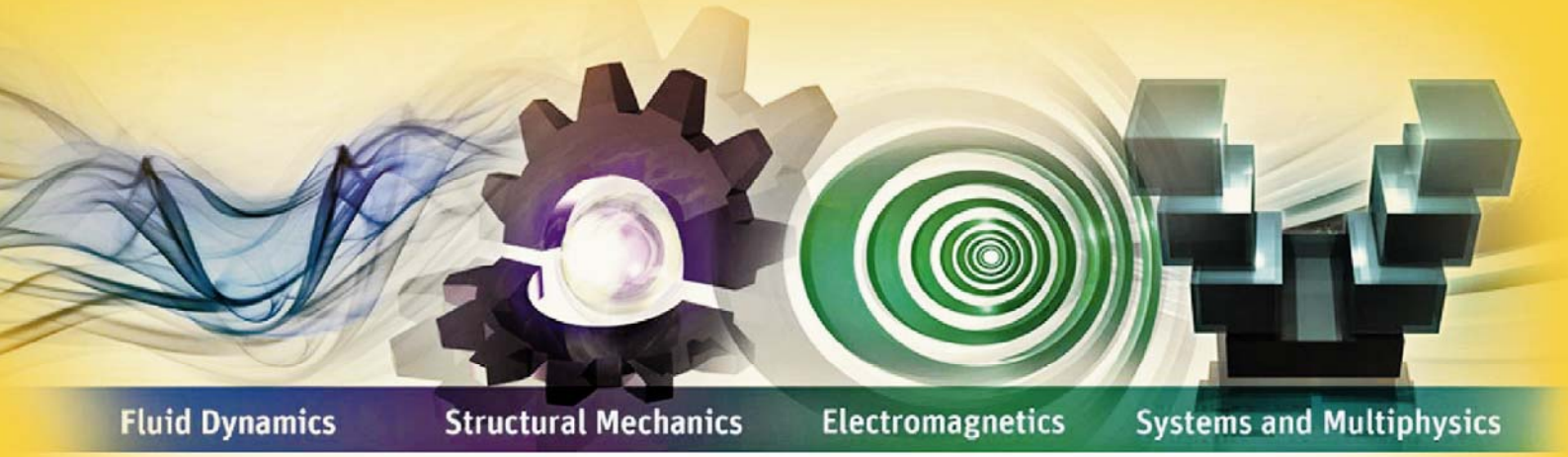
راهنمای کاربردی نرم افزار

ANSYS® v15.0

در مهندسی زلزله و سازه



مؤلف: دکتر محمد جواد جبارزاده

مؤسس پایگاه اینترنتی AnsysHelp.ir

سرشناسه	: جبارزاده، محمد جواد، ۱۳۵۳.
عنوان و نام پدیدآور	: راهنمای کاربردی نرم افزار ANSYS در مهندسی زلزله و سازه/ تألیف دکتر محمد جواد جبارزاده.
مشخصات نشر	: تهران: فرشچی، ۱۳۹۴.
مشخصات ظاهری	: ۴۶۰ ص، مصور، جدول، نمودار
شابک	: ۹۷۸-۶۰۰-۹۲۵۲۰-۳-۹
وضعیت فهرست‌نویسی	: فیپای مختصر
موضوع	: راهنمای نرم افزار اجزای محدود ANSYS
یادداشت	:فهرست نویسی کامل این اثر در نشانی: http://opac.nlai.ir قابل دسترسی است
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۸۱۶۱۹۴

راهنمای کاربردی نرم‌افزار ANSYS
در مهندسی زلزله و سازه

انتشارات فرشچی

مؤلف: دکتر محمد جواد جبارزاده

ویرایش: اول، ۱۳۹۴.

چاپ: اول، ۱۳۹۴.

تیراژ: ۲۰۰ جلد.

چاپ: پیشگام

ویراستار: ساره شهرستانی

طراح جلد: عاتکه احمدی

بهاء: ۳۰۰/۰۰۰ ریال

مرکز پخش: انتشارات سیمای دانش- تهران خیابان انقلاب، ۱۲ متری فروردین، پلاک ۳۱۸. تلفن: ۶۶۹۶۶۱۱۴-۵- تلفکس: ۶۶۴۶۴۷۷۹.

www.Simayedanesh.ir

کلیه حقوق برای مؤلف محفوظ است.

فهرست مطالب

پیشگفتار ۱
آشنایی با بخش‌های مختلف نرم افزار ANSYS ۳
۱. ۱. مقدمه ۳
۱. ۱. ۲. روش اجزای محدود ۴
۱. ۱. ۳. ساختار مدل‌سازی در ANSYS ۸
۱. ۱. ۴. سازمان‌دهی فصل ۸
۱. ۲. روشن کردن برنامه ۹
۱. ۳. ورود به برنامه ۹
۱. ۴. پنجره‌های اصلی نرم‌افزار ۱۰
۱. ۵. منوی اصلی یا Main Menu ۱۲
۱. ۵. ۱. بخش Preprocessor در Main Menu ۱۳
۱. ۵. ۲. بخش Solution در Main Menu ۱۵
۱. ۵. ۳. بخش General PostProc در Main Menu ۱۸
۱. ۵. ۴. بخش TimeHist PostPro در Main Menu ۲۴
۱. ۶. منوی ابزارها یا Utility Menu ۲۴
۱. ۶. ۱. بخش File در Utility Menu ۲۵
۱. ۶. ۲. بخش Select در Utility Menu ۲۸
۱. ۶. ۳. بخش List در Utility Menu ۲۹
۱. ۶. ۴. بخش Plot در Utility Menu ۳۰
۱. ۶. ۵. بخش Plot Ctrls در Utility Menu ۳۲
۱. ۶. ۶. بخش WorkPlane در Utility Menu ۳۴
۱. ۶. ۷. بخش Parameters در Utility Menu ۳۶
۱. ۶. ۸. بخش Help ۳۷
۱. ۷. المان‌های کاربردی ANSYS در مهندسی سازه ۳۹

۱. ۸. نحوه خروج از برنامه و ورود مجدد به آن ۵۰
۱. ۹. توصیه‌های مدل‌سازی و تحلیل ۵۲
۱. ۱۰. جداول آدرس یابی ۵۴
۱. ۱۱. مراجع ۵۴
تحلیل ورق فولادی تحت کشش با رفتار الاستیک خطی ۵۵
۲. ۱. مقدمه ۵۵
۲. ۲. مدل A، شبیه سازی ورق تحت کشش با اتصال جوشی ۵۷
۲. ۲. ۱. ساخت مدل ۵۸
۲. ۲. ۲. المان بندی ۷۰
۲. ۲. ۳. بارگذاری و تحلیل ۷۷
۲. ۲. ۴. مشاهده نتایج ۸۲
۲. ۲. ۵. خروج از برنامه ۹۱
۲. ۳. مدل B، شبیه سازی ورق تحت کشش با اتصال پیچی ۹۲
۲. ۳. ۱. مدل‌سازی ۹۳
۲. ۳. ۲. بارگذاری و تحلیل ۹۸
۲. ۳. ۳. مشاهده نتایج ۱۰۲
۲. ۴. مرجع ۱۰۴
مدل‌سازی و تحلیل خرپای فلزی دو بعدی ۱۰۵
۳. ۱. مقدمه ۱۰۵
۳. ۲. ساخت مدل ۱۰۷
۳. ۳. بارگذاری و تحلیل ۱۲۷
۳. ۴. مشاهده نتایج ۱۳۰
۳. ۵. مرجع ۱۳۵
مدل‌سازی و تحلیل قاب دو بعدی الاستیک خطی ۱۳۹

۴. ۱. مقدمه ۱۳۹
۴. ۲. مدل‌سازی قاب ۱۴۰
۴. ۲. ۱. ساخت مدل ۱۴۱
۴. ۳. بارگذاری و تحلیل ۱۶۲
۴. ۴. مشاهده نتایج ۱۶۸
۴. ۵. مرجع ۱۸۵
مدل‌سازی یک تیر کنسولی با المان Shell و Beam ۱۸۷
۵. ۱. مقدمه ۱۸۷
۵. ۲. مدل‌سازی ۱۸۹
۵. ۲. ۱. بخش اول – هندسه پوسته‌ای ۱۸۹
۵. ۲. ۲. بخش دوم - مدل‌سازی تیر ۲۰۵
۵. ۳. بارگذاری و تحلیل ۲۱۴
۵. ۴. مشاهده نتایج ۲۱۶
۵. ۴. ۱. تغییر شکل تیر ۲۱۶
۵. ۴. ۲. عکس‌العمل تکیه گاهی و برش در بخش Shell ۲۱۸
مدل‌سازی حجمی طاق و جرز بنایی با رفتار الاستیک خطی ۲۲۷
۶. ۱. مقدمه ۲۲۷
۶. ۲. آشنایی با صفحه کار ۲۲۹
۶. ۳. مدل‌سازی ۲۳۸
۶. ۴. المان‌بندی ۲۵۹
۶. ۵. بارگذاری و تحلیل ۲۶۲
۶. ۶. مشاهده نتایج ۲۶۵
۶. ۷. تمرین ۲۷۴

مقدمه‌ای بر رفتار غیر خطی مصالح و روش‌های مدل‌سازی و تحلیل آن در ANSYS ۲۷۵

۷. ۱. مقدمه ۲۷۵
۷. ۲. رفتار غیر خطی مصالح ۲۷۶
۷. ۲. ۱. رفتار غیر خطی فولاد ۲۷۶
۷. ۲. ۲. رفتار غیر خطی بتن ۲۷۹
۷. ۳. مدل‌سازی رفتار غیر خطی مصالح ۲۸۱
۷. ۳. ۱. معیارهای جاری شدگی ۲۸۳
۷. ۳. ۱. الف. معیار جاری شدگی ترسکا ۲۸۴
۷. ۳. ۱. ب. معیار جاری شدگی فون – میسز ۲۸۵
۷. ۳. ۲. معیارهای گسیختگی برای مصالح غیر فلزی ۲۸۷
۷. ۳. ۲. الف. مدل گسیختگی رانکین یا مدل تنش کششی حداکثر ۲۸۷
۷. ۳. ۲. ب. معیار گسیختگی مور – کلمب ۲۸۹
۷. ۳. ۲. پ. معیار گسیختگی دراکر-پراگر ۲۹۲
۷. ۳. ۲. ت. معیار گسیختگی ویلام-وارنکی ۲۹۴
۷. ۴. مدل‌های غیر خطی مصالح در نرم‌افزار ANSYS ۲۹۷
۷. ۴. ۱. پلاستیسیته مستقل از سرعت ۲۹۷
۷. ۴. ۱. الف. مبانی تئوری ۲۹۸
معیار جاری شدن ۲۹۸
قانون جریان ۲۹۹
قانون سخت شوندگی ۳۰۰
۷. ۴. ۱. ب. مدل‌های مصالح پلاستیک مستقل از سرعت ۳۰۱
سخت شوندگی کینماتیک دو خطی (Bilinear Kinematic Hardening) ۳۰۱
سخت شوندگی کینماتیک چند خطی (Multilinear Kinematic Hardening) ۳۰۲
سخت شوندگی کینماتیک غیر خطی (Nonlinear Kinematic Hardening) ۳۰۳

سخت شوندگی ایزوتروپیک دوخطی (Bilinear Isotropic Hardening) ۳۰۳
سخت شوندگی ایزوتروپیک چندخطی (Multilinear Isotropic Hardening) ۳۰۳
سخت شوندگی ایزوتروپیک غیر خطی (Nonlinear Isotropic Hardening) ۳۰۴
غیر ایزوتروپیک (Anisotropic) ۳۰۵
دراکر-پراگر (Drucker-Prager) ۳۰۵
چدن (Cast Iron) ۳۰۵
۷. ۴. ۲. پلاستیسیته وابسته به سرعت ۳۰۶
۷. ۴. ۳. مصالح درزبند (Gasket) ۳۰۷
۷. ۴. ۴. غیر خطی الاستیک ۳۰۸
۷. ۴. ۵. مدل آلیاژ حافظه‌دار (Shape Memory Alloy Material Model) ۳۰۸
۷. ۴. ۶. هایپر الاستیسیته ۳۰۹
۷. ۴. ۷. ویسکوالاستیسیته ۳۱۱
۷. ۴. ۸. بتن ۳۱۲
۷. ۵. حل معادلات غیر خطی در ANSYS ۳۱۲
۷. ۵. ۱. روش نیوتن-رافسون ۳۱۳
۷. ۵. ۲. همگرایی ۳۱۷
۷. ۵. ۳. گزینه Predictor ۳۱۹
۷. ۵. ۴. روش Adaptive Descent ۳۲۰
۷. ۵. ۵. گزینه Line Search ۳۲۱
۷. ۵. ۶. روش Arc-Length ۳۲۲
۷. ۶. مراجع ۳۲۴
بارگذاری تناوبی یک تیر کنسولی فولادی با رفتار غیر خطی ۳۲۵
۸. ۱. مقدمه ۳۲۵
۸. ۲. مصالح غیر خطی ۳۲۸
۸. ۳. بارگذاری ۳۳۰

۸. ۴. مشاهده نتایج ۳۴۳
۸. ۵. تحلیل با مصالح فولادی با رفتار الاستو پلاستیک سخت شونده ۳۵۳
۸. ۶. مرجع ۳۵۵
مدل‌سازی و تحلیل غیر خطی یک تیر بتنی مسلح ۳۵۷
۹. ۱. مقدمه ۳۵۷
۹. ۲. آشنایی با المان SOLID 65 ..... ۳۵۹
۹. ۲. ۱. فرمول‌بندی ماتریسی المان با رفتار غیر خطی ۳۵۹
۹. ۳. مدل‌سازی تیر بتنی ۳۶۳
۹. ۳. ۱. ساخت بخش اول – مدل‌سازی حجمی ۳۶۳
۹. ۳. ۲. ساخت بخش دوم – مدل‌سازی هندسه خطی ۳۸۰
۹. ۴. بارگذاری، تحلیل و مشاهده نتایج ۳۸۲
۹. ۵. مراجع ۳۹۵
تحلیل مودال، طیفی و دینامیکی تاریخچه زمانی یک مدل سه درجه آزاد دینامیکی ۳۹۷
۱۰. ۱. مقدمه ۳۹۷
۱۰. ۲. مدل‌سازی ۴۰۰
۱۰. ۳. بارگذاری و تحلیل مودال ۴۰۵
۱۰. ۴. مشاهده نتایج تحلیل مودال ۴۰۹
۱۰. ۵. تحلیل طیفی ۴۱۴
۱۰. ۶. مشاهده نتایج طیفی ۴۲۳
۱۰. ۷. تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی مدل سه فنری ۴۲۵
۱۰. ۸. تحلیل و مشاهده نتایج ۴۳۴
۱۰. ۹. مرجع ۴۴۲
پیوست الف: جداول آدرس یابی ۴۴۳

پ. ۱. جداول آدرس یابی ۴۴۳
پ. ۱. ۱. گره (Node) ۴۴۴
پ. ۱. ۲. المان (Element) ۴۴۵
پ. ۱. ۳. المان بندی (Meshing) ۴۴۶
پ. ۱. ۴. نقطه (Keypoiny) ۴۴۷
پ. ۱. ۵. خط (Line) ۴۴۸
پ. ۱. ۶. سطح (Area) ۴۴۹
پ. ۱. ۷. حجم (Volume) ۴۵۰
پ. ۱. ۸. اجزاء ۴۵۰
پ. ۱. ۹. کامپوننت (Component) ۴۵۱
پ. ۱. ۱۰. مدل ۴۵۱
پ. ۱. ۱۱. مصالح (Material) و مصالح غیر خطی (Data Table) ۴۵۱
پ. ۱. ۱۲. تحلیل (Solution) ۴۵۲
پ. ۱. ۱۳. بارگذاری (Loading) ۴۵۲
پ. ۱. ۱۳. ۱. تکیه‌گاه ۴۵۲
پ. ۱. ۱۳. ۲. نیروی متمرکز ۴۵۳
پ. ۱. ۱۳. ۳. بار سطحی ۴۵۳
پ. ۱. ۱۳. ۴. نیروی اینرسی ۴۵۴
پ. ۱. ۱۳. ۵. گام بارگذاری، فایل بارگذاری ۴۵۴
پ. ۱. ۱۴. نتایج (Results) ۴۵۵
پ. ۱. ۱۴. ۱. نتیجه بر مسیر هندسی ۴۵۵
پ. ۱. ۱۴. ۲. برش سازه ای (Surface) ۴۵۶
پ. ۱. ۱۴. ۳. حالت بار (Load Case) ۴۵۶
پ. ۱. ۱۴. ۴. متغیر زمانی (Variables) ۴۵۷
پ. ۱. ۱۵. دستگاه مختصات (Coordinate System) و صفحه کار (WorkPlane) ۴۵۷
پ. ۱. ۱۶. پارامتر (Parameter) ۴۵۸
پ. ۱. ۱۷. پنجره نمایش ۴۵۸

پ. ۱. ۱۸. فایل و Jobname ۴۵۹
پ. ۱. ۱۹. دستورات برنامه (Commands) ۴۵۹
پ. ۱. ۲۰. خروجی‌ها ۴۶۰
پ. ۱. ۲۱. خروج ۴۶۰

پیشگفتار

مدل‌سازی رفتار مکانیکی و دینامیکی اجسام از جالب‌ترین و کاربردی‌ترین مباحث علمی است. مدل‌سازی و شناسایی رفتار یک جسم در برابر شرایط محیطی دربرگیرنده‌اش و پیش‌بینی رفتاری هر چه نزدیک‌تر به واقعیت، توانایی طراحی با کارایی بهتر و اقتصادی‌تر را فراهم می‌سازد.

روش اجزای محدود یکی از ابزارهای ریاضی این شناخت است که به صورت نرم‌افزارهای قدرتمند با نام‌های گوناگون در اختیار مهندسان قرار گرفته است. از جمله این نرم‌افزارها ANSYS است که گستردگی فراوانی در تحلیل‌های استاتیکی، دینامیکی، حرارتی و ... دارد. در این نرم‌افزار دامنه وسیعی از المان‌ها برای مدل‌سازی دو و سه بعدی با هندسه خطی، صفحه‌ای و حجمی ارائه شده است که برای شبیه سازی رفتار جامدات، سیالات، محیط‌های الکترومغناطیسی و مسائل حرارتی کاربرد دارند.

کتاب آموزشی کار با نرم‌افزار ANSYS ویژه مهندسان سازه با محور قرار دادن پروژه‌های متداول در مهندسی عمران پایه ریزی و تهیه شده است. هدف مؤلف آموزش گام به گام مهندسان سازه در استفاده از نرم‌افزار است، بدین جهت ترتیب فصول کتاب از آشنایی با نرم‌افزار آغاز و به مدل‌سازی‌ها و تحلیل‌های پیچیده و تخصصی‌تر منتهی می‌شود. بنابراین کاربرانی که قبلاً با نرم‌افزار ANSYS آشنا بوده و یا از آن استفاده کرده‌اند می‌توانند تنها از فصلی که با زمینه نیازشان مرتبط است استفاده نمایند.

