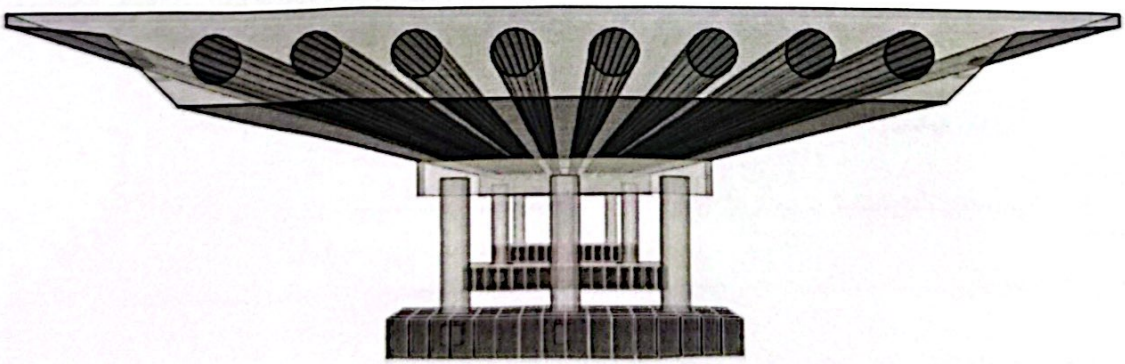
دانشگاه تهران
دانشکده مهندسی عمران

پروژه طراحی لرزه‌ای پل

گردآورندگان:

محمد امین زندی – ۸۱۰۲۰۰۱۶۸
ویدا شاهواروقی – ۸۱۰۲۰۰۱۷۷

استاد راهنما:
جناب آقای دکتر خان‌محمدی



زمستان ۱۴۰۱

Etabs-SAP.ir
csiBridge.blog.ir

Scanned with CamScanner

Etabs-SAP.ir

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات

۱-۱ مشخصات پروژه ۵

۱-۲ مشخصات مصالح ۷

۱-۳ آیین نامه های مورد استفاده ۷

۱-۴ نرم افزارهای مورد استفاده برای تحلیل و طراحی ۷

فصل دوم: بارگذاری

۲-۱ مقدمه ۸

۲-۱ بارهای دائمی ۹

۲-۲ بارهای بهره‌برداری ۱۲

۲-۲-۱ بارهای زنده ۱۲

۲-۲-۲ اثر ترمز ۱۹

۲-۲-۳ نیروی گریز از مرکز ۱۹

۲-۲-۴ بارهای پیاده‌رو ۲۰

۲-۲-۵ نیروهای بلندکننده ۲۰

۲-۲-۶ غوطه‌وری ۲۱

۲-۲-۷ بارهای ناشی از برخورد وسایل نقلیه ۲۱

۲-۲-۸ فشار جانبی خاک ۲۱

۲-۳ بار باد ۲۲

Scanned with CamScanner

Etabs-SAP.ir

۲-۴ بار زلزله ۲۳
۲-۵ نیروهای ناشی حرارت ۳۰

فصل سوم: حالات بار و ترکیبات بارگذاری

۳-۱ الگوهای بار ۳۳
۳-۲ ترکیبات بار ۳۵
۳-۳ ترکیبات مورد استفاده در نرم‌افزار SAP ۳۶

فصل چهارم: مدلسازی در نرم‌افزار

۴-۱ معرفی مقاطع و مصالح ۳۷
۴-۲- معرفی تکیه‌گاه‌ها ۴۴
۴-۳ اختصاص اجزای پل ۴۶

فصل پنجم: آنالیز در نرم‌افزار

۵-۱ تعریف تابع طیف پاسخ (Response Spectrum Function) ۴۹
۵-۲ خروجی نرم‌افزار CSI Bridge ۵۰
۵-۳ خروجی نرم‌افزار SAP2000 (V24) ۵۰

فصل ششم: طراحی بر اساس نیرو (Force Based Design)

۶-۱ طراحی الاستومرها ۵۱
۶-۲ طراحی ستون‌ها ۵۹
۶-۲-۱ طراحی خمشی ستون‌ها ۵۹
۶-۲-۲ طراحی برشی ستون‌ها ۶۷

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

فصل هفتم: طراحی بر اساس تغییرمکان (Displacement Based Design)

۷-۱ مقدمه ۷۱

۷-۲ ضوابط طراحی بر اساس آشتو ۷۲

۷-۳ تحلیل خطی و محاسبه تقاضا تغییرمکانی ۷۳

۷-۴ تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌آور) و محاسبه ظرفیت تغییرمکانی ۷۴

۷-۴-۱ کلیات ۷۴

۷-۴-۲ تغییرمکان هدف ۷۶

۷-۴-۳ تعریف مشخصات غیرخطی ۷۷

۷-۴-۴ پوش سازه (Pushover) ۸۳

۷-۵ کنترل تغییرمکانی سازه ۸۵

۷-۶ کنترل شکل‌پذیری سازه ۸۶

۷-۷ کنترل P-Δ ۸۹

۷-۸ کنترل حداقل و حداکثر آرماتور طولی و قطر آن ۸۹

۷-۹ طراحی و کنترل آرماتورهای برشی طبق AASHTO ۹۰

۷-۱۰ کنترل حداقل طول نشیمن الاستومر ۹۲

۷-۱۱ کنترل گره اتصال ۹۳

۷-۱۲ کنترل نسبت بعد ستون به ضخامت عرشه ۹۵

Scanned with CamScanner

Etabs-SAP.ir

فصل اول: کلیات

۱-۱ مشخصات پروژه

این پروژه طراحی پلی با طول ۸۴ متر است که هر مسیر آن ۲ دهانه میانی ۲۳ متری و دو دهانه کناری ۱۹ متری دارد و به طور کلی تعداد ۸ رمپ و لوپ ورودی و خروجی را دارا می‌باشد.

عرض کلی پل ۱۷/۹ متر است که شامل چهار خط عبوری در هر مسیر (۱۴/۴ متر) و عرض شانه راه (۳/۵ متر) می‌باشد. عرض هر خط عبور ۳/۶ متر در نظر گرفته شده است.

سیستم روسازه از نوع عرشه بتنی جعبه‌ای مجوف انتخاب شده است. (با توجه به طول دهانه‌ها)

پایه پل شامل یک سرستون به طول ۱۱/۵ متر (تقریبا در بعد پایین)، عرض ۲ متر و ارتفاع ۱/۱۵ متر و سه ستون دایره‌ای به قطر ۱/۱۵ متر می‌باشد.

ارتفاع ستون‌های پل ۶/۵۵ متر و ارتفاع عرشه ۱/۳ متر می‌باشد.

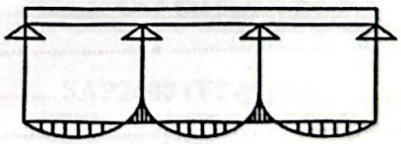
این پل در طبقه‌بندی پل‌های تخت قرار می‌گیرد که در ادامه به بررسی این دسته از پل‌ها می‌پردازیم:

← پل‌های تخت برای دهانه‌های متوسط ۸ تا ۱۰۰ متر به کار برده می‌شود.

← عبورگاه این پل‌ها معمولاً از نوع دال تخت، دال و تیر و یا تیر تنها ساخته می‌شود. مقطع عبورگاه در طول دهانه ممکن است ثابت یا متغیر باشد.

← از نظر استاتیکی عبورگاه به صورت دهانه ساده یا یکسره بر روی چند دهانه ساخته شود.

عرشه پیوسته

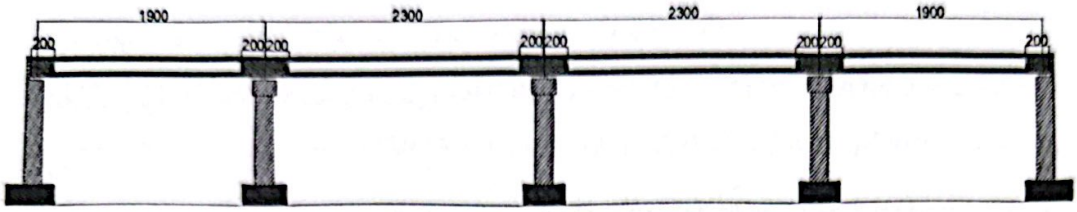


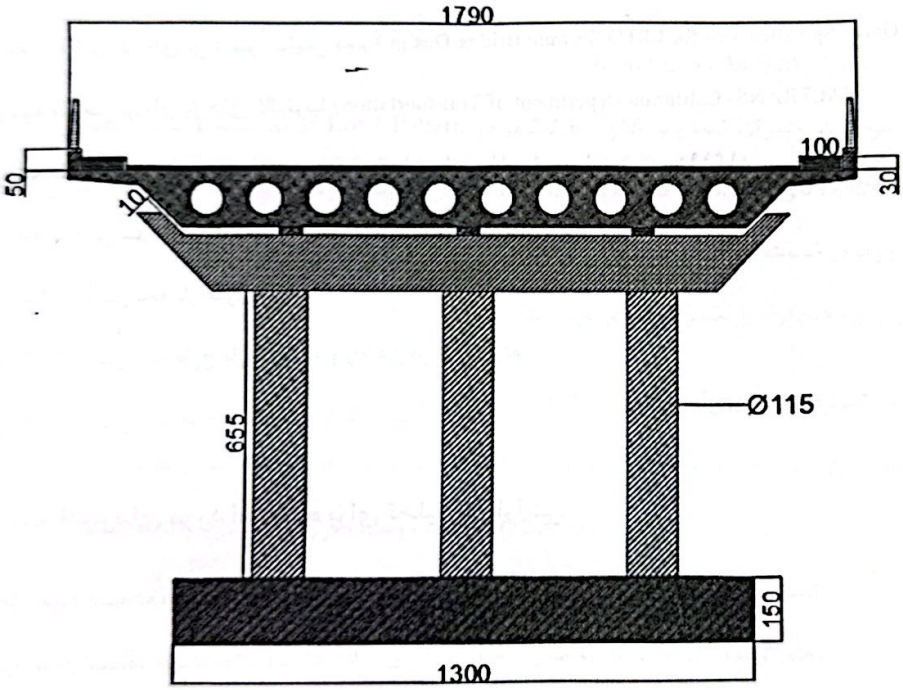
عرشه با دهانه های ساده

← مزیت استفاده از عرشه پیوسته نسبت دهانه ساده، عدم وجود درز انبساط در تکیه‌گاه‌ها است. وجود درز انبساط هزینه‌های اجرایی و نگهداری زیادی راه تحمیل می‌کند. اجرای نادرست این درزها باعث به وجود آمدن ناهمواری‌هایی در سطح پل می‌شود. مزیت دیگر پیوسته بودن عرشه در ضریب اطمینان بالاتر در مقابل خرابی هاست اما در مقابل تغییرات نشست تکیه‌گاهی بسیار حساس است.

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

مشخصات هندسی و نمای کلی پل در شکل زیر نمایش داده شده است.





Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

۱-۲ مشخصات مصالح

بتن با مقاومت فشاری ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع برای عرشه

بتن با مقاومت فشاری ۲۸۰ کیلوگرم بر سانتی مترمربع برای پایه‌ها و بی‌ها و کوله‌ها

میلگردها از نوع AIII و AII با سختی طبیعی و حداقل مقاومت جاری شدن ۴۰۰۰ و ۳۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع می‌باشند

الاستومری با قطر ۷۵ سانتی‌متر، ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و مدول برشی ۱/۲ مگاپاسکال

۱-۳ آیین نامه های مورد استفاده

آیین نامه طراحی پل آشتو ویرایش نهم (AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 2020)

آیین نامه طراحی لرزه‌ای پل آشتو ویرایش دوم (AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design)

آیین نامه طراحی لرزه‌ای پل‌های کالیفرنیا (CALTRANS- California Department of Transportation)

آیین نامه طراحی سازه های بتنی: مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ویرایش پنجم (۱۳۹۹)

آیین نامه طراحی سازه های فولادی: مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ویرایش پنجم (۱۴۰۰)

نشریه ۱۳۹ - آیین نامه بارگذاری پل‌ها

نشریه ۴۶۳ - آیین نامه طرح پل های راه و راه‌آهن در برابر زلزله

نشریه ۳۸۹ – آیین نامه طرح و محاسبه پل‌های بتن‌آرمه

۱-۴ نرم افزارهای مورد استفاده برای تحلیل و طراحی

نرم افزار مورد استفاده برای تحلیل و طراحی سازه: SAP2000 و CSiBridge و AutoCAD

نرم‌افزار مورد استفاده جهت محاسبات: Excel

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

فصل دوم: بارگذاری

۲-۱ مقدمه

در این فصل، بارهای وارد بر پل محاسبه شده و نحوه تعیین بارگذاری مدل سازه‌ای پل در نرم‌افزار تشریح می‌شود. تعریف بارها در برنامه در منوی Loads و اختصاص بارها به اجزای روسازه در منوی Bridge Object صورت می‌پذیرد. اما بارهای استاتیکی وارد بر اجزای زیرسازه باید به صورت دستی اختصاص داده شوند.

★ تذکر: بارهای اختصاص داده شده به صورت دستی، پس از بروزرسانی مدل (Update) از بین خواهند رفت.

⊗ اختصاص بارگذاری (Load Assignment)

← اختصاص بار متمرکز (Point Load Assign)

در خصوص بار متمرکز، ابتدا باید الگوی بارگذاری در Load Pattern تعریف شده و سپس مقدار بار در Load Distribution تعریف گردد. در قسمت Start Station باید موقعیت قرارگیری بار روی روسازه در راستای طولی پل، تعداد بارها در قسمت Number و همچنین فاصله میان آن‌ها در Spacing مشخص گردد.

در این پروژه هیچ‌گونه بار متمرکزی روی عرشه نداریم.

← اختصاص بار گسترده خطی (Line Load Assign)

در خصوص بار گسترده خطی، ابتدا باید الگوی بارگذاری در Load Pattern تعریف شده و سپس مقدار بار در Load Distribution تعریف گردد. در قسمت Start Station باید موقعیت قرارگیری شروع و در قسمت End Section محل پایان بار گسترده خطی در راستای طولی پل، مشخص گردد.

در این پروژه بارهای نرده در دو طرف پل به صورت خطی وارد می‌شوند.

← اختصاص بار گسترده سطحی (Area Load Assign)

در خصوص بار گسترده سطحی، ابتدا باید الگوی بارگذاری در Load Pattern تعریف شده و سپس مقدار بار در Load Distribution تعریف گردد. در قسمت Start Station باید موقعیت قرارگیری شروع و در قسمت End Section محل پایان بار گسترده روی روسازه در راستای طولی پل، مشخص گردد.

در این پروژه بارهای آسفالت و پیاده‌رو به صورت سطحی وارد می‌شوند.

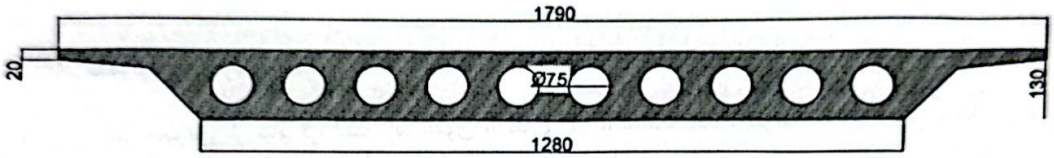
Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

۲-۱ بارهای دائمی

بارهای دائمی اثرکننده بر پل شامل وزن اجزای باربر و غیرباربر تشکیل‌دهنده پل و نیز وزن خاک روی عرشه پل می‌باشد. اجزای باربر پل قطعاتی هستند که نقش سازهای داشته و در انتقال بار به تکیه‌گاه نقش دارند. در برآورد این بار لازم است کلیه اجزای باربر و غیرباربر پل به طور مجزا شناسایی شده و وزن آنها تعیین شود. جهت برآورد وزن اجزای باربر و غیر باربر پل وزن هر یک از مصالح مصرفی بر اساس جداول مبحث ششم از مقررات ملی ساختمان تعیین می شود

⊗ بار مرده ناشی از عرشه

← وزن مقطع عرشه مجوف



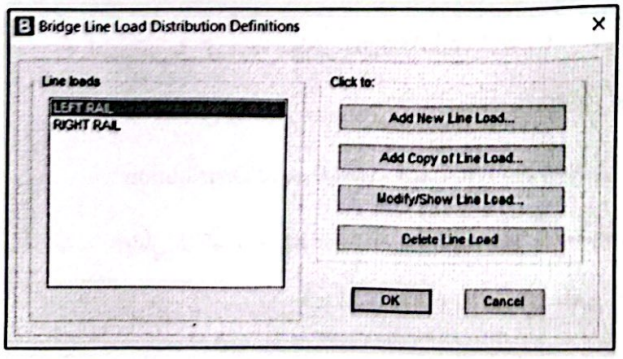
$$\left(۲۱۶۱۳۲.۸۹۱۲\ cm^۲ - ٤٤١٦ \times ۱۰\ cm^۲\right) \times ۲٤۰۰\ \frac{kg}{m^۳} \times ۱۰^{-۷} = ٤۲\ \frac{t}{m}$$

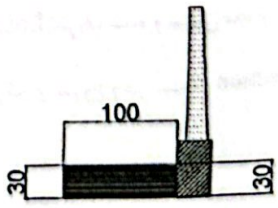
← وزن قسمت پر شده با بتن (هر ۲ متر)

$$۱۰ \times \frac{\pi \times ۷۵ \times ۷۵}{٤}\ cm^۲ \times ۲٤۰۰\ \frac{kg}{m^۳} \times ۲\ m \times ۱۰^{-۷} = ۲۲\ t$$

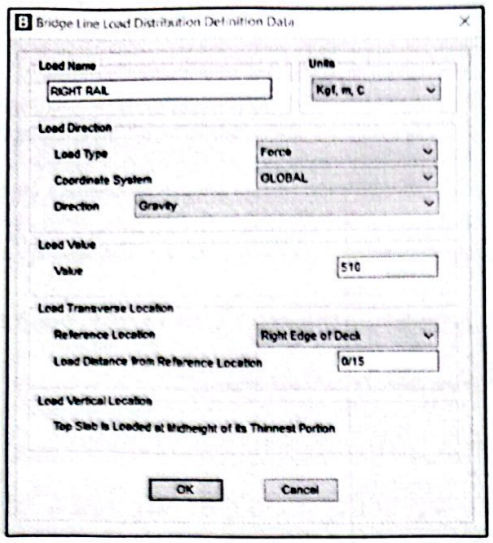
← وزن نرده‌ها

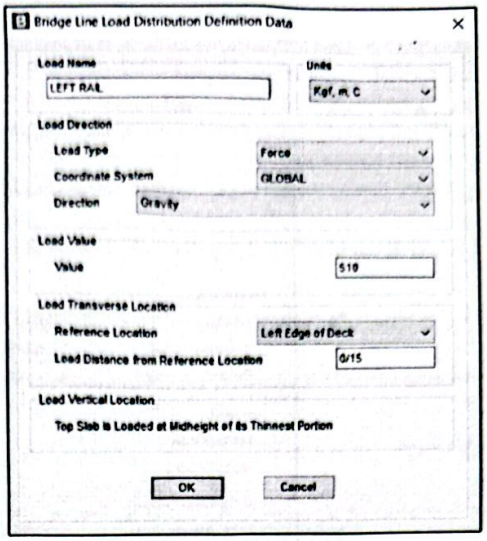
$$\left(۰.۳\ m \times ۰.۵\ m \times ۲.٤\ \frac{t}{m^۲}\right) + ۰.۱۵\ \frac{t}{m} = ۰.۵۱\ \frac{t}{m}$$ نرده‌ها





Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

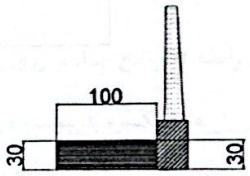


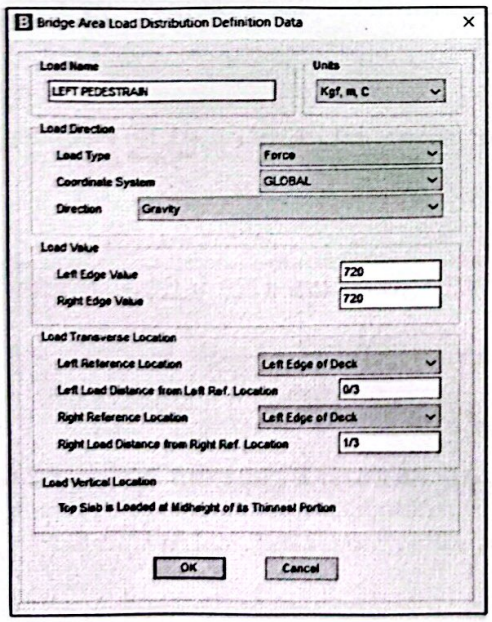


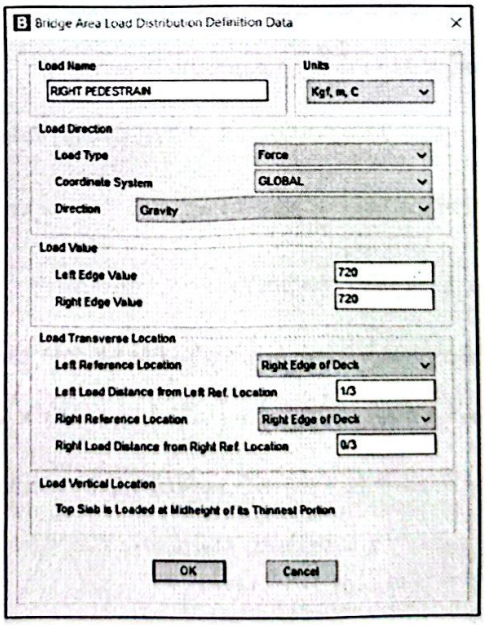
—

← وزن پیاده‌رو

پیاده‌رو $۰.۳\,m \times ۲.٤\,\frac{t}{m^۳} = ۰.۷۲\,\frac{t}{m^۲}$



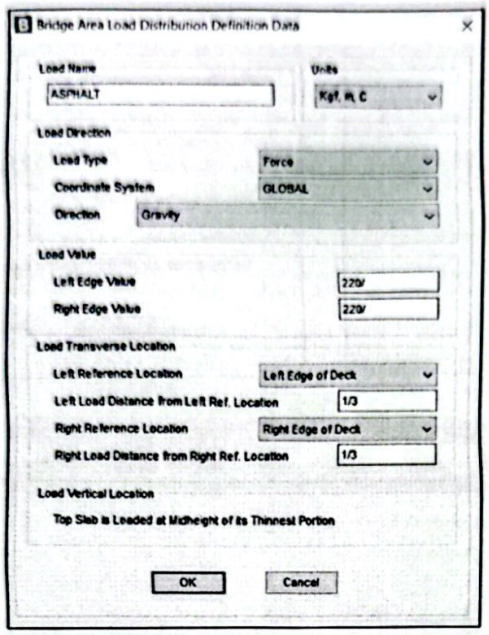




Etabs-SAP.ir
Scanned with CamScanner

← وزن آسفالت

$$۰.۱\square \times ۲۲۰۰ \frac{kg}{m^۳} \times ۱۰^{-۳} = ۰.۲۲ \frac{t}{m^۲}$$



⊗ بار مرده وارد بر پایه

شامل بار مرده منتقل شده از عرشه، وزن سرستون‌ها، وزن ستون‌ها، وزن خاک کوله‌ها

← وزن سرستون‌ها

$$۱۷۰.۱۲\ cm^۲ \times ۲۴۰۰ \frac{kg}{m^۳} \times ۱.۵\ m \times ۱۰^{-۷} = ۶۱.۲\ t$$

← وزن ستون‌ها

$$\frac{\pi \times ۱۱۵^۲}{۴} cm^۲ \times ۲۴۰۰ \frac{kg}{m^۳} \times ۶.۳۵\ m \times ۱۰^{-۷} = ۱۵.۸۳\ t$$

← بار مرده منتقل شده از عرشه به ستون

$$W = \left(\text{وزن مقطع عرشه} + \text{وزن نرده}\right) \times \text{طول بارگیر پایه} + \left(\text{وزن قسمت پرشده} \times ۲\right) +$$

$$\left(\text{طول بارگیر پایه} \times ۱۵.۳ \times \text{وزن آسفالت}\right) + \left(\text{طول بارگیر پایه} \times ۱ \times \text{وزن پیاده‌رو}\right)$$

$$(۴۲.۲۲ + ۰.۵۱) \times L + (۲ \times ۲۲) + (۰.۷۲ \times L) + (۰.۲۲ \times ۱۵.۳ \times L)$$

$$L = \frac{۱۹}{۲} + \frac{۲۳}{۲} = ۲۱\ m \qquad W = ۱۰۲۱.۷۳۶\ t$$

$$L = \frac{۲۳}{۲} + \frac{۲۳}{۲} = ۲۳\ m \qquad W = ۱۱۱۵.۳۶۸\ t$$

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

۲-۲ بارهای بهره‌برداری

۲-۲-۱ بارهای زنده

بار وسایل نقلیه از بارهای زنده وارد بر پل می‌باشد. انواع وسایل نقلیه بر اساس آیین‌نامه‌های مختلف کشورها، در کتابخانه نرم‌افزار وجود دارند و با گزینه Import Vehicle می‌توان آن‌ها را وارد بارگذاری کرد. هر بار خودرو شامل یک یا چند بار متمرکز، بار گسترده و یا ترکیبی از هر دو است. بارهای محور وسیله نقلیه (Axle) در یک موقعیت طولی منفرد از خودرو وجود دارند. بارهای گسترده یکنواخت (Uniform) نیز می‌توانند بین یک جفت محور یا قبل و بعد از محورها وارد شوند.

⊗ ضریب ضربه

وسیله نقلیه‌ای که با سرعت نرمال از روی پل عبور می نماید تنش هایی تولید می کند که از تنش های مربوط به حالت بارگذاری استاتیک آن وسیله بزرگتر می باشد. این افزایش تنش، اثر دینامیکی یا اثر ضربه نامیده می‌شود.

اثر بار عادی باید در ضریبی به نام ضریب دینامیکی یا ضریب ضربه ضرب شود که مقدار آن از رابطه زیر به دست می آید:

$$\delta = ۱.۳ - ۰.۰۰۵\square - ۰.۱۵\square \geq ۱$$

در این رابطه h ارتفاع خاکریز روی پل بر حسب متر و L بر اساس حالت‌های زیر به دست می‌آید:

- در پل های یکسره یا پیوسته در محاسبه لنگر خمشی مثبت هر دهانه L طول همان دهانه و در محاسبه لنگر خمشی تکیه‌گاهی L مقدار متوسط طول‌های دو دهانه مجاور تکیه‌گاه مورد نظر است.
- در مورد تیرهای عرضی و دال‌ها، L طول دهانه مربوطه است.
- در محاسبه اجزای طره‌ای، L طول طره می‌باشد.

ضریب ضربه باید در محاسبه تمامی اعضای عرشه پل منظور شود. دیوارهای حائل، کوله‌ها و پی‌ها از این قاعده مستثنی می‌باشند.

⊗ تعریف وسایل نقلیه (Vehicles)

در آیین نامه بارگذاری پل ایران، بارهای زنده شامل سه نوع بار فرضی در نظر گرفته شده است.

- بار نوع اول

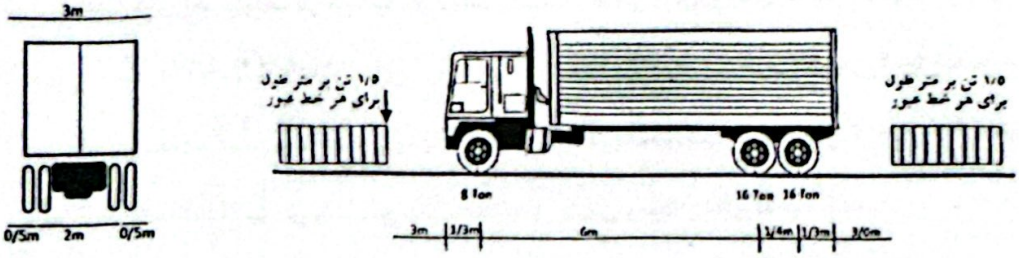
این بارگذاری که بار عادی نامیده می‌شود، معرف اثر محورهای سنگین قطار، کامیون‌ها و وسایل نقلیه معمولی می‌باشد که به طور معمول در سطح راه‌های کشور تردد می‌کنند. بار عادی هر خط عبور مطابق شکل زیر شامل دو قسمت است:

الف) یک کامیون محاسباتی به وزن ۴۰ تن

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

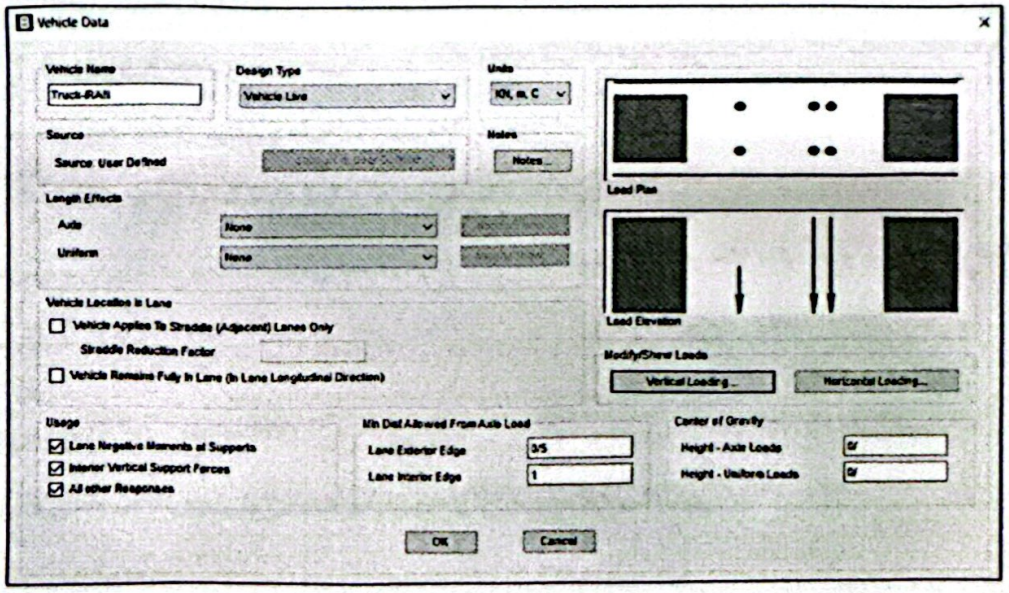
ب) در بقیه طول خط عبور ابتدا سه متر جلو و سه متر عقب کامیون بدون بارگذاری در نظر گرفته می‌شود و سپس بار یکنواختی به میزان یک و نیم تن بر متر به طور پیوسته در ادامه‌ی طول پل قرار داده می شود.

حداقل فاصله محور چرخ از لبه پیاده‌رو نیم متر در نظر گرفته می‌شود.



تعداد خطوط عبور	ضریب کاهش هم‌زمانی بارها
یک یا دو خط عبور	۱
سه خط عبور	۰/۹
چهار خط عبور و بیشتر	۰/۷۵

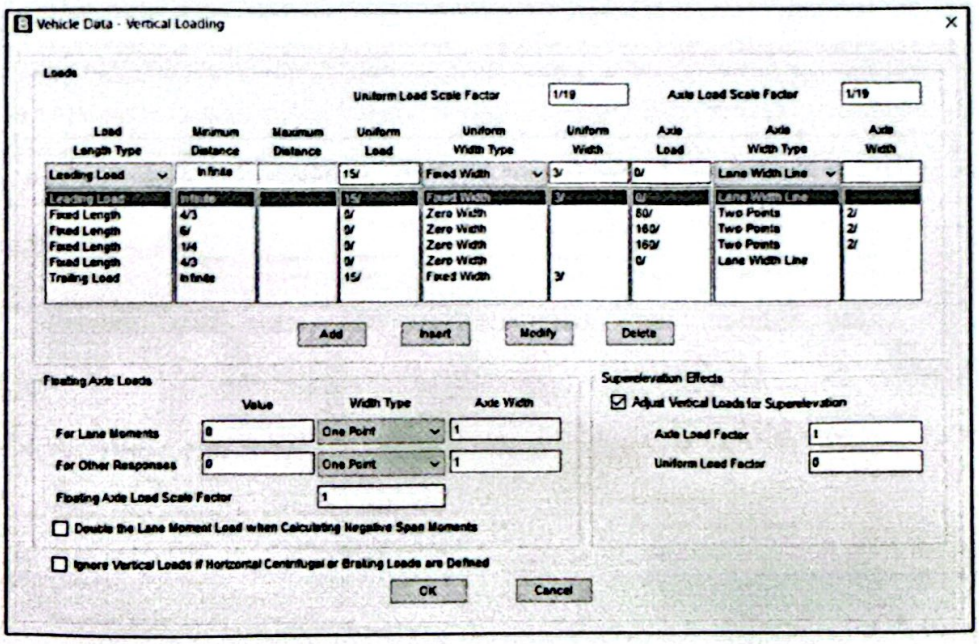
$$L\ (\text{بار کامیون}) = \frac{\text{تعداد خطوط عبور}}{\text{طول کل پل}} \times \left[\left(\text{طول کل پل} - ۱۶ \right) \times ۱.۵ + ۴۰ \right] \times \text{ضریب کاهش}$$



- با انتخاب گزینه Vehicle Applies to Straddle Lanes Only ، بار خودرو به مسیرهای عبور مجاور همراه با ضریب کاهش اعمال می شود.

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

- گزینه Vehicle Remains Fully in Lane، وسیله نقلیه را در تمام موقعیت ها در خط عبور نگه داشته و اجازه بیرون رفتن از مسیر عبور را نمی‌دهد.
- با انتخاب گزینه Lane Negative Moments at Supports ، برنامه برای بار زنده مورد نظر، لنگرهای منفی ناشی از عبور این بار را محاسبه می‌کند.
- گزینه Interior Vertical Support Forces ، مربوط به محاسبه واکنش تکیه‌گاهی در تکیه‌گاه‌های میانی است و با انتخاب این گزینه این نیروها توسط برنامه تعیین خواهند شد.
- دو گزینه Lane Exterior Edge و Lane Interior Edge ، کمینه فاصله بار محور را تا لبه مسیر عبور درونی و بیرونی مشخص می‌کند. در خصوص تعریف کامیون استاندارد ایران مطابق ضوابط نشریه ۱۳۹، مقادیر مذکور را باید به ترتیب برای لبه بیرونی نیم متر و برای لبه درونی یک متر منظور نمود.
- در قسمت Vertical Loading مشخصات بارهای قائم (مطابق کامیون استاندارد)، ضرایب ضربه و ... قابل مشاهده است.

