آموزش نرم‌افزار تحلیلی *OpenSees*

نویسندگان:

سیاوش قناعت پیشه – پارسا جلوخانی

انجمن سازه‌های فولادی ایران

فهرست مطالب

۱-جلسه اول ۱
۱-۱- مبانی اولیه در تحلیل سازه‌ها ۱
۱-۲- روشهای کلی تحلیل سازه‌ها ۳
۱-۲-۱-تحلیل الاستیک مرتبه اول ۳
۱-۲-۲-تحلیل کمانشی خطی ۴
۱-۲-۳-تحلیل الاستیک مرتبه دوم ۴
۱-۲-۴-تحلیل مفصل پلاستیک مرتبه اول ۵
۱-۲-۵-تحلیل غیرخطی مرتبه دوم ۵
۱-۳- جمع‌بندی ۶
۲-جلسه دوم ۷
۲-۱- منابع آیین‌نامه‌ای ۷
۲-۲- روشهای تحلیل آیین‌نامه‌ای ۷
۲-۲-۱-روش‌های خطی ۸
۲-۲-۲-روش‌های غیرخطی ۹
۳-جلسه سوم ۱۱
۳-۱- OpenSees چیست؟ ۱۱
۳-۲- نحوه نصب نرم‌افزار OpenSees ۱۲
۳-۳- نوشتن اولین دستور ۱۳
۳-۴- تاریخچه نرم‌افزار OpenSees ۱۴
۳-۵- مثالی از شمع در خاک ۱۴
۳-۶- نتیجه‌گیری ۱۷
۴-جلسه چهارم ۱۸
۴-۱- مزایا و معایب OpenSees ۱۸
۴-۲- سیستم حل در OpenSees ۱۹
۴-۳- مدل‌های المان‌های غیرخطی ۲۱

۴-۴- مصالح موجود ۲۳
۴-۵- دستورات TCL ۲۴
۵-جلسه پنجم ۲۷
۵-۱- مثال آموزشی اول ۲۷
۶-جلسه ششم ۳۶
۶-۱- بارگذاری اول (خطی و نقطه‌ای) ۳۶
۶-۲- موتور تحلیل ۴۱
۷-جلسه هفتم ۴۳
۷-۱- ادامه دستورات موتور تحلیل ۴۳
۷-۲- تحلیل استاتیکی (حل بارگذاری اول) ۴۸
۷-۳- بارگذاری دوم (نیرو و لنگر نقطه‌ای) ۵۲
۸-جلسه هشتم ۵۴
۸-۱- ساخت مقاطع Fiber ۵۴
۸-۲- تعریف مقطع بتنی ۵۶
۸-۳- تعریف مقطع فولادی ۶۰
۹-جلسه نهم ۶۱
۹-۱- مصالح یک جهته یا محوری ۶۱
۱۰-جلسه دهم ۷۱
۱۰-۱-مثال آموزشی دوم (ستون) ۷۱
۱۰-۲-دمپینگ رایلی ۷۴
۱۰-۳-تحلیل تاریخچه زمانی ۷۶
۱۰-۴-مقدار ویژه در تحلیل مدال ۷۸
۱۱-جلسه یازدهم ۷۹
۱۱-۱-نوشتن برنامه (procedure) ۷۹
۱۱-۲-تحلیل استاتیکی غیرخطی تحت بارهای ثقلی ۸۴
۱۲-جلسه دوازدهم ۸۵

۱۲-۱-تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌اور) ۸۵
۱۲-۲-تحلیل IDA: ۸۷
۱۲-۳-تحلیل شبه استاتیکی (سیکلیک) ۹۳

انجمن سازه های فولادی ایران
IRANIAN SOCIETY OF STEEL STRUCTURES

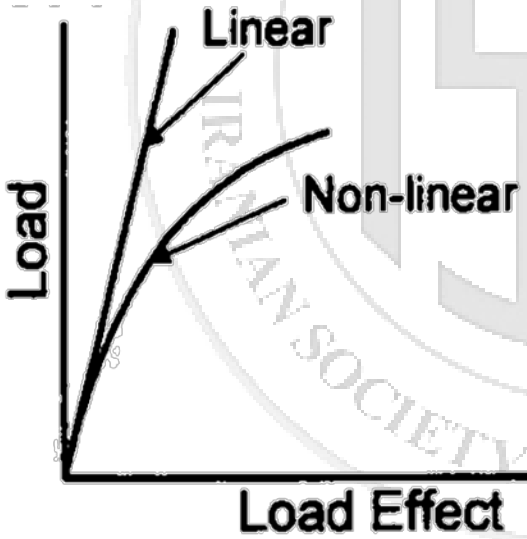
۱- جلسه اول

۱-۱- مبانی اولیه در تحلیل سازه‌ها

معینی و نامعینی سازه

چنانچه تعداد مجهولات برابر تعداد معادلات (معادلات تعادل و معادلات شرط) بوده و همچنین نیروها و لنگرها مستقل از خصوصیات اعضا باشند سازه معین است. در صورتی‌که تعداد مجهولات بیشتر از تعداد معادلات (معادلات تعادل و معادلات شرط و دیگر معادلات) بوده و همچنین نیروها و لنگرها وابسته به خصوصیات نسبی اعضا باشند سازه نامعین خواهد بود.

خطی و غیرخطی

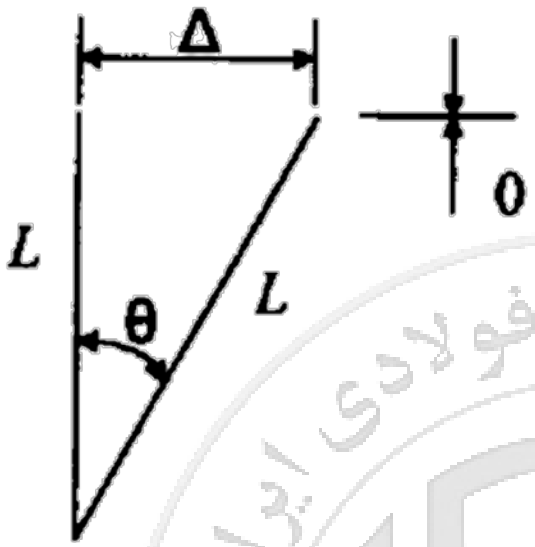


۱- **خطی**: اثرات بار متناسب با مقدار بار بوده و مصالح در حوزه الاستیک مورد بررسی قرار می‌گیرند و همچنین قانون جمع آثار قوا قابل استفاده است.

۲- **غیرخطی**: اثرات بارها متناسب با مقدار بار نیستند و مصالح در حوزه الاستیک- پلاستیک و غیرالاستیک مورد بررسی قرار می‌گیرند و همچنین استفاده از قانون جمع آثار قوا معتبر نخواهد بود.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

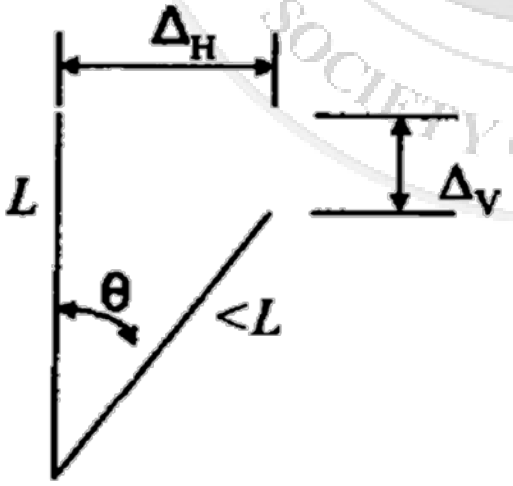
روش تحلیل مرتبه اول



تحلیل مرتبه اول سازه را بر مبنای تغییر شکل‌های کوچک و رفتار الاستیک مورد بررسی قرار می‌دهد. در روش تحلیل مرتبه اول معادلات تعادل نسبت به سازه تغییرشکل نیافته نوشته می‌شود و از اثر نیروی محوری در لنگر تیر ستون صرف نظر می‌شود. در این روش تغییر شکل‌ها کوچک فرض می‌شوند در واقع می‌توان گفت:

$$sin\theta = tan\theta = \theta$$

روش تحلیل مرتبه دوم



در روش تحلیل مرتبه دوم معادلات تعادل نسبت به سازه تغییرشکل یافته نوشته می‌شود و اثر نیروی محوری در لنگر تیر ستون لحاظ می‌شود. در این روش تغییرشکل‌ها بزرگ هستند در واقع می‌توان گفت:

$$sin\theta \neq tan\theta \neq \theta$$

انجمن سازه‌های فولادی ایران

۱-۲- روش‌های کلی تحلیل سازه‌ها

با توجه به موارد گفته شده تحلیل سازه در حالت کلی به یکی از روش‌های زیر قابل خواهد بود:

۱- **تحلیل الاستیک مرتبه اول**

۲- **تحلیل کمانشی خطی**

۳- **تحلیل الاستیک مرتبه دوم**

۴- **تحلیل مفصل پلاستیک مرتبه اول**

۵- **تحلیل غیرخطی مرتبه دوم**

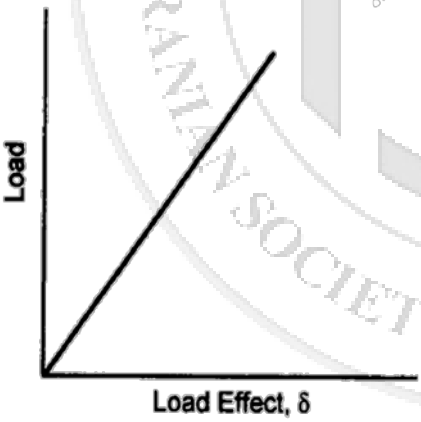
۱-۲-۱- تحلیل الاستیک مرتبه اول

فرضیات:

۱- خطی

۲- مصالح در حوزه الاستیک هستند

۳- معادلات تعادل نسبت به سازه اصلی نوشته می‌شود



روش‌های معمول

۱- توزیع لنگر

۲- شیب ـ افت

۳- روش ماتریس سختی

۴- و اکثر برنامه‌های تجاری کامپیوتری

انجمن سازه‌های فولادی ایران

۱-۲-۲- تحلیل کمانشی خطی

فرضیات:

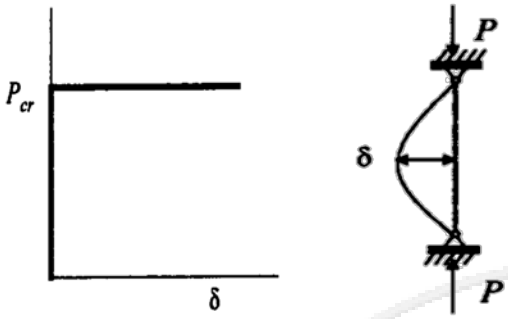
۱- تحلیل انشعابات (Bifurcation Analysis)

۱- از شرایط بدون جابه‌جایی تا جابه‌جایی بی‌نهایت

۲- تحلیل مقادیر ویژه (Eigenvalue Analysis)

۳- تحلیل معمول ستون

- طول مؤثر ستون
- الاستیک خطی



تحلیل انشعابات الاستیک خطی

۱-۲-۳- تحلیل الاستیک مرتبه دوم

فرضیات:

۱- مصالح الاستیک خطی هستند

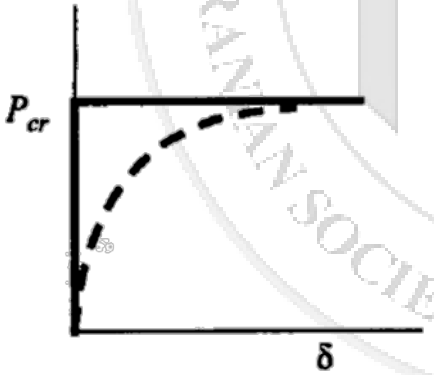
۲- تعادل نسبت به شرایط تغییرشکل یافته سنجیده می‌شود:

۱-۲- $P\Delta$ و $P\delta$

۳- راه حل دقیق، تکراری یا تقریبی

۴- محاسبه برای پایداری انجام می‌شود

۵- روش‌های بار بحرانی



چگونگی تاثیر اثرات مرتبه دوم در تغییرشکل سازه

انجمن سازه‌های فولادی ایران

۱-۲-۴- تحلیل مفصل پلاستیک مرتبه اول

فرضیات:

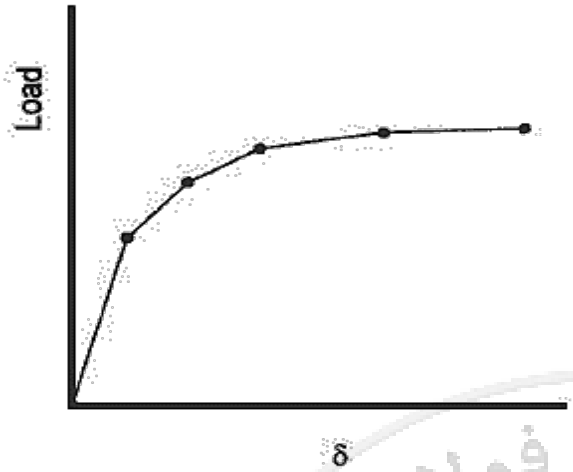
۱- مفاصل پلاستیک:

- الاستیک یا کاملاً پلاستیک هستند
- M_y از M_p تبعیت می‌کند

۲- انجام باز توزیع نیروها

۳- روش‌ها:

- صلب – پلاستیک
- الاستیک – پلاستیک



تحلیل مرتبه پلاستیک مرتبه اول

۱-۲-۵- تحلیل غیرخطی مرتبه دوم

فرضیات:

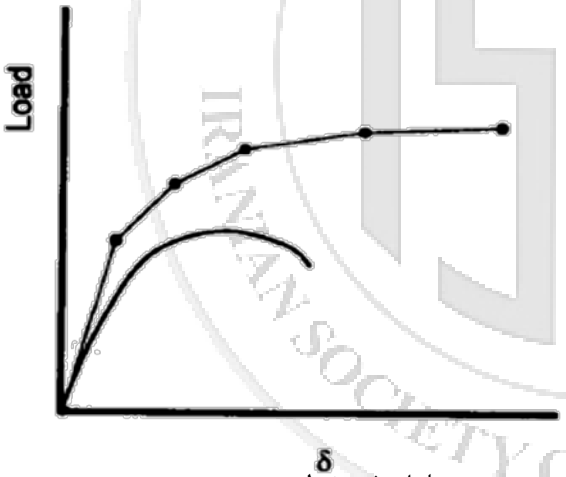
۱- در تسلیم مصالح به کار می‌رود

۲- بر پایه مفاصل پلاستیک است:

- یک تیر ستون برای هر عضو
- طول صفر برای مفاصل پلاستیک
- تحلیلی مؤثر برای ساختمان‌های بزرگ
- همچنان به صورت تقریبی مطرح است

۳- تحلیل ناحیه پلاستیک

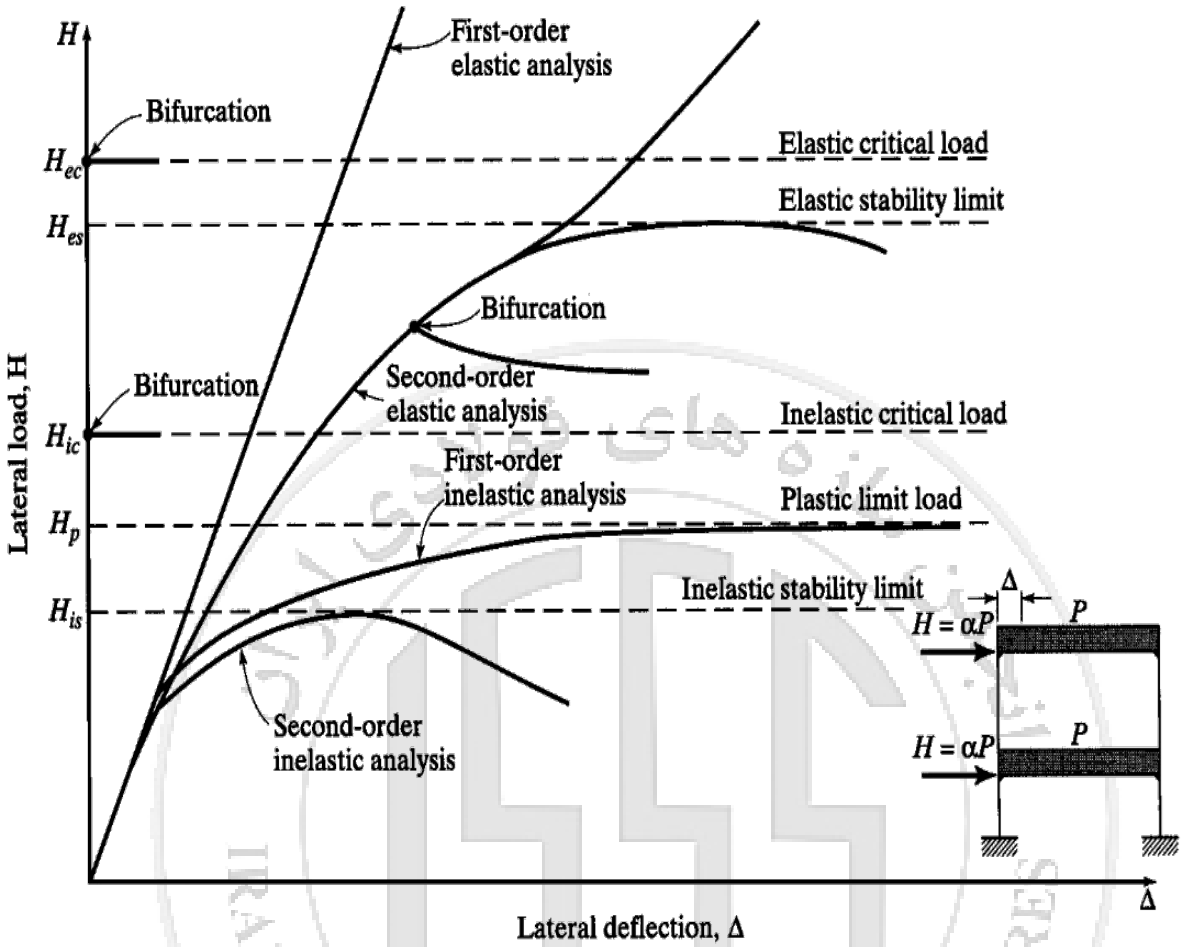
- توزیع پلاستیسیته
- تکه‌ای نمودن اعضاء
- تعداد زیادی اجزا محدود
- روشی بسیار پیچیده است



تحلیل غیرخطی مرتبه دوم

انجمن سازه‌های فولادی ایران

۱-۳- جمع‌بندی



انجمن سازه‌های فولادی ایران

۲- جلسه دوم

۲-۱- منابع آیین‌نامه‌ای

۱- آیین‌نامه طراحی ساختمآن‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش ۴)

۲- دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمآن‌های موجود، نشریه شماره ۳۶۰

۳- تفسیر دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمآن‌های موجود، نشریه ۳۶۱

۴- NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 4: Nonlinear Structural Analysis For Seismic Design

۲-۲- روش‌های تحلیل آیین‌نامه‌ای

آیین‌نامه‌ها و استانداردهای طراحی لرزه و طراحی بر اساس عملکرد (Performance Based Earthquake Engineering) همانند استاندارد ۲۸۰۰، ASCE/SEI 7، FEMA 356، FEMA 273، FEMA p695 و نشریه ۳۶۰ تقسیم بندی روش تحلیل را در دو دسته:

۱- روش‌های خطی

۲- روش‌های غیرخطی انجام می‌دهند.

بر این اساس روش‌های خطی و غیر خطی خود بر دو دسته:

۱- استاتیکی

۲- دینامیکی تقسیم‌بندی می‌شوند.

قابل استفاده بودن هریک از این روش‌ها بسته به میزان دقت نتایج حاصل از آن‌ها تعیین می‌شود.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

۲-۲-۱- روش‌های خطی

ارزیابی سازه در محدوده رفتار خطی اجزای اصلی است.

اعتبار این روش‌ها تا زمانی برقرار است که رفتار اجزای سازه در محدوده خطی بوده و یا تعداد کمی از آن‌ها از این محدوده خارج شده باشند. همچنین محل تشکیل مفاصل پلاستیک باید در دو انتهای عضو باشد.

مدل‌سازی تنها با اعضای اصلی انجام می‌شود و اعضای غیراصلی برای کنترل‌های بهره‌برداری مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

روش استاتیکی معادل:

هنگامی که سازه منظم و کوتاه باشد و در واقع اثرات مودهای بالاتر بر پاسخ سازه نسبت به مود اول بسیار کمتر باشد، قابل استفاده خواهند بود.

روش دینامیکی خطی:

به دو صورت تحلیل طیفی و تحلیل تاریخچه زمانی قابل انجام است.

۱- تحلیل خطی طیفی (یا در برخی مراجع شبه دینامیکی) : با استفاده از تحلیل مودهایی که اثر قابل توجهی در بازتاب کلی سازه دارند، انجام می‌شود.

۲- تحلیل خطی تاریخچه زمانی: با اثر دادن شتاب زمین به صورت تابعی از زمان در تراز پایه ساختمان و به کارگیری محاسبات متعارف دینامیک سازه‌ها انجام می‌شود

انجمن سازه‌های فولادی ایران

۲-۲-۲- روش‌های غیرخطی

ارزیابی تحلیلی سازه با درنظر گرفتن رفتار غیرخطی اجزاء به دلیل رفتار غیرخطی مصالح و اثرات غیرخطی هندسی انجام می‌شود:

۱- غیرخطی مصالح: تغییر خصوصیات رفتار مصالح

۲- غیرخطی هندسی: تغییر هندسه سازه

محل وقوع مفاصل پلاستیک در هر کجای عضو می‌تواند باشد.

روش‌های خطی و غیرخطی تا محدوده رفتار خطی اجزاء پاسخ‌های یکسانی دارند.

در روش‌های تحلیل غیرخطی تمامی اعضای اصلی و غیراصلی مدل شده و اثر کاهش مقاومت و سختی اجزاء توسط تعریف مصالح تغییرپذیر در مدل وارد می‌شوند.

تحلیل استاتیکی غیرخطی (Pushover):

بار جانبی ناشی از زلزله، به صورت استاتیکی، تدریجی افزایشی به سازه اعمال می‌شود و تا جایی که تغییر مکان در یک نقطه خاص (نقطه کنترل) تحت اثر بار جانبی، به مقدار تغییر مکان هدف برسد و یا سازه دچار فروریزش شود.

نقطه کنترل تغییر مکان سازه، مرکز جرم بام (نه خرپشته) انتخاب می‌شود.

توزیع بار جانبی بر مدل سازه باید تا حد امکان شبیه به آنچه که هنگام زلزله رخ خواهد داد، باشد و حالت‌های بحرانی تغییرشکل و نیروهای داخلی را در اعضاء ایجاد نماید. نشریه ۳۶۰ و دستورالعمل FEMA 273 حداقل دو نوع توزیع بار جانبی را برای سازه پیش‌بینی نموده است.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

روش دینامیکی غیرخطی:

برای بررسی عملکرد واقعی سازه در هنگام زلزله باید تحلیل دینامیکی غیرخطی صورت گیرد تا تغییرمکآن‌های حداکثر و توزیع واقعی مفاصل پلاستیک مشخص شود.

پاسخ سازه با درنظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح و رفتار غیرخطی هندسی سازه محاسبه می‌شود.

ماتریس سختی و میرایی از یک گام به گام بعدی می‌تواند تغییر کند، اما در طول هر گام زمانی ثابت است و پاسخ مدل تخت شتاب زلزله به روش‌های عددی و برای هر گام زمانی محاسبه می‌شود.

۱- تحلیل تاریخچه زمانی (Response History Analysis)

۲- تحلیل دینامیکی افزایشی (Incremental Dynamic Analysis)

برای ارزیابی فروریزش لازم است که شدت رکوردهای زلزله به صورت پیوسته و مرحله‌ای افزایش یابد. به چنین فرآیندی از تحلیل دینامیکی غیرخطی، تحلیل دینامیکی افزایشی یا IDA گفته می‌شود.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

۳- جلسه سوم

۳-۱- OpenSees چیست؟

نام OpenSees مخفف Open System for Earthquake Engineering Simulation می‌باشد که مشخص است برای کارهای مربوط به مهندسی زلزله تشکیل و بسط داده شده است.

نرم افزار OpenSees یکی از نرم افزارهای تحلیل سازه‌ها بوده که در سال ۱۹۹۰ توسط محققین دانشگاه برکلی آمریکا تهیه شده و از آن زمان تا کنون در حال توسعه مداوم می‌باشد. این نرم افزار شامل مجموعه کاملی از انواع المان ها، مصالح و روش‌های مختلف تحلیل بوده و توانایی مدل‌سازی و تحلیل را در زمینه‌های میکرو و ماکرو دارا می‌باشد.

این نرم افزار همانطور که از نامش پیداست به صورت رایگان از طریق آدرس اینترنتی دانشگاه برکلی در دسترس همگان بوده و کد برنامه نویسی آن به صورت باز می‌باشد. این نکته مهم سبب شده که اصلاح کمبودها و تکمیل تدریجی نرم افزار توسط کلیه افرادی که در سراسر دنیا از آن استفاده می کنند امکان پذیر باشد.

OpenSees یک فایل exe چند مگابایتی هست که داخلش کد وجود دارد. محیط اصلا visual نیست، اگر باز کنید محیط تحت DOS هست که توضیحاتی در بالا وجود دارد.

