مؤسسه انتشارات سری عمران
www.serieomran.ir

مقدمه مولفان

همواره اعتقاد داشته‌ایم که یک مهندس محاسب موفق، باید درک درستی از پارامترهای مؤثر بر عملکرد سازه‌ها داشته باشد و با کمک گرفتن از آنها، یک طراحی اصولی و مهندسی ارائه نماید. از سوی دیگر باید در روند طراحی، فاکتورهای اقتصادی و نکات اجرایی نیز لحاظ شود. بر مبنای این نگرش، تلاش کرده‌ایم تا در ادامه مسیر تألیف «مجموعه کتاب‌های زیر ذره‌بین سری عمران»، کتابی متفاوت در زمینه طراحی سازه‌های بتنی ارائه کنیم و در آن، دلسوزانه و با عشق ورزیدن به این مرز و بوم، تمامی نکاتی که باید در روند طراحی حرفه‌ای و ایمن سازه‌ها رعایت شوند را با نگاهی ریزبینانه شرح دهیم.

«تلاش ما بر این بوده است تا در این کتاب، به قول معروف به‌جای دادن ماهی به دست مهندسین عزیز، روش‌های اصولی ماهیگیری را آموزش دهیم و تنها درخواستی که از شما داریم آن است که با صبر و حوصلهٔ فراوان، تمامی مطالبی که در کتاب آورده شده است را با دقت مطالعه کنید»

برای درک صحیح شما عزیزان از روند طراحی، مطالب این کتاب در سه بخش مجزا تألیف شده است که عبارتند از:

- بخش اول (مفاهیم سازه‌های بتنی)
- بخش دوم (پروژه پایه‌ای)
- بخش سوم (پروژه حرفه‌ای)

مهمترین موضوعاتی که در تألیف هر یک از این بخش‌ها مدنظر مؤلفان قرار گرفته است، عبارتند از:

۱- در بخش اول کتاب، مبنای کار این بوده است که مهندسین به دور از یک فضای فرمول محور، بتوانند درک درستی از پارامترهای مؤثر بر طراحی تیرها و ستون‌های بتنی به‌دست آورند و همچنین با انواع سقف‌های با عملکرد یک‌طرفه و دوطرفه که در ساختمان‌های بتنی به‌کار می‌روند نیز آشنا شوند. در ادامه برای تکمیل بحث، نگرش جدیدی از مفاهیم شکل‌پذیری و سیستم‌های سازه‌ای بتن‌آرمه (مطابق ضوابط مبحث نهم مقررات ملی ساختمان) را ارائه کرده‌ایم. بحث‌های جذاب این بخش از کتاب، شما را به سمت فکر کردن اصولی در مورد طراحی صحیح سازه‌ها سوق می‌دهد.

۲- در بخش دوم کتاب، هدف اصلی آن بوده است که در طول ۱۰ فصل، روند طراحی یک سازه قاب خمشی بتن‌آرمه از نوع شکل‌پذیری متوسط را از صفر تا صد، به‌طور دقیق آموزش دهیم. در این بخش، شما یاد می‌گیرید که چگونه از شروع کار یک پروژه در مورد مشخصات سازه آن اظهارنظر کنید و در ادامه، این اظهارنظرها را به مدل‌سازی نرم‌افزاری منتقل نمایید. در نهایت باید گفت هدف اصلی آن است که در پایان بخش اول کتاب، شما عزیزان از همان شروع کار با نرم‌افزار ETABS 2015، مشابه با مهندسین حرفه‌ای عمل کنید و ذهن شما عزیزان از فضای اپراتور بودن دور شود. در این بخش از کتاب (پروژه پایه‌ای)، صفر تا صد نکات و کنترل‌های طراحی قاب‌های خمشی متوسط (که بیش از ۵۰ درصد سازه‌های بتن‌آرمه کشورمان را پوشش می‌دهند) را به‌طور مفهومی یاد می‌گیرید. در انتهای این بخش نیز به‌صورت کاملاً کاربردی، نحوه ترسیم نقشه‌های اجرایی برای یک پروژه بتن‌آرمه را یاد خواهید گرفت. به شما اطمینان می‌دهیم که با رسیدن به انتهای این بخش از کتاب، تمامی دغدغه‌های ذهنیتان در مورد نکات اصلی و ریزه‌کاری‌های طراحی قاب‌های خمشی مرتفع خواهد شد.

۳- در بخش سوم کتاب که نگارش آن بیش از ۹ ماه زمان برده است (و شاید دلیل اصلی تأخیر در ارائه این کتاب باشد)، موضوع طراحی یک سازه قاب خمشی با دیوار برشی از نوع شکل‌پذیری متوسط را با جزئیات و نکات طراحی بسیار کامل مطرح کرده‌ایم. در این قسمت از کتاب، عملاً تلاش شده است تا یک مرجع کامل و حرفه‌ای برای طراحی دیوار برشی ارائه شود و کلیه نکات مرتبط با ETABS و آیین‌نامه‌ها را نیز به همراه خود بیان کند. مطالب ارائه شده در این بخش از کتاب (پروژه حرفه‌ای)، نگرش شما عزیزان را در طراحی دیوار برشی بسیار کامل و پخته خواهد کرد. در این پروژه هم‌چنین سعی کرده‌ایم که به نوعی، ابهامات طراحی موجود بین مهندسین را در این زمینه برطرف کنیم.

و اما حرف آخر ...

هدف ما در این کتاب، ارائه روشی مبتنی بر تفکر بوده تا شما عزیزان روند طراحی سازه را به‌صورت حرفه‌ای یاد بگیرید و بتوانید در شرکت‌های مهندسین مشاور، به مردم کشور عزیزمان خدمت کنید. در ادامه این رسالت نیز برای تکمیل یادگیری شما، قول تألیف جلد دوم کتاب را می‌دهیم که با ارائه چند پروژه بزرگ‌تر و حرفه‌ای‌تر، قابلیت‌های طراحی شما را با نکاتی ناب (که به جرأت می‌توان گفت در کمتر کتابی ارائه شده است) بالاتر می‌برد.

برای نگارش این کتاب، افراد زیادی در کنار ما بوده‌اند که در این مجال از زحمات و کمک‌های تک تک این عزیزان کمال تشکر را داریم، به ویژه مهندسین عزیز فرزاد آزاد و مرتضی نیکوروش که با صبر و حوصله زیاد باعث بهبود روند تألیف این اثر شده‌اند. هم‌چنین از صبوری و متانت خانواده‌ها و به‌ویژه همسران عزیزمان که همواره یار و یاور ما بوده‌اند، کمال قدردانی را داریم.

در پایان یادآوری می‌کنیم که این اثر، دومین کتاب از مجموعه چهار جلدی آموزش طراحی ساختمان‌ها با نرم‌افزار ETABS است که تحت عنوان « مجموعه کتاب‌های زیر ذره‌بین سری عمران » منتشر می‌شوند. اطلاعات مربوط به کتاب‌های در دست انتشار این مجموعه را می‌توانید از طریق وب سایت سری عمران به نشانی «www.serieomran.ir» پیگیری نمایید. هم‌چنین از طریق این سایت و تالار گفتگوی آن، می‌توانید نظرات و پیشنهادات خود را در مورد این کتاب در اختیار ما قرار داده و سؤالات احتمالی خود را نیز با ما در میان بگذارید.

باشد که با تألیف این کتاب‌ها، به شما مهندسان گرامی کمک کنیم تا بتوانید قدم به قدم از این مفاهیم در طراحی صحیح سازه‌ها استفاده کنید.

«محسن حیدری ـ رضا کامرانی‌راد»

فهرست

بخش اول: مفاهیم سازه‌های بتنی

فصل اول اصول طراحی تیرها و ستون‌های بتنی

پیش فصل: رویکردهای طراحی سازه‌های بتن آرمه در آیین‌نامه‌ها ۸
قسمت اول: درک نیازهای طراحی در تیرهای بتن آرمه ۱۱
A-۱- اهمیت درک فیزیکی از سازه ۱۱
A-۲- اصولاً چه نیروهایی در تیرها ایجاد می‌شود؟ ۱۲
A-۳- اثر پیچش و نیروی محوری در تیرهای بتنی ۱۵
قسمت دوم: آرماتورهای فولادی موردنیاز در تیرهای بتن آرمه ۱۶
B-۱- نگاه کلی به آرماتورهای خمشی در تیرهای بتن آرمه ۱۶
B-۲- مفهوم آرماتورهای سراسری و تقویتی در تیرهای بتن آرمه ۱۷
B-۳- بررسی آرماتورهای خمشی در تیرهای پیوسته بتن آرمه ۱۹
B-۴- بررسی آرماتورهای برشی در تیرهای بتن آرمه ۲۱
B-۵- بررسی آرماتورهای پیچشی در تیرهای بتن آرمه ۲۳
قسمت سوم: روابط طراحی تیرهای بتن آرمه ۲۵
C-۱- مروری بر ضرورت طراحی تیرهای بتنی ۲۵
C-۲- اصول طراحی تیرها در خمش ۲۷
C-۳- اصول طراحی تیرها در برش ۳۳
C-۴- اصول طراحی تیرها در پیچش ۳۶
C-۵- بحث تأثیر همزمانی نیروهای داخلی تیر ۴۰
C-۶- آرایش آرماتورهای طولی تیر ۴۱
C-۷- آرایش آرماتورهای عرضی تیر ۴۲
قسمت چهارم: مروری بر اصول طراحی ستون‌های بتن آرمه ۴۴
D-۱- درک نیازهای طراحی در ستون‌های بتن آرمه ۴۴
D-۲- آرماتورهای فولادی موردنیاز در ستون‌های بتن آرمه ۴۵
D-۳- روابط طراحی ستون‌های بتن آرمه ۴۷

فصل دوم سیستم‌های سازه‌ای و مفاهیم شکل‌پذیری

قسمت اول: مروری بر سیستم‌های باربر جانبی در ساختمان‌های بتن آرمه ۵۶
A-۱- سیستم قاب خمشی بتنی ۵۶
A-۲- سیستم دیوار برشی بتنی ۵۹
A-۳- سیستم دوگانه بتنی ۶۰
A-۴- سیستم‌های متفرقه بتنی ۶۱
قسمت دوم: آشنایی با مفاهیم شکل‌پذیری و نگاه مفهومی به ضوابط آنها ۶۵
B-۱- مفاهیم مقدماتی شکل‌پذیری ۶۵
B-۲- نگاه کلی به عوامل مؤثر بر شکل‌پذیری در یک سازه بتنی ۶۸
B-۳- آشنایی با رویکردهای مرتبط با شکل‌پذیری در آیین‌نامه‌های طراحی بتن ۷۰
B-۴- ضوابط آیین‌نامه‌ای تیرها در سازه‌های با شکل‌پذیری متوسط ۷۲
B-۵- ضوابط آیین‌نامه‌ای ستون‌ها در سازه‌های با شکل‌پذیری متوسط ۷۶

فصل سوم سیستم‌های سقف در ساختمان‌های بتن آرمه

قسمت اول: آشنایی با انواع سقف‌های مورد استفاده در ساختمان‌های بتن آرمه ۸۲
A-۱- مقدمه ۸۲
A-۲- مفهوم عملکرد یک‌طرفه و دوطرفه سقف‌ها ۸۲
A-۳- سقف‌های رایج در ساختمان‌های بتن آرمه ۸۵
قسمت دوم: شناخت بهتر سقف‌های یک‌طرفه در ساختمان‌های بتنی ۸۶
B-۱- سقف تیرچه بلوک بتنی ۸۶
B-۲- سقف کرمیت و معایب آن در سازه‌های بتنی ۸۹
B-۳- سقف‌های پیش‌ساخته بتنی ۹۰
قسمت سوم: شناخت بهتر سقف‌های دوطرفه در ساختمان‌های بتنی ۹۲
C-۱- دال تخت بتنی بدون تیر ۹۲
C-۲- دال تخت بتنی با تیر ۹۵
C-۳- دال بتنی مشبک ۹۶
C-۴- دال بتنی مجوف ۹۸
C-۵- دال بتنی پیش‌تنیده ۹۹

بخش دوم: پروژه پایه‌ای

فصل اول معرفی و بررسی مشخصات پروژه

قسمت اول: شناسنامه پروژه ۱۰۴
قسمت دوم: بررسی جامع نقشه‌های معماری پروژه ۱۰۸
قسمت سوم: پیشنهاد سیستم سازه‌ای مناسب برای پروژه ۱۱۹
قسمت چهارم: مشخصات سقف پروژه ۱۲۳

فصل دوم جزئیات بارگذاری پروژه

قسمت اول: بارگذاری سقف‌ها و دیوارهای پروژه ۱۳۴
قسمت دوم: بررسی پله و بارگذاری آن در ساختمان‌های بتنی ۱۴۰
قسمت سوم: محاسبات بار زنده و برف و جمع‌بندی بارهای ثقلی ۱۴۸
قسمت چهارم: بارگذاری لرزه‌ای پروژه پایه‌ای ۱۵۵
قسمت پنجم: بارگذاری آسانسور و خرپشته ۱۷۴

فصل سوم تهیه قالب اولیه فایل ETABS

قسمت اول: تنظیمات اولیه و تهیه فایل خام مدل ETABS ۱۷۸
قسمت دوم: معرفی مصالح مورد استفاده در مدل ساختمان بتنی ۱۹۵
قسمت سوم: معرفی مقاطع مورد استفاده در مدل ساختمان بتنی ۲۱۰