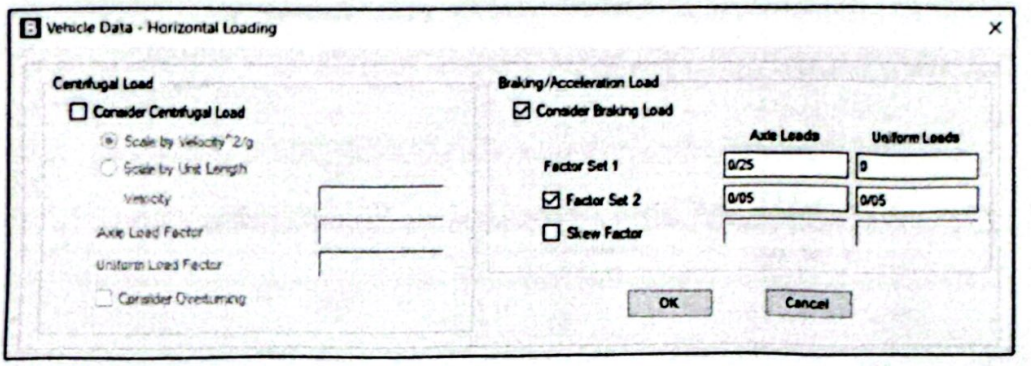


- ضریب ضربه باید در هر دو بار متمرکز و بار گسترده ضرب شود و برای پل‌های راه به طول دهانه وابسته است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\delta = ۱.۳ - ۰.۰۰۵\square - ۰.۰۰۱۵\square = ۱.۳ - ۰.۰۰۵ \times ۲۲ = ۱.۱۹$$

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

- گزینه Adjust Vertical Loads for Superelevation آثار بارهای قائم را متناسب با شیب عرضی به برنامه وارد می‌کند.
- در بخش Horizontal Loading ، مشخصات بارهای افقی وارد بر عبورگاه پل نظیر نیروی ترمز و نیروی گریز از مرکز وجود دارد که مطابق نشریه شماره ۱۳۹، بارهای ترمز روی کف روسازه و نیروی گریز از مرکز در ارتفاع ۱/۸ متری از سطح روکش راه اعمال می‌گردند. در این پروژه پل دارای قوس افقی نمی‌باشد و این نیروی گریز از مرکز محاسبه نمی‌شود.



- بار نوع دوم

این بار یک بار متمرکز ۸ تن می‌باشد که سطح اثر آن مربعی به ابعاد ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد و موقعیت آن در محدوده سواره‌رو متغیر می‌باشد.

- بار نوع سوم

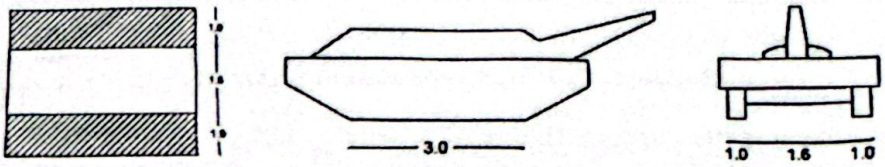
در طراحی تمامی پل‌هایی که امکان عبور تانک و یا تریلی تانک‌بر از روی آن‌ها وجود دارد باید اثر بار غیرعادی شامل دو نوع بار نظامی به شرح زیر در محاسبات منظور شود:

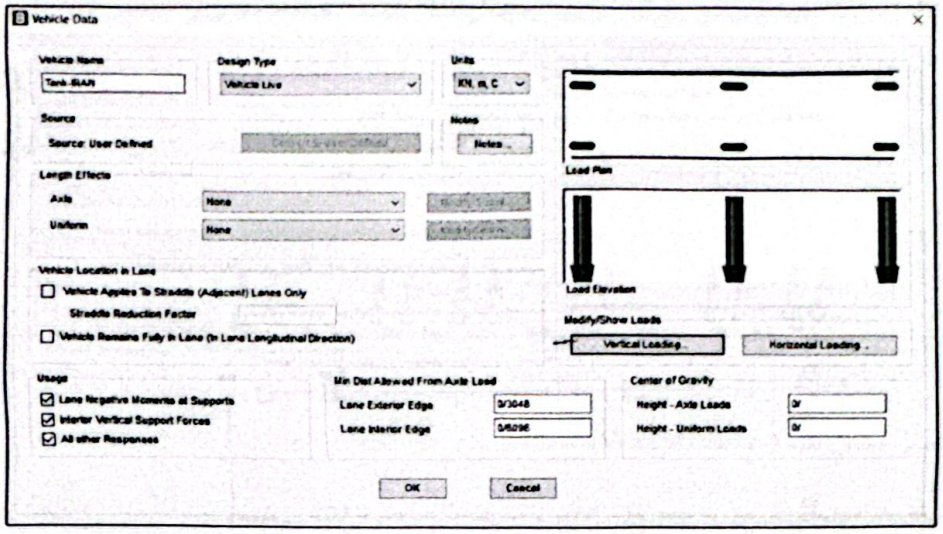
الف) بار تانک

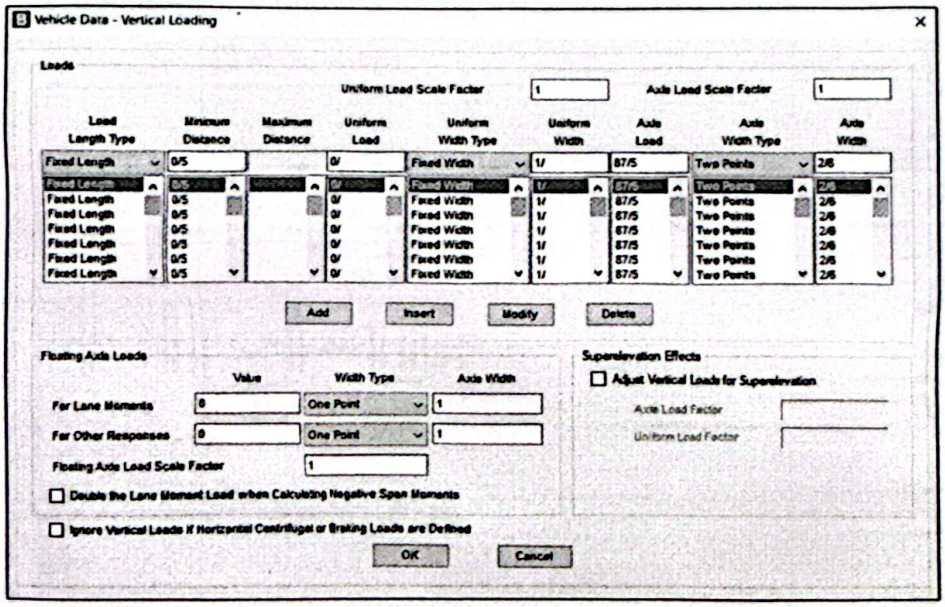
این بار به میزان ۷۰ تن بر روی دو زنجیر به ابعاد یک در سه و نیم مترمربع مطابق شکل در نظر گرفته می‌شود. در هر قسمت از عرض سواره‌رو پل، تنها یک تانک و در امتداد طول پل حداقل فاصله مرکز به مرکز تانک‌های متوالی ۳۰ متر منظور می‌شود. در این پروژه با توجه به طول پل (۸۴ متر) سه عدد تانک در طول پل جای می‌گیرد.

ضریب ضربه برای تانک یک منظور شده است.

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir





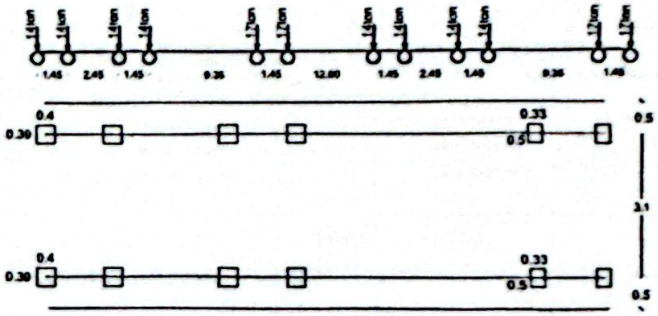


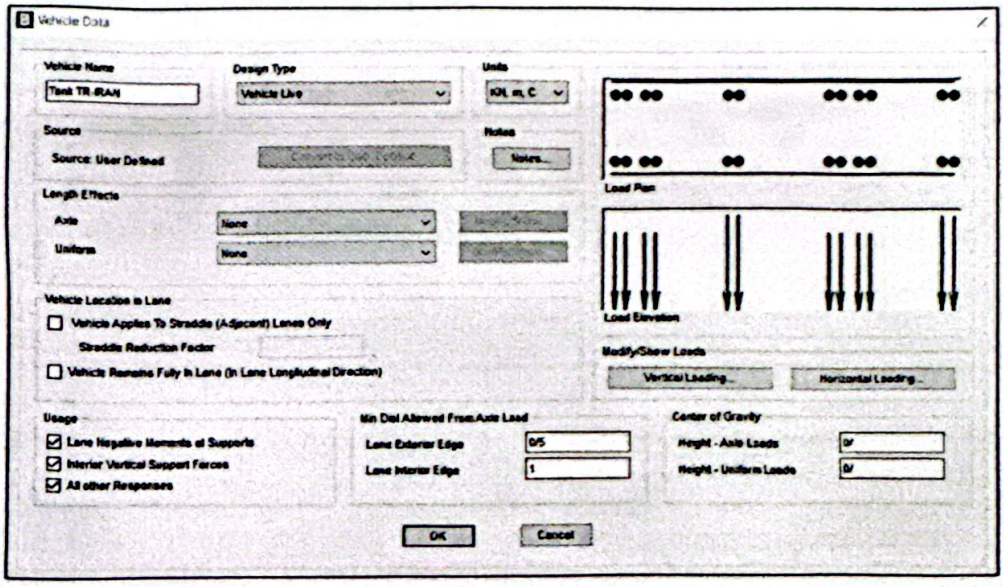
Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

ب) بار تریلی تانک‌بر

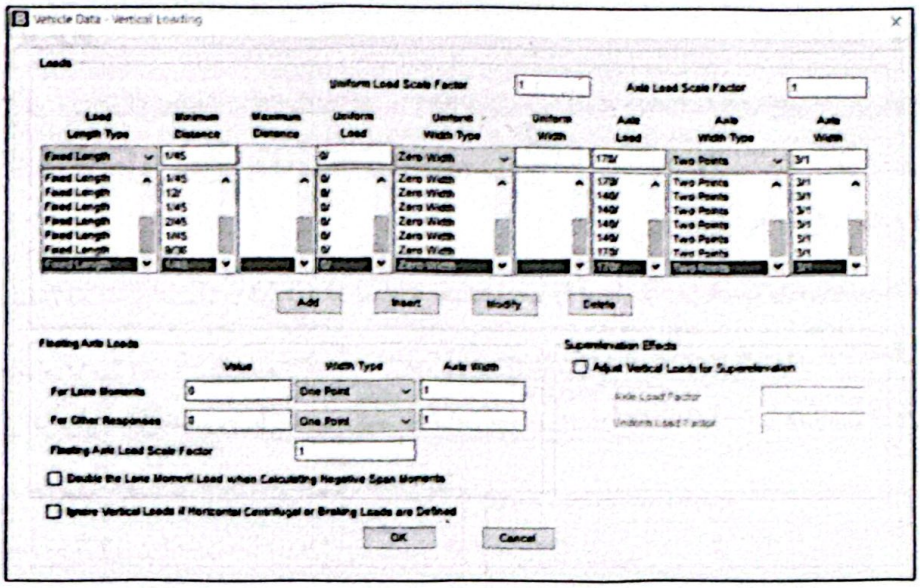
این وسیله نقلیه که برای حمل تانک مورد استفاده قرار می‌گیرد مطابق شکل دارای ۶ محور به وزن کل ۹۰ تن می‌باشد. در عرض پل تنها یک تریلی و در طول پل حداکثر دو دستگاه تریلی تانک‌بر (با حداقل فاصله ۱۲ متر بین چرخ‌های دو وسیله متوالی) می‌توان در نظر گرفت. فاصله محور تا محور چرخ‌ها در تریلی تانک‌بر در جهت عرض تریلی تانک‌بر معادل ۳/۱ متر و حداقل فاصله چرخ‌های آن از لبه پیاده‌رو نیم متر می‌باشد. در این پروژه با توجه به طول پل (۸۴ متر) دو عدد تریلی در طول پل قرار می‌گیرد.

ضریب ضربه برای بریلی تانک‌بر یک منظور شده است.



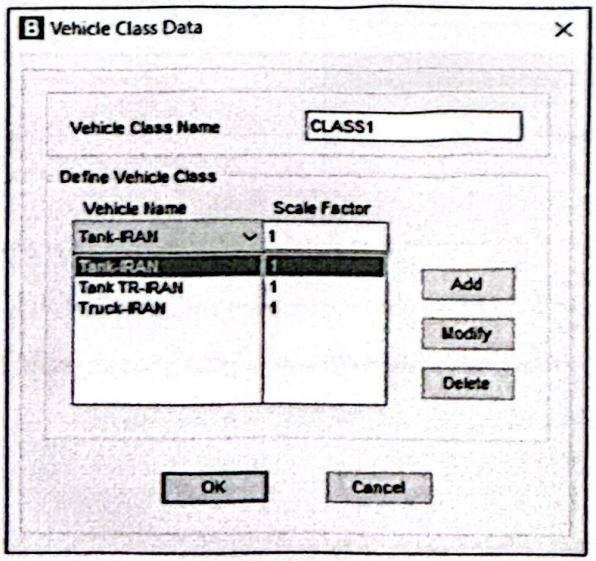


Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir



⊗ تعریف کلاس وسایل‌نقلیه (Vehicle Classes)

سه خودروی طراحی مد نظر نشریه تحت یک کلاس با ضریب یک با هم ترکیب می‌شوند.



Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

۲-۲-۲ اثر ترمز

برای تعیین اثر ترمز وسایل‌نقلیه روی پل مطابق نشریه ۱۳۹، فرض می‌شود که فقط یک نیروی افقی در یکی از خطوط عبور اعمال شود. مقدار این نیروی افقی از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$F_f = ۱۰ + ۰.۰۵L \leq ۴۰\ ton$$

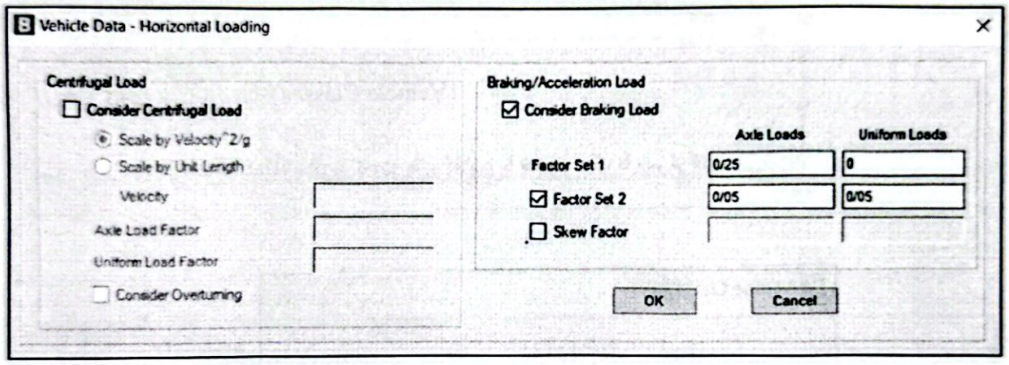
در این رابطه L فاصله درز انبساط تا درز انبساط بعدی بر حسب متر و F_f نیروی ترمز بر حسب تن می باشد.

حداکثر نیروی ترمز به وزن یک کامیون محاسباتی یعنی ۴۰ تن محدود شده و ضریب ضربه به نیروی ترمز اعمال نمی‌شود.

برای تعیین اثر ترمز وسایل‌نقلیه روی پل مطابق آشتو مقدار این نیرو در هر خط عبور برابر است با بزرگترین دو مقدار زیر:

۱) ۲۵ درصد وزن محورهای کامیون طراحی یا جفت محور

۲) ۵ درصد مجموع وزن کامیون طراحی یا جفت محور و بار یکنواخت عبور



۲-۲-۳ نیروی گریز از مرکز

پل‌هایی که در قوس افقی واقع می‌شوند، باید برای نیروی گریز از مرکز محاسبه شوند که به صورت افقی و در امتداد عمود بر خط مماس بر محور طولی پل اثر می‌کند. این نیرو به صورت درصدی از بار زنده یک کامیون در هر خط عبور در نظر گرفته می‌شود و در فاصله ۱/۸ متر در بالای عرشه پل اعمال می‌شود. در محاسبه آن اثر ضربه منظور نمی‌شود.

$$K_c = \frac{V^2}{Rg}$$

$$F_c = K_c W$$

در رابطه V سرعت طرح بر حسب متر بر ثانیه، R شعاع انحنای محور اصلی پل بر حسب متر، g شتاب ثقل زمین بر حسب متر بر مجذور ثانیه، W وزن هر کامیون، F_c نیروی گریز از مرکز بر حسب تن می‌باشد.

در این پروژه پل دارای قوس افقی نمی‌باشد و این نیرو محاسبه نمی‌شود.

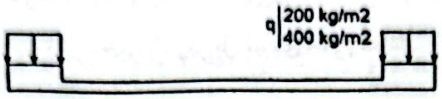
Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

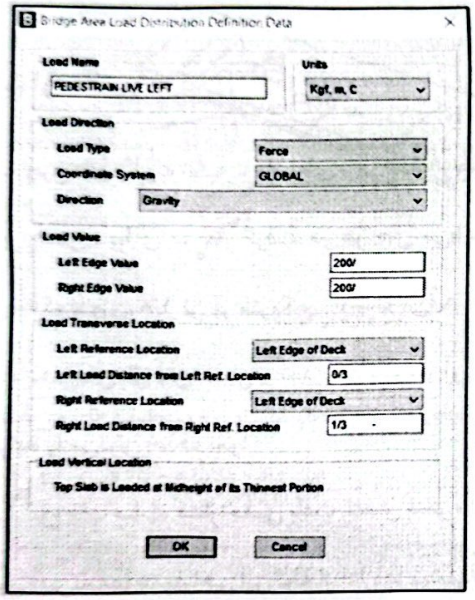
۲-۲-۴ بارهای پیاده‌رو

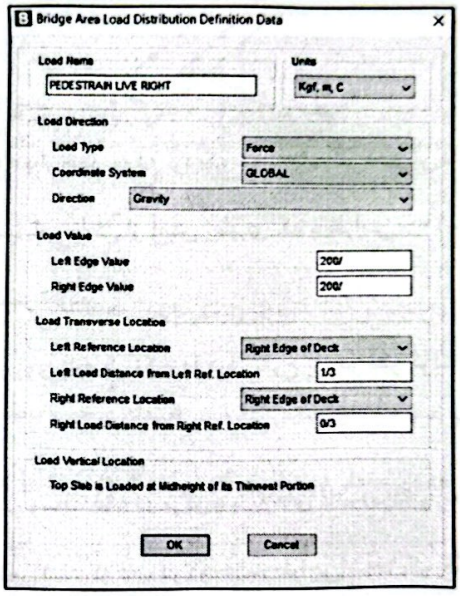
برای محاسبه نیروی داخلی اجزای عرشه پل، بارهای پیاده‌رو به شکل زیر در نظر گرفته می‌شوند:

در صورتی که بار عادی (بار کامیون محاسباتی یا بار معادل) روی سطح سواره‌رو قرارداده شود، مقدار بار اعمال شده روی هر پیاده‌رو معادل ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع می‌باشد.

در محاسبه ثانوی عرشه پل (غیر از تیرهای باربر و اصلی) باید باری معادل ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمربع در سطح هر پیاده‌رو اعمال شود.







۲-۲-۵ نیروهای بلندکننده

در دهانه‌های یکسره وقتی که بارهای زنده اولین دهانه داخلی قرار گیرند، گاهی مواقع می‌توانند تولید نیروی بلندکننده در پایه‌های دیگر نمایند. در این حالت تدابیری برای اتصال کافی عبورگاه پل به پایه‌های پل به وسیله ایجاد وزنه‌های بتنی یا بنایی که وزن آن مساوی بزرگترین در حالت‌های زیر می‌باشد، در نظر گرفته می‌شود:

- ۱۰۰ درصد نیروی بلندکننده محاسبه شده ناشی از هر بارگذاری یا ترکیب بارگذاری که در آن‌ها بار زنده به علاوه ضربه دو برابر شده است.
- ۱۵۰ درصد نیروی بلندکننده محاسبه شده در بارهای بهره‌برداری

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

۲-۲-۶ غوطه‌وری

در حالتی که قسمتی از پایه‌های پل در آب غرق باشد، اثر این نیرو باید لحاظ شود. در این پروژه این موضوع مطرح نیست.

۲-۲-۷ بارهای ناشی از برخورد وسایل نقلیه

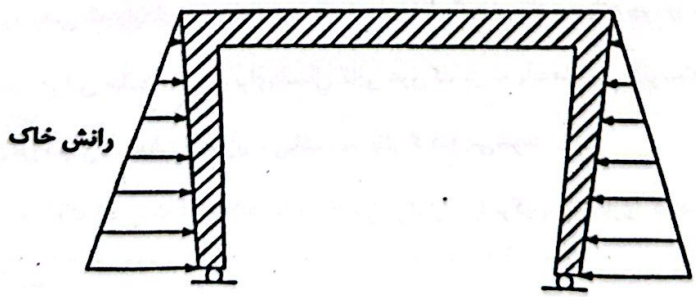
اصولاً پایه‌هایی از پل‌های سواره‌رو که در کناره راه قرار می‌گیرند، باید برای جلوگیری از برخورد وسایل نقلیه به وسیله دیواره و یا جان‌پناه حفاظت شوند. اگر چنین حفاظتی به عمل نیاید لازم است روی پایه پل و در امتداد موازی محور راه در زیر پل یک نیروی افقی معادل ۸۰ تن و در امتداد عمود بر محور راه زیر پل نیروی افقی معادل ۳۰ تن اعمال شود. هر یک از این دو نیرو به صورت مجزا و و در ارتفاع یک متری از سطح راه، بر پایه پل اثر داده می‌شود.

۲-۲-۸ فشار جانبی خاک

در صورتی که چرخ‌های وسیله نقلیه تا فاصله‌ای برابر نصف ارتفاع دیوار حائل به آن نزدیک شوند، باید اثر فشار آن‌ها را به صورت رانش افقی بر چنین دیواری در نظر گرفت. در هر حال می‌بایست این رانش از رانش نظیری که با افزایش ۱۰۰ سانتی‌متر بر ارتفاع واقعی خاک با وزن ۱/۸ تن بر مترمکعب بدست می‌آید، کمتر نگردد.

در صورتی که یک پیش‌دال بتن مسلح مطمئن که یک سر آن بر روی پایه پل تکیه دارد در طرح پل در نظر گرفته شود، سربار ناشی از بار زنده را می‌توان حذف نمود.

در سازه‌های از نوع قاب صلب، فشار جانبی باعث کاهش لنگر مثبت وسط دهانه در ترکیب با بارهای قائم (مرده و زنده) می‌گردد. به همین دلیل آیین‌نامه‌ها در طراحی این‌گونه از سازه‌ها پیشنهاد می‌کنند که قاب در دو حالت طراحی شود: یک حالت که تحت تأثیر رانش مایعی با وزن مخصوص ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب باشد و دیگری حالتی که تحت تأثیر رانش مایعی با وزن مخصوص ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب قرار گیرد و در نهایت برای بحرانی‌ترین نیروها طراحی گردد.

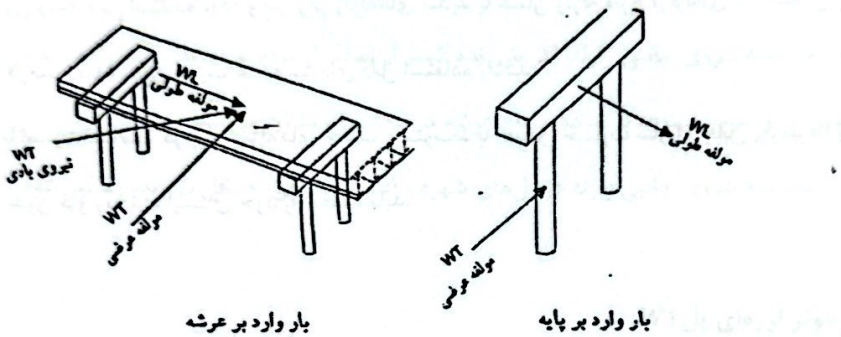


Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

۲-۳ بار باد

در حالت کلی اثر باد به عواملی چون موقعیت جغرافیایی، ارتفاع منطقه از سطح دریا، وضعیت توپوگرافی محل و مشخصات هندسی پل بستگی دارد. بارگذاری باد برای اجزای بادگیر پل‌ها بر اساس اصول و ضوابط مبحث ششم از مقررات ملی ساختمان انجام می‌شود. در شرایط متعارف برای تخمین بار باد بر پل‌ها می‌توان فرض‌های ساده زیر را در نظر گرفت:

امتداد باد افقی است و شدت آن روی سطح بادگیر، در دوران بهره‌برداری، بدون بار ترافیک معادل ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمربع و با بار ترافیک برابر ۱۲۵ کیلوگرم بر مترمربع خواهد بود. نیروی باد به مرکز ثقل سطح بادگیر اعمال می‌شود. بار باد در دو امتداد طولی و عرضی به طور جداگانه اثر می‌نماید و ترکیب اثر دو امتداد لازم نیست.



بار وارد بر عرشه　　بار وارد بر پایه

سطح بارگیر عرشه پل و وسایل نقلیه در امتداد عرضی، سطح نمای قائم آن‌ها در امتداد محور طولی پل می‌باشد و در امتداد طولی نصف همین مقدار در نظر گرفته می‌شود. در مورد پل‌های با عرشه متشکل از تیر مشبک، مساحت واقعی محاسبه شده برای تیر مشبک در ضریب ۱/۵ ضرب می‌شود. در صورتی که جان‌پناه روی سطح پل اجرا شود سطح بارگیری آن مشابه سطح عرشه و در صورت تعبیه نرده سطح بارگیر مشابه تیرهای مشبک محاسبه می‌شود. ارتفاع سطح بارگیر وسایل نقلیه از روی سطح سواره‌رو به میزان ۲ متر در سراسر طول پل منظور می‌شود. نیروی باد از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W = P.A$$

W نیروی باد، P شدت بار باد و A سطح بادگیر می‌باشند.

سطح بادگیر پایه‌ها در امتداد عرضی، سطح نمای قائم آن‌ها در امتداد طولی بزرگترین سطح نمای قائم پایه (سطح واقعی پایه) در نظر گرفته می‌شود.

درصورتی که زاویه مسیر باد مشخص باشد بار باد بر روی پل در امتداد واقعی در نظر گرفته می‌شود.

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

۲-۴ بار زلزله

آیین‌نامه‌ها بیان می‌کنند که استانداردهای آن‌ها حداقل ضوابطی است که برای حفظ جان انسان‌ها نیاز است و نمی‌تواند جلوگیری از خسارات را تضمین نماید. نیروهای آیین‌نامه‌ای به طور معمول کمتر از نیروهایی است که در یک زلزله ممکن است به سازه اعمال شود، بنابراین فرض می‌شود که سازه نیروهای بزرگتر از نیروی آیین‌نامه‌ای را می‌تواند تحمل کند به گونه‌ای که امنیت جانی تضمین شود ولی ممکن است خسارات سازه‌ای ایجاد شود.

با رعایت ضوابط آیین نامه طرح پل های راه و راه آهن در برابر زلزله انتظار می‌رود پل‌های با اهمیت زیاد در برابر زلزله‌های خفیف و متوسط یا همان زلزله سطح بهره‌برداری (زلزله‌ای که احتمال وقوع آن در ۵۰ سال بیشتر از ۹۹/۵ درصد باشد) با قابلیت بهره‌برداری بدون وقفه قابل استفاده بوده و در برابر زلزله‌های شدید یا همان زلزله طرح (زلزله‌ای که احتمال وقوع آن در ۵۰ سال کمتر از ۱۰ درصد باشد) بدون آسیب عمده سازه‌ای قابل استفاده باشند.

همچنین در پل‌های با اهمیت متوسط در برابر زلزله‌های خفیف و متوسط با حداقل خسارت سازه‌ای قابل بهره‌برداری آتی بوده و در زلزله‌های شدید بدون فرو ریختن، ایستای خود را حفظ نماید.

∇ ضوابط کلی

- امتداد عمود بر هم، قادر به تحمل نیروهای جانبی ناشی از زلزله باشند و در هر یک از این امتدادها نیروهای جانبی را به نحوی مناسب به شالوده‌ها برسانند. این دو امتداد معمولاً محور طولی پل و محور عمود بر آن انتخاب می‌شود. در مورد پل‌هایی که در پلان قوس دارند، یکی از محورها را می‌توان موازی خطی که کوله‌ها را به هم متصل می‌کنند در نظر گرفت.
- کوله‌های پل و دیوارهای حائل باید بتوانند فشار خاک اضافی ناشی از زلزله را تحمل نمایند.
- برای تعیین بار زلزله دو روش کلی موجود است:
  - روش تحلیل استاتیکی معادل
  - روش تحلیل دینامیکی

در پل هایی که طول کل پل کمتر از ۳۰۰ متر و دارای دهانه کمتر است ۱۰۰ متر و پایه های با ارتفاع کمتر از ۳۰ متر باشند می توان از روش تحلیل استاتیکی معادل استفاده کرد.

- شرایط پل‌های منظم:
  - تعداد دهانه‌های پل ۶ و یا کمتر باشد.
  - زاویه قوس در پلان مساوی و یا کمتر از ۹۰ درجه باشد.

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

- در پل‌های با دهانه ساده متوالی، زاویه قوس پل در پلان حداکثر ۲۰ درجه باشد.
- نسبت طول دهانه‌های متوالی کمتر از ۲ باشد.
- نسبت سختی پایه‌های متوالی میانی کمتر از ۳ باشد. برای محاسبه سختی پایه‌ها سختی سیستم تکیه‌گاهی باید منظور شود.

- در محاسبه نیروها فقط مولفه افقی نیروی زلزله در نظر گرفته شود و از اثر مولفه قائم صرف نظر شود.
- در محاسبه نیروها، اثر مولفه افقی نیروی زلزله در هر امتداد با ۳۰ درصد از اثر نیروی زلزله در امتداد عمود بر آن به طور هم‌زمان باید اعمال شود.
- نیروی زلزله باید در هر یک از امتداد های پل به صورت رفت و برگشت در نظر گرفته شود.
- در محاسبه نیروی جانبی زلزله، اگر بار زنده کمتر از نصف بار مرده عرشه باشد، بار زنده منظور نمی‌گردد. در غیر این صورت دو سوم مجموعه بار مرده و زنده عرشه در محاسبات منظور می‌شود.
- در محاسبه نیروی جانبی زلزله در پل‌های شهری، اعم از راه آهن، حداقل بار زنده منظور شود.

∇ جرم موثر لزره‌ای پل (W)

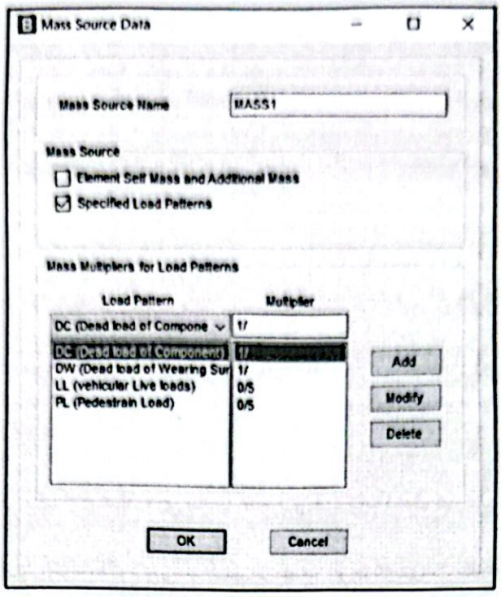
جهت مخاسبه زمان تناوب و نیروی زلزله نیاز به جرم موثر سازه می‌باشد. برای تعیین سهم بارهای دائمی و بهره‌برداری در تخمین جرم موثر سازه، باید با توجه به آیین‌نامه‌های بارگذاری عمل کرد. با توجه به نشریه شماره ۴۶۳، در مورد پل‌های شهری باید اثر ۵۰ درصدی بار زنده همراه با کل بارهای دائمی در تخمین جرم موثر لرزه‌ای سازه مد نظر قرار گیرد.