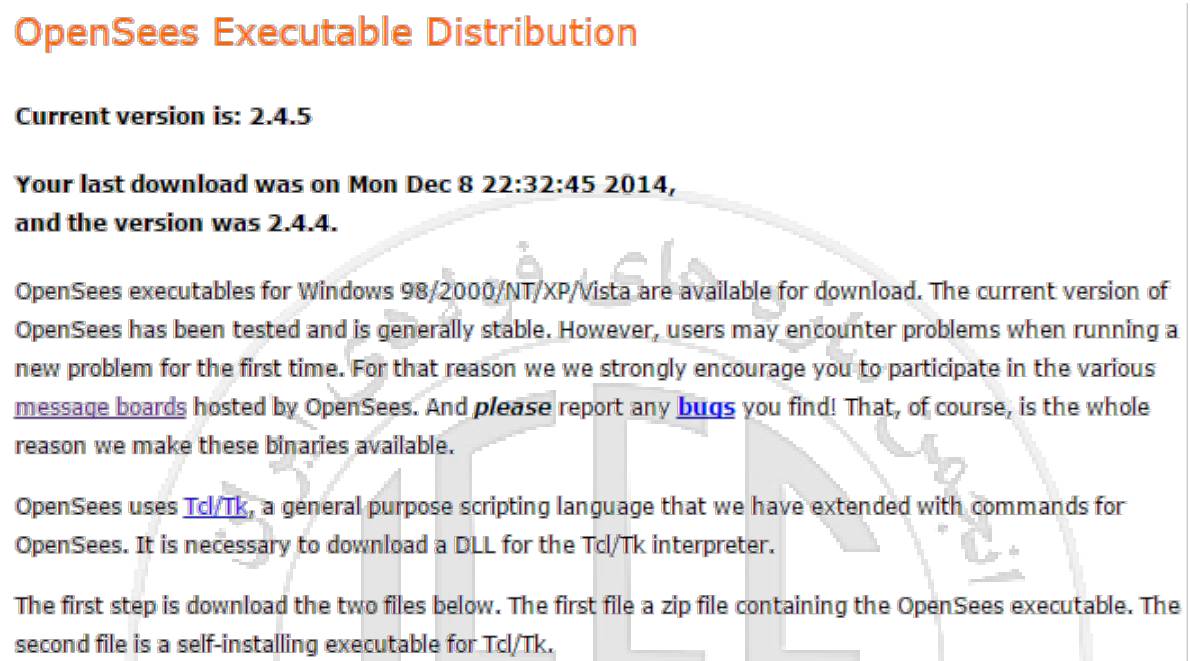
فایل هایی که در محیط OpenSees اجرا می شوند فایل‌های متنی هستند. مانند SAP80 یا SAP90 که باید برای تعریف گره و المان کد می نوشتیم، OpenSees هم همچین حالتی دارد.

مثلا اگر بخواهیم مدلی را اجرا کنیم، اولین راه این است که ابتدا نرم‌افزار OpenSees را باز کنیم، با دستور puts که دستور چاپ کردن می‌باشد، OpenSees را چاپ کنیم.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

۳-۲- نحوه نصب نرم‌افزار OpenSees

شما با مراجعه به سایت http://OpenSees.berkeley.edu و ثبت نام کردن و انتخاب گزینه download از سمت چپ، باید ایمیلی که با آن ثبت نام کردید را وارد کرده و سپس وارد صفحه ای به شکل زیر می‌شود:



OpenSees Executable Distribution

Current version is: 2.4.5

Your last download was on Mon Dec 8 22:32:45 2014,
and the version was 2.4.4.

OpenSees executables for Windows 98/2000/NT/XP/Vista are available for download. The current version of OpenSees has been tested and is generally stable. However, users may encounter problems when running a new problem for the first time. For that reason we we strongly encourage you to participate in the various message boards hosted by OpenSees. And ***please*** report any **bugs** you find! That, of course, is the whole reason we make these binaries available.

OpenSees uses Tcl/Tk, a general purpose scripting language that we have extended with commands for OpenSees. It is necessary to download a DLL for the Tcl/Tk interpreter.

The first step is download the two files below. The first file a zip file containing the OpenSees executable. The second file is a self-installing executable for Tcl/Tk.

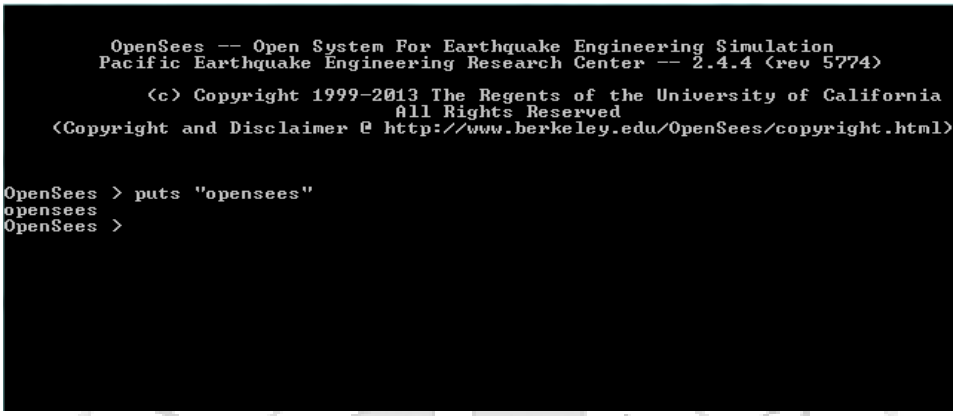
سپس فایل tcl/tk و OpenSees مربوطه را دانلود می‌کنید، فایل tcl/tk پیش‌نیاز اجرای OpenSees می‌باشد. مانند برنامه net framework. که پیش‌نیاز نصب نرم‌افزار Matlab می‌باشد.

اختلاف نسخه‌های مختلف، در دستورات داخل آن می‌باشد، اگر شما کدی نوشته باشید، ممکن است در نسخه بعدی وارد OpenSees شود یا ممکن است در نسخه بعدی کدهایی از برنامه حذف شود که یکی از دلایل آن می‌تواند خواستن نویسنده کد باشد.

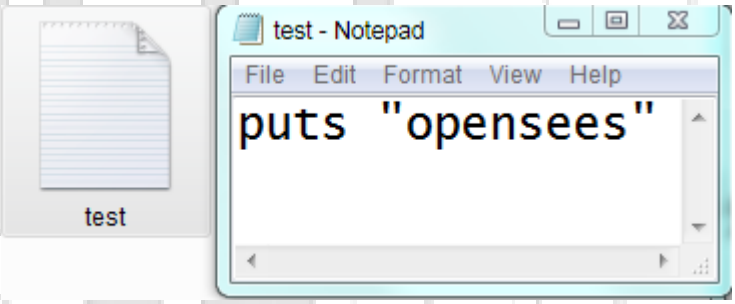
انجمن سازه‌های فولادی ایران

۳-۳- نوشتن اولین دستور

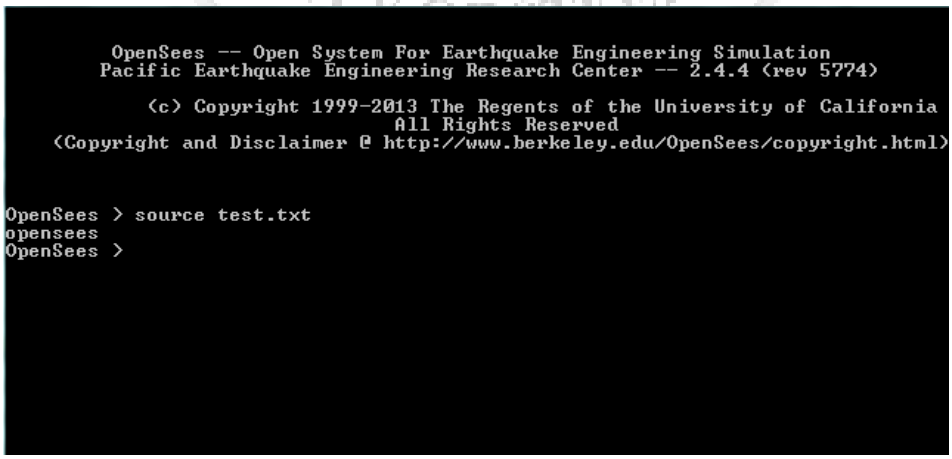
اولین روش اینست که پس از باز شدن برنامه، دستور puts “OpenSees” را بنویسید و enter را بزنید.



روش دیگر، باز کردن فایل متنی و نوشتن همین دستور در آن می‌باشد. بعد از save کردن آن دوباره به برنامه OpenSees بر میگردیم، یادمان باشد فایل متنی باید در همان فولدر فایل OpenSees باشد.



سپس در برنامه تایپ می کنیم: source test.txt



انجمن سازه‌های فولادی ایران

حالا به جای ۱ خط می‌توان ۱۰۰۰ خط کد نوشت. روش کار OpenSees به صورت بالا می‌باشد.

۳-۴- تاریخچه نرم‌افزار OpenSees

همانطوری که بالای برنامه OpenSees نوشته شده است، از سال ۱۹۹۹ این برنامه شروع به کار کرده و تا حالا در حال توسعه می‌باشد. برتری OpenSees اینست که کارها پشت هم می‌باشد، مثلا ما دیگر لازم نیست کد تعریف ماتریس سختی را بنویسیم، از برنامه نوشته شده استفاده می‌کنیم، و اگر کار جدیدی انجام دهیم می‌توانیم آن را به اشتراک بگذاریم و در نسخه بعدی برنامه، کد ما نیز داخل برنامه به اسم خود ما خواهد بود.

گسترش سریع آن مدیون همین نوع برنامه نویسی است، که میتواند تمام شاخه‌ها را پوشش دهد، از آب و خاک تا سازه، و دیگر نیاز به نرم افزار متفاوت برای هر کاری نمی‌باشد.

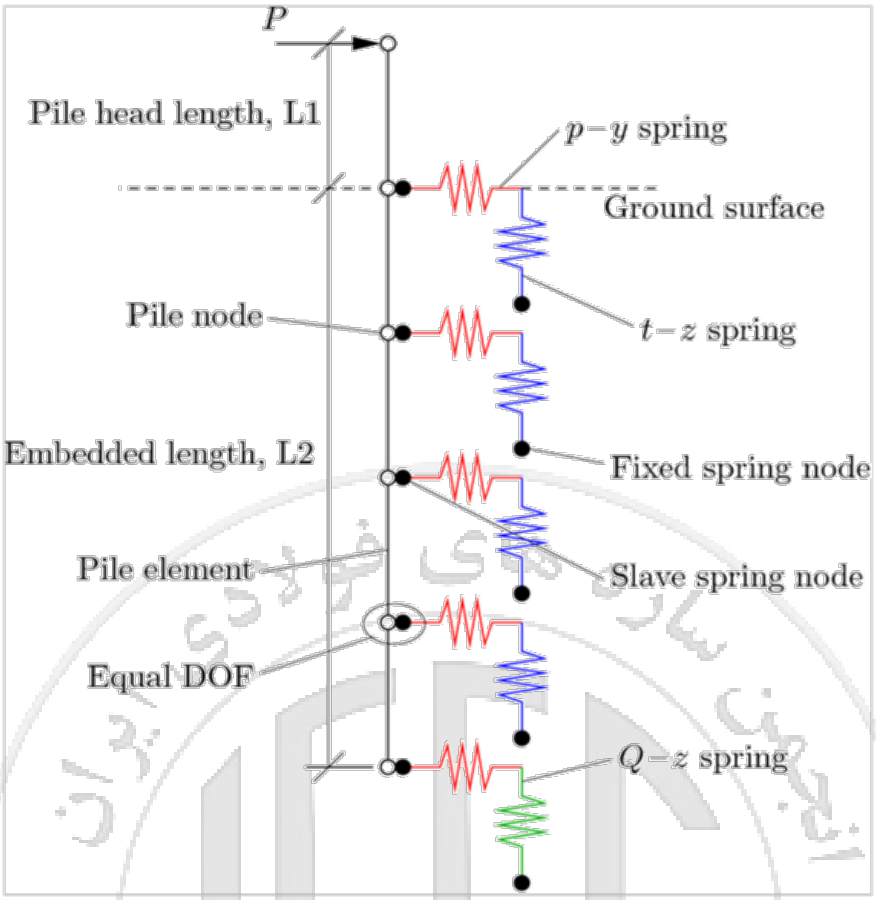
OpenSees همانطور که گفته شد یک نرم افزار کد باز می‌باشد، مانند SAP یا ABAQUS داخل یک دی وی دی نیست، به همین دلیل کسی نمیتواند بگوید کل OpenSees را بلد است، چون در حال به روز شدن و توسعه است و بسیار گسترده می‌باشد.

۳-۵- مثالی از شمع در خاک

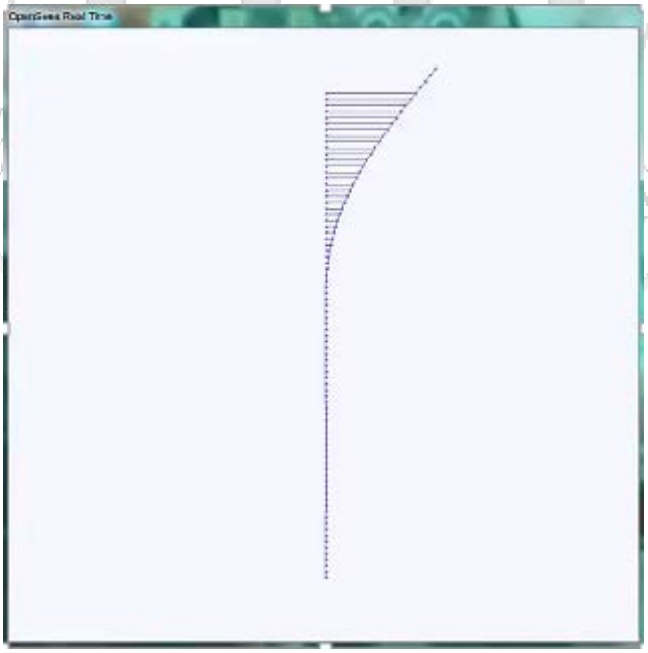
ابتدا یک مثال آماده نشان می‌دهم تا با نحوه کار برنامه بیشتر آشنا شوید، پس از آن از مثال‌های بسیار ساده تا سخت گام به گام پیش می‌رویم.

مثال اول مربوط به شمع داخل خاک می‌باشد که به صورت جانبی به آن نیرو وارد می‌شود. همانطور که می‌بینید از چندین المان به همراه فنرهایی برای مدل‌سازی خاک استفاده شده است.

انجمن سازه‌های فولادی ایران



اگر به آن نیروی جانبی وارد شود تغییرمکان آن به‌صورت زیر خواهد بود:



در ادامه کد نوشته شده برای این شمع را توضیح خواهید داد:

انجمن سازه‌های فولادی ایران

قسمت اول کد این شمع مربوط به تعریف گره‌ها می‌باشد. برای اینکه تعداد گره‌ها زیاد می‌باشد و همچنین رابطه معنی داری بین مختصات آن‌ها وجود دارد (همه با فاصله یکسان از هم روی یک خط هستند). با نوشتن حلقه با فرمت tcl که در جلسات بعد توضیح داده می‌شود، گره‌ها را تعریف کرده است:

```
#-----------------------------------------------------------
#  create spring nodes
#-----------------------------------------------------------

# spring nodes created with 3 dim, 3 dof
model BasicBuilder -ndm 3 -ndf 3

# counter to determine number of embedded nodes
set count 0

# create spring nodes
for {set i 1} {$i <= $nNodePile} {incr i} {
  # z-coordinates of nodes depend on element length
    set zCoord [expr $eleSize*($i - 1)]
  # only create spring nodes over embedded length of pile
    if {$zCoord <= $L2} {
        node $i              0.00   0.00   $zCoord
          node [expr $i+100]  0.00   0.00   $zCoord
        set count [expr $count+1]
    }
}
puts "Finished creating all spring nodes..."
```

همچنین علامت # برای نوشتن توضیحات به کار می‌رود. اگر بخواهیم توضیحی جلوی دستور بنویسیم ابتدا باید علامت ; را در انتهای دستور بنویسیم، سپس با علامت # توضیحات لازم وارد می‌شود.

```
#-----------------------------------------------------------
#  create pile elements
#-----------------------------------------------------------

for {set i 201} {$i <= [expr 200+$nElePile]} {incr i} {

    element dispBeamColumn  $i  $i  [expr $i+1]  $secTag3D   3   1
}
puts "Finished creating all pile elements..."
```

به دلیل زیاد بودن المان‌ها با نوشتن حلقه و دستور element بین گره ها، المان شمع قرار می گیرد.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

```
#-----------------------------------------------------------
#  create recorders
#-----------------------------------------------------------

# record information at specified increments
set timeStep 0.5

# record displacements at pile nodes
recorder Node -file pileDisp.out  -time  -nodeRange 201 [expr 200+$nNodePile]  -dof 1 2 3  -dT $timeStep  disp
# record reaction force in the p-y springs
recorder Node -file reaction.out  -time  -nodeRange 1 $nNodePile  -dof 1  -dT $timeStep  reaction
# record element forces in pile elements
recorder Element -file pileForce.out  -time  -eleRange 201 [expr 200+$nElePile]  -dT $timeStep  globalForce
puts "Finished creating all recorders..."

# real time display recorder for visualization during analysis
recorder display "OpenSees Real Time" 10 10 700 700 -wipe
prp           0 100 0
vup           0 0 1
vpn           0 -1 0
display       1 3 10
```

سپس خروجی‌های برنامه تعریف می‌شود، که چه تغییر مکان‌ها یا نیروهایی نیاز می‌باشد.

در آخر هر برنامه بارگذاری و موتورهای تحلیل معرفی می شوند.

۳-۶- نتیجه‌گیری

قدم‌های اساسی حل مساله در OpenSees:

۱- تعریف گره و تکیه گاه

۲- تعریف المان

۳- تعریف خروجی‌ها

۴- تعریف دستورات تحلیل

در تمام برنامه‌های نوشته شده، این ۴ قدم باید به درستی برداشته شود تا نتیجه درست باشد.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

۴- جلسه چهارم

۴-۱- مزایا و معایب OpenSees

نرم افزار OpenSees یک software framework هست که مزایا و معایبی دارد.

از قابلیت‌های کلیدی این نرم افزار می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- رایگان، منبع باز و در دسترس بودن و در نتیجه مناسب بودن برای ارائه مقاله در کنفرانس‌ها و مجلات بین المللی

۲- داشتن موتور قوی و سریع تحلیل در حوزه رفتار غیر خطی سازه‌های مختلف و در نتیجه مناسب برای انجام تحلیل‌های استاتیکی پوش‌اُور، استاتیکی دوره ای، دینامیکی تاریخچه زمانی و دینامیکی غیر خطی افزایشی (IDA)

۳- انجام تحلیل‌های دینامیکی با تحریک یک تکیه‌گاهی یا چند تکیه‌گاهی

۴- قابلیت تحلیل اندرکنش خاک و سازه

۵- قابلیت انعطاف بسیار بالای دستورات و نیز قابلیت اضافه کردن دستورات جدید به بدنه اصلی نرم افزار

۶- قابلیت انجام تحلیل‌های حجیم بهینه سازی از طریق اتصال به نرم‌افزارهایی مانند MATLAB

۷- داشتن آرشیو کاملی از مواد و المان‌ها و قابلیت کدنویسی برای چندین تحلیل

۸- قابلیت انجام تحلیل حرارتی و بررسی وضعیت سازه پس از آتش سوزی

در مثال جلسه سوم دیده شد، برنامه OpenSees کدنویسی محض می‌باشد و به‌صورت تصویری شکلی نشان نمی‌دهد، برای دیدن مدل‌ها باید از برنامه‌های جانبی که برای OpenSees ساخته شده و به چند برنامه محدود می‌شود استفاده کرد:

انجمن سازه‌های فولادی ایران

۱- برنامه OSP که معروف‌ترین آن‌هاست و با دادن فایل حاوی گره‌ها و المان‌ها، مدل را نشان می‌دهد.

۲- برنامه Building Tcl که برمبنای MATLAB می‌باشد.

۳- برنامه OpenSees Navigator که برمبنای MATLAB می‌باشد.

۴- برنامه VEES که برمبنای XML می‌باشد.

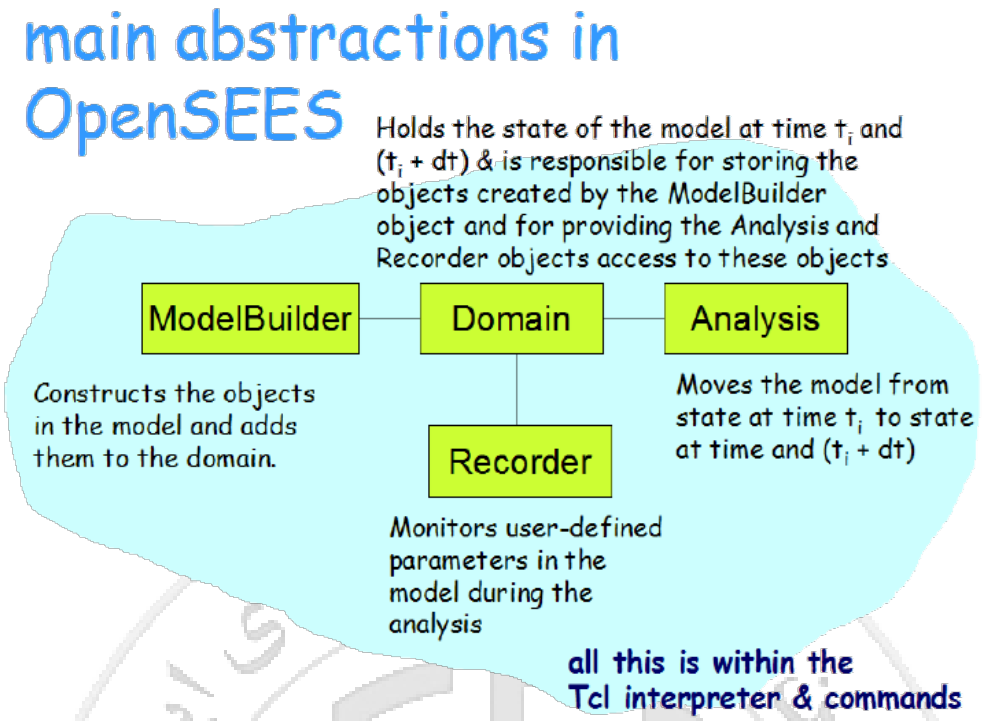
۵- دستور display recorder که بر مبنای tcl می‌باشد و اگر تحلیل انجام شود، تغییرمکان سازه را نشان می‌دهد.

پس از ساخت گره‌ها و المان‌ها توصیه می‌شود با یکی از این برنامه آن‌ها چک شود تا از صحت پارامترها مطمئن شوید.

۲-۴- سیستم حل در OpenSees

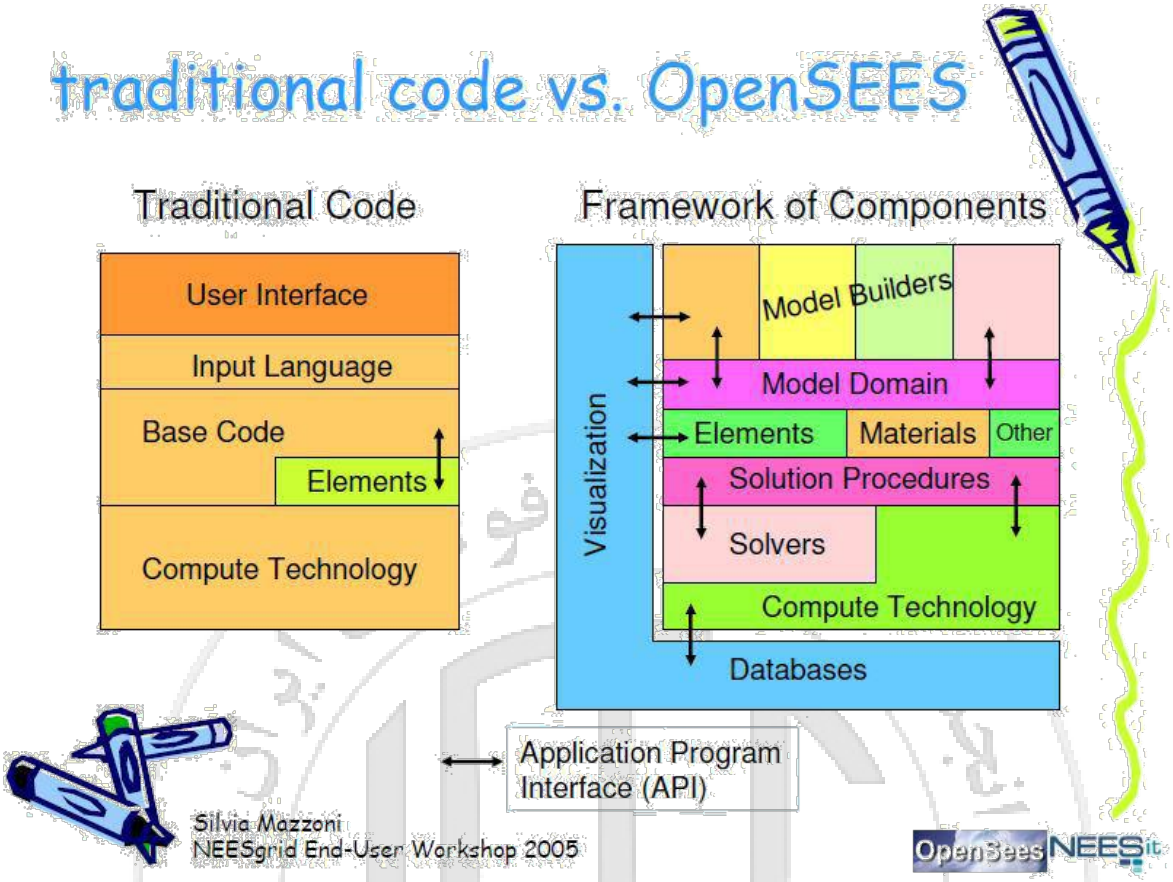
علت سرعت سریع OpenSees سیستم کدنویسی ستاره‌ای می‌باشد، قسمت اول model builder جایی است که مدل در آن ساخته می‌شود، قسمت وسط domain می‌باشد که دارد اتفاقات در آن رخ می دهد. اطلاعات در لحظه t و $t+\Delta t$ در domain وجود دارد، و قبل و بعدش وجود ندارد. قسمت تحلیل دستورات تحلیل و موتور domain می‌باشد، یعنی چه دستوراتی میخواهید در domain اجرا شود، قسمت recorder خروجی‌ها می‌باشد.