فصل چهارم مدل‌سازی هندسه سازه در ETABS

قسمت اول: ترسیم اعضای سازه ۲۲۸
قسمت دوم: اصلاح و اختصاص ویژگی‌های تکمیلی به مدل سازه ۲۴۳

فصل پنجم بارگذاری سازه در مدل ETABS

قسمت اول: معرفی انواع الگوهای بار ۲۵۶
قسمت دوم: اختصاص بارگذاری به مدل سازه ۲۶۸
قسمت سوم: بررسی ترکیب بارهای طراحی برای ساختمان‌های بتنی و تعریف آنها در ETABS ۲۸۷

فصل ششم تحلیل سازه در ETABS

قسمت اول: تنظیمات پیش از تحلیل سازه از منوی Define ۳۰۰
قسمت دوم: تنظیمات پیش از تحلیل سازه از منوی Analyze و Design ۳۰۷
قسمت سوم: انجام تحلیل سازه و بررسی گرافیکی خروجی‌های تحلیل در ETABS ۳۱۲

فصل هفتم کلیات طراحی ساختمان‌های بتنی در ETABS

پیش فصل: روند طراحی و کنترل سازه‌های بتن آرمه ۳۲۶
قسمت اول: تنظیمات پیش از طراحی سازه در منوی Define ۳۳۰
قسمت دوم: شروع طراحی سازه در نرم‌افزار و بررسی گرافیکی نتایج طراحی ۳۳۹

فصل هشتم طراحی و کنترل اولیه سازه در ETABS

قسمت اول: طراحی اولیه ستون‌های بتنی در ETABS ۳۵۲
قسمت دوم: طراحی اولیه تیرهای بتنی در ETABS ۳۶۴
قسمت سوم: کنترل‌های اولیه بر روی مدل سازه در ETABS ۳۸۷

فصل نهم طراحی و کنترل نهایی سازه در ETABS

قسمت اول: بررسی تفصیلی پنجره Information مربوط به ستون‌ها ۴۱۶
قسمت دوم: طراحی نهایی ستون‌ها در ETABS ۴۳۱
قسمت سوم: بررسی پنجره Information تیرها و طراحی نهایی تیرها در ETABS ۴۴۰
قسمت چهارم: طراحی دستی چند نمونه تیر و ستون در پروژه پایه‌ای ۴۵۰
قسمت پنجم: کنترل‌های نهایی مدل سازه در ETABS ۴۶۵

فصل دهم تهیه دیتیل‌های اجرایی سازه

قسمت اول: نکات کلی برای ترسیم دیتیل‌های اجرایی در تیرها ۴۷۴
قسمت دوم: نکات کلی برای ترسیم دیتیل‌های اجرایی در ستون‌ها ۴۸۲
قسمت سوم: ترسیم نقشه‌های اجرایی برای یک قاب از پروژه پایه‌ای ۴۸۷

بخش سوم : پروژه حرفه‌ای

فصل اول شناسنامه پروژه و تعیین بارگذاری‌های آن

قسمت اول: شناسنامه پروژه ۵۰۴
قسمت دوم: بارگذاری ثقلی و جانبی پروژه ۵۱۶

فصل دوم نگاه حرفه‌ای به مفاهیم و اصول طراحی دیوارهای برشی

قسمت اول: کلیاتی درباره دیوارهای برشی بتنی ۵۳۲
قسمت دوم: رویکردهای آرماتورگذاری در دیوارهای برشی ۵۳۸
قسمت سوم: مفاهیم و ضوابط آرماتورگذاری در اجزای مرزی دیوارهای برشی ۵۴۷
قسمت چهارم: مطالب تکمیلی در مورد دیوارهای برشی ۵۵۳

فصل سوم ساخت مدل سازه در ETABS

قسمت اول: تهیه قالب اولیه فایل ETABS ۵۶۰
قسمت دوم: ترسیم هندسه مدل در ETABS ۵۸۰
قسمت سوم: اصلاح ویژگی‌های مدل در ETABS ۵۹۳

فصل چهارم بارگذاری و تحلیل سازه در ETABS

قسمت اول: بارگذاری سازه در ETABS ۶۱۲
قسمت دوم: تحلیل سازه در ETABS ۶۴۴

فصل پنجم کنترل‌های اولیه سازه در ETABS

پیش فصل: آشنایی با انواع کنترل‌های لرزه‌ای سازه و ترتیب انجام آنها ۶۶۶
قسمت اول: کنترل‌های مربوط به پیچش سازه ۶۷۰
قسمت دوم: کنترل ترک‌خوردگی اعضای سازه ۶۸۶
قسمت سوم: کنترل‌های مربوط به جابه‌جایی جانبی سازه ۶۹۶

فصل ششم طراحی حرفه‌ای دیوارهای برشی در ETABS - بخش اول

پیش فصل: روند طراحی سازه‌های بتن آرمه ۷۰۶
قسمت اول: آشنایی با رویکردهای طراحی دیوار برشی در ETABS ۷۰۹
قسمت دوم: طراحی اولیه دیوارهای برشی پروژه به روش Uniform ۷۱۸
قسمت سوم: کنترل دیوارهای برشی براساس ضابطه ۵۰٪ ۷۲۸

فصل هفتم طراحی اولیه تیرها و ستون‌های سازه در ETABS

قسمت اول: تنظیمات طراحی تیرها و ستون‌ها در ETABS ۷۴۲
قسمت دوم: طراحی تیرها و ستون‌ها و بررسی نتایج آن در ETABS ۷۴۶

فصل هشتم طراحی حرفه‌ای دیوارهای برشی در ETABS - بخش دوم

قسمت اول: آشنایی با نحوه ترسیم مقطع دیوارهای برشی در محیط برنامه SD ۷۷۶
قسمت دوم: طراحی دیوارهای برشی پروژه به روش General ۷۹۴

فصل نهم نهایی کردن طراحی سازه پروژه در ETABS

قسمت اول: کنترل نهایی ضوابط لرزه‌ای سازه و بررسی کفایت مقطع اعضای بتنی ... ۸۱۴
قسمت دوم: انجام کنترل‌های خاص در مورد سازه پروژه حرفه‌ای ۸۲۹

پیوست در نظر گرفتن دستگاه پله در مدل‌سازی

DVD محتویات لوح فشرده همراه با کتاب

قسمت اول: بخش معرفی

A-۱- معرفی مؤسسه سری عمران
A-۲- معرفی مجموعه کتاب‌های زیر ذره‌بین
A-۳- معرفی کتاب طراحی ساختمان‌های بتنی با نرم‌افزار ETABS ، جلد ۱
A-۴- معرفی کلاس‌های نرم‌افزار سری عمران

قسمت دوم: نصب نرم‌افزار ETABS

B-۱- نصب نرم‌افزار ETABS بر روی رایانه
B-۲- اجرای کرک نرم‌افزار ETABS
B-۳- راهنمای نصب نرم‌افزار ETABS

قسمت سوم: فایل‌های پروژه ETABS

C-۱- فایل‌های مرتبط با پروژه پایه‌ای
C-۲- فایل‌های مرتبط با پروژه حرفه‌ای

قسمت چهارم: بخش تکمیلی

D-۱- فایل متنی طیف‌های بازتاب زلزله براساس ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰
D-۲- آیین‌نامه‌های داخلی ، خارجی و کتاب‌های طراحی بتن به‌صورت فایل PDF

در طراحی اولیهٔ تیرها در قسمت دوم از فصل قبل دیدیم که نرم‌افزار برای طراحی پیچشی این تیر اشتباه کرده و پیچش وارد بر تیر را بیش از مقدار ϕT_{cr} در نظر گرفته است. به همین دلیل با اعمال ضریب ۰/۰۱ در سختی پیچشی آن، لنگر پیچشی ایجاد شده در تیر را کاهش دادیم. با توجه به این موضوع، در جداول فوق مقدار T_u بسیار کم گزارش شده است. با این حال می‌دانیم که در این تیر باید آرماتورهای طولی و عرضی پیچشی معادل $T_u = \phi T_{cr}$ قرار گیرند. مقدار این آرماتورها برابرند با:

$$T_{cr} = \frac{۱}{۳}\sqrt{f'_c}\,\frac{A_{cp}^{۲}}{P_{cp}} = \frac{۱}{۳}\times\sqrt{۲۰}\times\frac{۱۲۲۵۰۰}{۱۴۰۰} = ۱۵۹۷۸۵۶۹\ N.mm = ۱۵/۹۸\ kN.m = ۱/۵۹۸\ tonf.m \Rightarrow T_u = \phi T_{cr} = ۰/۷۵\times۱/۵۹۸ = ۱/۲\ tonf.m$$

$$\frac{A_t}{s} = \frac{T_u}{۱/۷\,\phi A_{oh}\,f_{yv}} = \frac{۱/۲\times۱۰^{۵}}{۱/۷\times۰/۷۵\times۶۸۱/۷\times۳۴۰۰} = ۰/۰۴\ cm^{۲}/cm = ۴\ cm^{۲}/m$$

$$A_l = (\frac{A_t}{s})\,P_h\,\frac{f_{yv}}{f_{yl}} = ۰/۰۴\times۱۰۴/۴\times\frac{۳۴۰۰}{۴۰۰۰} = ۳/۵\ cm^{۲}$$

مقدار به‌دست آمده در فوق، در نتایج طراحی *ETABS* وجود ندارد ولی با استفاده از جداول (۵) و (۶) فصل قبل به راحتی قابل تعیین است.

توجه: طراحی پیچشی براساس ضوابط مبحث نهم نیز بسیار مشابه *ACI* است. شما می‌توانید با استفاده از روابط ارائه شده در فصل اول بخش ابتدایی کتاب، خود این مورد را انجام دهید.

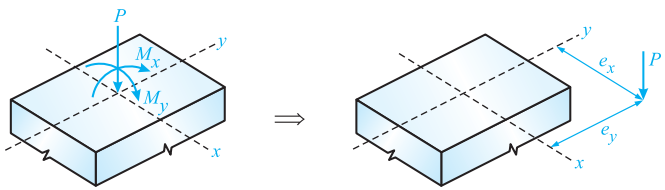
D-۲- فاز دوم: طراحی دستی ستون‌ها

هدف از فاز دوم

در سازه‌های دارای قاب خمشی به‌عنوان سیستم باربر جانبی در دو راستا، ستون‌ها تحت خمش دو محوری قرار می‌گیرند و در طراحی ستون لازم است ظرفیت باربری عضو بر همین اساس تعیین شود. نرم‌افزار *ETABS* قادر است با در نظر گرفتن فرضیاتی، منحنی اندرکنش خمش و نیروی محوری را برای زوایای مختلف خروج از مرکزیت رسم کند که حاصل این کار، یک منحنی اندرکنش سه بعدی خواهد بود. در این منحنی به راحتی می‌توان با تعیین وضعیت تلاش‌های ایجاد شده در عضو $(P-M_2-M_3)$، نسبت *Ratio* و یا مقدار آرماتور موردنیاز را محاسبه نمود که با کلیات این روش در فصل اول از بخش ابتدای کتاب آشنا شدیم. واقعیت این است که انجام این کار به‌صورت دستی نیازمند محاسبات بسیار زیادی بوده و تقریباً غیرممکن است. به همین دلیل معمولاً برای کنترل و یا طراحی دستی ستون‌های بتنی از روش‌های تقریبی از جمله روش برسلر (معکوس بار) و روش خروج از مرکزیت معادل (روش مک گریگور) استفاده می‌شود. در بین این دو روش، اغلب روش برسلر دارای دقت بیشتری بوده و محدودیت کمتری دارد. به همین دلیل در ادامه ابتدا با روند کنترل دستی ستون به روش برسلر آشنا شده و سپس کفایت ظرفیت یکی از ستون‌های پروژهٔ پایه‌ای را با این روش کنترل می‌کنیم.

اصول طراحی ستون‌ها

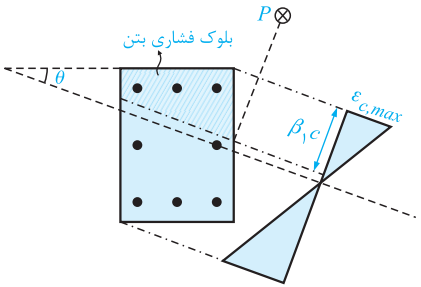
در شکل زیر، مقطع یک ستون تحت خمش دو محوره نشان داده شده است. در این حالت می‌توان گفت که مقطع تحت اثر یک نیروی محوری همراه با دو خروج از مرکزیت همزمان قرار دارد، به‌طوری‌که:



شکل ۲۵: تأثیر نیروی محوری و لنگر خمشی دو محوره بر مقطع ستون

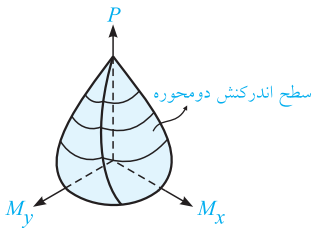
$$\begin{cases} M_x = P.e_y \Rightarrow e_y = \dfrac{M_x}{P} \\ M_y = P.e_x \Rightarrow e_x = \dfrac{M_y}{P} \end{cases}$$

می‌توان نشان داد که در ترکیب خمش دو محوره و نیروی محوری، محور خنثی به‌صورت مورب در مقطع قرار می‌گیرد. بنابراین اگر بخواهیم مقطع را به‌صورت دقیق بررسی کنیم، باید با یک محاسبات طولانی و به‌صورت سعی و خطا، ابتدا محل دقیق محور خنثی و زاویهٔ آن با یکی از لبه‌های مقطع را پیدا کرده و سپس مقادیر تنش‌ها و نیروها را به‌دست آوریم.



