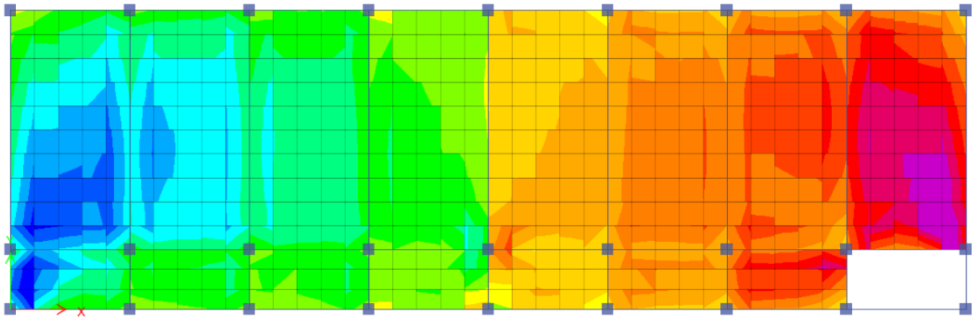
لازم به ذکر است که مشاهده نیروی برشی در واحد طول تحت پوش ترکیب‌بارها (*Envelope*) نیز در نرم‌افزار امکان‌پذیر است. با این حال، ممکن است در برخی ترکیب‌بارها نیروی برشی به‌صورت موضعی و تنها در چند المان محدود از مقدار مجاز فراتر رود. در حالت پوش ترکیب‌بارها، تنها بیشینه این مقادیر نمایش داده می‌شود و این موضوع می‌تواند در قضاوت مهندسی برای پذیرش یا رد ظرفیت برشی دیافراگم اثرگذار باشد. از این‌رو، برای بررسی دقیق‌تر و ارزیابی صحیح وضعیت برش در دیافراگم، توصیه می‌شود نیروی برشی در واحد طول برای ترکیب‌بارهای بحرانی به‌صورت جداگانه مورد بررسی و کنترل قرار گیرد.

نیروی برشی در واحد طول و ناحیه‌هایی که مقدار آن از حد مجاز فراتر رفته است، در شکل ۲۳ نمایش داده شده‌اند. لازم به ذکر است در محدوده‌هایی که برش از حد نهایی فراتر رفته است، لازم است ضخامت دیافراگم افزایش یابد یا از بتن با مقاومت فشاری بیشتر استفاده شود تا ظرفیت برشی موردنیاز تأمین گردد.

همچنین با توجه به اینکه در ترازهای پودیوم و طبقات زیر دیوارهای حائل، دیافراگم سقف ممکن است تحت اثر فشار جانبی خاک قرار گرفته و نیروهای محوری فشاری قابل‌توجهی در آن ایجاد گردد، توصیه می‌شود دیافراگم در دو حالت یک بار با اعمال اثر فشار جانبی خاک و بار دیگر بدون فشار خاک طراحی گردد و آرماتورگذاری نهایی دیافراگم بر اساس پوش حداکثر آرماتورهای به‌دست‌آمده از هر دو تحلیل تعیین گردد.



شکل ۲۲- تنظیمات نرم‌افزار برای نمایش دیاگرام نیروی برشی در واحد طول در دیافراگم



شکل ۲۳- دیاگرام نیروی برشی در واحد طول دیافراگم

۴-۶ طراحی جمع‌کننده‌ها

مطابق مطالب ارائه‌شده، جمع‌کننده‌ها و اتصالات آن‌ها باید برای نیروی تعریف‌شده در بند ۳ طراحی شوند. در سازه‌های دارای تیر، در اغلب موارد تیرها به‌طور هم‌زمان نقش جمع‌کننده را نیز ایفا می‌کنند؛ ازاین‌رو در مدل سازه می‌توان با بررسی نیروی محوری ایجادشده در تیرها، طراحی جمع‌کننده را انجام داد.