انجمن سازه‌های فولادی ایران



در کدنویسی معمولی، ابتدا مدل و اطلاعات اولیه ساخته و وارد می‌شود، سپس برای تحلیل، قسمت اطلاعات ورودی قفل می‌شود و فقط تحلیل انجام می‌شود و نمی‌توان برگشت و آن را تغییر داد. ولی در OpenSees می‌توان کدی نوشته که مثلا در ثانیه ۱۰ام تحلیل، ستونی از سازه حذف شود و بقیه تحلیل ادامه پیدا کند. این ویژگی در بررسی خرابی پیش‌رونده یا دمپرهای فعال که باید پس از هر تحلیل نیروی آن‌ها عوض شود، کاربرد زیادی دارد.

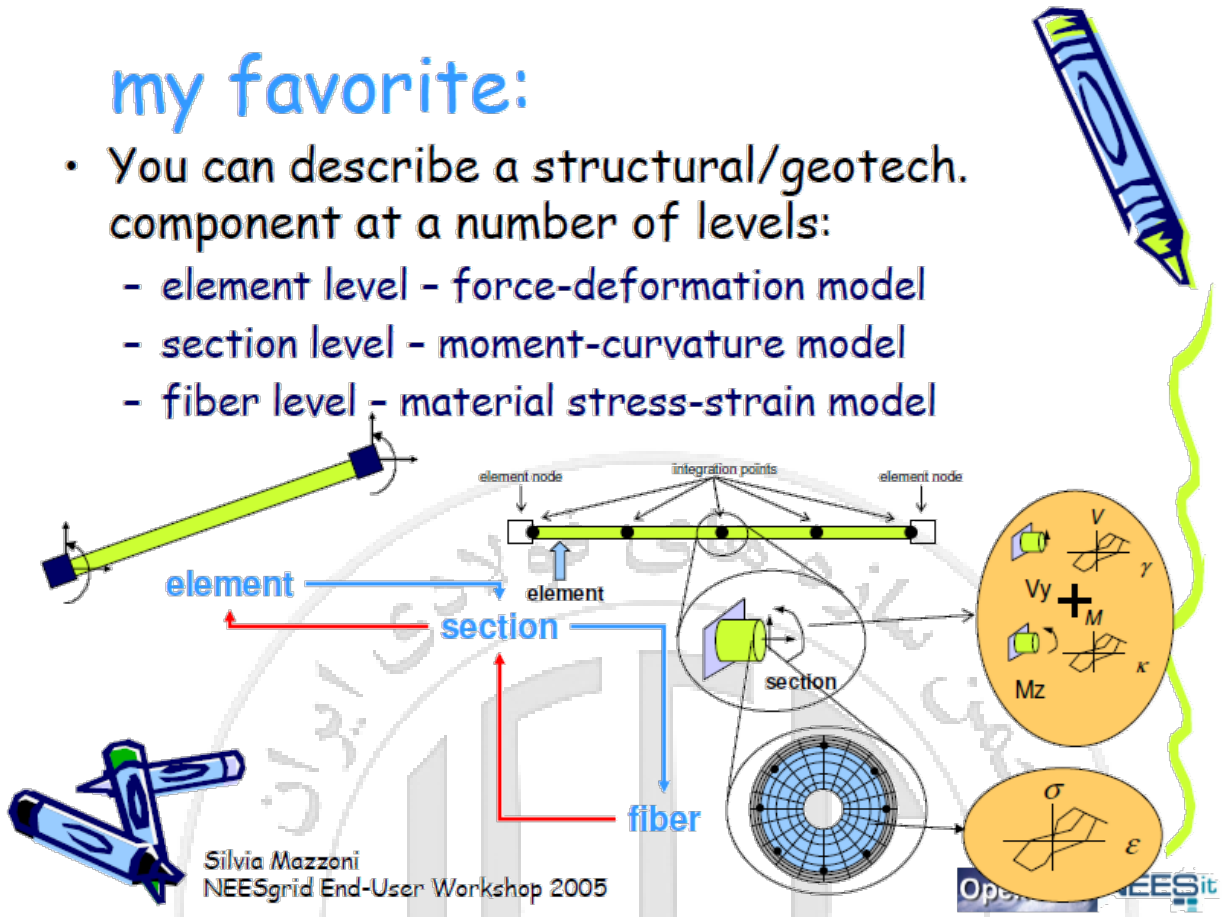
انجمن سازه‌های فولادی ایران



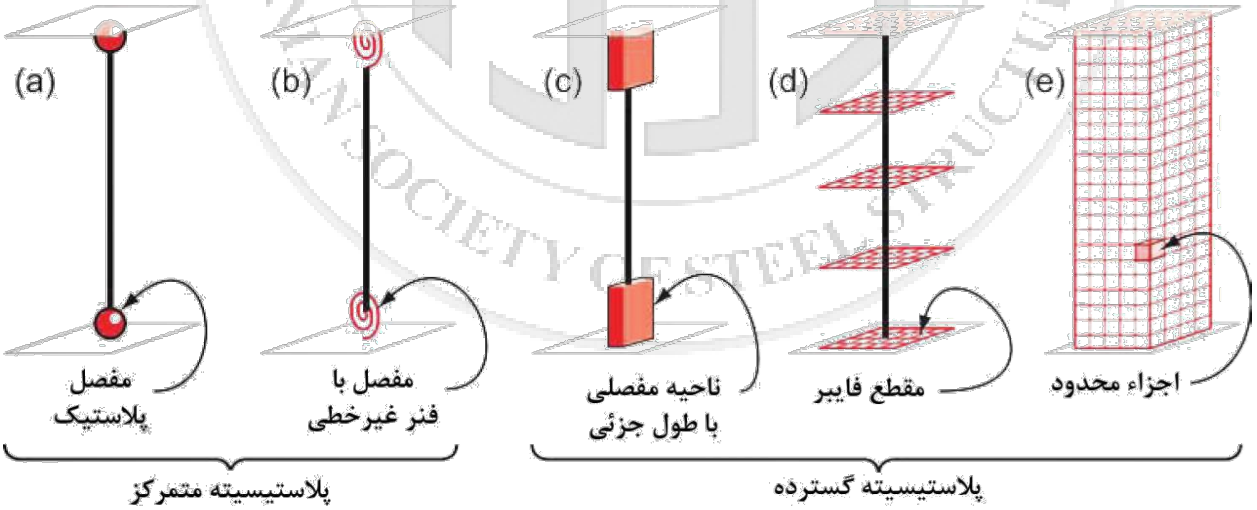
۴-۳- مدل‌های المان‌های غیرخطی

در نرم‌افزارهای تجاری همانند SAP2000 یا ETABS، المان‌ها به‌صورت کلی مدل می‌شوند و خروجی آن‌ها نیز، تنش-کرنش کل المان می‌باشد و نه اجزای سازنده آن‌ها، ولی در OpenSees حالت‌های دیگری از قبیل خروجی مقطع، و خروجی هر آرماتور نیز قابل دریافت است.

انجمن سازه‌های فولادی ایران



اگر بخواهیم در یک شکل این حالات را بررسی کنیم:



در SAP2000 یا ETABS از پلاستیسیته متمرکز استفاده می‌شود، در OpenSees به‌غیر از آن از پلاستیسیته گسترده که دقیق‌تر می‌باشد می‌توان استفاده کرد.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

۴-۴- مصالح موجود

در سایت http://OpenSees.berkeley.edu/wiki/index.php انواع مصالح موجود در آخرین نسخه OpenSees آورده شده است که به شرح زیر می‌باشد:

- Steel & Reinforcing-Steel Materials
  - Steel01 Material
  - Steel02 Material – Giuffré-Menegotto-Pinto Model with Isotropic Strain Hardening
  - Steel4 Material
  - Hysteretic Material
  - Reinforcing Steel Material
  - Dodd Restrepo
  - RambergOsgoodSteel Material
- Concrete Materials
  - Concrete01 Material – Zero Tensile Strength
  - Concrete02 Material – Linear Tension Softening
  - Concrete04 Material – Popovics Concrete Material
  - Concrete06 Material
  - Concrete07 – Chang & Mander's 1994 Concrete Model
  - Concrete01 Material With Stuff in the Cracks
  - ConfinedConcrete01 Material
- Some Standard Uniaxial Materials
  - Elastic Uniaxial Material
  - Elastic-Perfectly Plastic Material
  - Elastic-Perfectly Plastic Gap Material
  - Elastic-No Tension Material
  - Parallel Material
  - Series Material

ابتدا مصالح فولاد آمده است، در کارهای معمول از steel02 به‌خاطر smooth بودن نمودار تنش-کرنش آن استفاده می‌شود، برای تاثیر کمانش در بادبندها می‌توان از hysteretic استفاده کرد، همچنین برای مدل-سازی پارگی میلگرد از reinforced steel استفاده می‌شود.

در مصالح بتنی، اگر نیاز به مدل‌سازی ساده باشد از concrete01 که در کشش مقاومت ندارد استفاده می‌شود و برای کارهای مهم از concrete07 که دقیق‌ترین مدل حال حاضر است استفاده خواهد شد. همچنین اگر بخواهید محصورشدگی را مورد مطالعه قرار بدهید از confined Concrete می‌توان استفاده کرد.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

برای کارهای اولیه که نیاز به غیرخطی نداریم، یا مصالحی که نمیخواهیم وارد ناحیه غیرخطی شوند از elastic استفاده می‌شود، اگر نیاز به مدل‌سازی فاصله بین پیچ تا حلقه دور پیچ یا هر فاصله‌ای باشد که در یک راستا سخت و در راستای دیگر نیرویی وجود نداشته باشد از Gap استفاده می‌شود. اطلاعات بیشتر برای هر ماده را می‌توان در سایت جستجو کرد.

۴-۵- دستورات TCL

زبان برنامه نویسی tcl پیش‌نیاز کار با OpenSees می‌باشد، تمام کدهای نوشته شده باید براساس این زبان باشند. در ادامه چند دستور رایج ارائه خواهد شد:

۱- دستور set

برای اختصاص عدد به یک متغیر: set a 1

این دستور برای راحتی کار بسیار مهم است، مثلا اگر بخواهیم از یک متغیر در جاهای متفاوت استفاده کنیم، با یک‌بار تعریف کردن آن، از شلوغ بودن محیط راحت می‌شویم.

۲- دستور unset

برای خالی مردن متغیر از عدد اختصاص داده شده و آزاد کردن آن: unset a

مثلا در حلقه‌ها که از متغیر i استفاده می‌شود، میتوان آن را پس از اتمام حلقه unset کرد تا در جای دیگر استفاده شود.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

۳- دستور file mkdir

برای ساخت فولدر: file mkdir result/push

مثلا اگر بخواهیم هر تحلیل در فولدر متفاوتی انجام شود، می‌توان به‌جای ساخت دستی فولدر، از دستور بالا استفاده کرد.

۴- دستور source

برای اینکه فایل دیگری را وارد domain کند: Source mode1.tcl

در بعضی موارد که مدل بسیار زیاد می‌شود، برای کمتر پیچیده شدن قسمت‌های مختلف را جدا کرده و در فایل‌های مختلف وارد می‌کنیم، سپس با source کردن آن‌ها در یک فایل، آن‌ها را کنار هم قرار می‌دهیم.

۵- دستور expr

برای انجام اعمال ریاضی: expr 3.+2. یا expr $a+$b

همیشه سعی شود تمام اعداد دارای ممیز باشد وگرنه در محاسبات خطای زیادی وارد می‌شود، همچنین برای اینکه محاسبات انجام شود باید قبل و بعد دستور از براکت [ ] استفاده شود. دستور براکت باعث اول انجام شدن عملیات می‌شود، همانند پرانتز در معادلات ریاضی.

۶- دستور puts

برای نوشتن یک متن: Puts “Hello OpenSees class”

معمولا بعد از بعضی دستورات از puts استفاده می‌شود تا در صفحه برنامه OpenSees معلوم شود برنامه در چه مرحله‌ای می‌باشد. همچنین اگر جمله بعد puts دارای فاصله باشد، از سمیکالن “ ” استفاده می‌شود.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

۷- دستور incr

مقدار متغیر را افزایش می‌دهد: incr x 2

این دستور معمولا در حلقه کاربرد دارد.

۸- دستور for

برای نوشتن این دستور باید قدم‌های زیر را طی کنیم:

for *start test next body*

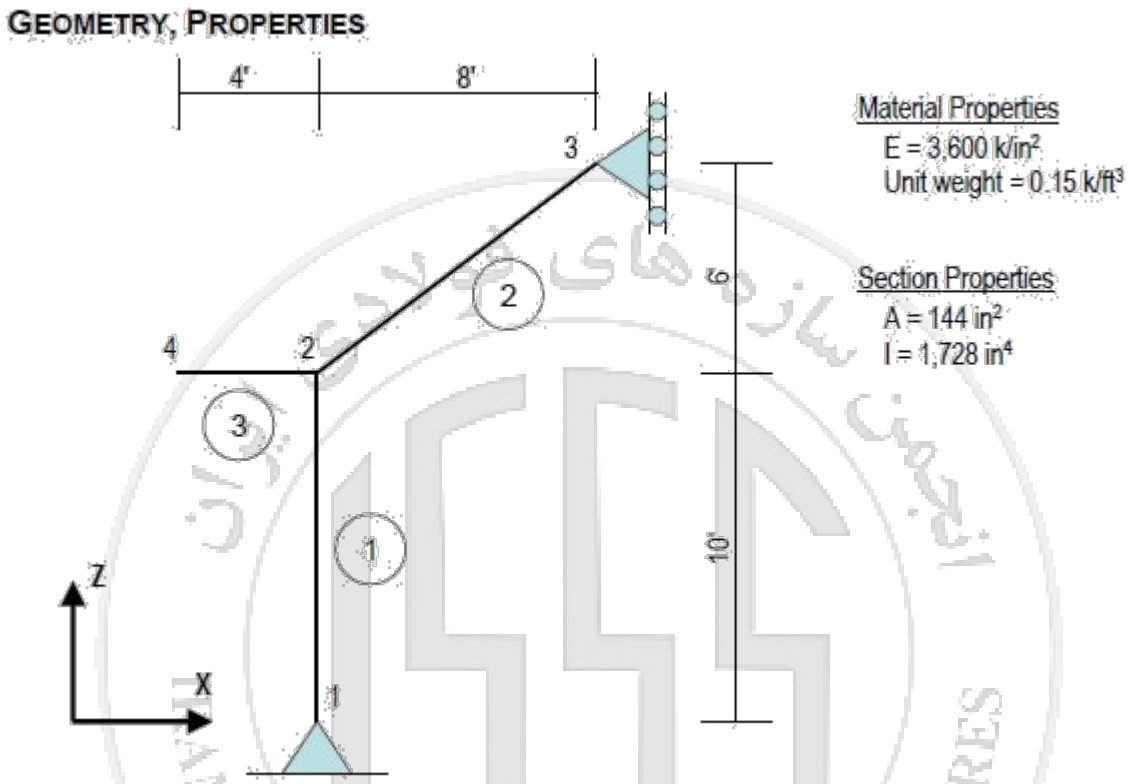
```
for {set x 0} {$x<10} {incr x 2} {
    puts “x is $x”
}
```

ابتدا متغیر افزایشی تعریف می‌شود که از چه عددی شروع شود، سپس مقدار ماکزیمم و گام افزایشی تعریف می‌شود. پس از آن دستوری که باید در هر گام حلقه انجام شود نوشته می‌شود.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

۵- جلسه پنجم

۵-۱- مثال آموزشی اول



قاب مورد بررسی با بارگذاری‌های مختلف تحلیل می‌شود و با جواب‌های دستی مقایسه می‌شود. ابتدا سیستم را دو بعدی تعریف کرده، فولدری که نتایج در آن آمده است و گره‌ها می‌سازیم، همچنین تکیه‌گاه را تعریف می‌کنیم:

اگر برنامه tcleditor را داشته باشید، دستورات رنگی ظاهر میشود.

دستور wipe برای پاک کردن حافظه برنامه هست تا با فایل‌های قبلی تداخل ایجاد نشود.

دستور ساخت مدل به شکل زیر آمده است:

انجمن سازه‌های فولادی ایران

Basic Model Builder

This command is used to construct the BasicBuilder object.

```
model BasicBuilder -ndm $ndm <-ndf $ndf>
```

$ndm	dimension of problem (1,2 or 3)
$ndf	number of degrees of freedom at node (optional) (default value depends on value of ndm: ndm=1 -> ndf=1 ndm=2 -> ndf=3 ndm=3 -> ndf=6)

مدل دو بعدی، سه درجه آزادی و مدل سه‌بعدی، شش درجه آزادی می‌باشد. البته می‌توان مدل سه‌بعدی را سه‌درجه آزادی نیز تعریف کرد، برای این کار قسمت داخل کروشه < > را نوشته و به‌جای $ndf عدد ۳ را وارد می‌کنیم، در دستورات OpenSees قسمت‌های داخل < > اختیاری هستند و در شرایط خاص عدد گذاری می‌شوند.

در ضمن ndm مخفف number of dimension و ndf مخفف number degree of freedom هست.

دستور ساخت گره‌ها به شکل زیر می‌باشد:

node Command

This command is used to construct a Node object. It assigns coordinates and ma
object.

```
node $nodeTag (ndm $coords) <-mass (ndf $MassValues)>
```

$nodeTag	integer tag identifying node
$coords	nodal coordinates (*ndm* (page 34) arguments)
$MassValues	nodal mass corresponding to each DOF (*ndf* (page 34) arguments) (optional)

انجمن سازه‌های فولادی ایران

ابتدا node نوشته می‌شود، سپس شماره گره، پس از آن مختصات x و y آن در حالت دوبعدی، مختصات x، y و z آن در حالت سه بعدی وارد می‌شود. می‌توان جرم هر درجه آزادی را نیز پس از آن وارد کرد، ولی با دستور mass نیز می‌توان در جای دیگری از مدل وارد کرد، تفاوتی نمی‌کند.

پس از تعریف گره‌ها، تکیه‌گاه‌ها مشخص می‌شود که از دستور زیر باید استفاده شود:

fix Command

This command is used to construct homogeneous single-point boundary constraints

```
fix $nodeTag (ndf $ConstrValues)
```

$nodeTag	integer tag identifying the node to be constrained
$ConstrValues	constraint type (0 or 1). *ndf* (page 29) values are specified, corresponding to the ndf degrees-of-freedom.

The two constraint types are:

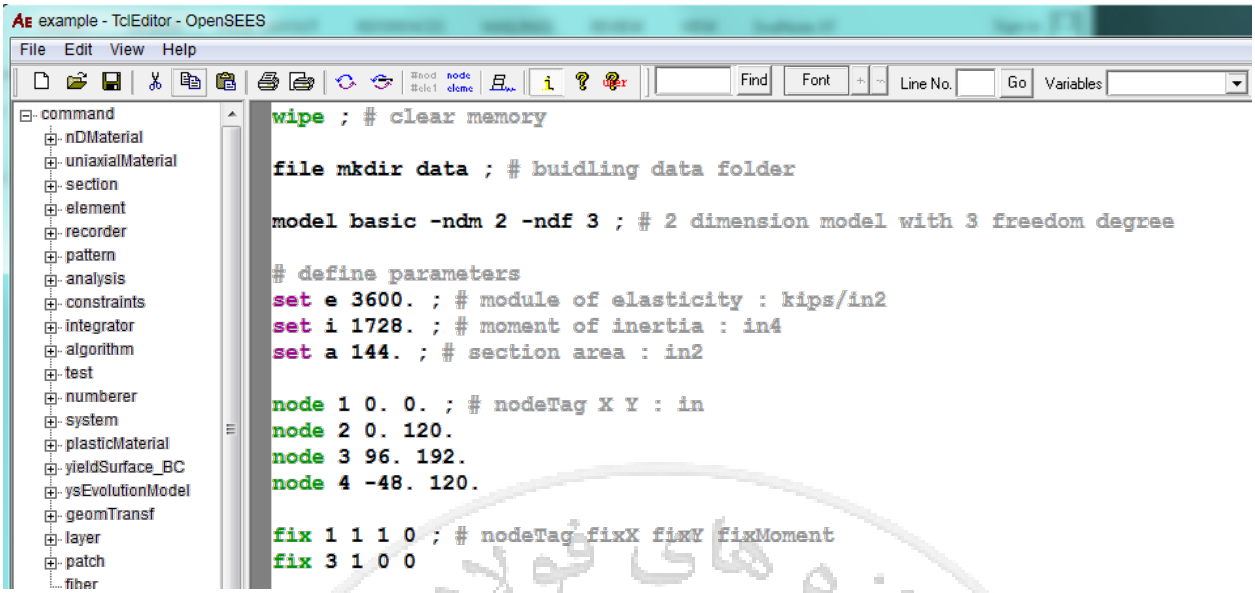
0 unconstrained

1 constrained

پس از آوردن دستور fix باید شماره گره‌ای که دارای تکیه‌گاه است وارد شود، سپس درجات آزادی بسته شده را ۱ و باز را ۰ قرار می‌دهیم، دقت شود باید تمام درجات آزادی در این دستور نوشته شود.

شکل زیر کاربرد این دستورات را در مثال نشان می‌دهد:

انجمن سازه‌های فولادی ایران



دستورات کدنویسی همانطور که در بالا نوشته شده باید در فایل متنی نوشته شود، می‌تاون پس از هر دستور از ; استفاده کنیم، این دستور به نرم‌افزار می‌گوید ادامه دستورات نوشته شده در همان خط را، مانند اینکه در خط بعدی نوشته شده باشد درنظر بگیرد. وگرنه اگر پس از هر دستوری بدون علامت ; با # توضیحات اضافه کنیم، خطا می‌دهد.

پس از معرفی گره‌ها و تکیه‌گاه‌ها، باید المان‌ها را تعریف کنیم، قبل از تعریف المان‌ها، اگر رفتار غیرخطی مدنظر باشد، باید مصالح غیرخطی یا در بعضی موارد مقاطع غیرخطی تعریف شود، ولی در این مثال چون رفتار الاستیک است به‌صورت زیر عمل می‌شود:

انجمن سازه‌های فولادی ایران

Elastic Beam Column Element

This command is used to construct an elasticBeamColumn element object. The arguments for the construction of an elastic beam-column element depend on the dimension of the problem, *ndm* (page 29):

For a two-dimensional problem:

```
element elasticBeamColumn $eleTag $iNode $jNode $A $E $Iz $transfTag
```

For a three-dimensional problem:

```
element elasticBeamColumn $eleTag $iNode $jNode $A $E $G $J $Iy $Iz
        $transfTag
```

$eleTag		unique element object tag
$iNode	$jNode	end nodes
$A		cross-sectional area of element
$E		Young's Modulus
$G		Shear Modulus
$J		torsional moment of inertia of cross section
$Iz		second moment of area about the local z-axis
$Iy		second moment of area about the local y-axis
$transfTag		identifier for previously-defined *coordinate-transformation* (page 280) (CrdTransf) object

در این دستور ابتدا شماره المان مشخص می‌شود، سپس شماره گره ابتدا و انتهای المان، مساحت، مدول الاستیسیته، ممان اینرسی اصلی و تبدیل مختصات محلی به کلی وارد می‌شود.

تبدیل مختصات محلی به کلی به سه روش قابل انجام است:

۱- روش خطی که در اجزا محدود آموزش داده می‌شود.

۲- روش P-Delta که دقیق‌تر می‌باشد و تغییرشکل‌ها را درنظر می‌گیرد.

۳- روش Corotational که دقیق‌ترین روش است و معمولاً برای المان‌هایی که تغییرشکل زیاد دارند استفاده می‌شود.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

geomTransf transfType? arg1? ...

The type of transformation created and the additional arguments required depends on the **transfType?** provided in the command.

The following contain information about transfType? and the args required for each of the available geometric transformation types:

- Linear Transformation
- PDelta Transformation
- Corotational Transformation

در این مثال به‌خاطر سادگی از حالت خطی استفاده می‌شود که البته نتایج تغییرمکان با نتایج SAP متفاوت خواهد شد:

Linear Transformation

This command is used to construct a linear coordinate transformation (LinearCrdTransf) object, which performs a linear geometric transformation of beam stiffness and resisting force from the basic system to the global-coordinate system.

For a two-dimensional problem:

```
geomTransf Linear $transfTag <-jntOffset $dXi $dYi $dXj $dYj>
```

For a three-dimensional problem:

```
geomTransf Linear $transfTag $vecxzX $vecxzY $vecxzZ <-jntOffset $dXi $dYi
        $dZi $dXj $dYj $dZj>
```

$transfTag unique identifier for CrdTransf object

برای حالت سه بعدی، باید محورهای محلی المان نسبت به محورهای کلی وارد شود که در جلسات بعد گفته می‌شود.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

```
set transftag 1
geomTransf Linear $transftag ; # defining transformation to linear

element elasticBeamColumn 1 2 1 $a $e $i $transftag
# elementTag firstNode secondNode Area    module_of_elasticity transformation
element elasticBeamColumn 2 2 3 $a $e $i $transftag
element elasticBeamColumn 3 4 2 $a $e $i $transftag
```

برای گره اول و دوم هر المان باید سعی شود، ستون‌ها از پایین به بالا و تیرها از چپ به راست کشیده شوند وگرنه در قسمت بارگذاری دچار مشکل می‌شود.

پس از تعریف المان‌ها، خروجی برنامه تعریف می‌شود، اگر در این قسمت خروجی خاصی آورده نشود، باید دوباره تحلیل انجام شود که در مدل‌های بزرگ وقت زیادی تلف می‌شود.