با وجود قابلیت‌های گرافیکی و ابزاری که نرم‌افزار ANSYS در اختیار قرار می‌دهد همواره تأکید می‌شود که مهندسان و دانشجویان قبل از استفاده از چنین نرم‌افزارهایی، دوره‌های آموزش روش مدل‌سازی و تحلیل اجزای محدود را گذرانده و با مفاهیم آن آشنا باشند. نرم‌افزار ANSYS یک ابزار برای تسهیل در تأمین نیازهای مهندسی است و همانند سایر ابزارها هنگامی مفید است که توسط متخصص و آگاه به نحوه کارکرد آن بکار رود.

از کلیه کسانی که درباره نحوه تدوین، روش ارائه مطالب، نوع مثال‌ها و سایر موارد در تهیه کتاب انتقاد یا پیشنهادی دارند صمیمانه تقاضا می‌شود که نکات ارزشمند خود را به آدرس اینترنتی AnsysHelp.ir@gmail.com ارسال فرمایند. همچنین به علاقه‌مندان مباحث مدل‌سازی پیشنهاد می‌شود برای مطالعه گزارش‌ها و نکات آموزشی، به پایگاه اینترنتی AnsysHelp.ir مراجعه نموده و در صورت تمایل تجارب خود را به اشتراک گذارند.

دکتر محمد جواد جبارزاده – بهار ۱۳۹۴

فصل اول

آشنایی با بخش‌های مختلف نرم افزار ANSYS

۱. ۱. مقدمه

انتخاب هر ابزار مهندسی بر اساس انطباقِ کارایی و توانایی آن برای انجام وظیفه مشخصی که مد نظر کاربر است صورت می‌گیرد. بنابراین قبل از انتخاب هر ابزار لازم است با مزایا، محدودیت‌ها و حوزه عملکرد آن و به عبارت کلی‌تر فضای کارکردی آن آشنا شد. این شناخت همانند دید پرنده‌ای است که از آسمان به زمین می‌نگرد؛ درک و انتخاب مسیرهای مختلف در چنین نگاهی به مراتب جامع‌تر از کسی است که روی سطح زمین در جستجوی مسیر درست است.

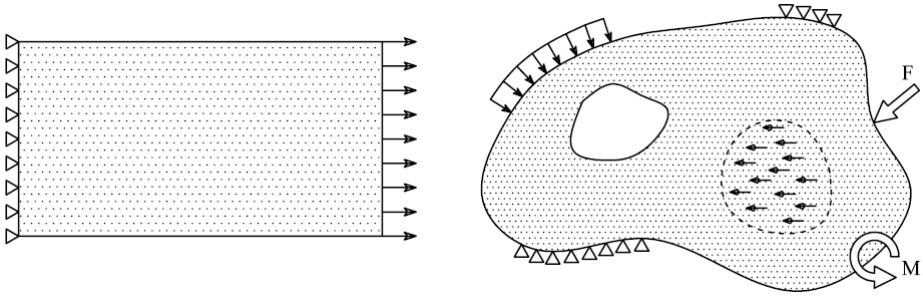
هدف از این فصل دریافت دیدی همانند پرنده نسبت به ویژگی‌های مدل‌سازی و تحلیلی نرم‌افزار ANSYS است. با سرکشی به منوهای مختلف و گزینه‌های زیر مجموعه آنها، نگاهی از

بالا برای کاربر فراهم می‌شود تا زمینه مناسب برای مطالعه جزئیات بیشتر در فصول بعدی فراهم شود.

دیدگاه مؤلف در تهیه این کتاب، آماده سازی آن برای مهندسان با گرایش عمران-سازه یا عمران-زلزله بوده است. بنابراین معرفی ابزارها و کاربردهای آنها در همین چارچوب صورت گرفته است. کاربر پس از آشنایی با این گزینه‌ها می‌تواند طیف وسیعی از نیازهای مدل‌سازی و تحلیلی خود را برطرف نماید. سعی شده است که تا حد امکان ارائه اطلاعات به‌صورت تصویری صورت گیرد. استفاده از تصویر نه تنها انتقال اطلاعات به خواننده را تسریع می‌کند، بلکه ماندگاری بیشتری در ذهن او ایجاد خواهد کرد.

۱. ۱. ۲. روش اجزای محدود

هنگامی که یک سازه هندسه منظمی داشته و بارگذاری آن ساده باشد، شاید بتوان با استفاده از معادلات دیفرانسیل حاکم بر رفتار آن و اعمال شرایط مرزی، مقادیر تنش و کرنش یا جابجایی و نیرو را در قسمت‌های مختلف آن محاسبه و نتایج مهندسی مطلوب را برای طراحی یا کنترل سازه بدست آورد. برای مثال می‌توان به تحلیل یک ورق مستطیلی تحت بار گسترده در لبه‌های آن اشاره کرد، شکل ۱-۱-الف [۱ و ۲]. اما اگر هندسه مدل پیچیده‌تر و بارگذاری آن متنوع‌تر باشد، آنگاه تحلیل و بدست آوردن نتیجه با استفاده از روش مستقیم حل معادلات دیفرانسیل به‌سادگی امکان نداشته و یا غیر ممکن است، شکل ۱-۱-ب.



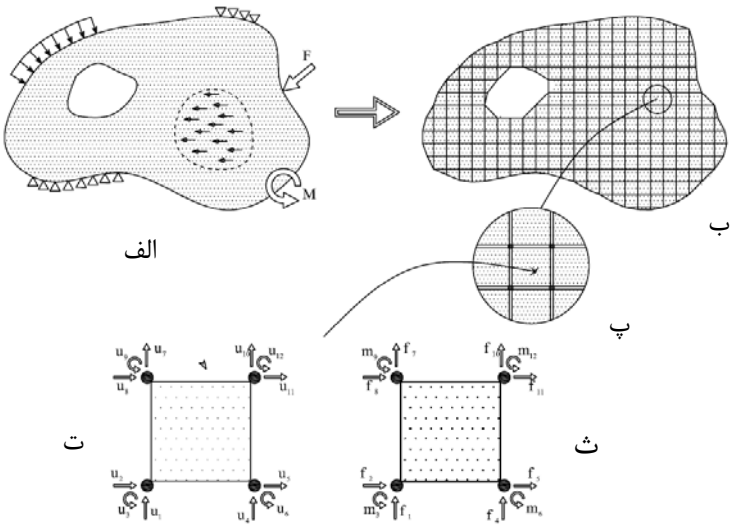
الف.هندسه و شرایط مرزی ساده امکان حل بسته را فراهم می‌سازد

ب.شرایط مرزی و هندسه پیچیده حل بسته را بسیار دشوار یا غیر ممکن می‌سازد

شکل ۱-۱ مقایسه دو مدل با هندسه و شرایط مرزی ساده و پیچیده

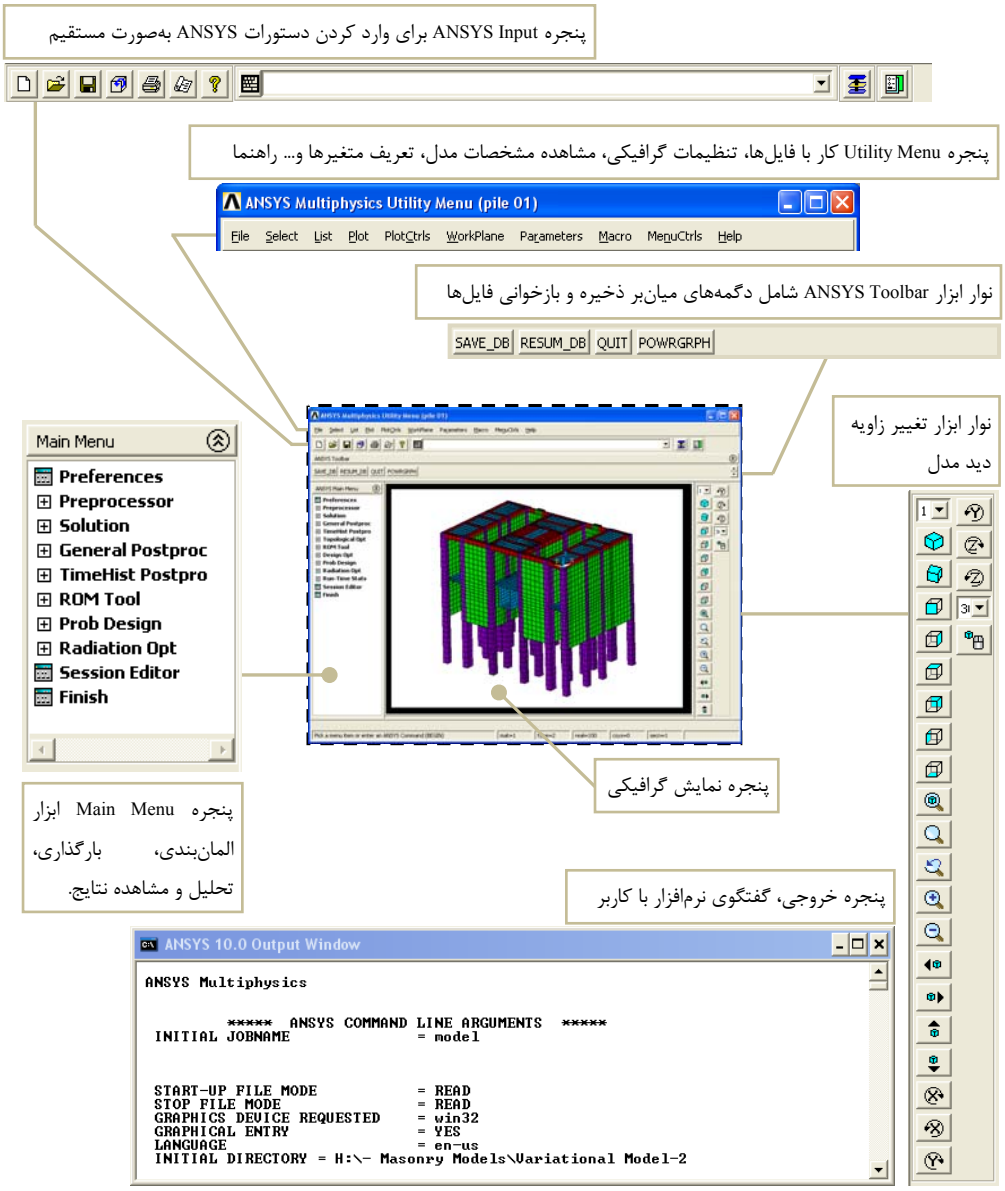
ریاضیدانان و مهندسان برای حل این مشکل روشی ابداع نمودند که بر پایه فلسفه‌ای ساده بنیان آن بنا شده بود. مطابق با این فلسفه فکری که منسوب به ارسطو است برای حل یک مسئله پیچیده ابتدا آن را به مسائل کوچک‌تر تقسیم کرده و سپس هر مسئله کوچک به تنهایی حل می‌شود. به این ترتیب با حل کلیه مسائل کوچک‌تر می‌توان به حل مسئله اصلی دست پیدا کرد. بر این اساس برای حل یک سازه پیچیده مانند آنچه در شکل ۱-۲-الف نشان داده شده است، ابتدا هندسه آن به اجزای کوچک‌تری که به آنها المان گفته می‌شود تقسیم می‌شود، شکل ۱-۲-ب. اگر بتوان رفتار این قطعه کوچک را فرمول‌بندی نمود آنگاه می‌توان با ترکیب جواب المان‌ها پاسخ کل سازه را بدست آورد. برای تعریف رفتار المان از یک فرض ساده استفاده می‌شود. این فرض ساده شده تعریف گره در گوشه‌های المان است، شکل ۱-۲- پ. بطوری که اتصال هر المان با المان‌های مجاور به جای یک مرز پیوسته تنها از طریق گره‌ها صورت می‌گیرد.

در هر المان تغییر شکل‌های نقاط داخلی و پیرامونی به‌صورت تابعی از تغییر شکل‌های گره‌های آن تعریف می‌شود. از طرفی برای هر گره جهت‌های جابجایی از پیش تعیین شده‌ای در نظر گرفته شده است. مانند جابجایی دو یا سه بعدی، دوران دو یا سه بعدی یا ترکیبی از آنها. به این جابجایی‌ها درجات آزادی گفته می‌شود. شکل ۱-۲-ت. به این ترتیب کلیه حالات متصور برای تغییر شکل المان به کمک چند متغیر محدود، قابل توصیف است.



شکل ۱-۲ خرد کردن یک مدل پیچیده به اجزای کوچک‌تر

صفحات میانی حذف شده اند



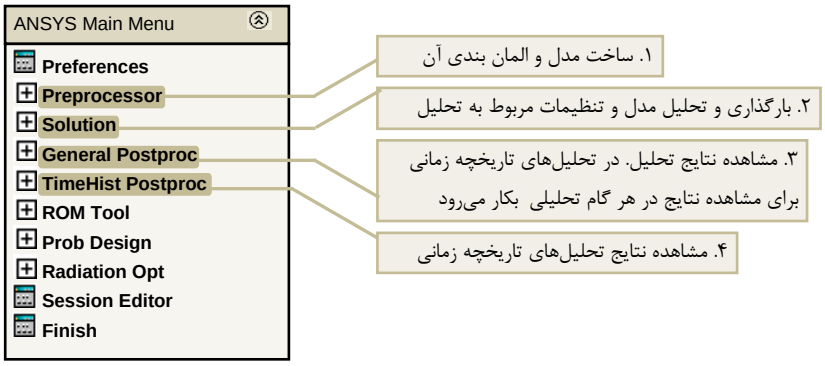
شکل ۱-۴ پنجره‌ها و نوارابزارهای اصلی نرم‌افزار ANSYS

ANSYS Input نوار سفید رنگی است که برای ورود اطلاعات به نرم‌افزار بکار می‌رود. بطور کلی اجرای یک دستور یا کاربرد یک گزینه به دو صورت یکی به کمک پنجره‌ها و منوهای برنامه و دیگری به کمک دستورات استاندارد برنامه امکان پذیر است. نوار ANSYS Input برای وارد کردن این دستورات بکار می‌رود. ANSYS Toolbar که در زیر Utility Menu قرار گرفته شامل

برخی دگمه‌های کاربردی است که از جمله آنها Save_DB و Resume_DB به ترتیب برای ذخیره و بازخوانی یک مدل است.

پنجره گرافیکی برای نمایش و کار با مدل و ارائه نتایج آن بکار می‌رود. در سمت راست این پنجره نوار ابزاری قرار دارد که برای تغییر وضعیت دید به مدل تعبیه شده است. در این نوار ابزار زوایای دید از پیش تعریف شده به همراه کنترل‌های حرکت دلخواه مدل پیش بینی شده‌اند. همچنین امکان بزرگنمایی و کوچک نمایی مدل نیز در آن قرار داده شده است.

آخرین پنجره ANSYS Output است. این پنجره سیاه‌رنگ عموماً در پشت پنجره‌های اصلی برنامه قرار می‌گیرد. ANSYS Output پنجره‌ای برای گفتگوی برنامه با کاربر است. بطوریکه کارهای انجام شده، اخطارها، هشدارها و ... را به اطلاع کاربر می‌رساند.



شکل ۱-۵ بخش‌های Main Menu

۱.۵. منوی اصلی یا Main Menu

منوی اصلی یا Main Menu برای ساخت مدل هندسی و المان بندی آن، بارگذاری و تحلیل و مشاهده نتایج تحلیل‌ها بکار می‌رود. در این کتاب چهار بخش اصلی در این منو مورد توجه هستند که عبارت‌اند از:

- Preprocessor برای ساخت مدل و المان‌بندی و عموماً عملیات قبل از تحلیل بکار می‌رود،
- Solution برای بارگذاری و تنظیمات تحلیلی و انجام تحلیل بکار می‌رود،
- General Postproc برای مشاهده نتایج هر گام بارگذاری استفاده می‌شود،
- TimeHist Postpro جهت استخراج نتایج وابسته به زمان بکار می‌رود، شکل ۱-۵.

در ادامه اجزای هر بخش معرفی می‌شوند. برای معرفی گزینه‌های هر بخش در هر شکل از سه عدد استفاده شده است. دو عدد اول حاوی شماره شکل و عدد سوم شماره ارجاع به آن گزینه است که در آن شکل آدرس دهی شده است. برای مثال منظور از گزینه ۱-۶-۳، گزینه شماره ۳ در شکل ۱-۶ است.

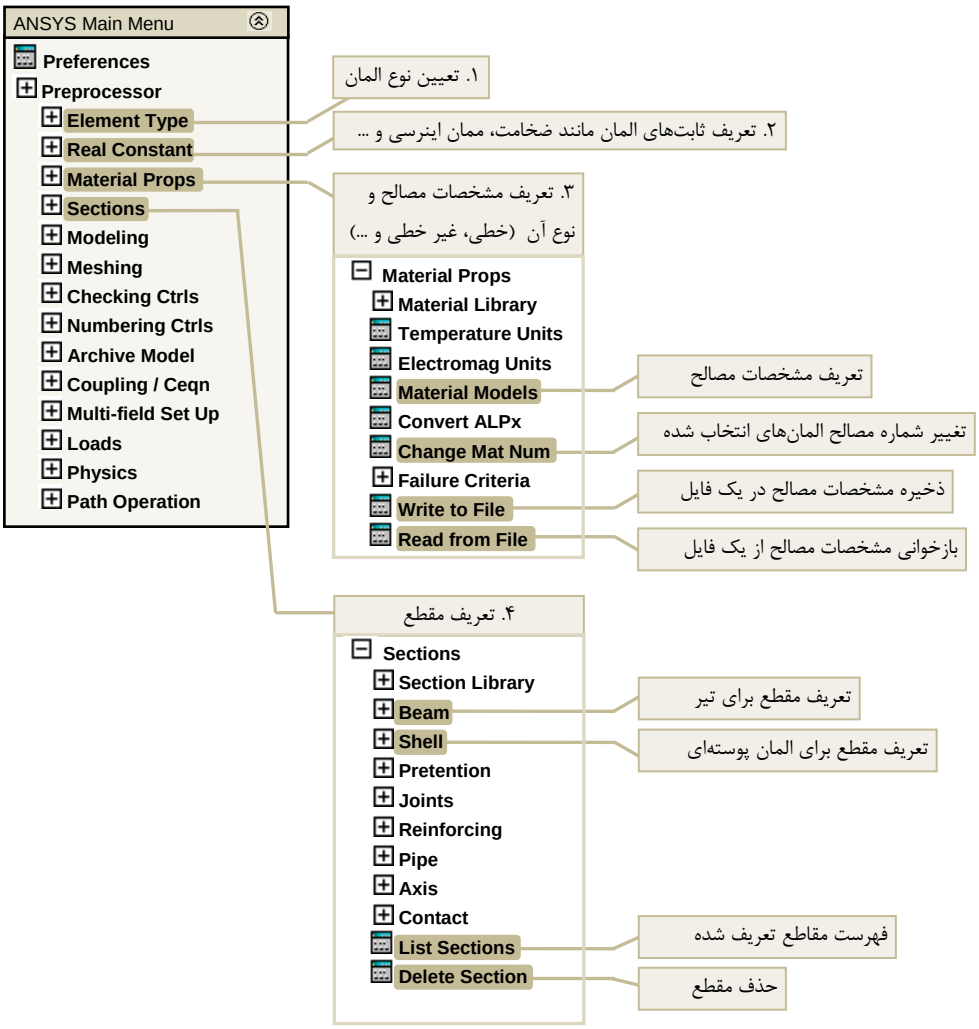
۱. ۵. ۱. بخش Preprocessor در Main Menu

برای مدل‌سازی یک سازه ابتدا لازم است المان مناسبی برای المان بندی انتخاب شود. در ANSYS مجموعه متنوعی از المان‌ها با ساختار نقطه‌ای، خطی، سطحی و حجمی در دسترس‌اند که می‌توانند رفتار خطی یا غیر خطی داشته باشند. انتخاب المان در بخش Element Type صورت می‌گیرد، شکل ۱-۶ شماره ۱. مجموعه‌ای از المان‌های کاربردی در مهندسی سازه در بخش ۱-۷ این فصل بطور مختصر معرفی شده است.