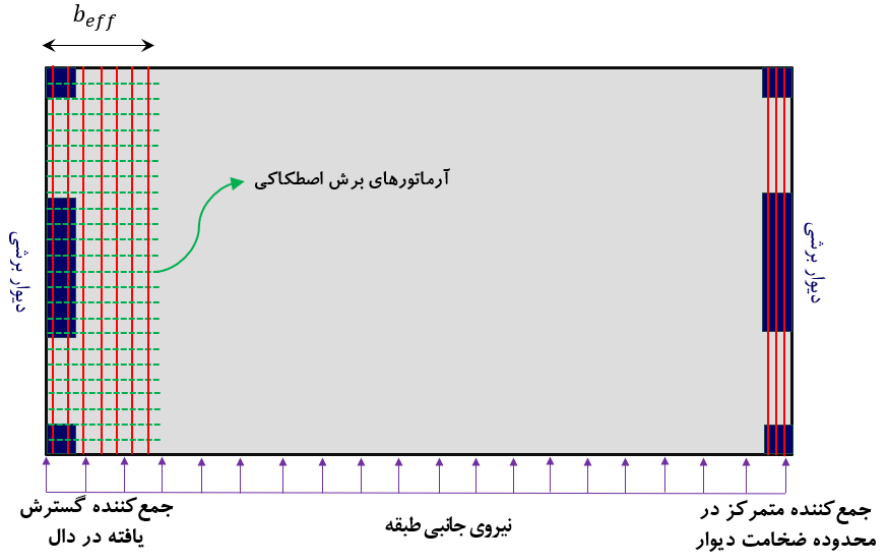
آرماتورهای موردنیاز جمع‌کننده باید به آرماتورهای طولی تیر افزوده شوند. توصیه می‌شود این آرماتورها در محدوده یک‌سوم میانی گونه تیر قرار گیرند تا اثر آن‌ها بر رفتار خمشی تیر، برش چشمه اتصال، رعایت ضابطه تیر ضعیف–ستون قوی و سایر ملاحظات طراحی، به حداقل برسد.

جمع‌کننده‌ها ممکن است در تمام طول تیر امتداد یابند و یا تنها در بخشی از آن در نظر گرفته شوند. آرماتور جمع‌کننده لزوماً در تمام طول جمع‌کننده امتداد نمی‌یابد و می‌تواند از محلی که بر اساس محاسبات دیگر به آن نیازی نیست، حداقل به اندازه طول مهاری l_d ادامه داده شود. با توجه به دشواری تعیین دقیق بخشی از طول عضو که از آن به بعد دیگر نیازی به آرماتور جمع‌کننده وجود ندارد، توصیه می‌شود در صورت نبود محاسبات دقیق، آرماتورهای جمع‌کننده در تمام طول عضو و نیز در ناحیه تکیه‌گاهی، از جمله روی دیوار، به‌صورت پیوسته ادامه داده شوند. همچنین در صورتی که آرماتور جمع‌کننده به انتهای عضو ختم شود، لازم است این آرماتور با استفاده از قلاب استاندارد در عضو انتهایی به‌طور مناسب مهار شود.

آرماتورهای جمع‌کننده می‌توانند در داخل عرض عضو قائم (نظیر دیوار برشی یا ستون) قرار گیرند. در این وضعیت، کل نیروی کششی و فشاری جمع‌کننده در محل مرز اتصال، مستقیماً به عضو قائم منتقل می‌شود. بنابراین، تنها مؤلفه برش دیافراگم در امتداد طول عضو قائم باید از طریق مکانیزم اصطکاک برشی (Shear Friction) انتقال یابد.

در حالت دیگر، عرض جمع‌کننده از عرض عضو قائم بیشتر است؛ به‌طوری‌که تنها بخشی از نیروی محوری جمع‌کننده مستقیماً به ناحیه مرزی عضو قائم وارد شده و بخش باقیمانده نیرو باید از طریق مکانیزم اصطکاک برشی به وجه جانبی عضو قائم منتقل گردد (شکل ۲۴). لازم به ذکر است در این حالت طراحی آرماتورهای برش اصطکاکی در این ناحیه، باید برای نیروی برشی تشدیدیافته انجام شود.

انجمن مهندسان سازه کالیفرنیا [11] پیشنهاد می‌کند که عرض مؤثر (b_{eff}) برای جمع‌کننده نباید از مجموع عرض عضو قائم باربر جانبی به‌علاوه نصف طول تماس بین دیافراگم و عضو قائم تجاوز کند.