در سربرگ Advanced و منوی Define، Mass Source را انتخاب کرده و جهت محاسبه جرم سازه بر اساس الگوهای بار استاتیکی تعریف شده در Load Pattern گزینه Specified Load Pattern را انتخاب کرده و ترکیب بار وارد می‌شود. لازم است تا یک بار زنده معادل روی روسازه به صورت استاتیکی تعریف شود تا امکان لحاظ کردن آثار بار زنده در تعیین جرم موثر لرزه‌ای سازه وجود داشته باشد. برای معادل‌سازی بار زنده با بار کامیون استاندارد ایران بر اساس نشریه شماره ۱۳۹، می‌توان از قواعد تعادل و تبدیل همه بارهای متمرکز و گسترده کامیون در مسیرهای عبور به یک بار گسترده معادل استفاده نمود، اما باید دقت کرد که آثار این بار دقیقاً معادل بارهای زنده واقعی نیست.

$$W_{equivalent} = LL = \frac{\text{تعداد خطوط عبور}}{\text{طول پل} \times \text{عرض پل}} \times \left[\left(\text{طول کل پل} - ۱۶\right) \times ۱۵ + ۴۰۰\right] \times \text{ضریب کاهش} \times \text{ضریب ضربه}$$

$$W_{equivalent} = LL = \frac{۴}{۸۴ \times ۱۷.۹} \times [(۸۴ - ۱۶) \times ۱۵ + ۴۰۰] \times ۰.۷۵ \times ۱.۱۹ = ۳.۳۷ \frac{kN}{m^۲}$$

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir



در محاسبه نیروی افقی زلزله در پل‌های شهری اعم از پل‌های راه و راه‌آهن در محاسبه W علاوه بر بار مرده عرشه، همواره باید حداقل نصف بار زنده پل را نیز در نظر گرفت. در سایر پل‌ها اگر بار زنده عرشه پل کمتر از نصف بار مرده آن باشد، در تعیین وزن موثر لرزه‌ای عرشه پل، بار زنده در نظر گرفته نشده و W فقط برابر بار مرده عرشه پل خواهد بود. در غیر این صورت اگر بار زنده عرشه پل بیشتر از نصف بار مرده عرشه پل باشد، W برابر با دو سوم مجموع بار زنده عرشه پل در نظر گرفته می‌شود.

$$DL = (۴۳ + ۰.۵۱) \times ۸۴ + (۸ \times ۲۲) + (۰.۷۲ \times ۲ \times ۸۴) + (۰.۲۲ \times ۱۵.۳ \times ۸۴) = ۴۲۳۴\ t$$

$$LL = ۴ \times [(۸۴ - ۱۶) \times ۱.۵ + ۴۰] \times ۰.۷۵ \times ۱.۱۹ = ۵۰۷\ t$$

$$M = DL + ۰.۵\square\square + (\text{سرستون}) + (\text{ستون} \times ۰.۵) = ۴۲۳۴ + ۳ \times ۶۵ + \frac{۱}{۲} \times ۹ \times ۱۵.۸۳ = ۴۵۰۰\ t$$

∇ زمان تناوب

زمان تناوب اصلی نوسان پل بر اساس روش بار یکنواخت و یا رابطه مشابه در روش توزیع بر اساس مد اصلی ارتعاش محاسبه می‌شود:

$$T_x = ۲\square\sqrt{\frac{W}{Kg}} = ۲\square\sqrt{\frac{M}{K}} \quad \text{طولی}$$

$$T_y = ۲\square\sqrt{\frac{W}{Kg}} = ۲\square\sqrt{\frac{M}{K}} \quad \text{عرضی}$$

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

در روابط فوق K سختی جانبی پل در جهت مورد نظر است که از تقسیم نیروی جانبی فرضی که در مرکز جرم عرشه پل وارد می‌شود به تغییرمکان حداکثری که در عرشه پل ایجاد می‌گردد به دست می‌آید. همچنین M جرم موثر لرزه‌ای پل، W وزن موثر پل و g شتاب ثقل زمین می‌باشد.

$$K_{cx} = ۳ \times ۳ \times \frac{۳ \times ۲۷۳۸۶ \times \frac{\pi \times ۱۱۵^۴}{۶۴}}{۶۵۵^۳} \times \frac{۱}{۱۰۰} = ۲۲۶ \frac{t}{cm} \qquad K_{cx} = ۰.۴ \times ۲۲۶ = ۹۰.۴ \frac{t}{cm}$$

$$K_{cy} = ۳ \times ۳ \times \frac{۱۲ \times ۲۷۳۸۶ \times \frac{\pi \times ۱۱۵^۴}{۶۴}}{۶۵۵^۳} \times \frac{۱}{۱۰۰} = ۹۰۴ \frac{t}{cm} \qquad K_{cy} = ۰.۴ \times ۹۰۴ = ۳۶۱.۶ \frac{t}{cm}$$

$$K_{elastomer} = \frac{GA}{h_{eff}} = \frac{۱.۲\ MPa \times \frac{\pi \times ۷۰^۲}{۴}\ cm^۲}{۰.۷ \times ۲۰\ cm} = ۳.۳ \frac{t}{cm}$$

$$K_x = K_{cx} + ۶\, K_{elastomer} = ۱۱۰.۲ \frac{t}{cm}$$

$$K_y = K_{cy} + ۶\, K_{elastomer} = ۳۸۱.۵ \frac{t}{cm}$$

$$T_x = ۲\pi \sqrt{\frac{M}{K_x}} = ۲\pi \sqrt{\frac{۴۵۰۰}{۱۱۰.۲ \times ۹۸۱}} = ۱.۲۵\ s$$

$$T_y = ۲\pi \sqrt{\frac{M}{K_y}} = ۲\pi \sqrt{\frac{۴۵۰۰}{۳۸۱.۵ \times ۹۸۱}} = ۰.۶۸۹\ s$$

$$۰.۵ \le T_x \le ۲.۵ \quad \rightarrow \quad K = ۰.۵\, T_x + ۰.۷۵ = ۱.۳۷۵$$

$$۰.۵ \le T_y \le ۲.۵ \quad \rightarrow \quad K = ۱.۱$$

∇ ضریب زلزله (C)

$$C = \frac{ABI}{R_u}$$

- A: نسبت شتاب مبنای طرح

مطابق با بند ۲-۴-۳، سازه در منطقه با لرزه‌خیزی خیلی زیاد قرار دارد و این نسبت برابر با ۰/۳۵ می باشد.

ضریب شتاب	دسته‌بندی اهمیت	
A	I ضروری	I معمولی
$A < ۰.۰۹$	A	A
$۰.۰۹ < A < ۰.۱۹$	B	B
$۰.۱۹ < A < ۰.۲۹$	C	C
$A > ۰.۲۹$	D	C

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

منطقه	خطر نسبی پهنه	مقدار شتاب مبنای طرح(A)
۱	خیلی زیاد	۰/۳۵
۲	زیاد	۰/۳۰
۳	متوسط	۰/۲۵
٤	کم	۰/۲۰

$S_{a_{۱۰۰}} = (۰.۳ \sim ۰.۵)\, S_{a_{٤٧٥}}$

$S_{a_{۱۰۰۰}} = (۱.۲ \sim ۱.۳)\, S_{a_{٤٧٥}}$

$S_{a_{٢٤٧٥}} = ۱.۵\, S_{a_{٤٧٥}}$

- I: ضریب اهمیت سازه

مطابق با بند ۳-۴-۷، پل در گروه پل‌های با اهمیت متوسط قرار می گیرد و ضریب اهمیت برابر ۱ می‌باشد.

گروه پل	ضریب اهمیت پل (I)
گروه با اهمیت زیاد	۱/۲
گروه با اهمیت متوسط	۱/۰

- B: ضریب بازتاب پل

مطابق با بند ۲-۴-۴ زمین منطقه از نوع دوم و منطقه با لرزه‌خیزی خیلی زیاد می‌باشد پس بر اساس جدول:

نوع زمین	T_0	T_S	خطر نسبی کم و متوسط	خطر نسبی زیاد و خیلی زیاد
			S	S
I	۰/۱	۰/٤	۱/۵	۱/۵
II	۰/۱	۰/۵	۱/۵	۱/۵
III	۰/۱	۰/۷	۱/۷۵	۱/۷۵
IV	۰/۱۵	۱/۰	۲/۲۵	۱/۷۵

$T_. = ۰.۱\ s \quad , \quad T_S = ۰.۵\ s \quad , \quad S = ۱.۵ \quad , \quad T_x = ۱.۲۵\ s \quad , \quad T_y = ۰.٦٨٩\ s$

$$\left.\begin{array}{ll} B = ۱ + S\left(\frac{T}{T_.}\right) & \Leftarrow ۰ \le T \le T_. \\ B = S + ۱ & \Leftarrow T_. \le T \le T_S \\ B = (S+۱)\left(\frac{T_S}{T}\right)^{\frac{۲}{۳}} & \Leftarrow T \ge T_S \end{array}\right\} \Longrightarrow \quad B_x = ۱.۳۵۷ \ , \ B_y = ۲.۰۱۹$$

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

- R_u: ضریب رفتار سازه

این ضریب عواملی از قبیل شکل‌پذیری، سیستم سازه‌ای پل، درجه نامعینی و اضافه مقاومت موجود در پایه‌های پل را مشخص می‌کند و با توجه به سیستم سیستم سازه‌ای پایه، از جدول زیر تعیین می‌شود.

زیرسازه [1]	R	اتصالات [1]	R
- پایه های دیواری [2]	۲	- اتصال روسازه به کوله	۰/۸
- قاب چند ستونی	۵	- درز انبساط واقع در دهانه روسازه	۰/۸
- تک ستونها	۳	- اتصال ستونها، پایه‌ها یا قاب شمعها به تیر سرستون، تیر سرشمع (Cap Beam) یا روسازه	۱/۰
- شمع ستون بتن آرمه (قاب‌هایی که ستونهای آنها را شمع تشکیل می‌دهد)			۱/۰
a) فقط شمعهای قائم	۳	- اتصال ستونها یا پایه ها به شالوده	
b) دارای حداقل یک شمع مایل	۲		
- قاب شمعهای فولادی یا مرکب (فولاد و بتن آرمه)			
c) فقط شمعهای قائم	۵		
d) دارای حداقل یک شمع مایل	۳		
- شالوده‌ها، سرشمعها و شمعها [3]	نصف مقدار R که در محاسبه پایه ها به کار برده شده است	—	

Substructure	Importance Category		
	Critical	Essential	Other
Wall-type piers—larger dimension	1.5	1.5	2.0
Reinforced concrete pile bents			
• Vertical piles only	1.5	2.0	3.0
• With batter piles	1.5	1.5	2.0
Single columns	1.5	2.0	3.0
Steel or composite steel and concrete pile bents			
• Vertical pile only	1.5	3.5	5.0
• With batter piles	1.5	2.0	3.0
Multiple column bents	1.5	3.5	5.0

دلیل آنکه آنالیز خطی برای محاسبه نیروها انجام می‌شود، سطح نیروها بالاتر از حد واقعی است (که بستگی به شکل‌پذیری دارد). بنابراین با توجه به شکل‌پذیری مورد انتظار (وابسته به رفتار و نامعینی) حد نیروها با ضریب رفتار R کاهش می‌یابند. در این پروژه پایه‌های پل در جهت طولی، ستون و در جهت عرضی پایه سه ستونه هستند و در دسته پل‌های متعارف فرض شده‌اند. بنابراین با توجه به آیین‌نامه آشتو طبق جدول زیر، ضریب رفتار در جهت عرضی ۵ و در جهت طولی ۳ است.

$R_{ux} = ۳$ طولی

$R_{uy} = ۵$ عرضی

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

- در نتیجه ضریب زلزله برابر است با:

$$C_x = \frac{ABI}{R_u} = \frac{۰.۳۵ \times ۱.۳۵۷}{۳} = ۰.۱۵۸ \qquad AB = ۰.۴۸$$

$$C_y = \frac{ABI}{R_u} = \frac{۰.۳۵ \times ۲.۰۱۹}{۵} = ۰.۱۴۱ \qquad AB = ۰.۷۰۷$$

★ باید به این نکته توجه کرد چون پل‌ها از نظر عملکردی دسته‌بندی می‌شوند بنابراین در پل‌ها ضریب اهمیت (I) نداریم.

▽ توزیع نیروی جانبی زلزله

در صورتی که عرشه صلب باشد، نیروی جانبی زلزله وارد به عرشه، باید به نسبت سختی پایه‌های مقاوم در برابر بار جانبی بین آن‌ها تقسیم شود. در غیر این صورت در توزیع نیروی زلزله بین پایه‌ها باید اثر تغییرشکل ایجادشده در عرشه مورد توجه قرار گیرد.

پایه‌های پا علاوه بر نیروی زلزله ناشی از وزن عرشه، نیروی زلزله ناشی از وزن خود را نیز تحمل نمایند.نیروی اخیر از حاصل‌ضرب ضریب زلزله در وزن پایه‌ها به دست می‌آید. محل اثر این نیرو در مرکز جرم پایه‌ها می‌باشد.

در برآورد تلاش‌های داخلی و تغییرمکان جانبی پایه‌های پل لازم است اثر $p - \Delta$ را در حالتی که تغییرمکان جانبی قابل‌ملاحظه‌ای در پایه‌ها به وقوع می‌پیوندد در نظر گرفت. تغییرمکان جانبی قابل‌ملاحظه تغییرمکانی است که باعث شود لنگرهای خمشی ثانویه، بیش از ۱۰ درصد لنگرهای خمشی اولیه باشد.

▽ روش تحلیل دینامیکی

در این روش‌ها نیروی جانبی زلزله با استفاده از بازتاب دینامیکی که پل در اثر حرکت زمین ناشی از زلزله نشان می‌دهد، تعیین می‌گردد. اثرات حرکات زمین ممکن است به یکی از صورت‌های طیف بازتاب شتاب یا تاریخچه زمانی تغییرات شتاب مشخص شود. روش‌های تحلیل دینامیکی شامل روش تحلیل طیفی و روش تحلیل تاریخچه زمانی خواهند بود.

روش تحلیل طیفی (با استفاده از آنالیز مدها):

به طور کلی در روش تحلیل طیفی ابتدا پل با استفاده از روش آنالیز مدها تحلیل شده و زمان تناوب و تغییر مکان نسبی اجزای پل در هر مد نوسان تعیین می‌شود. آثار بیشینه در اجزای پل در هر مورد با توجه به زمان تناوب نوسان، شکل مد و با استفاده از طیف بازتاب طرح بدست‌آمده و سپس با یکدیگر ترکیب می‌شوند.

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

بازتاب‌های بدست‌آمده از این ترکیب‌ها از قبیل تغییر مکان‌ها، برش‌ها و لنگرهای خمشی در طراحی پل مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین تعداد مدهای نوسانی که در ترکیب مدهای مختلف در هر امتداد در نظر گرفته می‌شود، باید حداقل ۳ برابر تعداد دهانه‌های پل و حداکثر ۲۵ باشد.

تحلیل دینامیکی در این روش با فرض رفتار خطی سازه و با استفاده از حداکثر بازتاب کلیه مدهای نوسانی بر سازه که در بازتاب کل سازه اثر قابل توجهی دارند، انجام می‌گیرد. حداکثر بازتاب در هر مد با توجه به زمان تناوب آن مد از طیف طرح بدست می‌آید و در نهایت بازتاب کلی سازه از ترکیب آماری بازتاب‌های حداکثر هر مد تخمین زده می‌شود. طیف‌های طرح با استفاده از دو روش تعیین می‌شوند:

۱) طیف طرح استاندارد

این طیف از حاصل ضرب ضریب بازتاب سازه (B) در مقدار شتاب مبنای طرح (A)، ضریب اهمیت (I) و عکس ضریب رفتار (R) بدست می‌آید. در تعیین این طیف نسبت میرایی ۵ درصد در نظر گرفته می‌شود.

۲) طیف طرح ویژه ساختگاه

این طیف با استفاده از مشخصات زلزله‌های منطقه ساختگاه و با توجه به ویژگی‌هلی زمین‌شناسی، تکتونیکی، لرزه‌شناسی، میزان خطرپذیری و مشخصات خاک در لایه‌های مختلف ساختگاه با میرایی ۵ درصد تعیین می‌گردد. مقادیر محاسبه شده این طیف باید در ضریب اهمیت (I) و عکس ضریب رفتار (R) ضرب شود. همچنین مقادیر طیف طرح ویژه ساختگاه نباید کمتر از $\frac{۲}{۳}$ مقادیر طیف طرح استاندارد در نظر گرفته شود.

۲-۵ نیروهای ناشی حرارت

تغییرات دما در سازه پل باعث ایجاد تغییرشکل شده و گاهی می‌تواند تنش‌های اضافی نیز در سازه پل ایجاد نماید.بنابراین اثر تغییر دما باید در محاسبه سازه پل مورد توجه قرار گیرد. تغییرات دما نسبت به دمای متوسط محل احداث پل در سال‌های مختلف به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

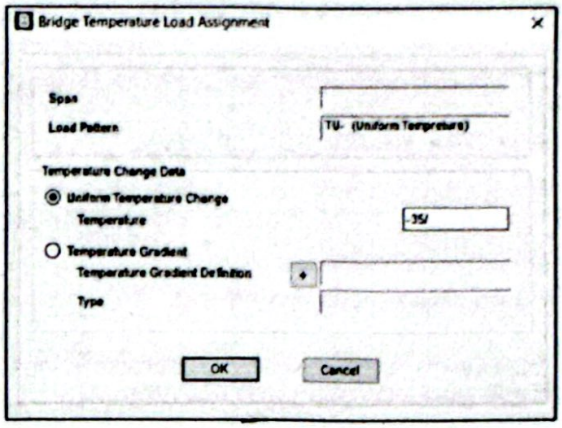
∇ تغییر دما

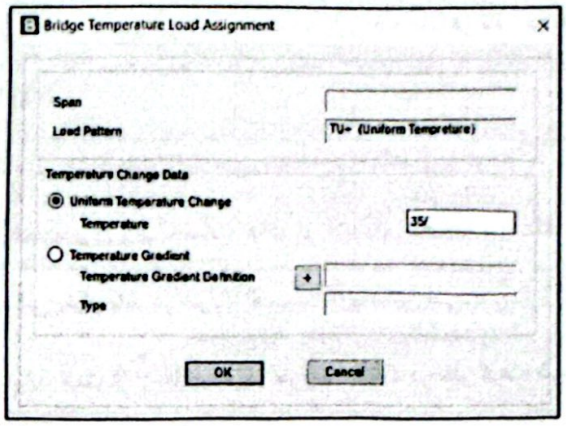
اثر تغییرات یکنواخت دما باید در محاسبات تمامی اجزای باربر پل در نظر گرفته شود. این اثر برای پل‌های سطحی که روی آن‌ها خاکریزی صورت نمی‌گیرد، برابر $\pm ۳۵^{\circ}$ درجه سانتی‌گراد و برای پل‌های مدفون در خاک ولی کم عمق (ارتفاع خاک روی پل ۳ متر و کمتر) برابر ۲۰ درجه سانتی‌گراد منظود می‌شود.

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

نکته‌ای که باید به آن توجه نمود این است که اختلاف یکنواخت دما (شاخص TU) نیازی به تعریف در Load Distribution ندارد و همزمان با اختصاص گرادیان حرارتی (شاخص TG) در Bridge Object تعریف و اختصاص داده می‌شود.

در قسمت temperature load این اثر را در هر چهار دهانه لحاظ می‌کنیم.





▽ اختلاف دما

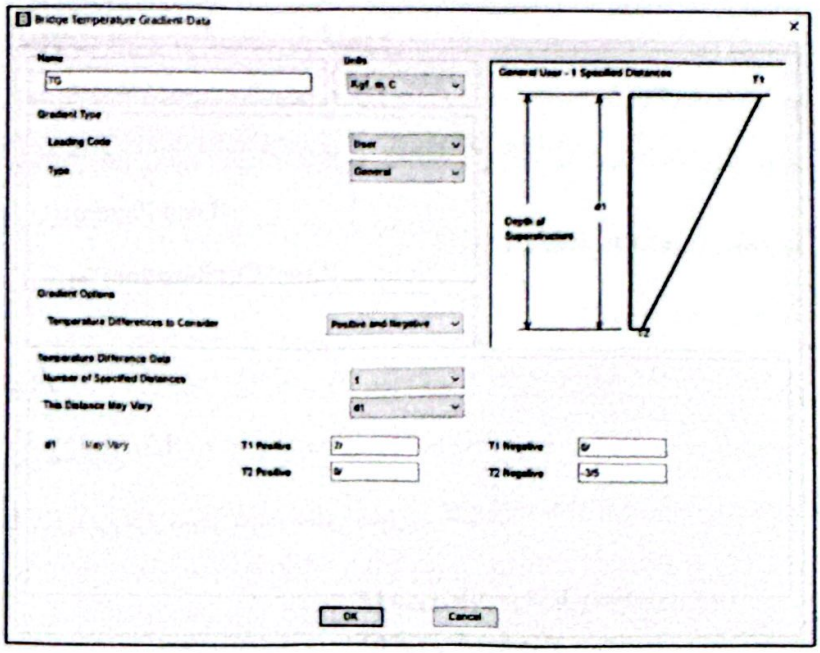
اثر اختلاف دما بین سطوح بالایی و پایینی عرشه پل با این فرض که تغییر دما در ضخامت مقطع خطی است باید در محاسبات لحاظ شود. این اثر که به آن گرادیان حرارتی نیز می‌گویند، تابع اوضاع فصلی محل ساخت پل بوده و در یکی از دو حالت زیر در نظر گرفته می‌شود:

حالت اول: تابش خورشید روی سطح بالایی و سایه در سطح پایینی عرشه پل

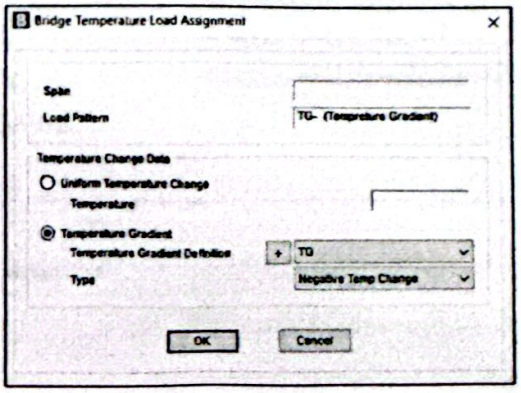
حالت دوم: یخبندان روی سطح بالایی عرشه

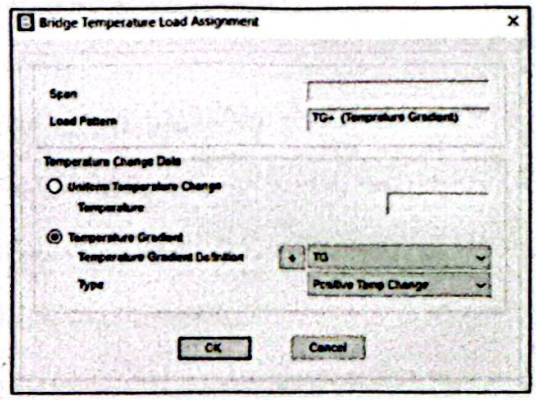
اوضاع فصلی	نوع پل		
	فلزی	بتنی	مرکب
حالت ۱	۱۰	۷	۱۰
حالت ۲	۵	۳/۵	۷

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir



پس از تعریف گرادیان حرارتی در Load Distribution، در Bridge Object اختصاص گرادیان حرارتی به روسازه پل انجام می‌پذیرد.





Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

فصل سوم: حالات بار و ترکیبات بارگذاری

در نرم‌افزار دو نوع تعریف جهت انجام فرآیند بارگذاری، تحلیل و طراحی وجود دارد:

۱) تعریف الگوی بار (Load Pattern)

۲) ترکیب جبری نیروها (Load Combination)

۳-۱ الگوهای بار

∇ بر مبنای آیین‌نامه ایران

الگوهای باری که باید به نرم افزار معرفی شوند، مطابق جدول زیر هستند.

D: بار مرده
L :بار زنده
I: ضربه بار زنده
E :فشار خاک
B: نیروی غوطه‌وری
W :بار باد
WL: بار باد بر روی بار زنده
PF: نیروی حاصل از پیش‌تنیدگی
ST: نیروی حاصل از نشست تکیه‌گاهی

LF: نیروی طول در اثر بار زنده (نیروی ترمز)
CF: نیروی گریز از مرکز
R: اثر حاصل از کوتاه شدن قوس و تیرهای پیش‌تنیده
S: نیروی حاصل از افت مصالح
EQ: نیروی زلزله
T: نیروی حاصل از تغییر دما
SF: نیروی حاصل از جریان رودخانه

∇ بر مبنای آشتو (Permanent Loads)

* بارهای دائمی

- (DC) بار مرده (وزن اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای به جز روکش روسازی)
- (DW) بار روکش روسازی
- (PS) بار آثار پیش‌تنیدگی (نیروی پیش‌تنیدگی)
- (CR) بار ناشی از خزش مصالح (اثر خزش صرفا در تحلیل حین ساخت در برنامه قابل بررسی است)
- (SH) بار ناشی از جمع‌شدگی مصالح (اثر خزش صرفا در تحلیل حین ساخت در برنامه قابل بررسی است)
- (DD) نیروی فروکش در شمع‌های اصطکاکی
- (EH) فشار افقی خاک (پشت کوله‌ها در شرایط بهره‌برداری به سه صورت سکون، فعال، مقاوم ایجاد می‌شود)

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

- (EV) فشار قائم خاک (روی پنجه و پاشنه دیوارهای حایل و روی عناصر افقی آبروها ایجاد می‌شود)
- (ES) سربار خاک (در اثر وجود سربار در بالادست یک گود به دیواره گود به صورت افقی وارد می‌شود)
- (EL) نیروی قفل‌شدگی ناشی از فرآیند اجرا در پل‌های قطعه‌ای

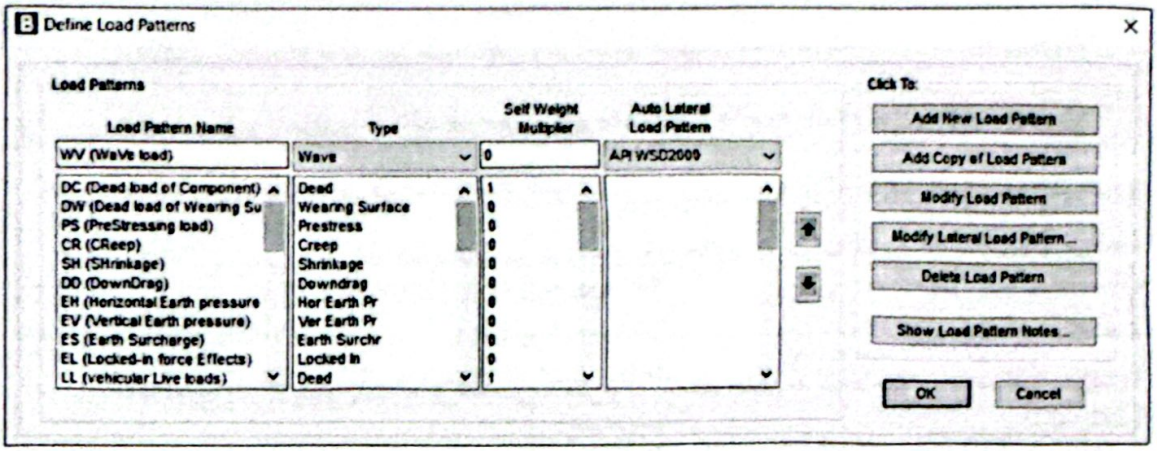
* **بارهای غیردائمی (Transient Loads)**

- (LL) بار ناشی از عبور وسایل‌نقلیه
- (BR) بار ترمز وسایل‌نقلیه (به صورت افقی و در راستای طولی پل اعمال می‌شود)
- (CE) بار گریز از مرکز وسایل‌نقلیه (به صورت افقی و در راستای جانبی به پل دارای قوس افقی وارد می‌شود)
- (IM) اثر ضربه دینامیکی عبور عادی وسایل‌نقلیه
- (LS) سربار ناشی از بار زنده (به هنگام عبور بار زنده از روی خاکریز، به صورت افقی به دیوار حائل وارد می‌شود)
- (PL) بار پیاده‌رو
- (CT) بار برخورد وسایل‌نقلیه به پل (به صورت افقی و در راستای جانبی به پایه‌ها هنگام تصادف اعمال می‌شود)
- (CV) بار برخورد کشتی به پل (به صورت افقی و در راستای جانبی به پایه‌ها هنگام برخورد اعمال می‌شود)
- (BL) بار ناشی از انفجار (به هنگام انفجار به اجزای پل اعمال می‌شود)
- (WS) بار باد وارد بر سازه پل (دارای مولفه افقی و قائم)
- (WL) بار باد وارد بر وسایل‌نقلیه
- (EQ) بار زلزله (این بار را می‌توان به صورت استاتیکی، طیفی یا تاریخچه زمانی در تحلیل لحاظ کرد)
- (SE) بار ناشی از نشست (در سازه‌های نامعین به علت نشست تکیه‌گاهی در اجزای سازه ایجاد می‌گردد)
- (TU) بار ناشی از اختلاف یکنواخت دما (به علت انقباض و انبساط)
- (TG) بار ناشی از گرادیان حرارتی (به علت اختلاف دما در مقطع روسازه پل)
- (WA) بار ناشی از فشار جریان آب
- (FR) بار ناشی از اصطکاک
- (IC) بار ناشی از یخ (به علت تجمع یخ اطراف پایه پل‌ها)

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

← نرم‌افزار

در این قسمت فقط به تعریف الگوهای بارهای وارد بر پل در نرم‌افزار می‌پردازیم. الگوهای بار به طور پیش فرض بر اساس آیین‌نامه‌های مختلف نظیر AASHTO و Euro Code در نرم‌افزار تعریف شده‌اند. تمامی الگوهای بار یادشده در فصل قبل در منوی Load Pattern قابل تعریف هستند و در تحلیل‌های استاتیکی می‌توان از آن‌ها استفاده کرد.



۳-۲ ترکیبات بار

▽ بر مبنای آیین‌نامه ایران

بر مبنای آیین‌نامه بارگذاری، همزمانی بارها باید مورد توجه قرار گیرد.

گروه ۱) مجموعه‌ای از بارها شامل بار مرده، اثر کاهش وزن ناشی از غوطه‌وری، تغییرشکل‌های تابع زمان مصالح (جمع‌شدگی و وارفتگی)، نشست پایه‌ها و فشار خاک

گروه ۲) گروه ۱ + بارهای بهره‌برداری همراه با اثر ضربه، ترمز و گریز از مرکز

گروه ۳) گروه ۱ + بار باد

گروه ۲ + بار باد

گروه ۴) گروه ۱ + اثر تغییر دما

گروه ۲ + اثر تغییر دما

گروه ۵) گروه ۱ + بار زلزله

گروه ۶) گروه ۱ + بارهای ویژه

ترکیبات بارگذاری ایران در طراحی به روش حالات حدی به شرح زیر است.

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

۱)	۱/۲۵ (D+B+R+S+ST+PF+SF+E)
۲)	۱/۲۵ (LF+CF) + ۱/۶ (L+I) + گروه یک
۱-۳)	۰/۸۵ (گروه یک +۱/۵W)
۲-۳)	۰/۸۵ (گروه دو +۱/۵W+ ۱/۵WL)
۱-۴)	۰/۸ (گروه یک + ۱/۲۵T)
۲-۴)	۰/۸ (گروه دو + ۱/۲۵T)
۵)	۰/۸ (گروه یک +۱/۵EQ)
۶)	(بارهای ویژه) ۱/۵+ گروه یک

∇ بر مبنای آشتو

Load Combination	DC DD DW EH EV ES EL	LL IM CE BR PL LS	WA	WS	WL	FR	TU CR SH	TG	SE	Use One of These at a Time			
										EQ	IC	CT	CV
STRENGTH I (unless noted)	γ_p	1.75	1.00	--	--	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	--	--	--	--
STRENGTH II	γ_p	1.35	1.00	--	--	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	--	--	--	--
STRENGTH III	γ_p		1.00	1.40	--	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	--	--	--	--
STRENGTH IV	γ_p		1.00	--	--	1.00	0.50/1.20	--	--	--	--	--	--
STRENGTH V	γ_p	1.35	1.00	0.40	1.0	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	--	--	--	--

۳-۳ ترکیبات مورد استفاده در نرم‌افزار SAP

در این پروژه از ۱۱ ترکیب بار استفاده شده است که ترکیب بار نهایی آن Envelope نام دارد که مجموع ۱۰ ترکیب بار دیگر است که خروجی نتایج در آن، با در نظر گرفتن بحرانی‌ترین ترکیب است.

۱) $DD + L$

۲) $DD + ۰.۵\square$

۳) $DD + ۰.۵\square + EX + ۰.۳\square\square$

۴) $DD + ۰.۵\square - EX - ۰.۳\square\square$

۵) $DD + ۰.۵\square + EX - ۰.۳\square\square$

۶) $DD + ۰.۵\square - EX + ۰.۳\square\square$

۷) $DD + ۰.۵\square + ۰.۳\square\square + EY$

۸) $DD + ۰.۵\square - ۰.۳\square\square - EY$

۹) $DD + ۰.۵\square + ۰.۳\square\square - EY$

۱۰) $DD + ۰.۵\square - ۰.۳\square\square + EY$

۱۱) $Envelope$

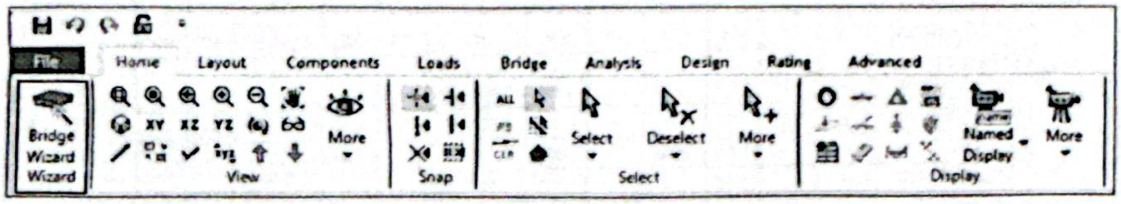
Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

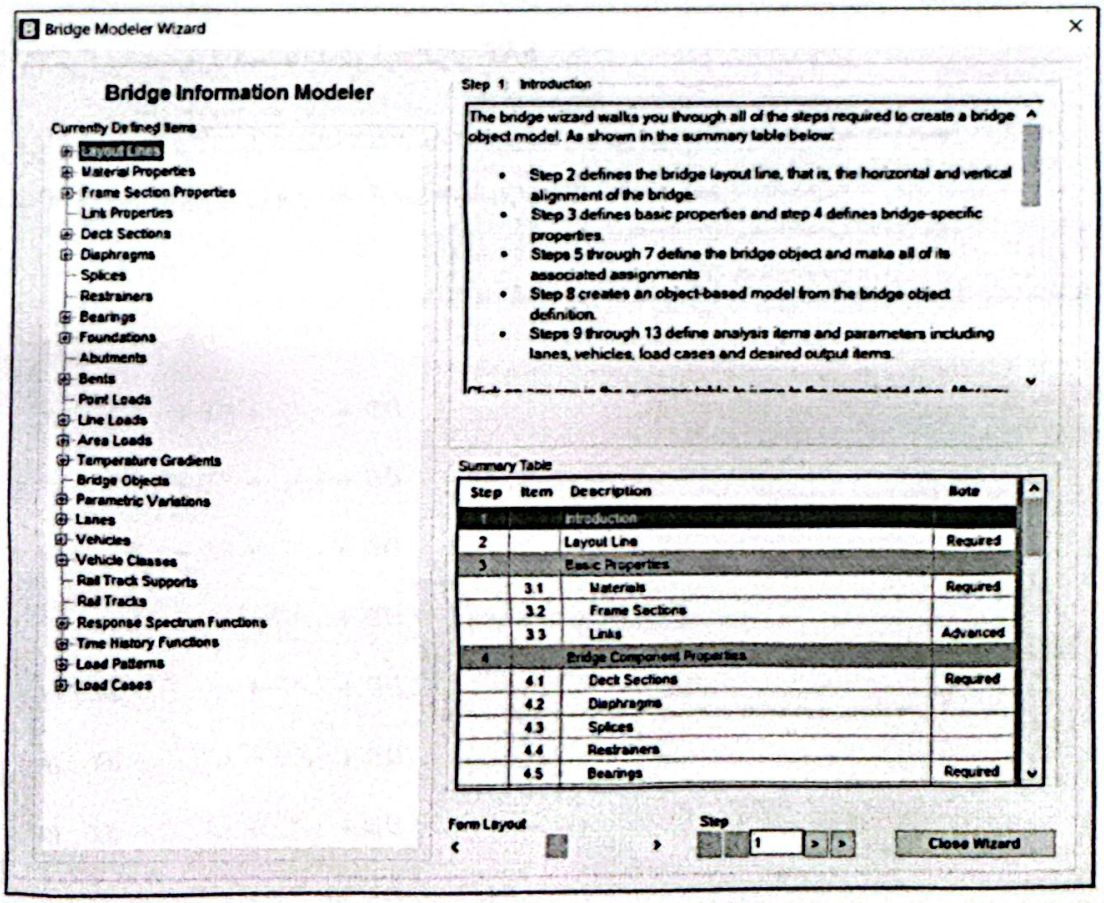
فصل چهارم: مدلسازی در نرم‌افزار

۴-۱ معرفی مقاطع و مصالح

⊗ ایجاد مدل

پس از ورود به محیط برنامه CSiBridge از منوی اصلی File گزینه‌ی New را انتخاب نموده و چون قصد استفاده از الگوهای آماده را نداریم، بنابراین روی گزینه‌ی Blank کلیک می‌کنیم. مدلسازی را می‌توان مستقیماً با فرمان‌های داخل نرم‌افزار و یا استفاده از Bridge Wizard انجام داد.