بسته به نوع المان انتخاب شده برخی مشخصات مانند ضخامت یا سطح مقطع و ... باید تعیین شوند. برخی از المان‌ها نیز فاقد این ویژگی هستند که از آن جمله می‌توان به برخی Solidها اشاره کرد. تعیین این مشخصات در بخش Real Constant، گزینه ۱-۶-۲، یا Section، گزینه ۱-۶-۴، صورت می‌گیرد. مفهوم المان و ثابتهای آن به تنهایی برای ساخت یک مدل سازه‌ای قابل تحلیل کافی نیست. برای تکمیل این فرآیند باید نوع رفتار مصالح نیز تعریف شود تا امکان تشکیل ماتریس‌های سختی، جرم یا میرایی توسط برنامه فراهم آید. مشخصات مصالح در Material Props به نرم‌افزار وارد می‌شود، گزینه ۱-۶-۳.

پس از معرفی ورودی‌های فوق باید هندسه مدل در نرم‌افزار شبیه سازی شود، شکل ۱-۷. با شبیه سازی هندسه مدل و نسبت دادن مشخصات المان و مصالح می‌توان آن را المان بندی کرده و به یک مدل قابل تحلیل تبدیل نمود. ابزارهای ساخت هندسه در بخش Modeling، گزینه ۱-۷-۱، و المان بندی آن در بخش Meshing قرار دارند، گزینه ۱-۷-۲.

در برخی مدل‌ها کاربر باید گره‌ها یا نقاط مجاور را به یکدیگر متصل سازد. این کار برای اتصال دو قطعه از مدل بکار می‌رود تا رفتاری همسان در محل اتصال داشته باشند. در برخی موارد نیز مناسب است که شماره اجزای مدل مانند گره‌ها، المان‌ها... مجدداً مرتب شوند. این گزینه‌ها در بخش Numbering Ctrls تعبیه شده‌اند، شکل ۱-۸ شماره ۱.



شکل ۱-۶ گزینه‌های بخش PreProcessor

برای استفاده از یک مدل در سایر پروژه‌ها یا ساخت اجزای مدل بطور جداگانه و ترکیب آنها در یک مدل نهایی لازم است که امکان ذخیره و بازخوانی بخش مورد نظر در دسترس باشد. این امکان در Archive Model برای کاربر فراهم شده است، گزینه ۱-۸-۲.

وابسته ساختن درجات آزادی چند گره مشخص به کمک گزینه Coupling/Ceqn صورت می‌گیرد. با این گزینه می‌توان یک بخش صلب ایجاد کرد و یا حرکت نسبی بین گره‌ها را در جهت مشخصی مانع شد، گزینه ۱-۸-۳.

بارگذاری مدل هم در بخش Preprocessor و هم Solution امکان پذیر است. انواع بارگذاری

صفحات میانی حذف شده اند

جدول ۱-۱۰ مشخصات المان‌های Contact

نام المان	ابعاد هندسی	تعداد گره‌ها	درجات آزادی	قابلیت‌های مدل‌سازی و تحلیلی
Conta 171	2D	۲	Ux,Uy	شبیه سازی تماس اتکایی و لغزش بین یک سطح هدف (Target) و یک سطح انعطاف‌پذیر دو بعدی با دو گره، همراه با Target 169 بکار می‌رود، فقط فشاری، اصطکاک کولمب، قابلیت استفاده به‌صورت Plane Stress، Plane Strain یا Axisymmetric، Birth and death, Debonding, Fluid pressure penetration, Isotropic friction, Large deflection, Linear perturbation, Nonlinearity, User-defined contact interaction, User-defined friction
Conta 172	2D	۳	Ux,Uy	شبیه سازی تماس اتکایی و لغزش بین یک سطح هدف (Target) و یک سطح انعطاف‌پذیر دو بعدی با ۳ گره، همراه با Target 169 بکار می‌رود، فقط فشاری، اصطکاک کولمب، قابلیت استفاده به‌صورت Plane Stress، Plane Strain یا Axisymmetric، Birth and death, Debonding, Fluid pressure penetration, Isotropic friction, Large deflection, Linear perturbation, Nonlinearity, User-defined contact interaction, User-defined friction,
Conta 173	3D	۴	Ux,Uy,Uz	شبیه سازی تماس اتکایی و لغزش بین سطوح هدف (Target) و یک سطح انعطاف‌پذیر سه بعدی با ۴ گره، همراه با Target 170 بکار می‌رود، فقط فشاری، اصطکاک کولمب ایزوتروپیک و ارتوتروپیک، Birth and death, Debonding, Fluid pressure penetration, Isotropic friction, Large deflection, Linear perturbation, Nonlinearity, User-defined contact interaction, User-defined friction, Orthotropic friction
Conta 174	3D	۶ یا ۸	Ux,Uy,Uz	شبیه سازی تماس اتکایی و لغزش بین سطوح هدف (Target) و یک سطح انعطاف‌پذیر سه بعدی با ۶ یا ۸ گره، همراه با Target 170 بکار می‌رود، فقط فشاری، اصطکاک کولمب ایزوتروپیک و ارتوتروپیک، Birth and death, Debonding, Fluid pressure penetration, Isotropic friction, Large deflection, Linear perturbation, Nonlinearity, User-defined contact interaction, User-defined friction, Orthotropic friction
Conta 175	2D,3D	۱	Ux,Uyیا Ux,Uy,Uz	شبیه سازی تماس اتکایی و لغزش بین دو سطح یا یک گره و یک سطح یا بین خط و گره به‌صورت ۲ یا سه بعدی، همراه با Target 169 یا Target 170 بکار می‌رود، فقط فشاری، اصطکاک کولمب ایزوتروپیک و ارتوتروپیک، Birth and death, Debonding, Isotropic friction, Large deflection, Linear perturbation, Nonlinearity, User-defined contact interaction, User-defined friction, Orthotropic friction
Conta 176	3D	۲ یا ۳	Ux,Uy,Uz	شبیه سازی تماس اتکایی و لغزش بین خط‌های سه بعدی و یک خط انعطاف‌پذیر، همراه با Target 170 بکار می‌رود، فقط فشاری، اصطکاک کولمب ایزوتروپیک و ارتوتروپیک، Birth and death, Debonding, Isotropic friction, Large deflection, Linear perturbation, Nonlinearity, User-defined contact interaction, User-defined friction, Orthotropic friction
Conta 177	3D	۲ یا ۳	Ux,Uy,Uz	شبیه سازی تماس اتکایی و لغزش بین صفحات سه بعدی و یک خط انعطاف‌پذیر، همراه با Target 170 بکار می‌رود، فقط فشاری، اصطکاک کولمب ایزوتروپیک و ارتوتروپیک، Birth and death, Debonding, Isotropic friction, Large deflection, Linear perturbation, Nonlinearity, User-defined contact interaction, User-defined friction, Orthotropic friction

ادامه جدول ۱-۱۰ مشخصات المان‌های Contact

Conta 178	3D	۲	Ux,Uy,Uz	شبیه سازی تماس اتکایی گره به گره سه بعدی، میراگر، اصطکاک کولمب، فقط فشاری، Gap Isotropic friction, Linear perturbation, Nonlinear gap type, User-defined contact interaction, User-defined friction,
Target 169	2D	۱، ۲ یا ۳	Ux,Uy یا Ux,Uy,Rz	سطح هدف برای المان‌های Conta 171، Conta 172 و Conta 175، رفتار صلب یا انعطاف‌پذیر Birth and death, Fluid pressure penetration, Linear perturbation, Nonlinearity
Target 170	3D	۱، ۲، ۳، ۴، ۶ یا ۸	Ux,Uy,Uz یا Ux,Uy, Uz,Rx,Ry,Rz	سطح هدف برای المان‌های Conta 173، Conta 174، Conta 175، Conta 176 و Conta 177، رفتار صلب یا انعطاف‌پذیر Birth and death, Fluid pressure penetration, Linear perturbation, Nonlinearity

جدول ۱-۱۱ مشخصات المان‌های Interface

نام المان	ابعاد هندسی	تعداد گره‌ها	درجات آزادی	قابلیت‌های مدل‌سازی و تحلیلی
INTER 192	2D	۴	Ux,Uy	المان بینابینی از درجه ۱، همراه با المان‌های سازه‌ای دو بعدی درجه ۱ برای شبیه سازی Gasket Joints، می‌تواند به‌صورت Plane Stress یا Plane Strain بکار رود یا به‌صورت Axisymmetric استفاده شود. Gasket Material, Linear perturbation
INTER 193	2D	۶	Ux,Uy	المان بینابینی از درجه ۲، همراه با المان‌های سازه‌ای دو بعدی درجه ۲ برای شبیه سازی Gasket Joints، می‌تواند به‌صورت Plane Stress یا Plane Strain بکار رود یا به‌صورت Axisymmetric استفاده شود. Gasket Material, Linear perturbation
INTER 194	3D	۱۶ یا ۱۲	Ux,Uy,Uz	المان بینابینی ۱۶ گره‌ی از درجه ۲، همراه با المان‌های سازه‌ای سه بعدی درجه ۲ برای شبیه سازی Gasket Joints Gasket Material, Linear perturbation
INTER 195	3D	۸	Ux,Uy,Uz	المان بینابینی ۸ گره‌ی از درجه ۱، همراه با المان‌های سازه‌ای سه بعدی درجه ۱ برای شبیه سازی Gasket Joints Gasket Material, Linear perturbation
INTER 202	2D	۴	Ux,Uy	المان بینابینی درجه ۱ دو بعدی برای شبیه سازی سطح بینابینی (Interface) و مدل‌سازی جداشدگی در آن، می‌تواند به‌صورت Plane Stress یا Plane Strain بکار رود یا به‌صورت Axisymmetric استفاده شود. Cohesive Zone Material (CZM)
INTER 203	2D	۶	Ux,Uy	المان بینابینی درجه ۲ دو بعدی برای شبیه سازی سطح بینابینی (Interface) و مدل‌سازی جداشدگی در آن، می‌تواند به‌صورت Plane Stress یا Plane Strain بکار رود یا به‌صورت Axisymmetric استفاده شود. Cohesive Zone Material (CZM)
INTER 204	3D	۱۶ یا ۱۲	Ux,Uy,Uz	المان بینابینی درجه ۲ سه بعدی با ۱۶ گره برای شبیه سازی سطح بینابینی (Interface) و مدل‌سازی جداشدگی در آن، Cohesive Zone Material (CZM)
INTER 205	3D	۸	Ux,Uy,Uz	المان بینابینی درجه ۱ سه بعدی با ۸ گره برای شبیه سازی سطح بینابینی (Interface) و مدل‌سازی جداشدگی در آن، Cohesive Zone Material (CZM)

جدول ۱-۱۲ معرفی اصطلاحات بکار رفته در جداول به ترتیب حروف الفبا ی لاتین

Adaptive descent	تکنیکی است برای همگرایی بهتر فرآیند تحلیلی، به کمک این تکنیک هنگامی که مشکلات همگرایی در تحلیل رخ دهد برنامه بطور اتوماتیک به ماتریسی سخت‌تر سوئیچ می‌کند. هنگامی که سرعت همگرایی مطلوب باشد برنامه بطور اتوماتیک به حالت قبل بازمی‌گردد.
Anisotropic	این نوع مصالح امکان شبیه سازی متفاوت منحنی‌های دو خطی تنش-کرنش را در جهات x، y و z با رفتارهای مختلف کششی، فشاری و برشی فراهم می‌سازد.
Ax,Ay,Az	شتاب در امتداد x، y و z
Birth & Death	قابلیت مرده و زنده کردن المان‌ها در حین تحلیل است که به‌ویژه در مدل‌هایی که مراحل ساخت سازه را در نظر می‌گیرند بکار می‌رود. هنگام مردن المان‌ها، سختی و جرم آنها در اعداد کوچکی ضرب می‌شود تا اثری بر تحلیل نداشته باشند.
Cohesive Zone Material (CZM)	مدلی است که برای شبیه سازی شکست یا لایه لایه شدن سطح بینابینی (Interface) بین دو جسم در اثر جداشدگی آنها بکار می‌رود. فرمول‌بندی آن بر اساس روابط نرم شوندگی بین جداشدگی و کشش دو سطح مجاور است که با افزایش جداشدگی، پدیده نرم شوندگی به سرعت در سختی آن ایجاد می‌شود. تغییر شکل‌های غیر خطی کششی و برشی در آن منظور می‌شوند. این مصالح فاقد قابلیت باربرداری است.
Cracking & Crushing	مصالح با قابلیت ترک خوردگی و خرد شدگی
Creep	نوعی رفتار غیر خطی وابسته به زمان است که در آن مصالح تحت یک بار ثابت در طول زمان بطور پیوسته دچار تغییر شکل می‌شود. در مقابل با وارد شدن جابجایی، نیروی عکس‌العمل (و تنش‌ها) با تغییر زمان رو به کاهش می‌رود.
Elastic	رفتار الاستیک خطی
Element Technology auto Select	برخی از المان‌ها قابلیت استفاده از دو یا چند نوع تکنولوژی شبیه سازی تنش را دارا هستند. انتخاب تکنولوژی المان می‌توان توسط کاربر انجام شده یا به‌صورت خودکار به برنامه واگذار شود.
Explicit	روش حل Explicit امکان تحلیل‌های سریع‌تری برای مسائل دینامیکی با زمان کوتاه و تغییر شکل‌های بزرگ، مسائل شبه استاتیکی با تغییر شکل‌های بزرگ و رفتارهای غیر خطی چندگانه و مسائل ترکیبی تماس/برخورد را فراهم می‌سازد. این روش تحلیلی از قابلیت‌های مدل‌سازی ANSYS، قابلیت تحلیلی محیط LS-DYNA و قابلیت‌های مشاهده نتایج در ANSYS کمک می‌گیرد.
Gasket Material	برای شبیه سازی سطوح بینابینی بکار رفته و می‌تواند رفتار غیر خطی فشاری را با قابلیت باربرداری مدل‌سازی کند.
Hardening Plasticity	رفتار دو خطی با سخت شدگی کرنشی در محدوده غیر خطی .
Hill anisotropy	به فصل ششم مراجعه شود.
Hyperelasticity	این نوع مصالح برای شبیه سازی و تحلیل انواع Rubberها که کرنش‌های و تغییر شکل‌های بزرگ با تغییرات ناچیز حجم (تقریباً غیر قابل تراکم) در آنها رخ می‌دهد بکار می‌رود.
Initial State	اشاره به وضعیت سازه در ابتدای تحلیل دارد. به طور کلی وضعیت اولیه سازه بدون تغییر شکل و بدون تنش فرض می‌شود، اما با این گزینه می‌توان یک وضعیت تنش یا کرنش اولیه برای سازه تعیین کرد.

صفحات میانی حذف شده اند

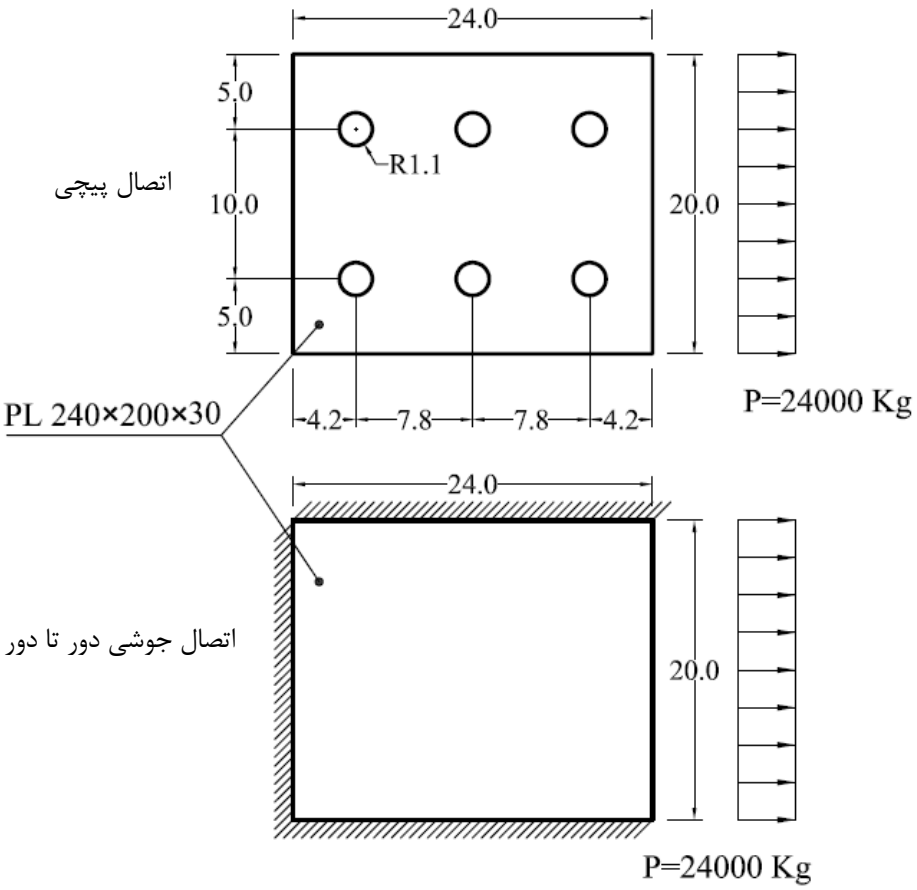
فصل دوم
تحلیل ورق فولادی تحت کشش با رفتار الاستیک خطی

۲. ۱. مقدمه

در فصل اول با قسمت‌های مختلف برنامه آشنا شدیم همچنین روش‌های مختلف مدل‌سازی و ویژگی‌های المان‌های مختلف ANSYS معرفی شد. در این فصل تا انتهای کتاب نحوه ساخت پروژه‌های مختلف با جزئیات کامل ارائه خواهد شد. در هر پروژه گام به گام مراحل ساخت مدل، المان بندی، بارگذاری، تعریف تکیه‌گاه، تحلیل و نهایتاً روش‌های مختلف مشاهده نتایج ارائه خواهد شد. به این ترتیب تا پایان کتاب خواننده بر نحوه تحلیل و بررسی طیف وسیعی از مدل‌های متداول سازه‌ای تسلط خواهد یافت.

در این فصل با نحوه مدل‌سازی یک ورق تحت کشش با استفاده از المان Shell آشنا می‌شویم. مدل ورق با فرض دو نوع اتصال جوشی و پیچی از یک طرف و نیروی کششی خالص در طرف دیگر در نظر گرفته می‌شود [۱]. هدف مدل‌سازی شرایط بارگذاری و تکیه‌گاهی ورق و

مشاهده نحوه توزیع تنش‌ها داخل آن است. مدل مفروض و مشخصات هندسی آن در شکل ۲-۱ نشان داده شده است. مصالح فولادی الاستیک خطی فرض شده است. مشخصات مصالح ورق در جدول ۲-۱ فهرست شده است، کلیه واحدها کیلوگرم و سانتیمتر هستند.