شکل ۲۴- جمع‌کننده گسترش یافته در دال و یا متمرکز در عرض دیوار

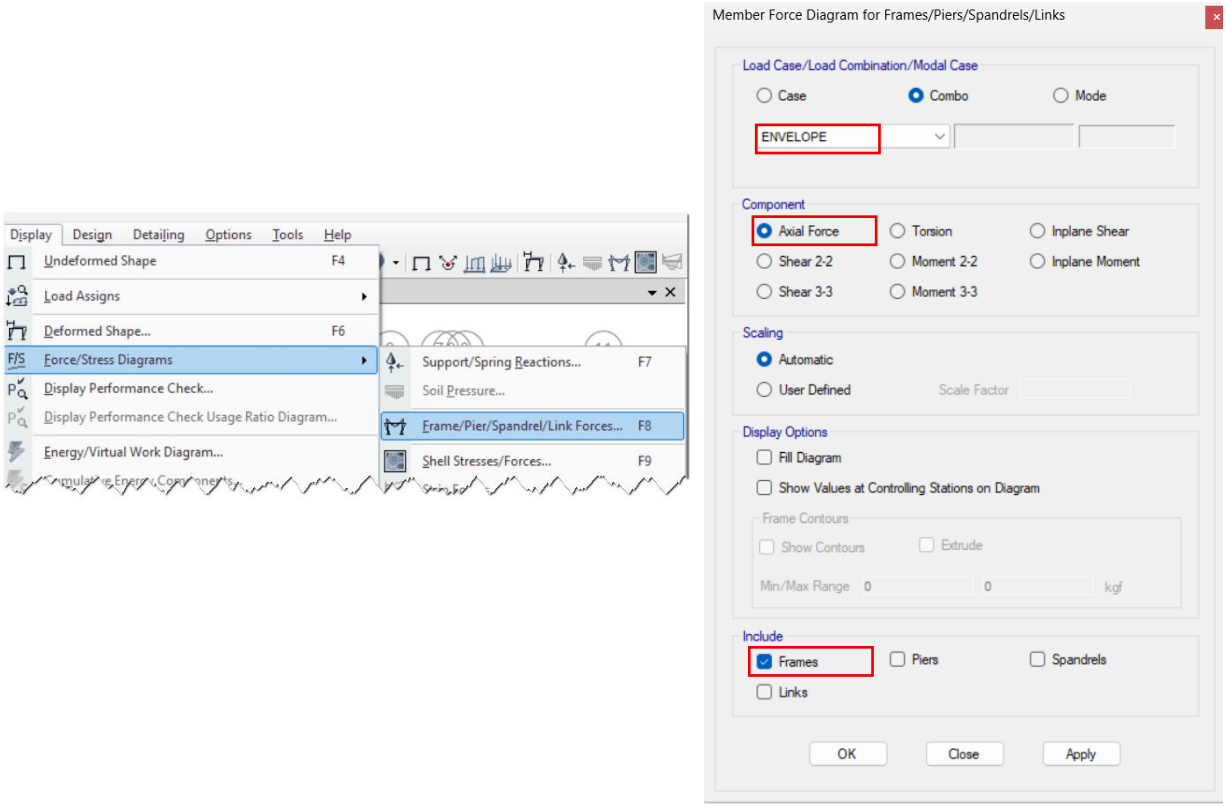
در صورتی که جمع‌کننده تحت فشار قرار گیرد، بر اساس آیین‌نامه بتن ایران و مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، الزامات آرماتورگذاری عرضی به شرح زیر است:

چنانچه تنش محوری فشاری در جمع‌کننده تحت اثر ترکیب‌بارهای شامل زلزله تشدیدیافته (Ω_0) از $0.5f_c'$ فراتر رود (و یا در صورت استفاده از زلزله تشدیدنشده، از $0.2f_c'$ بیشتر شود)، تعبیه آرماتورهای عرضی (دورگیر) با رعایت ضوابط بند ۲۰-۸-۷-۵ آیین‌نامه بتن ایران الزامی است.