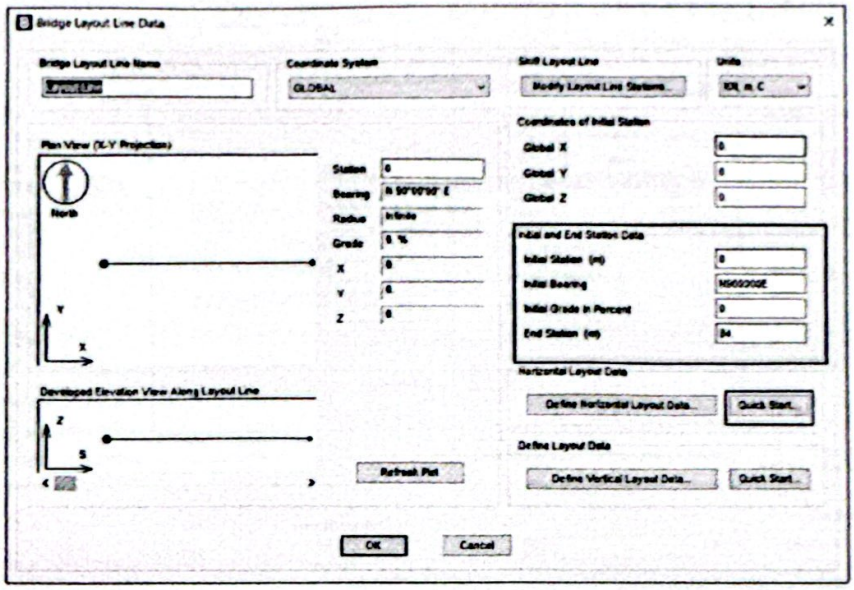


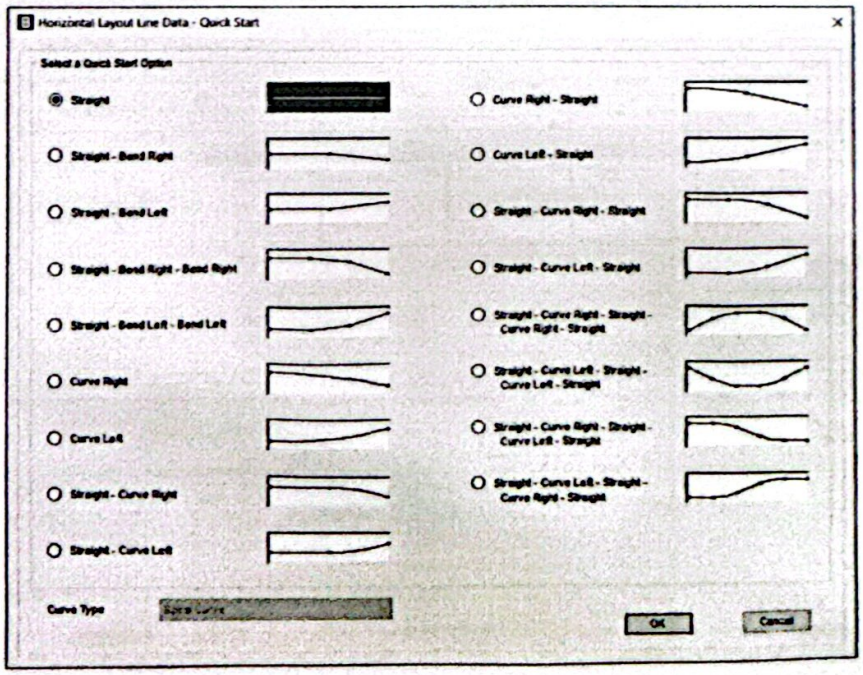


Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

⊗ تعریف هندسه پل

برای تعریف هندسه اولیه پل در پنل Summary Table وارد قسمت Layout Line می‌شویم. مطابق شکل‌های زیر در این پنجره کیلومتر نقاط ابتدا و انتهای پل و همچنین شکل افقی پل را در قسمت Horizontal Layout Data به صورت مستقیم (Straight) تعریف می‌نماییم.

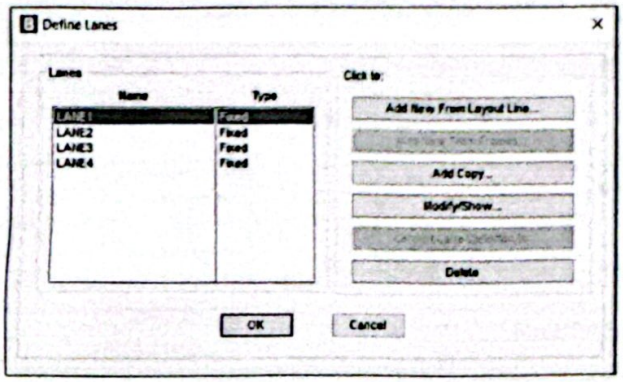


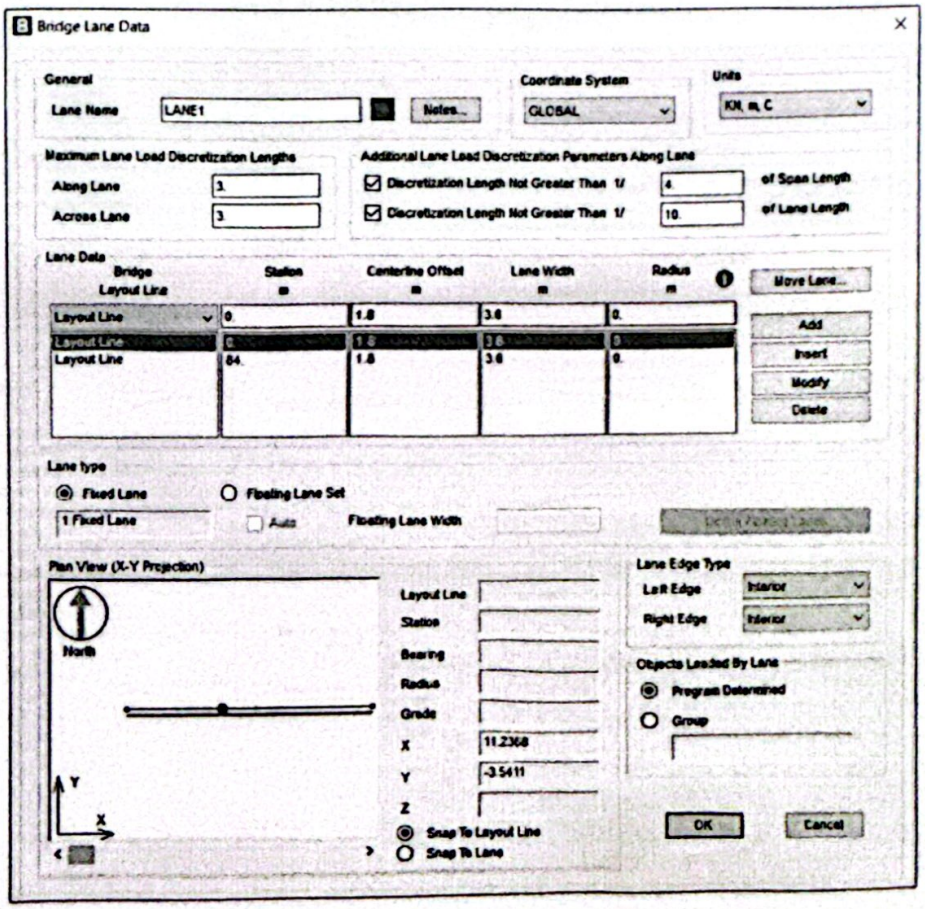


Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

⊗ تعریف خطوط عبور

در این پروژه با توجه به تحلیل بار متحرک، می‌بایست اطلاعات لازم برای تعریف خطوط عبور ترافیک معرفی شوند. برای تعریف از Layout Line تعریف شده استفاده می‌نماییم. بدین منظور در پنل Lanes اطلاعات لازم (فاصله آکس مسیر از Layout Line و عرض مسیر) را وارد می‌کنیم. که در این پروژه عرض مسیر ۳/۶ متر و فاصله آکس مسیر از Layout Line ۱/۸ متر است. این مرحله مطابق شکل (خط عبوری اول) با توجه به تعداد خطوط عبوری (۴خط) انجام شود.

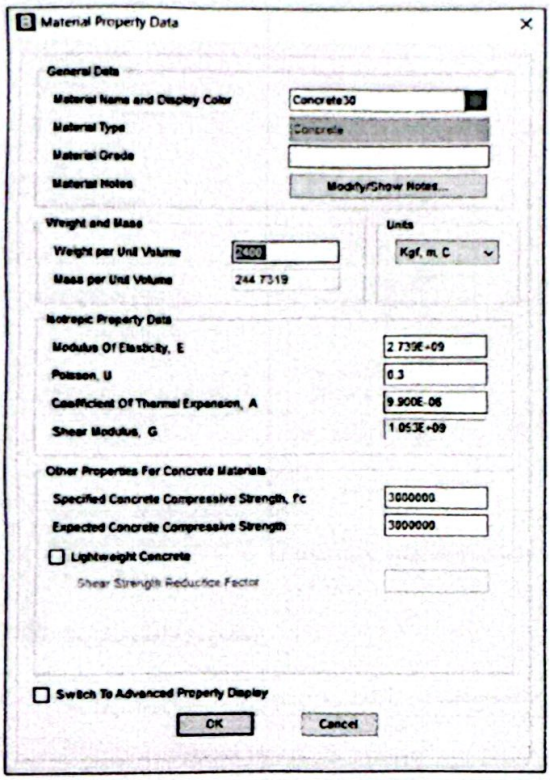


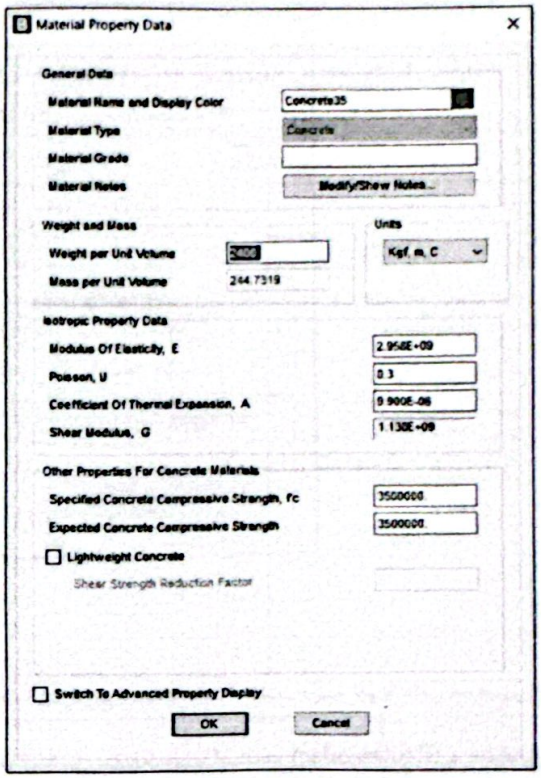


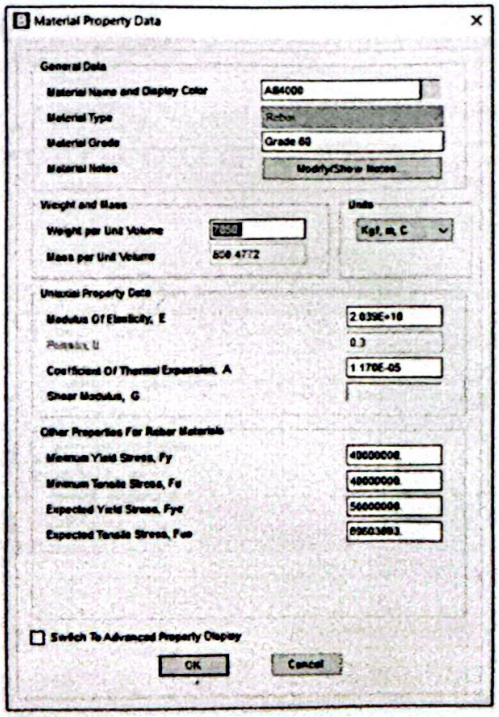
Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

⊗ تعریف مشخصات مصالح

ابتدا در قسمت Material بتن‌های رده ۳۰ و ۳۵ و سپس میلگرد AIII با حد تسلیم ۴۰۰۰ کیلوگرم بر مترمربع را تعریف می‌کنیم. مشخصات هر یک از مصالح ذکر شده در شکل‌های زیر مشخص است.



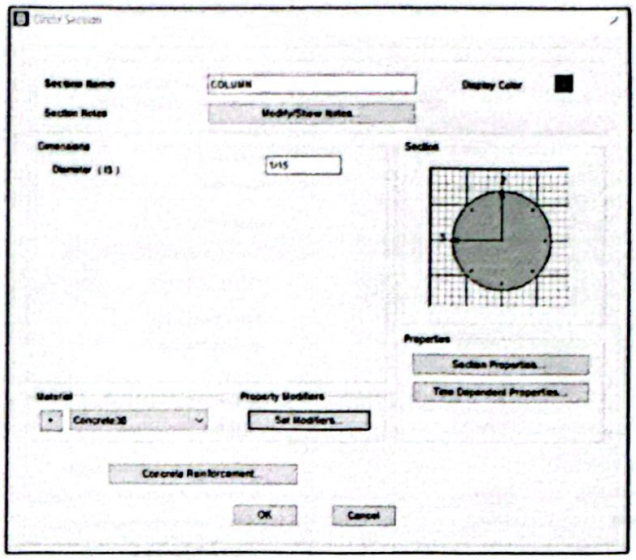




Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

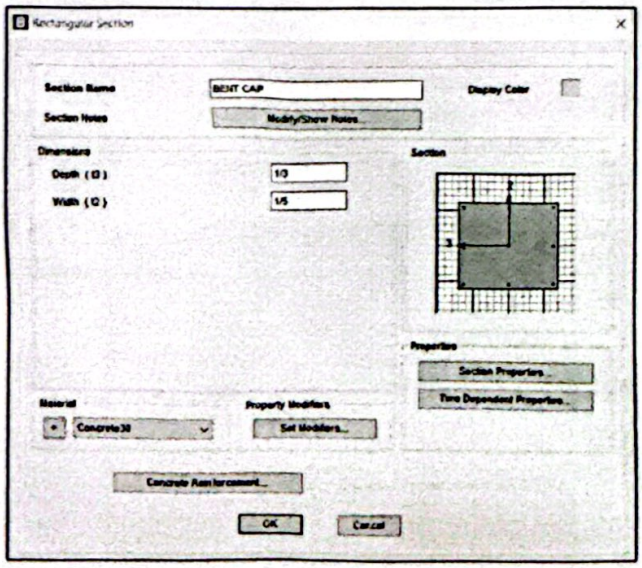
⊗ تعریف مقطع ستون

در این پروژه ستون بتنی دایره‌ای با قطر۱/۱۵ متر استفاده شده است. جهت تعریف این ستون در نرم‌افزار وارد قسمت Frame Section شده و مشخصات ستون را وارد می‌کنیم. بتن مورد استفاده در ستون‌ها C30 است.



⊗ تعریف مقطع سرستون

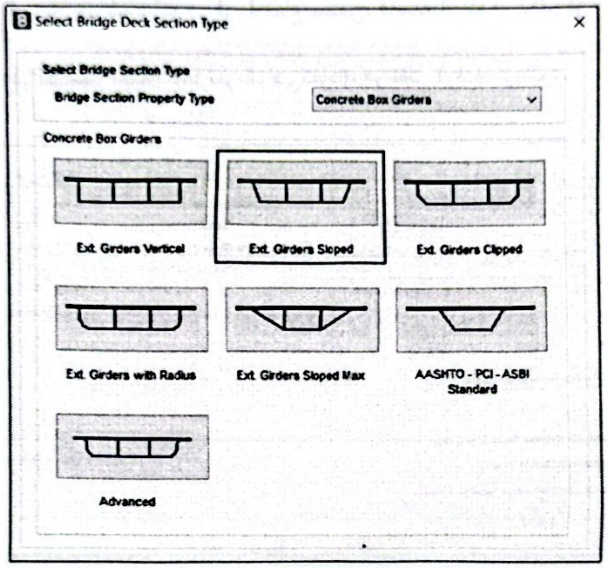
در این پروژه سرستون بتنی مستطیلی با سطح مقطع ۱/۳×۱/۵ مترمربع استفاده شده است. جهت تعریف این سرستون در نرم‌افزار وارد قسمت Frame Section شده و پس از انتخاب شکل مقطع مورد استفاده (Rectangular) و مشخصات سرستون را وارد می‌کنیم. بتن مورد استفاده در سرستون‌ها C30 است. همچنین باید در قسمت Concrete Reinforcement نوع طراحی را Beam می‌گذاریم.

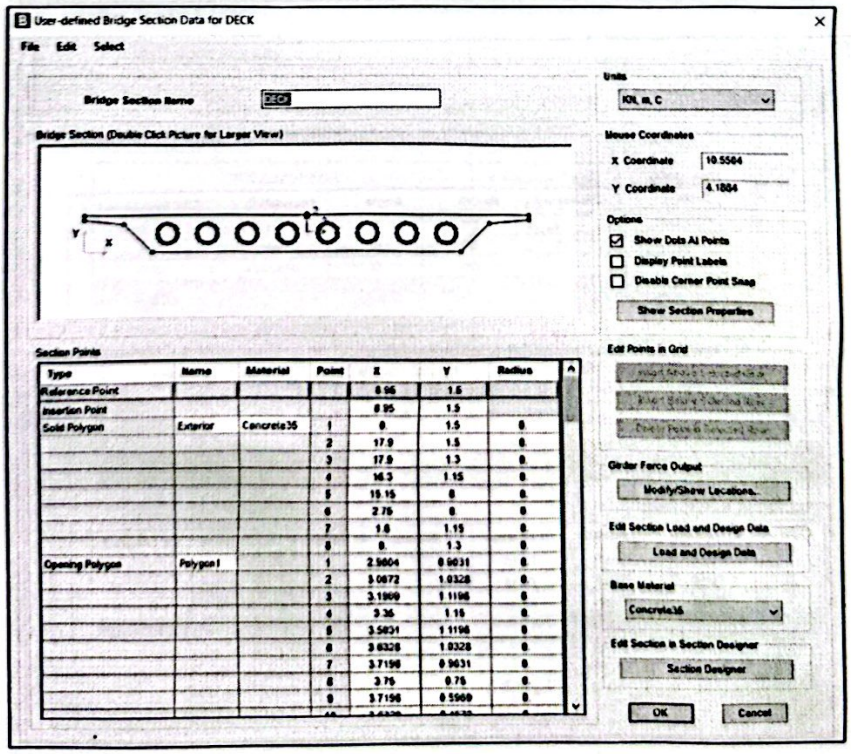


Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

⊗ تعریف عرشه پل

برای تعریف عرشه در پنل Summary Table باید گزینه‌ی Deck Section را انتخاب نمود. پس از آن می‌بایست نوع عرشه (مجوف، جعبه‌ای و ...) را از بین موارد پیشنهادی نرم‌افزار انتخاب نمود و یا اینکه یک فایل DXF را فراخوانی کرد. با توجه به اینکه در این پروژه از عرشه مجوف استفاده می‌شود، گزینه‌ی Ext. Girders Sloped را انتخاب نموده و با توجه با طراحی انجام شده در اتوکد ابعاد مورد نظر را وارد می‌نماییم.

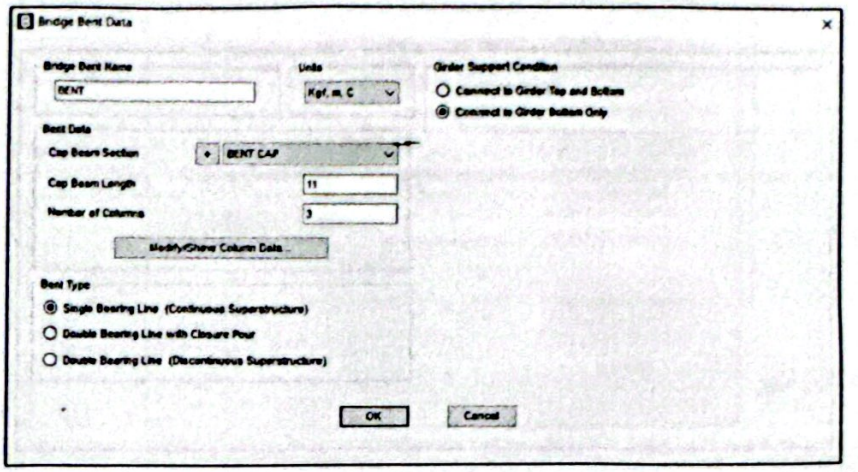


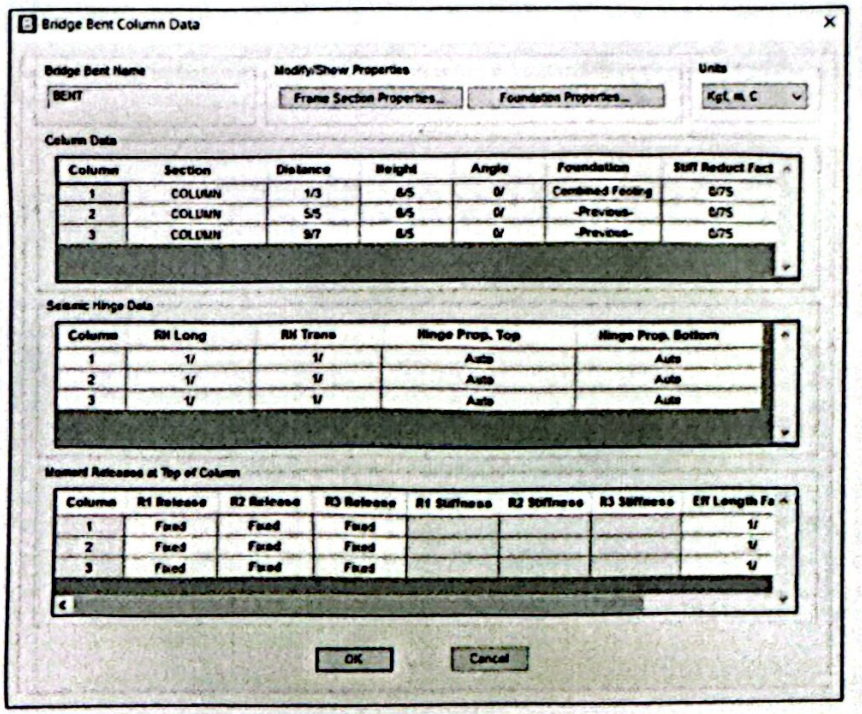


Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

⊗ تعریف پایه میانی

برای تعریف پایه میانی در پنل Summary Table باید گزینه‌ی Bent را انتخاب نمود. در این پروژه از پایه‌های سه ستونی با یک سرستون به طول ۱۱ متر استفاده شده است. فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون‌ها با در نظر گرفتن یک فاصله‌ی ۷۲/۵ سانتی‌متری از لبه‌های سرستون، ۴۲۰ سانتی‌متر است. همچنین ستون‌ها در پایه گیردار هستند. در قسمت Bent Type با توجه به پیوسته بودن عرشه در محل پایه‌ها گزینه‌ی Single Bearing Line را انتخاب می‌کنیم. در ادامه با انتخاب گزینه‌ی Modify پنجره‌ای باز می‌شود که در آن ارتفاع ستون، فاصله آن‌ها از یکدیگر و نوع اتصال به پی که به صورت Combined Footing (در قسمت تکیه‌گاه‌ها تعریف می‌شود)، در نظر گرفته می‌شود.





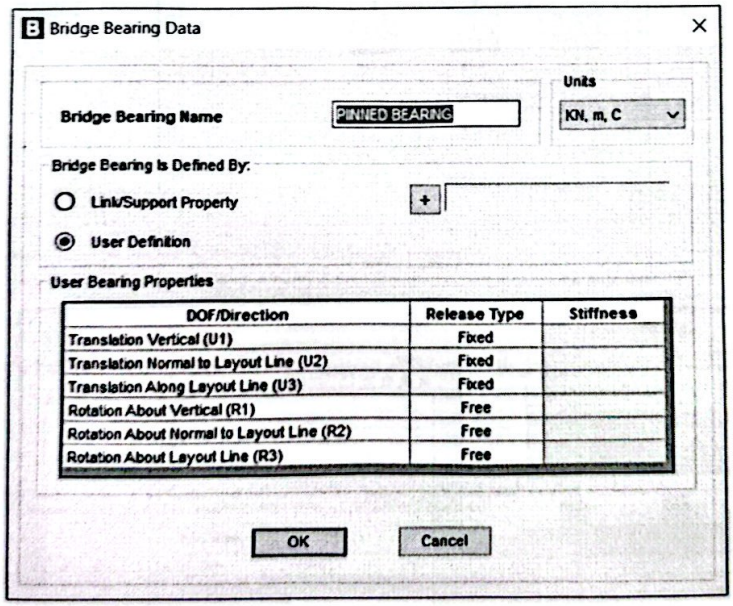
Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

۴-۲- معرفی تکیه‌گاه‌ها

تکیه‌گاه‌ها با توجه به رفتار طولی پل به سه نوع صلب، مفصلی و غلتکی تقسیم می‌شوند. در این پروژه اتصال روسازه به زیرسازه با الاستومر صورت گرفته که این به معنی اتصال مفصلی (سه جهت انتقالی ثابت و سه جهت دورانی آزاد) است. اتصالات کوله‌ها با عرشه هم با الاستومر است که به منزله‌ی اتصال غلتکی (جهت قائم و عمود بر Layout Line ثابت و سه جهت دورانی آزاد) است. چون می‌خواهیم کلیه‌ی نیروهای پای ستون به پی منتقل شود، اتصال پایه‌ها با فونداسیون به صورت گیردار (همه جهات ثابت) است.

⊗ تعریف تکیه‌گاه مفصلی

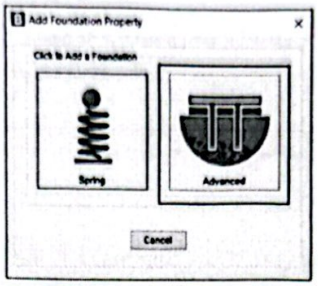
برای تعریف تکیه‌گاه مفصلی در پنل Summary Table باید گزینه‌ی Bearing را انتخاب نمود. سپس همانطور که در شکل زیر مشخص است، در هیچ جهتی هیچ‌گونه توانایی جابجایی نداشته و ثابت است. این اتصال مفصلی در واقع اتصال روسازه و زیرسازه را تعریف می‌کند که قطر ۵۰ سانتی‌متری و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متری دارد.

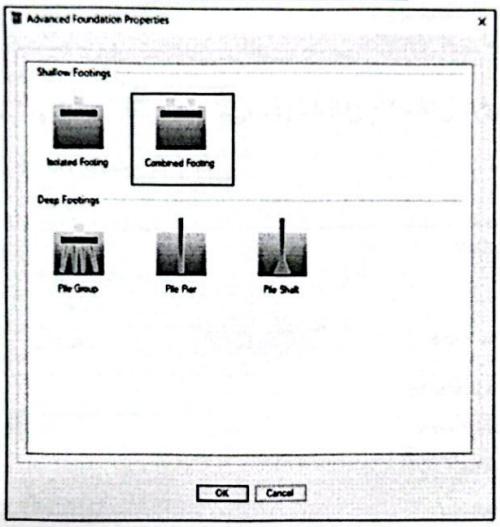


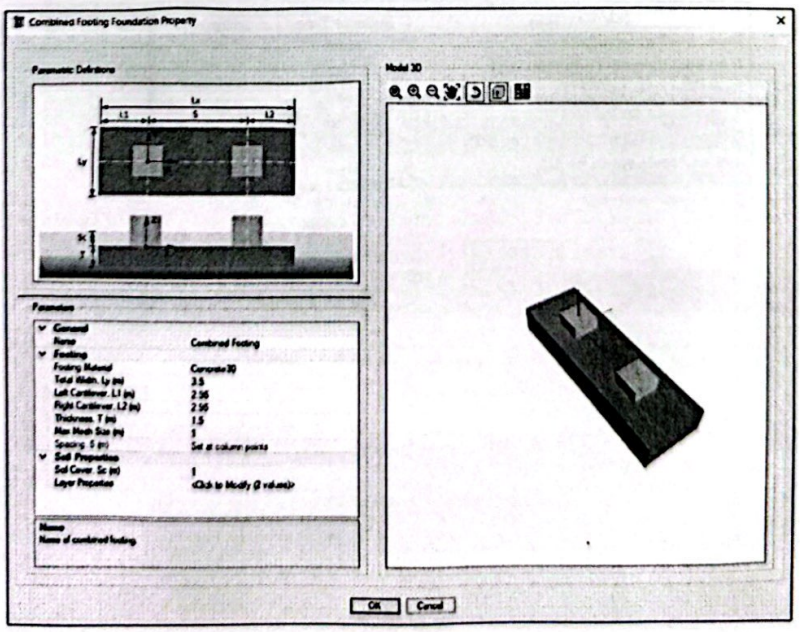
Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

⊗ تعریف تکیه‌گاه گیردار فونداسیون

برای تعریف تکیه‌گاه گیردار در پنل Summary Table باید گزینه‌ی Foundation را انتخاب نمود. در این پنجره گزینه‌ی Advanced و سپس Combined Footing را انتخاب می‌کنیم. در پنجره‌ی باز شده مطابق شکل زیر ابعاد پی و محل قرارگیری هر ستون را مشخص می‌کنیم.



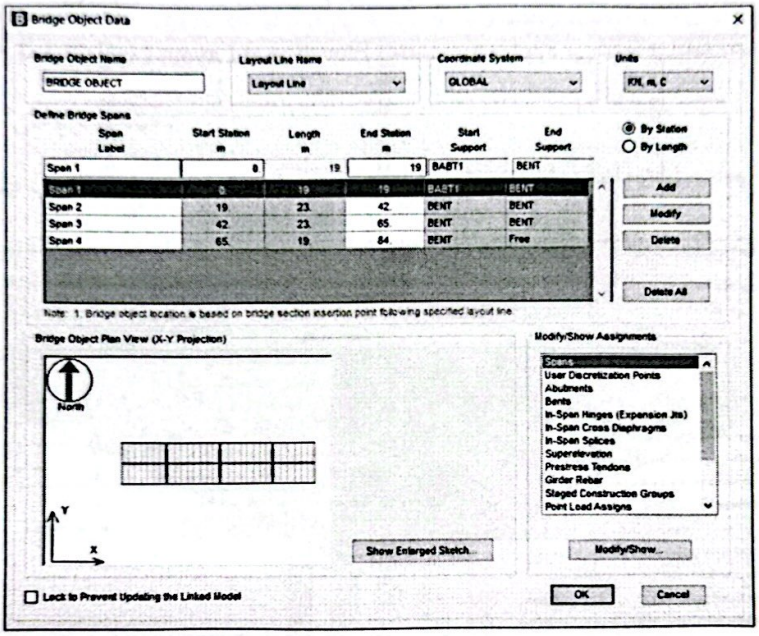




Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

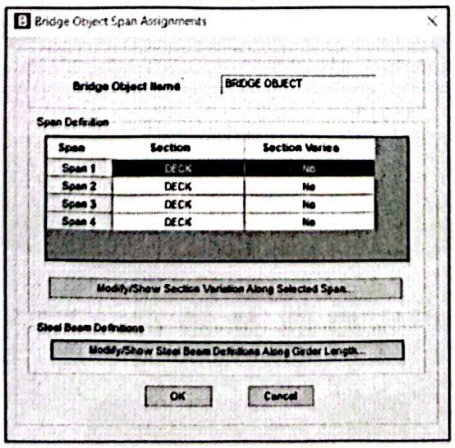
۴-۳ اختصاص اجزای پل

در این مرحله می‌بایست از مقاطع معرفی شده در مراحل قبل یک مدل یکپارچه به وجود بیاوریم. بدین منظور در ابتدا در پنل Summary Table وارد قسمت Bridge Object Definition شده و در آن مطابق شکل زیر ۴ دهانه موجود در این پروژه را تعریف می‌کنیم. همانطور که مشاهده می‌شود که دو دهانه‌ی ابتدایی و انتهایی ۱۹ متر و دو دهانه‌ی میانی ۲۳ متر در نظر گرفته شده‌اند.



⊗ اختصاص عرشه

برای اختصاص عرشه تعریف شده در پنل Bridge Object Assignment باید گزینه‌ی Deck Section را انتخاب نمود.