شکل ۲-۱ مدل ورق تحت کشش

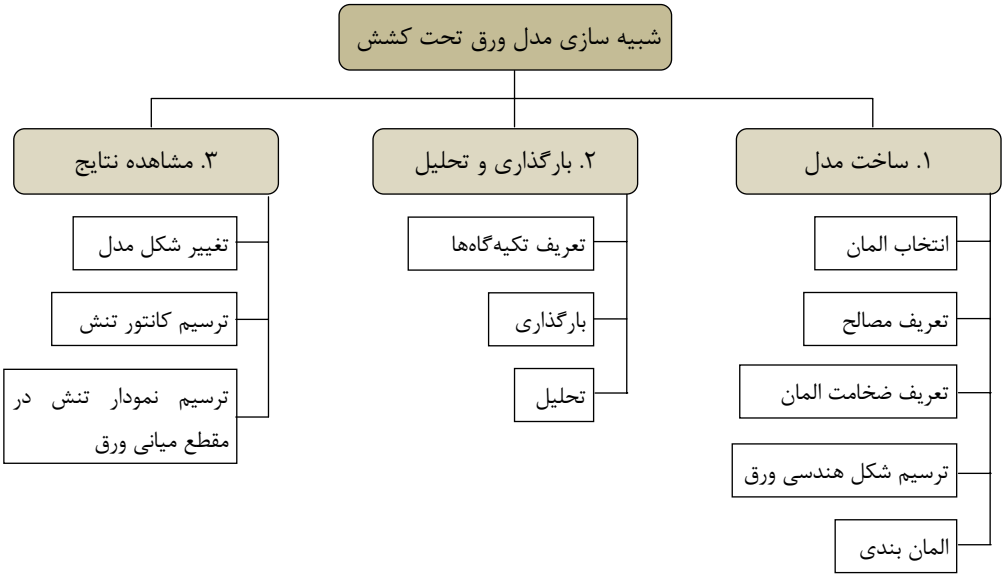
جدول ۲-۱ مشخصات مصالح ورق فولادی – واحدها کیلوگرم و سانتیمتر

مدول الاستیسیته	۲/۱×۱۰^۶
ضریب پواسون	۰/۳
تنش جاری شدن	۲۴۰۰

۲. ۲. مدل A، شبیه سازی ورق تحت کشش با اتصال جوشی

مراحل شبیه سازی ورق تحت کشش در فلوچارت شکل ۲-۲ نشان داده شده است. این مراحل شامل ساخت مدل، بارگذاری و تحلیل و مشاهده نتایج است. ساخت مدل شامل انتخاب المان، تعریف ضخامت المان، تعریف مصالح و المان بندی است. در مرحله بارگذاری تکیه‌گاه‌ها و بار کششی تعریف شده و تحلیل صورت می‌گیرد. نتایج تحلیل نیز شامل تغییر شکل، ترسیم کانتورهای رنگی از توزیع تنش و ترسیم نمودار تنش در مقطع میانی ورق هستند.

برای شروع به کار پروژه ابتدا یک پوشه به نام ANSYS Files در محلی از هارد کامپیوتر خود ایجاد کنید. این پوشه به عنوان پوشه مادر کلیه پروژه‌هایی که در این کتاب ساخته خواهند شد بکار می‌رود، بنابراین دقت کنید که حافظه کافی در درایو مربوطه وجود داشته باشد. داخل پوشه ANSYS Files پوشه دیگری به نام Example-1 بسازید تا محتویات مثال شماره ۱ در آن ذخیره شود.



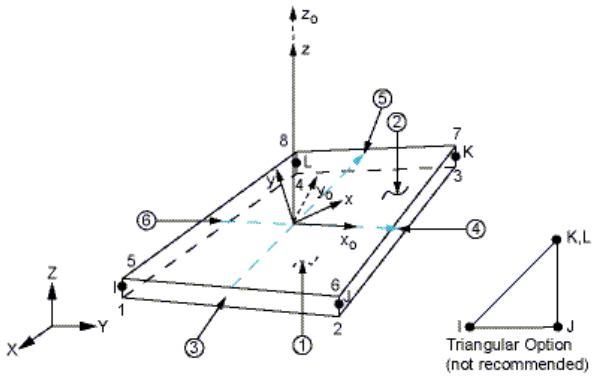
شکل ۲-۲ فلوچارت مراحل تحلیلی ورق تحت کشش با اتصال جوشی

حال وارد نرم‌افزار شوید. دگمه Mechanical APDL Product Launcher 15.0 را فشار دهید تا پنجره ورودی برنامه باز شود. در این پنجره در بخـــــــــش Working Directory و به کمک دگمه Browse پوشه Example-1 را انتخاب و در مقابل Job name نام Model-A را وارد

کنید. حال دگمه Run را بفشارید تا وارد برنامه شوید. برای سادگی می‌توانید یک Shortcut از برنامه را روی Desktop قرار دهید.

۲. ۲. ۱. ساخت مدل

کلیه عملیات مدل‌سازی در بخش Preprocessor ← **Main Menu** انجام می‌شود. اولین گام نیز انتخاب المان است. نوع المان مورد استفاده برای شبیه سازی اجزای محدود بر اساس هندسه و نوع رفتار مورد نیاز انتخاب می‌شود. چون هدف شبیه سازی یک ورق فولادی است از هندسه صفحه‌ای و المان Shell استفاده می‌شود. المان انتخابی Shell 181 است. این المان قابلیت شبیه سازی رفتار الاستیک و پلاستیک را داراست. از این المان می‌توان به‌صورت ۳ یا چهار گره‌ی استفاده نمود، شکل ۲-۳. هر گره المان دارای ۶ درجه آزادی شامل جابجایی در سه جهت x، y و z و دوران‌های حول این سه محور است.

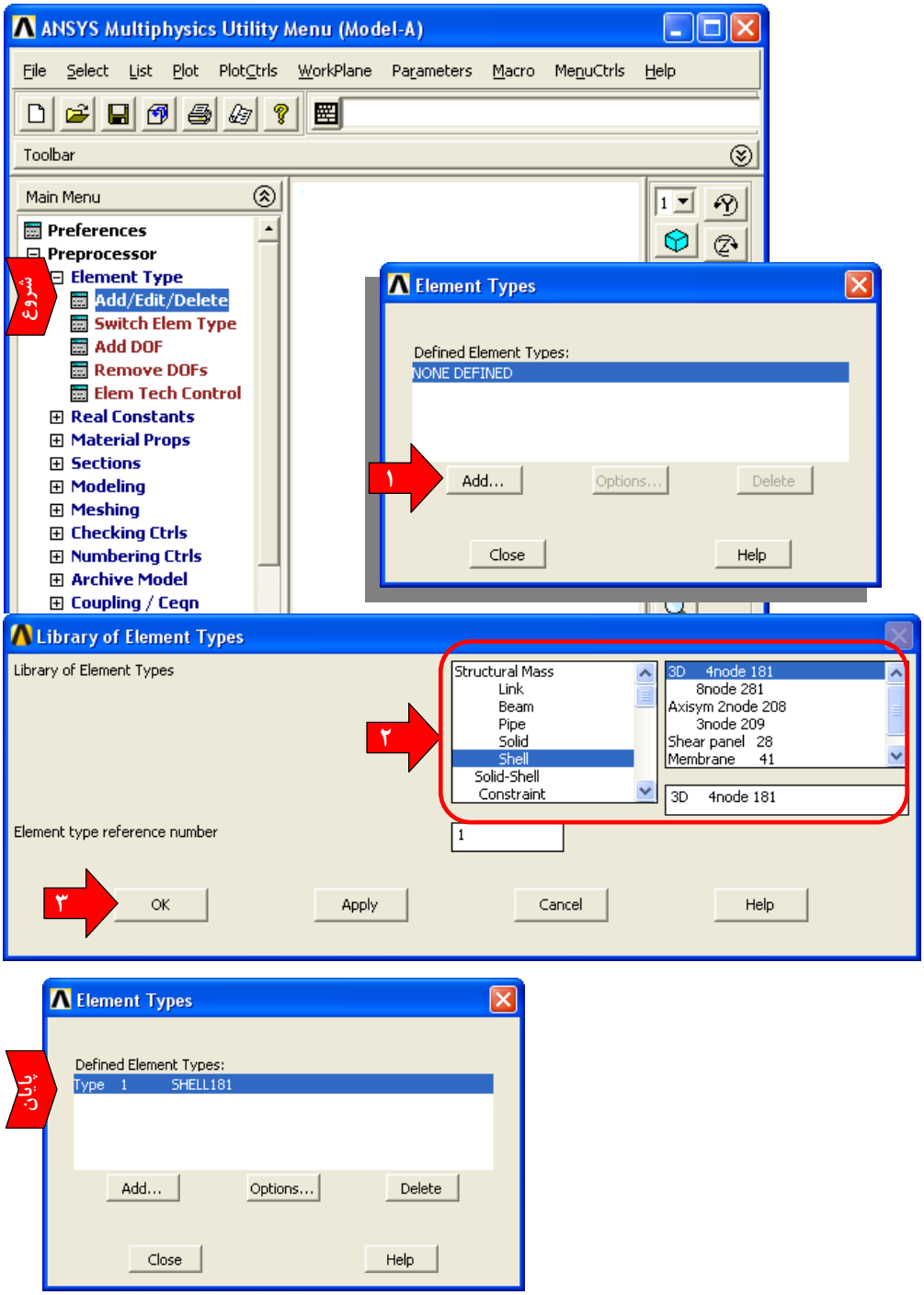


شکل ۲-۳ مشخصات المان Shell 181

اعداد داخل دایره کد مربوط به تعریف بار از نوع گسترده بر وجوه مختلف المان هستند. حروف I، J، K و L موقعیت گره‌ها را نشان می‌دهند. در شکل مثلثی گره‌های K و L در یک مکان در نظر گرفته می‌شوند. این المان می‌تواند در هر گره ضخامت متفاوتی داشته باشد. این ضخامت به‌صورت یکنواخت در طول المان تغییر خواهد کرد. سایر جزئیات المان Shell 181 را می‌توانید در جدول ۱-۵ فصل اول مطالعه کنید.

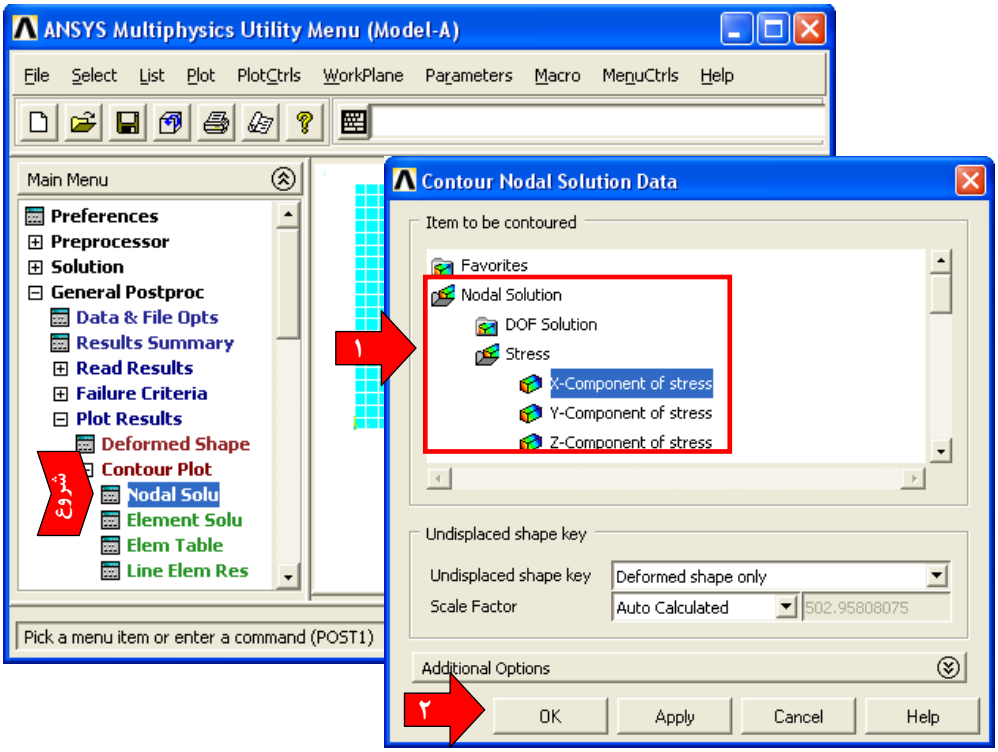
برای انتخاب المان وارد آدرس زیر شده و مراحل شکل ۲-۴ را دنبال کنید:

Main Menu ← Preprocessor ← **Element Type** ← Add/Edit/Delete

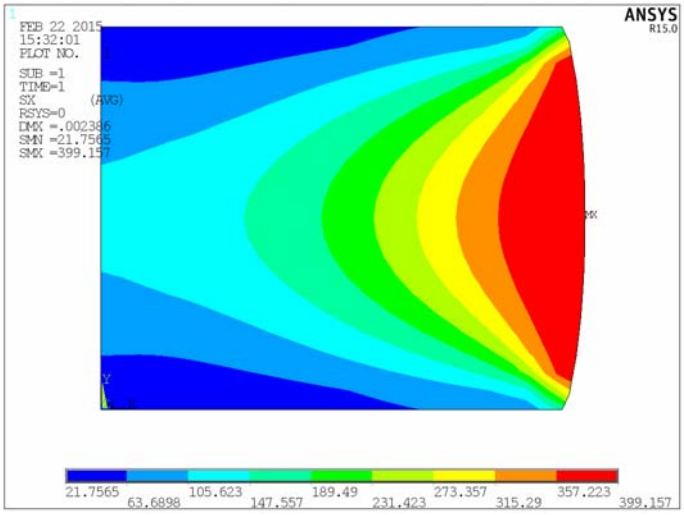


شکل ۲-۴ مراحل انتخاب نوع المان

صفحات میانی حذف شده اند

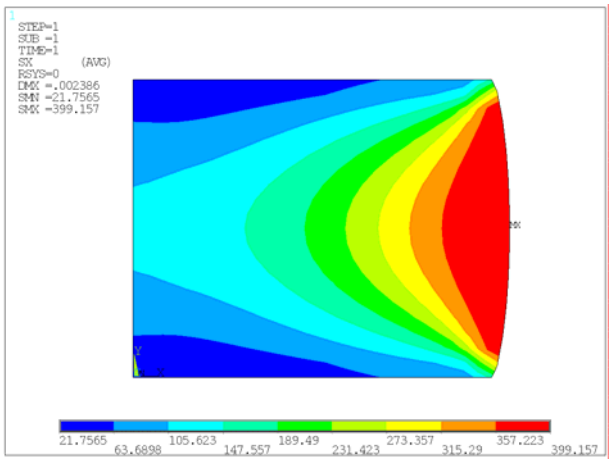


شکل ۲-۲۵ ترسیم کانتور رنگی تنش جهت x

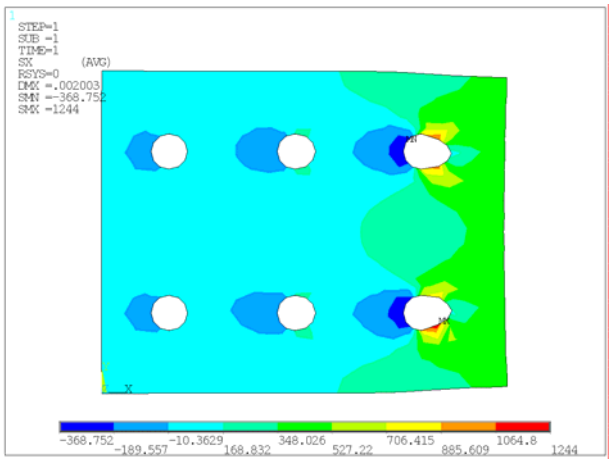


شکل ۲-۲۶ کانتور رنگی تنش جهت x

صفحات میانی حذف شده اند



مدل A



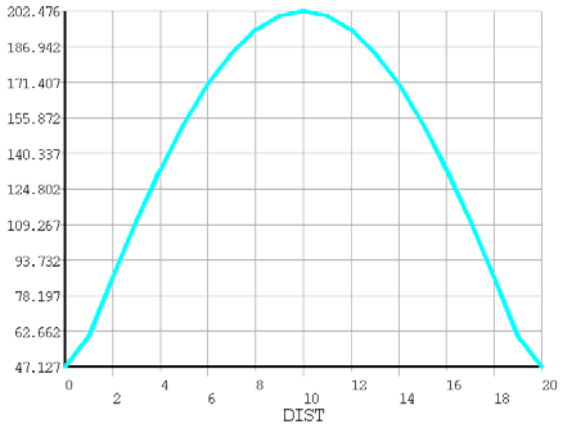
مدل B

شکل ۲-۴۲ مقایسه تنش‌های جهت x در دو مدل با اتصال جوشی و اتصال پیچی

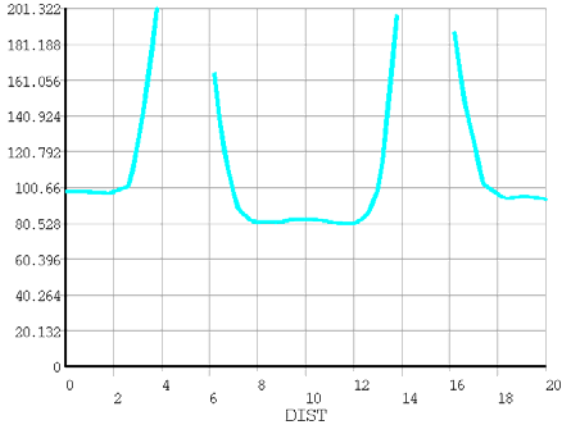
برای مقایسه دیگر نمودار تغییرات تنش همانند شکل ۲-۳۱ برای ورق سوراخ‌دار نیز ترسیم و با ورق بدون سوراخ مقایسه می‌شود. مراحل همانند قبل است و یک مسیر بین دو گره میانی لبه تحتانی و فوقانی ورق سوراخ‌دار تعریف می‌شود. نمودار بدست آمده در شکل ۲-۴۳ نشان داده شده و با نتیجه قبلی مقایسه شده است. در ورق سوراخ‌دار تعداد nDiv برابر ۱۰۰ قرار داده شده است تا توزیع تنش در اطراف سوراخ‌ها با دقت بیشتری محاسبه شود.

چنانچه ملاحظه می‌شود مقدار حداکثر تنش در هر دو نمونه در این مقطع تقریباً برابر است اما توزیع آنها متفاوت است. توزیع تنش در ورق با اتصال جوشی به‌صورت یک کوهان است که

در دو لبه به علت قیدهای ایجاد شده به صفر رسیده است اما در ورق سوراخ‌دار توزیع تنش دو کوهانی است که در لبه سوراخ‌ها به‌صورت متمرکز به حداکثر رسیده است. در این مرحله مدل را ذخیره نمایید.