این آرماتورهای عرضی باید تا مقطعی ادامه یابند که تنش فشاری تحت زلزله تشدیدیافته به کمتر از $0.4f_c'$ (و یا تحت زلزله تشدیدنشده به کمتر از $0.15f_c'$) کاهش یابد.

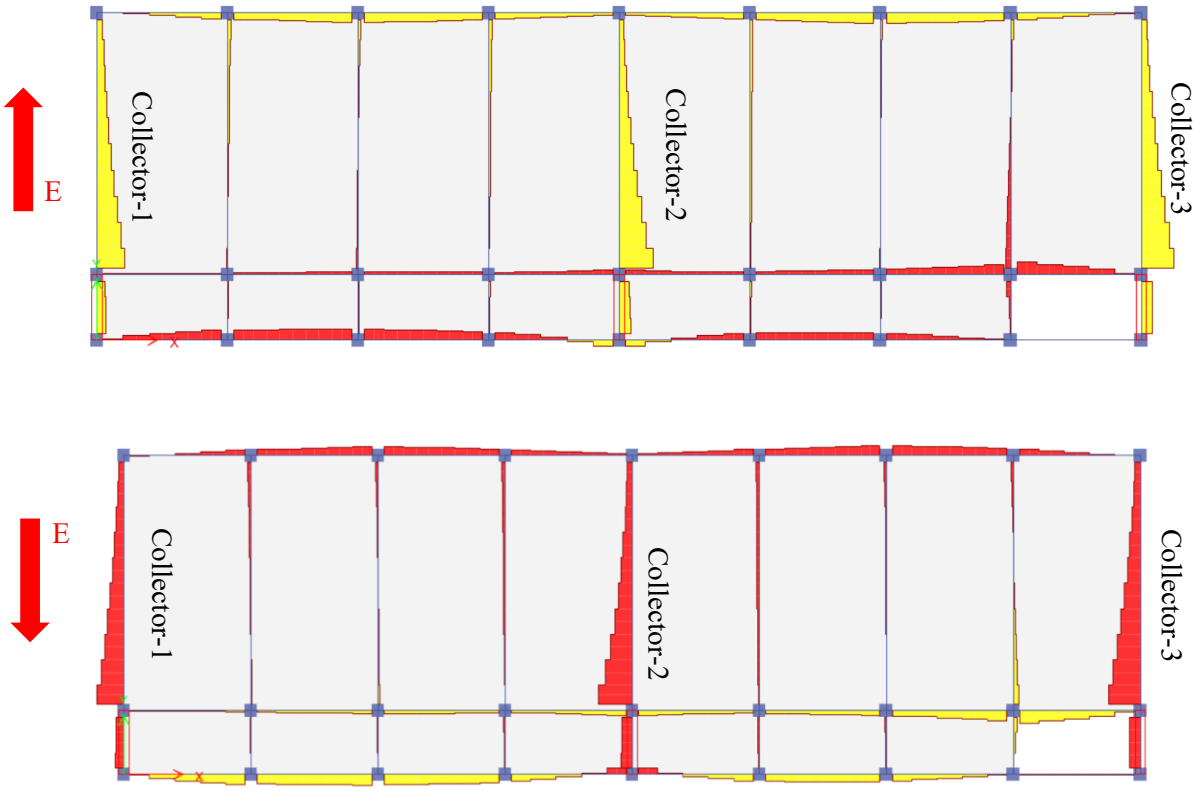
در خصوص طراحی اعضای جمع‌کننده کششی مطابق آیین نامه ACI 318-19 [10] می‌توان نیروی محوری درون‌صفحه‌ای حداکثر جمع‌کننده تحت ترکیبات بار طراحی جمع‌کننده (با اعمال $F_{Coll\,x}$) را از نرم‌افزار استخراج کرد و با در نظر گرفتن لنگرهای خمشی ناشی از بارهای ثقلی، جمع‌کننده را برای اندرکنش نیروی کششی و لنگر خمشی طراحی کرد. بدین منظور، می‌توان مقطع تیر را همراه با آرماتورهای طولی و در محیط Section Designer مدل‌سازی نموده و مقطع را بر اساس نمودار اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی $(P-M_3)$ کنترل کرد.