شکل ۲۶: محور خنثی در ستون تحت خمش دو محوره

در این حالت، سطح اندرکنش ستون مطابق شکل مقابل خواهد بود. اگر نقطه‌ای که ترکیب $(P-M_x-M_y)$ وارد بر ستون را نشان می‌دهد، در داخل حجم نمودار نشان داده شده قرار گیرد، ستون ایمن بوده و دارای مقاومت کافی است. نرم‌افزار *ETABS* نیز برای کنترل ظرفیت ستون و یا تعیین مساحت آرماتور موردنیاز، از نمودارهای سه بعدی مشابه این شکل استفاده می‌کند.



شکل ۲۷: سطح اندرکنش دو محوری خمش و نیروی محوری $(P-M_x-M_y)$

با توجه به پیچیدگی و طولانی بودن روش به دست آوردن این نمودارها، معمولاً در بررسی‌های دستی ستون‌های بتن‌آرمه تحت خمش دو محوره، از روش‌های تقریبی استفاده می‌شود. یک روش تقریبی بسیار مناسب و با درصد خطای کم برای آنالیز ستون تحت خمش دو محوره، روش بار متقابل یا روش برسلر است که در آیین‌نامه‌ها نیز توصیه شده است و در فصل اول بخش ابتدایی کتاب با آن آشنا شدیم.

پرفسور برسلر رابطهٔ سادهٔ زیر را برای تخمین ظرفیت اسمی ستون یعنی P_n، هنگامی که ستون تحت لنگرهای همزمان M_x و M_y قرار می‌گیرد، پیشنهاد می‌کند:

$$\frac{1}{P_n}=\frac{1}{P_{nx}}+\frac{1}{P_{ny}}-\frac{1}{P_0}$$

P_0 : ظرفیت محوری خالص فشاری ستون
P_n: ظرفیت محوری ستون تحت اثر لنگرهای همزمان M_x و M_y
P_{nx}: ظرفیت محوری ستون تحت خروج از مرکزیت e_y (یا لنگر M_x)
P_{ny}: ظرفیت محوری ستون تحت خروج از مرکزیت e_x (یا لنگر M_y)

تذکر: در هنگام محاسبهٔ P_{nx} باید $e_x=0$ و در هنگام محاسبهٔ P_y باید $e_y=0$ باشد.

متوسط خطای رابطهٔ برسلر حدود ۳ درصد است. با این حال اگر $P<0.1P_0$ باشد، خطای این روش زیاد شده و استفاده از روش برسلر مجاز نخواهد بود. معمولاً اگر P از ۱۰ درصد P_0 کوچک‌تر باشد، مقطع را می‌توان به‌ازای خمش خالص دو محوره طراحی کرد؛ یعنی اثر بار محوری را با توجه به کوچک بودن آن در نظر نگرفت.

نحوهٔ خروجی گرفتن از ETABS برای استفاده از روش برسلر

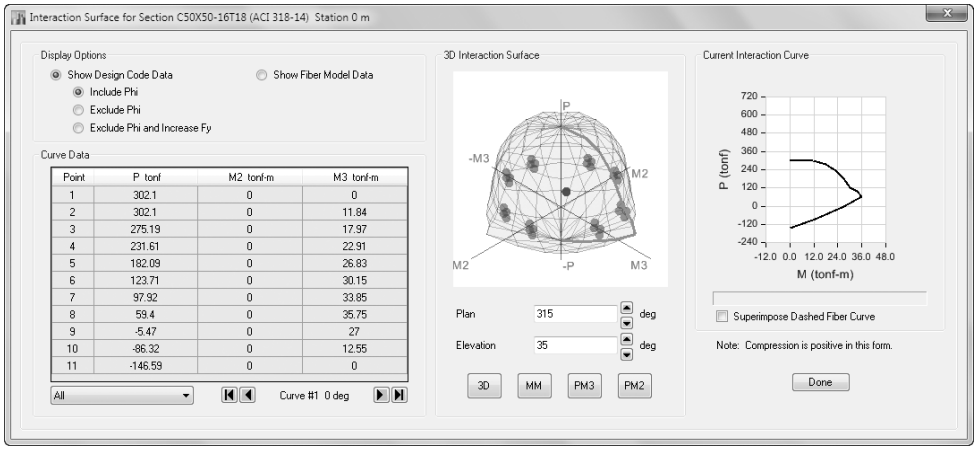
برای به‌دست آوردن پارامترهای مورد استفاده در رابطهٔ برسلر، باید روند زیر را طی کنیم:

۱- ابتدا با استفاده از کلید *Summary* در پنجرهٔ *Information* ستون، تلاش‌های مورد استفاده در طراحی ستون موردنظر یعنی P_u، M_{u2} و M_{u3} را به‌دست آورید.

۲- با استفاده از روابط زیر، مقدار خروج از مرکزیت معادل در دو راستای (۲) و (۳) را تعیین کنید.

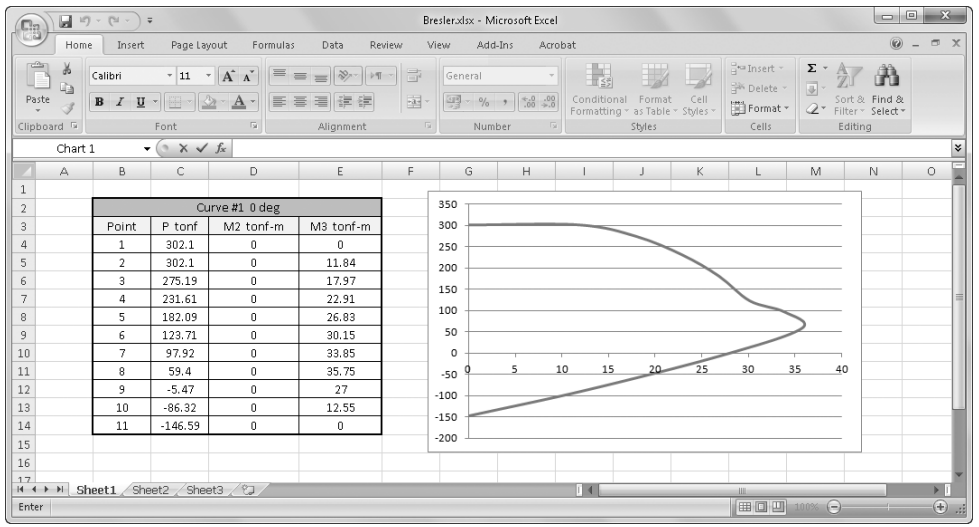
$$e_2=\frac{M_{u3}}{P_u}\quad,\quad e_3=\frac{M_{u2}}{P_u}$$

۳- برای تعیین ظرفیت ستون در دو راستای (۲) و (۳) به‌صورت مجزا (P_{r2} و P_{r3}) به منحنی تک محوری اندرکنش ستون نیاز داریم. نرم‌افزار *ETABS* منحنی اندرکنش خمش و نیروی محوری را برای مقطع ستون‌ها محاسبه می‌کند. اطلاعات این منحنی‌ها را می‌توانیم با استفاده از کلید *Interaction* در پنجرهٔ *Information* مشاهده کنیم. ستون‌های مورد استفاده در این پروژه، دارای مقطع با آرماتورگذاری کاملاً متقارن هستند، به همین دلیل منحنی اندرکنش آنها در هر دو راستای مقطع یکسان خواهد بود. به منظور مشاهدهٔ مختصات مورد استفاده برای رسم منحنی $P-M_3$، در قسمت پایین پنجره باید منحنی شمارهٔ ۱ (*Curve*#1) که برای زاویهٔ صفر درجه نسبت به محور (۳) رسم شده است را انتخاب کنید.



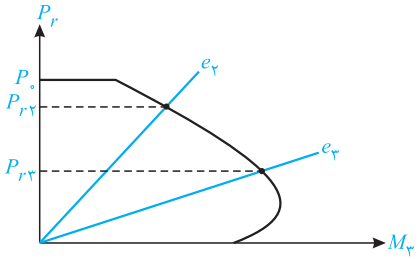
شکل ۲۸: پنجرهٔ نمایش منحنی اندرکنش ستون به صورت سه بعدی

برای استفاده از این منحنی‌ها در این قسمت، باید این اعداد را به نرم‌افزار *Excel* منتقل کنیم. به همین منظور، در قسمتی از جدول شکل فوق راست کلیک کرده و گزینهٔ *Copy Current Curve* را انتخاب کنید. حال در یکی از خانه‌های نرم‌افزار *Excel* راست کلیک کرده و گزینهٔ *Paste* را انتخاب کنید. در این مرحله به راحتی می‌توانید نمودار $P-M_3$ را در این نرم‌افزار رسم کنید (به شکل زیر توجه کنید).



شکل ۲۹: ترسیم منحنی اندرکنش موردنظر در نرم‌افزار *Excel*

۴- حال باید برای محاسبهٔ ظرفیت محوری ستون، در نمودار رسم شده در *Excel*، دو خط با شیب $(\frac{۱}{e_۲})$ و $(\frac{۱}{e_۳})$ به‌گونه‌ای رسم شود که منحنی ظرفیت ستون را قطع کنند. محل تقاطع این دو خط با منحنی ستون، بیانگر ظرفیت ستون بوده و بنابراین مقادیر $P_{r۲}$ و $P_{r۳}$ به‌دست می‌آیند. همچنین مقدار ماکزیمم نیروی محوری در این نمودار، بیانگر مقدار پارامتر $P_۰$ می‌باشد. این موارد در شکل مقابل نشان داده شده‌اند.



شکل ۳۰: نحوهٔ تعیین پارامترهای رابطهٔ برسلر

۵- در این مرحله می‌توان با استفاده از رابطهٔ زیر، ظرفیت محوری معادل ستون را محاسبه نمود:

$$\frac{۱}{P_r}=\frac{۱}{P_{r۲}}+\frac{۱}{P_{r۳}}-\frac{۱}{P_۰}$$

توجه: در صورتی‌که رابطهٔ $P_r \geq P_u$ برقرار باشد، ظرفیت ستون کافی است؛ در غیر این‌صورت لازم است ستون به طریقی (افزایش ابعاد مقطع و یا مساحت آرماتورها) تقویت شود.

مشابه طرحی خمشی و برشی تیرها، در طراحی ستون نیز همواره باید رابطهٔ $P_u \leq \phi P_n$ و $M_u \leq \phi M_n$ برقرار باشد که مقادیر P_n و M_n از نمودارهای اندرکنش ستون به‌دست می‌آیند. در قسمت *Display Options* در پنجرهٔ *Interaction* سه حالت مختلف برای در نظر گرفتن ϕ وجود دارد:

۱. **اعمال ضریب ϕ (*Include Phi*)**: در این حالت ضریب ϕ در اعداد جدول پایین پنجره اعمال شده است. به عبارتی مقدار ϕP_n از این جدول به‌دست می‌آید که در توضیحات فوق آن را با P_r نشان داده‌ایم.

۲. **عدم اعمال ضریب ϕ (*Exclude Phi*)**: در این حالت ضریب ϕ در محاسبات جدول اعمال نشده و به عبارت دیگر، مقدار لنگر اسمی و نیروی محوری اسمی ارائه می‌شود. در واقع در این حالت مقدار P_n ارائه می‌شود.

۳. **عدم اعمال ضریب ϕ و افزایش تنش تسلیم آرماتور (*Exclude Phi and Increase F_y*)**: در این حالت به منظور محاسبهٔ لنگر خمشی محتمل عضو که در محاسبات لرزه‌ای کاربرد دارد، ضریب ϕ اعمال نشده ولی تنش تسلیم آرماتور با استفاده از ضریب R_y افزایش یافته است. دقت شود که ضریب R_y در هنگام تعریف مشخصات مقطع به نرم‌افزار ارائه می‌شود.

کنترل دستی ستون نمونه

در این مرحله قصد داریم ستون قرار گرفته بر روی آکس $(F-1)$ در طبقهٔ اول را براساس روند گفته شده در بخش قبل به‌صورت دستی کنترل کنیم. به همین منظور مراحل زیر را طی می‌کنیم:

۱- به منظور تعیین تلاش‌های ایجاد شده در این ستون، پس از تحلیل و طراحی سازه، بر روی این ستون راست کلیک کرده و در پنجرهٔ *Information* کلید *Summary* را انتخاب کنید. در پنجرهٔ باز شده در جدول (*Axial Force and Biaxial Moment Design*) مقادیر تلاش‌های مورد استفاده برای طراحی ستون را قرائت کنید.