الف



ب

شکل ۲-۴۳ مقایسه نمودار تنش Sx در عرض دو ورق بدون سوراخ و سوراخ‌دار

۲.۴. مرجع

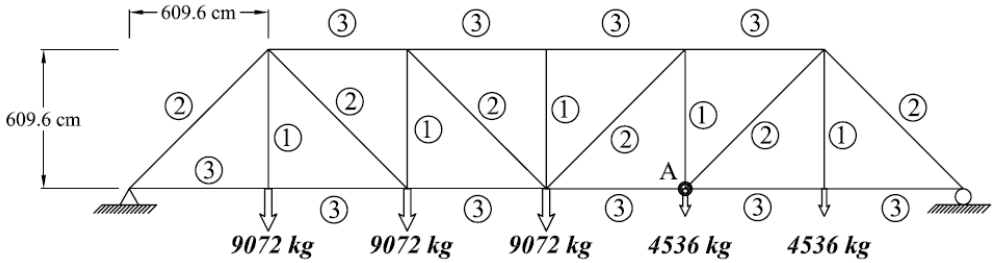
۱- طراحی سازه‌های فولادی، جلد سوم-اتصالات، مجتبی ازهری، سید رسول میرقادری، انتشارات ارکان دانش، ۱۳۸۶، چاپ پنجم.

فصل سوم
مدل‌سازی و تحلیل خرپای فلزی دو بعدی

۳. ۱. مقدمه

به عنوان اولین نمونه سازه‌ای خرپای فولادی برای مدل‌سازی و تحلیل در نرم‌افزار ANSYS انتخاب شده است. سادگی المان‌های خرپایی و هندسه سازه‌ای خرپا دلیل اصلی این انتخاب است تا کاربر از مدل‌های ساده‌تر خطی شروع بکار نماید. برای ساخت خرپا از دسته المان‌های Link استفاده می‌شود. خصوصیات این نوع المان‌ها در فصل اول مختصراً مرور شده است.

خرپای مفروض در مرجع [۱] با محاسبات دستی تحلیل شده است. نوع تحلیل الاستیک خطی است و نوع بارگذاری استاتیکی-ثقلی است. ابعاد هندسی و بارگذاری سازه در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. اعداد داخل دایره شماره مقطع عضو را نشان می‌دهند. سطح مقطع اعضای مختلف و مشخصات مصالح در جدول ۳-۱ آورده شده است. برای ساخت اعضای خرپایی از المان Link استفاده می‌شود. صریح نبودن اعداد به جهت تبدیل واحد انجام شده از اعداد مرجع اصلی است.



شکل ۳-۱ مدل سازه‌ای خرپا، مشخصات هندسی و بارگذاری

جدول ۳-۱ مشخصات مصالح خرپا و سطح مقطع اعضای مختلف

شماره مقطع	سطح مقطع بر حسب سانتیمتر مربع
۱	۱۲/۹۰
۲	۱۹/۳۵
۳	۲۵/۸۱

مشخصات مکانیکی	
مدول الاستیسیته	$۲/۰۳۸۹\times۱۰^{۶}$
ضریب پواسون	۰/۳

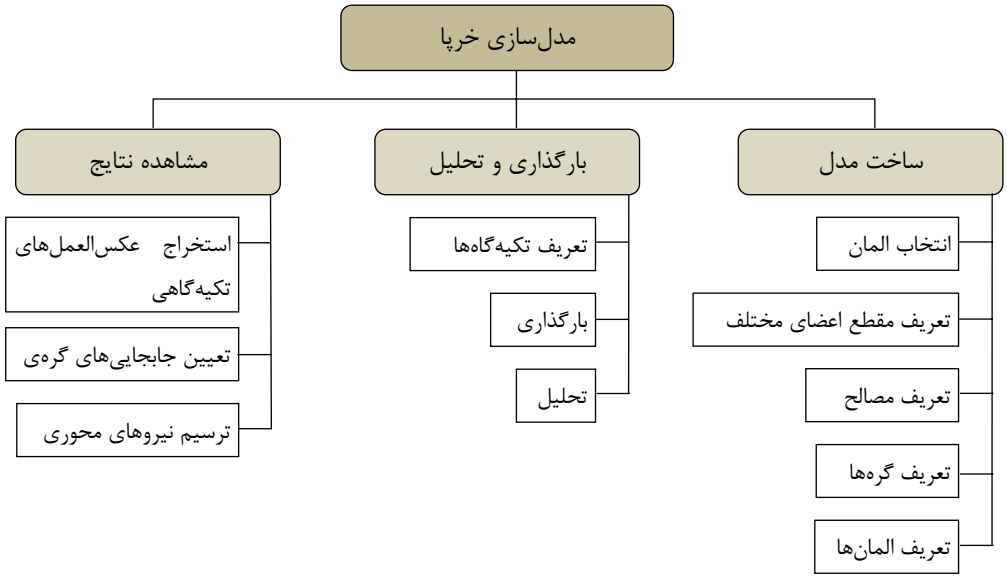
بر اساس تحلیل انجام شده در مرجع ۱ تغییر شکل قائم نقطه A که در شکل ۳-۱ نشان داده شده است در جهت قائم برابر ۳/۶۸۳ سانتیمتر و تغییر شکل افقی آن برابر ۱/۱۵۶ سانتیمتر به سمت راست است. با مدل‌سازی و تحلیل این مدل تحت شرایط بارگذاری و مشخصات داده شده نتایج تحلیلی با جواب بدست آمده از حل دستی مرجع [۱] مقایسه می‌شود.

مراحل مدل‌سازی خرپا در فلوچارت شکل ۳-۲ نشان داده شده است. در مدل‌سازی خرپا از روش مستقیم مدل‌سازی استفاده می‌شود به همین دلیل به جای مرحله ساخت هندسه و المان بندی، مراحل ساخت گره و المان جایگزین شده‌اند.

تحلیل انتخاب شده استاتیک است و بارگذاری شامل نیروهای متمرکزی است که بر روی گره‌های کف خرپا وارد می‌شود. نتایج مورد نظر در این تحلیل نیز شامل عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی، تغییر شکل گره A در جهت افقی و قائم و ترسیم نمودار نیروی محوری اعضاء است.

برای شروع به کار پروژه در پوشه مادر ANSYS Files که در پروژه قبل ساخته شد پوشه‌ای به نام Example-2 بسازید تا محتویات مثال شماره ۲ در آن ذخیره شود. حال وارد نرم‌افزار شوید. گزینه Mechanical APDL Product Launcher را فشار دهید تا پنجره ورودی برنامه باز شود. در این پنجره در بخش Working Directory و به کمک دگمه Browse پوشه

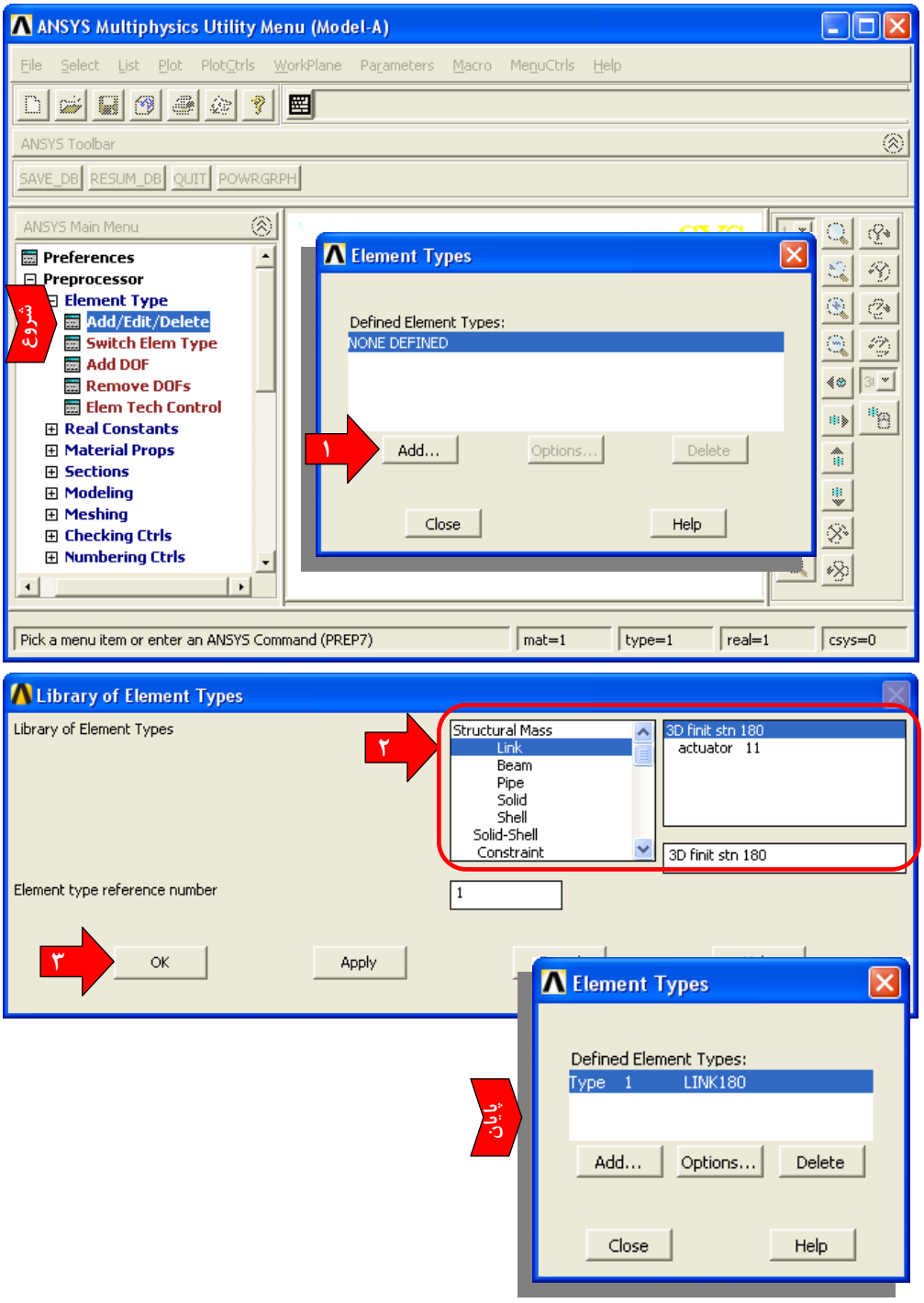
Example-2 را انتخاب و در مقابل Job name نام truss را وارد کنید. حال دگمه Run را بفشارید تا وارد برنامه شوید.



شکل ۳-۲ فلوچارت مراحل ساخت و تحلیل خرپا

۳. ۲. ساخت مدل

برای ساخت مدل خرپای دو بعدی از المان‌های گروه Link استفاده می‌شود. دو نوع المان Link قابل استفاده‌اند که شامل Link 11 و Link 180 است. المان Link 11 بیشتر شبیه یک فنر است تا عضو خرپایی. مشخصات المان شامل سختی محوری، جرم در دو گره و میرایی است. این المان به‌ویژه در تحلیل‌های دینامیکی قابل استفاده است. Link 180 همه قابلیت‌های Link 11 را داراست و علاوه بر آن می‌تواند به‌صورت فقط کششی یا فقط فشاری نیز بکار رود. از جمله کاربردهای این المان در شبیه سازی کابل‌ها است. از آنجائیکه ورودی این المان سطح مقطع است برای مدل‌سازی خرپای این فصل از آن استفاده می‌شود. تصویر المان در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. المان دارای دو گره است که هر گره سه درجه آزادی ux و uy و uz دارد. برای آشنایی با سایر ویژگی‌های این المان به راهنمای برنامه مراجعه کنید.

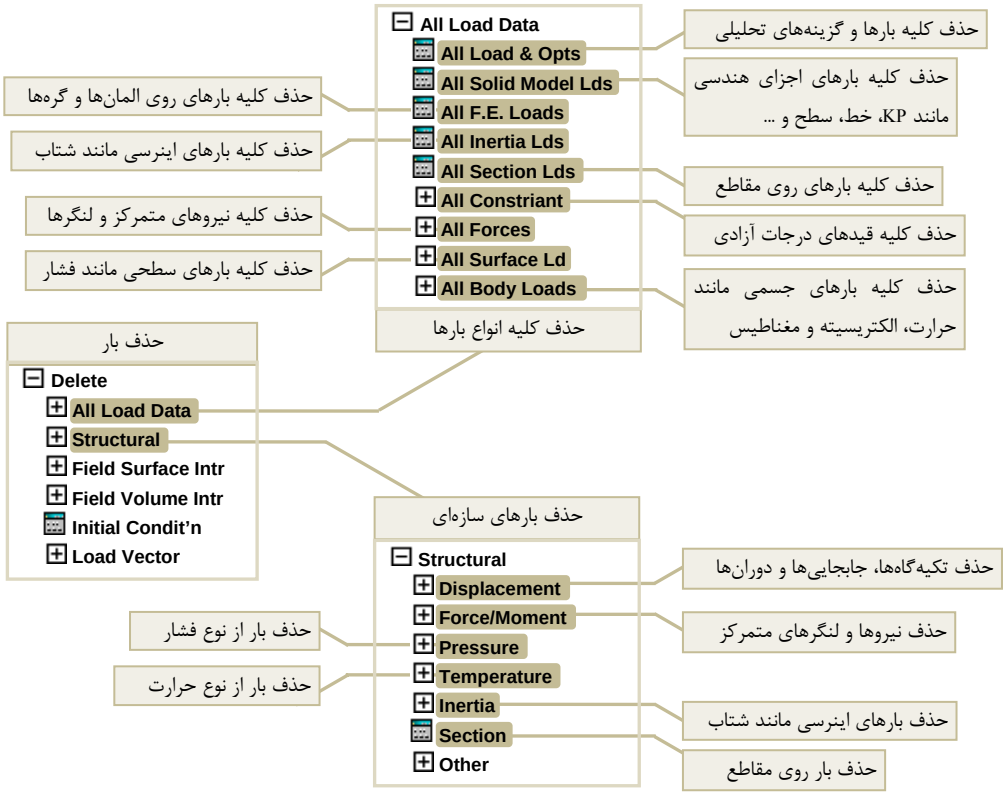


شکل ۳-۴ مراحل انتخاب نوع المان

صفحات میانی حذف شده اند

برای مثال می‌توان به جای کلیه داده‌های بارگذاری و تحلیلی تنها بارهای گره‌ها و المان‌ها را با گزینه All F.E. Loads پاک کرد بطوریکه سایر بارها بدون تغییر باقی بمانند، یا می‌توان کلیه تکیه‌گاه‌ها و جابجایی‌های تعریف شده را با گزینه All Constraint حذف نمود.

اما اگر کاربر مایل باشد که به‌صورت انتخابی بار یک گره یا المان و یا جابجایی و تکیه‌گاه تعریف شده بر روی آن را حذف کند و یا به عبارت کلی‌تر یک نوع بار مشخص بر روی یک شیء مشخص را حذف نماید، باید از منوی Structural استفاده نماید. در این منو فهرستی مشابه با بخش Apply مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۲۲ منوی Delete در بخش Solution

مدل نهایی پس از تعریف تکیه‌گاه‌ها در شکل ۳-۲۳ نشان داده شده است. تا این مرحله کلیه عملیات با فشردن دگمه در فایل Model-A.db ذخیره می‌شوند. برای انجام تحلیل وارد

شماره، عدد یک در زیر ستون E، آورده شده است. چون نیروی محوری در طول المان ثابت است، مقدار آن برای هر دو گره برابر خواهد بود، به همین دلیل تنها یک شماره به آن اختصاص داده شده است.

اسامی مربوط به خروجی‌های المان که در ستون اول این جدول آورده شده است، در جدول ۱ راهنمای المان تعریف شده است. برخی از آیتم‌های این جدول در جدول ۳-۴ فهرست شده است.

جدول ۳-۳ آیتم‌های خروجی المان Link 180 در روش Sequence Number

Table 180.2: LINK180 Item and Sequence Numbers

Output Quantity Name	ETABLE and ESOL Command Input			
	Item	E	I	J
Sxx	LS	-	1	2
EPELxx	LEPEL	-	1	2
EPTOxx	LEPTO	-	1	2
EPTHxx	LEPTH	-	1	2
EPPLxx	LEPPL	-	1	2
EPCRxx	LEPCR	-	1	2
FORCE	SMISC	1	-	-
AREA	SMISC	2	-	-

جدول ۳-۴ تعاریف مربوط به خروجی‌های المان‌ها

Table 180.1: LINK180 Element Output Definitions

Name	Definition
AREA	Cross-sectional area
FORCE	Member force in the element coordinate system
Sxx	Axial stress
EPELxx	Axial elastic strain
EPTOxx	Total strain
EPPLxx	Axial plastic strain
EPCRxx	Axial creep strain
EPTHxx	Axial thermal strain

صفحات میانی حذف شده اند

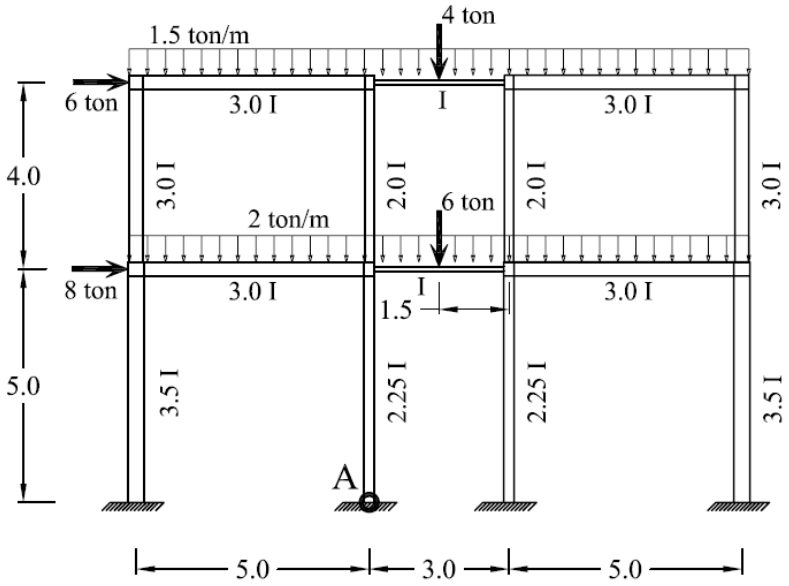
فصل چهارم
مدل‌سازی و تحلیل قاب دو بعدی الاستیک خطی

۴. ۱. مقدمه

مجموعه دوم از سازه‌های متداول در مهندسی ساختمان، قاب‌های ساختمانی هستند. در این فصل روش شبیه سازی این گونه سازه‌ها با استفاده از المان Beam نشان داده می‌شود. المان Beam علاوه بر سختی محوری، سختی خمشی و برشی نیز دارد و در حالت سه بعدی سختی پیچشی نیز داراست. قاب مورد مطالعه در این فصل تحت بارگذاری ثقلی و ترکیب آن با بار جانبی شبه استاتیکی تحلیل شده و نحوه استخراج نتایج آنها نمایش داده خواهد شد.

مدل دو بعدی مورد مطالعه در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. مشخصات مدل از مرجع [۱] برداشت شده است تا نتایج آن قابل مقایسه با جواب حل دستی بدست آمده در مرجع [۱] باشد. در حل دستی برای تعیین نیروها در این قاب نیازی به داشتن مقدار E و I تیرها و ستون‌ها

نیست و تنها نسبت بین سختی تیرها و ستون‌ها برای تحلیل کفایت می‌کند. اما برای تحلیل چنین سازه‌ای در نرم‌افزار باید مقادیری برای E و I در نظر گرفته شوند. فرضیات بکار رفته در جدول ۴-۱ فهرست شده است. واحدهای بکار رفته کیلوگرم و سانتیمتر است که درنهایت نتایج برای مقایسه با مرجع به تن-متر تبدیل می‌شود. جنس قاب بتنی فرض شده است.