به عنوان یک راهکار ساده‌تر می‌توان نیروی محوری حاصل از بحرانی‌ترین حالت در پوش (*Envelope*) ترکیبات بار را در طراحی جمع‌کننده در نظر گرفت. مطابق شکل ۲۵، در نرم‌افزار *ETABS* می‌توان با استفاده از منوی *Display*، بیشینه نیروی محوری ایجادشده در تیرها را تحت ترکیب بار پوش مشاهده و استخراج کرد.



شکل ۲۵- مشاهده نیروی محوری در جمع‌کننده‌ها تحت ترکیب بار بحرانی

با توجه به جهت اعمال بار زلزله، در جمع‌کننده‌ها نیروی محوری به‌صورت کششی یا فشاری ایجاد می‌شود. در شکل ۲۶، مقادیر بیشینه نیروی کششی و فشاری ایجادشده در جمع‌کننده‌های متصل به دیوارهای برشی نمایش داده شده است.



شکل ۲۶- حداکثر نیروی ایجاد شده در جمع‌کننده دیوار برشی

با توجه به اینکه تیرهای ایفاکننده نقش جمع‌کننده، پیش‌تر در زمان طراحی کلی سازه تحت اثر نیروهای محوری ناشی از زلزله قرار گرفته‌اند، می‌توان طراحی را بر اساس مازاد نیروی محوری انجام داد. به این معنا که نیروی محوری حاصل از ترکیب‌بار متناظر در طراحی سازه (T_i)، از نیروی نهایی طراحی جمع‌کننده ($T_{Coll,i}$) کسر شده و طراحی برای اختلاف این دو نیرو انجام گیرد.

بر این اساس، نیروی طراحی جمع‌کننده (T_u) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T_u = T_{Coll,i} - T_i \qquad (۷)$$

و در نهایت، سطح مقطع آرماتور اضافه مورد نیاز جمع‌کننده (A_s) از رابطه زیر به دست می‌آید:

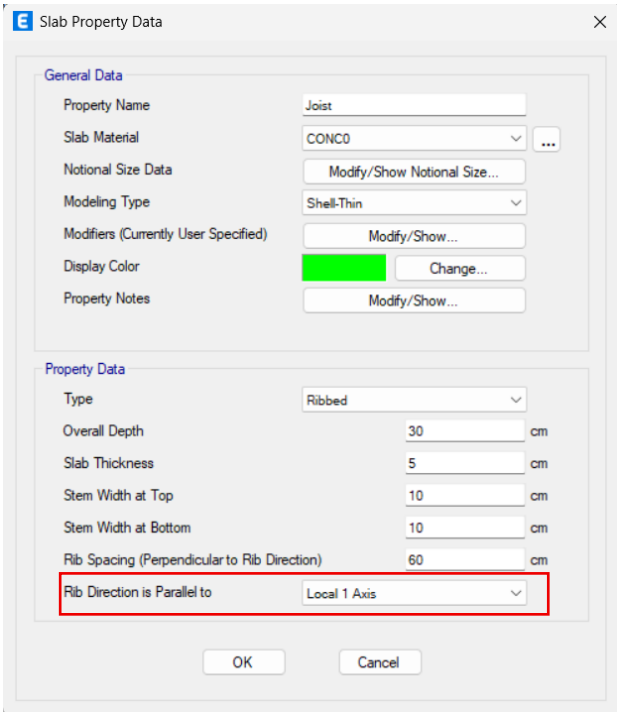
$$A_s = \frac{T_u}{\phi F_y}, \qquad \phi = 0.9 \qquad (۸)$$

به‌عنوان یک رویکرد ساده‌تر و محافظه‌کارانه، می‌توان جمع‌کننده را مستقیماً بر اساس بارگذاری ارائه‌شده برای «طراحی درون‌صفحه» طراحی نمود. در این حالت، اگرچه آیین‌نامه الزامی به طراحی جمع‌کننده برای مؤلفه‌های خارج از صفحه تحت زلزله تشدیدیافته ندارد، اما از آنجا که در این روش تنها مؤلفه مربوط به نیروی اینرسی جمع‌کننده تشدید شده و مؤلفه نیروی انتقالی تغییر نمی‌کند، نتایج با تقریب مناسبی قابل‌قبول و در جهت اطمینان خواهند بود.