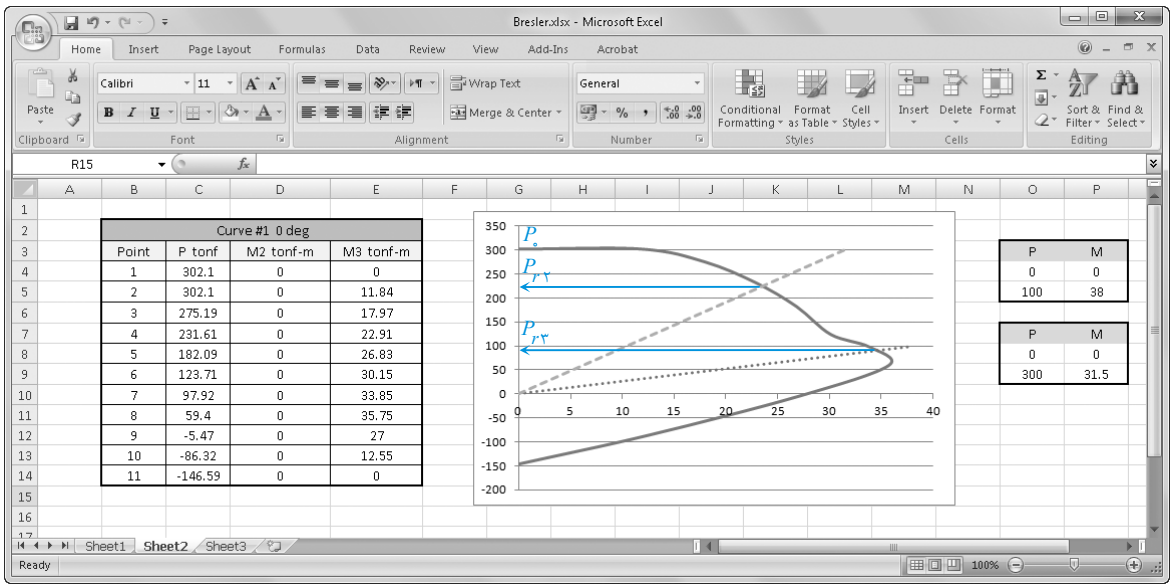
Axial Force and Biaxial Moment Design For P_u , M_{u2} , M_{u3}

Design P_u tonf	Design M_{u2} tonf-m	Design M_{u3} tonf-m	Minimum M_2 tonf-m	Minimum M_3 tonf-m	Rebar % %	Capacity Ratio Unitless
67.99	7.11	25.82	2.06	2.06	1.63	0.892

۲- با استفاده از مقادیر جدول فوق، مقدار خروج از مرکزیت معادل را در دو راستای (۲) و (۳) تعیین می‌کنیم.

$$e_{۲}=\frac{M_{u۳}}{P_u}=\frac{۲۵/۸۲}{۶۷/۹۹}=۰/۳۸۰\ m \quad , \quad e_{۳}=\frac{M_{u۲}}{P_u}=\frac{۷/۱۱}{۶۷/۹۹}=۰/۱۰۵\ m$$

۳- به روشی که در بخش قبل توضیح دادیم، اطلاعات منحنی اندرکنش ستون را از نرم‌افزار *ETABS* استخراج کرده و نمودار آن را در نرم‌افزار *Excel* رسم کنید. همچنین در این نمودار دو خط با شیب $\frac{۱}{e_{۲}}=۲/۶۳$ و $\frac{۱}{e_{۳}}=۹/۵۶$ را نیز رسم کنید. در شکل زیر نتیجهٔ این کار را مشاهده می‌کنید.



شکل ۳۱: نمودار اندرکنش خمش و نیروی محوری در نرم‌افزار *Excel*

۴- همان‌طورکه در شکل فوق مشاهده می‌کنید، ظرفیت محوری ستون در دو راستای (۲) و (۳) و همچنین مقدار $P_{\circ}$ برابر است با:

$$P_{r۲}\simeq ۲۳۱/۶\ tonf \quad , \quad P_{r۳}\simeq ۹۷/۹\ tonf \quad , \quad P_{\circ}=۳۰۲/۱\ tonf$$

۵- حال با استفاده از رابطهٔ برسلر، ظرفیت محوری معادل ستون را به‌دست می‌آوریم:

$$\frac{۱}{P_r}=\frac{۱}{P_{r۲}}+\frac{۱}{P_{r۳}}-\frac{۱}{P_{\circ}}=\frac{۱}{۲۳۱/۶}+\frac{۱}{۹۷/۹}-\frac{۱}{۳۰۲/۱} \Rightarrow P_r=۸۹/۱\ tonf$$

۶- از طرفی مقدار P_u بحرانی وارد بر ستون را می‌توانید از طریق سربرگ *Design Details* مشاهده کنید که برابر ۶۷/۹۹ *tonf* می‌باشد. مقدار P_r معادل، از نیروی محوری ایجاد شده در ستون در ترکیب بار بحرانی بیشتر است، پس این ستون دارای ظرفیت کافی می‌باشد و این موضوع با نتایج *ETABS* همخوانی دارد.

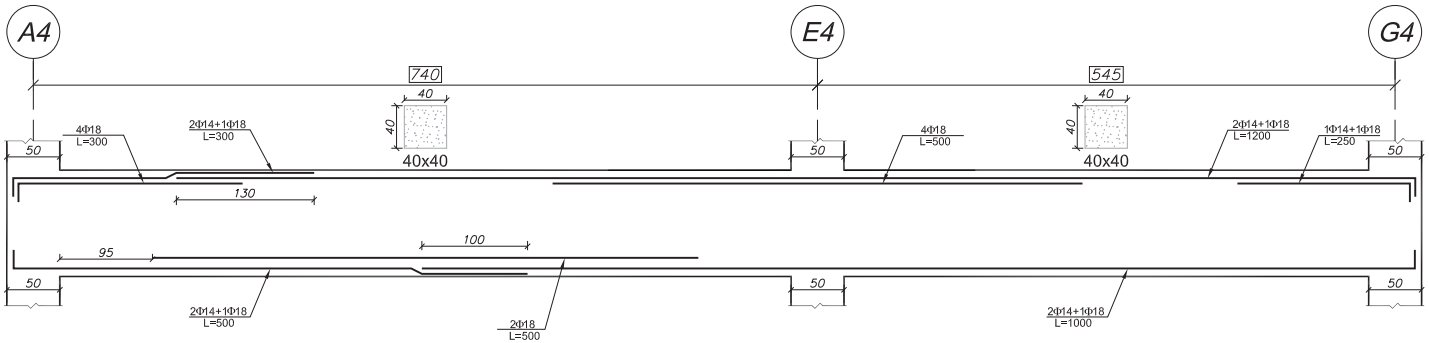
$$P_u=۶۷/۹۹\ tonf < P_r=۸۹/۱\ tonf$$

۷- از طرفی مقدار *Ratio* در محاسبات دستی را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد که البته با نتیجهٔ *ETABS* که ۰/۸۹۲ است اختلاف دارد (مقدار *Ratio* نرم‌افزار را در جدول پایین صفحهٔ قبل مشاهده کنید). دلیل اختلاف آن است که *Ratio* محاسبات دستی فقط براساس نیروی محوری معادل است ولی *ETABS* مقدار *Ratio* ستون را براساس اندرکنش نیروی محوری - لنگر خمشی محاسبه می‌کند که بسیار دقیق‌تر است.

$$Ratio=\frac{P_u}{P_r}=\frac{۶۷/۹۹}{۸۹/۱}=۰/۷۶۳$$

ترسیم آرماتورهای طولی طبقهٔ اول سازه در قاب (۴)

نقشهٔ اجرایی مربوط به تیرهای طبقهٔ اول از قاب (۴)، با توجه به توضیحات قسمت اول فصل به‌صورت زیر خواهد بود.



شکل ۲۵: نقشهٔ اجرایی آرماتورهای طولی تیرهای طبقهٔ اول از قاب (٤)

برای رسم این نقشهٔ اجرایی، مراحل زیر طی شده است:

مرحلهٔ ۱: یافتن آرماتورهای سراسری تیرها

مرحلهٔ ۲: یافتن آرماتورهای تقویتی در تیرها

مرحلهٔ ۳: یافتن طول آرماتورهای تقویتی در تیرها

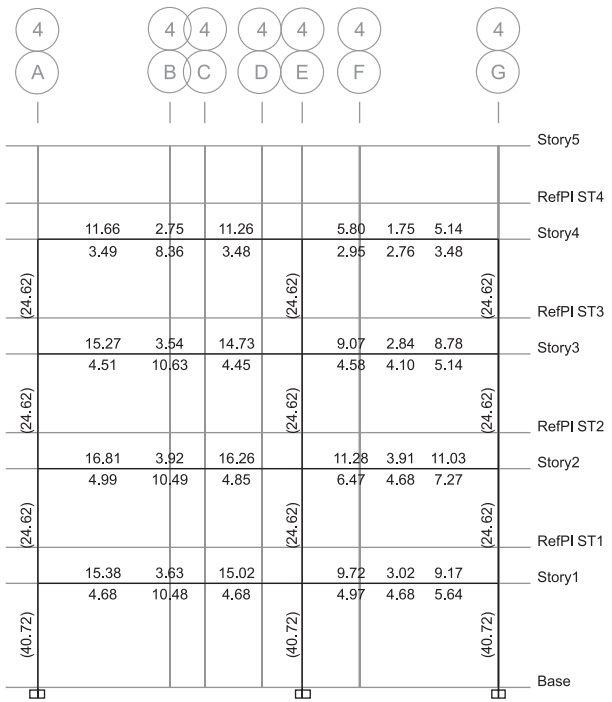
مرحلهٔ ۴: یافتن طول قلاب‌های موردنیاز و محل وصلهٔ آرماتورها

در ادامه هر یک از این مراحل را بیشتر شرح می‌دهیم:

مرحلهٔ ۱ (یافتن آرماتورهای سراسری تیرها): برای شروع کار، باید نتایج حاصل از طراحی نرم‌افزار را از روی آن بخوانیم. برای این منظور در پنجره‌ای که قاب (۴) را نشان می‌دهد، از طریق پنجرهٔ *Display Design Results*، گزینهٔ *Longitudinal Reinforcing* را انتخاب کنید. نتایج این حالت برای قاب (۴)، در شکل (۲۶) نشان داده شده است.

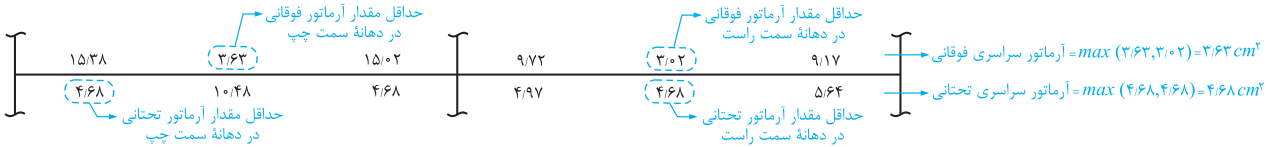
همان‌طورکه از خروجی میلگردهای طولی این قاب مشخص است، هر تیر ۶ مساحت تعیین شده را به خود اختصاص داده است که مساحت‌های بالایی نشان‌دهندهٔ آرماتور موردنیاز در بالای تیر و مساحت‌های پایینی، نشان‌دهندهٔ آرماتورهای موردنیاز در پایین تیر هستند. از طرفی در قسمت اول فصل نیز گفته شد که تیرها از میلگرد سراسری و میلگرد تقویتی تشکیل شده‌اند و میلگرد سراسری، براساس حداقل مساحت بالا و پایین تیر تعیین می‌شود که در این گام می‌خواهیم به این بحث بپردازیم.

همان‌طورکه مشاهده می‌کنید، در پایین تیرها، حداکثر آرماتور موردنیاز بعضاً در وسط و بعضاً در کنار تیر می‌باشد و در بالای تیر، حداقل آرماتور موردنیاز همواره در وسط تیر می‌باشد.



شکل ۲۶: مقدار آرماتور طولی موردنیاز تیرها در قاب (٤)

برای پیدا کردن مقدار مساحت لازم برای میلگردهای سراسری در بالا و پایین، در هر دهانه حداقل مساحت را انتخاب می‌کنیم و در ادامه از آنجاکه آرماتورهای سراسری به‌صورت یکپارچه اجرا می‌شوند و در ستون میانی قطع نمی‌شوند (و به همین دلیل بهتر است آرماتورهای سراسری یکسان باشند)، حداکثر مقدارِ حداقل‌های انتخابی در دهانه‌ها را به‌عنوان مقدار آرماتور سراسری انتخاب می‌کنیم. برای درک بهتر به شکل زیر توجه کنید:



شکل ۲۷: انتخاب مقدار آرماتور سراسری در بالا و پایین تیر طبقهٔ اول

حال به مرحلهٔ انتخاب میلگرد برای این آرماتورهای سراسری رسیده‌ایم.

انتخاب آرماتورهای سراسری

به‌طور کلی در بحث انتخاب آرماتور، طراح باید یک مدیریت منطقی بین بحث طراحی و اجرا در کارگاه را برقرار کند. در این پروژه از میلگرد با سایز ۱۴ و ۱۸ استفاده کرده‌ایم و با توجه به عرض ۴۰ سانتی‌متری تیرهای طبقهٔ اول، از ۳ میلگرد سراسری در آن استفاده می‌کنیم. دقت شود که در صورت استفاده از دو میلگرد، فاصلهٔ آنها بیش از حد زیاد می‌شود (بیش از ۲۰ cm). در ضمن بهتر است که جهت ساده شدن بحث اجرا، تعداد و سایز میلگردهای سراسری در بالا و پایین تیر یکسان باشد، مگر در موارد خاص که اختلاف آنها زیاد و غیر اقتصادی می‌شود.