شکل ۴-۱ مدل سازه‌ای قاب، مشخصات هندسی و بارگذاری

جدول ۴-۱ مشخصات مصالح قاب و سطح مقطع اعضاء-کیلوگرم و سانتیمتر

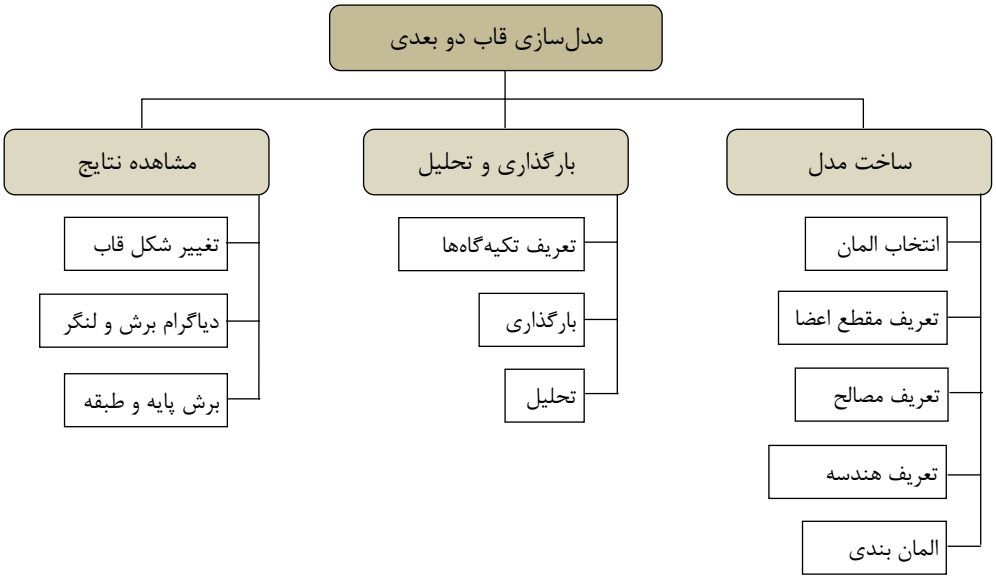
مدول الاستیسیته بتن	۲/۱×۱۰^۵
ضریب پواسون	۰/۲۵
I	۱۰۰۰۰

۴. ۲. مدل‌سازی قاب

مراحل شبیه سازی قاب دو بعدی مثل گذشته و مطابق با فلوچارت شکل ۴-۲ است. در مدل‌سازی قاب از روش غیر مستقیم مدل‌سازی استفاده می‌شود. تحلیل انتخاب شده استاتیک است و بارگذاری شامل نیروهای گسترده و متمرکز بر روی تیرها و بارهای جانبی طبقه است. نتایج مورد نظر در این تحلیل نیز شامل لنگر داخلی اعضا برای مقایسه با مرجع [۱]، ترسیم

دیاگرام برش و لنگر، تعیین برش طبقات، محاسبه وزن سازه و بدست آوردن تغییر شکل جانبی طبقات است.

برای شروع به کار پروژه در پوشه مادر ANSYS Files پوشه‌ای به نام Example-3 بسازید تا محتویات مثال شماره ۳ در آن ذخیره شود. گزینه Mechanical APDL Product Launcher را فشار دهید تا پنجره ورودی برنامه باز شود. در این پنجره در بخش Working Directory و به کمک دگمه Browse پوشه Example-3 را انتخاب و در مقابل Job name نام Frame-2D را وارد کنید. حال دگمه Run را فشرده و وارد برنامه شوید.

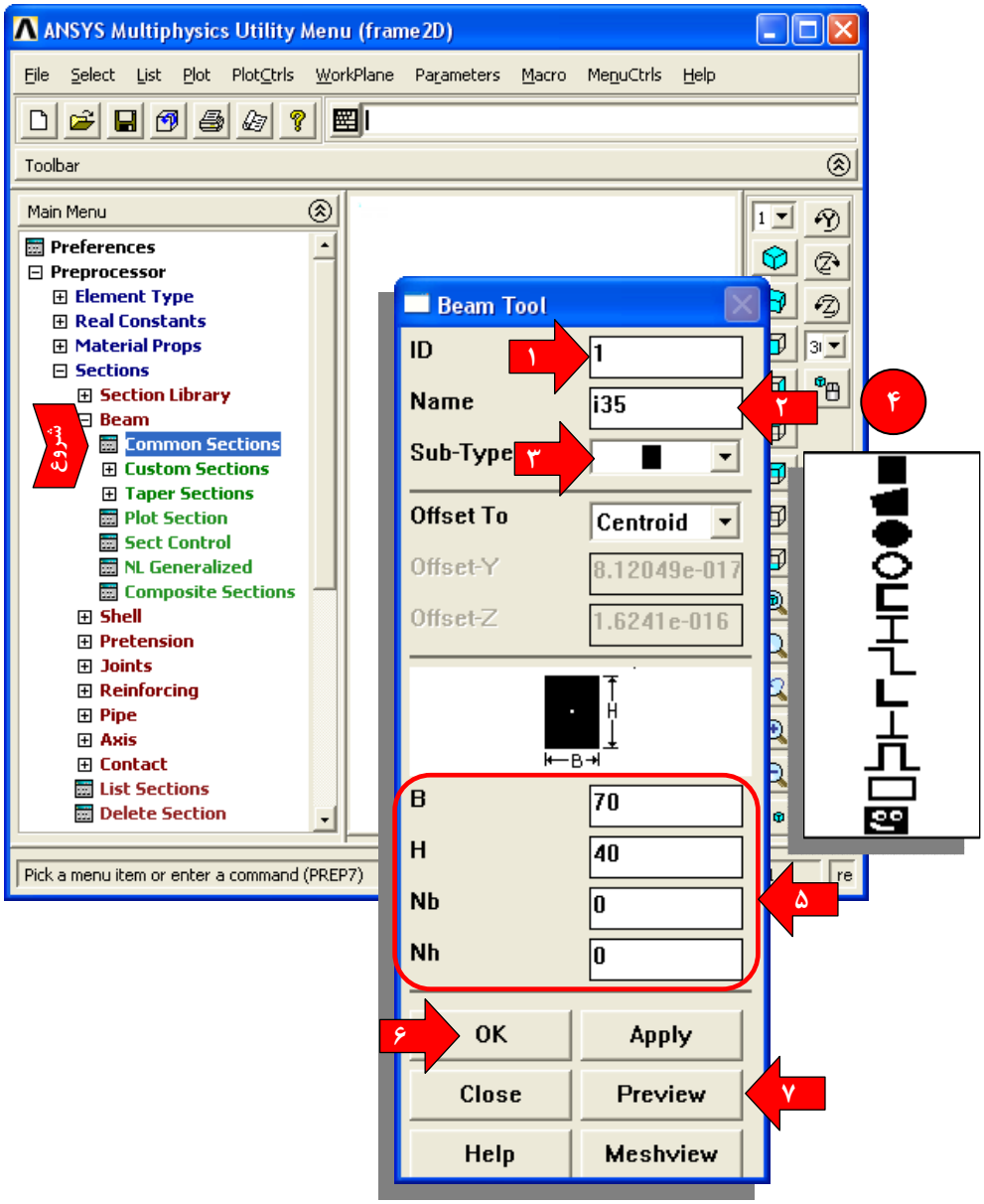


شکل ۴-۲ فلوچارت مراحل ساخت و تحلیل قاب

۴.۲.۱. ساخت مدل

مدل قاب با المان Beam ساخته می‌شود. المان Beam دارای هندسه خطی است و علاوه بر درجه آزادی جابجایی در سه جهت دارای درجه آزادی دورانی حول سه محور در هر گره است. همین قابلیت امکان ایجاد سختی خمشی، برشی و پیچشی را در المان فراهم کرده و آن را برای شبیه سازی قاب‌های ساختمانی مناسب می‌سازد.

دو نوع المان Beam در ANSYS برای مدل‌سازی قاب مورد نظر مناسب هستند که عبارت‌اند از Beam 188 و Beam189. در شکل ۴-۳ شکل عمومی این دو المان با یکدیگر

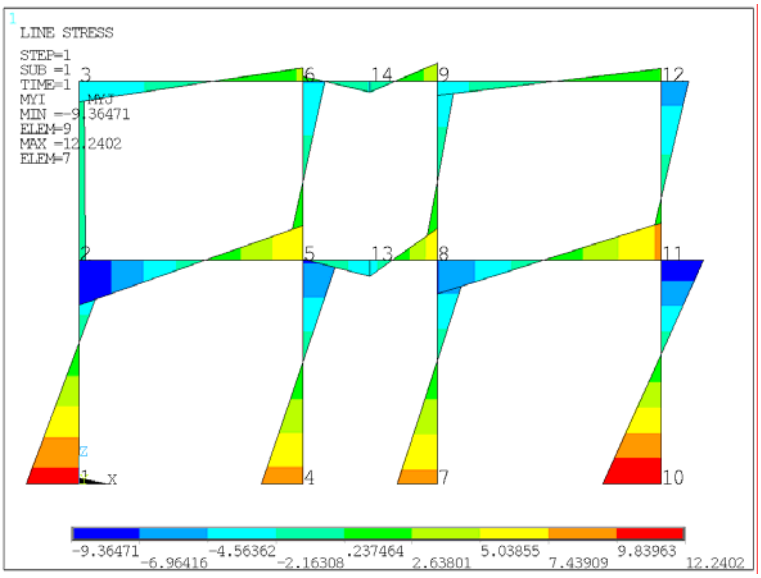


شکل ۴-۵ تعریف مقطع برای تیر – مقطع 3.5I

در قاب مفروض پنج نوع مقطع متفاوت برای تیرها و ستون‌ها وجود دارد. چون شکل مقاطع اهمیتی ندارد و تنها سختی نسبی آنها در تحلیل مهم است، از شکل مستطیلی استفاده شده و فرض می‌شود جنس قاب بتنی است. برای ستون با مقطع 3.5I ارتفاع مقطع برابر ۴۰ و عرض آن

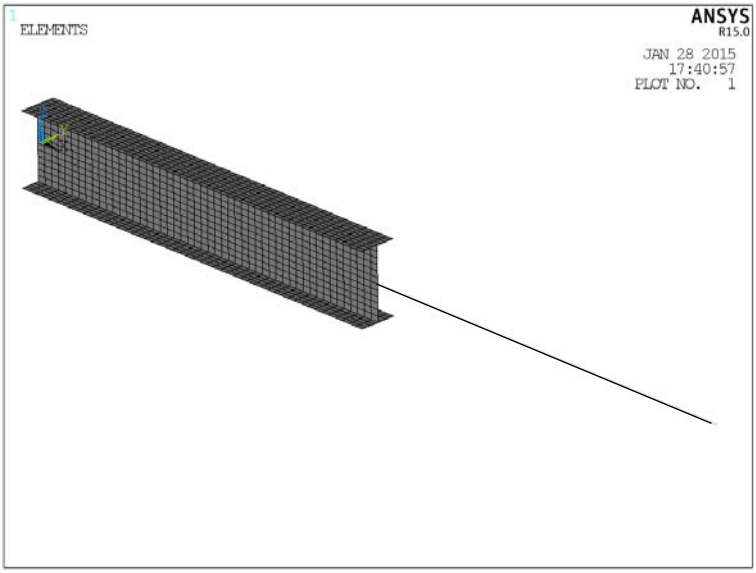
صفحات میانی حذف شده اند

نمایش داده و برآیند آنها را محاسبه کرده است. در ستونی که با پیکان ۳ مشخص شده است شماره گره و مؤلفه FX آنها و در ستون‌های بعدی مؤلفه نیروی محوری و لنگر خمشی My در تکیه‌گاه‌ها فهرست شده است. در خط پایانی که با شماره ۶ مشخص شده است برآیند کلیه بارها برای هر مؤلفه محاسبه و نوشته شده است. عدد زیر ستون FX در این خط همان برش پایه است که برابر ۱۴۰۰۰ کیلوگرم بوده و صحیح است.



شکل ۴-۳۷ ترسیم دیاگرام لنگر اعضاء بر حسب Ton.m

از دیگر نتایجی که مطلوب است تعیین برش طبقه است. در روش اجزای محدود المان‌هایی که به یک گره متصل‌اند، هر یک نیروی متفاوتی دارند که برآیند آنها همراه با نیروی وارده بر گره و عکس العمل تکیه‌گاهی آن (در صورت وجود) برابر صفر است. برای استخراج برش طبقه باید نیروهای داخل ستونهای این طبقه به تنهایی استخراج و با یکدیگر جمع شوند. روش تعیین برش طبقه شامل انتخاب (یا Select کردن) ستون‌های طبقه دوم، سپس انتخاب گره‌های زیرین این ستون‌ها و نهایتاً جمع کردن نیروی گره‌های ستونها در امتداد جهت x است. مفهوم انتخاب بدین معنی است که المان‌های مشخصی از مدل بر اساس موقعیت یا مشخصات آنها از سایر اعضا جدا شده و پس از آن تنها نتایج آنها قابل مشاهده است.



شکل ۵-۲۴ مدل نهایی تیر

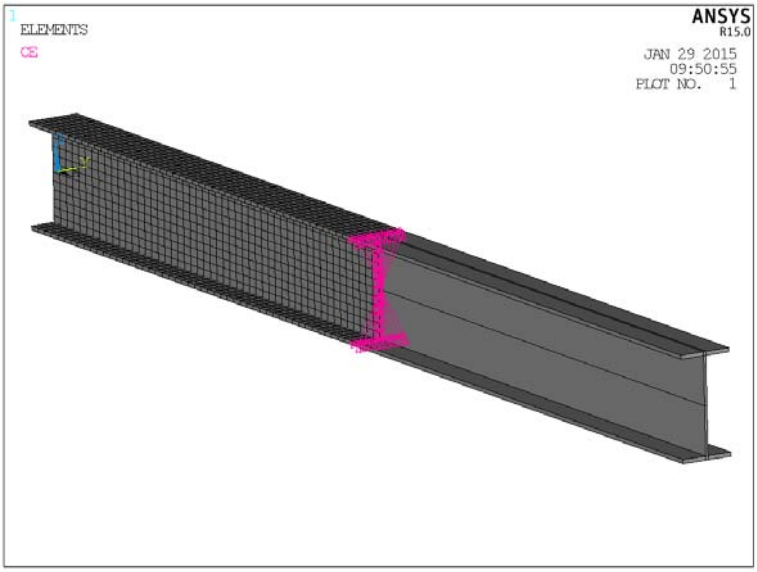
برای کنترل مقطع تعریف شده برای المان Beam می‌توان از گزینه گرافیکی که در آدرس زیر پیش بینی شده است استفاده نمود، شکل ۵-۲۵:

Utility Menu → Plot Ctrls → **Style** → Size and Shape …

این گزینه مقطع تعریف شده برای المان Beam را در اندازه واقعی به‌صورت سه بعدی ترسیم می‌کند. گزینه‌ای که باید برای این کار تیک زده شد Display of Element در شکل ۵-۲۵ است. نتیجه کار در شکل ۵-۲۶ نشان داده شده است. اگر در همین حین به المان‌های Shell نیز دقت کنید ملاحظه خواهید کرد که در نمایش گرافیکی آنها نیز ضخامت صفحات به‌صورت سه بعدی دیده می‌شود. به عبارتی استفاده از این گزینه برای فعال کردن نمایش سه بعدی همه المان‌ها بکار می‌رود و مختص المان‌های Beam نیست.

همین گزینه برای غیر فعال کردن نمایش سه بعدی مقاطع نیز بکار می‌رود. برای کار در مراحل بعدی این گزینه را غیر فعال کنید.

اگر به همین صورت مدل تحلیل شود، مشاهده خواهد شد که لنگر ناشی از المان Beam 188، تمرکز تنش بالایی در گره میانی جان تیر اول ایجاد خواهد کرد. برای جلوگیری از این تمرکز تنش باید انتقال نیرو از گره انتهای المان Beam به گره‌های المان‌های Shell بطور مناسب انجام شود.



شکل ۵-۲۶ نمایش سه بعدی المان Beam

این کار با همبسته کردن درجات آزادی گره‌ها در محل اتصال المان‌های Shell و Beam صورت می‌گیرد، بطوریکه گره انتهایی المان Beam با کلیه گره‌های انتهایی المان‌های Shell پیوند داده می‌شود (به شکل ۵-۲۰ مراجعه کنید). برای این کار از روش Rigid Region در آدرس زیر استفاده می‌شود، شکل ۵-۲۷:

Main Menu → Preprocessor → **Coupling/Ceqn** → Rigid Region

این روش با ایجاد یک پیوند صلب بین گره‌های دو نوع المان باعث می‌شود که لنگر و برش در انتهای المان Beam 188 بطور کامل به گره‌های انتهای تیر اول منتقل شود. با ورود به این آدرس، موس فعال می‌شود. برای دقت بیشتر از دگمه برای بزرگنمایی محل اتصال دو تیر استفاده نمایید. اولین گره‌ی که انتخاب می‌شود، گره مشترک دو مدل در مرکز جان تیر اول است. با انتخاب آن دگمه Ok را فشرده تا مجدداً موس فعال شود (شماره‌های ۱ و ۲ در شکل ۵-۲۷). گره‌ی که انتخاب شد به عنوان Master Node یا گره مادر بخش صلب منظور می‌شود.

درجات آزادی این گره حاکم بر رفتار بخش صلب خواهد بود. به همین دلیل گره مرکز جان و همچنین محل اتصال دو مدل برای آن انتخاب شد. حال باید گره‌هایی که درجات آزادی آنها به گره مادر مقید می‌شود انتخاب نمود.

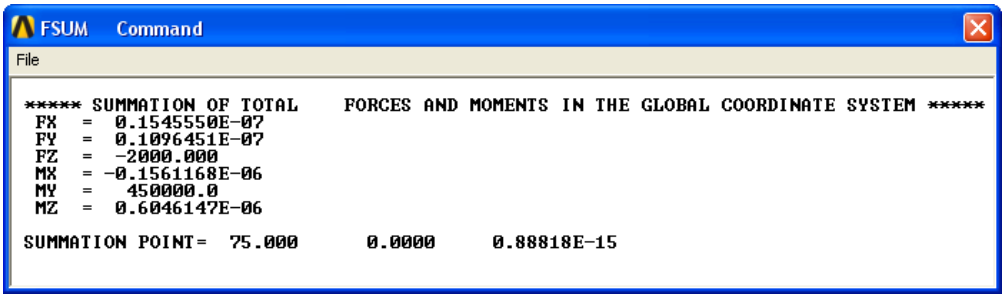
صفحات میانی حذف شده اند

دقت کنید که گره‌های مجاور در مستطیل انتخاب قرار نگیرند. می‌توانید برای کنترل گره‌های انتخاب شده شماره Nodes را در … Plot → Numbering فعال کنید.