۷- سقف تیرچه‌بلوک

نتایج نیروهای درون‌صفحه‌ای دیافراگم و تیرها در سازه‌هایی که سقف آن‌ها با المان‌های *Deck* یا *Membrane* مدل‌سازی شده باشد، برای طراحی اجزای دیافراگم صحیح و قابل‌اتکا نیست. بنابراین، در مواردی که در مدل اصلی سازه، سقف تیرچه‌بلوک با المان *Deck* شبیه‌سازی شده است، لازم است جهت کنترل و طراحی دیافراگم، سقف به‌صورت *Ribbed Slab* در نرم‌افزار بازتعریف شود.

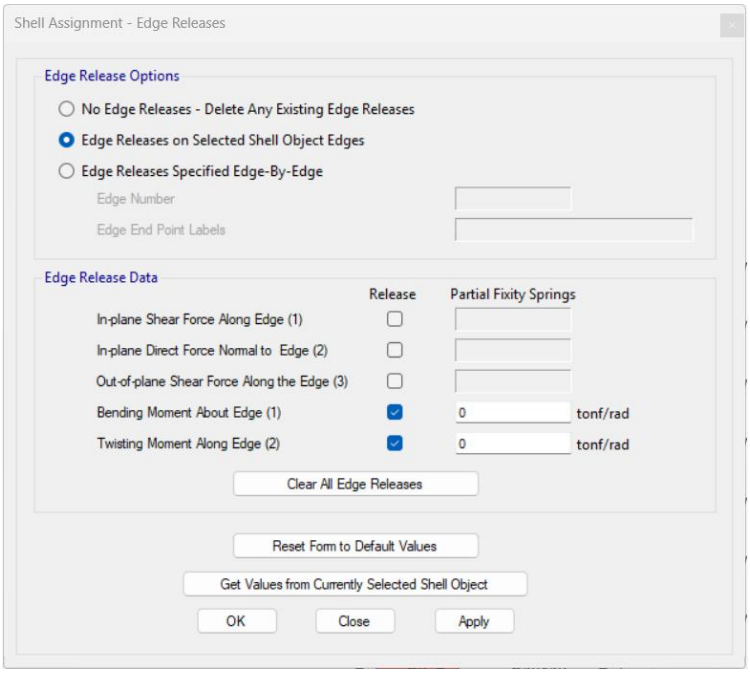
بدین منظور، می‌توان از مسیر *Define>Section Properties>Slab Sections* در نرم‌افزار *ETABS*، سقف را مطابق شکل ۲۷ تعریف نمود. شایان ذکر است که به‌صورت پیش‌فرض، راستای تیرچه‌ها در امتداد محور محلی ۱ قرار دارد و توصیه می‌شود برای حفظ سازگاری در نتایج، این راستا تغییر داده نشود.



شکل ۲۷- مدل‌سازی سقف تیرچه در نرم‌افزار

لازم است در مدل سازه، **محور محلی ۱ سقف** (محور قرمزرنگ) کاملاً هم‌راستا با جهت قرارگیری تیرچه‌ها تعریف شود.

با توجه به اینکه در سقف‌های تیرچه‌ای، لنگر انتهایی تیرچه‌ها صفر فرض می‌شود، برای آزادسازی لنگرهای انتهایی می‌توان تمامی دیافراگم‌های تیرچه‌ای را انتخاب کرد و سپس از مسیر *Assign>Area> Edge Releases*، مؤلفه‌های لنگر و پیچش را در تمام لبه‌ها آزاد نمود (شکل ۲۸).