Node Recorder

The Node type records the displacement, velocity, acceleration and incremental displacement at the nodes (translational & rotational)

```
recorder Node <-file $fileName> <-xml $fileName> <-time> <-node ($node1
        $node2 ...)>  <-nodeRange $startNode $endNode> <-region
        $RegionTag> <-node all> -dof ($dof1 $dof2 ...) $respType
```

-file	output recorder data to a file
-xml	output recorder data + xml metadata labelling each column of data (-file and -xml cannot be specified symultaneously)
$fileName	file where results are stored. Each line of the file contains the result for a committed state of the domain (optional, default: screen output)
-time	this argument will place the pseudo time of the as the first entry in the line. (optional, default: omitted)
$node1 $node2 ...	tags nodes where response is being recorded -- select nodes in domain (optional, default: all)

خروجی گره‌ها به‌صورت بالا تعریف می‌شود، می‌توان آن را به‌صورت فایل متنی که فقط شامل خروجی است به‌دست آورد یا با فرمت xml که اطلاعاتی از مدل نیز در آن آورده شده است. پارامتر time برای تحلیل تاریخچه زمانی، زمان انجام تحلیل است که هر خروجی در چه زمانی آمده است، برای تحلیل استاتیکی،

انجمن سازه‌های فولادی ایران

ضریبی است که در بار تعریف شده ضریب می‌شود تا آن خروجی را بدهد. مثلا اگر بار را 1 kN تعریف کرده باشید، و گره مورد نظر ۲ سانتی متر جلو رفته باشد، عبارت time ضریبی را نشان می‌دهد که باید در 1 kN ضرب شود تا ۲ سانتی متر گره حرکت کند. در تحلیل پوش‌اُور و تاریخچه زمانی کاربرد بیشتری دارد. سپس باید گره‌هایی که می‌خواهیم خروجی آن‌ها در فایل بیاید تعریف می‌کنیم، که معمولا برای هر گره فایل جدا ساخته می‌شود. پس از آن درجه آزادی‌ای که برای آن خروجی می‌خواهیم تعریف می‌کنیم، می‌توان تمام درجات آزادی را نیز وارد کرد ولی اگر نیاز نباشد فقط باعث پیچیدگی می‌شود. و در آخر خروجی مورد نظر را وارد می‌کنیم، مثلا تغییر مکان گره یا نیروی آن گره که در زیر حالات مختلف آن آورده شده است:

$respType a string indicating response required. Response types are given in table below.

disp	displacement*
vel	velocity*
accel	acceleration*
incrDisp	incremental displacement
"eigen i"	eigenvector for mode i
reaction	nodal reaction
rayleighForces	damping forces

انجمن سازه‌های فولادی ایران

خروجی یک المان به‌صورت‌های زیر تعریف می‌شود:

The command to create an element recorder is:

recorder Element <-file $fileName> <-xml $fileName> <-binary $fileName> <-precision $nSD> <-time> <-closeOnWrite> <-dT $deltaT> <-ele ($ele1 $ele2 ...)> <-eleRange $startEle $endEle> <-region $regTag> $arg1 $arg2 ...

	name of file to which output is sent.
$fileName	file output is either in xml format (-xml option), textual (-file option) or binary (-binary option)
$nSD	number of significant digits (optional, default is 6)
-time	(optional using this option places domain time in first entry of each data line, default is to have time ommitted)
-closeOnWrite	optional. using this option will instruct the recorder to invoke a close on the data handler after every timestep. If this is a file it will close the file on every step and then re-open it for the next step. Note, this greatly slows the execution time, but is useful if you need to monitor the data during the analysis.
$deltaT	time interval for recording. will record when next step is $deltaT greater than last recorder step. (optional, default: records at every time step)
$ele1 $ele2 ..	tags of elements whose response is being recorded -- selected elements in domain (optional, default: omitted)
$startEle $endEle ..	tag for start and end elements whose response is being recorded -- range of selected elements in domain (optional, default: omitted)
$regTag	previously-defined tag of region of elements whose response is being recorded -- region of elements in domain (optional)
$arg1 $arg2 ...	arguments which are passed to the setResponse() element method

فرق اساسی این دستور با دستور node recorder در خروجی‌های برنامه است، هر نوع المانی همانند elasticBeamColumn یا zeroLength یا forceBeamColumn یک خروجی خاصی دارند که در قسمت $arg1 وارد می‌شود و باید از OpenSees Wiki پیدا کنید.

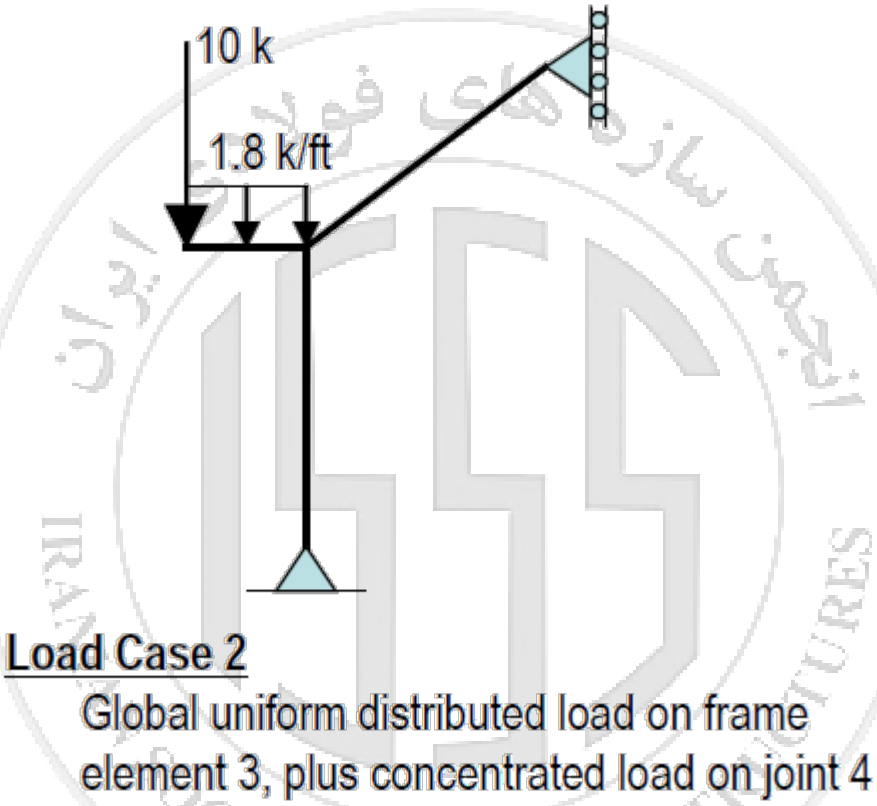
```
recorder Node    -file data/node3disp.out -time -node 3 -dof 2 disp
# node 3 displacement in Y direction with
# scale factor that multiply to current loading
# column 1 : scale factor ; column 2 : displacement in Y direction in inch
recorder Node    -file data/node1react.out -time -node 1 -dof 1 2 3 reaction
# node 1 reaction in X and Y and Moment directions
recorder Element -file data/element1.out    -time -ele 1 globalForce
# element 1 forces in global directions (X Y Mz) for iNode and Jnode of element
# and scale factor

puts "model build!"
```


انجمن سازه‌های فولادی ایران

۶- جلسه ششم

۶-۱- بارگذاری اول (خطی و نقطه‌ای)

برای مثال جلسه قبل از چند بارگذاری استفاده می‌شود، که اولی به شکل زیر می‌باشد:



برای این حالت ما باید یک بار گسترده به تیر شماره ۳ و یک بار نقطه ای به گره شماره ۴ بدهیم.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

در OpenSees چندین حالت تعریف بار داریم:

pattern patternType? arg1? ...

The type of pattern created and the additional arguments required depends on the **patternType?** provided in the command. The following contain information about patternType? and the additional args required for each of the available pattern types:

1. Plain Pattern
2. Uniform Excitation Pattern
3. Multi-Support Excitation Pattern
4. DRM Load Pattern

حالت اول برای بار استاتیکی تا تغییرمکان گره‌ها استفاده می‌شود، حالت دوم برای بارهای دینامیکی مثل زلزله یا انفجار مورد استفاده قرار می‌گیرد، حالت سوم تحریک چند تکیه‌گاهی و حالت چهارم هنوز در دست توسعه است.

در این بارگذاری از حالت استاتیکی کمک می‌گیریم:

plain Pattern

This command is used to construct an ordinary *LoadPattern* (page 294) object in the *Domain* (page 30).

```
pattern Plain $patternTag (TimeSeriesType arguments) {
        load (load-command arguments)
        sp (sp-command arguments)
        eleLoad (eleLoad-command arguments)
}
```

در این دستور ابتدا شماره‌ای برای این بارگذاری انتخاب می‌شود، سپس نحوه وارد آمدن آن در طول زمان خواسته می‌شود که خود به صورت زیر دسته‌بندی می‌شود:

انجمن سازه‌های فولادی ایران

timeSeries seriesType? arg1? ...

The type of time series created and the additional arguments required depends on the **seriesType?** provided in the command.

The following contain information about seriesType? and the args required for each of the available time series types:

- Constant TimeSeries
- Linear TimeSeries
- Trigonometric TimeSeries
- Triangular TimeSeries
- Rectangular TimeSeries
- Pulse TimeSeries
- Path TimeSeries
- PeerMotion
- PeerNGAMotion

حالت constant مثل یک ضربه می‌ماند، در لحظه صفر کل بار وارد می‌شود.

حالت linear برای حالت استاتیکی انتخاب می‌شود، چون بار به تدریج وارد می‌شود.

حالت Path معمولا برای بارهایی است که مانند زلزله به‌صورت تصادفی وارد می‌شوند و لازم است نحوه وارد آمدن آن‌ها در زمان را از فایل خارجی نرم‌افزار بخواند.

حالت PeerMotion و PeerNGA مخصوص زلزله‌هایی است که از سایت PEER دانلود می‌شوند که البته از حالت Path نیز قابل خواندن می‌باشد.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

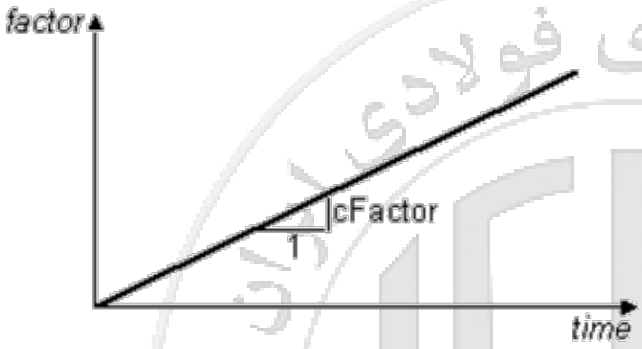
حالت linear به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

This command is used to construct a TimeSeries object in which the load factor applied is linearly proportional to the time in the domain, i.e.

$\lambda = f(t) = cFactor * t$

timeSeries Linear $tag <-factor $cFactor>

$tag	unique tag among TimeSeries objects.
$cFactor	the linear factor (optional, default=1.0)



پس از تعریف بار در طول زمان، باید بار را تعریف کنیم:

۱- بار گرهی با دستور زیر قابل تعریف است:

load $nodeTag (ndf $LoadValues)

$nodeTag	tag of node to which load is applied.
$loadvalues	ndf reference load values.

ابتدا شماره گره، سپس بار وارده در هر درجه آزادی که دارای واحد kips در این مثال است نوشته می‌شود.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

۲- بار روی المان:

The element loads are only applied to line elements. Continuum elements do not accept element loads. When NDM=2, the beam column elements all accept eleLoad commands of the following form:

```
eleLoad -ele $eleTag1 <$eleTag2 ....> -type -beamUniform $Wy <$Wx>
```

```
eleLoad -range $eleTag1 $eleTag2 -type -beamPoint $Py $xL <$Px>
```

When NDM=3, the beam column elements all accept eleLoad commands of the following form:

```
eleLoad -ele $eleTag1 <$eleTag2 ....> -type -beamUniform $Wy $Wz <$Wx>
```

```
eleLoad -range $eleTag1 $eleTag2 -type -beamPoint $Py $Pz $xL <$Px>
```

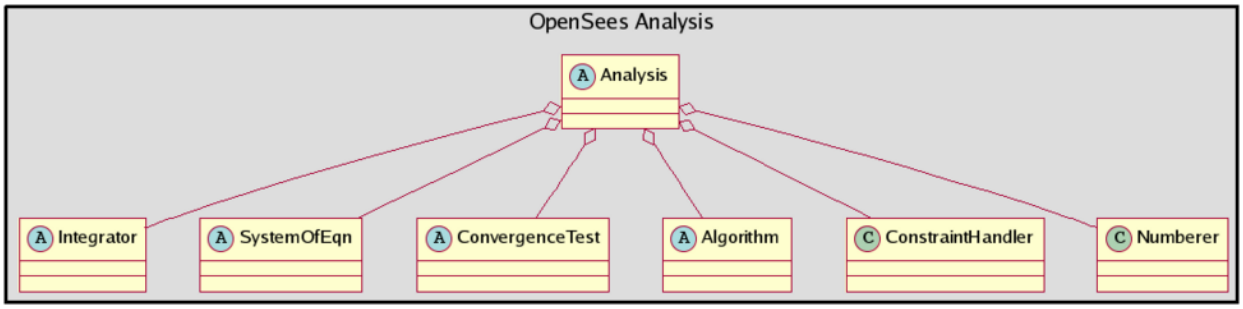
ابتدا شماره المان، سپس بار در جهت قائم را می‌توان تعریف کرد که واحدش در این مثال kips/in است. مقدار بار قائم المان به جهت المان ربط دارد، سعی شود المان از چپ به راست کشیده شود وگرنه جواب اشتباه می‌باشد.

```
pattern Plain 1 Linear { ; # loading number 1 with linear in time

eleLoad -ele 3 -type -beamUniform [expr -1.8/12.]
# element number 3 with uniform load in "kips/in"
load 4      0.    -10.   0.
# node number 4 with load in Y direction in "kips"
}
```

انجمن سازه‌های فولادی ایران

۶-۲- موتور تحلیل

موتور تحلیل OpenSees دارای زیرمجموعه زیر است:



که توضیح هرکدام در زیر آمده است:

1. ConstraintHandler -- determines how the constraint equations are enforced in the analysis -- how it handles the boundary conditions/imposed displacements
2. DOF_Numberer -- determines the mapping between equation numbers and degrees-of-freedom
3. Integrator -- determines the predictive step for time t+dt
4. SolutionAlgorithm -- determines the sequence of steps taken to solve the non-linear equation at the current time step
5. SystemOfEqn/Solver -- within the solution algorithm, it specifies how to store and solve the system of equations in the analysis
6. Convergence Test -- determines when convergence has been achieved.

اول از همه Constraints را داریم. که رابط بین درجات آزادی می‌باشد. چهار حالت دارد:

In This Chapter

Plain Constraints 318
Penalty Method 318
Lagrange Multipliers 319
Transformation Method 320

۱- درجه اول از Plain می‌توانید استفاده کنید.

۲- ولی با وجود تحریکات تکیه‌گاهی در تحلیل باید از Lagrange استفاده کنید.

۳- در تحلیل‌های بزرگ باید از Transformation استفاده کنید.

مفهوم کلی اینست که این دستورات ماتریس سختی می سازند و با دستور [P]=[K]*[u] مقدار تغییر مکان را پیدا می کنند.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

RCM نحوه شماره‌گذاری را مشخص می‌کند، همانطوری که در تحلیل ۲ گفته شده، بهترین حالت نام گذاری اینست که گره‌های دو سر المان دارای اختلاف شماره کم باشند. یا در اجزای محدود برای assemble کردن ماتریس سختی باید ماتریس‌های هر المان را بر اساس شماره گره‌های نظیر به هم وصل کنیم، پس اختلاف کمتر گره‌ها باعث راحتی کار و سرعت بیشتر می‌شود. به صورت خلاصه plain بر اساس همان نام‌گذاری شما پیش می رود و RCM نام گذاری بهینه را در domain انجام می دهد تا سرعت کار بیشتر شود و بعد از تحلیل شماره کره را به حالت معرفی شده بر می گرداند و نتایج را چاپ می کند.

In This Chapter

Plain Numberer 321
RCM Numberer 322

زیر مجموعه System Command برای ساخت حل‌کننده خطی معادلات تحلیل می‌باشد و دارای زیرمجموعه‌های زیر می‌باشد:

system systemType? arg1? ...

The type of LinearSOE created and the additional arguments required depends on the **systemType?** provided in the command.

The following contain information about systemType? and the args required for each of the available aystem types:

1. BandGeneral SOE
2. BandSPD SOE
3. ProfileSPD SOE
4. SuperLU SOE
5. UmfPack SOE
6. FullGeneral
7. SparseSYM SOE
8. Mumps
9. Cusp

در سیستم‌های کوچک می‌توان از BandGeneral و در سازه‌های بزرگ از UmfPack استفاده کرد، خطاهای موجود در برنامه که با تغییر موتور تحلیل قابل حل هستند معمولا به این قسمت مربوط نمی‌شوند.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

۷- جلسه هفتم

۷-۱- ادامه دستورات موتور تحلیل

یکی از دستورات خیلی مهم، دستور همگرایی می‌باشد، که اجازه می‌دهد تحلیل ادامه پیدا کند یا متوقف شود:

test testType? arg1? ...

The type of convergence test created and the additional arguments required depends on the **testType?** provided in the command.

The following contain information about testType? and the args required for each of the available test types:

test Command Equation

1. Norm Unbalance Test
2. Norm Displacement Increment Test
3. Energy Increment Test
4. Relative Norm Unbalance Test
5. Relative Norm Displacement Increment Test
6. Total Relative Norm Displacement Increment Test
7. Relative Energy Increment Test
8. Fixed Number of Iterations

در دستور تست اول، NormUnbalanceTest از ماتریس زیر استفاده می‌کند تا اگر اختلاف دو جواب کمتر از مقدار معرفی شده باشد، گام همگرا معرفی شود و گام بعدی شروع شود:

THEORY:

If the system of equations formed by the integrator is:

$$K\Delta U^i = R(U^i)$$

This integrator is testing:

$$\| R(U^i) \| < \text{tol}$$

و این دستور به صورت زیر نوشته می‌شود:

انجمن سازه‌های فولادی ایران

Norm Displacement Increment Test

This command is used to construct a CTestNormDispIncr object which tests positive force convergence if the 2-norm of the x vector (the displacement increment) in the *LinearSOE* (page 323) object is less than the specified tolerance.

test NormDispIncr $tol $maxNumIter <$printFlag>

$tol	convergence tolerance
$maxNumIter	maximum number of iterations that will be performed before "failure to converge" is returned
$printFlag	flag used to print information on convergence (optional) **0** no print output (default) **1** print information on each step **2** print information when convergence has been achieved **4** print norm, dU and dR vectors **5** at convergence failure, carry on, print error message, but do not stop analysis

مقدار تلورانس 1.e-8 و تعداد تکرار معمولا از ۱۰ تا ۲۰۰ متغیر است. البته می‌توان در بعضی تحلیلها از ۱۰۰۰ تکرار نیز بهره‌جست تا به جواب رسید. همچنین مقدار تکرار معمولا بستگی به الگوریتم حل مسئله دارد. که در حالت Modified Newton نیاز به بیشترین مقدار تکرار پیدا می کنید. معمولا از Norm Displacement Increment برای پروژه‌ها استفاده می‌شود، ولی بر اساس سازه مورد نظر، اگر تحلیل به همگرایی نرسید، می توانید از روش انرژی یا Energy Increment استفاده کنید.

دستور بسیار مهم دیگر الگوریتم‌های حل مسئله می‌باشند که همچون دستور همگرایی، می‌تواند باعث حل نشدن یک مسئله درست شود، پس انتخاب زیرمجموعه درست حائز اهمیت می‌باشد. الگوریتم‌های موجود در OpenSees به شرح زیر است:

انجمن سازه‌های فولادی ایران

algorithm algorithmType? arg1? ...

The type of solution algorithm created and the additional arguments required depends on the **algorithmType?** provided in the command.

The following contain information about algorithmType? and the args required for each of the available algorithm types:

- Linear Algorithm
- Newton Algorithm
- Newton with Line Search Algorithm
- Modified Newton Algorithm
- Krylov-Newton Algorithm
- Secant Newton Algorithm
- BFGS Algorithm
- Broyden Algorithm

الگوریتم‌های مختلف را در درس محاسبات عددی دیده‌ایم، نکته ای که باید اشاره کنم اینست که برای مسائل کوچک از Newton استفاده می کنیم، و برای اینکه سازه را مثلا در تحلیل پوش‌اُور تا لحظه خرابی تحلیل کنیم بهتر است از Krylov-Newton استفاده کنیم. نکته دیگر اضافه کردن دستور -initial به ادامه دستور الگوریتم می‌باشد، با این کار برای پیدا کردن جواب همیشه از شیب اولیه استفاده می کند.

الگوریتم Newton به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

algorithm Newton <-initial> <-initialThenCurrent>

-initial	optional flag to indicate to use initial stiffness iterations
-initialThenCurrent	optional flag to indicate to use initial stiffness on first step, then use current stiffness for subsequent steps

تئوری آن و بقیه روش‌ها را می‌توانید در سایت OpenSees Wiki مشاهده کنید.

دستور دیگر که بیشتر به نحوه تحلیل برمی‌گردد، دستورات انتگرال‌گیری می‌باشد که مشخص می‌کند، تحلیل استاتیکی یا دینامیکی، همینطور نیرویی یا تغییرمکانی باشد، که در زیر آورده شده است:

انجمن سازه‌های فولادی ایران

The type of integrator used in the analysis is dependent on whether it is a static analysis or transient analysis.

Static Integrators:

- Load Control
- Displacement Control
- Minimum Unbalanced Displacement Norm
- Arc-Length Control

Transient Integrators:

- Central Difference
- Newmark Method
- Hilber-Hughes-Taylor Method
- Generalized Alpha Method
- TRBDF2

همیشه برای تحلیل بارهای ثقلی یا همین مثال درحال حاضر، از Load Control استفاده می‌شود، برای تحلیل استاتیکی غیرخطی یا پوش‌اُور از Displacement Control و برای تحلیل دینامیکی غیرخطی یا تاریخچه زمانی از Newmark Method استفاده می‌شود.

دستور Load Control به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

This command is used to construct a LoadControl integrator object.

integrator LoadControl $lambda <$numIter $minLambda $maxLambda>

$lambda	the load factor increment λ
$numIter	the number of iterations the user would like to occur in the solution algorithm. Optional, default = 1.0.
$minLambda	the min stepsize the user will allow. optional, defualt = $\lambda_{min} = \lambda$
$maxLambda	the max stepsize the user will allow. optional, default = $\lambda_{max} = \lambda$

مقدار lambda تقسیم بندی بار وارده را مشخص می‌کند، مثلا اگر بخواهید بارگذاری در ۱۰ مرحله انجام شود، باید مقدار آن را ۱۰ قرار دهید. اگر خواستید در یک مرحله انجام شود ولی اگر به همگرایی نرسید به‌صورت هوشمند بار را تقسیم بندی کنید، باید minLambda و maxLambda را مشخص کنید که معمولا maxLambda برابر lambda می‌باشد، سپس تعداد سعی و خطای مجاز برای اینکه از بین این حداقل و حداکثر عددی را پیدا کند تا به همگرایی برسد را مشخص می‌کنید.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

سپس باید مشخص کنید تحلیلتان استاتیکی یا دینامیکی می‌باشد، این دستور ارتباط مستفیم با دستور انتگرال‌گیری دارد و باید باهم هماهنگ باشند:

This command is used to construct the Analysis object, which defines what type of analysis is to be performed.

analysis analysisType?

$analysisType	char string identifying type of analysis object to be constructed. Currently 3 valid options: 1. **Static** - for static analysis 2. **Transient** - for transient analysis with constant time step 3. **VariableTransient** - for transient analysis with variable time step

که در این مثال از حالت استاتیکی استفاده می‌شود.

دستور آخر انجام تحلیل می‌باشد:

This command is used to perform the analysis.

analyze $numIncr <$dt> <$dtMin $dtMax $Jd>

$numIncr	number of analysis steps to perform.
$dt	time-step increment. Required if transient or variable transient analysis
$dtMin $dtMax	minimum and maximum time steps. Required if a variable time step transient analysis was specified.
$Jd	number of iterations user would like performed at each step. The variable transient analysis will change current time step if last analysis step took more or less iterations than this to converge. Required if a variable time step transient analysis was specified.

RETURNS:

0 if successful

<0 if NOT successful

مقدار numIncr یعنی تعداد انجام تحلیل، که مثلا اگر در تحلیل استاتیکی ثقلی آن را ۲ بگذارید، یعنی می خواهید بار ثقلی دو بار پشت هم به سازه اعمال شود پس باید در قسمت انتگرال‌گیری هم lambda را ۲

انجمن سازه‌های فولادی ایران

بگذاریم تا بار تقسیم بر ۲ شود. به‌طور خلاصه در تحلیل استاتیکی قفلی مقدار آن را lambda در قسمت انتگرال‌گیر یکسان است.

مقدار dt برای تحلیل‌های دینامیکی می‌باشد و گام زمانی را مشخص می کند، مقادیر بعدی در تحلیل variable transient به کار می رود و مقادیر حداقل و حداکثر گام زمانی و Jd تعداد تکرار هر گام را مشخص می کند.