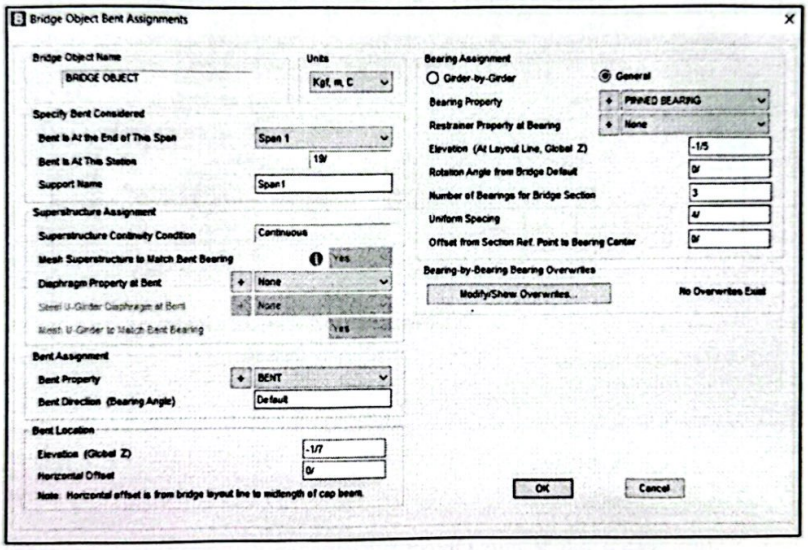


Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

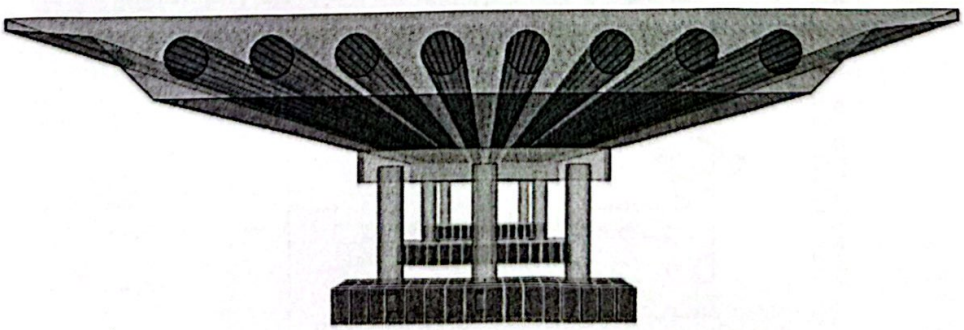
⊗ اختصاص پایه

برای اختصاص پایه تعریف شده در پنل Bridge Object Assignment باید گزینه‌ی Bent را انتخاب نمود. ابتدا باید این نکته را در نظر گرفت که تراز ارتفاعی مبنا ($z = 0$) در مدل، روی عرشه بدون آسفالت در نظر گرفته می‌شود. بنابراین تمام ترازهای ارتفاعی مربوط به اجزای پایه دارای علامت منفی خواهد بود. همانطور که در شکل زیر مشاهده می‌شود در قسمت Elevation (Global Z) باید بالاترین تراز ارتفاعی پایه (در محل اتصال به روسازه) را نشان دهد. که با توجه به این تعریف باید مجموع ضخامت الاستومر و عرشه را وارد نمود. قسمت Bearing Assignment را روی حالت General گذاشته و در Elevation at Layout Line, Global Z ضخامت عرشه را وارد می‌کنیم. در ادامه تعداد الاستومرها و فاصله مرکز به مرکز آن‌ها وارد می‌شوند.

موارد گفته شده برای هر دهانه باید در نرم‌افزار تعریف شوند که تصاویر مربوط به دهانه‌ی اول و دوم آورده شده‌اند.



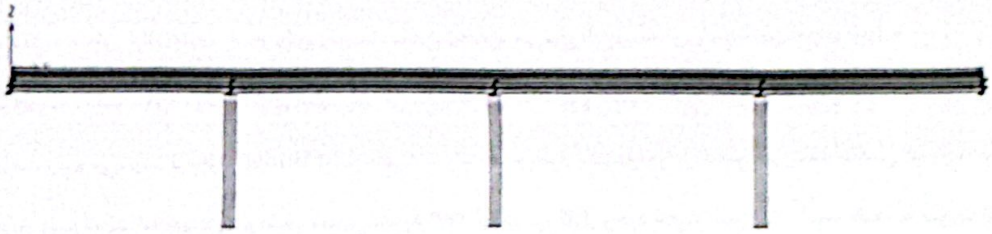
✓ مدلسازی در CSI BRIDGE

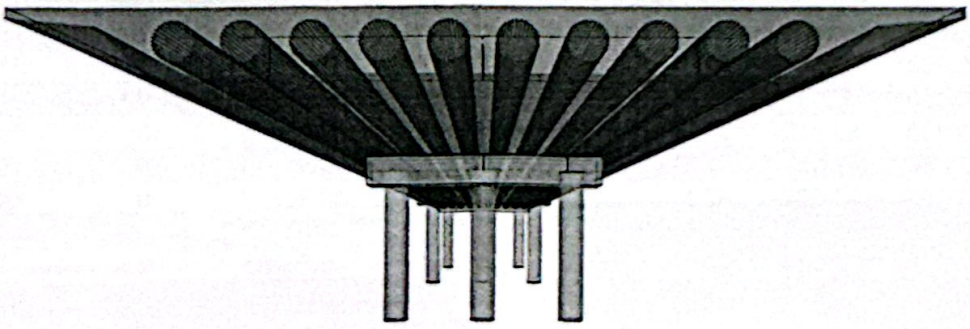


Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

✓ مدلسازی در SAP

با توجه به این که این پروژه در SAP با استفاده از Bridge Wizard مدلسازی نشده است عرشه به صورت یک تیر مدل شده و سپس بارگذاری خطی با توجه به محاسبات فصل دو صورت گرفته است.





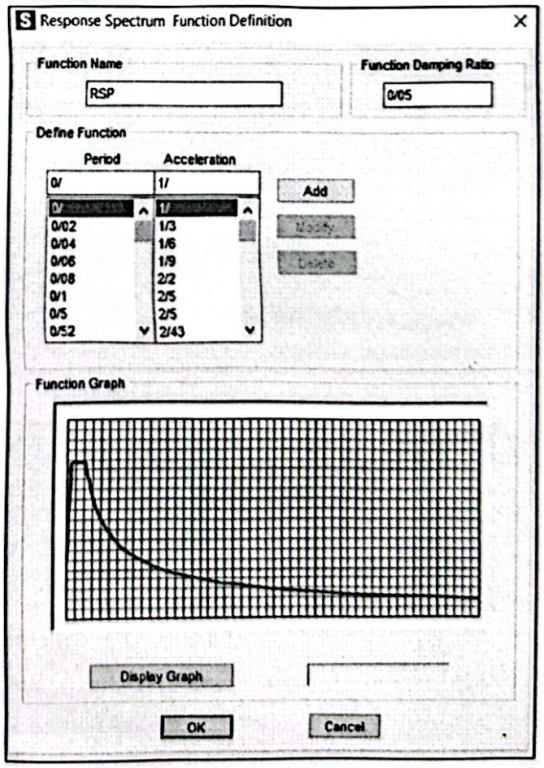
Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

فصل پنجم: آنالیز در نرم‌افزار

۵-۱ تعریف تابع طیف پاسخ (Response Spectrum Function)

تحلیل طیف پاسخ نوعی از تحلیل آماری است که به منظور تعیین پاسخ محتمل سازه به هنگام اعمال بارهای ناشی از زلزله انجام می‌پذیرد. نمودار طیف پاسخ برای یک راستای معین توسط نقاط پاسخ شتاب شبه طیفی در برابر زمان تناوب سازه رسم می‌شود. به منظور ارائه طیف پاسخ برای یک ساختگاه مشخص، می‌توان از طیف‌های پاسخ آیین‌نامه‌ای (نشریه شماره ۴۶۳ یا آشتو) استفاده نمود. طیف پاسخ دارای نسبت میرایی مشخص است است و معمولاً طیف‌های پاسخ آیین‌نامه‌ای با نسبت میرایی ۵ درصد رسم می‌شوند. نرم‌افزار CSI Bridge قادر است تا طیف پاسخ استاندارد را بر اساس آیین‌نامه چندین کشور به صورت خودکار رسم نماید. اما جهت رسم طیف مطابق نشریه ۴۶۳ که در نرم افزار وجود ندارد، است لازم است طیف به صورت دستی تعریف شود. طیف‌های آیین‌نامه‌ای در ایران به صورت نمودار ضریب بازتاب سازه برحسب زمان تناوب رسم می‌شوند و لازم است کاربر برای تبدیل ضریب بازتاب به شتاب طیفی، از ضریب مقیاس $\frac{AI}{R}g$ در Load Case مربوط به تحلیل طیفی استفاده کند. باید دقت کرد که انجام تحلیل طیفی وابسته به استخراج مودهای ارتعاشی از تحلیل مودال تعریف صحیح جرم سازه می‌باشد. با توجه به ضریب رفتار سازه در راستای طولی ($R_x = ۵$) و در راستای عرضی ($R_y = ۳$) طیف به صورت زیر تعریف شده است.

T (Sec)	B	T (Sec)	B
0	1	1/4	1/258446
0/02	1/3	1/5	1/201875
0/04	1/6	1/6	1/15126
0/06	1/9	1/7	1/105658
0/08	2/2	1/8	1/064319
0/1	2/5	1/9	1/026639
0/12	2/5	2	0/992126
0/14	2/5	2/5	0/854988
0/16	2/5	3	0/757134
0/48	2/5	3/5	0/68319
0/5	2/5	4	0/625
0/52	2/435479	4/5	0/577801
0/54	2/374967	5	0/538609
0/56	2/318078	5/5	0/50545
0/58	2/264478	6	0/476964
0/6	2/213872	6/5	0/45218
0/7	1/997659	7	0/430383
0/8	1/827511	8	0/393725
0/9	1/689501	9	0/363992
1	1/574901	10	0/339302
1/1	1/477945	11	0/318414
1/2	1/394652	12	0/300469
1/3	1/322182	13	0/284855



Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

۵-۲ خروجی نرم‌افزار CSI Bridge

Frame	Station	Output Case	P	V2	V3	M2	M3
Text	m	Text	Tonf	Tonf	Tonf	Tonf-m	Tonf-m
20	0	Envelope	-486.38	-85.26	-89.11	-599.94	-242.80
21	0	Envelope	-369.47	-86.10	-89.93	-602.84	-243.47
22	0	Envelope	-497.43	-80.64	-90.41	-604.65	-229.58
36	0	Envelope	-562.27	-87.25	-90.22	-605.13	-249.31
37	0	Envelope	-365.60	-87.15	-90.25	-605.22	-246.68
38	0	Envelope	-558.63	-81.54	-90.17	-605.14	-232.19
52	0	Envelope	-502.93	-93.49	-90.20	-604.56	-266.64
53	0	Envelope	-342.79	-94.07	-90.10	-604.24	-265.96
54	0	Envelope	-502.97	-88.09	-90.15	-604.57	-250.50

۵-۳ خروجی نرم‌افزار SAP2000 (V24)

Frame	Station	OutputCase	P	V2	V3	M2	M3
Text	m	Text	Tonf	Tonf	Tonf	Tonf-m	Tonf-m
17	0	Envelope	-485.02	-66.37	-70.95	-250.40	-529.97
18	0	Envelope	-392.16	-66.40	-73.49	-256.72	-530.01
19	0	Envelope	-485.02	-66.21	-72.48	-254.28	-529.33
20	0	Envelope	-482.29	-66.29	-69.78	-246.28	-529.69
21	0	Envelope	-387.98	-66.40	-72.27	-252.49	-530.05
22	0	Envelope	-482.29	-66.29	-71.29	-250.11	-529.69
23	0	Envelope	-485.02	-66.21	-70.95	-250.40	-529.33
24	0	Envelope	-392.16	-66.40	-73.49	-256.72	-530.02
25	0	Envelope	-485.02	-66.37	-72.48	-254.27	-529.98

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

فصل ششم: طراحی بر اساس نیرو (Force Based Design)

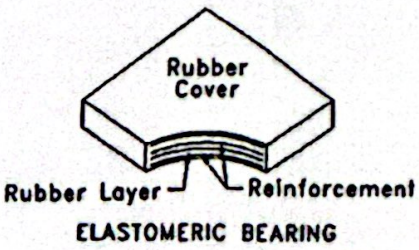
در طراحی به روش Force Based معیار کنترل نیرویی است. در این روش از ضوابط و روابط آیین نامه AASHTO با فرض دسته بندی پل به عنوان پل متعارف، استفاده می‌شود.

در روش طراحی نیرویی ابتدا برش پایه الاستیک کاهش یافته را بدست می‌آوریم و آنالیز خطی (استاتیکی خطی یا دینامیکی طیفی) انجام می‌دهیم. در طراحی پل‌ها با این روش برخلاف طراحی ساختمان‌ها نمی‌توانیم به طور صریح تغییرشکل‌ها را بررسی کنیم. در واقع معیار دریفت مجاز Globally و Locally نداریم.

۶-۱ طراحی الاستومرها

الاستومر ها از المان‌های مهم در پل‌ها می‌باشند که توانایی تغییر شکل‌های زیادی را دارا هستند. این المان‌ها در اکثر کشورهای دنیا به جز نیوزلند به مقصود غیرلرزه‌ای استفاده می‌شوند، در ایران الاستومرها عمدتا به مقصود لرزه‌ای به کار گرفته می‌شوند و از آنجا که این المان‌ها جذب انرژی کمی دارند به کارگیری آنها به عنوان تنها المان لرزه‌بر شاید مناسب نباشد و از سوی دیگر آیین‌نامه‌ها الزام به الاستیک ماندن زیرسازه در صورت استفاده از الاستومرها دارند. به طور کلی الاستومرها به صورت لینک‌هایی که سختی جانبی دارند در نرم افزار تعریف می‌شوند و در جهت قائم از مدل کردن سختی محوری آنها به دلیل تاثیر کم آن‌ها اجتناب می‌شود. در گام اول طراحی الاستومرها، برای بدست آوردن میزان نیروی محوری و تقاضای تغییر شکل آن‌ها، روی کوله‌ها به صورت مفصل غلتکی مدل می‌شود و در گام‌های بعدی با انتخاب ابعاد و ضخامت الاستومرها سختی در دو راستای افقی و قائم به مدل معرفی می‌شوند. برای تعیین میزان نیروی محوری و تقاضای تغییر شکل روی الاستومرها از ترکیب بارهای $DL + ۰.۵۰۰ + EX + 0.۳۰۰$ و $DL + ۰.۵۰۰ + EY + 0.۳۰۰$ در هر گام استفاده شده است و در هر گام تمامی روابط آیین‌نامه برای الاستومر انتخابی چک می‌شود. در ادامه تمامی روابط کنترل الاستومرها آورده شده است.

تکیه‌گاه‌های مورد استفاده در جداسازی لرزه‌ای می‌بایست لایه‌ای بوده و توسط ورق‌های فولادی میانی مسلح شده باشند.



ELASTOMERIC BEARING

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

در این گزارش الاستومرهای کوله ابتدایی طراحی می‌شوند. به طوری که نیروهای وارد بر آن‌ها از نرم‌افزار استخراج شده و کنترل‌های مربوطه صورت می‌گیرد. طراحی الاستومرهای پایه‌های میانی در اکسل صورت گرفته است.

⊗ کنترل حداقل و حداکثر سطح مقطع الاستومرها

حداکثر تنش قابل تحمل الاستومر بسته به نوع الاستومر متفاوت خواهد بود. این تنش قابل تحمل برای الاستومرهای واردائی رنجی در حدود ۱۲۰ تا ۱۵۰ $\frac{kg}{cm^2}$ و برای الاستومرهای داخلی در حدود ۶۰ تا ۸۰ $\frac{kg}{cm^2}$ خواهد بود. در این پروژه تنش قابل تحمل ۸۰ $\frac{kg}{cm^2}$ لحاظ گردیده است و حداقل تنش موجود بر روی الاستومر برای پایداری الاستومر در برابر لغزش ۳۰ $\frac{kg}{cm^2}$ لحاظ گردیده است.

$$۳۰\ \frac{kg}{cm^2} \leq \sigma = \frac{P_{EQ}}{A} \leq ۸۰\ \frac{kg}{cm^2}$$

ABUT	COMB	Pe (t)	A_{max} (cm^2)	A_{min} (cm^2)	D(cm)	A	CONTROL
1	COMB 1	134	4466/66667	1675	50	1963/5	OK
1	COMB 2	134	4466/66667	1675	50	1963/5	OK
1	COMB 3	134	4466/66667	1675	50	1963/5	OK
1	COMB 4	134	4466/66667	1675	50	1963/5	OK
1	COMB 5	134	4466/66667	1675	50	1963/5	OK
1	COMB 6	134	4466/66667	1675	50	1963/5	OK
1	COMB 7	134	4466/66667	1675	50	1963/5	OK
1	COMB 8	134	4466/66667	1675	50	1963/5	OK
1	D+L	134	4466/66667	1675	50	1963/5	OK
1	D+0.5 L	134	4466/66667	1675	50	1963/5	OK

⊗ کنترل کرنش برشی کل

کرنش برشی کل طراحی که با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود باید توسط معیارهای زیر کنترل شود:

$$\varepsilon_{td} = \varepsilon_c + \varepsilon_s + \varepsilon_\alpha$$

که در این رابطه، ε_c کرنش برشی ناشی از فشار، ε_s کرنش برشی ناشی از تغییرمکان‌های طراحی لرزه‌ای و ε_α کرنش برشی ناشی از دوران زاویه‌ای الاستومرها می‌باشد که در ادامه روابط آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

∇ کرنش برشی ناشی از فشار (ε_c)

از روابط زیر استفاده می‌شود بطوری که در این رابطه، σ_e تنش نرمال موثر ماکزیمم نشیمنگاه می‌باشد.

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

$$\varepsilon_c = \frac{۱.۵\,\sigma_e}{SG}$$

$$\sigma_e = \frac{N_{sd}}{A_r}$$

که در این رابطه، N_{sd} نیروی محوری ماکزیمم روی الاستومر تحت ترکیب بارهای زلزله و A_r حداقل سطح مقطع موثر کاهش داده شده الاستومر است که برای الاستومرهای مستطیلی با ورق فولادی به ابعاد b_x و b_y به صورت رابطه زیر بوده که در این روابط $d_{E\,dx}$ و $d_{E\,dy}$ تغییرمکان‌های نسبی کلی لرزه‌ای در جهات x و y الاستومر است که شامل تغییرمکان لرزه‌ای افزایش‌یافته (به میزان ۵۰ درصد) با اثر پیچشی و نیز تغییرمکان‌های ناشی از تغییرشکل‌های تحمیل شده به روسازه همانند افت و خزش و ۵۰ درصد اثرات حرارتی طراحی است.

← نشیمنگاه‌های مستطیلی

$$A_r = (b_x - d_{E\,dx})(b_y - d_{E\,dy})$$

← نشیمنگاه‌های دایره‌ای با ورق فولادی به قطر D

$$A_r = \frac{(\delta - Sin\delta)D^۲}{۴}$$

$$\delta = ۲\arccos\left(\frac{d_{Ed}}{D}\right)$$

$$d_{Ed} = \sqrt{d_{Edx}^2 + d_{Edy}^2}$$

ABUT	COMB	d_{Edx} (cm)	d_{Edy} (cm)	d_{Ed} (cm)	δ	A_r (cm^۲)
1	COMB 1	13/574	0/657	13/590	2/591	1292/447
1	COMB 2	13/574	-0/657	13/590	2/591	1292/446
1	COMB 3	-9/502	5/8E-05	9/502	2/759	1491/269
1	COMB 4	-13/574	-0/657	13/590	2/591	1292/447
1	COMB 5	4/072	2/189	4/624	2/956	1732/649
1	COMB 6	-4/072	2/189	4/624	2/956	1732/647
1	COMB 7	4/072	-2/189	4/624	2/956	1732/647
1	COMB 8	-4/072	-2/189	4/624	2/956	1732/649
1	D+L	0	0	0	3/142	1963/495
1	D+0.5 L	0	0	0	3/1416	1963/4954

فاکتور شکل لایه‌ای الاستومر یا S نسبت سطح فشرده شده موثر به سطح جانبی آزاد مستعد انبساط است. در روابط زیر t_i ضخامت لایه‌های الاستومر و t_t ضخامت کل الاستومر می‌باشد.

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

← نشیمنگاه‌های مستطیلی

$$S = \frac{b_x\, b_y}{2(b_x + b_y)\, t_i}$$

← نشیمنگاه‌های دایره‌ای

$$S = \frac{D}{2t_i}$$

ABUT	COMB	$N_{sd} = P_e$ (t)	A_r (cm^2)	σ_e ($\frac{t}{cm^2}$)	t_i (cm)	t_t (cm)	S	G ($\frac{N}{mm^2}$)	ε_c
1	COMB 1	134/0	1292/447	0/089	2	20	6/250	1	2/488
1	COMB 2	134/0	1292/446	0/089	2	20	6/250	1	2/488
1	COMB 3	134/0	1491/269	0/082	2	20	6/250	1	2/157
1	COMB 4	134/0	1292/447	0/089	2	20	6/250	1	2/488
1	COMB 5	134/0	1732/649	0/077	2	20	6/250	1	1/856
1	COMB 6	134/0	1732/647	0/077	2	20	6/250	1	1/856
1	COMB 7	134/0	1732/647	0/077	2	20	6/250	1	1/856
1	COMB 8	134/0	1732/649	0/077	2	20	6/250	1	1/856
1	D+L	134/0	1963/495	0/068	2	20	6/250	1	1/638
1	D+0.5 L	134/0	1963/495	0/0682	2	20	6/2500	1	1/6379

∇ کرنش برشی ناشی از تغییرمکان‌های طراحی لرزه‌ای (ε_s)

$$\varepsilon_s = \frac{d_{Ed}}{t_t}$$

$$d_{Ed} = \sqrt{d_{Edx}^2 + d_{Edy}^2}$$

$$t_t = \sum t_i$$

ABUT	COMB	d_{Ed} (cm)	t_t (cm)	ε_s
1	COMB 1	0/657	20	0/679511
1	COMB 2	-0/657	20	0/679511
1	COMB 3	5/8E-05	20	0/475102
1	COMB 4	-0/657	20	0/679511
1	COMB 5	2/189	20	0/231177
1	COMB 6	2/189	20	0/231178
1	COMB 7	-2/189	20	0/231178
1	COMB 8	-2/189	20	0/231177
1	D+L	0	20	0
1	D+0.5 L	0	20	0

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

∇ کرنش برشی ناشی از دوران زاویه‌ای (ε_α)

← نشیمنگاه‌های مستطیلی

که α_x و α_y دوران زاویه‌ای در طول ابعاد b_x و b_y الاستومر می‌باشند.

$$\varepsilon_\alpha = \frac{(b_x^2 \alpha_x + b_y^2 \alpha_y)}{2\, t_i\, t_t}$$

← نشیمنگاه‌های دایره‌ای

$$\varepsilon_\alpha = \frac{D^2 \alpha}{2\, t_i\, t_t}$$

$$\alpha = \sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2}$$

ABUT	COMB	t_i (cm)	t_t (cm)	α_x	α_y	α	ε_α
1	COMB 1	2	20	0	0/000906	0/000906	0/028
1	COMB 2	2	20	0	0/000906	0/000906	0/028
1	COMB 3	2	20	0	0/000906	0/000906	0/028
1	COMB 4	2	20	0	0/000906	0/000906	0/028
1	COMB 5	2	20	0	0/000906	0/000906	0/028
1	COMB 6	2	20	0	0/000906	0/000906	0/028
1	COMB 7	2	20	0	0/000906	0/000906	0/028
1	COMB 8	2	20	0	0/000906	0/000906	0/028
1	D+L	2	20	0	0/000906	0/000906	0/028
1	D+0.5 L	2	20	0	0/000964	0/000964	0/030

∇ معیارهای طراحی نشیمنگاه‌های الاستومری معمولی

کرنش برش کل باید به رابطه $\varepsilon_{td} \leq 0.75\, \varepsilon_{bu}$ محدود شود که ε_{bu} برای نشیمنگاه‌هایی که ضوابط تست‌های مخصوص لرزه‌ای را ارضا می‌نمایند برابر ۵ و برای نشیمنگاه‌های لایه‌ای معمولی برابر ۴ در نظر گرفته می‌شود.

ABUT	COMB	ε_c	ε_s	ε_α	ε_{td}	ε_{bu}	CONTROL
1	COMB 1	2/488	0/6795	0/028	3/1961	5	OK
1	COMB 2	2/488	0/6795	0/028	3/1961	5	OK
1	COMB 3	2/157	0/4751	0/028	2/6600	5	OK
1	COMB 4	2/488	0/6795	0/028	3/1961	5	OK
1	COMB 5	1/856	0/2312	0/028	2/1156	5	OK
1	COMB 6	1/856	0/2312	0/028	2/1156	5	OK
1	COMB 7	1/856	0/2312	0/028	2/1156	5	OK
1	COMB 8	1/856	0/2312	0/028	2/1156	5	OK
1	D+L	1/638	0/0000	0/028	1/6662	5	OK
1	D+0.5 L	1/6379	0/0000	0/030	1/6680	5	OK

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

⊗ کنترل کرنش برشی لرزه‌ای

کرنش برش لرزه‌ای طراحی نیز می‌بایست به مقدار زیر محدود گردد:

$$\varepsilon_s \leq ۲$$

این ضابطه طبق آیین‌نامه یوروکد آورده شده است و در این قسمت به دلیل ۱/۳ برابر بودن طیف آیین‌نامه یوروکد نسبت به طیف آیین نامه ۲۸۰۰ حد ε_s به میزان ۱/۳ برابر کمتر شده است.

$$\varepsilon_s \leq \frac{۲.۰}{۱.۳} = ۱.۵۳۸$$

ABUT	COMB	ε_s	CONTROL
1	COMB 1	0/6795	OK
1	COMB 2	0/6795	OK
1	COMB 3	0/4751	OK
1	COMB 4	0/6795	OK
1	COMB 5	0/2312	OK
1	COMB 6	0/2312	OK
1	COMB 7	0/2312	OK
1	COMB 8	0/2312	OK
1	D+L	0/0000	OK
1	D+0.5 L	0/0000	OK

⊗ کنترل پایداری

در کنترل پایداری الاستومر یکی از دو معیار زیر می‌بایست ارضا گردد:

$$\frac{b_{min}}{t_t} > ۴ \quad \text{یا} \quad \frac{\sigma_e}{G} < \frac{۲\, b_{min}}{۳\, t_t}\, S_{min}$$

که در روابط بالا S_{min} و b_{min} حداقل فاکتور شکل لایه‌های نشیمنگاه و حداقل بعد الاستومر خواهند بود.

$$A_{min} = ۱۶۷۵\, cm^۲ \quad ۱۶۷۵\, cm^۲ = \frac{\pi D^۲}{۴} \quad D_{min} = ۴۷$$

$$S_{min} = \frac{D_{min}}{۴ t_i} = \frac{۴۷}{۴ \times ۲} = ۵.۸۷۵$$

$$\frac{\sigma_e}{G} < \frac{۲\, b_{min}}{۳\, t_t}\, S_{min} = \frac{۲ \times ۴۷}{۳ \times ۲۰} \times ۵.۸۷۵ \times ۱۰ = ۹۲\, \frac{kg}{cm^۲}$$

$$\sigma_e < ۹۲\, \frac{kg}{cm^۲}$$

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

⊗ کنترل گیرداری نشیمنگاه

همچنین گیرداری نشیمنگاه طبق روابط زیر باید کنترل گردد:

چنانچه هر دو معیار زیر تحت بدترین شرایط تلاش‌های لرزه‌ای ارضاء گردد، می‌توان انتظار داشت اصطکاک به عنوان عامل جلوگیری از لغزش در نظر گرفته شود.

$$\frac{V_{Ed}}{N_{Ed}} \leq K_{\cdot} + \frac{K_f}{\sigma_e}$$

$$\sigma_e \geq ۳ \frac{N}{mm^۲}$$

در این روابط $K_{\cdot}$ ، برای نشیمنگاه‌های با یک لایه الاستومر خارجی برابر ۰/۱ و برای نشیمنگاه‌های با ورق‌های فولادی و دارای پوشش‌های خارجی برابر ۰/۵ می‌باشد. همچنین K_f برای بتن برابر ۰/۶ و برای بقیه سطوح برابر ۰/۲ است.

V_{Ed} و N_{Ed} نیز نیروی برشی و نیروی محوری هستند که هم‌زمان از طریق الاستومر انتقال می‌یابند. (در ترکیب بار طراحی لرزه‌ای)

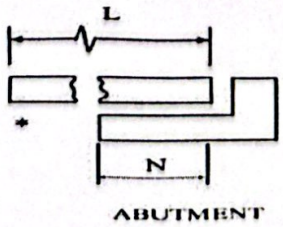
LINK ID	COMB	V2 (t)	V3 (t)	N_{Ed} (t)	σ_e ($\frac{N}{mm^۲}$)	$K_{\cdot}$	K_f	CTRL1	CTRL2
9	COMB1	19/004	0/9195	134/00	10/3679	0/5	0/6	OK	OK
9	COMB2	19/004	-0/9195	134/00	10/3679	0/5	0/6	OK	OK
9	COMB3	-13/3028	6/04E-06	134/00	8/9856	0/5	0/6	OK	OK
9	COMB4	-19/004	-0/9195	134/00	10/3679	0/5	0/6	OK	OK
9	COMB5	5/7012	3/065	134/00	7/7338	0/5	0/6	OK	OK
9	COMB6	-5/7012	3/065	134/00	7/7338	0/5	0/6	OK	OK
9	COMB7	5/7012	-3/065	134/00	7/7338	0/5	0/6	OK	OK
9	COMB8	-5/7012	-3/065	134/00	7/7338	0/5	0/6	OK	OK

⊗ کنترل حداقل طول نشیمن الاستومرها

با توجه به بند ۴،۱۲،۲ آیین‌نامه آشتو برای نواحی C, B, A حداقل طول نشیمن N برابر خواهد بود با:

$$N = (۸ + ۰،۰۲۵ + ۰،۰۸۵)(۱ + ۰،۰۰۰۱۲۵ s^۲) \quad (in)$$

که در رابطه بالا L برابر با طول عرشه از انتهای گیردار تا محل کوله‌ها خواهد بود و H ارتفاع میانگین پایه‌ها و s شیب در پلان پل خواهد بود.



Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

برای ناحیه D با توجه به بند ۴،۱۲،۳ حداقل طول نشیمن N برابر خواهد بود با:

$$N = (۴ + ۱.۶۵\Delta_{EQ})(۱ + ۰.۰۰۰۱۲۵\, s^{۲}) > ۲۴\ in = ۶۰۰\ mm$$

که در رابطه بالا Δ_{EQ} تقاضای الاستیک سازه تحت ترکیب بار لرزه‌ای و S شیب در پلان پل خواهد بود.

که این ضابطه بعد از انتخاب نهایی ابعاد الاستومر به صورت ۲۵۰ × ۷۵۰ × ۸۵۰ (بعد از آخرین سعی و خطا) در ذیل چک شده است.

$$N = ۷۵۰ > ۶۰۰\ mm$$

در شروع گام اول با محدود نمودن تنش قائم در الاستومرها تحت تمامی ترکیب بارهای ذکر شده ابعاد اولیه انتخاب می‌شوند به طوری‌که تنش در الاستومر از ۳۰ تا ۸۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع محدود شود.

$$۳۰\ \frac{kg}{cm^{۲}} \le \sigma = \frac{P_{EQ}}{A} \le ۸۰\ \frac{kg}{cm^{۲}}$$

که در این رابطه P_{EQ} برابر است با نیروی محوری الاستومر تحت بحرانی‌ترین ترکیب بارهای $DL + ۰.۵۰۰ + EY + ۰.۳۰۰$ و $DL + ۰.۵۰۰ + EX + ۰.۳۰۰$.

درگام های بعدی نیز با رعایت بند فوق و سایر ضوابط ذکر شده برای انتخاب الاستومر سعی و خطا انجام می‌گیرد.

سختی الاستومرها در جهت طولی و عرضی از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$K_h = \frac{GA}{t_{eff}}$$

که در رابطه بالا، G مدول برشی الاستومر، t_{eff} ضخامت موثر و A سطح مقطع الاستومر می‌باشند. مقدار مدول برشی الاستومر ۱۰ $\frac{kg}{cm^{۲}}$ لحاظ شده است. برای لحاظ کردن سختی الاستومرها در جهت عرضی و طولی در مدل از رابطه بالا استفاده شده است و سختی‌ها در هر گام در مدل اصلاح می‌شوند.

تمامی محاسبات و کنترل‌ها در گام‌های مختلف انجام شده و پس از انجام سعی و خطا در نهایت ابعاد ۲۰ × ۵۰ برای هر کدام از الاستومرهای کوله و ابعاد ۳۰ × ۶۵ بدست خواهد آمد.

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

۶-۲ طراحی ستون‌ها

با توجه مشخصات ستون‌هایی که داریم و همچنین نیروهایی که از نرم‌افزار استخراج می‌شوند، ستون‌ها را از لحاظ خمشی و برشی و تعداد آرماتورهای مورد نیاز مورد بررسی و طراحی قرار می‌دهیم.

۶-۲-۱ طراحی خمشی ستون‌ها

⊗ تعیین رفتار پایه‌ها

آیین‌نامه آشتو برای تعیین رفتار پایه‌ها در هر جهت رابطه زیر را بررسی می‌کند:

$$\frac{H}{B} < ۲.۵ \rightarrow Shear\ Control$$

$$\frac{H}{B} > ۲.۵ \rightarrow Flexural\ Control$$

در جهت عرضی و طولی:

$$\frac{H}{B} = \frac{۶۵۵}{۱۱۵} = ۵.۷ > ۲.۵ \rightarrow Flexural\ Control$$

بنابراین رفتار در هر دو جهت خمش کنترل است.