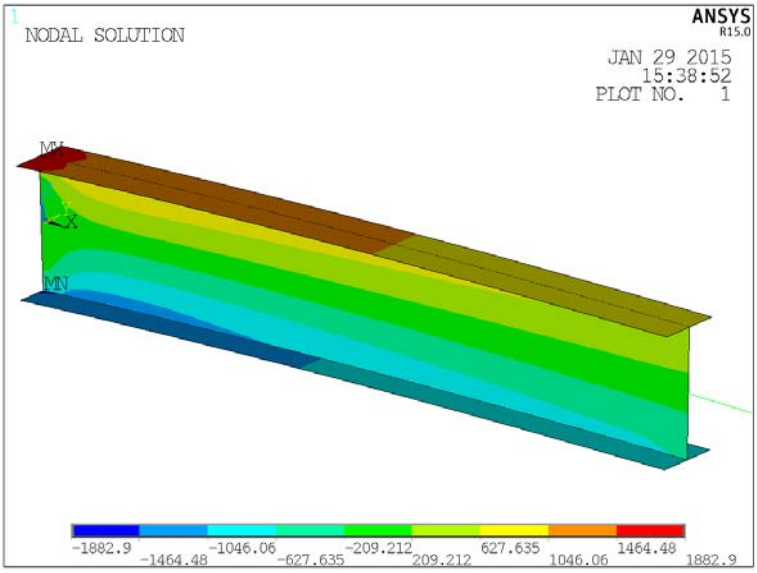
گام بعدی تغییر محل محاسبه برآیند نیروها در آدرس زیر است:

Main Menu → General Post Proc → **Nodal Calcs** → Summation Pt → **At Node**

با فعال شدن موس از میان گره‌های انتخاب شده، گره وسط جان را انتخاب کنید. حال دستور Nodal Calcs را انتخاب کنید. نتیجه محاسبات در شکل ۵-۴۲ نشان داده شده است.



شکل ۵-۴۲ محاسبه برآیند نیروها در مقطع برش زده شده به فاصله ۷۵ سانتیمتر از تکیه‌گاه



شکل ۵-۴۳ ترسیم کانتور تنش sx در المان‌های Shell

مقدار برش ثابت و برابر ۲۰۰۰- اما مقدار لنگر برابر ۴۵۰۰۰۰ بدست آمده است که صحیح است. در پایان با انتخاب دستور زیر باز هم کلیه اجزای مدل در حالت انتخاب در می‌آیند:

Utility Menu → Select → **Everything**

سایر نتایج قابل استخراج شامل ترسیم دیاگرام لنگر و برش در المان Beam181 و ترسیم کانتورهای تنش در المان‌های Shell است که در مثال‌های قبلی تشریح شده و انجام آن به عنوان تمرین به کاربر واگذار می‌شود. در شکل ۵-۴۳ کانتور رنگی تنش sx (تنش در امتداد محور طولی المان) به عنوان نمونه نمایش داده شده است.

فصل ششم

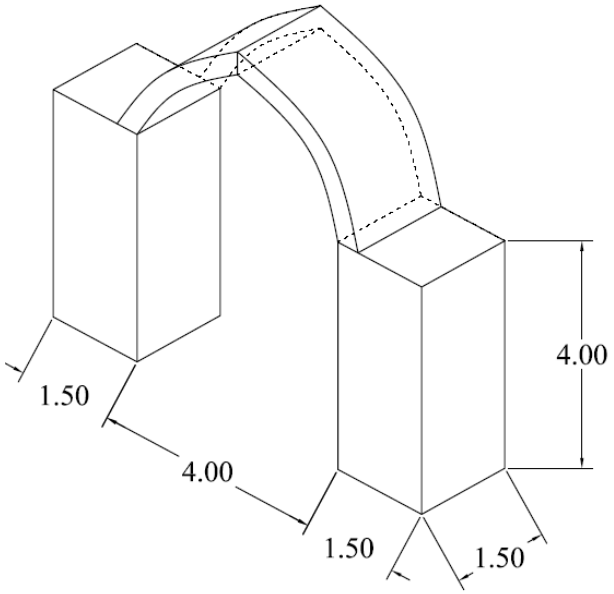
مدل‌سازی حجمی طاق و جرز بنایی با رفتار الاستیک خطی

۶. ۱. مقدمه

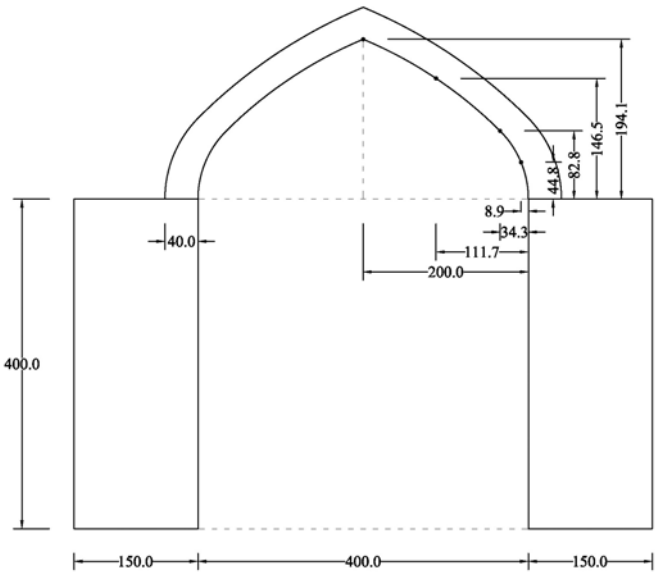
در این فصل با روش مدل‌سازی حجمی آشنا خواهیم شد. مدل انتخابی یک طاق متکی بر دو جرز بنایی است که در ساختمان‌های تاریخی ایران کاربرد زیادی دارند. طاق‌های بنایی عموماً ضخامتی حدود یک-دهم دهانه خود داشته و ابعاد جرزها به نحوی انتخاب می‌شد که وزن آنها مانع از ناپایداری ناشی از رانش افقی پای طاق شود. مصالح در نظر گرفته شده الاستیک خطی است تا بیشتر بر روی نحوه کار با ابزارهای ساخت مدل‌های حجمی آشنا شویم.

نوع طاق بنایی پنج او هفت انتخاب شده است. نمای سه بعدی مدل در شکل ۶-۱ آورده شده است. در شکل ۶-۲ نمای جانبی مدل طاق-جرز همراه با ابعاد آن نشان داده شده است. مشخصات مصالح بنایی نیز در جدول ۶-۱ آورده شده است. مدول الاستیسیته بنایی با استفاده

از رابطه $E_m=۵۵۰f'_m$ مطابق نشریه ۳۷۶ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور تعیین شده و مقاومت فشاری ۴۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع فرض شده است (f'_m مقاومت فشاری بنایی است).



شکل ۶-۱ نمای سه بعدی مدل طاق-جرز



شکل ۶-۲ شکل استاندارد طاق پنج او هفت

جدول ۶-۱ مشخصات مصالح بنایی - واحدها کیلوگرم و سانتیمتر

مدول الاستیسیته بنایی	۵۵۰×۴۰=۲۲۰۰۰
ضریب پواسون	۰/۲
چگالی مصالح	۱۸۰۰×۱۰^{-۶}

در این مثال با نحوه ساخت مدل‌های حجمی و همچنین چگونگی استفاده از صفحه کار Work Plane آشنا خواهیم شد. برای شروع به کار پروژه، داخل پوشه ANSYS Files پوشه دیگری به نام Example-6 بسازید تا محتویات مثال شماره ۶ در آن ذخیره شود. حال وارد نرم‌افزار شوید. دگمه Mechanical APDL Product Launcher 15.0 را فشار دهید تا پنجره ورودی برنامه باز شود. در این پنجره در بخش Working Directory و به کمک دگمه Browse پوشه Example-6 را انتخاب و در مقابل Job name نام Arch را وارد کنید. حال دگمه Run را بفشارید تا وارد برنامه شوید.

۶. ۲. آشنایی با صفحه کار

در نرم‌افزار ANSYS ساخت اشیاء هندسی غیر از نقطه و گره بر روی صفحه‌ای صورت می‌گیرد که به آن Work Plane یا صفحه کار گرفته می‌شود. برای مثال ساخت یک صفحه و ابعاد آن و یا ساخت یک حجم و تعریف ابعاد آن بر اساس مختصات آن بر روی Work Plane تعیین شده و اصطلاحاً بر روی آن ساخته می‌شود. نقطه و گره (Keypoint یا Node) نیز می‌توانند هم بر اساس دستگاه مختصات اصلی (In Active CS) و هم بر اساس مختصات صفحه کار تعریف شوند.

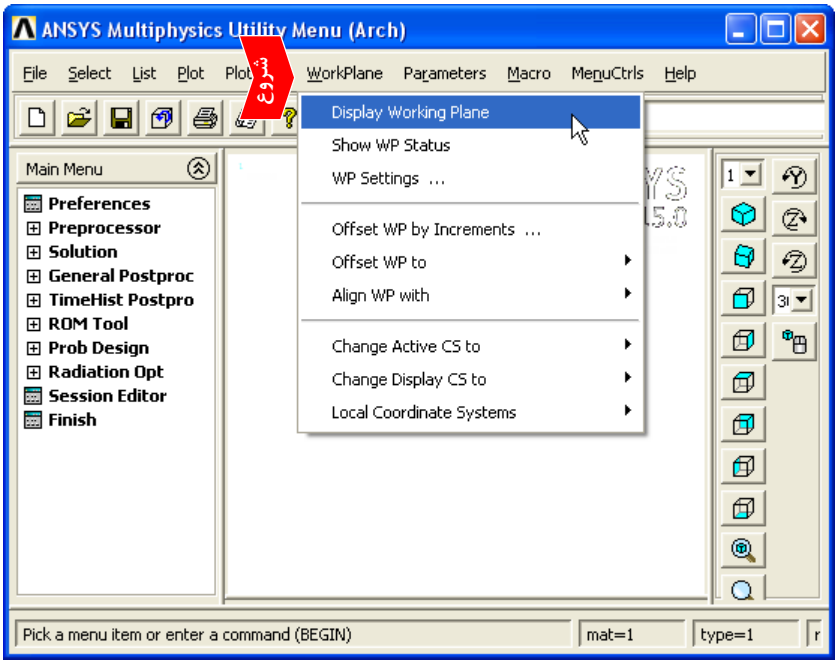
یک صفحه کار شامل دستگاه مختصات شناوری است که موقعیت – به لحاظ مختصات مکانی و میزان دوران - و نوع آن - به لحاظ کارتزین یا استوانه‌ای بودن آن – توسط کاربر تعیین می‌شود. استفاده از صفحه کار دو ویژگی دارد، اول اینکه اشیاء هندسی ایجاد شده در نرم‌افزار بر اساس مختصات این صفحه ایجاد می‌شوند و دوم اینکه می‌توان برای انجام برخی تغییرات دستگاه مختصات اصلی را بر روی آن منطبق کرد و به این ترتیب با آسودگی بیشتر به مدل‌سازی پرداخت.

برای فعال سازی صفحه کار وارد منوی شکل ۶-۳ شده و گزینه Display Work Plane را

فعال سازید. با این کار سه محور جدید در مرکز مختصات مشاهده می‌شود که با wx، wy و wz نام‌گذاری شده و محورهای آن بر دستگاه مختصات اصلی فضای نمایش منطبق است. دو نوع کلی تنظیم برای صفحه کار پیش بینی شده است. نوع اول تغییر در نحوه مشاهده و نوع دوم تغییر موقعیت صفحه کار است. تغییر در نحوه مشاهده صفحه کار توسط گزینه WP Setting انجام می‌شود که در شکل ۶-۴ جزئیات آن توضیح داده شده است.

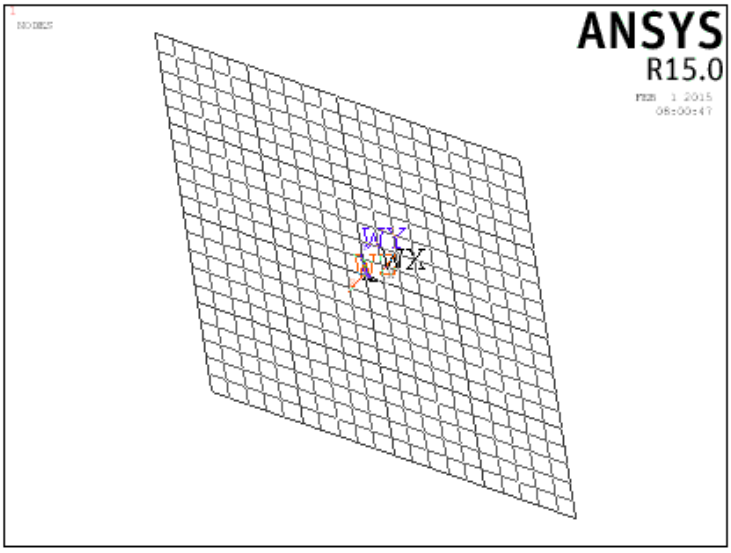
به عنوان مثال می‌توانید گزینه Grid and Traid را انتخاب و در مربع چهارم فواصل شبکه یا Spacing را ۱۰ سانتیمتر و مقادیر حداقل و حداکثر آن را به ترتیب ۱۰۰- و ۱۰۰+ قرار دهید. حال دگمه Ok را بفشارید و نتیجه را در پنجره نمایش رؤیت کنید، شکل ۶-۵.

صفحه شطرنجی همواره در صفحه wx-wy صفحه کار قرار گرفته است و با چرخاندن صفحه کار یا جابجا کردن آن موقعیت آن نیز بطور متناسب تغییر می‌کند. همین ویژگی است که کارایی قابل توجهی به صفحه کار می‌دهد. زیرا کاربر می‌تواند به سرعت با تغییر وضعیت آن دستگاه مختصات جدیدی ایجاد کرده و مدل‌سازی را ادامه دهد.



شکل ۶-۳ مشاهده صفحه کار در پنجره نمایش

شکل ۶-۴ تنظیمات صفحه کار

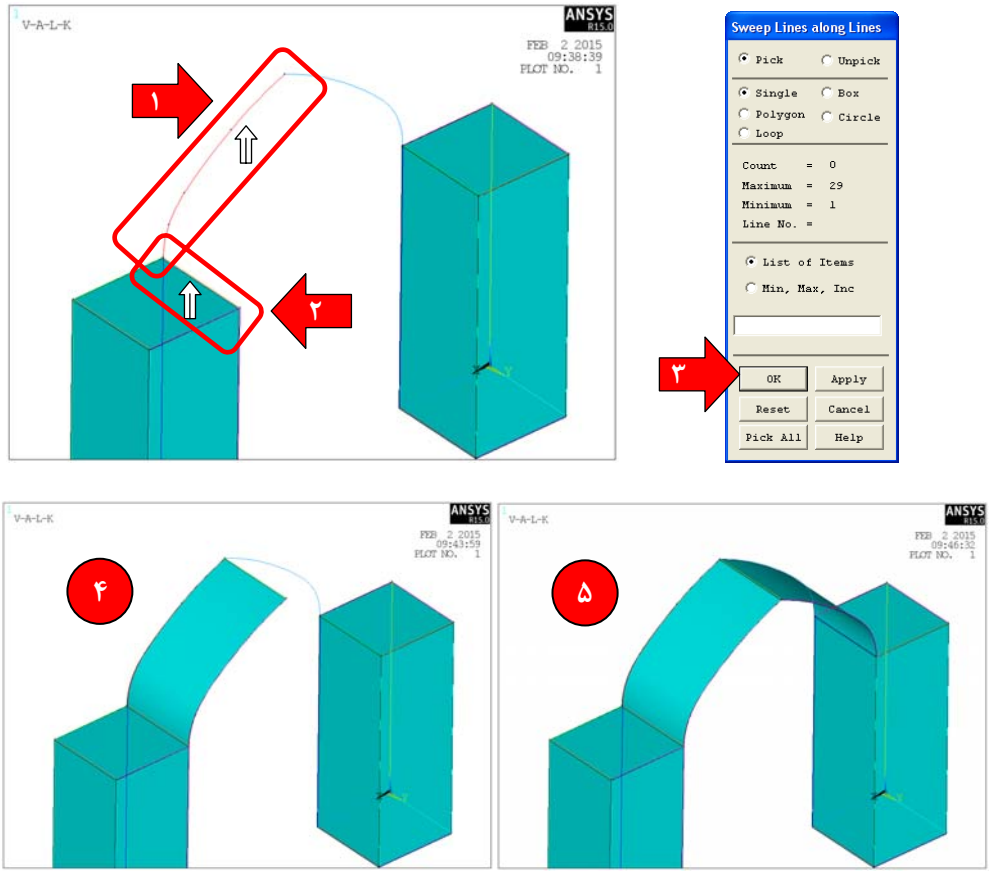


شکل ۶-۵ تغییر ابعاد و فواصل شبکه بندی صفحه کار

صفحات میانی حذف شده اند

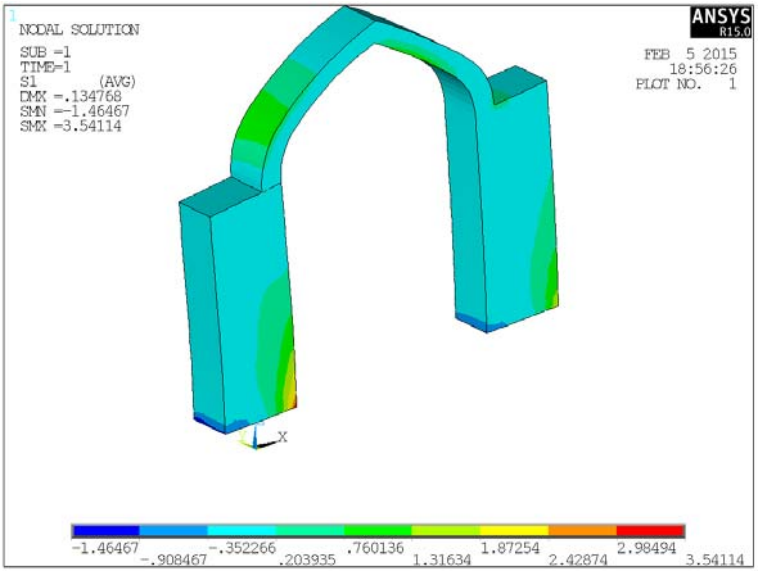
مرحله بعدی ساخت صفحات طاق است. نام‌گذاری صفحات طاق در شکل ۶-۱۷-ب صورت گرفته است. ابتدا صفحات A1 و A2 که سطح زیرین طاق را شکل می‌دهند با امتداد دادن خطوط L1 و L2 ایجاد می‌شوند. این خطوط در عرض جرز Extrude می‌شوند. قبلاً از این دستور استفاده کرده‌ایم. وارد آدرس زیر شده و با فعال شدن موس روی خط L1 کلیک کرده و پس از فشردن Ok خط عرضی جرز را مطابق شکل ۶-۲۳ انتخاب کنید:

Main Menu → Preprocessor → **Modeling** → Operate → **Extrudes**→ Lines → **along Line**