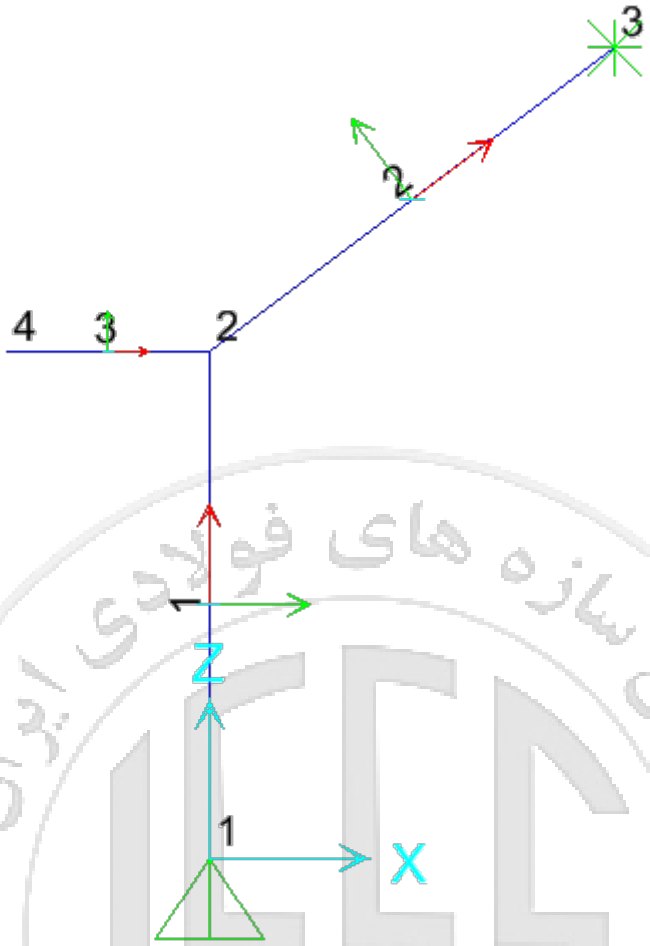
شما می‌توانید با نوشتن برنامه ای که بگوید اگر جواب analyze برابر ۰ شد، "درست" و اگر نشد، مثلاً نوع انتگرال گیر را عوض کرده و در نتیجه موتور تحلیل متغیر و هوشمند بسازید که من در جلسات آخر نمونه آن را در اختیارتان قرار می‌دهم.

۲-۷- تحلیل استاتیکی (حل بارگذاری اول)

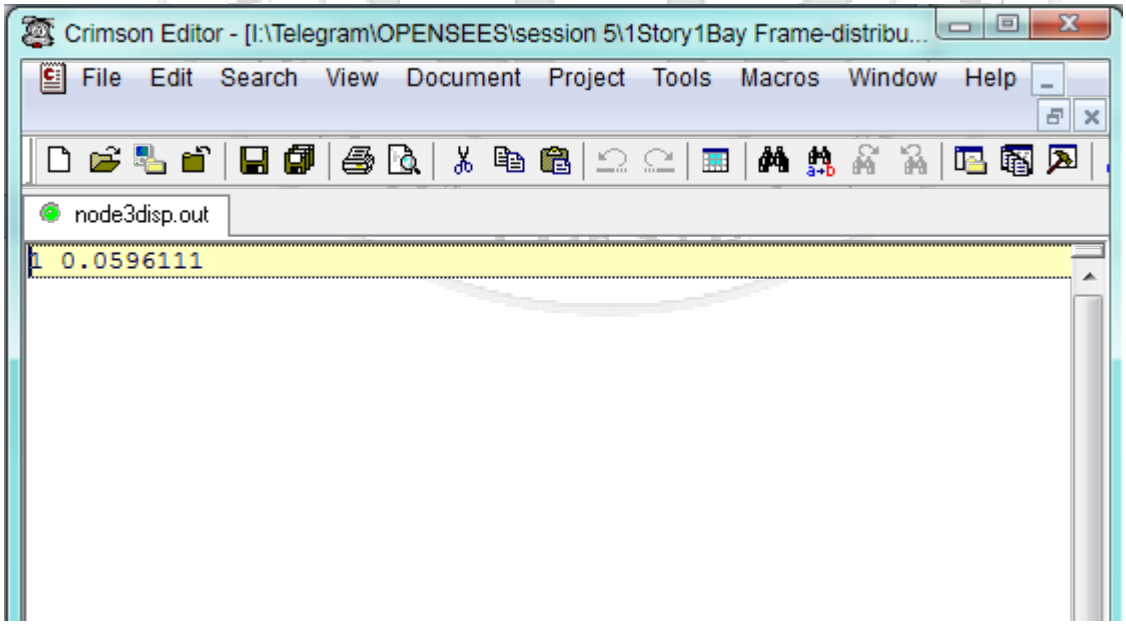
اگر موتور تحلیل زیر را به مدل اضافه کنیم و تحلیل کنیم به جواب‌های زیر می‌رسیم:

```
constraints Plain
numberer Plain
system BandGeneral
test NormDispIncr 1.e-6 60 ; # telorance is 1.e-6
                             # limit max step is 60
algorithm ModifiedNewton
integrator LoadControl 1 ; # all loads applied at once
analysis Static
analyze 1 ; # analyze in one step
```

انجمن سازه‌های فولادی ایران



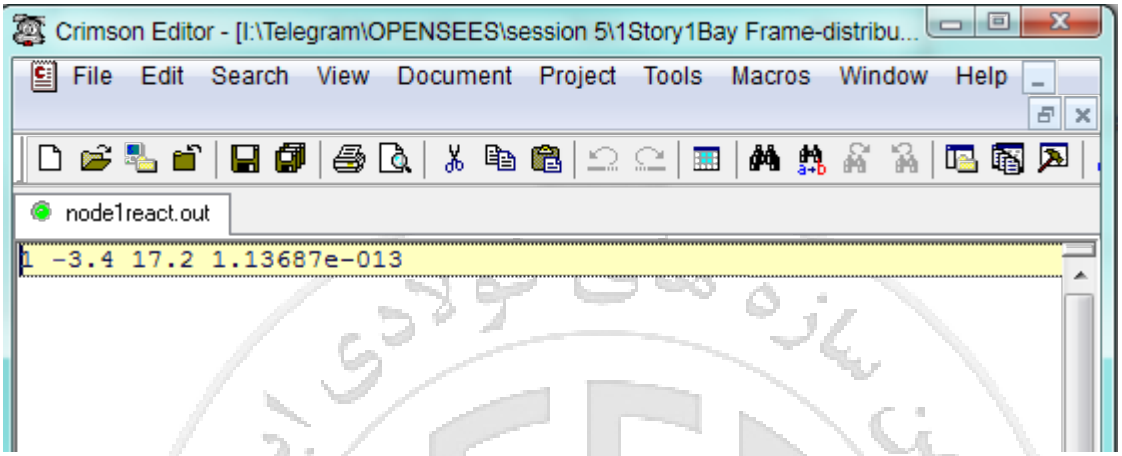
جابه‌جایی نقطه سوم در OpenSees به‌صورت زیر به‌دست آمده است:



انجمن سازه‌های فولادی ایران

عدد ۱ همان مقدار time– آمده در دستور recorder هست، یعنی کل بار وارد شده است، مقدار 0.05961 به اینچ، جابه‌جایی در راستای قائم گره ۳ می‌باشد.

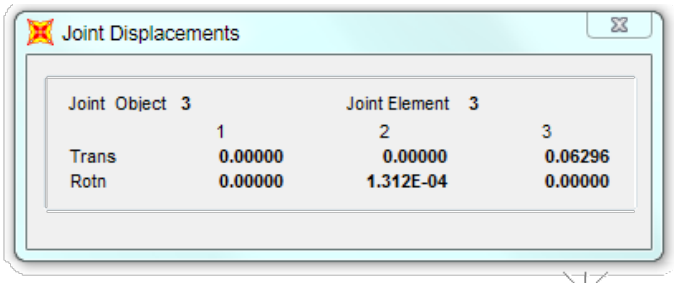
واکنش‌های تکیه‌گاهی گره ۱ به‌صورت زیر است:

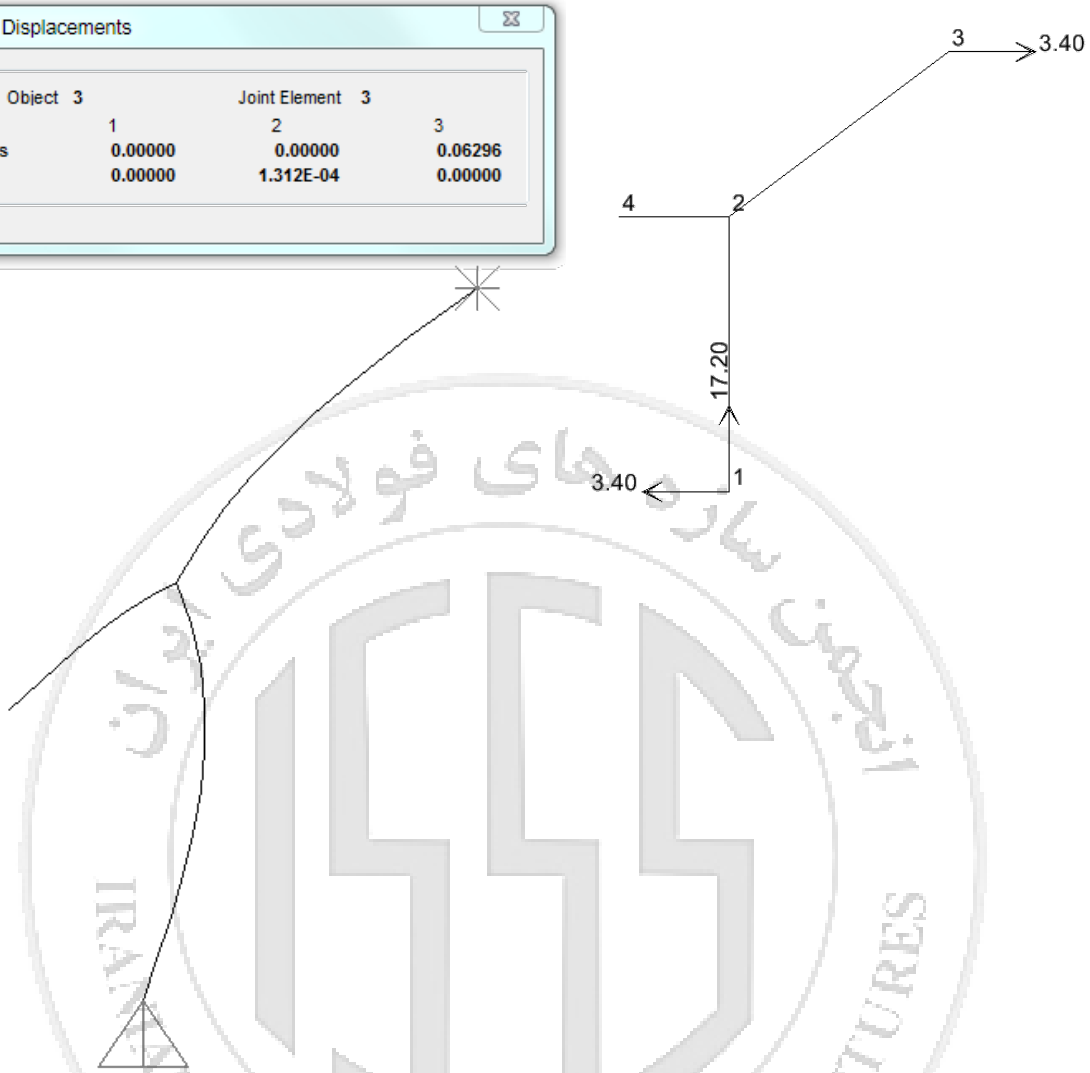


عدد اول time، عدد دوم واکنش در جهت x، عدد سوم واکنش در جهت y و عدد چهارم لنگر مقاوم تکیه‌گاه است که چون مفصلی است عدد بسیار کوچکی است.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

تغییرمکان گره ۳ و اکنش‌های تکیه‌گاهی در SAP به‌صورت زیر می‌باشد:



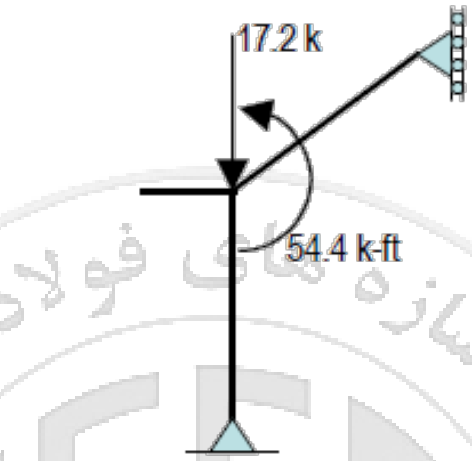


واکنش تکیه‌گاهی دقیق ولی تغییرمکان مقدار کمی خطا دارد.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

۷-۳- بارگذاری دوم (نیرو و لنگر نقطه‌ای)

در این حالت از بارگذاری زیر استفاده می‌کنیم:

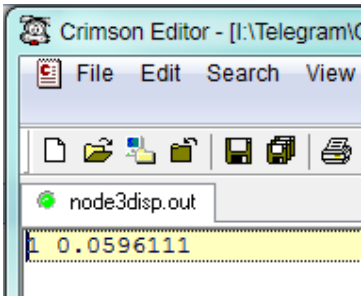


Load Case 3
Global joint force and joint moment at joint 2

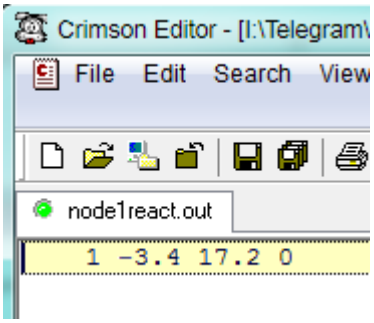
بارگذاری در برنامه به‌صورت زیر تغییر پیدا می‌کند:

```
pattern Plain 2 Linear {

load 2 0 -17.2 [expr 54.4*12.]
# node 2 has Point Load in Y direction and moment
}
```

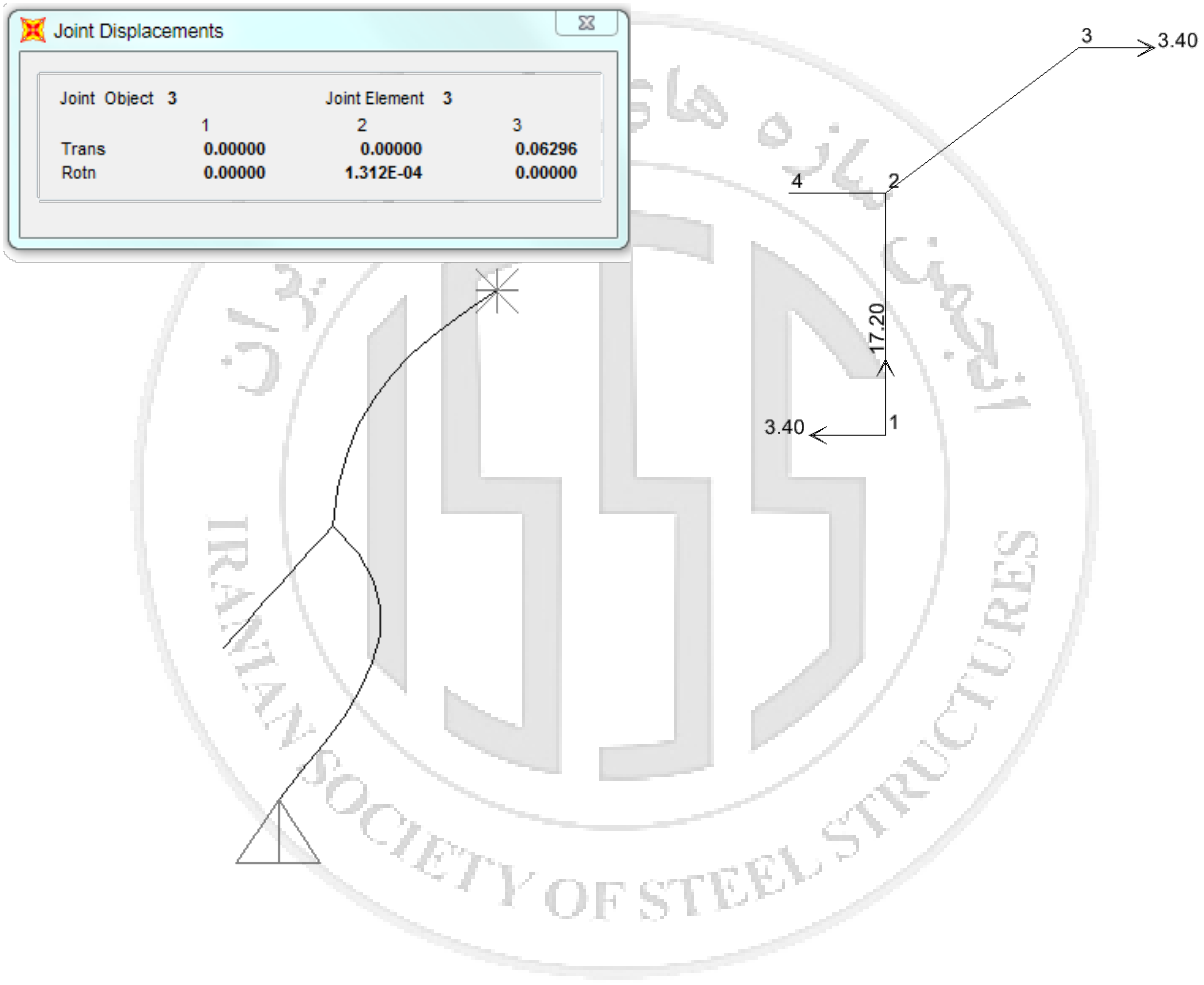
نتایج تغییرمکان گره ۳ و واکنش‌های تکیه‌گاهی گره ۱ همانند مثال قبل به‌دست آمده و به شکل زیر است:



انجمن سازه‌های فولادی ایران



نتایج SAP به‌صورت زیر می‌باشد:



انجمن سازه‌های فولادی ایران

جلسه هشتم

۷-۴- ساخت مقاطع Fiber

یکی از خصوصیات نرم‌افزار OpenSees که آن را بارز می‌کند، توانایی Fiber مدل کردن می‌باشد،

برای اینکار به‌صورت زیر پیش می‌رویم:

section secType? secTag? arg1? ...

The type of section created and the additional arguments required depends on the **secType?** provided in the command.

NOTE:

The valid queries to any section when creating an ElementRecorder are 'force', and 'deformation'. Some sections have additional queries to which they will respond. These are documented in the NOTES section for those sections.

The following contain information about secType? and the args required for each of the available section types:

- Elastic Section
- Fiber Section
- NDFiber Section
- Wide Flange Section
- RC Section
- Parallel Section
- Section Aggregator
- Uniaxial Section
- Elastic Membrane Plate Section
- Plate Fiber Section
- Bidirectional Section
- Isolator2spring Section

نرم‌افزار OpenSees مقاطع مختلفی دارد که در زیر آمده است، برای استفاده از مقطع Fiber می‌توان

از Fiber section استفاده کنیم که دارای دستورات زیر می‌باشد:

انجمن سازه‌های فولادی ایران

```
section Fiber $secTag <-GJ $GJ> {
fiber...
patch...
layer...
...
}
```

$secTag	unique tag among sections
$GJ	linear-elastic torsional stiffness assigned to the section (optional, default = no torsional stiffness)
fiber...	command to generate a single fiber
patch...	command to generate a number of fibers over a geometric cross-section
layer...	command to generate a row of fibers along a geometric-arc

ابتدا شماره مقطع را وارد می‌کنیم، سپس بخاطر اینکه مقطع Fiber مقاومت پیچشی عضو را نمی‌تواند حساب کند، می‌توان دستی آن را وارد کرد، اگر وارد نکنیم و مقطع دچار پیچش شود، نرم‌افزار به‌صورت پیش‌فرض آن را بی‌نهایت قرار می‌دهد.

گزینه‌های ساخت مقطع فایبر شامل Fiber که یک تار را همانند میلگرد تعریف میکند، patch که لازمه ساخت است و به‌صورت چهارضلعی، مستطیلی و دایروی قابل تعریف است و در آخر layer که مجموعه منظمی از Fiberها می‌باشد.

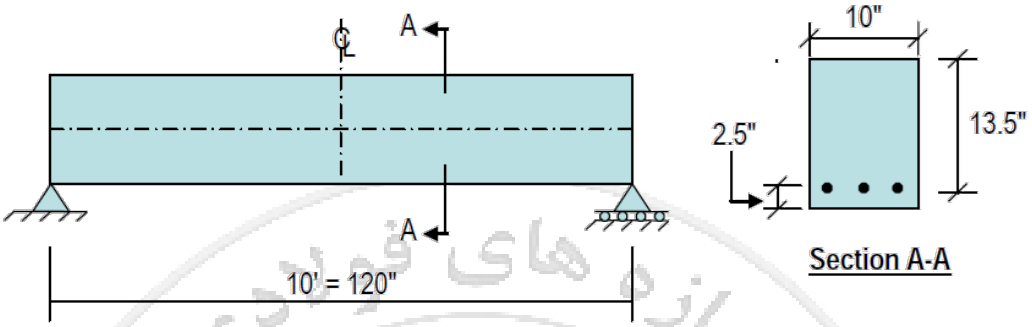
برای هر مقطعی می‌توان از fiber استفاده کرد، از جمله کاربردهای زیاد آن مقاطع I شکل یا H شکل و همچنین مقاطع بتنی می‌باشد، در نسخه‌های جدید مقاطع آماده H شکل به نام Wide flange section تعریف شده که دیگر نیازی به استفاده از fiber نمی‌باشد، ولی همچنان برای مقاطع دیگر نظیر ناودانی یا جعبه‌ای باید از fiber section استفاده کرد.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

۷-۵- تعریف مقطع بتنی

برای مثال از تیر بتنی زیر استفاده می‌کنیم:

GEOMETRY, PROPERTIES AND LOADING



Material Properties		Section Properties			Design Properties
E =	3600 k/in²	d	=	13.5 in	$f'_c = 4\ k/in^2$
v =	0.2	b	=	10.0 in	$f_y = 60\ k/in^2$
G =	1500 k/in²	I	=	3,413 in⁴	

برای مدل‌سازی این تیر چند حالت وجود دارد:

۱- حالت الاستیک با elasticBeamColumn با مساحت و مدول الاستیسیته

۲- حالت الاستیک با forceBeamColumn با ماده الاستیک و مقطع fiber

۳- حالت غیر الاستیک با forceBeamColumn با ماده concrete01 و مقطع fiber

البته می‌توان المان، ماده یا مقطع را عوض کرد ولی در کل همین حالات برای تعریف یک المان وجود دارد.

برای تعریف تک میلگرد یا هر ماده دیگری که به‌صورت میلگرد رفتار کند از دستور زیر استفاده میکنیم:

انجمن سازه‌های فولادی ایران

This command allows the user to construct a single fiber and add it to the enclosing FiberSection or NDFiberSection.

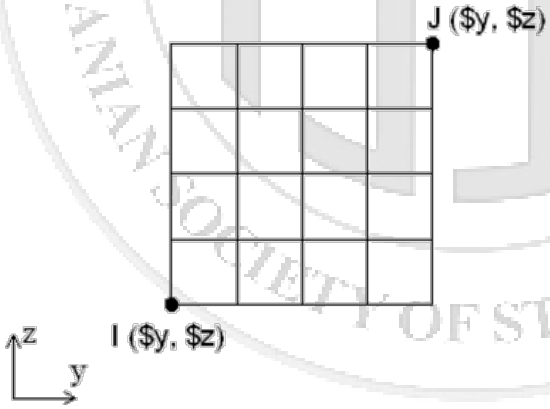
fiber $yLoc $zLoc $A $matTag

$yLoc	y coordinate of the fiber in the section (local coordinate system)
$zLoc	z coordinate of the fiber in the section (local coordinate system)
$A	area of the fiber.
$matTag	material tag associated with this fiber (UniaxialMaterial tag for a FiberSection and NDMaterial tag for use in an NDFiberSection).

برای تعریف بتن مقطع، از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

patch rect $matTag $numSubdivY $numSubdivZ $yI $zI $yJ $zJ

$matTag	tag of previously defined material (UniaxialMaterial tag for a FiberSection or NDMaterial tag for use in an NDFiberSection)
$numSubdivY	number of subdivisions (fibers) in the local y direction.
$numSubdivZ	number of subdivisions (fibers) in the local z direction.
$yI $zI	y & z-coordinates of vertex I (local coordinate system)
$yJ $zJ	y & z-coordinates of vertex J (local coordinate system)



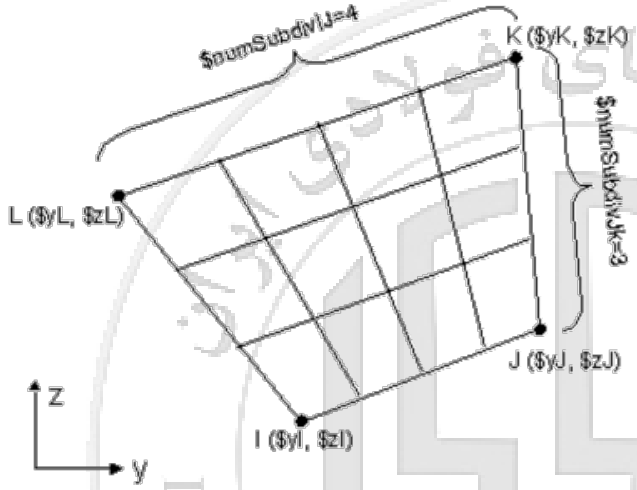
برای تعریف هر چهار ضلعی از دستور زیر استفاده می‌کنیم:

انجمن سازه‌های فولادی ایران

The following is the command to generate a quadrilateral shaped patch (the geometry of the patch is defined by four vertices: I J K L. The coordinates of each of the four vertices is specified in COUNTER CLOCKWISE sequence):

patch quad $matTag $numSubdivIJ $numSubdivJK $yI $zI $yJ $zJ $yK $zK $yL $zL

$matTag	tag of previously defined material (UniaxialMaterial tag for a FiberSection or NDMaterial tag for use in an NDFiberSection)
$numSubdivIJ	number of subdivisions (fibers) in the IJ direction.
$numSubdivJK	number of subdivisions (fibers) in the JK direction.
$yI $zI	y & z-coordinates of vertex I (local coordinate system)
$yJ $zJ	y & z-coordinates of vertex J (local coordinate system)
$yK $zK	y & z-coordinates of vertex K (local coordinate system)
$yL $zL	y & z-coordinates of vertex L (local coordinate system)



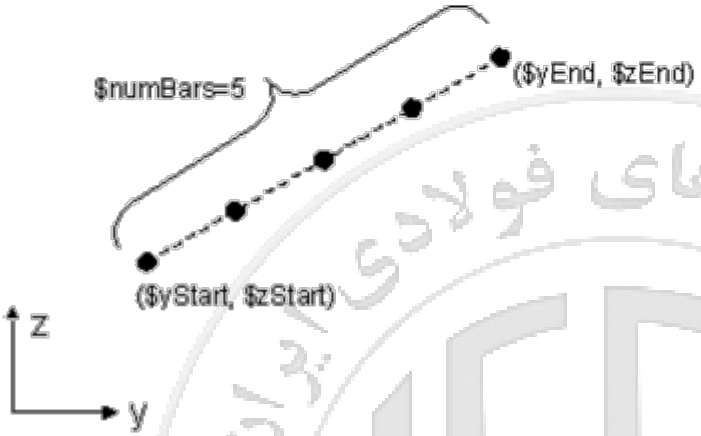
توصیه می‌شود برای ساخت مقاطع پیچیده با این دستور، ابتدا روی کاغذ مختصات مورد استفاده نوشته شود و سپس به‌ترتیب وارد شود. در قسمت اول از شما matTag را خواسته است، در نتیجه شما باید قبل از این مرحله material را تعریف کرده باشید، من هنوز آن را نگفته‌ام. (برای ساخت elasticBeamColumn نیازی به تعریف material نمی‌باشد). سپس روی کاغذ نقاط گوشه مستطیل را نام گذاری کنید، به طوریکه پادساعتگرد باشد، حال در قسمت دوم از شما تعداد تقسیمات بین نقطه اول و دوم را می خواهد. و در قسمت سوم تعداد تقسیمات بین نقطه سوم و چهارم. تعداد تقسیمات برای مقطع غیر خطی (وقتی material را غیر خطی تعریف کنید) مهم می‌شود. ولی اگر material خطی باشد، تاثیری ندارد. تعداد لازم بستگی به دقت شما دارد. معمولاً ۸ تکه مناسب می‌باشد.