⊗ محاسبه نسبت ALR

حداکثر نیروی محوری ناشی از ترکیب بار DL+0.5LL برابر است با:

$$P_u = ۴۱۴.۴۸۶\ t$$

$$ALR = \frac{P_u}{A_g f_c'} = \frac{۴۱۴.۴۸۶\ t}{\frac{\pi \times ۱۱۵^۲}{۴} cm^۲ \times ۳۰ \frac{N}{mm^۲}} \times ۱۰۰ = ۰.۱۳۳$$

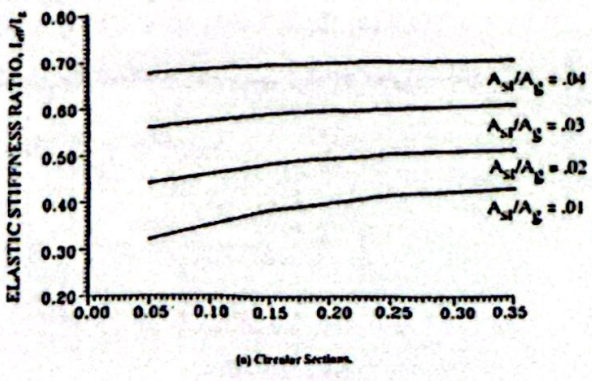
⊗ اصلاح سختی

پس از مدل‌سازی پل و اعمال بارهای مرده و زنده با توجه به نیروی محوری موجود در هر پایه و درصد آرماتور طولی آن سختی هر پایه با استفاده از گراف زیر اصلاح می‌شود.

$$ALR = ۰.۱۳۳$$

$$\rho_L = ۰.۰۲$$

$$\frac{I_{eff}}{I_g} = ۰.۴۷$$



(a) Circular Sections

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

21	Envelope	-388/0	-263/9	-695/9	0/7	-596/0	-135/1	-213/8
22	Envelope	-250/2	256/5	695/3	0/7	-338/4	115/6	188/1
22	Envelope	-486/6	-260/9	-695/3	0/6	-828/1	-148/0	-236/6
23	Envelope	-254/6	267/2	695/8	0/7	-345/7	120/9	188/9
23	Envelope	-490/1	-262/7	-694/9	0/6	-837/2	-149/6	-237/4
24	Envelope	-392/2	270/3	695/9	0/6	-605/0	139/0	214/7
24	Envelope	-392/2	-270/3	-695/9	0/6	-605/0	-139/0	-214/7
25	Envelope	-254/6	262/7	695/8	0/7	-345/7	118/9	188/9
25	Envelope	-490/1	-267/2	-695/8	0/6	-837/2	-152/1	-237/7

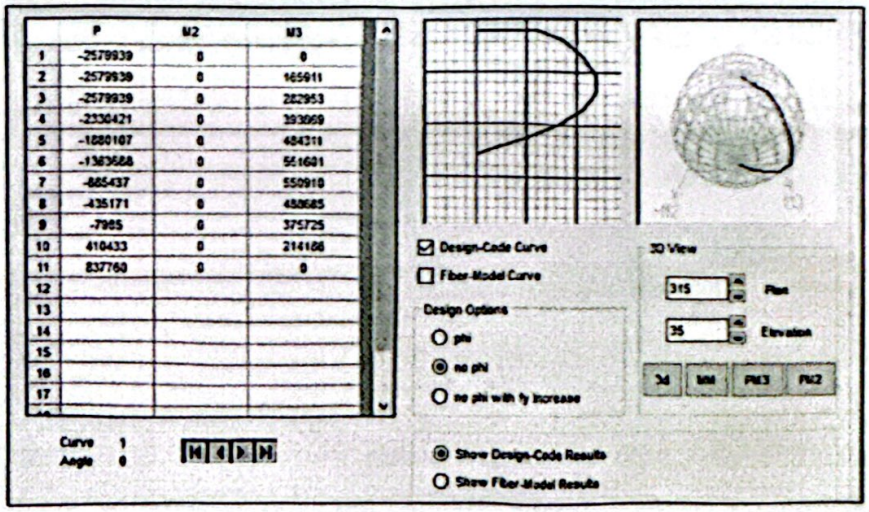
⊗ محاسبه آرماتورهای طولی

برای طراحی خمشی، ابتدا نیازمند میزان آرماتور طولی هستیم. طبق توصیه آیین‌نامه‌ها ρ_L باید بین یک تا چهار درصد باشد. همانطور که قبلاً ذکر شد در گام اول ρ_L را برابر ۲ درصد در نظر می‌گیریم. با توجه به میزان آرماتور (۳۴ آرماتور طولی با قطر ۲۰ میلی‌متر) منحنی M-P برای هر جهت استخراج می‌شود. در صورتی که تقاضاهای بدست آمده در هر جهت داخل منحنی M-P آن جهت باشد مقطع جوابگو خواهد بود.

$$\rho_L = ۰.۰۲ = \frac{A_s}{A_g} \quad \rightarrow \quad A_s = ۰.۰۲ \times \frac{\pi \times ۱۱۵^۲}{۴} = ۲۰۸\, cm^۲$$

$$A_s = ۲۰۸\, cm^۲ = n \times \frac{\pi \times ۲.۸^۲}{۴} \quad \rightarrow \quad n = ۳۴$$

⊗ کنترل خمش در مقطع ستون

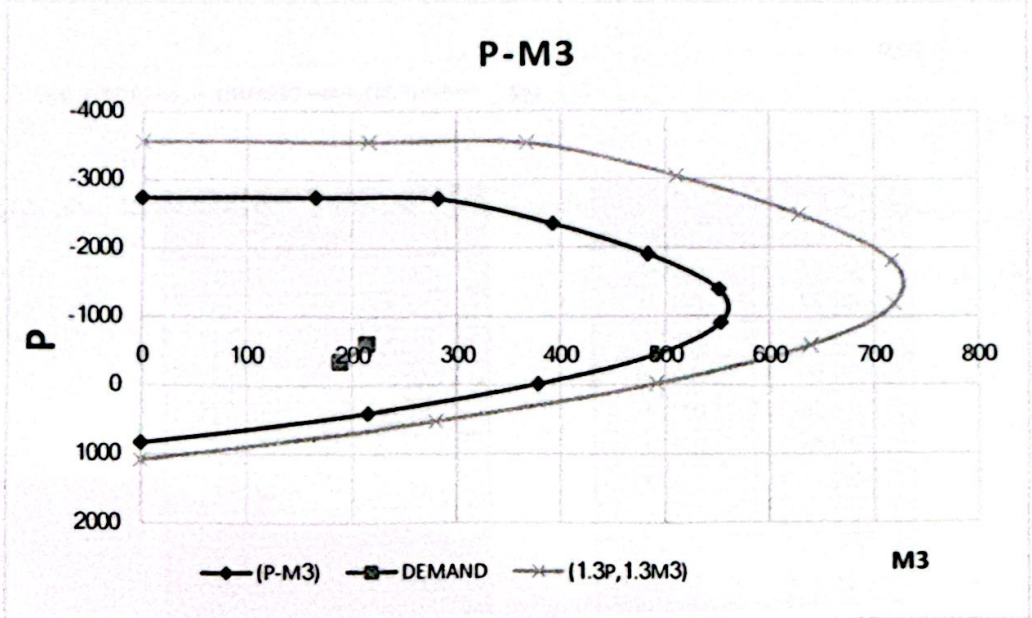


Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

P-M Curve		
Pn	M2	M3
-2733/00	0/00	0/00
-2733/00	0/00	166/93
-2719/00	0/00	282/37
-2338/00	0/00	392/62
-1896/00	0/00	483/43
-1390/00	0/00	551/85
-905/91	0/00	553/42
-449/49	0/00	492/06
-16/27	0/00	378/62
407/34	0/00	215/62
837/76	0/00	0/00

1.3 P-M Curve		
1.3Pn	1.3M2	1.3M3
-3552/90	0/00	0/00
-3552/90	0/00	217/01
-3534/70	0/00	367/08
-3039/40	0/00	510/41
-2464/80	0/00	628/46
-1807/00	0/00	717/41
-1177/68	0/00	719/45
-584/33	0/00	639/68
-21/15	0/00	492/20
529/54	0/00	280/30
1089/09	0/00	0/00

DEMAND	
P	M3
-345/67	188/94
-604/96	214/69
-345/67	188/94
-338/38	188/08
-596/05	213/80
-338/38	188/08
-345/67	188/94
-604/96	214/69
-345/67	188/94

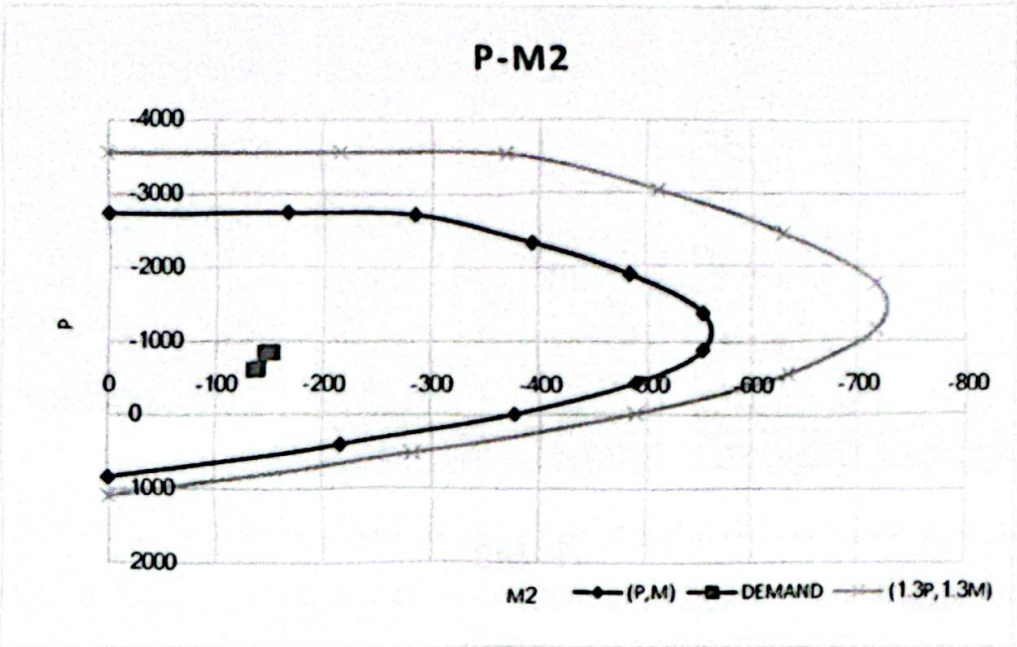


CAPACITY		
Pn	M2	M3
-2733/0	0/0	0/0
-2733/0	0/0	0/0
-2717/0	0/0	0/0
-2335/0	0/0	0/0
-1885/0	0/0	0/0
-1368/0	0/0	0/0
-887/7	0/0	0/0
-437/2	0/0	0/0
-9/0	0/0	0/0
404/2	0/0	0/0
837/8	0/0	0/0

1.3 CAPACITY		
Pn	M2	M3
-3552/9	0/0	0/0
-3552/9	0/0	0/0
-3532/1	0/0	0/0
-3035/5	0/0	0/0
-2450/5	0/0	0/0
-1778/4	0/0	0/0
-1154/0	0/0	0/0
-568/4	0/0	0/0
-11/6	0/0	0/0
525/5	0/0	0/0
1089/1	0/0	0/0

DEMAND	
P	M2
-837/2	-149/6
-605/0	-139/0
-837/2	-152/1
-828/1	-145/5
-596/0	-135/1
-828/1	-148/0
-837/2	-149/6
-605/0	-139/0
-837/2	-152/1

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir



P-M3	
Pn/Ag fc	Mn/Ag fc h
-0/877	0/000
-0/877	0/008
-0/873	0/014
-0/750	0/019
-0/608	0/024
-0/446	0/027
-0/291	0/027
-0/144	0/024
-0/005	0/019
-0/877067	0/027115

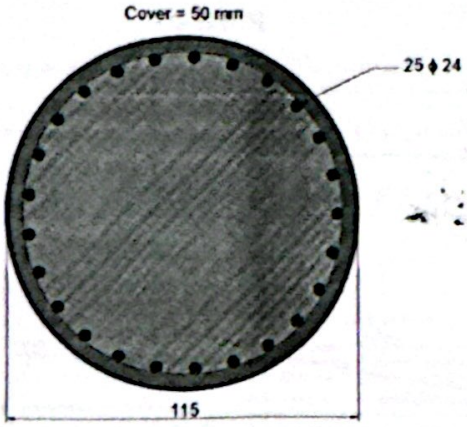
P-M2	
Pn/Ag fc	Mn/Ag fc h
-0/877	0/000
-0/877	-0/008
-0/872	-0/014
-0/749	-0/019
-0/605	-0/024
-0/439	-0/027
-0/285	-0/027
-0/140	-0/024
-0/003	-0/018
-0/877067	-0/027022

با توجه به جداول و نمودارهای بالا میزان آرماتور مورد محاسبه در گام اول بالا است. بنابراین درصد آرماتور طولی در گام دوم برابر ۱ درصد (۲۵ آرماتور طولی با قطر ۲۴ میلی‌متر) در نظر گرفته می‌شود و مراحل فوق مجدداً انجام می‌شوند.

$$\rho_L = ۰.۰۱ = \frac{A_s}{A_g} \quad \rightarrow \quad A_s = ۰.۰۲ \times \frac{\pi \times ۱۱۵^۲}{۴} = ۱۰۴\ cm^۲$$

$$A_s = ۱۰۴\ cm^۲ = n \times \frac{\pi \times ۲.۴^۲}{۴} \quad \rightarrow \quad n = ۲۴$$

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir



⊗ اصلاح سختی

پس از مدل‌سازی پل و اعمال بارهای مرده و زنده با توجه به نیروی محوری موجود در هر پایه و درصد آرماتور طولی آن سختی هر پایه با استفاده از گراف زیر اصلاح می‌شود.

$ALR = ۰.۱۳۳$

$\rho_L = ۰.۰۱$

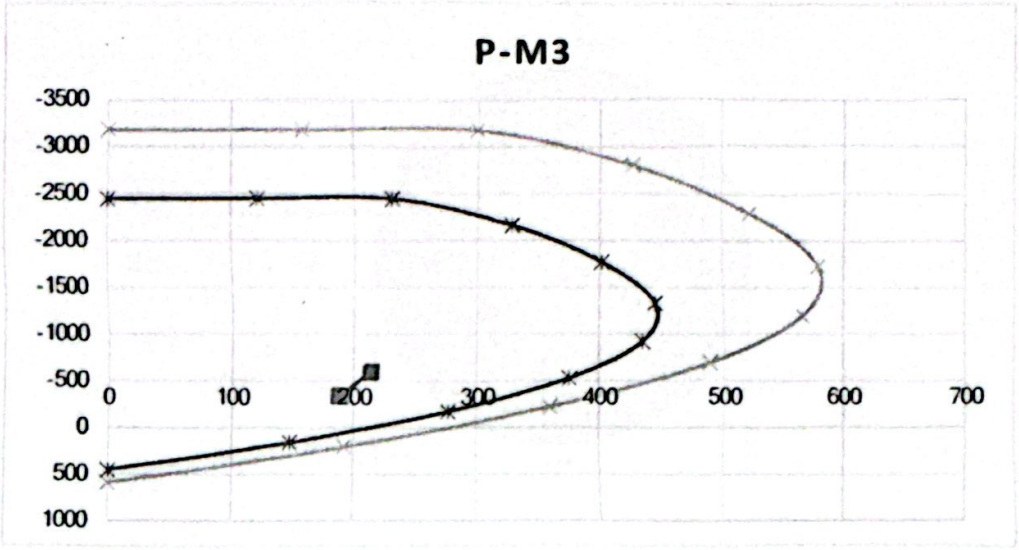
$\frac{I_{eff}}{I_g} = ۰.۴$

CAPACITY		
Pn	M2	M3
-2444/00	0/00	0/00
-2444/00	0/04	122/16
-2444/00	-0/05	229/72
-2157/00	-0/39	327/88
-1764/00	-0/28	401/33
-1328/00	-0/29	445/20
-918/56	-0/04	435/12
-532/99	0/14	375/59
-171/70	1/13	276/92
157/01	0/24	148/26
452/00	0/00	0/00

1.3 CAPACITY		
1.3Pn	1.3M2	1.3M3
-3177/20	0/00	0/00
-3177/20	0/05	158/81
-3177/20	-0/06	298/63
-2804/10	-0/50	426/25
-2293/20	-0/36	521/73
-1726/40	-0/37	578/76
-1194/13	-0/05	565/66
-692/89	0/18	488/27
-223/21	1/46	360/00
204/11	0/31	192/74
587/60	0/00	0/00

DEMAND	
P	M3
-345/67	188/94
-604/96	214/69
-345/67	188/94
-338/38	188/08
-596/05	213/80
-338/38	188/08
-345/67	188/94
-604/96	214/69
-345/67	188/94

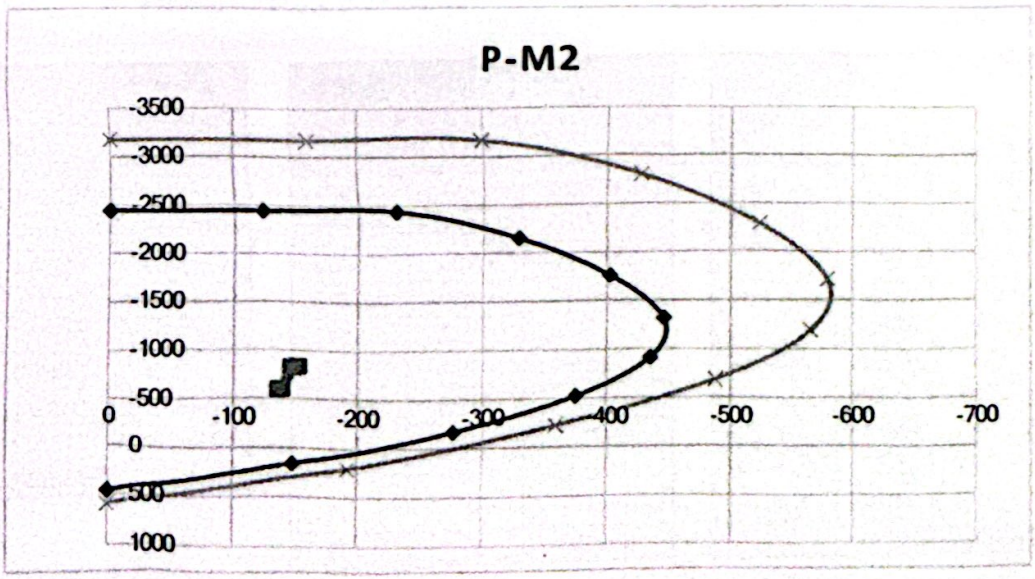
Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir



CAPACITY		
Pn	M2	M3
-1589/0	0/0	0/0
-1589/0	-79/6	0/0
-1589/0	-149/4	0/0
-1401/0	-213/4	0/0
-1143/0	-261/5	0/0
-858/3	-289/6	0/0
-689/5	-327/6	0/0
-475/6	-337/4	0/0
-153/6	-248/7	0/0
142/2	-132/9	0/0
406/8	0/0	0/0

1.3 CAPACITY		
1.3Pn	M2	1.3M3
-2065/7	0/0	0/0
-2065/7	-103/5	0/0
-2065/7	-194/3	0/0
-1821/3	-277/4	0/0
-1485/9	-339/9	0/0
-1115/7	-376/4	0/0
-896/3	-425/9	0/0
-618/2	-438/6	0/0
-199/7	-323/4	0/0
184/8	-172/7	0/0
528/8	0/0	0/0

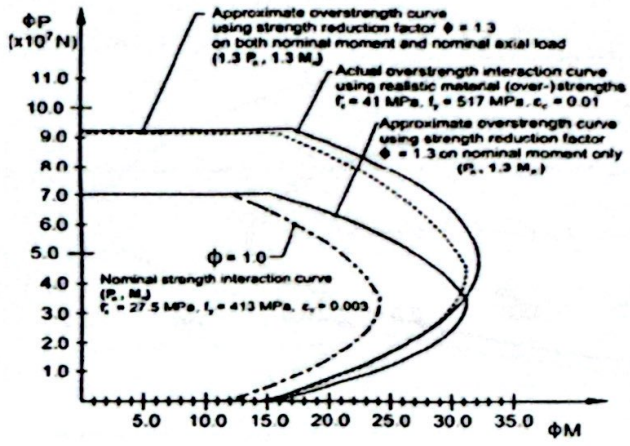
DEMAND	
P	M2
-837/2	-149/6
-605/0	-139/0
-837/2	-152/1
-828/1	-145/5
-596/0	-135/1
-828/1	-148/0
-837/2	-149/6
-605/0	-139/0
-837/2	-152/1



Etabs-SAP.ir
Scanned with CamScanner

⊗ محاسبه لنگر پلاستیک ستون

در ادامه با توجه به نیروی محوری هر پایه و با استفاده از منحنی اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی لنگر متناظر با نیروی موجود در هر پایه قرائت می‌شود و حداکثر لنگر از بین آن‌ها مشخص می‌شود. توجه شود که با ضرب کردن مقادیر نیرو و لنگر در ۱/۳ مقادیر لنگر به لنگر پلاستیک نزدیک می‌شوند.



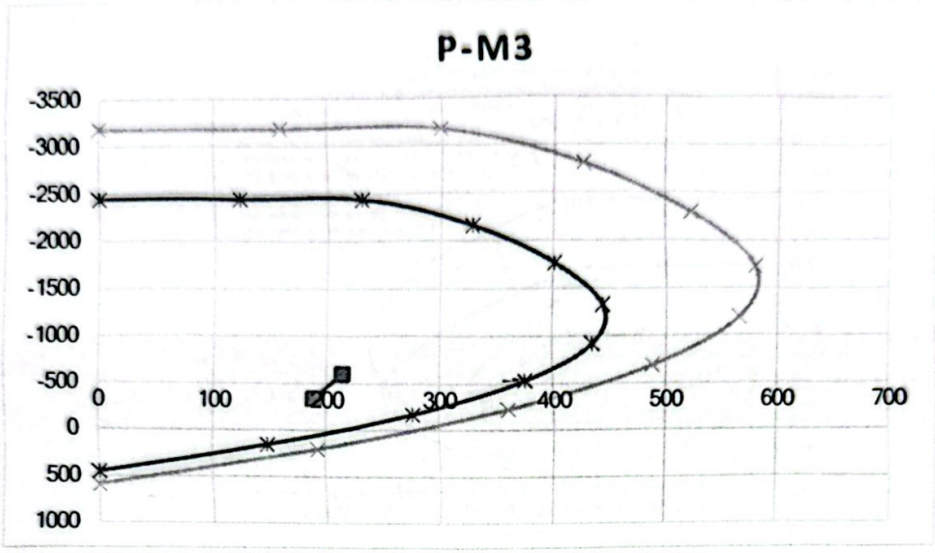
Frame	Station	COMB	P_u (t)	φ	$P_E = \frac{P_u}{\varphi}$
17	0	D+0.5L	-372/365	0/661003	563/3327
17	6/55	D+0.5L	-356/037	0/671483	530/224
18	0	D+0.5L	-392/183	0/648283	604/9559
18	6/55	D+0.5L	-375/855	0/658763	570/5458
19	0	D+0.5L	-372/365	0/661003	563/3329
19	6/55	D+0.5L	-356/037	0/671483	530/2242
20	0	D+0.5L	-368/412	0/663541	555/2208
20	6/55	D+0.5L	-352/083	0/674021	522/3629
21	0	D+0.5L	-388/005	0/650965	596/0464
21	6/55	D+0.5L	-371/677	0/661445	561/9169
22	0	D+0.5L	-368/412	0/663541	555/2208
22	6/55	D+0.5L	-352/083	0/674021	522/3629
23	0	D+0.5L	-372/365	0/661003	563/3327
23	6/55	D+0.5L	-356/037	0/671483	530/224
24	0	D+0.5L	-392/183	0/648283	604/9559
24	6/55	D+0.5L	-375/855	0/658763	570/5458
25	0	D+0.5L	-372/365	0/661003	563/3329
25	6/55	D+0.5L	-356/037	0/671483	530/2242

$$P_E = \frac{P_u}{\varphi} = ٦٠٤.٩٠٥٩\ t$$

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

با توجه به نیروی محوری حداکثر لنگر از نمودارهای اندرکنش در هر دو جهت به دست می‌آیند و سپس با ضرب ضریب ۱/۳ به مقدار لنگر پلاستیک نزدیک می‌شوند.

$$M3_p = M2_p = ٤٧٠\ t.m$$



۶-۲-۲ طراحی برشی ستون‌ها

⊗ محاسبه تقاضا در طراحی برشی در جهت طولی و عرضی

برای محاسبه V_p در هر دو جهت طولی و عرضی باید مراحل زیر طی شود. در محاسبه V_p بعد از قرار دادن بار DL+0.5LL بر روی مدل و خواندن نیروها از نرم‌افزار بار محوری در بالا و پایین ستون‌ها از نرم‌افزار خوانده می‌شوند و با استفاده از نیروهای محوری بدست آمده در بالا و پایین ستون مقادیر M_p بالا و پایین ستون‌ها از منحنی P-M بدست می آیند. در این مرحله با استفاده از مقادیر M_p در بالا و پایین هر ستون V_p برای هر ستون بدست آورده خواهد شد و بعد از این مرحله مجموع V_p ها بر روی ستون‌ها حساب خواهند شد و بر روی مدل در گام بعدی قرار داده می‌شوند و سپس تحت نیروی قرار داده شده نیروهای محوری در بالا و پایین ستون از نرم‌افزار دوباره بدست آورده خواهند شد و با نیروهای محوری بدست آمده در بالا و پایین ستون ها در گام اول تحت DL+0.5LL جمع می‌شوند و دوباره M_p در بالا و پایین هر ستون برای بدست آوردن مجموع V_p ها خوانده می‌شوند.

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

پروسه بالا تا رسیدن به حداقل خطای ۵ ٪ در نیروهای محوری ستون‌ها ادامه پیدا خواهدکرد. لازم به ذکر است در انجام تمامی مراحل سعی و خطا، الاستومرهای طراحی شده در مدل قرار داشته و از منحنی P-M که ۱/۳ برابر شده است، در هر دو جهت برای تعیین M_p استفاده خواهد شد.

طبق توصیه آشتو برای تعیین لنگرهای پلاستیک در مناطق لرزه‌ای ۳ و۴ و در پل‌های با اهمیت زیاد باید از مقادیر مقاومت‌های مورد انتظار استفاد گردد و نمودار P-M مورد استفاده برای تعیین لنگرهای پلاستیک در این نگاه نباید دارای مقایر کمتری نسبت به نمودار P-M ایجاد شده با لحاظ ضریب ۱/۳ در لنگر و بارمحوری نمودار P-M که با مقاومت‌های اسمی کشیده شده است، باشد.

در این پروژه به دلیل وزن کم ستون و تاثیر کم آن‌ها می‌توان از آن صرف نظر کرد و صرفا نیروی محوری حداکثر را استخراج کرد و از فرمول زیر برش پلاستیک را مجاسبه کرد.

$$M3_p = M2_p = ٤٧٠\ t.m$$

$$V_p = \frac{٢M_p}{h} = ١٣٠.٦\ t$$

$$V_{up} = V_{ux} = V_{uy} = \sqrt{V_{px}^{٢} + (٠.٣V_{py})^{٢}} = ١٣٦.٨\ t$$

برای محاسبه برش الاستیک ستون‌ها برش وارد بر ستون در دو جهت محاسبه می‌شود:

$$V_{Ex} = ٢٤٧.٨\ t$$

$$V_{Ey} = ١٩١.٧\ t$$

⊗ طراحی برشی ستون:

$$V_u = \min(V_{up}, V_{uE}) = ١٣٦.٨\ t$$

$$V_n > \frac{V_u}{\varphi} = \frac{١٣٦.٨}{٠.٩} = ١٥٢\ t$$

$$V_n = V_c + V_s > ١٥٢\ t$$

$$h_c = ١.١٥ - ٢ \times cover = ١١٥ - ٢ \times ٥ = ١٠٥\ cm$$

$$s = ١٠٠\ mm$$

$$\rho_{s1} = ٠.٤٥\left(\frac{A_g}{A_c} - ١\right)\frac{f'_c}{f_{yh}} = ٠.٤٥\left(\frac{\frac{\pi \times ١١٥^{٢}}{٤}}{\frac{\pi \times (١١٥ - ١٠)^{٢}}{٤}} - ١\right)\frac{٣٠}{٤٠٠} = ٠.٠٠٧$$

$$\rho_{s2} = ٠.١٢\frac{f'_c}{f_y} = ٠.١٢ \times \frac{٣٠}{٤٠٠} = ٠.٠٠٩$$

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

$$\rho_s = \max(\rho_{s1}, \rho_{s2}) = ۰.۰۰۹ \quad for\ spiral$$

$$\rho_s = ۰.۰۰۹ = \frac{۴A_{sp}}{D_c S} \quad \rightarrow \quad A_{sp} = ۰.۰۰۹ \times \frac{۱۰۵ \times ۱۰}{۴} = ۲.۳۶۲۳\ cm^۲$$

$$A_{sp(req)} = ۲.۳۶۲۳\ cm^۲ = \frac{\pi \times D^۲}{۴} \quad \rightarrow \quad D > ۱۷\ mm \rightarrow D = ۲۰\ mm$$

$$A_{sp} = \frac{\pi \times ۲۰^۲}{۴} = ۳۱۴.۱۶\ mm^۲$$

$$A_v = ۲A_{sp} = ۲ \times \frac{\pi \times ۲۰^۲}{۴} = ۶۲۸.۳۲\ mm^۲$$

$$L > \max\left(D_{column}, \frac{clear\ height\ of\ column}{۶}, ۴۵۰\ mm\right) = \max\left(۱۱۵۰, \frac{۶۵۵۰}{۶}, ۴۵۰\right) = ۱۱۵۰\ mm$$

طبق بند ۵.۱۰.۱۱.۴.۱ آیین‌نامه آشتو ۲۰۰۵ در صفحه ۴۴۷ برای نواحی لرزه‌ای ۳ و ۴ حداقل آرماتورهای عرضی باید بزرگتر از مقدار A_{sh} باشد و همچنین آیین نامه در این بند حداکثر فاصله عمودی آرماتورهای عرضی را به ۱۰۰ میلی‌متر محدود می‌کند که در طراحی فاصله عمودی آرماتورهای عرضی ۱۰۰ میلی‌متر لحاظ شده است.

$$V_c = ۰.۱۷۵\sqrt{f'_c}\, b_w d = ۰.۱۷ \times ۱ \times \sqrt{۳۰} \times ۱۱۵۰ \times ۰.۸ \times ۱۱۵۰ \times ۱۰^{-۴} = ۹۸.۵\ t$$

$$\frac{P}{A_g f'_c} = \frac{۶۰۴.۹۵۵}{\frac{\pi \times ۱۱۵^۲}{۴} \times ۳۰} \times ۱۰^۲ = ۰.۰۰۱۹ \approx ۰.۰۰۲$$

$$\frac{V_c}{۰.۱} = \frac{\alpha V_c}{ALR} \quad \rightarrow \alpha = ۰.۰۲$$

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s} = \frac{۲ \times \frac{\pi \times ۲^۲}{۴} \times ۴۰۰ \times ۰.۸ \times ۱۱۵}{۱۰} \times ۱۰^{-۲} = ۲۳۱.۱\ t$$

$$\left(\frac{A_v}{S}\right)_{req} = \frac{\frac{V_u}{\varphi} - \alpha V_c}{f_y d} = \frac{۱۵۲ - ۰.۰۲ \times ۹۸.۵}{۴۰۰ \times ۱۱۵ \times ۰.۸} = ۴.۰۷۷\ mm$$

$$\left(\frac{A_v}{S}\right)_{min} = \max\left(\frac{۰.۰۶۲\sqrt{f'_c}\, b_w}{f_{yt}}, \frac{۰.۳۵\, b_w}{f_{yt}}\right) < \left(\frac{A_v}{S}\right)_{req}$$

$$\left(\frac{A_v}{S}\right)_{min} = \max\left(\frac{۰.۰۶۲ \times \sqrt{۳۰} \times ۱۱۵۰}{۴۰۰} = ۰.۹۷۶, \frac{۰.۳۵ \times ۱۱۵۰}{۴۰۰} = ۱.۰۰۶\right) = ۱.۰۰۶\ mm < \left(\frac{A_v}{S}\right)_{req}$$

$$S_{req} = \frac{A_v}{\left(\frac{A_v}{S}\right)_{req}} = \frac{۲ \times \frac{\pi \times ۲۰^۲}{۴}}{۴.۰۷۷} = ۱۵۷\ mm \rightarrow S = ۱۰۰\ mm$$

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

$$S_{max} < \min\left(\frac{h_{min}}{۴}, ۶d_l, ۱۵۰.۰۰\right) = \min\left(\frac{۱۱۵۰}{۴}, ۶ \times ۲۴ = ۱۴۴.۰۰, ۱۵۰.۰۰\right) = ۱۴۴\ mm$$

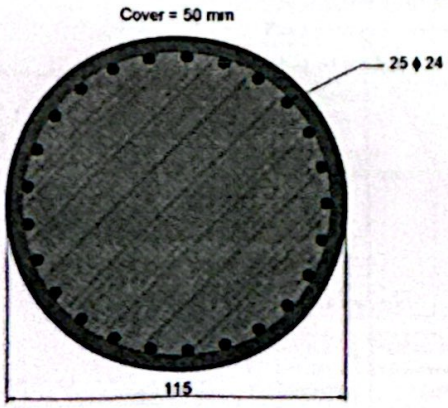
$$V_s > ۲V_c \rightarrow S_{max} = \min\left(\frac{d}{۴}, ۳۰۰\ mm\right) = \min\left(\frac{۰.۸ \times ۱۱۵۰}{۴} = ۲۲۰.۰۰, ۳۰۰\ mm\right) = ۲۲۰\ mm$$

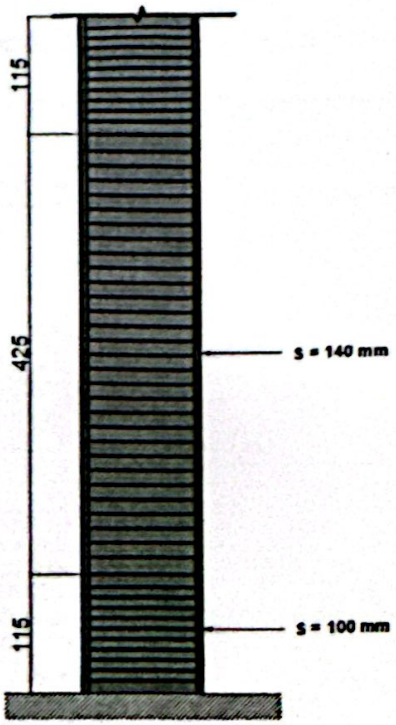
$$V_s < ۲V_c \rightarrow S_{max} = \min\left(\frac{d}{۲}, ۶۰۰\ mm\right)$$

$$V_s < ۴V_c \rightarrow ۲۲۱.۱ < ۴ \times ۹۸.۵ = ۳۹۴ \quad OK$$

$$V_u < ۵V_c \rightarrow ۱۵۲ < ۵ \times ۹۸.۵ = ۴۹۲.۵ \quad OK$$

$$\rho_s = ۰.۰۰۹ > ۰.۰۰۲۵ \quad OK$$





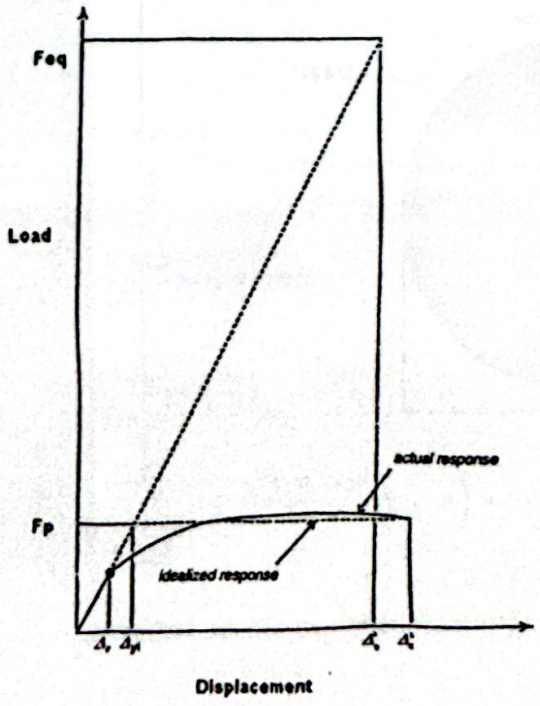
Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

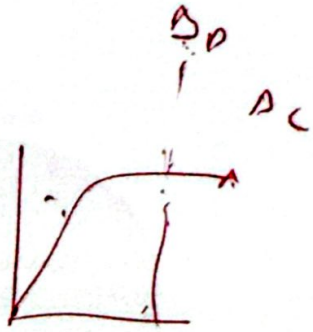
فصل هفتم: طراحی بر اساس تغییرمکان (Displacement Based Design)

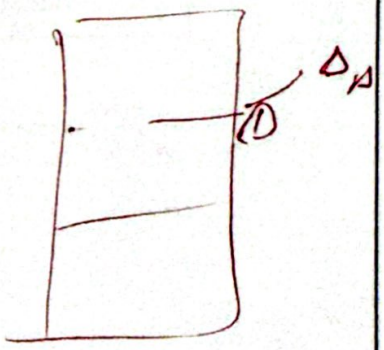
۷-۱ مقدمه

در طراحی به این روش معیار کنترل تغییر مکان است. برای بررسی ضوابط و روابط از آیین‌نامه‌های AASHTO و Caltrans استفاده می‌شود. در آیین‌نامه آشتو پل‌ها با احتمال رخداد ۷ درصد در ۷۵ سال برای سطح عملکرد ایمنی جانی طراحی می‌شوند. در این سطح عملکرد انتظار می‌رود فروریزش رخ ندهد اما آسیب جدی و قطع بهره‌برداری محتمل است. در این رویکرد سه روش طراحی وجود دارد. یکی از این سه روش، طراحی بر اساس زیرسازه شکل‌پذیر و روسازه الاستیک است که بر اساس دو شرط شکل‌پذیری بزرگتر مساوی ۴ و $\Delta_D < \Delta_C$ شکل رفته است. در شکل زیر طراحی به این روش نشان داده شده است.