برای تیر طبقهٔ اول، در قسمت پایین و براساس مساحت میلگرد کمتر، می‌توان از ۲Φ۱۴+۱Φ۱۸ (با مساحت ۵٫۶۲ cm^2) استفاده کرد. در قسمت فوقانی این تیر نیز براساس مساحت ۳٫۶۳ cm^2 می‌توان از ۳Φ۱۴ (با مساحت ۴٫۶۲ cm^2) برای میلگرد سراسری استفاده کرد. در ادامه همان‌طورکه گفتیم، در جهت ساده شدن اجرا، بهتر است میلگرد سراسری تیرها در بالا و پایین مقطع را یکسان فرض کرده و در هر دو تیر، از ۲Φ۱۴+۱Φ۱۸ به‌عنوان میلگرد سراسری در بالا و پایین استفاده کنیم.

جدول کاربردی برای مساحت میلگردهای مصرفی در این پروژه

استفاده از جدول زیر (و ساخت چنین جداولی در پروژه‌های مختلف)، می‌تواند سرعت شما را در بحث انتخاب آرماتور افزایش دهد:

$A_s(cm^2)$	ترکیب میلگردها	تعداد میلگرد با قطر ۱۸	تعداد میلگرد با قطر ۱۴
۱/۵۴	۱Φ۱۴	۰	۱
۳/۰۸	۲Φ۱۴	۰	۲
۴/۶۲	۳Φ۱۴	۰	۳
۶/۱۶	۴Φ۱۴	۰	۴
۲/۵۴	۱Φ۱۸	۱	۰
۵/۰۹	۲Φ۱۸	۲	۰
۷/۶۳	۳Φ۱۸	۳	۰
۱۰/۱۸	۴Φ۱۸	۴	۰
۴/۰۸	۱Φ۱۴+۱Φ۱۸	۱	۱
۶/۶۳	۱Φ۱۴+۲Φ۱۸	۲	۱
۹/۱۷	۱Φ۱۴+۳Φ۱۸	۳	۱
۱۱/۷۲	۱Φ۱۴+۴Φ۱۸	۴	۱

$A_s(cm^2)$	ترکیب میلگردها	تعداد میلگرد با قطر ۱۸	تعداد میلگرد با قطر ۱۴
۵/۶۲	۲Φ۱۴+۱Φ۱۸	۱	۲
۸/۱۷	۲Φ۱۴+۲Φ۱۸	۲	۲
۱۰/۷۱	۲Φ۱۴+۳Φ۱۸	۳	۲
۱۳/۲۶	۲Φ۱۴+۴Φ۱۸	۴	۲
۷/۱۶	۳Φ۱۴+۱Φ۱۸	۱	۳
۹/۷۱	۳Φ۱۴+۲Φ۱۸	۲	۳
۱۲/۲۵	۳Φ۱۴+۳Φ۱۸	۳	۳
۱۴/۸۰	۳Φ۱۴+۴Φ۱۸	۴	۳
۸/۷۰	۴Φ۱۴+۱Φ۱۸	۱	۴
۱۱/۲۵	۴Φ۱۴+۲Φ۱۸	۲	۴
۱۳/۷۹	۴Φ۱۴+۳Φ۱۸	۳	۴
۱۶/۳۴	۴Φ۱۴+۴Φ۱۸	۴	۴

- پس از تعیین ترک‌خوردگی یا ترک‌نخوردگی دیوار برشی، می‌توان با استفاده از ضوابط بند (۹-۱۳-۸-۴) مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، سختی دیوارها را به‌صورت زیر اصلاح نمود:

اگر دیوار در محدودهٔ کششی، ترک‌نخورده باشد $\Rightarrow I_e = ۰/۷ I_g$

اگر دیوار در محدودهٔ کششی، ترک‌خورده باشد $\Rightarrow I_e = ۰/۳۵ I_g$

توجه: پارامترهای I_g و I_e به‌ترتیب ممان اینرسی کل مقطع بتنی و ممان اینرسی مؤثر مقطع می‌باشند. اعداد ۰/۷ و ۰/۳۵ نیز در واقع همان ضرایب ترک‌خوردگی مقطع دیوار هستند که باعث اصلاح سختی دیوار می‌شوند.

B-۲- فاز دوم: روند کنترل ترک‌خوردگی دیوارهای برشی

هدف از فاز دوم

موضوع کنترل ترک‌خوردگی دیوارهای برشی در *ETABS*، یکی از نکات مهم طراحی سازه‌های بتنی است که دربارهٔ آن بین بسیاری از مهندسان طراح اختلاف نظر وجود دارد. به همین دلیل در این فاز می‌خواهیم براساس مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و آیین‌نامهٔ معتبر *ACI* 318، در مورد مراحل انجام کنترل ترک‌خوردگی دیوارها تصمیم‌گیری کنیم.

حال که در فاز اول مفهوم ترک‌خوردگی دیوارهای برشی را بررسی کردیم، اینک لازم است با چند ضابطهٔ آیین‌نامه‌ای دیگر برای انجام این کنترل در *ETABS* آشنا شویم. در رابطه با این موضوع باید گفت که هر چند در بند (۹-۱۳-۸-۴) از مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، مقدار ضریب ترک‌خوردگی دیوارها بیان شده ولی روند انجام آن به روشنی ارائه نگشته و همین امر دلیل اختلاف نظر بین مهندسان می‌باشد. با این حال در آیین‌نامهٔ *ACI* 318-14 [*ACI R* 6.6.3.1.1] بیان شده که باید مراحل زیر برای کنترل ترک‌خوردگی دیوارها انجام گیرد:

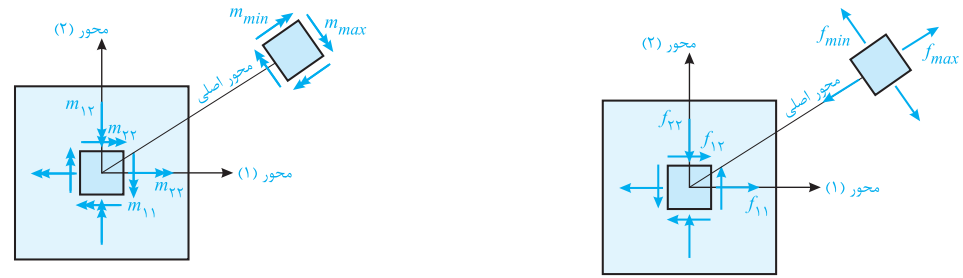
۱. ابتدا سازه باید با فرض ترک‌نخورده بودن دیوارها تحلیل شود. به عبارت دیگر، در تحلیل اولیه باید ضرایب کاهش سختی دیوارها ۰/۷ باشد ($I_e = ۰/۷ I_g$).
۲. روند تحلیل سازه مشابه فایل اصلی است و باید مواردی نظیر $P-\Delta$ نیز در نظر گرفته شوند.
۳. حداکثر تنش کششی ایجاد شده در دیوار باید قرائت شود. دقت کنید که نرم‌افزار این مورد را از طریق پنجرهٔ *Shell Forces/Stresses* ارائه می‌دهد.
۴. برای برداشت حداکثر تنش کششی دیوار از ترکیب بارهای طراحی استفاده می‌شود، زیرا طراحی سازه باید براساس این ترکیب بارها باشد.
۵. در صورتی‌که حداکثر تنش کششی برداشت شده در نرم‌افزار از f_r کمتر باشد، دیوار ترک‌نخورده و فرض ابتدایی در مرحلهٔ (۱) صحیح است.
۶. اگر در برخی از طبقات سازه حداکثر تنش کششی برابر f_r یا بزرگتر از آن باشد، دیوار در آن محدوده‌ها ترک‌خورده است. پس باید در این نواحی ضریب کاهش سختی ۰/۳۵ اعمال شود.

در رابطه با مورد (۴) دو موضوع مهم زیر قابل ذکر است:

- برخی از مهندسان تصور می‌کنند که کنترل حداکثر تنش کششی دیوار باید در حالت‌های بار (*Load Cases*) و نه در ترکیب‌های بار (*Load Combinations*) انجام گیرد. اما واقعیت آن است که از نظر قواعد طراحی، دیوار باید بتواند نیروهای محوری و لنگرهای خمشی ایجاد شده در ترکیب بارها را تحمل کند و لذا در بحث ترک‌خوردگی نیز ترکیب بارها باید مدنظر قرار گیرند.
- شماری دیگر از مهندسان بیان می‌کنند که برای کنترل ترک‌خوردگی دیوار باید از ترکیب بارهای بدون ضریب استفاده نمود. این در حالی است که مطابق بند مذکور در آیین‌نامهٔ *ACI*، صراحتاً عنوان «*Factored Moments*» به معنای لنگرهای ضریب‌دار بیان شده است. دقت شود که از نظر فلسفی نیز چون دیوار باید بتواند تلاش‌های ایجاد شده در ترکیب بارهای طراحی را تحمل کند، ترکیب بارهای طراحی که ضریب‌دار هستند ملاک عمل می‌باشند.

در نرم‌افزار ETABS ، کدام تنش دیوار باید با f_r مقایسه شود؟

همان‌طورکه در فصل سوم پروژه بحث کردیم، المان‌های *Shell* که برای مدل‌سازی دیوار برشی به‌کار می‌روند دارای دو نوع سختی درون صفحه و خارج از صفحه می‌باشند. در واقع همان‌طور که در شکل‌های زیر ملاحظه می‌کنید، هر یک از این دو نوع سختی، خود باعث ایجاد ۳ نیرو یا لنگر در دیوار می‌شوند (در مجموع ۶ تلاش داخلی).



(نیروهای ایجاد شده به‌دلیل سختی درون صفحهٔ المان) (نیروهای ایجاد شده به‌دلیل سختی خارج از صفحهٔ المان)

شکل ۱۲: نیروهای درون صفحه و خارج از صفحه که در المان‌های *Shell* ایجاد می‌شوند

در بحث کنترل ترک‌خوردگی دیوار برشی، باید تنش‌های ایجاد شده در مقطع دیوار با f_r مقایسه گردد. حال سؤال اینجاست که کدام‌یک از ۶ تلاش داخلی دیوار باید مدنظر قرار گیرد؟ در صورتی‌که بحث‌های مطرح شده در قسمت سوم فصل (۳) پروژه را به دقت مطالعه کرده باشید، حتماً به یاد دارید که تنش‌های محوری دیوار برشی همان پارامترهای $f_{۱۱}$ و $f_{۲۲}$ می‌باشند. همچنین می‌دانیم که در اغلب موارد، محور محلی (۲) در المان‌های دیوار برشی به سمت قائم است و لذا تنش‌هایی که به طور محوری و قائم در دیوار ایجاد می‌شوند، همان $f_{۲۲}$ها می‌باشند. در نتیجه می‌توان گفت که برای کنترل ترک‌خوردگی دیوار برشی، باید تنش‌های $f_{۲۲}$ دیوار با f_r مقایسه شوند مگر اینکه محور محلی (۱) المان‌های دیوار برشی به سمت قائم باشد که در این صورت باید $f_{۱۱}$ با f_r مقایسه شود.

دقت: با توجه به شکل (۱۲) تنش کششی ایجاد شده در دیوار، تنش محوری و در راستای قائم است.

تذکر: نرم‌افزار *ETABS* در هنگام ارائه نتایج تحلیل، به‌جای پارامتر $f_{۲۲}$ از عنوان $S_{۲۲}$ استفاده می‌کند.

B-۳- فاز سوم: کنترل ترک‌خوردگی دیوارهای برشی پروژه در ETABS

هدف از فاز سوم

در این فاز نحوهٔ کنترل ترک‌خوردگی دیوارهای برشی مربوط به این پروژه را در *ETABS* بررسی خواهیم کرد.

به منظور کنترل ترک‌خوردگی دیوارهای برشی، باید تنش قائم دیوار که با توجه به نحوهٔ ترسیم آنها ممکن است $S_{۱۱}$ یا $S_{۲۲}$ باشد (در اغلب موارد $S_{۲۲}$)، با مدول گسیختگی بتن (f_r) مقایسه شود. به این ترتیب هرجا که تنش موردنظر به f_r رسیده یا از آن بیشتر شده باشد، آن قسمت به‌صورت ترک‌خورده محسوب می‌شود.

حال برای انجام این روند در *ETABS*، مراحل زیر را انجام می‌دهیم:

۱- فایل اصلی طراحی که در آن اثرات $P-\Delta$ فعال است و ترکیب بارهای طراحی نیز تعریف شده‌اند را در نظر بگیرید.

۲- سازه را در فایل اصلی آنالیز کنید. سپس با کلیک روی آیکن ، نمای یکی از دیوارهای برشی موردنظر مانند نمای (۵) سازه را فعال نمایید.

۳- برای آنکه مطمئن شویم تنش‌های قائم در دیوارها $S_{۲۲}$ هستند، باید محورهای محلی المان‌ها را بررسی نماییم. بدین منظور آیکن را کلیک کرده و از برگهٔ *Object Assignments* مورد *Local Axes* را از بخش *Shell Assignments* انتخاب کنید. با بررسی المان‌های دیوار برشی متوجه می‌شوید که محور سبز رنگ (محور محلی ۲) برای همهٔ آنها در راستای قائم است و در نتیجه تنش $S_{۲۲}$ در دیوارها بیانگر تنش قائم محوری است که باید با تنش f_r مقایسه شود.