برای تعریف ردیف میلگردها که سه عدد میلگرد دارد از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

انجمن سازه‌های فولادی ایران

layer straight $matTag $numFiber $areaFiber $yStart $zStart $yEnd $zEnd

$matTag	material tag of previously created material (UniaxialMaterial tag for a or NDMaterial tag for use in an NDFiberSection)
$numFibers	number of fibers along line
$areaFiber	area of each fiber
$yStart $zEnd	y and z-coordinates of first fiber in line (local coordinate system)
$$yEnd $zEnd	y and z-coordinates of last fiber in line (local coordinate system)



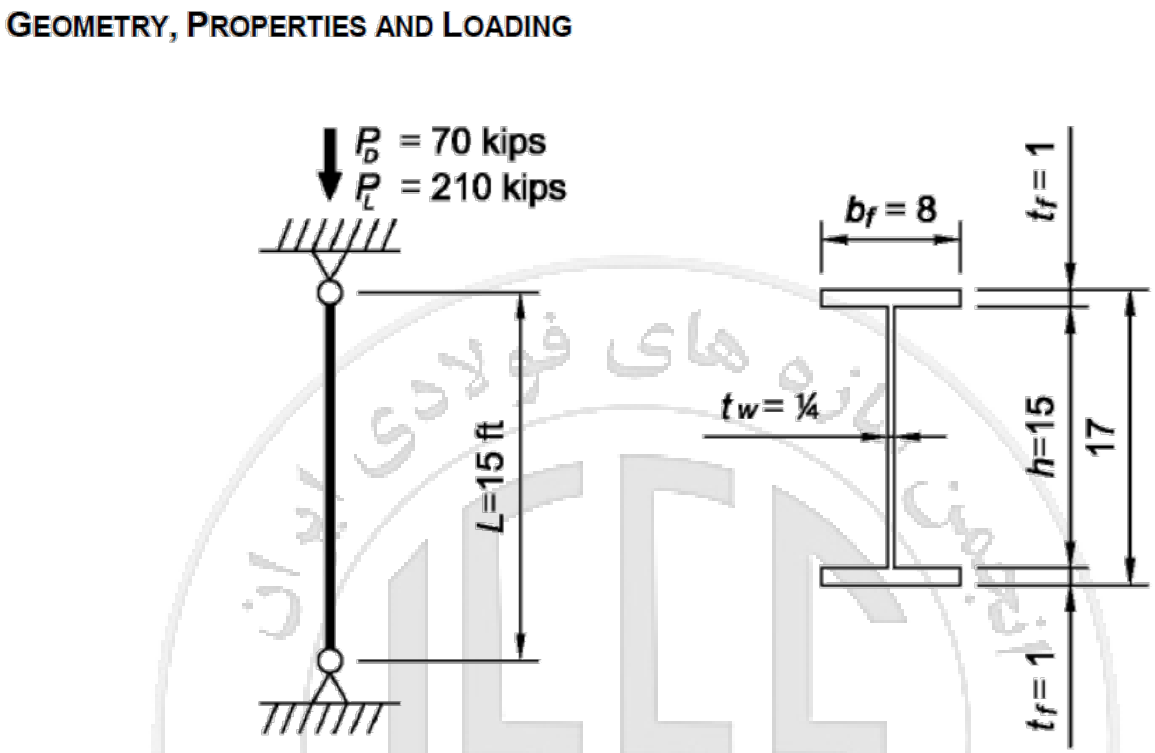
کد این مقطع Fiber به‌صورت زیر خواهد شد:

```
section Fiber $sec_tag {

patch rec    $mat_conc   4            4            -5.   [expr -16./2.]    5.    [expr 16./2.]
             #material   subDivideX   subDivideY   yI    zI                yJ    zJ

layer straight    $mat_rebar  3          0.487        -4.0   -5.5   4.0    -5.5
                  #material   numFiber   Area         yS     zS     yE     zE

}
```

انجمن سازه‌های فولادی ایران

۷-۶- تعریف مقطع فولادی

برای مثال اگر بخواهیم مقطع I شکل زیر را بسیازیم:



فقط نیاز است سه بار از دستور patch استفاده کنیم، چون برای مقطع بتنی از patch rect استفاده شد، برای این مقطع از patch quad استفاده می‌کنیم و نتیجه کد به‌صورت زیر خواهد شد:

```
section Fiber $sec_tag {
patch quad $mat_steel 4 4    -4.   [expr -17./2.]   4.    [expr -17./2.]   4.    [expr -17./2.+1] -4.   [expr -17./2.+1]
patch quad $mat_steel 4 4    [expr -1./8.]    [expr -17./2.+1] [expr 1./8.]     [expr -17./2.+1]\
                             [expr 1./8.]     [expr 17./2.-1]  [expr -1./8.]    [expr 17./2.-1]
patch quad $mat_steel 4 4    -4.   [expr 17./2.-1]  4.    [expr 17./2.-1]  4.    [expr 17./2.]    -4.   [expr 17./2.]
}
```

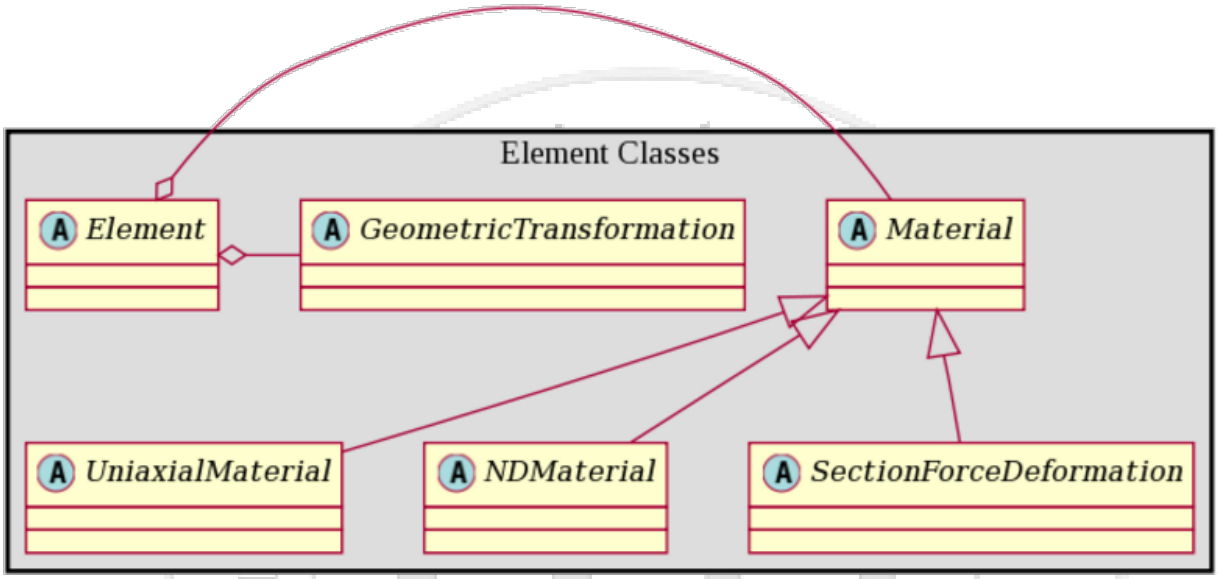
اگر یک دستور بسیار زیاد شد و خواستید در یک صفحه ببینید، می‌توانید با علامت \ در آخر خط، بقیه دستور را در خط بعد بنویسید که در کد بالا استفاده شده است.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

۸- جلسه نهم

۸-۱- مصالح یک جهته یا محوری

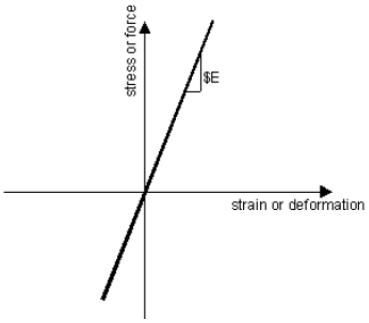
در OpenSees دو حالت مصالح داریم، یک بعدی و چند بعدی که در زیر نشان داده شده است:



در این جلسه چند ماده را به دلخواه انتخاب کرده و توضیحاتی راجع به آن‌ها می‌دهیم:

همانطور که میدانید ، تحلیل و طراحی در Etabs با فرض الاستیک بودن مصالح می‌باشد، و در هنگام تحلیل شما هر چقدر بارگذاری کنید، سازه مشکل پیدا نمی‌کند. ولی در هنگام طراحی، بر اساس مقاومت‌های موجود و ضوابط طراحی، المان‌ها به رنگ قرمز در می آیند. این ماده را با دستور elastic می‌توانیم مدل کنیم:

انجمن سازه‌های فولادی ایران



Elastic Material

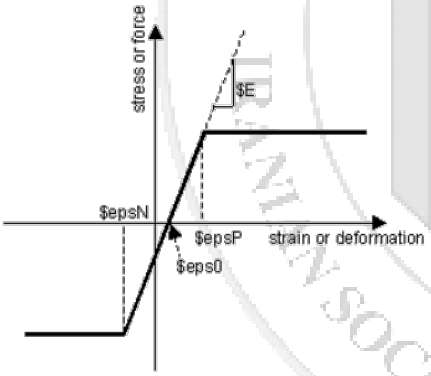
This command is used to construct an elastic uniaxial material object.

uniaxialMaterial Elastic $matTag $E <$eta>

$matTag	unique material object integer tag
$E	tangent
$eta	damping tangent (optional, default=0.0)

معمولا Damping با دستور رایلی به سازه اعمال می‌شود و پارامتر eta که بیانگر damping مصالح هست، طبق پیش فرض صفر می‌باشد.

حال شما مثلا می‌خواهید مصالح steel به تیر جلسه قبل اختصاص دهید. هم می توانید از EPP استفاده کنید که نقطه تسلیم برای مصالح در نظر می گیرد. و هم از مصالح مخصوص فولاد مثل steel01 یا steel02 یا steel4 استفاده کنید.



Elastic-Perfectly Plastic Material

This command is used to construct an elastic perfectly-plastic uniaxial material object.

uniaxialMaterial ElasticPP $matTag $E $epsyP <$epsyN $eps0>

$matTag	unique material object integer tag
$E	tangent

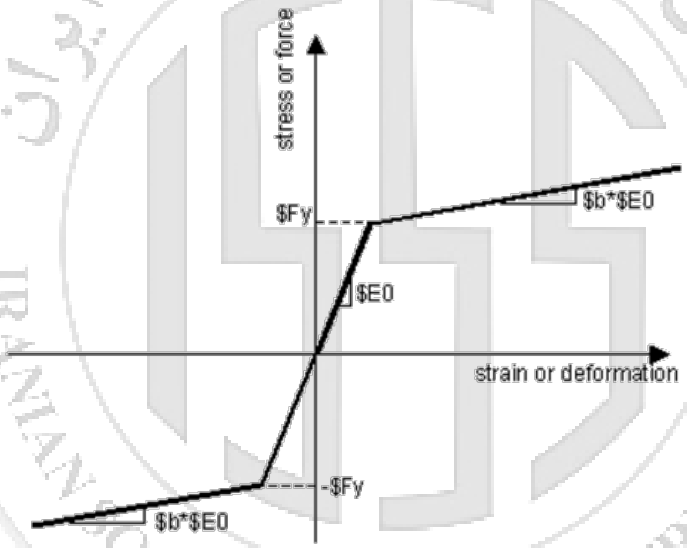
$epsyP	strain or deformation at which material reaches plastic state in tension
$epsyN	strain at which material reaches plastic state in compression (optional, default: tension value)
$eps0	initial strain (optional, default: zero)

انجمن سازه‌های فولادی ایران

ماده steel01 در زیر آورده شده است:

uniaxialMaterial Steel01 $matTag $Fy $E0 $b <$a1 $a2 $a3 $a4>

$matTag	integer tag identifying material
$Fy	yield strength
$E0	initial elastic tangent
$b	strain-hardening ratio (ratio between post-yield tangent and initial elastic tangent)
$a1	isotropic hardening parameter, increase of compression yield envelope as proportion of yield strength after a plastic strain of $a2*($Fy/E0). (optional)
$a2	isotropic hardening parameter (see explanation under $a1). (optional).
$a3	isotropic hardening parameter, increase of tension yield envelope as proportion of yield strength after a plastic strain of $a4*($Fy/E0). (optional)
$a4	isotropic hardening parameter (see explanation under $a3). (optional)



Steel01 Material – Hysteretic Behavior of Model w/o Isotropic Hardening

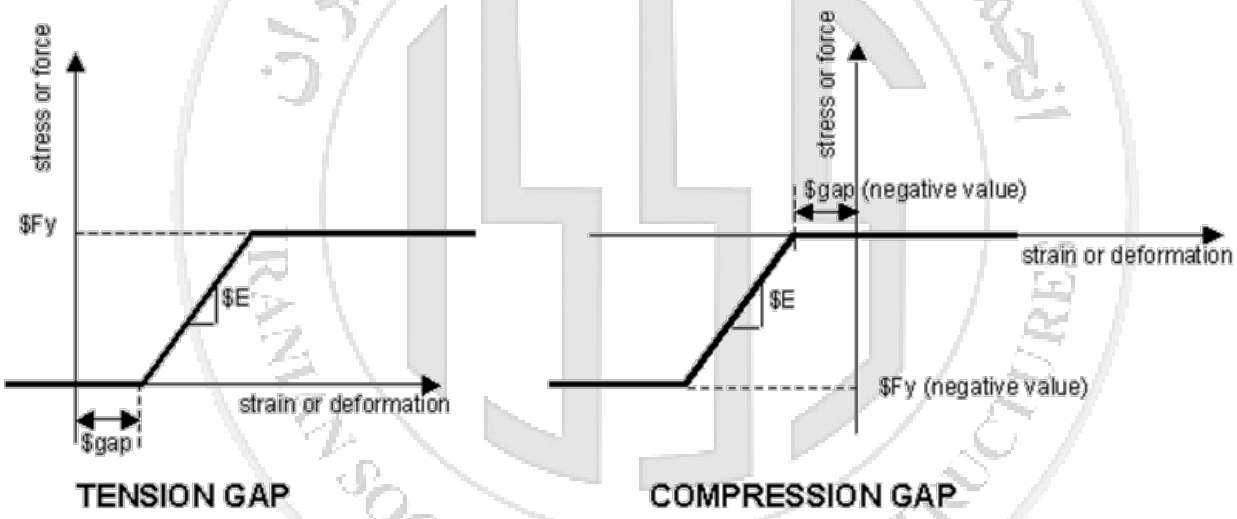
همانطور که می بینید، فرق اساسی و مهم آن شیب بعد از تسلیم شدگی می‌باشد، که شما در مسائل خودتون خیلی وقتها با تغییر شیب به جواب می رسید، چون شیب نداشتن در مسائل غیر خطی بعضی وارد منجر به واگرایی در حل مسئله می‌شود.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

اگر بخواهید ponding را مدل‌کنید، نیاز به ماده‌ای دارید تا از فاصله‌ای نزدیک بسیار سخت باشد، ولی وقتی از فاصله خاصی دورتر می‌شود اصلا مقاومتی نداشته باشد، مثلا در مدل‌سازی رواداری پیچ‌ها نیز می‌توان از آن استفاده کرد:

uniaxialMaterial ElasticPPGap $matTag $E $Fy $gap <$eta> <damage>

$matTag	integer tag identifying material
$E	tangent
$Fy	stress or force at which material reaches plastic state
$gap	initial gap (strain or deformation)
$eta	hardening ratio (=Eh/E), which can be negative
$damage	an optional string to specify whether to accumulate damage or not in the material. With the default string, "noDamage" the gap material will re-center on load reversal. If the string "damage" is provided this recentering will not occur and gap will grow.



انجمن سازه‌های فولادی ایران

اگر بخواهید پای ستون را آزاد کنید، به‌طوریکه ستون در فشار روی پی بماند و در کشش آزاد باشد یا ماده‌ای شبیه بامپر بسازید، می‌توانید از ماده زیر استفاده کنید:

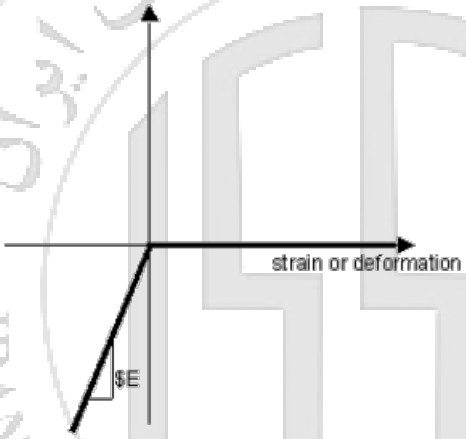
Elastic-No Tension Material

This command is used to construct a uniaxial elastic-no tension ma

uniaxialMaterial ENT $matTag $E

$matTag	unique material object integer tag
$E	elastic model in compression

In tension, there is zero stress.



براس مدل‌کردن ماده‌ای که در هر چرخه هیسترزیس شیب متفاوتی داشته باشد، می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

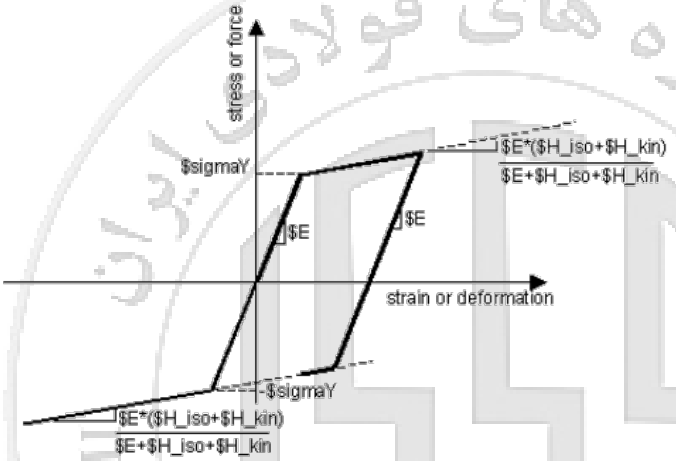
انجمن سازه‌های فولادی ایران

Hardening Material

This command is used to construct a uniaxial material object with combined linear kinematic and isotropic hardening. The model includes optional visco-plasticity using a Perzyna formulation (REF???)

uniaxialMaterial Hardening $matTag $E $sigmaY $H_iso $H_kin <$eta>

$matTag	unique material object integer tag
$E	tangent stiffness
$sigmaY	yield stress or force
$H_iso	isotropic hardening Modulus
$H_kin	kinematic hardening Modulus
$eta	visco-plastic coefficient (optional, default=0.0)



ماده Concrete01 ساده ترین مدل بتن می‌باشد، که همانطور که می بینید، در کشش مقاومتی ندارد.

می توانید از concrete02 استفاده کنید، که در کشش برای آن مقاومت در نظر گرفته شده است:

انجمن سازه‌های فولادی ایران

Concrete01 Material -- Zero Tensile Strength

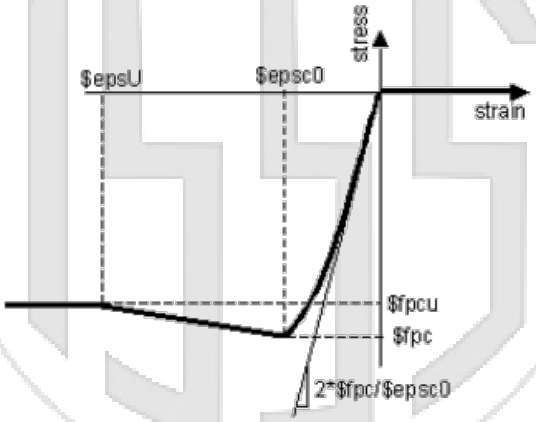
This command is used to construct a uniaxial Kent-Scott-Park concrete material object with degraded linear unloading/reloading stiffness according to the work of Karsan-Jirsa and no tensile strength. (REF: Fedeas).

uniaxialMaterial Concrete01 $matTag $fpc $epsc0 $fpcu $epsU

$matTag	unique material object integer tag
$fpc	concrete compressive strength at 28 days (compression is negative)*
$epsc0	concrete strain at maximum strength*
$fpcu	concrete crushing strength *
$epsU	concrete strain at crushing strength*

***NOTE:** Compressive concrete parameters should be input as negative values.

The initial slope for this model is (2*$fpc/$epsc0)

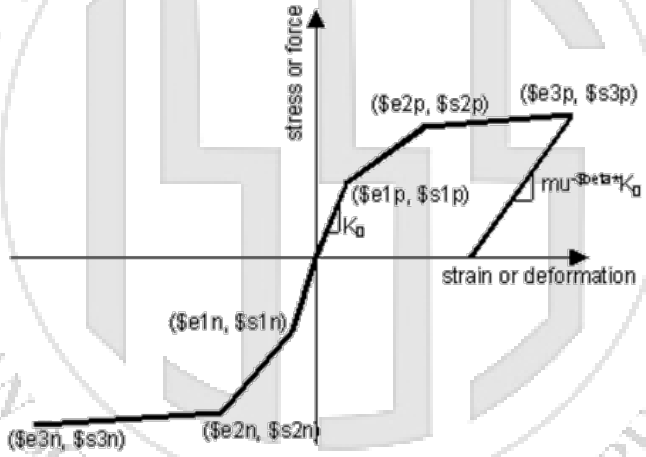


IRANIAN SOCIETY OF STEEL STRUCTURES
انجمن سازه‌های فولادی ایران

ماده hysteretic برای مدل‌سازی مفاصل پلاستیک یا مدل‌سازی کمانش مهاربند میتواند به‌کاررود و به‌صورت زیر می‌باشد:

uniaxialMaterial Hysteretic $matTag $s1p $e1p $s2p $e2p <$s3p $e3p> $s1n $e1n $s2n $e2n <$s3n $e3n> $pinchX $pinchY $damage1 $damage2 <$beta>

$matTag	integer tag identifying material
$s1p $e1p	stress and strain (or force & deformation) at first point of the envelope in the positive direction
$s2p $e2p	stress and strain (or force & deformation) at second point of the envelope in the positive direction
$s3p $e3p	stress and strain (or force & deformation) at third point of the envelope in the positive direction (optional)
$s1n $e1n	stress and strain (or force & deformation) at first point of the envelope in the negative direction
$s2n $e2n	stress and strain (or force & deformation) at second point of the envelope in the negative direction
$s3n $e3n	stress and strain (or force & deformation) at third point of the envelope in the negative direction (optional)
$pinchx	pinching factor for strain (or deformation) during reloading
$pinchy	pinching factor for stress (or force) during reloading
$damage1	damage due to ductility: D1(mu-1)
$damage2	damage due to energy: D2(Eii/Eult)
$beta	power used to determine the degraded unloading stiffness based on ductility, mu-beta (optional, default=0.0)

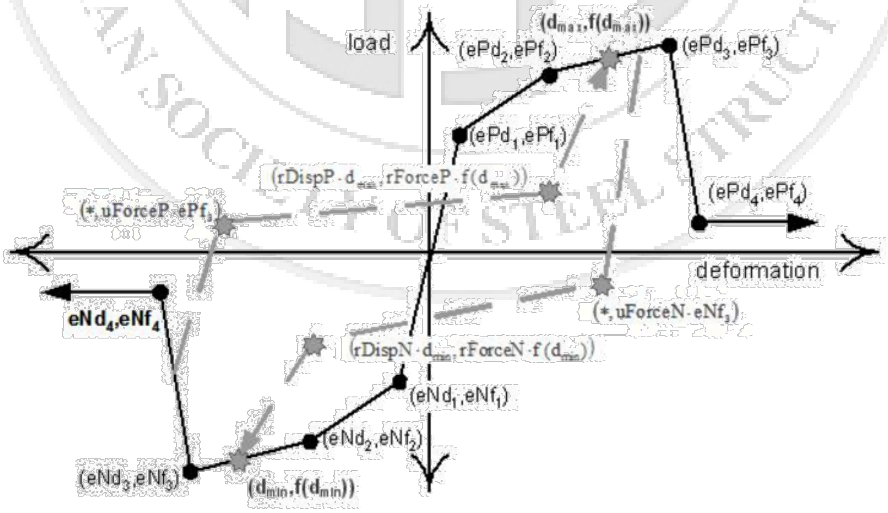


انجمن سازه‌های فولادی ایران

در نسخه‌های جدیدتر مواد جدیدی آمده است که میتواند جای این ماده را بگیرد، از جمله آن‌ها pinching4 می‌باشد که به‌صورت زیر است:

uniaxialMaterial Pinching4 $matTag $ePf1 $ePd1 $ePf2 $ePd2 $ePf3 $ePd3 $ePf4 $ePd4 <$eNf1 $eNd1 $eNf2 $eNd2 $eNf3 $eNd3 $eNf4 $eNd4> $rDispP $rForceP $uForceP <$rDispN $rForceN $uForceN > $gK1 $gK2 $gK3 $gK4 $gKLim $gD1 $gD2 $gD3 $gD4 $gDLim $gF1 $gF2 $gF3 $gF4 $gFLim $gE $dmgType

$matTag	integer tag identifying material
$ePf1 $ePf2 $ePf3 $ePf4	floating point values defining force points on the positive response envelope
$ePd1 $ePd2 $ePd3 $ePd4	floating point values defining deformation points on the positive response envelope
$eNf1 $eNf2 $eNf3 $eNf4	floating point values defining force points on the negative response envelope
$eNd1 $eNd2 $eNd3 $eNd4	floating point values defining deformation points on the negative response envelope
$rDispP	floating point value defining the ratio of the deformation at which reloading occurs to the maximum historic deformation demand
$fFoceP	floating point value defining the ratio of the force at which reloading begins to force corresponding to the maximum historic deformation demand
$uForceP	floating point value defining the ratio of strength developed upon unloading from negative load to the maximum strength developed under monotonic loading
$rDispN	floating point value defining the ratio of the deformation at which reloading occurs to the minimum historic deformation demand
$fFoceN	floating point value defining the ratio of the force at which reloading begins to force corresponding to the minimum historic deformation demand
$uForceN	floating point value defining the ratio of strength developed upon unloading from negative load to the minimum strength developed under monotonic loading
$gK1 $gK2 $gK3 $gK4 $gKLim	floating point values controlling cyclic degradation model for unloading stiffness degradation
$gD1 $gD2 $gD3 $gD4 $gDLim	floating point values controlling cyclic degradation model for reloading stiffness degradation
$gF1 $gF2 $gF3 $gF4 $gFLim	floating point values controlling cyclic degradation model for strength degradation
$gE	floating point value used to define maximum energy dissipation under cyclic loading. Total energy dissipation capacity is defined as this factor multiplied by the energy dissipated under monotonic loading.
$dmgType	string to indicate type of damage (option: "cycle", "energy")



انجمن سازه‌های فولادی ایران

همانطور که دیدید بسیار از موارد پر کاربرد نظیر steel01 دارای حد نهایی نمی‌باشند، یا اگر در کابل پیش‌کشیده استفاده شوند، نمی‌توان به آن‌ها تنش اولیه یا کرنش اولیه وارد کرد، موادی در کتابخانه OpenSees است که این کارها را روی هر ماده‌ای انجام می‌دهد:

MinMax Material

Command_Manual

This command is used to construct a MinMax material object. This stress-strain behaviour for certain threshold values, the other material is assumed to have failed. From that point on, va

uniaxialMaterial MinMax $matTag $otherTag <-min $minStrain> <-max $maxStrain>

$matTag	integer tag identifying material
$otherTag	tag of the other material
$minStrain	minimum value of strain. optional default = -1.0e16.
$maxStrain	max value of strain. optional default = 1.0e16.