در واقع هدف طراحی این است که مطمئن شویم ستون شکل‌پذیری کافی را فراهم کند و تلاش شکل‌پذیر خمش ستون باشد و احتمال رخداد سایر مودهای خرابی حداقل شود (البته تلاش شکل‌پذیر عضو نباید ظرفیت باربری ثقلی سازه را به خطر بیندازد). دلیل این امر امکان شناسایی سریع آسیب و تعمیر آن است. برای جلوگیری از آسیب پی، عرشه و گره‌های اتصال طراحی ظرفیتی برای این اعضا صورت می‌گیرد (به جز شمع ستون‌ها). همچنین باید سیستم و المان‌های مقاوم لرزه‌بر مجاز (ERE,ERS) مناسبی جهت انتقال نیروهای زلزله در راستای هدف طراحی انتخاب شود.







Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

پس دو نوع المان تحت عنوان المان‌های دارای رفتار نیرو کنترل و المان‌های تغییرشکل کنترل در سازه وجود دارند. المان‌های نیروکنترل المان‌هایی هستند که نیرو رفتار آن‌ها را در هنگام شکست کنترل می‌کند. اما در المان‌های تغییرشکل کنترل در لحظه شکست تغییرشکل اندازه‌گیری و کنترل می‌شود.

۲-۷ ضوابط طراحی بر اساس آشتو

آشتو ساختگاه‌ها را بر اساس سرعت موج برشی خاک و ضریب نفوذ استاندارد و شتاب از A تا F طبقه‌بندی می‌کند. با توجه به لرزه‌خیزی مناطق ایران از ضوابط مناطق C و D استفاده می‌شود.

مناطق C و D هر دو نیازمند ERS مشخص، آنالیز، کنترل $P-\Delta$، کنترل طول نشیمن، طراحی ظرفیتی اعضای غیر شکل‌پذیر هستند. ولی هر یک جزئیات بندی (Detailing) خاص خود را دارند. در ناحیه C امکان کنترل ظرفیت جابجایی به صورت ضمنی وجود دارد ولی ناحیه D نیازمند آنالیز پوش‌آور است.

نوع آنالیز به نوع پل وابسته است و از جداول زیر انتخاب می‌شود. به پل‌هایی که کمتر از ۷ دهانه داشته باشند و تغییر غیر معمول در وزن، سختی و هندسه آن‌ها رخ ندهد پل‌های متعارف (Regular Bridge) می‌گویند.

با توجه به جداول در این پروژه از آنالیز استاتیکی معادل استفاده شده است.

Table 4.2-3 Regular Bridge Requirements.

Parameter	Value				
Number of Spans	2	3	4	5	6
Maximum subtended angle (curved bridge)	90°	90°	90°	90°	90°
Maximum span length ratio from span-to-span	3	2	2	1.5	1.5
Maximum bent/pier stiffness ratio from span-to-span (excluding abutments)	-	4	4	3	2

Seismic Design Category	Regular Bridges with 2 through 6 Spans	Not Regular Bridges with 2 or more Spans
A	Not required	Not required
B, C, or D	Use Procedure 1 or 2	Use Procedure 2

Procedure Number	Description	Article
1	Equivalent Static	5.4.2
2	Elastic Dynamic Analysis	5.4.3
3	Non-linear Time History	5.4.4

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

معیار منظمی در روش‌های تغییر مکانی:

$\frac{T_i}{T_j} \geq ۰.۷$ → پریود قاب سخت‌تر به قاب نرم‌تر

$\frac{k_i}{k_j} \geq ۰.۵$ → سختی مؤثر کم‌تر به سختی مؤثر بیشتر در یک قاب

در مناطق B ، C و D تقاضای تغییرمکانی یعنی Δ_D در دو جهت طولی و عرضی پل محاسبه می‌شوند و سپس با توجه به اثر ۳۰-۱۰۰ و رابطه SRSS ترکیب می‌شوند. تغییرمکانی (Δ_D) کل جابجایی لرزه‌ای نقطه‌ای خاص از سازه است که شامل تغییرمکان پی (Δ_f)، تغییرمکان اعضای الاستیک مثل سرستون (Δ_b) و تغییرمکان الاستیک و پلاستیک اعضای شکل‌پذیر (Δ_y, Δ_{pd}) می‌باشد.

Δ_D بدست آمده از آنالیز خطی در هر دو جهت طولی و عرضی پل باید در ضریب R_d ضرب شود تا تقاضای تغییرمکانی طراحی بدست آید.

$$T^* = ۱.۲۵\,T_s = ۱.۲۵ \times ۰.۵ = ۰.۶۲۵\,s$$

$$for\ \frac{T^*}{T} > ۱ \quad \rightarrow \quad R_d = \left(۱ - \frac{۱}{R}\right)\frac{T^*}{T} + \frac{۱}{R} \geq ۱$$

$$for\ \frac{T^*}{T} \leq ۱ \quad \rightarrow \quad R_d = ۱$$

$$T_x = ۱.۳۹\,s \quad \rightarrow \quad \frac{T^*}{T} = \frac{۰.۶۲۵}{۱.۳۹} = ۰.۴۵ < ۱ \quad \rightarrow \quad R_{dx} = ۱$$

$$T_y = ۰.۸۸\,s \quad \rightarrow \quad \frac{T^*}{T} = \frac{۰.۶۲۵}{۰.۸۸} = ۰.۷۱ < ۱ \quad \rightarrow \quad R_{dy} = ۱$$

در روابط بالا R حداکثر شکل‌پذیری مورد انتظار سازه است که برای ناحیه B برابر ۲، برای ناحیه C برابر ۳ و برای ناحیه D برابر μ_D است.

۳-۷ تحلیل خطی و محاسبه تقاضا تغییرمکانی

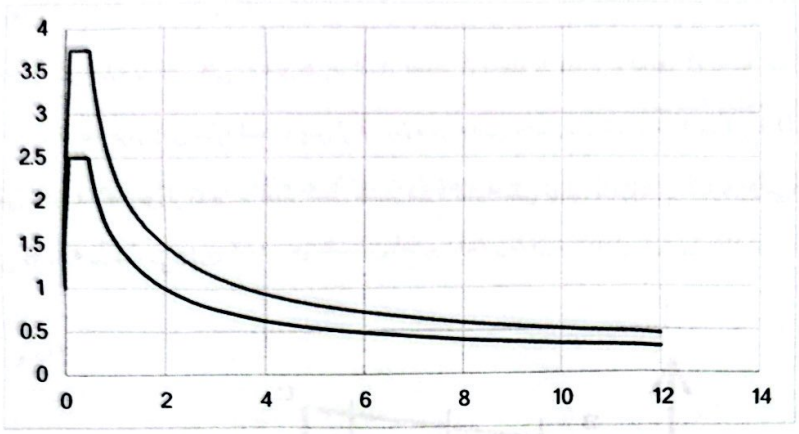
برای محاسبه تقاضا با توجه به اینکه آیین‌نامه‌های AASHTO و Caltrans زلزله MCE را ملاک محاسبه تقاضای خود قرار می‌دهند. بنابراین برای محاسبه تقاضا طبق توصیه ASCE طیف آیین‌نامه را ۱/۳ برابر می‌کنیم که تقریباً برابر زلزله MCE می‌شود.

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

$S_{a_{1...}} = (۰.۳ \sim ۰.۵)\, S_{a_{1Ve}}$

$S_{a_{1...}} = (۱.۲ \sim ۱.۳)\, S_{a_{1Ve}}$

$S_{a_{1.Ve}} = ۱.۵\, S_{a_{1Ve}}$



برای محاسبه تقاضا از آنالیز خطی بر روی طیف ۱/۳ برابر شده استفاده می‌شود و برای لحاظ نمودن اثرات P-Δ روی تقاضا یک الگو بار غیرخطی شامل DL+0.5LL با عنوان P-Delta در مدل ایجاد شده است و این الگو در الگو بار مودال (در محاسبه سختی آن) لحاظ شده است.

پس از اعمال موارد فوق در مدل الاستیک تقاضاها به صورت زیر بدست آمدند:

- در جهت طولی :

$$\Delta_{DX} = \Delta_{DX_{Ex}} + ۰.۳\Delta_{DX_{Ey}} = ۲۱.۷ + ۰.۳ \times ۱.۷ \times ۱۰^{-۷} = ۲۱.۸\ cm$$

- در جهت عرضی :

$$\Delta_{DY} = \Delta_{DY_{Ey}} + ۰.۳\Delta_{DY_{Ex}} = ۷.۸ + ۰.۳ \times ۰.۰۰۰۹۶۸ = ۷.۹\ cm$$

۷-۴ تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌آور) و محاسبه ظرفیت تغییرمکانی

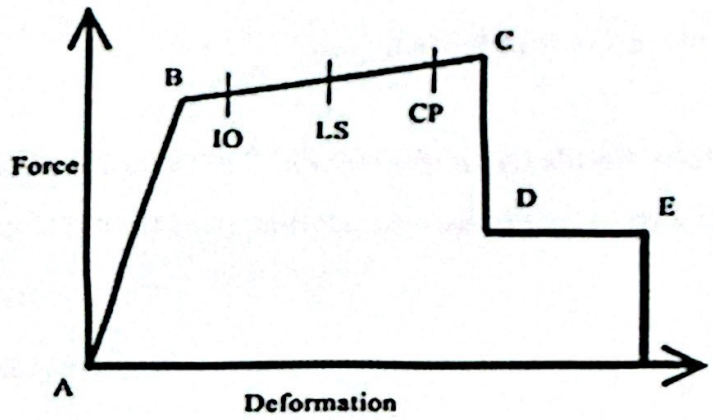
۷-۴-۱ کلیات

تحلیل بارافزون یا Pushover یک تحلیل استاتیکی غیرخطی سازه است تحت بارهای جانبی افزایش یابنده و تعیین نمودار بار-تغییرمکان یا منحنی ظرفیت سازه. معمولا از مقادیر برش پایه و تغییرمکان جانبی نقطه مرجع برای رسم این نمودار استفاده

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

می‌شود. تغییرمکان هدف در نقطه مرجع اعمال می‌شود. به عبارتی از طریق اعمال تغییرشکل در سازه نیرو در سازه ایجاد می‌شود و سختی سازه کاهش می‌یابد. در تغییرمکان‌های کوچک رفتار سازه الاستیک می‌ماند. در تغییرشکل‌های بزرگ سازه رفتار غیرخطی پیدا می‌کند. پس برای بررسی رفتار غیرخطی سازه باید با ضوابط مربوطه تغییرمکان هدف را بدست آورد و به سازه اعمال کرد.

منحنی نیرو-تغییرمکان سازه به طور کلی به صورت زیر است. لحظه A لحظه بارگذاری و لحظه B لحظه غیرخطی شدن رفتار سازه است. لحظه C لحظه فروریزش سازه است و پس از آن سازه بار جانبی تحمل نمی‌کند و ظرفیت آن به D می‌رسد که فقط می‌تواند بار ثقلی تحمل کند. پس از مدتی با تغییر شکل بیشتر سازه گسیختگی نهایی یا فروپاشی سازه رخ می‌دهد. عملکردهای آیین‌نامه‌ای بین B و C تعریف می‌شوند.



در ساختمانی‌ها مطابق ۲۸۰۰ از تحلیل پوش‌آور در سازه‌هایی می‌توان استفاده کرد که در آن‌ها اثر مودهای بالاتر عمده نباشد. برای تعیین این موضوع ضروری است سازه دو بار تحلیل دینامیکی طیفی شود. بار اول تنها مود اول سازه در نظر گرفته شده و در بار دوم تمام مودهای نوسانی که مجموع جرم موثر آن‌ها حداقل ۹۰ درصد جرم کل سازه است باید در نظر گرفته شود. در صورتی که نتایج تحلیل دوم نشان دهد نیروی برشی در طبقه‌ای بیش از ۳۰ درصد نیروی برشی حاصل از تحلیل اول بزرگتر است، این امر به معنی عمده بودن اثر مودهای بالای سازه است. برای کنترل این بند با قرار دادن Maximum number of mode در Modal بر روی عدد یک، برش پایه وارد بر سازه در جهت طولی و عرضی پل از نرم‌افزار خوانده می‌شود. سپس تعداد مودها را افزایش می‌دهیم. در افزایش تعداد مودهای سازه، تعداد باید طوری انتخاب شود که مجموع جرم مشارکت مودها به ۹۰ درصد جرم کل برسد (تقریبا ۳ برابر تعداد طبقات در ساختمانی‌ها). اختلاف برش پایه‌های جدید با برش پایه مود اول باید کمتر از ۳۰ درصد باشد.

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

در پل‌ها مطابق بند ۲-۲-۱-۵ نشریه ۴۶۳ تعداد مودهای نوسان باید حداقل سه برابر تعداد دهانه‌های پل و حداکثر ۲۵ مد در نظر گرفته شود و تعداد آن از رابطه زیر محاسبه می‌شود. بنابراین در این پروژه تعداد حداقل مود ۱۲ است و کنترل بند بالا معنا ندارد. پس می‌توان از روش تحلیل پوش‌آور استفاده کرد.

۲۴ = (۲- تعداد دهانه)۶ + ۱۲= تعداد مودهای نوسان

۲-۴-۷ تغییرمکان هدف

در تحلیل پوش‌آور تغییرشکل متناظر با مود اول سازه مدنظر است چرا که همه اعضا در یک جهت تغییرشکل می‌دهند و می‌توان آن تغییرشکل هدف را اعمال کرد. رابطه تغییرمکان هدف بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ به صورت زیر است:

$$\delta_i = C.C_1 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g$$

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}}$$

در روابط فوق T_e زمان تناوب اصلی موثر سازه، T_i زمان تناوب اصلی ارتجاعی سازه (با تحلیل مدل سازه با فرض رفتار خطی بدست می‌آید)، K_i سختی جانبی ارتجاعی سازه در جهت مورد نظر (شیب خط مماس بر منحنی ظرفیت واقعی سازه در مبدا) و K_e سختی جانبی موثر سازه در جهت موردنظر (شیب خط مماس بر منحنی ظرفیت دو خطی شده سازه در مبدا) است.

با توجه به تفاوت کم T_e و T_i ابتدا این دو مساوی در نظر گرفته می‌شوند سپس اصلاح خواهد شد.

$$T_{ix} = 1.4\,s \quad \rightarrow \quad B = (S+1)\left(\frac{T_s}{T}\right)^{\frac{2}{3}} = 1.264$$

$$T_{iy} = 0.87\,s\ \ s \quad \rightarrow \quad B = (S+1)\left(\frac{T_s}{T}\right)^{\frac{2}{3}} = 1.715$$

$$S_{ax} = AB = 1.3 \times 0.35 \times 1.264 = 0.57512$$

$$S_{ax} = AB = 1.3 \times 0.35 \times 1.715 = 0.78$$

ضریب $C.$ از جدول نشریه ۳۶۰ بدست می‌آید و برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود.

ضریب C_1 در ابتدای تحلیل یک فرض می‌شود و سپس اصلاح خواهد شد.

تغییرمکان هدف اولیه:

$$\delta_{ix} = C.C_1 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g = 0.57512 \times \frac{1.4^2}{4\pi^2} \times 9.81 = 0.28\,m$$

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

$$\delta_{i\,y} = C_{\cdot}C_{1}S_{a}\frac{T_{e}^{2}}{4\pi^{2}}g = ۰.۷۸ \times \frac{۰.۸۸^{2}}{4\pi^{2}} \times ۹.۸۱ = ۰.۱۴\,m$$

با یک بار تحلیل سازه T_e در راستای طولی برابر ۱/۷ بدست می‌آید.

$$\delta_{i\,x} = C_{\cdot}C_{1}S_{a}\frac{T_{e}^{2}}{4\pi^{2}}g = ۰.۵۷۵۱۲ \times \frac{۱.۷^{2}}{4\pi^{2}} \times ۹.۸۱ = ۰.۴۲\,m$$

$$\delta_{i\,y} = C_{\cdot}C_{1}S_{a}\frac{T_{e}^{2}}{4\pi^{2}}g = ۰.۷۸ \times \frac{۰.۸۸^{2}}{4\pi^{2}} \times ۹.۸۱ = ۰.۱۴\,m$$

۳-۴-۷ تعریف مشخصات غیرخطی

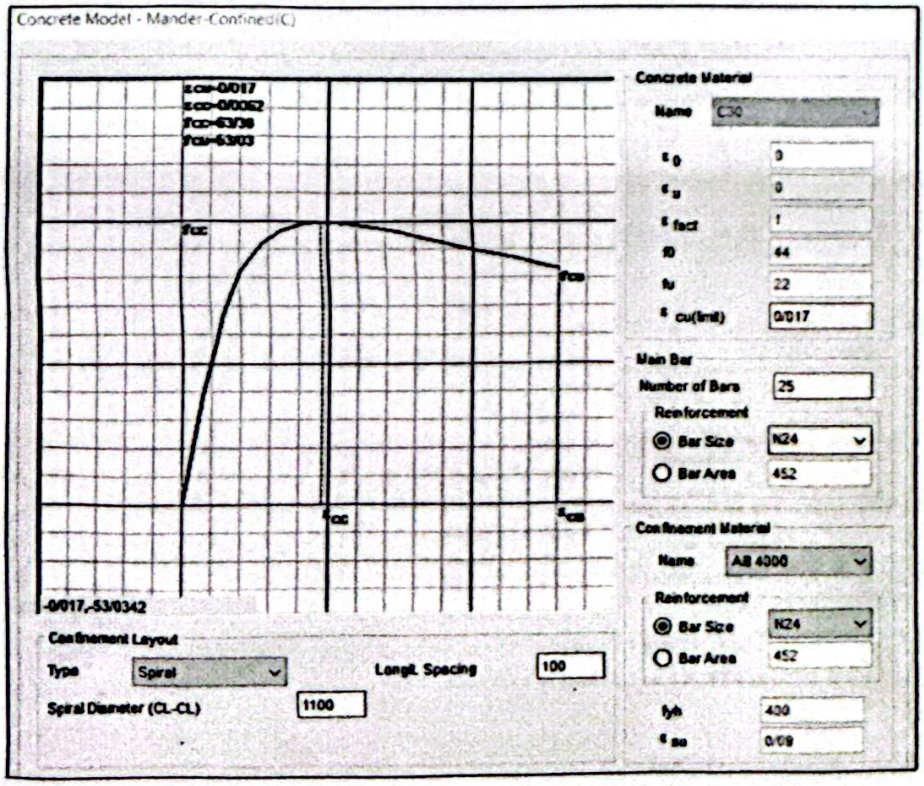
✓ منحنی رفتاری مصالح

- مصالح بتنی:

مطابق بند ۸.۴.۴ آشتو منحنی تنش کرنش بتن با استفاده از مدل Mander و مقادیر کرنش‌های زیر و همچنین در نظر نگرفتن ناحیه کششی، منحنی رفتاری مصالح بتنی مطابق شکل زیر تعیین شده است.

$unconfined\ compressive\ strain\ at\ the\ \max compressive\ stress$: $\varepsilon_{co} = ۰.۰۰۲$

$ultimate\ unconfined\ compression\ strain$: $\varepsilon_{sp} = ۰.۰۰۵$



Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

با توجه به منحنی‌های بالا مشخصات بتن محصورشده بدست می‌آید:

$f_{cc} = ۶۳.۳۸\ Mp$

$f_{cu} = ۵۳.۰۳\ Mpa$

$confined\ compressive\ strain: \varepsilon_{cc} = ۰.۰۰۵۶۱۸$

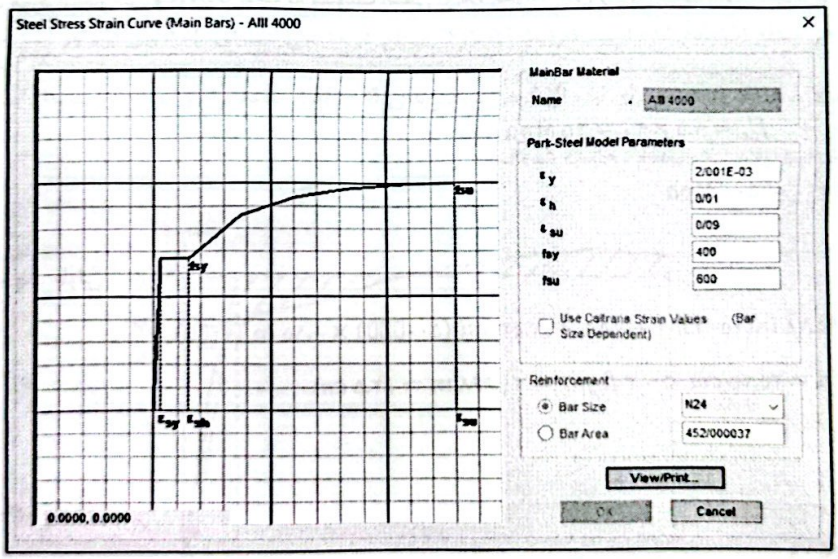
$ultimate\ compressive\ strain: \varepsilon_{cu} = ۰.۰۲۳۵$

- مصالح فولادی:

برای تعیین رفتار آرماتور مدل Park استفاده شده است. با توجه به جدول ۸.۴.۲.۱ آشتو مقادیر زیر استخراج شده و منحنی رفتار فولاد به صورت زیر تعریف می‌شود.

$f_y = ۴۰۰\ Mpa,\ f_{ye} = ۵۰۰\ Mpa\ ,\ f_u = ۶۰۰\ Mpa$

$\varepsilon_{ye} = ۰.۰۰۲\ ,\quad \varepsilon_{sh} = ۰.۰۱\ ,\ \varepsilon_{su} = ۰.۰۹$



✓ مدل غیرخطی ستون

در نرم‌افزار SAP با استفاده از مفاصل پلاستیک رفتار غیرخطی مصالح تعریف می‌شوند. محل مفصل پلاستیک بر اساس نوع نیرو و شرایط تکیه‌گاهی عضو متفاوت است. همچنین تلاشی از عضو که انتظار می‌رود باعث خرابی شود باید مشخص

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

شود. در نرم‌افزار می‌توان برای المان‌های مقاوم جانبی مشخصات مفاصل پلاستیک را به صورت اتوماتیک بر اساس مشخصات آیین‌نامه FEMA356 اختصاص داد ولی ترجیح داده می‌شود مشخصات مفاصل به صورت دستی محاسبه و اعمال شوند. مدل غیرخطی در جهت طولی به دلیل رفتار طره‌ای ستون، با یک مفصل در پایین ستون مدل می‌شود. این مفاصل در فاصله‌های برابر با نصف طول مفصل پلاستیک لحاظ می‌گردند. برای ایجاد مدل غیرخطی در جهت عرضی دو مفصل در پایین و بالای ستون مدل می‌شود.

✓ طول مفصل پلاستیک

طول مفصل پلاستیک طبق آیین نامه Caltrans و AASHTO از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\text{AASHTO}: \quad L_p = ۰.۰۸\,L + ۰.۱۵ f_{ye} d_{bl} \geq ۰.۳\, f_{ye} d_{bl}$$

$$\text{Caltrans}: \quad L_p = ۰.۰۸\,L + \xi f_y d_b \geq ۰.۰۴۴\, f_{ye} d_b \quad , \quad \xi = ۰.۰۲۳$$

برای محاسبه مشخصات و منحنی رفتاری مفصل پلاستیک از مقاومت مورد انتظار استفاده می‌شود بنابراین برای محاسبه مقاومت مورد انتظار بتن و فولاد با توجه به مقاومت اسمی آن‌ها، مقاومت بتن را در ۱/۵ و مقاومت فولاد را در ۱/۲۵ ضرب می‌کنیم.

$$f'_{ce} > ۱.۳ f'_c \quad \rightarrow \quad f'_{ce} = ۱.۵ \times ۳۰ = ۴۵\ Mpa$$

$$f_{ye} = ۱.۲۵ \times ۴۰۰ = ۵۰۰\ Mpa$$

- در جهت طولی

$$L_p = ۰.۰۸ \times ۴۵.۲۸\ in (۱۵۰\ cm) + ۰.۱۵ \times ۷۲.۵۲\ ksi\ (۵۰۰۰۰) \times ۰.۹۵\ in\ (۲۴۰۰)$$

$$L_p = ۱۳.۹۵۷\ in = ۳۵.۴۵\ cm < ۰.۳\, f_{ye} d_b = ۲۰.۶۶۸\ in = ۵۲.۵\ cm$$

$$L_p = ۵۲.۵\ cm$$

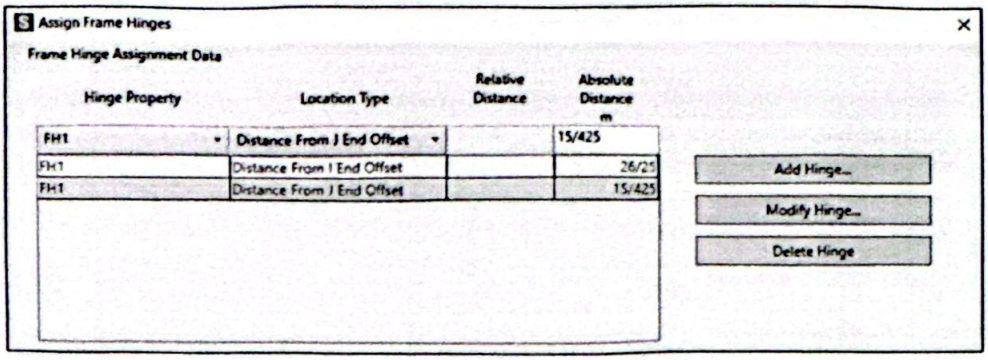
- در جهت عرضی

$$L_p = ۰.۰۸ \times \frac{۴۵.۲۸}{۲}\ in + ۰.۱۵ \times ۷۲.۵۲\ ksi \times ۰.۹۵\ in = ۱۲.۱۴۵\ in = ۳۰.۸۵\ cm$$

$$L_p = ۳۰.۸۵\ cm > ۰.۳\, f_{ye} d_b = ۲۰.۶۶۸\ in = ۵۲.۵\ cm$$

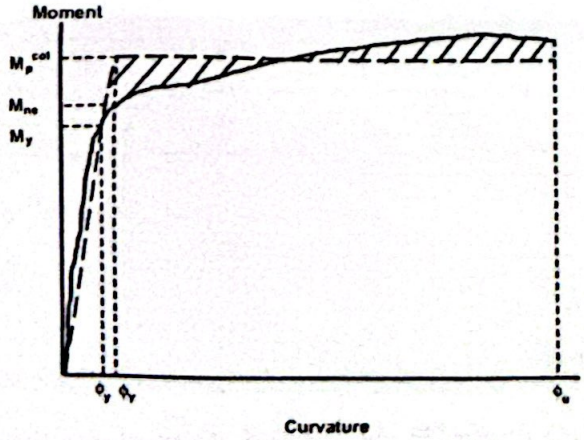
$$L_p = ۳۰.۸۵\ cm$$

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

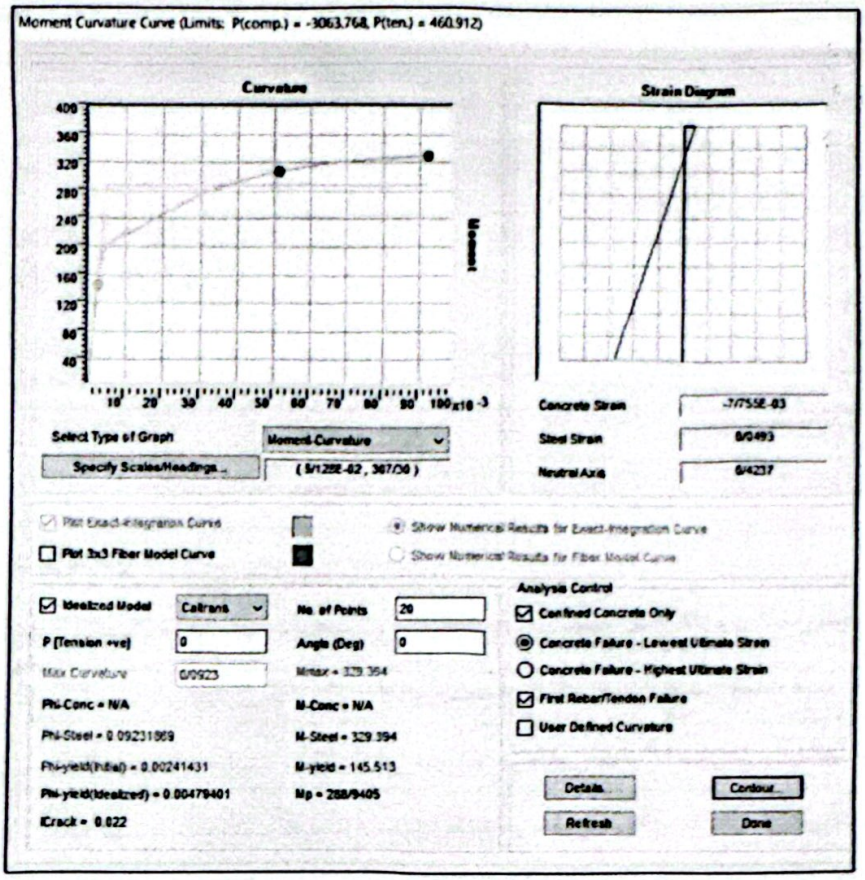


✓ منحنی رفتاری مقاطع:

ظرفیت خمشی پلاستیک مقطع بتنی شکل‌پذیر توسط منحنی رفتاری مقطع ($M - \emptyset$) و بر اساس مشخصات موردانتظار مصالح بدست می‌آید. منحنی رفتاری مقطع ($M - \emptyset$) به مشخصات آرماتور طولی و عرضی وابسته است که از نتایج طراحی بر اساس تغییرمکان بدست آمده است. بنابراین از ۲۵ عدد آرماتور طولی با قطر ۲۴ میلی‌متر و آرماتور عرضی با قطر ۲۰ میلی‌متر در مقطع استفاده شده است. ظرفیت الاستیک مقطع در منحنی نقطه‌ای که اولین آرماتور تسلیم شود در نظر می‌گیرند. لازم به ذکر است که برای ایده آل کردن منحنی‌های $M - \emptyset$ از قاعده برابری سطح زیر نمودار استفاده می‌کنیم و سپس ظرفیت پلاستیک مقطع محاسبه شده است.



Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir



✓ مشخصات مفصل پلاستیک

برای تعیین مشخصات مفصل پلاستیک از منحنی $M-\theta$ استفاده می‌گردد. که برای تعیین این منحنی به مشخصات مدل، منحنی رفتاری مصالح و منحنی رفتاری مقطع نیاز است. بدین منظور از نرم‌افزارهای KSU و SAP از قسمت Section Designer می‌توان استفاده نمود. که در این پروژه از مدل SAP استفاده شده است. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار Excel منحنی‌های دو خطی ایده‌آل شده بدست آمدند.

$$\theta_y = \varphi_y \times \frac{L}{۲}$$

$$for\ \theta > \theta_y \quad \rightarrow \theta = \theta_y + (\varphi - \varphi_y) \times L$$

L : فاصله تا نقطه‌ی عطف که در این پروژه در راستای طولی برابر ۶۵۵ سانتی‌متر و در راستای عرضی برابر ۳۳۰ سانتی متر در نظر گرفته می‌شود.

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

در نرم‌افزار مقادیر φ_y ، φ_u و M_p تحت نسبت‌های بار محوری متفاوت با توجه به ظرفیت مقطع ستون استخراج می‌شود.