۴- حال برای مشاهدهٔ توزیع تنش $S_{۲۲}$ در دیوارها، مسیر زیر را انتخاب کرده یا کلید $F9$ را فشار دهید. همچنین می‌توانید بر روی آیکن کلیک نمایید.

Display > Force/Stress Diagrams > Shell Stresses/Forces

۵- پنجره‌ای با عنوان *Shell Forces/Stresses* باز می‌شود که برای مشاهدهٔ نیروهای داخلی و تنش‌های ایجاد شده در المان‌های صفحه‌ای (نظیر دیوار برشی و کف‌ها) به‌کار می‌رود.

برای مشاهدهٔ تنش $S_{۲۲}$ دیوارها تحت ترکیب بارهای طراحی، موارد زیر را در این پنجره انجام می‌دهیم:

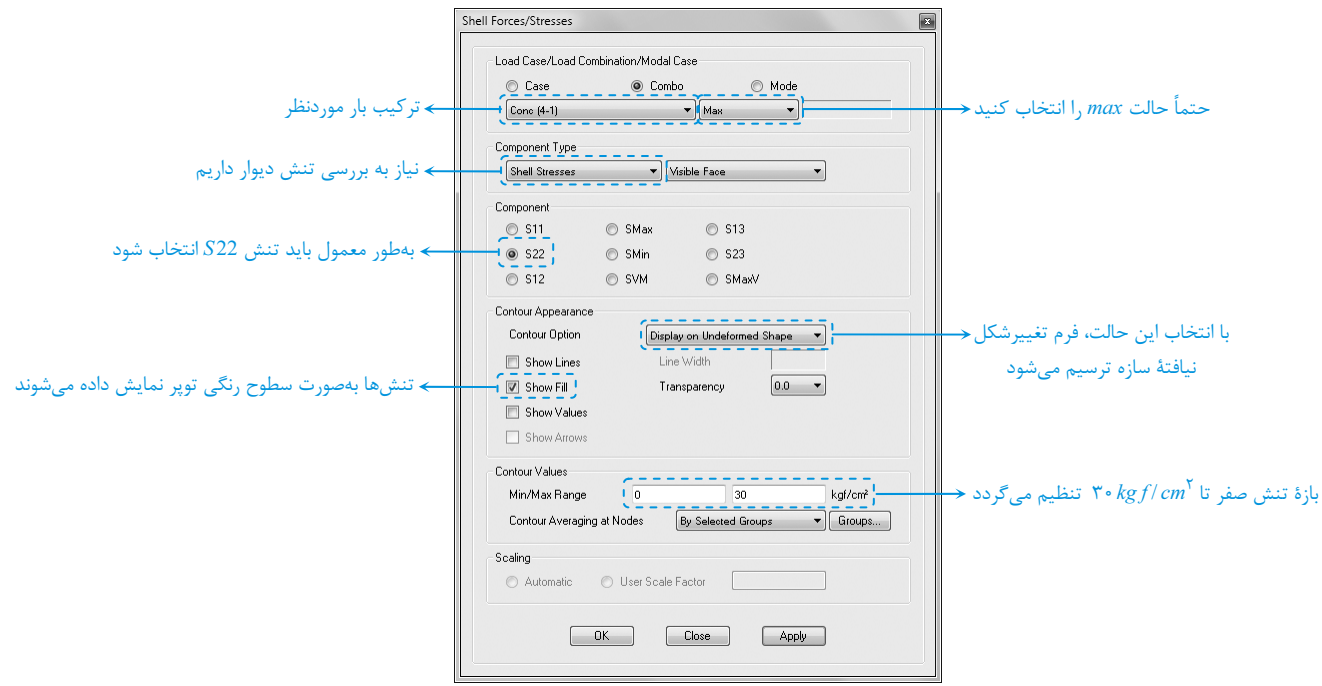
- در بخش بالای پنجره، حالت *Combo* را انتخاب کرده و سپس از لیست پایین آن، اولین ترکیب بار زلزله‌دار (ترکیب بار *Conc* 4-1) را برگزیده و حالت *max* جلوی آن را فعال می‌کنیم. دقت شود که این ترکیب بار مربوط به زلزلهٔ راستای X سازه است و در نتیجه بر دیوارهای راستای X سازه مؤثرتر است.

توجه مهم: از آنجاکه حداکثر مقدار تنش‌های کششی (تنش‌های مثبت) را می‌خواهیم کنترل کنیم، حتماً باید حالت *max* انتخاب شود.

- در بخش *Component Type* حالت *Shell Stresses* را انتخاب می‌کنیم زیرا قصد داریم تنش‌های ایجاد شده در داخل المان‌های دیوار را بررسی نماییم.
- سپس در بخش *Component*، تنش *S* 22 را فعال می‌کنیم که بیانگر تنش قائم محوری در المان‌های دیوار است.
- در بخش *Contour Appearance* تنظیمات گرافیکی مربوط به نمایش توزیع تنش دیوار انجام می‌شود. حالت پیش‌فرض این بخش که شامل موارد *Display on Undeformed Shape* و *Show Fill* است را می‌پذیریم (این موارد بهترین حالت نمایش تنش دیوارها می‌باشد، تأثیر سایر موارد را می‌توانید خود به راحتی امتحان نمایید).
- در بخش *Contour Values* توصیه می‌شود که مقدار حداقل و حداکثر تغییرات تنش را ارائه دهید. به همین منظور حداقل مقدار را برابر ۰ و حداکثر مقدار را برابر f_r تنظیم می‌کنیم. دقت شود که در این پروژه، مقدار f_r به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

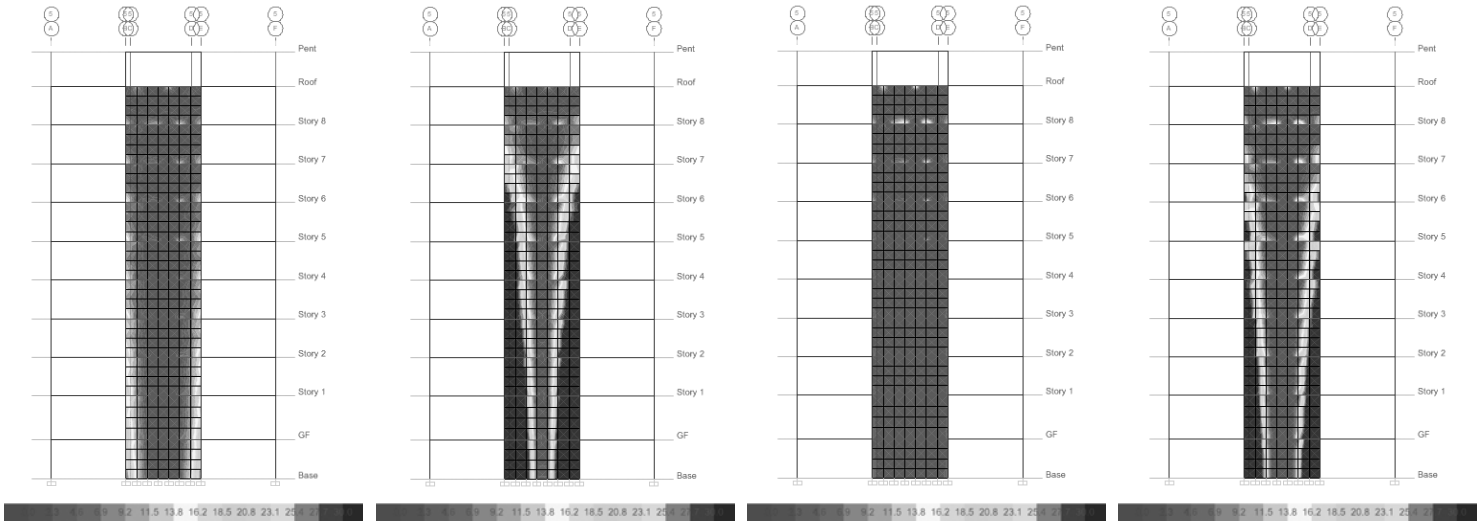
$$f_r = ۰/۶\,\lambda\sqrt{f_c} = ۰/۶\times۱\times\sqrt{۲۵} = ۳\ MPa \simeq ۳۰\ kgf/cm^۲$$

- در انتها روی دکمهٔ *Apply* کلیک نمایید تا توزیع تنش در دیوارهای برشی مشاهده شود.



شکل ۱۳: تنظیمات مربوط به پنجرهٔ کنتورهای تنش

۶- حال به بررسی دیوارهای راستای X سازه می‌پردازیم. به‌طور مثال مطابق شکل زیر، توزیع تنش $S22$ برای دیوار راستای X سازه در نمای (۵) در چهار ترکیب بار زلزله‌دار نشان داده شده‌اند.



ترکیب بار Conc (4-1) ترکیب بار Conc (4-2) ترکیب بار Conc (5-1) ترکیب بار Conc (5-2)

شکل ۱۴: توزیع تنش $S22$ برای دیوار راستای X سازه در نمای (۵) در ترکیب بارهای زلزله‌دار راستای X

همان‌طورکه در شکل‌های فوق مشاهده می‌کنید، توزیع تنش $S22$ توسط رنگ‌های مختلفی در سطح دیوار ارائه شده است که اصطلاحاً به آن، **کنتور تنش** (*Stress Contour*) می‌گوییم. دقت کنید که مقدار متناظر با هر یک از این رنگ‌ها، در پایین پنجرهٔ مدل بیان شده به‌طوری‌که:

- اگر تنش $S22$ در بخشی از دیوار برشی منفی باشد (یعنی فشاری باشد)، مقدار آن زیر صفر بوده و با رنگ بنفش نشان داده می‌شود.
- اگر تنش $S22$ در بخشی از دیوار برشی به‌صورت کششی بوده ولی هنوز به حد ترک‌خوردگی نرسیده باشد، مقدار آن بین صفر تا f_r است (در این پروژه بین ۰ تا ۳۰ kgf/cm^2). این محدوده‌ها برحسب مقدار تنش، به‌صورت رنگ‌های قرمز، نارنجی، زرد، سبز، فیروزه‌ای و آبی کم‌رنگ نشان داده می‌شوند.
- اگر تنش $S22$ در بخشی از دیوار به‌صورت کششی بوده و به حد ترک‌خوردگی رسیده باشد، مقدار آن باید از f_r (۳۰ kgf/cm^2 در این پروژه) تجاوز کند. این محدوده‌ها به‌صورت آبی پررنگ نمایش داده شده‌اند.

تذکر: ممکن است تنش $S22$ در ناحیهٔ بسیار کوچکی از دیوار بحرانی شود که البته نمی‌تواند معیار خوبی برای ترک‌خوردن دیوار محسوب شود. به همین دلیل مهندسان باتجربه توصیه می‌کنند که هرگاه ناحیهٔ ترک‌خوردگی براساس تنش از محدودهٔ یک مش با ابعاد حدودی ۱/۰ متر در ۱/۰ متر تجاوز کرد، آن دیوار در آن طبقه، ترک‌خورده منظور شود.

توجه ۱: محدودهٔ تنش صفر تا f_r را در پنجرهٔ *Shell Forces/Stresses* مشخص کرده‌ایم که براساس آن، سه حالت فوق نمایش داده شده است.

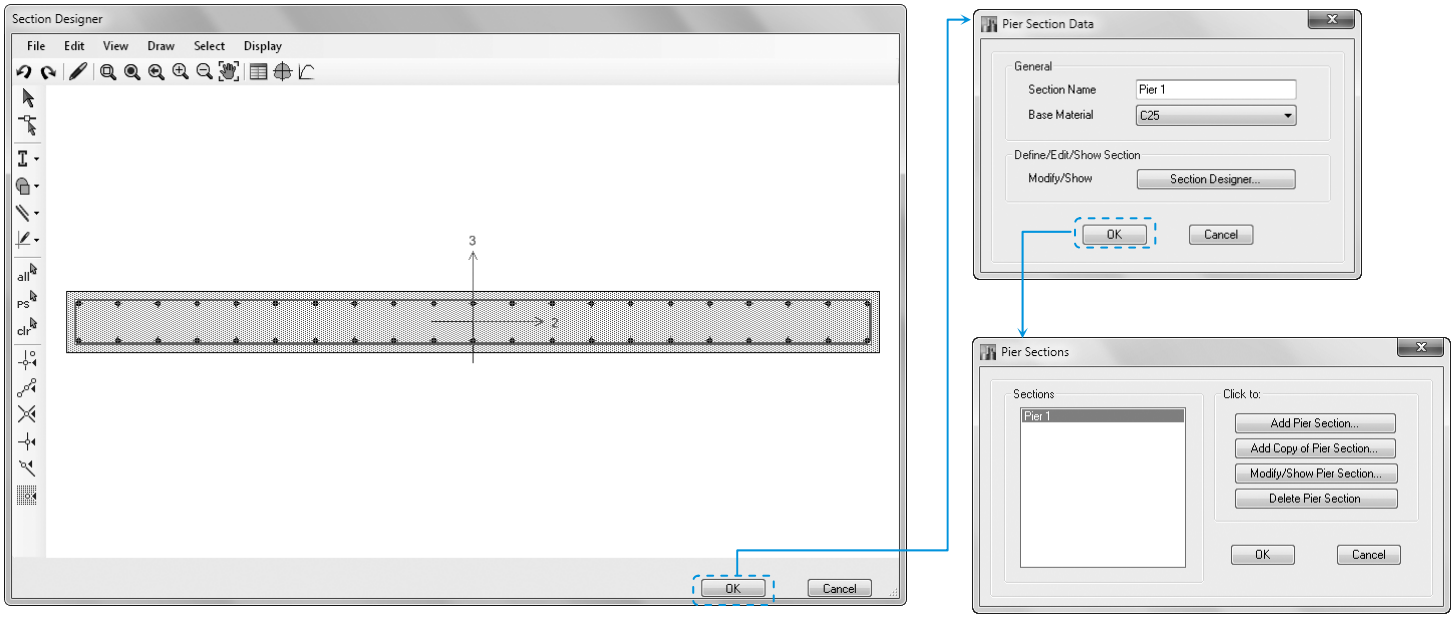
توجه ۲: رنگ‌های مورد استفاده برای نمایش کنتورهای تنش، از طریق مسیر *Options > Graphic Colors > Output* قابل تغییر هستند که البته نیازی به انجام این کار نبوده و پیش‌فرض‌های *ETABS* مناسب می‌باشند.