این ماده کرنش مثبت و منفی حداکثر را مشخص می‌کند.

Initial Stress Material

Command_Manual

This command is used to construct an Initial Stress material object. The str initial stress for the material under consideration. The strian that correspond

uniaxialMaterial InitStressMaterial $matTag $otherTag $initStress

$matTag	integer tag identifying material
$otherTag	tag of the other material
$initStress	initial stress

Initial Strain Material

Command_Manual

This command is used to construct an Initial Strain material object. The initial strains for the material under consideration. The stress that corresp

uniaxialMaterial InitStrainMaterial $matTag $otherTag $initStrain

$matTag	integer tag identifying material
$otherTag	tag of the other material
$initStrain	initial strain

این ماده کرنش و تنش اولیه در ماده ایجاد می‌کند.

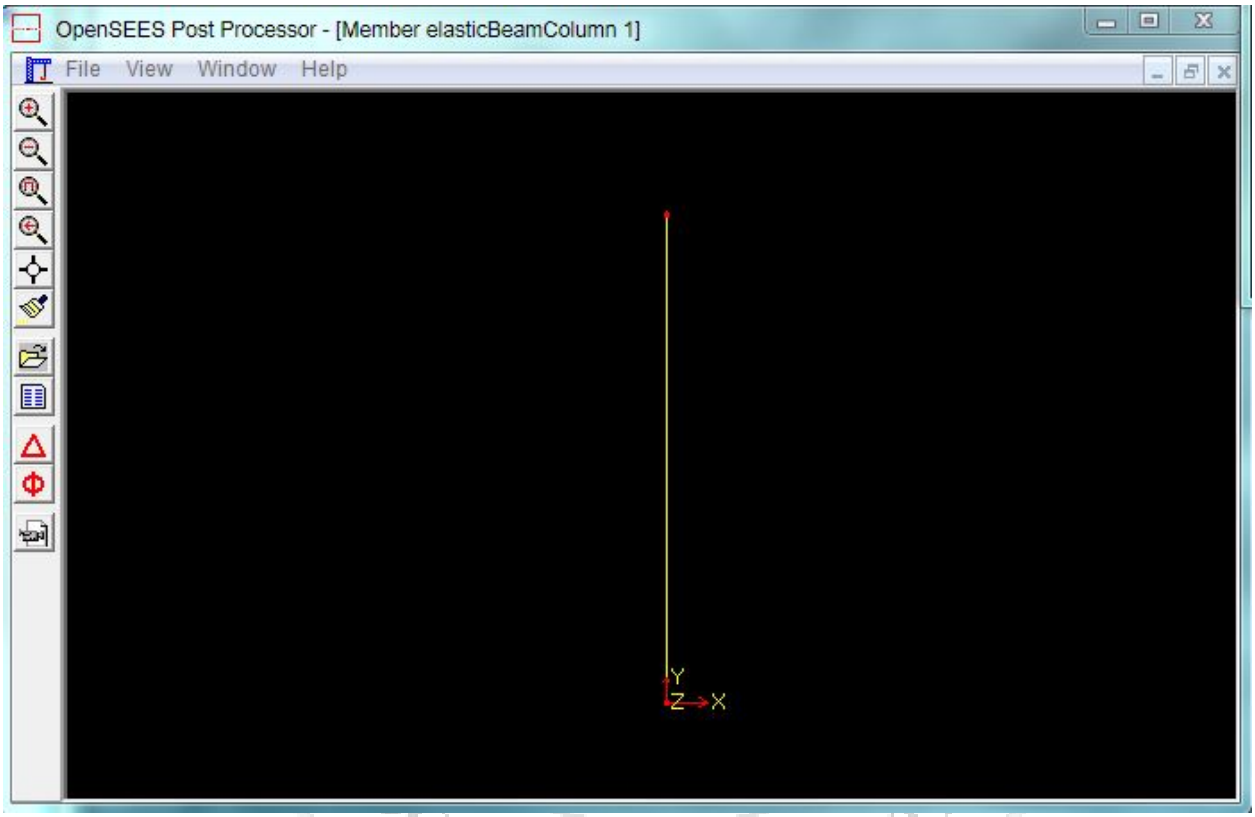
در ادامه با وارد کردن این مواد در مقاطع و استفاده در المان‌ها، می‌توان هر المانی با هر رفتاری ساخت و استفاده کرد.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

۹– جلسه دهم

۹-۱- مثال آموزشی دوم (ستون)

این مثال برای آموزش رفتار غیرخطی و بارگذاری زلزله آماده شده در نتیجه برای راحتی کار یک ستون تک مورد تحقیق قرار می‌گیرد:



در صفحه OPS ستون را می‌بینید، برای تعریف آن باید کدنویسی زیر را انجام دهیم:

انجمن سازه‌های فولادی ایران

```
wipe

model basic -ndm 2 -ndf 3

########################
## Nodal Coordinate   ##
########################

set length 5.

node 1 0 0
node 2 0 $length

########################
## Boundry Conditions ##
########################

fix 1 1 1 1
```

در مسئله‌ای دو بعدی، ستونی به طول ۵ متر با تکیه‌گاهی گیردار به زمین وصل شده است.

```
#####################################
##   Define Material and Element   ##
#####################################

set A   28.5
set E   2.e6
set Iz  1940.

geomTransf Linear 1
element elasticBeamColumn 1 1 2 $A $E $Iz 1

########################
##   Define Masses    ##
########################

set massx 5.e3
set massy 1.e-9
set g 9.81

mass 2 $massx $u 0
```

در ادامه المانی الاستیک برای ستون انتخاب کرده و برای اینکه تحلیل تاریخچه زمانی انجام دهیم، به بالای ستونی جرمی اختصاص می‌دهیم، همانطور که می‌دانید شتاب زلزله به جرم وارد شده و آن را حرکت می‌دهد. همچنین می‌توان تحلیل مدال نیز انجام داد و پریود مد این ستون را حساب کرد.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

برای اینکه فایل شامل زلزله را تعریف کنیم، ابتدا همانطور که برای بار استاتیکی، از linear استفاده کردیم، برای تاریخچه زمانی نیز از Path استفاده می‌کنیم که به‌صورت زیر می‌باشد:

For a load path where the factors are specified in a tcl list with a constant time interval between points:

timeSeries Path $tag -dt $dt -values {list_of_values} <-factor $cFactor>

For a load path where the factors are specified in a file for a constant time interval between points:

timeSeries Path $tag -dt $dt -filePath $filePath <-factor $cFactor>

For a load path where the values are specified at non-constant time intervals:

timeSeries Path $tag -time {list_of_times} -values {list_of_values} <-factor $cFactor>

For a load path where both time and values are specified in a list included in the command

timeSeries Path $tag -fileTime $fileTime -filePath $filePath <-factor $cFactor>

$tag	unique tag among TimeSeries objects.
$filePath	file containing the load factors values
$fileTime	file containing the time values for corresponding load factors
$dT	time interval between specified points.
{list_of_times}	load factor values in a tcl list
{list_of_values}	time values in a tcl list
$cFactor	optional, a factor to multiply load factors by (default = 1.0)

در چهار حالت می‌توان تعریف کرد:

۱- حالت اول، گام زمانی ثابت است، مقادیر بار (شتاب)، با بردار معرفی می‌شود.

۲- حالت دوم، گام زمانی ثابت است، مقادیر بار (شتاب)، از فایل خارجی خوانده می‌شود.

۳- حالت سوم، گام زمانی و بار (شتاب) با بردار معرفی می‌شوند.

۴- حالت چهارم گام زمانی و بار (شتاب) هر دو از فایل خارجی خوانده می‌شوند.

برای زلزله معمولاً حالت دوم استفاده می‌شود.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

برای تعریف شتاب، از دستور زیر باید استفاده کنیم:

pattern UniformExcitation $patternTag $dir -accel $tsTag <-vel0 $vel0> <-fact $cFactor>

$patternTag	unique tag among load patterns
$dir	direction in which ground motion acts 1 - corresponds to global X axis 2 - corresponds to global Y axis 3 - corresponds to global Z axis
$tsTag	tag of the TimeSeries series defining the acceleration history.
$vel0	the initial velocity (optional, default=0.0)
$cFactor	constant factor (optional, default=1.0)

جهت شتاب و مسیر نیرو و زمان را که در قبل مشخص کردیم، اگر وارد کنیم، می‌توانیم تحلیل تاریخچه زمانی انجام دهیم:

```
set outFile records/kobe-KJM000-dt(0.02).txt

set GMfatt [expr 9.81] ;      # data in input file is in g Unifts -- ACCELERATION TH

set dt_ground     0.02
set AccelSeries "Series -dt $dt_ground\
-filePath $outFile -factor  $GMfatt" ;    # time series information

pattern UniformExcitation  2  1 -accel  $AccelSeries ;      # create Uniform excitation

puts "groundmotion start! Time: [getTime]"
```

پس از تعریف مدل، زلزله را وارد می‌کنیم، حال زمان شروع زلزله را با دستور getTime روی صفحه OpenSees می‌بینیم.

۹-۲- دمپینگ رایلی

در تحلیل‌های تاریخچه زمانی لازم است به سازه دمپینگ اعمال کنیم، وگرنه جواب‌ها فقط زیاد می‌شوند، برای اعمال دمپینگ چند راه وجود دارد، یکی از آن‌ها وارد کردن دمپینگ مصالح می‌باشد، ولی روش مرسوم‌تر، استفاده از دمپینگ رایلی می‌باشد:

انجمن سازه‌های فولادی ایران

D = $alphaM * M + $betaK * Kcurrent +$betaKinit * Kinit + $betaKcomm * KlastCommit

rayleigh $alphaM $betaK $betaKinit $betaKcomm

$alphaM	factor applied to elements or nodes mass matrix
$betaK	factor applied to elements current stiffness matrix.
$betaKinit	factor applied to elements initial stiffness matrix.
$betaKcomm	factor applied to elements committed stiffness matrix.

دمپینگ رایلی بدین صورت است که دو پریود انتخاب می‌کنیم و دمپینگ آن‌ها را عدد خاصی مثلا ۵٪ قرار میدهیم، سپس پریود بقیه سازه همانند منحنی شکل زیر مشخص می‌شود، برای مطالعه بیشتر می‌توانید به مراجع مراجعه کنید:

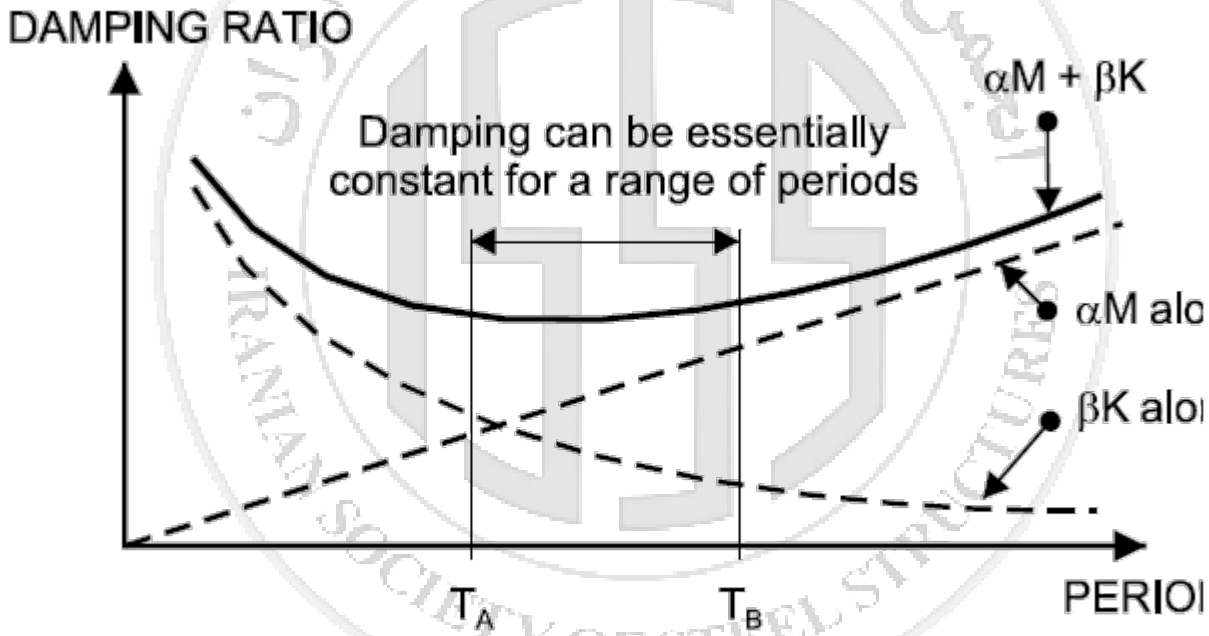


Figure 18.2 Variation of Damping Ratio with Period for Linear Analysis

برای اینکه دستوری بنویسیم که این کار را انجام دهد، از کد زیر باید استفاده شود:

انجمن سازه‌های فولادی ایران

```
###=================================================###
###         Computed RAYLEIGH Damping               ###
###            From Mode 1 & Mode 3                 ###
###=================================================###
# ------------ define & apply damping
# RAYLEIGH damping parameters, Where to put M/K-prop damping, switches
# D=$alphaM*M + $betaKcurr*Kcurrent + $betaKcomm*KlastCommit + $beatKinit*$Kinitial
set xDamp 0.05;        # damping ratio
set MpropSwitch 1.0;
set KcurrSwitch 0.0;
set KcommSwitch 1.0;
set KinitSwitch 0.0;
set nEigenI 1;         # mode 1
set nEigenJ 3;         # mode 3
set lambdaN [eigen [expr $nEigenJ]];               # eigenvalue analysis for nEigenJ modes
set lambdaI [lindex $lambdaN [expr $nEigenI-1]];    # eigenvalue mode i
set lambdaJ [lindex $lambdaN [expr $nEigenJ-1]];    # eigenvalue mode j
set omegaI [expr pow($lambdaI,0.5)];
set omegaJ [expr pow($lambdaJ,0.5)];
set alphaM [expr $MpropSwitch*$xDamp*(2*$omegaI*$omegaJ)/($omegaI+$omegaJ)];     # M-prop. damping; D = alphaM*M
set betaKcurr [expr $KcurrSwitch*2.*$xDamp/($omegaI+$omegaJ)];                   # current-K;      +beatKcurr*KCurrent
set betaKcomm [expr $KcommSwitch*2.*$xDamp/($omegaI+$omegaJ)];            # last-committad K;   +betaKcomm*KlastCommitt
set betaKinit [expr $KinitSwitch*2.*$xDamp/($omegaI+$omegaJ)];            # initial-K;      +beatKinit*Kini
rayleigh $alphaM $betaKcurr $betaKinit $betaKcomm;                     # RAYLEIGH damping
```

۹-۳- تحلیل تاریخچه زمانی

در ادامه موتور تحلیل باید معرفی شود:

```
##############################
##   Define Damping         ##
##############################

rayleigh  0.0    0.0     0.0     0.05

##############################
##   Define Analysis        ##
##############################

test NormDispIncr 1.0e-12 10
algorithm Newton
integrator Newmark 0.5 0.25
constraints Plain
numberer RCM
system BandGeneral
analysis Transient

##############################
##   Define Recorders       ##
##############################

recorder Node     -time -file node.out -node 2 -dof 1 disp
recorder Element  -file element.out -time -ele 1 localForce
```

انجمن سازه‌های فولادی ایران

در این مثال recorder در آخر آورده شده تا معلوم شود، این دستور فقط نباید پس از دستور analyze بیاید، و قبل آن در هر جا مشکلی ندارد. همچنین ترتیب دستورات موتور تحلیل شکل خاصی نباید داشته باشند. در ادامه تحلیل با دستورات هوشمند اجرا میشود:

```
set dt 0.01 ; # in analysis
set Tmax 30 ; # in analysis

set Nsteps [expr int($Tmax/$dt)];
      set ok [analyze $Nsteps $dt] ;      # actually perform analysis;
      if {$ok != 0} { ; # analysis was not successful.

# ------------------------------------------------------------------------
# change some analysis parameters to achieve convergence
# performance is slower inside this loop
# Time-controlled analysis
      set ok 0;
      set controlTime [getTime];
      while {$controlTime < $Tmax && $ok == 0} {
            set controlTime [getTime]
            set ok [analyze 1 $dt]
            if {$ok != 0} {
                  puts "Trying Newton with Initial Tangent ..."
                  test NormDispIncr 1.e-8 1000  1
                  algorithm Newton -initial
                  set ok [analyze 1 $dt]
                  test NormDispIncr 1.e-8 20  0
                  algorithm Newton
            }
```

در اینجا تحلیل در گام‌های زمانی ۰/۰۱ ثانیه (کمتر از گام‌های زمانی شتاب نگاشت وارده باشد) و در ۳۰ ثانیه (بیشتر از زمان شتاب نگاشت وارده باشد) انجام می‌شود، ولی اگر در هر لحظه به همگرایی نرسد، مقدار تست و الگوریتم‌ها عوض شده و همان گام دوباره تحلیل می‌شود. نکته اصلی در حلقه نویسی اینست که اگر تحلیل شما موفق باشد، جواب تحلیل ۰ خواهد بود و اگر ناموفق باشد، عددی کوچکتر از ۰ می‌شود.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

۹-۴- مقدار ویژه در تحلیل مدال

برای محاسبه مقدار ویژه سیستم از دستور زیر استفاده می‌شود:

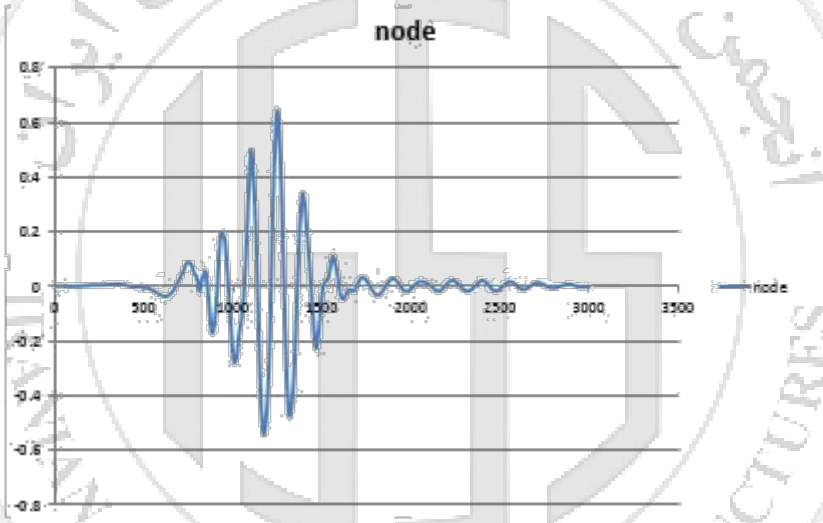
Command_Manual

This command is used to perform the analysis.

eigen <$solver> $numEigenvalues

$numEigenvalues	number of eigenvalues required
$solver	optional string detailing type of solver: -genBandArpack, -symmBandLapack, -fullGenLapack (default: -genBandArpack)

در اخر جابه‌جایی نوک ستون تحت زلزله به‌صورت زیر می‌شود:



انجمن سازه‌های فولادی ایران

۱۰– جلسه یازدهم

در این جلسه ستون را در محیط سه بعدی قرار داده، با فایبر مدل کرده و به آن مصالح غیرخطی می‌دهیم و نتیجه تحلیل تاریخچه زمانی و IDA را بررسی می‌کنیم.

۱۰-۱- نوشتن برنامه (procedure)

بعضی مواقع لازم می‌شود، برنامه یا procedure خاصی نوشته شود، در این حالت لازم است در متن اصلی ابتدا برنامه فراخوانی شود و سپس برای اجرای برنامه، نام برنامه و پارامترهای تعریف شده پشت هم نوشته می‌شود. برای مثال در زیر برنامه مقاطع H شکل آورده شده است:

```
proc Wsection {secID matID d bf tf tw nfdw nftw nfbf nftf} {

set dw [expr  $d -  2 * $tf]

set z1 [expr -$d  / 2 ]
set z2 [expr -$dw / 2 ]
set z3 [expr  $dw / 2 ]
set z4 [expr  $d  / 2 ]
set y1 [expr -$bf / 2 ]
set y2 [expr -$tw / 2 ]
set y3 [expr  $tw / 2 ]
set y4 [expr  $bf / 2 ]

section fiberSec $secID {
# nfIJ nfJK yI zI yJ zJ yK zK yL zL
patch quad $matID $nfbf $nftf $y1 $z1 $y4 $z1 $y4 $z2 $y1 $z2
patch quad $matID $nftw $nfdw $y2 $z2 $y3 $z2 $y3 $z3 $y2 $z3
patch quad $matID $nfbf $nftf $y1 $z3 $y4 $z3 $y4 $z4 $y1 $z4

      }
}
```

پس از نوشتن این برنامه، که از شما، نام مقطع، ماده این مقطع، ارتفاع، عرض، ضخامت بال، ضخامت جان و تعداد تقسیم بندی‌های آن‌ها را می‌خواهد، میتوان در متن اصلی به‌صورت زیر آن را وارد کرد:

انجمن سازه‌های فولادی ایران

```
model basic -ndm 3 -ndf 6

########################
## Nodal Coordinate   ##
########################

set length 5

node 1 0 0        0
node 2 0 $length  0

########################
## Boundry Conditions ##
########################

fix 1   1 1 1   1 1 1

#####################################
##   Define Material and Element   ##
#####################################

set E   2e6

geomTransf Linear 1 1 0 0

uniaxialMaterial Elastic 1 $E

source Wsection.tcl
#secID matID d bf tf tw nfdw nftw nfbf nftfWsection
Wsection 1 1 20 10 0.85 0.56 5 5 5 5
element nonlinearBeamColumn 1 1 2 5 1 1

########################
##   Define Masses    ##
########################

set massx 5e3
set u 1e-9
set g 9.81

mass 2 $massx $u 0   0 0 0
```

برای اینکه از برنامه نوشته شده استفاده کنیم، باید فایل tcl آن را در پوشه همین فایل قرار دهیم و با source که دستور tcl/tk می‌باشد، آن را فراخوانی کنیم. سپس سطر اول فایل Wsection را می‌نویسیم ولی به جای متغیرها عدد قرار می دهیم که مشاهده می کنید در اینجا اطلاعات مقطع IPE200 داده شده است. هرچه تعداد تقسیم بندی در طول بال و جان بیشتر باشد، جواب مقطع در elastic به حالت elasticBeamColumn نزدیک تر خواهد شد.