$P(t)$	φ_y	φ_u	M_p
$P_n = ۰$	0.00479	0.0923	288.94
$۰/۱P_n = -۲۴۴/٤$	0.0046	0.08771	387.5
$۰/۳P_n = -۷۳۳/۲$	0.0046	0.0622	545
$۰/٦□_n = -۱٤٦٦/٤$	0.0051	0.044	730
$۰.۹□_n = -۲۱۹۹.٦$	0.0053	0.0347	846.6
$P_n = +٤٥۲$	0014	0.0849	78

سپس با روابط بالا θ_y و θ_u در هر راستا محاسبه می‌شوند:

- در راستای طولی

$P(t)$	θ_y	θ_u	$\theta_u - \theta_y$
$P_n = ۰$	0.010458	0.056401	0.045943
$۰/۱P_n = -۲٤٤/٤$	0.010043	0.053678	0.043635
$۰/۳P_n = -۷۳۳/۲$	0.010043	0.040283	0.03024
$۰/٦□_n = -۱٤٦٦/٤$	0.011135	0.031558	0.020423
$۰.۹□_n = -۲۱۹۹.٦$	0.011572	0.027007	0.015435
$P_n = +٤٥۲$	0.030567	0.067789	0.037223

- در راستای عرضی

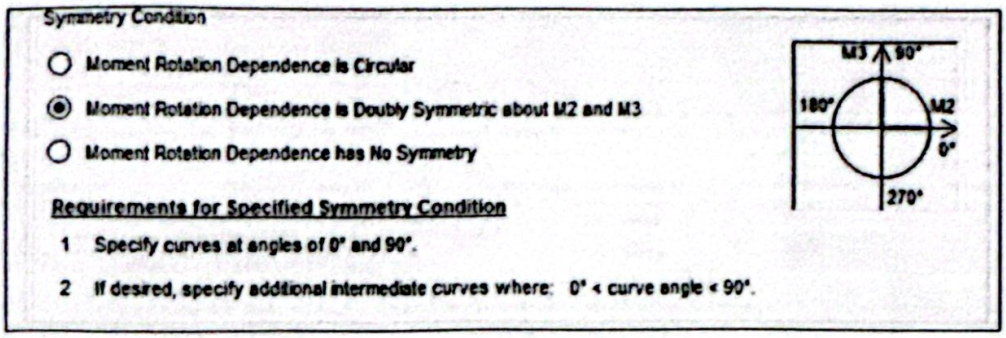
$P(t)$	θ_y	θ_u	$\theta_u - \theta_y$
$P_n = ۰$	0.005229083	0.032225918	0.026996835
$۰/۱P_n = -۲٤٤/٤$	0.005021667	0.030662431	0.025640765
$۰/۳P_n = -۷۳۳/۲$	0.005021667	0.022791267	0.0177696
$۰/٦□_n = -۱٤٦٦/٤$	0.0055675	0.01756815	0.01200065
$۰.۹□_n = -۲۱۹۹.٦$	0.005785833	0.014855733	0.0090699
$P_n = +٤٥۲$	0.015283333	0.037155983	0.02187265

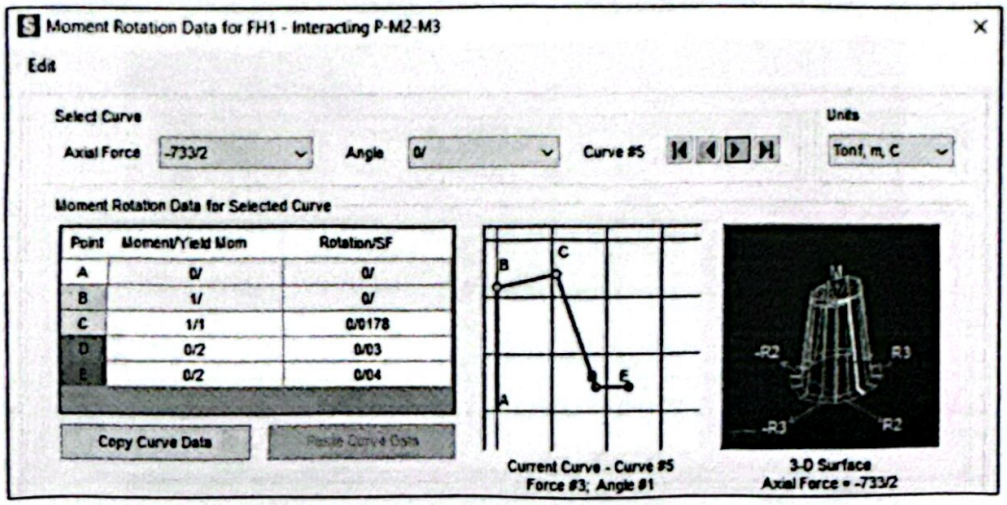
با توجه به اینکه رفتار غیرخطی فقط در قسمت مفصل پلاستیک (به دلیل لحاظ شدن تغییرشکل و رفتار الاستیک توسط ستون) در نرم‌افزار از کاربر گرفته می‌شود، داده‌های ورودی به نرم‌افزار در قسمت پلاستیک به صورت $\frac{\theta}{\theta_y}$ و $\frac{M}{M_y}$ است. بدین منظور در

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

منوی Define در قسمت Section Properties وارد پنجره‌ی Hinge Properties می‌شویم. با توجه موارد ذکر شده در بالا و مدل چند خطی شده $M - \emptyset$، می‌توان نمودار $M - \theta$ مربوط به مفصل را ترسیم نمود.

با توجه به اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی در راستای طولی و عرضی پل مشخصات مفصل به صورت زیر تعریف می‌شود:





۴-۴-۷ پوش سازه (Pushover)

پس از وارد کردن مشخصات مصالح و مفاصل پلاستیک، برای محاسبه ظرفیت سازه از آنالیز پوش آور استفاده می‌شود. برای اعمال پوش دقیق‌تر، سازه را به صورت یکنواخت جرمی پوش می‌کنیم. بدین منظور در نرم‌افزار SAP یک الگو بار غیرخطی $D + ۰.۵$ برای لحاظ نمودن اثر $P - \Delta$ و برای پوش سازه یک الگوی بار با پوش یکنواخت (ACCEL) برای هر جهت با شرایط اولیه (Initial Condition) الگوی بار غیرخطی $D + ۰.۵$ تعریف شده است.

لازم به ذکر است طبق آیین‌نامه Caltrans و AASHTO ممان اینرسی مؤثر بر حسب بار محوری و میزان آرماتور طولی با استفاده از نمودار $۰.۴I_g$ در نظر گرفته شده است.

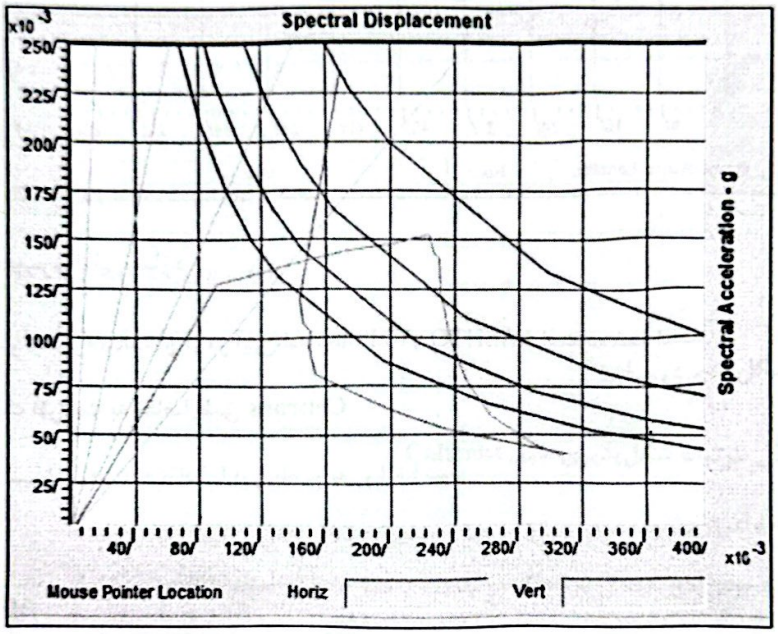
Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

برای مشاهده و مقایسه اثر $P-\Delta$، آنالیز یکبار بدون لحاظ نمودن اثر $P-\Delta$ و بار دیگر با لحاظ نمودن اثر $P-\Delta$ انجام می‌دهیم و در نهایت نمودار پوش سازه از منوی Display در قسمت Show Static Pushover Curve قابل مشاهده است.

نکته قابل توجه این است که این آنالیز تا شروع ناپایداری سازه (رسیدن همزمان مفصل تحتانی ستون‌ها به ماکزیمم ظرفیت دوران پلاستیک) وجاهت دارد (موارد ذکر شده برای جهت عرضی و یکبار برای جهت طولی انجام شده‌اند).

- در راستای طولی

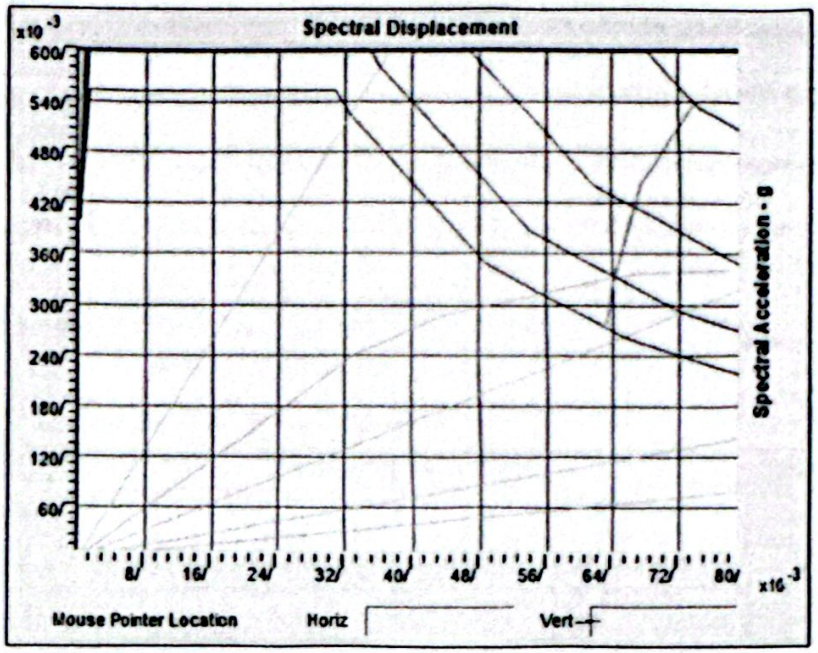
$\Delta_C = ۲۲.۵\ cm$



- در راستای عرضی

$\Delta_C = ۸\ cm$

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir



۵-۷ کنترل تغییرمکانی سازه

برای کنترل سازه و اعضا و اتصالات آن از دو آیین‌نامه Caltrans و AASHTO استفاده شده است.

← کنترل نسبت ظرفیت به تقاضا طبق Caltrans

برای کنترل نسبت ظرفیت به تقاضا باید رابطه رو به رو ارضا شود:

$$\Delta_D \leq \Delta_C$$

در جهت طولی

$$\Delta_{Dx} \leq \Delta_{Cx} \quad \rightarrow \quad ۲۱.۸\ cm < ۲۲.۵\ cm \quad OK$$

در جهت عرضی

$$\Delta_{Dy} \leq \Delta_{Cy} \quad \rightarrow \quad ۷.۸\ cm < ۸\ cm \quad OK$$

← کنترل نسبت ظرفیت به تقاضا طبق AASHTO

برای کنترل نسبت ظرفیت به تقاضا باید رابطه رو به رو ارضا شود:

$$C_۱ \times \Delta_D \leq \Delta_C$$

- ضریب افزایش تقاضای الاستیک ($C_۱$)

تقاضاهای محاسبه شده در هر جهت از آنالیز الاستیک با فرض پریود غالب جهت مربوطه بیشتر از $۱.۲۵T_s$است. بنابراین در صورتی که سازه در محدوده کمتر از این پریود قرار بگیرد بایستی تقاضاها را افزایش داد. برای بدست آوردن پریود غالب

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

باید مود غالب را بدست آورد. بدین منظور پس از تحلیل مودال، پس از بررسی مشارکت جرمی، مودی مود غالب در هر جهت است که بیشترین مشارکت جرمی را در آن جهت داشته باشد.

$T > ۱.۲۵T_S \quad \rightarrow \quad C_۱ = ۱.۰$

$T < ۱.۲۵T_S \quad \rightarrow \quad C_۱ = \left(۱ - \frac{۱}{\mu_D}\right) \times \frac{۱.۲۵T_S}{T} + \frac{۱}{\mu_D}$

در رابطه فوق μ_D حداکثر شکل‌پذیری آیین‌نامه‌ای است که برای پایه‌های تک ستون برابر ۵ برای دیوار در جهت ضعیف برابر ۵ و پایه‌های چند ستون برابر ۶ و دیوار در جهت قوی برابر ۱ است.

بررسی پریود سازه در جهت طولی و عرضی

$T_S = ۰.۵ \qquad T_y = ۰.۶۵\ s \qquad T_x = ۱.۲۸\ s$

$T_x, T_y > ۱.۲۵T_S = ۰.۶۲۵ \quad \rightarrow \quad C_۱ = ۱.۰$

$C_۱\Delta_{Dx} \leq \Delta_{Cx} \quad \rightarrow \quad ۲۱.۸\ cm < ۲۲.۵\ cm \quad OK$

$C_۱\Delta_{Dy} \leq \Delta_{Cy} \quad \rightarrow \quad ۷.۸\ cm < ۸\ cm \quad OK$

۷-۶ کنترل شکل‌پذیری سازه

← کنترل حداقل ظرفیت شکل‌پذیری طبق Caltrans

کنترل ضابطه برای ستون:

به دلیل کوچک بودن طول مفصل پلاستیک در مقایسه با طول تا نقطه عطف رابطه زیر برقرار است:

$\Delta_c = \Delta_y^{col} + \Delta_p$

$\Delta_y^{col} = \frac{L^۲}{۳}\varphi_y$

$\theta_p = L_p\varphi_p$

$\varphi_p = \varphi_u - \varphi_y$

$\Delta_p = \theta_p \times \left(L - \frac{L_p}{۲}\right)$

$\mu_{\Delta c} = \frac{\Delta_{uc}}{\Delta_y}$

	طولی	عرضی
φ_y	0.0046	0.0046
φ_u	0.0622	0.0622

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

φ_p	0.0576	0.0576
L_p	0.525	0.3085
θ_p	0.03024	0.01777
Δ_p	0.190134	0.055454
Δ_y^{col}	0.065784	0.016446
Δ_c	0.255918	0.0719
$\mu_{\Delta c}$	3.890285	4.371921
	OK	OK

← کنترل حداکثر تقاضای شکل‌پذیری طبق Caltrans

آیین‌نامه Caltrans برای کنترل سختی از روابط زیر استفاده می‌کند:

$\mu_{\Delta D} \leq ٤.٠ \quad \rightarrow \quad for\ Single\ Column$

$\mu_{\Delta D} \leq ٥.٠ \quad \rightarrow \quad for\ Multi\ Column$

$\mu_{\Delta D} \leq ٥.٠ \quad \rightarrow \quad for\ Pier\ Wall\ (Weak\ Direction)$

$\mu_{\Delta D} \leq ٥.٠ \quad \rightarrow \quad for\ Pier\ Wall\ (Strong\ Direction)$

در این حالت تغییرمکان جاری شدن کل ستون از جمع تغییرمکان جاری شدن مفاصل بدست می‌آید. آیین‌نامه Caltrans برای محاسبه تقاضای شکل‌پذیری رابطه زیر را بیان می‌کند.

در راستای طولی

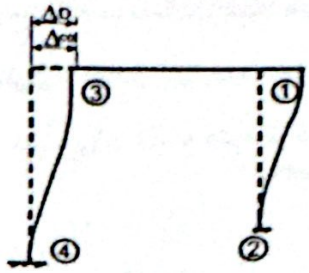
$$\mu_{\Delta D} = \frac{\Delta_D}{\Delta_y} = \frac{٢١.٨}{٦.٥٧٨٤} = ٣.٣ < ٤.٠ \quad for\ Single\ Column$$

در راستای عرضی

$$\mu_{\Delta D} = \frac{\Delta_D}{\Delta_y} = \frac{٧.٨}{١.٦٤٤٦ + ١.٦٤٤٦} = ٢.٣٧ < ٥.٠ \quad for\ Multi\ Column$$

$$\Delta_y = (\varphi_y \times \frac{L^٢}{٣})_{TOP} + (\varphi_y \times \frac{L^٢}{٣})_{BOT} = (\theta_y \times L)_{TOP} + (\theta_y \times L)_{BOT}$$

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir



CASE A
Rigid Bent Cap

کنترل حداکثر تقاضای شکل‌پذیری طبق AASHTO

آیین‌نامه AASHTO برای کنترل سختی از روابط زیر استفاده می‌کند:

$\mu_{\Delta D} \leq ۵.۰ \quad \rightarrow \quad for\ Single\ Column$

$\mu_{\Delta D} \leq ۶.۰ \quad \rightarrow \quad for\ Multi\ Column$

$\mu_{\Delta D} \leq ۵.۰ \quad \rightarrow \quad for\ Pier\ Wall\ (Weak\ Direction)$

$\mu_{\Delta D} \leq ۱.۰ \quad \rightarrow \quad for\ Pier\ Wall\ (Strong\ Direction)$

آیین‌نامه AASHTO برای هر قسمت از ستون تا نقطه عطف با توجه به رابطه زیر (به نوعی برای هر مفصل)، روابط فوق را کنترل می کند. آیین نامه آشتو برای محاسبه تقاضای شکل پذیری رابطه زیر را بیان می کند:

$$\mu_{\Delta c} = \frac{\Delta_{ud}}{\Delta_y} = ۱ + \frac{\Delta_{pd}}{\Delta_y}$$

$$\Delta_y = \varphi_y \times \frac{L^۲}{۳} = \theta_y \times L$$

$$\Delta_{pd} = \theta_{pd} \times \left(L - \frac{L_p}{۲}\right)$$

L : فاصله تا نقطه‌ی عطف

θ_{pd} : مقدار ظرفیت دوران پلاستیک ستون در تغییرشکل تقاضا

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

برای محاسبه دوران پلاستیک تقاضا، بایستی سازه را تا حد تقاضا پوش نمود. بدین منظور مراحل حل در آنالیز پوش‌اور به نحوی در نظر گرفته می‌شود که بتوان به تقاضا در یکی از مراحل این آنالیز رسید. سپس در مرحله‌ی تقاضا مقدار دوران پلاستیک برای هر مفصل از منوی Show Hinge Result بدست می‌آید. لازم به ذکر است که در گام تقاضا در آنالیز پوش‌اور، طول تا نقطه عطف از روی نمودار لنگر بدست می‌آید.

۷-۷ کنترل $P-\Delta$

کنترل اثر $P-\Delta$ طبق Caltrans

طبق این آیین‌نامه برای محدود کردن کاهش مقاومت تحت اثر $P-\Delta$ باید از رابطه‌ی زیر استفاده نمود:

$$P_{dl} \times \Delta_r \leq ۰.۲\, M_p$$

Δ_r: تغییرمکان نسبی تقاضا تا نقطه‌ی عطف

Δ_r در جهت طولی برابر با کل تقاضا در این جهت است، بنابراین:

$$۴۸۵.۰۲ \times ۰.۲۱۸ = ۱۰۵.۷۳ \leq ۰.۲ \times ۵۴۵ = ۱۰۹ \quad OK$$

Δ_r در جهت عرضی بطور تقریبی برابر با نصف تقاضای ستون در این جهت است، بنابراین

$$۴۸۵.۰۲ \times \frac{۰.۰۷۸}{۲} = ۱۸.۹۱ \leq ۰.۲ \times ۵۴۵ = ۱۰۹ \quad OK$$

کنترل اثر $P-\Delta$ طبق AASHTO

طبق این آیین‌نامه برای محدود کردن کاهش مقاومت تحت اثر $P-\Delta$ باید از رابطه‌ی زیر استفاده نمود:

$$P_{dl} \times \Delta_r \leq ۰.۲۵\, M_p$$

چون حد بالایی بزرگتر است، نیازی به بررسی ندارد.

۸-۷ کنترل حداقل و حداکثر آرماتور طولی و قطر آن

کنترل حداقل و حداکثر آرماتور طولی طبق Caltrans

$$۱٪ \leq \rho = ۱ \leq ۴٪ \quad \rightarrow \quad for\ Column$$

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

کنترل حداقل و حداکثر آرماتور طولی طبق AASHTO

$$۱٪ \le \rho = ۱ \le ۴٪$$

کنترل قطر آرماتور طولی ستون طبق Caltrans

$$d_{bl} \le \begin{cases} ۲۵\sqrt{f_c'}\dfrac{L_b}{f_{ye}} & \rightarrow \quad (in, psi) \\ ۲.۱\sqrt{f_c'}\dfrac{L_b}{f_{ye}} & \rightarrow \quad (mm, Mpa) \end{cases}$$

$$L_b = L - ۰.۵\, D_c = \frac{۶۵۵}{۲} - ۰.۵ \times ۱۱۵ = ۲۷۰۰\ mm$$

$$۲.۱\sqrt{f_c'}\frac{L_b}{f_{ye}} = ۲.۱\sqrt{۳۰}\frac{۲۷۰۰}{۵۰۰} = ۳۵.۵۰۰ \qquad d_{bl} = ۲۴\ mm \le ۳۵.۵\ mm \quad OK$$

L : فاصله نقطه‌ی عطف تا محل حداکثر لنگر که در کوچک‌ترین حالت ممکن در رابطه‌ی بالا قرار داده شده است

D_c : قطر ستون می‌باشد که در اینجا در جهت اطمینان بعد بزرگ‌تر ستون قرار داده شده است.

۷-۹ طراحی و کنترل آرماتورهای برشی طبق AASHTO

به دلیل ستون بودن پایه‌ها در هر دو جهت طولی و عرضی از ضوابط بند ۸.۶ آیین‌نامه آشتو در طراحی برشی ستون‌ها در جهت طولی و عرضی استفاده می‌شود.

طراحی برشی پایه‌ها در محل مفصل پلاستیک در جهت طولی و عرضی:

در طراحی در این قسمت از مقاومت‌های اسمی مصالح بهره برده می‌شود و تمامی واحدها (in, kip) خواهند بود.

$$\phi V_n \ge V_u \quad ; \quad \phi = ۰.۸۵$$

$$V_n = V_c + V_s$$

$$V_u = V_{po} = \frac{۲\, M_{po}}{L} = \frac{۲ \times ۱.۲ \times M_p}{L}$$

که در رابطه بالا V_n و V_u به ترتیب ظرفیت برشی اسمی مقطع (تحت مقاومت‌های اسمی مصالح) و برش نهایی طراحی هستند که برش نهایی طراحی، برش پلاستیک متناظر با لنگر پلاستیک ۱/۳ برابر می‌شوند.

M_p حداکثر لنگر پلاستیک مقطع برای بار محوری موجود در نقطه تقاضای ستون خواهد بود که باید از روی مفصل $P-\Delta$ در مدل پوش‌اور خوانده شود، که در این پروژه به دلیل عدم تغییر بار محوری در هر دو جهت، M_p حداکثر لنگر پلاستک مقطع

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

برای بار محوری تحت بارگذاری $D + 0.5$ به اضافه بار محوری آخرین سعی در قسمت Force Based (نیروی نهایی ستون‌ها بعد از قرار دادن آخرین $\sum V_p$ درقسمت اول پروژه) نظر گرفته شده است و برای بدست آوردن M_p از با مقاومت‌های مورد انتظار مصالح استفاده شده است.

- ظرفیت برشی بتن:

$$V_c = v_c \times A_e \quad (kip)$$

$$A_e = 0.8A_g \quad (in^2)$$

$$v_c = 0.03 \times \alpha' \left(1 + \frac{P_u}{2A_g}\right) \times \sqrt{f_c'} \leq \min \begin{cases} 0.11\sqrt{f_c'} & \rightarrow \quad (in, kip) \\ 0.047\alpha'\sqrt{f_c'} & \rightarrow \quad (in, kip) \end{cases}$$

P_u : بار محوری موجود در نقطه تقاضای ستون خواهد بود که باید از مدل پوش اور در نقطه تقاضا خوانده شود که همانطور که توضیح داده شد، به دلیل عدم تغییر بار محوری در هر دو جهت، همان بار محوری در قسمت قبل قرار داده شده است، که اگر نیروی P_u فشاری باشد، V_c از رابطه بالا بدست خواهد آمد و اگر P_u کششی باشد V_c برابر صفر لحاظ خواهد شد.

α' برای مقاطع دایره‌ای با آرماتورهای اسپیرالی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\rho_s = \frac{4A_{sp}}{sD} = \frac{4 \times \frac{\pi \times 2^2}{4}}{10 \times 10.5} = 0.012$$

$$\mu_{\Delta D} = 3.3 < 5.0 \quad for\ Single\ Column$$

$$\mu_{\Delta D} = 2.37 < 6.0 \quad for\ Multi\ Column$$

$$\alpha' = \frac{0.03\rho_s f_{yh}}{\mu_D} = \frac{0.03 \times 0.012 \times 58.0150.9508}{5.0} = 0.004 < 0.3 \quad \alpha' = 0.3 \quad \text{طولی}$$

$$\alpha' = \frac{0.03\rho_s f_{yh}}{\mu_D} = \frac{0.03 \times 0.012 \times 58.0150.9508}{6} = 0.038 \qquad \alpha' = 0.3 \quad \text{عرضی}$$

$$v_c = \alpha' \left(1 + \frac{P_u}{2A_g}\right) \times \sqrt{f_c'} = 0.038 \left(1 + \left(\frac{485.02 \times 10^4\ N}{2\frac{\pi \times 1150^2}{4}\ mm^2} = 0.338\right)\right) \times \sqrt{4.35} = 0.8$$

$$V_c = v_c \times A_e = 0.8 \times 0.8A_g = 0.08 \times 0.8 \times \frac{\pi \times 45.28^2}{4} = 1030\ kip = 467\ t$$

- ظرفیت برشی فولاد:

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

برای مقاومت برشی اسمی فولاد برای مقاطع دایره‌ای از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_s = \frac{\pi}{2}\left(\frac{nA_{sp}\,f_{yh}d}{s}\right) = \frac{\pi}{2}\left(\frac{\frac{\pi \times ۰.۷۹^۲}{۴} \times ۵۸ \times ۴۱.۳۴}{۳.۹۴}\right) = ۴۶۸\ kip = ۲۱۳\ t$$

$$V_s = ۲۱۳\ t > ۰.۲۵A_e\sqrt{f_c'} = ۰.۲۵ \times ۰.۸ \times \frac{\pi \times ۱۱۵۰^۲}{۴} \times \sqrt{۳۰} \times ۱۰^{-۴} = ۱۱۳.۷\ t$$

$$V_s = ۱۱۳.۷\ t$$

- **ظرفیت برشی مقطع:**

$$V_n = V_c + V_s = ۵۸۰\ t$$

$$\phi V_n \geq V_u \quad ; \quad \phi = ۰.۸۵$$

$$V_u = V_{po} = \frac{۲\,M_{po}}{L} = \frac{۲ \times ۱.۲ \times ۵۴۵}{۶.۵۵} = ۱۹۹.۶\ t$$

$$\phi V_n = ۰.۸۵ \times ۵۸۰ = ۴۹۳\ t \geq V_u = ۱۹۹.۶\ t$$

- **حداقل آرماتور برشی ستون‌ها:**

آیین‌نامه آشتو کمترین مقدار آرماتور برشی برای مقاطع دایره‌ای را برای ناحیه‌ی D به مقدار زیر محدود کرده است:

$$\rho_w \geq ۰.۰۰۵$$

$$\rho_s \geq ۰.۰۰۵$$

۷-۱۰ کنترل حداقل طول نشیمن الاستومر

طبق آیین‌نامه AASHTO، حداقل طول نشیمن برابر است با:

$$N \geq (۸ + ۰.۰۲\,L + ۰.۰۸\,L)(۱ + ۰.۰۰۰۱۲۵\,s^۲) \quad (in)$$

L : طول عرشه از انتهای گیردار تا محل کوله‌ها

H : ارتفاع میانگین پایه‌ها

s : شیب در پلان

برای ناحیه‌ی D با توجه به آیین‌نامه، برای حداقل طول نشیمن داریم:

$$N \geq (۴ + ۱.۶۵\Delta_{EQ})(۱ + ۰.۰۰۰۱۲۵\,s^۲) > ۲۴ \quad (in)$$

Δ_{EQ} : تقاضای الاستیک سازه تحت ترکیب بار لرزه‌ای

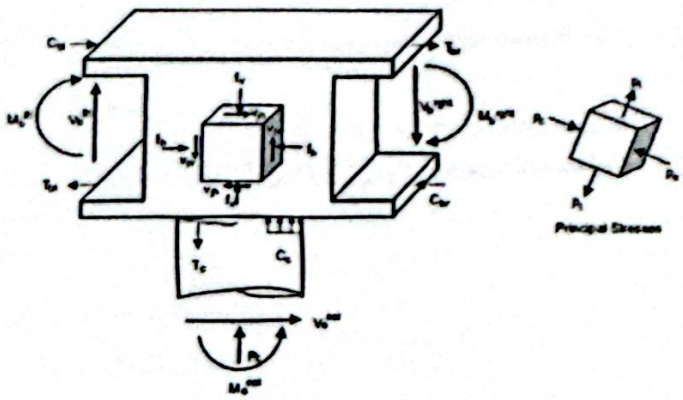
Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

۷-۱۱ کنترل گره اتصال

- **کنترل گره اتصال طبق Caltrans**

اتصالات باید برای انتقال نیروهای حداکثر ایجاد شده بر اثر رسیدن ستون به ظرفیت M_{po} طراحی شوند. برای کنترل باید تنش‌های اصلی در گره اتصال با روابط ذیل کنترل گردد. برای تعیین تنش‌های اصلی و کنترل روابط ذیل بایستی به شکل زیر عمل کنیم.

$$\begin{cases} P_c \le ۰.۲۵\, f'_c \quad (Mpa) \\ P_t \le ۱.۰\sqrt{f'_c} \quad (Mpa) \end{cases}$$



$$\begin{cases} B_{cap} = ۱.۸\, m \\ D_c = ۱.۱۵\, m \\ D_s = ۱.۳\, m \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} d_c = D_c - ۲\,(Cover) = ۱.۱۵ - ۲ \times ۰.۰۵ = ۱.۰۵\, m \\ L_{ac} = D_c - ۲۰ = ۱۱۵ - ۲۰ = ۹۵\, cm \end{cases}$$

D_c : بعد ستون در جهت خمش

D_s : ضخامت عرشه

L_{ac} : طول آرماتور ستون در داخل سرستون

$$L_{ac} = ۹۵۰\, mm \ge ۲۴ d_{bl} = ۵۷۶\, mm \quad OK$$

$$B_{cap} = ۱.۸\, m > D_c + ۰.۶۰ = ۱.۷۵ \quad OK$$

$$A_{jh} = (D_c + D_s) B_{cap} = (۱.۱۵ + ۱.۳) \times ۱.۸ = ۴.۴۱\, m^۲$$

$$A_{jv} = L_{ac}\, B_{cap} = ۰.۹۵ \times ۱.۸ = ۱.۷۱\, m^۲$$

$$M_o = ۱.۲ M_p = ۱.۲ \times ۵۴۵ = ۶۵۴\, t.m$$

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

$$T_c = \frac{M_o}{\frac{۷}{۸} d_c} = \frac{۶۵۴}{\frac{۷ \times ۱.۰۵}{۸}} = ۷۱۱.۸۴\ t$$

$$\begin{matrix} P_c = ۴۸۵.۰۲\ t \\ T_c = ۷۱۱.۸۴\ t \\ P_b = ۷۱\ t \end{matrix} \Rightarrow \begin{cases} v_{jv} = \frac{T_c}{A_{jv}} = ۴۱۶.۳\ \frac{t}{m^۲} \\ f_v = \frac{P_c}{A_{jh}} = ۱۱۰\ \frac{t}{m^۲} \\ f_h = \frac{P_b}{B_{cap}\ D_c} = ۳۴.۳\ \frac{t}{m^۲} \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_c = \frac{f_v + f_h}{۲} + \sqrt{\left(\frac{f_h - f_v}{۲}\right)^۲ + v_{jv}^۲} = ۴۷۴.۷\ \frac{t}{m^۲} = ۴.۴۷\ Mpa < ۷.۵\ Mpa \quad OK \\ P_t = \left| \frac{f_v + f_h}{۲} - \sqrt{\left(\frac{f_h - f_v}{۲}\right)^۲ + v_{jv}^۲} \right| = ۳۴۵.۸۵\ \frac{t}{m^۲} = ۳.۴۶\ Mpa < ۵.۵\ Mpa \quad OK \end{cases}$$

- **کنترل گره اتصال طبق AASHTO**

در آیین‌نامه آشتو حد تنش‌های اصلی کششی و فشاری به شکل زیر داده شده است و سایر روابط نیز در محاسبه تنش‌ها مانند قبل خواهند بود، به دلیل بالاتر بودن حد این ضوابط نسبت به آیین‌نامه Caltrans نیازی به کنترل نخواهد بود.

$$\begin{cases} P_c \le ۰.۲۵ f_c' \\ P_t \le ۰.۳۸ \sqrt{f_c'} \end{cases}$$

- **قرار دادن حداقل آرماتور برشی در گره اتصال طبق Caltrans**

با توجه به آیین‌نامه اگر میزان تنش کششی اصلی در گره اتصال کمتر از مقدار زیر باشد، احتیاج به قرار دادن آرماتور اضافی در داخل گره اتصال نخواهد بود، و ادامه پیدا کردن آرماتورهای برشی ستون به داخل سرستون کافی خواهد بود.

$$P_t = ۳.۴۶\ Mpa > ۰.۲۹ \sqrt{f_c'} = ۱.۵۸\ Mpa$$

همچنین میزان حجم آرماتورهای عرضی که داخل سرستون ادامه پیدا خواهند کرد باید بیشتر از مقدار زیر قرار داده شود:

$$\rho_{s_{min}} \ge \frac{۰.۲۹ \sqrt{f_c'}}{f_{yh}} = \frac{۱.۵۸}{۴۰۰} = ۰.۰۰۴$$

$$\rho_s = \frac{۰.۴ A_{st}}{L_{ac}^۲} = \frac{۰.۴ \times (\pi \times ۱۰۵ \times ۲)}{۹۵^۲} = ۰.۰۲۹ > ۰.۰۰۴ \quad OK$$

Scanned with CamScanner
Etabs-SAP.ir

۷-۱۲ کنترل لنبود بعد ستون به صفحات عرضه

Scanned with CamScanner

Etabs-SAP.ir