توجه ۳: چنانچه نشانگر موس را روی نواحی مختلف دیوار برشی ببرید، مقدار تنش ایجاد شده در آن محل در کنار نشانگر موس و همچنین در پایین پنجرهٔ *ETABS* نشان داده می‌شود.

توجه ٤: اگر روی هر یک از المان‌های دیوار برشی راست کلیک کنید، پنجرهٔ کوچکی به نام *Area Diagram* مطابق شکل روبرو باز خواهد شد که تغییرات کنتور تنش در المان موردنظر را به‌طور دقیق‌تری نشان می‌دهد.

شکل ۱۵: توزیع تنش در یکی از المان‌های دیوار برشی

۷- در نهایت با *OK* کردن تنظیمات پنجرهٔ *Section Object Data* دیوار برشی موردنظر تکمیل می‌شود. سپس با *OK* کردن پنجرهٔ *Section Designer* و در ادامه *OK* کردن پنجرهٔ *Pier Section Data* ، مقطع دیوار موردنظر به لیست پنجرهٔ *Pier Section* اضافه خواهد شد.



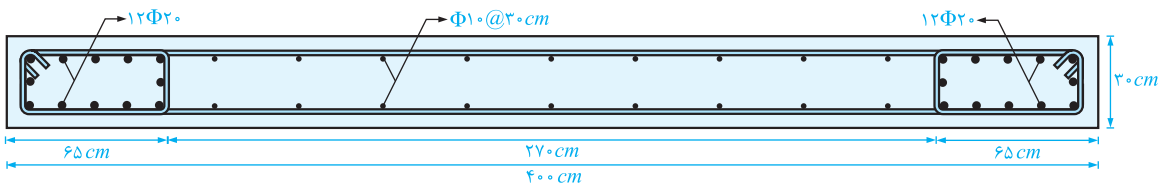
شکل ۲۰: نحوهٔ تکمیل معرفی مقطع دیوار برشی

۳-A- فاز سوم: ترسیم یک دیوار برشی دلخواه با مقطع مستطیلی و آرماتورگذاری غیریکنواخت

هدف از فاز سوم

در این فاز می‌خواهیم با نحوهٔ آرماتورگذاری غیریکنواخت دیوار در برنامهٔ *SD* آشنا شویم. در واقع قصد داریم در ادامهٔ فاز قبل، راهکارهای ترسیم آرماتورگذاری متراکم در دیوار را یاد بگیریم.

مقطع یک دیوار برشی را مطابق شکل زیر در نظر بگیرید که ابعاد آن مشابه دیوار شکل (۸) است ولی دارای آرماتورگذاری غیریکنواخت می‌باشد. طرفین این دیوار دارای یک محدودهٔ ۶۵ سانتی‌متری از آرماتورگذاری فشرده است که دارای ۱۲ Φ ۲۰ بوده و در بخش‌های میانی آن آرماتورها به‌صورت Φ۱۰@۳۰ *cm* می‌باشند. برای ترسیم این دیوار برشی در محیط *SD* چهار راهکار کلی وجود دارد که در ادامه، آنها را بررسی می‌کنیم.



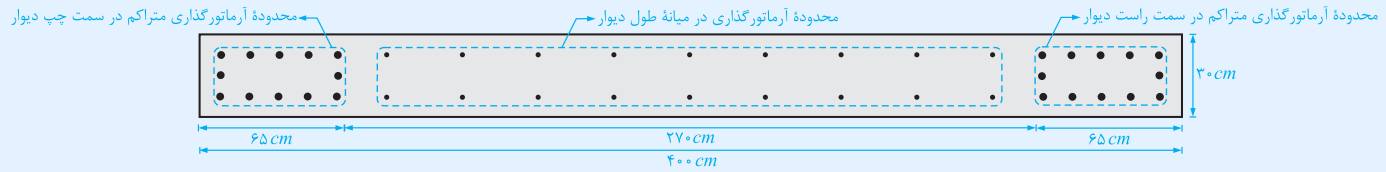
شکل ۲۱: مقطع دیوار برشی موردنظر برای ترسیم در محیط *SD*

راهکار اول

در راهکار اول قصد داریم در یک مقطع مستطیلی ترسیمی، سه محدودهٔ آرماتورگذاری شکل صفحهٔ قبل را به‌صورت دستی ایجاد نماییم. برای انجام این روش مراحل زیر را طی می‌کنیم:

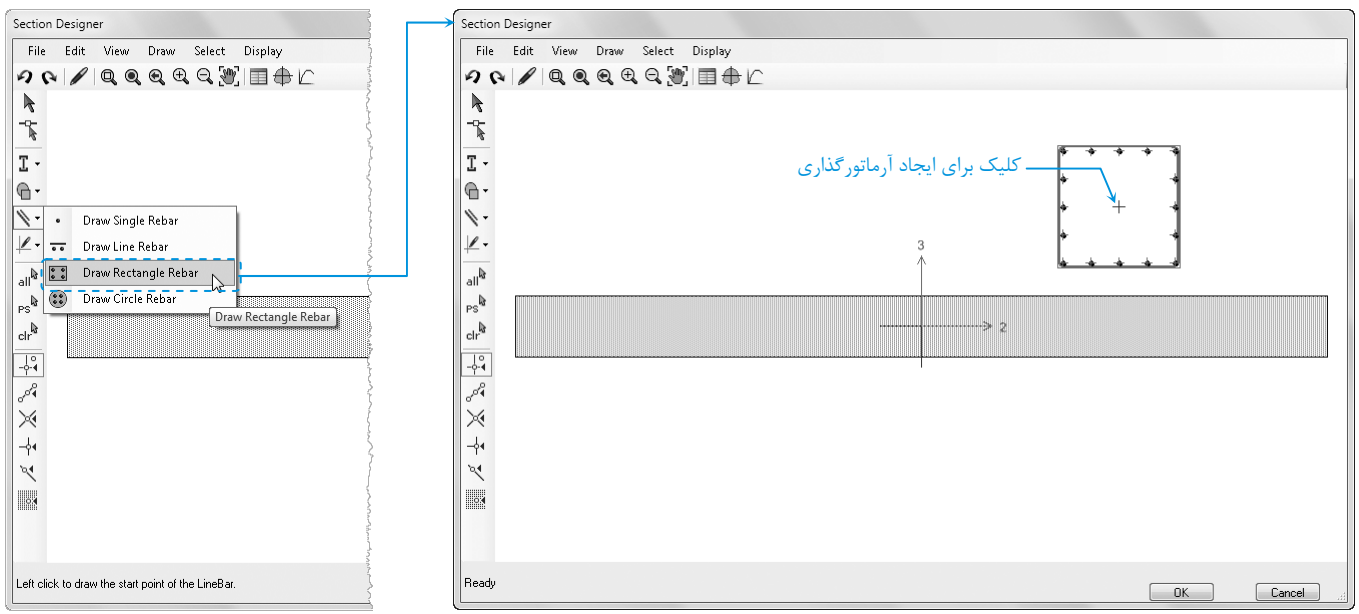
۱- در محیط *SD* یک مستطیل با عرض ۳۰ *cm* و طول ۴۰۰ *cm* ایجاد کرده و پارامتر *Reinforcing* مربوط به آن را به‌صورت *No* تنظیم می‌کنیم تا آرماتوری در آن رسم نشود.

اگر به شکل زیر دقت کنید، خواهید دید که هر یک از سه محدودهٔ آرماتورگذاری شده در این دیوار مشابه یک مستطیل هستند. به همین دلیل از قابلیت مجموعهٔ آرماتورگذاری مستطیلی (*Draw Rectangular Rebar*) در *SD* بهره می‌گیریم که در آن می‌توان هر یک از دسته‌های آرماتورگذاری را به تفکیک ترسیم نمود.



شکل ۲۲: محدوده‌های آرماتورگذاری شده در دیوار موردنظر

۲- برای استفاده از این قابلیت، آیکن ▣ را انتخاب کرده و در صفحهٔ *SD* کلیک می‌کنیم تا یک مجموعهٔ آرماتورگذاری پیش‌فرض به شکل مستطیلی ایجاد شود.



شکل ۲۳: نحوهٔ ایجاد یک آرماتورگذاری مستطیلی در محیط *SD*

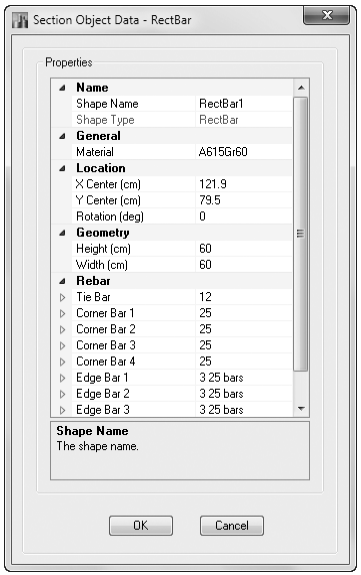
۳- حال این آرماتورگذاری را انتخاب کرده و در داخل آن راست کلیک نمایید تا پنجرهٔ تنظیمات آن باز شود (شکل ۲۴). همان‌طورکه در پنجرهٔ *Section Object Data* مربوط به این مجموعهٔ آرماتورگذاری مشاهده می‌کنید، همهٔ پارامترهای موجود در این پنجره مشابه با پارامترهای آرماتورگذاری یک مستطیل است (مشابه شکل ۱۳).

۴- مطابق شکل زیر، اگر بخواهیم این مجموعهٔ آرماتورگذاری را به‌عنوان آرماتورگذاری موردنظر در گوشهٔ سمت چپ دیوار به کار بگیریم، مشخصات هندسهٔ آن به شرح زیر تعیین می‌گردد.

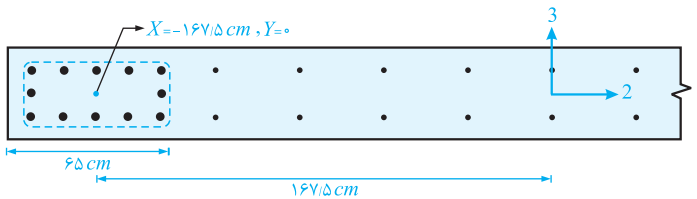
- مختصات مرکز این مجموعه آرماتورها را به‌صورت (۱۶۷/۵،۰-) در نظر می‌گیریم.
- این مجموعه آرماتور قرار است در مستطیلی به ابعاد $۳۰\times۶۵\ cm$ قرار گیرد ولی هنگام ارائه پارامترهای *Height* و *Width* به آن، باید ضخامت کاور خالص روی خاموت‌ها کم شود.

$۲۷\times۶۲\ cm$: ابعاد مجموعهٔ آرماتورگذاری $\Rightarrow$ $۳\ cm$: فرض کاور خالص روی خاموت‌ها

- قطر و تعداد آرماتورها در گوشه و لبهٔ این مجموعه باید مطابق توضیحات فاز قبلی ارائه شود.