شکل ۲۸- آزاد سازی لنگر و پیچش در لبه‌های دیافراگم تیرچه‌بلوک

همچنین، ازآنجاکه سقف‌های مدل‌شده با المان *Ribbed Slab* دارای سختی خارج از صفحه متناظر با مؤلفه‌های m_{11}، m_{22} و m_{12} هستند، لازم است ضرایب ترک‌خوردگی به این مؤلفه‌ها اعمال شود. برای این منظور، می‌توان یکی از دو راهکار زیر را در نظر گرفت:

الف ـ اعمال ضریب ترک‌خوردگی یکسان به تمامی مؤلفه‌ها

در این حالت ضریب ترک‌خوردگی ۰/۲۵ برای هر سه مؤلفه m_{11}، m_{22}و m_{12} اعمال شود. در این حالت، لازم است آرماتورهای طولی محاسبه‌شده و گزارش‌شده توسط نرم‌افزار هم در راستای تیرچه‌ها و هم در راستای عمود بر آن‌ها در طراحی و آرماتورگذاری سقف لحاظ شوند. چنانچه در نتایج طراحی آرماتورهای خمشی، وضعیت *Fail* مشاهده شود، باید ضخامت دال رویه سقف تیرچه‌بلوک افزایش یابد.

ب ـ کاهش سختی در راستای عمود بر تیرچه‌ها

در این رویکرد، ضریب سختی مؤلفه‌های m_{22}و m_{12} سقف تیرچه‌بلوک برابر با مقداری بسیار کوچک، مانند ۰/۰۰۱، و ضریب سختی مؤلفه m_{11} برابر با ۰/۲۵ در نظر گرفته می‌شود. در این حالت، نتایج گزارش‌شده توسط نرم‌افزار در راستای تیرچه‌ها قابل‌قبول است و آرماتورگذاری سقف در این راستا باید بر اساس نتایج مذکور انجام شود. همچنین، در صورت نیاز باید آرماتورهای اضافی محاسبه‌شده توسط نرم‌افزار به آرماتورهای متعارف سقف تیرچه‌بلوک افزوده شوند. بااین‌حال، نتایج نرم‌افزار در راستای عمود بر تیرچه‌ها ممکن است از دقت کافی برخوردار نباشد.

در این حالت لازم است کفایت برشی سقف بر اساس نیروی برشی درون‌صفحه‌ای در واحد طول دال، F_{12}، کنترل شود. برای انجام این کنترل می‌توان از منوی *Display* نرم‌افزار، مطابق شکل ۲۲، استفاده و محدوده تغییرات نیروی برشی در واحد طول دال را مشاهده کرد. با این کنترل می‌توان نواحی‌ای از دیافراگم را که نیروی برشی در آن‌ها از مقدار مجاز فراتر رفته است مشخص کرد.

شایان ذکر است، با توجه به ضعف سقف‌های تیرچه‌ای در تحمل نیروهای محوری و برشی، توصیه می‌شود از به‌کارگیری این نوع سقف در دیافراگم‌های بحرانی، از جمله تراز پودیوم و سقف‌های زیر تراز پایه که وظیفه تحمل و انتقال فشار جانبی خاک زیرزمین را بر عهده دارند، بدون انجام محاسبات و کنترل‌های دقیق خودداری شود.

۸- مراجع

۱- «آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)» ، ویرایش پنجم.

2- ASCE/SEI 7-22, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures.

3- NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 3, Seismic Design of Cast-in-Place Concrete Diaphragms, Chords, and Collectors: A Guide for Practicing Engineers (2010).

4-NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 5, Seismic Design of Composite Steel Deck and Concrete-filled Diaphragm, 2011.

5-Design Guide for Reinforced Concrete Diaphragms, CRSI, 2019.

6- Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings, Jack. Moehle, McGraw-Hill, 2014.

۷- نشریه ۱۱۲ شهرداری شیراز، طراحی دیافراگم‌های بتن‌آرمه، ۱۴۰۴.

۸- آیین‌نامه بتن ایران، جلد اول تحلیل و طراحی (ضابطه ۱-۱۲۰)، سازمان برنامه و بودجه کشور ۱۴۰۱.

۹- مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران، تحت عنوان «طرح و اجرای ساختمان‌های بتن‌آرمه» ، ویرایش پنجم.

10-ACI 318-19, Building Code Requirements for Structural Concrete.

11- SEAOC Blue Book Structural Engineers Association of California. (2019).