در این مدل همانطور که دیده می‌شود، ابتدا مدلی سه بعدی و دارای شش درجه آزادی تعریف شده، فرق اول این مدل با مدل قبلی، متغیر سوم در تعریف گره می‌باشد که همان z نقاط است. اختلاف دیگر در درجات آزادی گیرداری است که از "x y Mz" به "x y z Mx My Mz" تبدیل شده است.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

تبدیلات هندسی در سه بعدی پیچیده می‌باشد که به‌صورت زیر گفته می‌شود:

transformation شامل ۳ گزینه دیگر نیز می‌شود :

۱- vecxzZ

۲- vecxzY

۳- vecxzX

که به شرح زیر می‌باشد:

در اینجا جهت Z المان خیلی مهم می‌باشد، جهت X المان که در طول خودش می‌باشد، مانند Etabs که جهت ۱ در طولش بود.

جهت Z و Y به تعریف شماست، می تواند در جهت قوی المان یا ضعیف المان باشد.

مثلا در فایل Wsection که بعدا قرار میدهم، جهت Z در جهت امتداد جان می‌باشد.

پس من اگر بخواهم ستون را طوری قرار دهم تا در جهت X کلی قوی باشد، جهت Z المان را در جهت X کلی قرار خواهم داد.

پس چون Z المان در جهت X کلی می‌باشد:

vecxzX=1

vecxzY=0

vecxzZ=0

انجمن سازه‌های فولادی ایران

سپس مصالح را تعریف می کنم چون در Wsection فرض شده مصالح قبلا داده شده است.

در مثال حال حاضر elastic تعریف می‌شود چون می‌خواهیم نتایج را با elasticBeamColumn مقایسه کنیم. سپس با Steel01 مصالح را غیرخطی تعریف می‌کنیم و مقایسه خواهیم کرد. در شکل زیر مدل غیرخطی steel01 نشان داده شده است که جایگزین elastic شده است.

```
#####################################
##   Define Material and Element   ##
#####################################

set E   2e6

geomTransf Linear 1 1 0 0

set Fy 2400
set b 0.01
uniaxialMaterial Steel01 1 $Fy $E $b

source Wsection.tcl
```

پس از تحلیل اختلاف مقادیر ویژه به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

سازه مدل شده با elasticBeamColumn

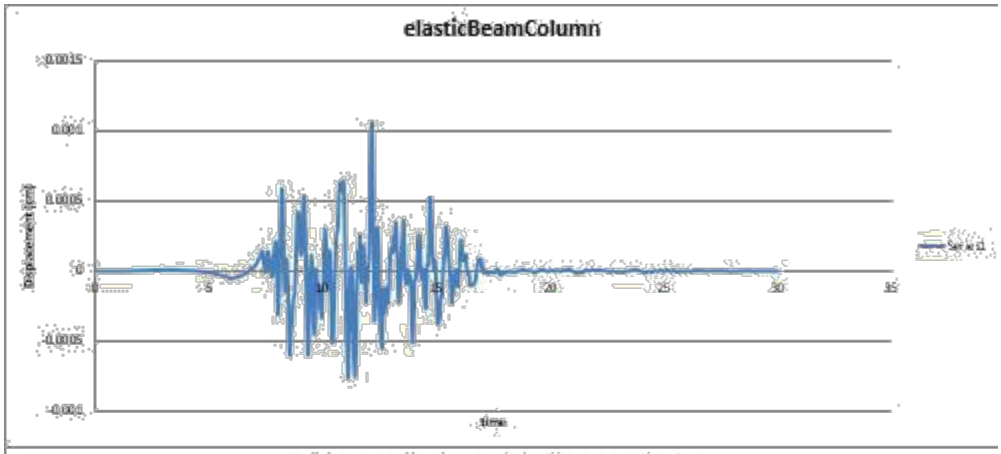
```
30.000000
Transient analysis completed SUCCESSFULLY
1.862400e+004
```

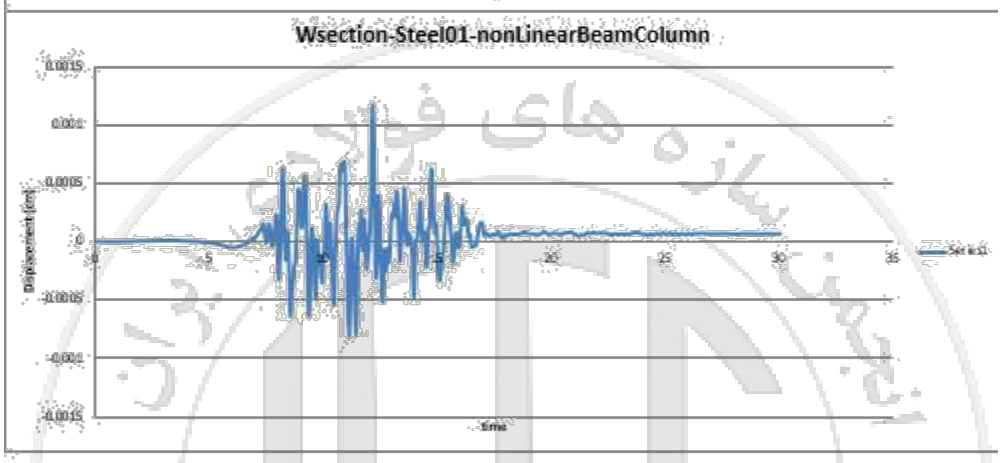
سازه مدل شده با Wsection

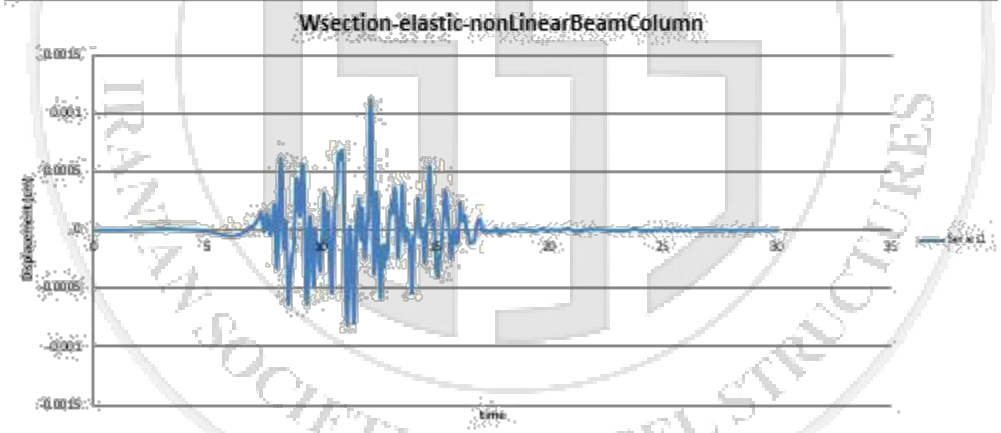
```
30.000000
Transient analysis completed SUCCESSFULLY
1.760745e+004
```

حال اگر تحت تحلیل تاریخچه زمانی سه حالت را مقایسه کنیم به‌صورت زیر خواهد شد:

انجمن سازه‌های فولادی ایران







انجمن سازه‌های فولادی ایران

۱۰-۲- تحلیل استاتیکی غیرخطی تحت بارهای ثقلی

این تحلیل همانند مثال آموزشی اول می‌باشد و به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

```
#################################
##   Define Gravity            ##
#################################

set Weight 2000.; # superstructure weight
set PCol $Weight; # nodal dead-load weight per column

pattern Plain 1 Linear {
   load 2 0 -$PCol 0 0 0 0
}

set GravSteps 10.
# Gravity-analysis parameters -- load-controlled static analysis
system UmfPack ; # solution procedure, how it solves system of equations

constraints Plain ; # how it handles boundry conditions, enforce constraints

test NormDispIncr 1.e-6 10 0;

algorithm Newton

numberer RCM ; # renumber dof's to minimize band-width

integrator LoadControl  [expr 1./$GravSteps]

analysis Static

analyze $GravSteps

puts "done gravity"

loadConst -time 0.
```

همانطور که می بینید، وزن روی ستون را ۲۰۰۰ کیلوگرم فرض کردیم، سپس بار را به صورت عمودی وارد کردیم.

در مرحله بعد گفتیم که در ۱۰ مرحله بار به سازه وارد شود و هر مرحله یک‌دهم بار اعمال شود.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

۱۱- جلسه دوازدهم

۱۱-۱- تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌اور)

جلسه قبل ستون یک درجه آزادی را تحت بار زلزله قرار داریم و تغییر مکان بام را پیدا کردیم.

همچنین تحت بار ثقلی نیز تحلیل کردیم. برای انجام تحلیل پوش‌اُور در ادامه بار ثقلی از کد زیر استفاده می‌کنیم:

```
############################
##   Define Analysis      ##
############################
set DmaxPush      [expr 0.05*15]
set DxPush        [expr 0.01*3]
set DminPush      [expr 0.001*3]

set PUSHOVER "DispControl"
# run displacement-controlled static pushover analysis

pattern Plain 2 Linear {
load $IDctrlNode 1. 0 0
}

integrator DisplacementControl $IDctrlNode 1 $DxPush 10 $DminPush $DxPush
set Nsteps [expr int($DmaxPush/$DxPush)]
```

در ابتدا مقدار جابه‌جایی هدف، جابه‌جایی هر گام و همچنین در مواقعی که به همگرایی نمی‌رسیم، جابه‌جایی حداقل تعریف شده است. سپس الگوی بار جانبی معرفی می‌شود. و در آخر دستور انتگرال‌گیری مختص پوش‌اور نوشته می‌شود.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

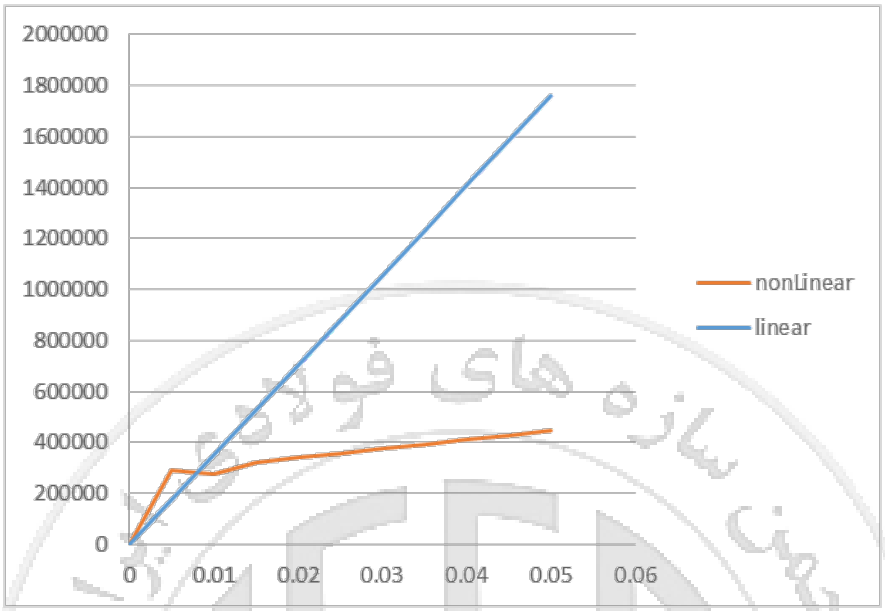
برای انجام تحلیل از دستور زیر استفاده می‌کنیم:

```
#################################
##    Perform The Analysis     ##
#################################

set ok [analyze $Nsteps];
# if analysis fails, try following performance is slowed inside this loop
if {$ok != 0} {
      set ok 0;
      set maxU $DmaxPush
      set controlDisp 0.0;
      test NormDispIncr 1.e-7 20 0
      while {$controlDisp < $maxU && $ok == 0} {
            set ok [analyze 1]
            set controlDisp [nodeDisp $IDctrlNode 1]
                  if {$ok != 0} {
                  puts "Trying Newton with Initial Tangent .."
                  test NormDispIncr   1.e-7 1000  1
                  algorithm Newton -initial
                  set ok [analyze 1]
                  test NormDispIncr 1.e-7 20  0
                  algorithm Newton
            }
            if {$ok != 0} {
                  puts "Trying Broyden .."
                  algorithm Broyden 8
                  set ok [analyze 1]
                  algorithm Newton
            }
            if {$ok != 0} {
                  puts "Trying NewtonWithLineSearch .."
                  algorithm NewtonLineSearch .8
                  set ok [analyze 1]
                  algorithm Newton
            }
      }; # end while loop
}; # end original if ok!=0 loop
```

در اینجا نیز دستور انجام تحلیل پوش‌اُور را می بینید که به صورت حلقه نوشته شده است و اگر تحلیل خطا بدهد، مثلا الگوریتم حل مسئله عوض خواهد شد و دوباره تحلیل انجام می‌شود.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

بعد از حل مسئله نمودار پوش‌اُور به صورت زیر خواهد شد که در مقایسه با حالت خطی آورده شده است:



۱۱-۲- تحلیل IDA:

```
wipe;
###------------------------------------------------------###
###    Please Enter Sa Records                       ###
###------------------------------------------------------###
set sa1 0.1;


set NEQ 1;                  # NEQ = Number of EarthQuake;
set incrGM 0.1;             # afzayeshe zarayeb baraye GM cheghadr bashad;
set maxGM 6.0;              # tahlile IDA ta che mazrabi az g anjam shavad;
set DtAnalysis 0.05;        # time-step Dt for lateral analysis
set TmaxAnalysis  40;       # maximum duration of ground-motion analysis -- should be 50*$sec
set xDamp 0.05;
set grav 9.81

###++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++

for {set n 1} {$n <= $NEQ} {incr n 1} {; # NEQ = Number of EarthQuake;
      set cc [set sa$n]
      set sa $cc
      puts ""
      puts "                    EQ $n <--------->  Sa$n = $sa"
      puts ""
```


انجمن سازه‌های فولادی ایران

در فایل بالا شما می توانید با چندین زلزله IDA انجام دهید و در عین حال قدرت آن‌ها را هر بار زیاد کنید. با دو حلقه تو در تو، ابتدا زلزله اول از قدرت ۰٫۱g تا مثلا ۳g به سازه اعمال می‌شود و نتایج ذخیره می‌شود، سپس زلزله بعد به سازه وارد می‌شود و به همین ترتیب در اول فایل، از شما Sa رکورد را می خواهد ، استفاده از آن برای شدت زلزله می‌باشد. همانطور که می‌دانید باید شدت زلزله را همیشه g قرار دهیم. چون فایل‌های دانلود شده از PEER ضریبی از g هستند. ولی ما ضریب زلزله را شدت IDA ضرب در g تقسیم بر Sa قرار می‌دهیم.

یعنی اگر Sa ما ۲٫۰ باشد، زمانی که قدرت زلزله در تحلیل IDA که مثلا از ۰٫۱ شروع شده است، به ۲٫۰ برسد، تازه شدت زلزله ۱g خواهد شد. پس از این قسمت که sa‌ها را معرفی کردید، تعداد زلزله را مشخص می‌کنید.

سپس ضریب افزایش شدت زلزله را مشخص می کنید که من ۰٫۱ فرض کردم. پس از آن مقدار آخر شدتی که میخواهید را یادداشت می کنید.

در ادامه اطلاعات مربوط به رکوردها را وارد می کنیم. که مثلا ما ۰٫۰۵ ثانیه فاصله بین شتاب‌ها و ۴۰ ثانیه زمان رکوردها را معرفی کرده ایم. سپس درصد دمپینگ سازه و مقدار شتاب زمین یا g وارد می‌شود.

و در قسمت بعدی شما شماره زلزله ای که می خواهید با آن شروع کنید را وارد می کنید، مثلا اگر ۵۰ تا زلزله دارید، میتوانید از شماره ۳۰ شروع به تحلیل کنید.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

```
###-------------------------------------------###
###         Start Steps Analysis          ###
###-------------------------------------------###

#=============================================================================#
# Example 5. 2D Frame --  Dynamic Earthquake Analysis                         #
#                         Silvia Mazzoni & Frank McKenna, 2006                #
#      execute this file after you have built the model, and after you apply gravity  #
#=============================================================================#

for {set factor 1} {$factor <= [expr $maxGM/$incrGM]} {incr factor 1} {;   #step=0.1 --> 3g
      set facc [expr $factor*$incrGM];
      puts "                          ****** Factor is $facc g ---> $maxGM g ******"
      puts "  ";
      puts "  ";
      set GMfact [expr $factor*$incrGM/$sa];     # ground-motion scaling factor
      set factor1 [expr 1+$factor]
      set k [expr $factor1+($n*100)];
      set dataDir Data($k);
      file mkdir IDA/$dataDir;
      set GMdir "GMfiles";
      wipe;

source nonLinearWsection.tcl;
#source mass.tcl
      loadConst -time 0.0;
      wipeAnalysis;                       # Clear OpenSees Model


recorder Drift -file IDA/$dataDir/Drift.out -time -iNode 1 -jNode 2 -dof 1 -perpDirn 2;
```

در اینجا شما شدتی که میخواهید تحلیل شروع شود، را وارد می کنید، مثلا جلوی factor اگر ۱۵ وارد کنید، یعنی از ۱۵×۰/۱ یا ۱/۵g تحلیل شروع شود. بصورت خلاصه تر بخواهم بگم، در قسمت file mkdir شما فولدری که داده‌ها در آن ذخیره می شوند را وارد می کنید.

و در پایین با source کردن، فایل مورد نظرتون را فراخوانی می کنید تا روی آن IDA انجام شود. با دستور loadConst زمان را برای تحلیل بعدی به ۰ بر میگردانید، و همچنین با wipeAnalysis اطلاعات زلزله قبلی را پاک می کنید، وگرنه ممکن است زلزله‌ها با هم جمع شوند و هر زلزله ادامه زلزله قبلی باشد.

در ادامه رکوردر خود را وارد می کنید، چون نمی‌خواهید رکوردها روی هم ذخیره شوند، برای هر زلزله و هر شدتی یک فولدر ساخته می‌شود که این رکوردرها داخل آن‌ها ریخته می‌شوند. پس نباید در جای دیگری تعریف شوند.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

```
###=========================================================###
###          Computed RAYLEIGH Damping                      ###
###            From Mode 1 & Mode 3                         ###
###=========================================================###
      rayleigh  0.0     0.0      0.0      0.05;                      # RAYLEIGH damping

###=========================================================###
###          End Assign RAYLEIGH Damping                    ###
###=========================================================###


# Uniform Earthquake ground motion (uniform acceleration input at all support nodes)
      set    GMfile       "$n" ;       # ground-motion filenames;
      set    GMdirection "1";          # ground-motion direction;

# ---------- set up analysis parameters ---------------#
source LibAnalysisDynamicParameters.tcl;  # constraints Handler, DOFnumberer,system-of equa

# ---------- perform Dynamic Ground-Motion Analysis ---------------#
      # the following commands are unique to the Uniform Earthquake excitation
      set IDloadTag 150;                  # for Uniform Support Excitation
      # Uniform EXCITATION: acceleration input;
      # read a PEER strong motion database file, extracts dt from the header and converts t
      # to the format OpenSees expects for Uniform/multiple-support ground motions
source ReadSMDFile.tcl;                   # read in procedure Multinition
      # Uniform EXCITATION: acceleration input;
      set inFile $GMdir/$GMfile.txt
      set outFile $GMdir/$GMfile.g3;            # set variable holding new filename (PEER f

      ReadSMDFile $inFile $outFile dt;          # call procedure to convert the ground-moti
      set GMfatt [expr $grav*$GMfact];    # data in input file is in g Units -- ACCELERATI
      set AccelSeries "Series -dt $dt -filePath $outFile -factor  $GMfatt";          # time
      pattern UniformExcitation  $IDloadTag  $GMdirection -accel  $AccelSeries;      # creat
      set Nsteps [expr int($TmaxAnalysis/$DtAnalysis)];
      set ok [analyze $Nsteps $DtAnalysis];      # actually perform analysis; returns ok=0 i
      if {$ok != 0} {;                  # analysis was not successful.
```

در ادامه، برای هر تحلیل دمپینگ رایلی تعریف می‌شود و تا قسمت source ReadSMDFile برای شما شاید لازم نباشد، چون من برای شلوغ نشدن فایل جداگانه ساختم تا پارامترهای لازم برای تحلیل در آن‌ها جمع شود.

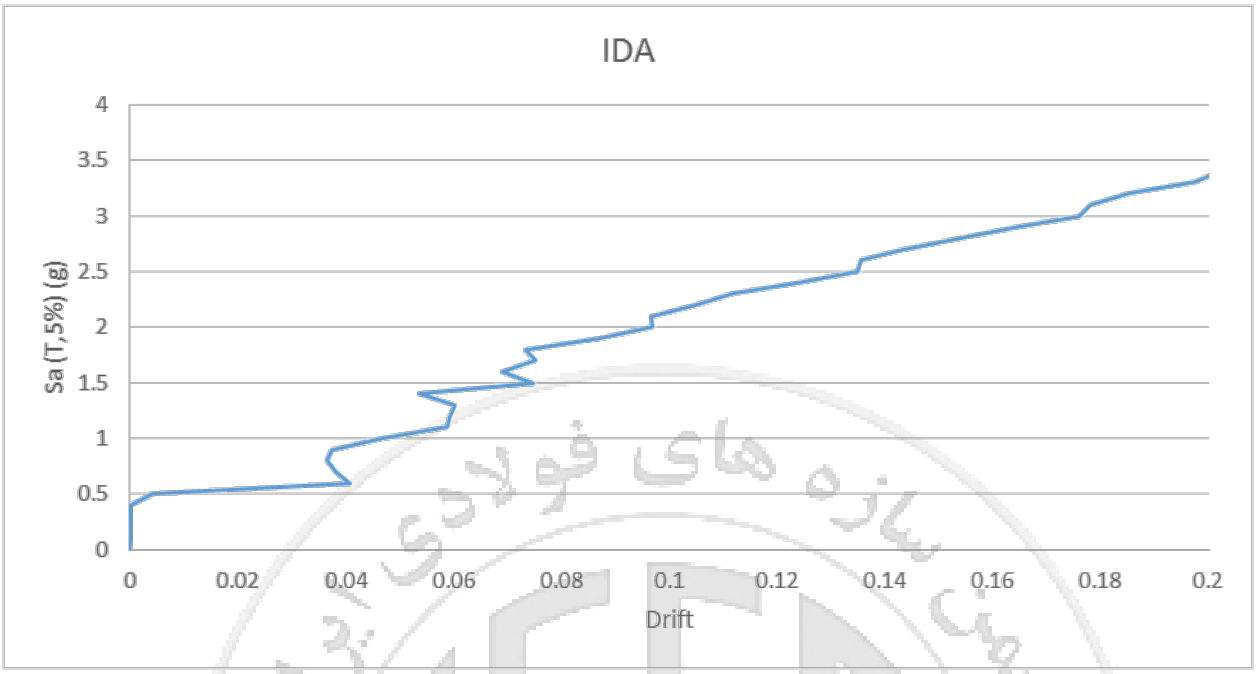
قسمت مهم ReadSMDFile می‌باشد که مخصوص فایل‌های گرفته شده از PEER هست، این فایل‌ها به صورت مستقیم توسط اپنسیس قابلیت خواندن ندارند، پس با برنامه ReadSMDFile آن‌ها را به فرمت اپنسیس تبدیل می کنیم. سپس بار زلزله را تعریف می کنیم و دستور تحلیل دینامیکی که قبلا گفته شده را وارد می‌کنیم.

انجمن سازه‌های فولادی ایران

```
        # ------------------------------------------------------------------------------
        # change some analysis parameters to achieve convergence
        # performance is slower inside this loop
        #    Time-controlled analysis
              set ok 0;
              set controlTime [getTime];
              while {$controlTime < $TmaxAnalysis && $ok == 0} {
                    set controlTime [getTime]
                    set ok [analyze 1 $DtAnalysis]
                    if {$ok != 0} {
                          puts "Trying Newton with Initial Tangent ..."
                          test NormDispIncr   $TolDynamic 1000  0
                          algorithm Newton -initial
                          set ok [analyze 1 $DtAnalysis]
                          test $testTypeDynamic $TolDynamic $maxNumIterDynamic  0
                          algorithm $algorithmTypeDynamic
                    }
                    if {$ok != 0} {
                          puts "Trying Broyden ..."
                          algorithm Broyden 8
                          set ok [analyze 1 $DtAnalysis]
                          algorithm $algorithmTypeDynamic
                    }
                    if {$ok != 0} {
                          puts "Trying NewtonWithLineSearch ..."
                          algorithm NewtonLineSearch 0.70
                          set ok [analyze 1 $DtAnalysis]
                          algorithm $algorithmTypeDynamic
                    };
              };
        };      # end if ok !0

};

puts "";
puts "                    Ground Motion Done. End Time: [getTime]";
};
};
puts "";
puts "                    Complete Analysis IDA";
puts "";
```

انجمن سازه‌های فولادی ایران

در آخر به نمودار زیر می‌رسید:



انجمن سازه‌های فولادی ایران

۱۱-۳- تحلیل شبه استاتیکی (سیکلیک)

آخرین مبحث این آموزش، تحلیل شبه استاتیکی می‌باشد، زمانی که میخواهید رفتار هیسترزیس یک ماده را ببینید، باید از این تحلیل استفاده کنید، همانند پوش‌اُور می‌باشد، ولی به‌صورت مثبت و منفی و جدا جدا پشت سر هم، کد آن به‌صورت زیر می‌باشد:

```
constraints Plain;
numberer Plain;
system BandGeneral;
test NormDispIncr 1.0e-8 60 ;
algorithm Newton ;

set disploop [list 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2.0]
for {set i 1} {$i<=20} {incr i 1} {
set dispincr [expr -1.0*pow((-1.0),[expr $i-1])*[lindex $disploop [expr $i-1]]/100]
integrator DisplacementControl 2 1 $dispincr;
analysis Static
analyze 100;
}


puts "Cyclic Done!"
```

در این کد، گره شماره ۲ در جهت x ابتدا تا 0.1- در ۱۰۰ گام طی می‌کند، سپس از 0.1- به اندازه 0.2+ در ۱۰۰ گام طی می‌کند، که به 0.1+ خواهد رسید، سپس 0.3- از آنجا طی می‌کند و به همین ترتیب پیش می‌رود.

پایان

انجمن سازه‌های فولادی ایران