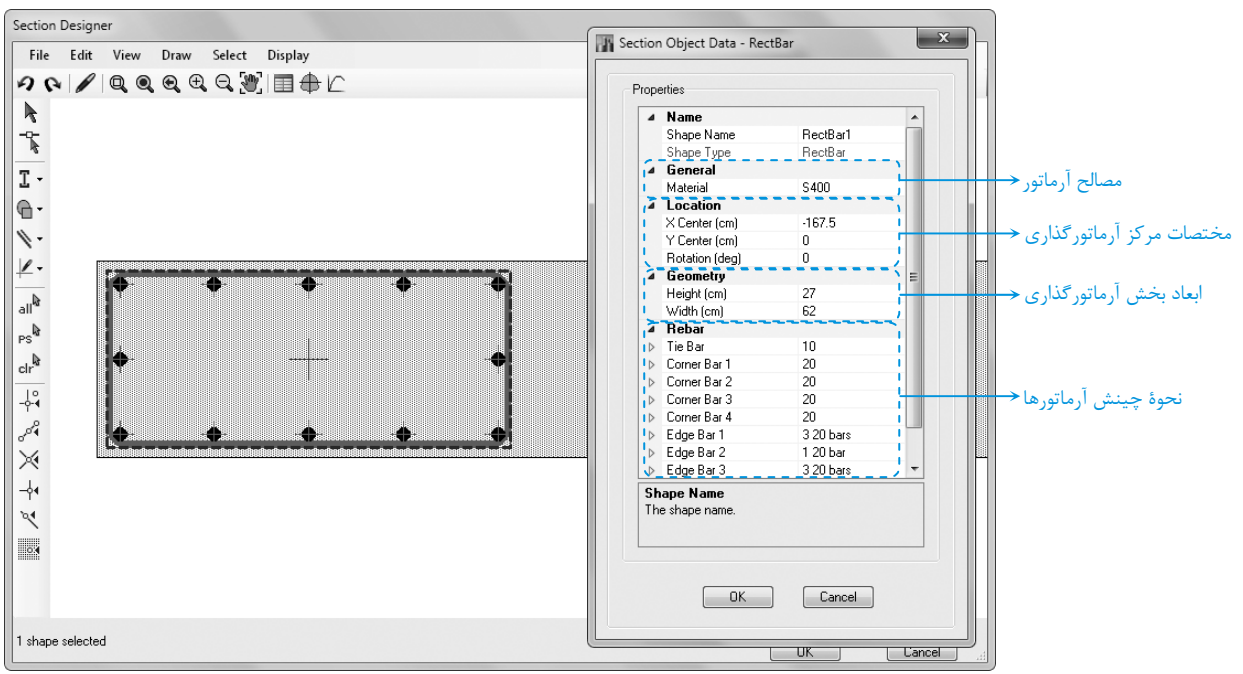


شکل ۲۴: پنجرهٔ تنظیمات یک آرماتورگذاری دلخواه

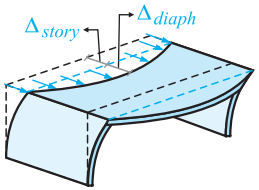


شکل ۲۵: پارامترهای مجموعهٔ آرماتور متراکم در سمت چپ دیوار

۵- حال با تکمیل مشخصات این آرماتورگذاری، در شکل زیر آرماتورهای سمت چپ دیوار را ایجاد می‌کنیم.



شکل ۲۶: ایجاد آرماتورگذاری سمت چپ دیوار



شکل ۲۱: تغییرشکل دیافراگم تحت بار جانبی

$\frac{\Delta_{diaph}}{\Delta_{story}} < ۰/۵ \Rightarrow$ دیافراگم صلب

$۰/۵ \le \frac{\Delta_{diaph}}{\Delta_{story}} \le ۲/۰ \Rightarrow$ دیافراگم نیمه‌صلب

$\frac{\Delta_{diaph}}{\Delta_{story}} > ۲/۰ \Rightarrow$ دیافراگم انعطاف‌پذیر

تذکر: اصولاً دیافراگم‌های انعطاف‌پذیر در سازه‌های ساختمانی کاربرد چندانی نداشته و در این سازه‌ها دیافراگم‌های صلب یا نیمه‌صلب استفاده می‌شوند.

در مناطق لرزه‌خیز سعی مهندسان طراح ساختمان آن است که اعضای سازه‌ای در تراز هر طبقه به هم بسته شده و به‌عنوان یک واحدِ یکپارچه عمل کنند. برای ایجاد یکپارچگی سازه در هنگام زلزله، باید کلیهٔ اعضای قائم سیستم باربر جانبی با استفاده از کف‌ها به هم متصل شده به‌طوری‌که کف‌ها نیروهای ناشی از زلزله را به آنها منتقل کنند. به همین دلیل، همواره استفاده از دیافراگم صلب که یکپارچگی ایده‌آل‌تری نسبت به دیافراگم نیمه‌صلب دارد، توصیه می‌شود. به هر حال لازم است تا با توجه به ویژگی‌های سقف سازه، صلب بودن یا نیمه‌صلب بودن آن براساس ضوابط آیین‌نامه بررسی گردد.

کنترل صلبیت دیافراگم سازه در ETABS

برای کنترل صلبیت دیافراگم در نرم‌افزار *ETABS* باید مراحل زیر را طی کنید:

۱- ابتدا باید مقدار دریفت طبقات در فایل اصلی مدل تعیین شود که برای کنترل صلبیت دیافراگم آن را با نام Δ_{story} می‌شناسیم. برای انجام این کار دو روش را می‌توان پیشنهاد داد که هر دو از طریق مسیر *Display > Show Tables* قابل دسترسی هستند:

- در روش اول می‌توان مقدار *Diaphragm Center of Mass Displacements* را درخواست داد که تغییرمکان مرکز جرم طبقات را می‌دهد و سپس از طریق اختلاف تغییرمکان‌های دو طبقهٔ متوالی، دریفت هر طبقه (Δ_{story}) را تعیین کرد.
- در روش دوم می‌توان مقدار *Diaphragm Max/Avg Drifts* را درخواست داد و مقدار ستون *Avg Drift* را به‌عنوان دریفت میانگین هر طبقه (Δ_{story}) در نظر گرفت.

توجه: مقادیر به‌دست آمده از دو روش فوق، ممکن است بعضاً اندکی تفاوت داشته باشند. در جدول زیر این مقادیر را از هر دو روش، برای جهت *Y* سازه به‌دست آورده‌ایم.

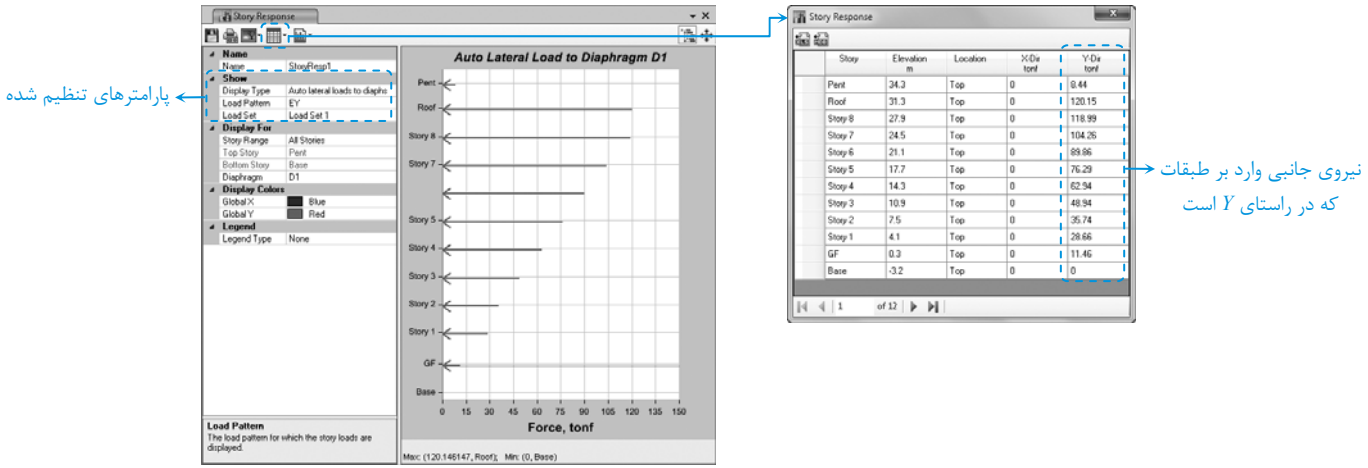
جدول ۹: تعیین مقادیر Δ_{story} از دو طریق مختلف (تحت بار *EY*)

		Roof	*Story 8*	*Story 7*	*Story 6*	*Story 5*	*Story 4*	*Story 3*	*Story 2*	*Story 1*	*GF*
از طریق *Diaph Displacements*	تغییرمکان (*mm*)	۶۹/۰۴	۶۰/۶۶	۵۲/۲۰	۴۳/۶۷	۳۵/۱۸	۲۶/۸۶	۱۸/۹۲	۱۱/۸۳	۶/۰۶	۱/۶۴
	دریفت (*mm*)	۸/۳۸	۸/۴۶	۸/۵۲	۸/۵۰	۸/۳۲	۷/۹۴	۷/۱۰	۵/۷۷	۴/۴۲	۱/۶۴
از طریق *Diaph Drifts*	دریفت نسبی	۰/۰۰۲۴۶۴	۰/۰۰۲۴۸۹	۰/۰۰۲۵۰۷	۰/۰۰۲۴۹۹	۰/۰۰۲۴۴۶	۰/۰۰۲۳۳۶	۰/۰۰۲۰۸۷	۰/۰۰۱۶۹۶	۰/۰۰۱۳۷۹	۰/۰۰۰۴۶۷
	دریفت (*mm*)	۸/۳۸	۸/۴۶	۸/۵۲	۸/۵۰	۸/۳۲	۷/۹۴	۷/۱۰	۵/۷۷	۵/۲۴	۱/۶۳

۲- دیگر نتیجه‌ای که باید از فایل اصلی مدل برداشت شود، مقدار نیروی جانبی وارد بر طبقات سازه تحت بار زلزله است. مقدار این نیرو را می‌توانید به یکی از روش‌هایی که بیان می‌کنیم به‌دست آورید:

- از طریق مسیر *Display > Show Tables* مقدار *Story Forces* را درخواست داده و برش هر طبقه در راستای موردنظر را تعیین کنید. مثلاً برای بررسی صلبیت دیافراگم در جهت *Y*، مقدار *VY* را تحت بار *EY* بخوانید. سپس از تفاضل برش طبقات، نیروی وارد بر هر طبقه تحت بار *EY* به‌دست می‌آید.

از طریق مسیر *Display > Story Response Plots* مقدار بار جانبی وارد بر هر طبقه تحت حالت بار استاتیکی را درخواست دهید. برای این منظور پارامتر *Auto Lateral Loads to diaphs* را تحت بار *EY* فعال کرده و سپس مقادیر این بارها را به‌دست آورید. این موضوع در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۲۲: تعیین نیروهای جانبی وارد بر طبقات سازه تحت بار *EY*

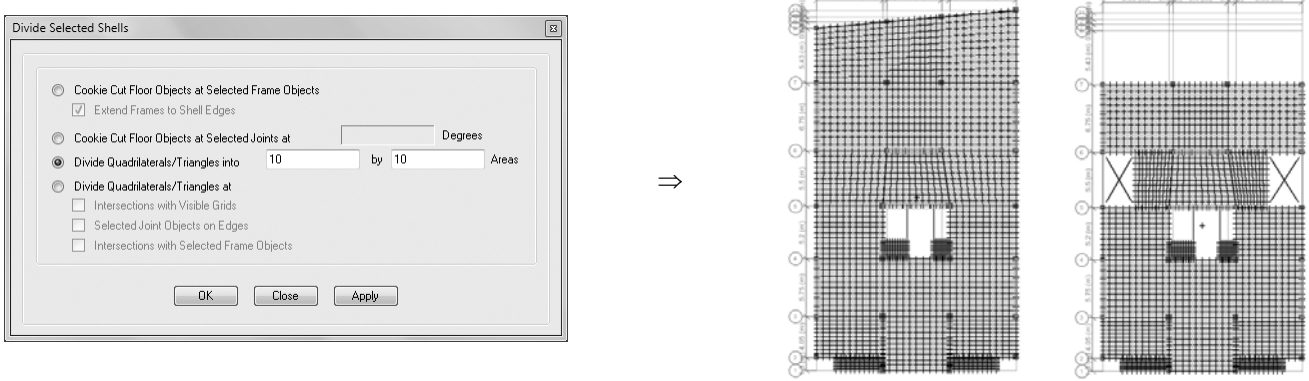
دید مهندسی

برای محاسبهٔ تغییرشکل افقی ایجاد شده در دیافراگم‌ها، باید از نیروی جانبی (و نه برش طبقه) استفاده شود زیرا نیروی جانبی به دیافراگم وارد می‌شود و برش طبقه (که مجموع نیروهای برشی طبقات فوقانی تا طبقهٔ موردنظر است) به اجزای باربر قائم نظیر دیوارهای برشی می‌رسد.

۳- حال از فایل اصلی مدل یک *Save As* بگیرید. این فایل را می‌توانید با نامی نظیر «*Concrete Project 2 - Diaph Check.EDB*» ذخیره کنید.

۴- در این فایل جدید ابتدا از طریق منوی *Select* همهٔ کف‌های سازه را انتخاب کرده و المان سطحی از نوع *Shell* یعنی «*S 20 – Shell*» را به آنها اختصاص دهید. دقت شود که برای کنترل صلبیت دیافراگم، حتماً باید کف‌ها از نوع *Shell* باشند تا تغییرشکل‌های درون صفحه (Δ_{diaph}) بتواند در آنها ایجاد شود.

۵- سپس دوباره همهٔ کف‌های سازه را انتخاب کرده و از طریق مسیر *Edit > Edit Shells > Divide Shell* همهٔ آنها را به‌صورت دستی مش بزنید. انتخاب حالت مش‌بندی ۵×۵ یا ۱۰×۱۰ می‌تواند مناسب باشد. دقت کنید که برای کنترل صلبیت دیافراگم، حتماً باید کف‌های سازه مش بخورند که البته می‌تواند به‌صورت اتوماتیک یا دستی باشد (مش دستی جواب‌های بهتری می‌دهد).



شکل ۲۳: مش زدن کف‌های سازه به‌طور دستی در فایل کنترل صلبیت دیافراگم