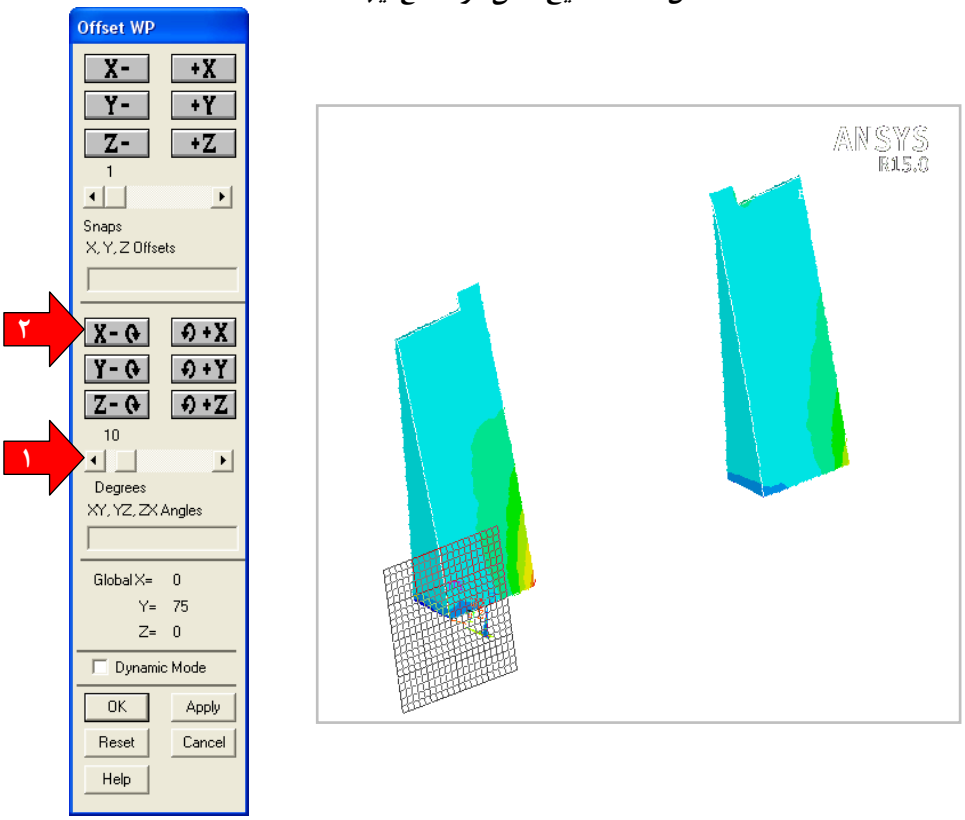


شکل ۶-۲۳ ساخت اولین صفحه زیرین طاق با امتداد دادن خط طاق

با فشردن Ok سطح A1 ایجاد می‌شود. مراحل مشابهی می‌توان برای ساخت صفحه A2 طی کرد و یا از دستور Reflect استفاده نمود که انجام آن به عهده کاربر گذاشته می‌شود. نتیجه



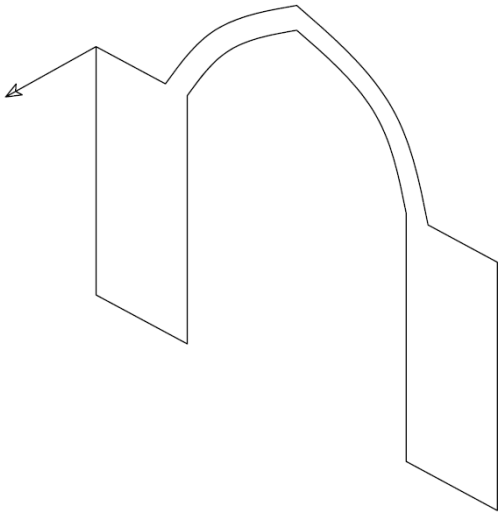
شکل ۶-۴۲ نتایج تنش در مقطع ایجاد شده



شکل ۶-۴۳ تنظیمات سطح برش مایل در مدل

۶. ۷. تمرین

به عنوان تمرین پیشنهاد می‌شود کاربر ساخت مدل را به روش دیگری انجام داده و مراحل تحلیل و مشاهده نتایج را مجدداً تکرار کند. برای این منظور ابتدا مقطع مدل را همانند شکل ۶-۴۴ ساخته و سپس آن را در جهت عمود بر سطح خود امتداد داده تا حجم مورد نظر تشکیل شود. سپس مدل را المان بندی کرده و پس از بارگذاری نتایج را در آن مشاهده کنید.



شکل ۶-۴۴ مقطع مدل و مسیر امتداد دادن آن

فصل هفتم

مقدمه‌ای بر رفتار غیر خطی مصالح و روش‌های مدل‌سازی و تحلیل آن در ANSYS

۷. ۱. مقدمه

مثال‌هایی که تا این فصل آموزش داده شد شامل مدل‌سازی اجزاء یا سازه‌هایی بود که رفتار الاستیک خطی داشتند. در دو فصل بعدی مدل‌هایی مورد بررسی قرار می‌گیرند که رفتار مصالح آنها غیر خطی در نظر گرفته می‌شود. استفاده از این مثال‌ها مستلزم آن است که کاربر با رفتار غیر خطی مصالح آشنا بوده و از روش‌های مدل‌سازی و تحلیل آنها اطلاع داشته باشد.

در این فصل به‌صورت خلاصه انواع مصالح شکل‌پذیر و ترد در نرم‌افزار ANSYS معرفی می‌شود. پس از آن چگونگی حل معادلات غیر خطی مطرح شده و گزینه‌های غیر خطی که می‌توانند برای دستیابی به همگرایی در این نوع تحلیل‌ها کارآمد باشند، معرفی می‌شوند.

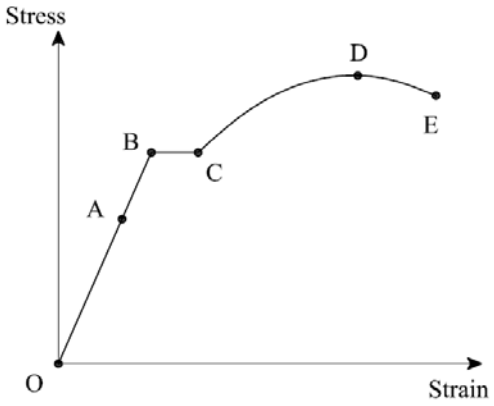
۷. ۲. رفتار غیر خطی مصالح

شناخت رفتار مصالح در یک آزمایش کشش یا فشار ساده کمک بسیاری به آشنایی با رفتار مصالح در محدوده غیر خطی و پس از آن در حوزه تنش‌های دو یا سه محوری می‌کند. مصالح متنوعی در دسته‌های مختلف مانند فلزات، مصالح شکننده و مصالح فوق الاستیک یا هوشمند و ... در طبیعت وجود داشته و یا بطور مصنوعی ساخته شده‌اند. اما از دید سازه‌ای دو نوع مصالح فولاد و بتن به دلیل کاربردهای گسترده آنها از اهمیت بیشتری برخوردارند.

در این بخش مبحث رفتار غیر خطی مصالح با مقدمه‌ای از نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های فولادی و بتنی در بارگذاری تک محوری آغاز خواهد شد. سپس معیارهایی که برای شبیه سازی رفتار جاری شونده و رفتار گسیختگی ابداع شده‌اند مرور و نهایتاً مدل‌های مصالح نرم‌افزار ANSYS که در حوزه مهندسی عمران کاربرد دارند، مختصراً معرفی می‌شوند. در پایان فصل نیز روش‌ها و گزینه‌های تحلیل‌های غیر خطی که می‌توانند در رسیدن به همگرایی در پاسخ مؤثر باشند تشریح خواهند شد.

۷. ۲. ۱. رفتار غیر خطی فولاد

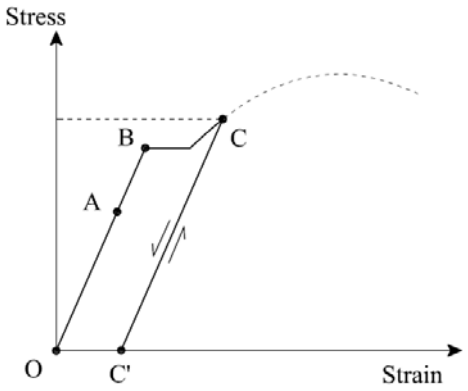
نمونه‌ای از رفتار یک نمونه کششی در شکل ۷-۱ نشان داده شده است. هنگامی که بارگذاری فولاد در محدوده تنش‌های کوچک صورت می‌گیرد، تا نقطه A در روی نمودار، تغییرات تنش نسبت به کرنش خطی بوده و هر گونه بار برداری در این محدوده باعث می‌شود که نمونه در همان مسیر بارگذاری به نقطه اولیه بازگردد. در صورتیکه بارگذاری تا نقطه B ادامه یابد فولاد جاری شده و بدون آنکه نیروی داخلی نمونه افزایش پیدا کند، در آن تغییر شکل ایجاد می‌شود. تنش و کرنش متناظر با نقطه B تنش و کرنش جاری شدگی و محدوده B تا C جریان پلاستیک نامیده می‌شود. پس از نقطه C با افزایش تنش، فولاد مجدداً تمایل به سخت شدن از خود نشان می‌دهد اما این بار شیب منحنی تنش-کرنش کمتر از مقدار اولیه آن است. این محدوده ناحیه سخت شوندگی مجدد نامیده می‌شود. سخت شوندگی تا حداکثر مقاومت فولاد یا نقطه E ادامه یافته و پس از آن فولاد دچار گسیختگی می‌شود. کرنش ایجاد شده در فولاد در محدوده جاری شدن حدود ۰/۰۰۲ و در محدوده گسیختگی حدود ۰/۲ است. اگر نمونه فولادی به جای بارگذاری کششی، فشرده شود، رفتاری مشابه آنچه در شکل ۷-۱ ترسیم شده از خود نشان خواهد داد.



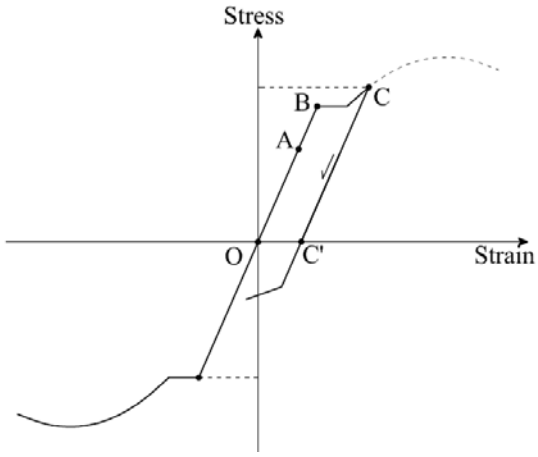
شکل ۷-۱ نمودار تنش-کرنش فولاد

اما اگر فولاد پس از بارگذاری، باربرداری شود بسته به اینکه در چه محدوده باربرداری صورت گرفته است رفتار متفاوتی خواهد داشت.، شکل ۷-۲. اگر باربرداری نمونه در محدوده نقطه O تا A باشد، به دلیل رفتار الاستیک خطی فولاد در این ناحیه، مسیر باربرداری دقیقاً بر روی مسیر بارگذاری باز خواهد گشت تا به نقطه O برسد. اما اگر فولاد از ناحیه جاری شدگی عبور کرده باشد، مسیر باربرداری آن روی خطی به موازات خط OA خواهد بود. به این ترتیب هنگامی که بار روی نمونه به صفر می‌رسد، نمونه به جای نقطه O به نقطه 'C رسیده و مقداری تغییر شکل ماندگار در آن باقی خواهد ماند. بارگذاری مجدد نمونه از همین نقطه آغاز شده و مسیر خط 'CC را طی خواهد کرد. به این ترتیب تنش جاری شدگی جدید در رفتار فولاد دیده می‌شود که مقدار آن بیشتر از تنش جاری شدگی اولیه فولاد است. اما ظرفیت تغییر شکل‌پذیری نمونه به دلیل بروز تغییر شکل‌های پلاستیک ماندگار کاهش یافته است.

حالت سوم وضعیتی است که نمونه پس از باربرداری، بارگذاری معکوس را متحمل شود. نمودار تنش-کرنش برای این حالت در شکل ۷-۳ نشان داده شده است. در صورت بارگذاری معکوس از نقطه 'C، نمونه در خطی به موازات خط OA در محدوده منفی تنش‌ها شروع به حرکت می‌کند. اما قبل از رسیدن به تنش جاری شدن در محدوده فشاری دچار رفتار پلاستیک شده و شیب منحنی کاسته می‌شود. این پدیده اولین بار توسط بوشینگر مشاهده و به نام او نام‌گذاری شده است.



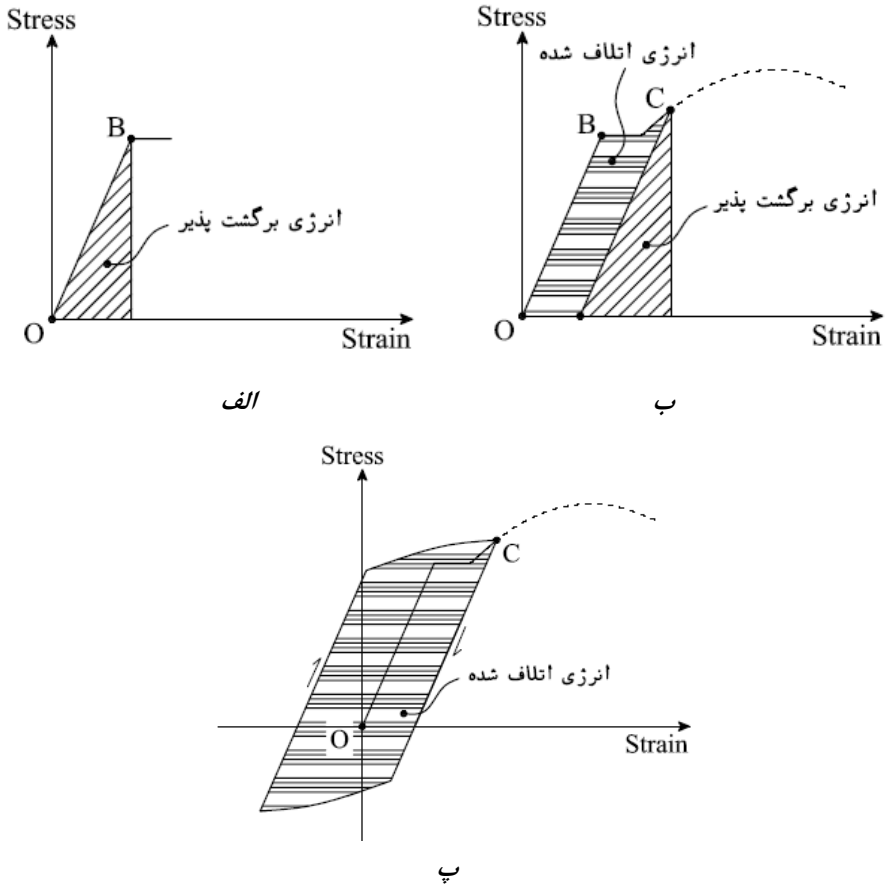
شکل ۷-۲ بارگذاری و باربرداری نمونه فولادی پس از تنش جاری شدن



شکل ۷-۳ بارگذاری-باربرداری-بارگذاری معکوس نمونه فولادی

هنگامی که نمونه در محدوده الاستیک خطی بارگذاری می‌شود، مقدار انرژی دریافت شده توسط آن برابر سطح زیر مثلث 'OBB در شکل ۷-۴-الف است. اگر در همین حین نمونه باربرداری شود، همان مقدار که انرژی دریافت کرده است، آزاد می‌کند. اما اگر دچار رفتار پلاستیک شده باشد در هنگام باربرداری تنها بخشی از انرژی که برابر سطح مثلث CC'D است آزاد شده و بخشی دیگر به دلیل تغییر شکل پلاستیک اتلاف می‌شود، شکل ۷-۴-ب. همین رفتار در یک سیکل کامل بارگذاری –باربرداری – بارگذاری معکوس نیز قابل رؤیت است. با بروز تغییر شکل‌های ماندگار در نمونه، حلقه‌ای ایجاد می‌شود که به آن حلقه پسماند گفته شده و

سطح زیر آن انرژی اتلاف شده توسط نمونه فولادی بر اثر تغییر شکل‌های پلاستیک است، شکل ۷-۴-پ. این ویژگی فولاد تأثیر زیادی در اتلاف انرژی بارهای وارده به سازه‌ها در هنگام زلزله دارد.



شکل۷-۴ انرژی بازگشت پذیر و اتلاف شده در بارگذاری-باربرداری-بارگذاری معکوس نمونه فولادی

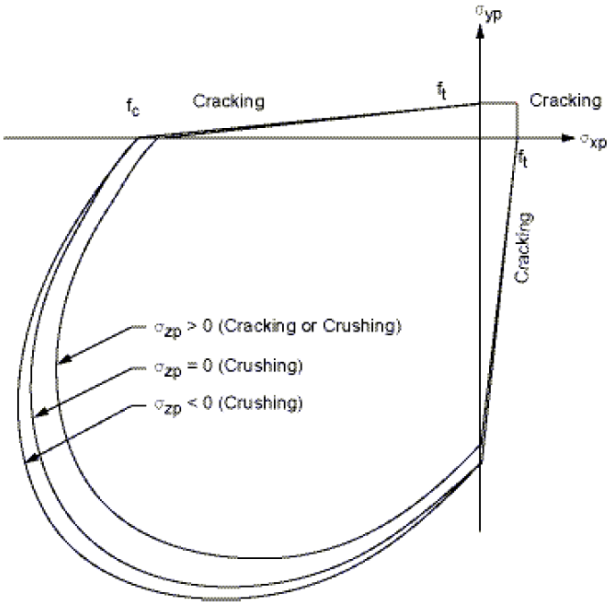
۷. ۲. ۲. رفتار غیر خطی بتن

مصالح بتن مصالح مرکب از سنگ‌دانه و ملات سیمانی است. هنگامی که بتن سخت می‌شود حتی قبل از آنکه تحت تنش ناشی از بارهای وارده قرار گرفته باشد، در سطوح بینابینی سنگ‌دانه و ملات دارای میکرو ترک‌هایی است که در اثر خزش و یا ایجاد تنش‌های حرارتی در بتن و اختلاف سختی بین سنگ‌دانه و ملات ایجاد می‌شوند.

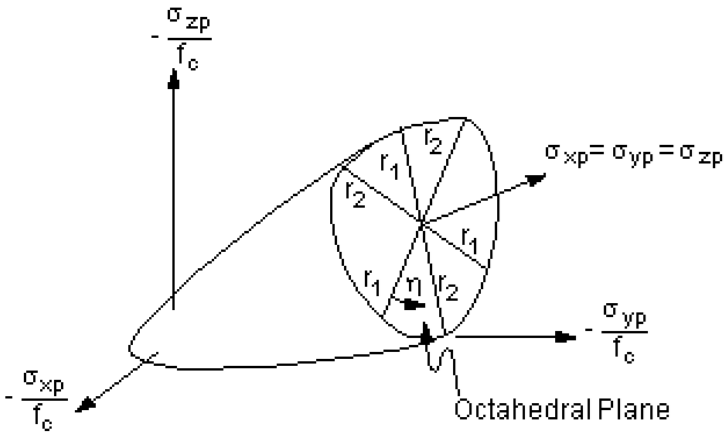
صفحات میانی حذف شده اند

۴. محدوده کشش-کشش-کشش که در آن $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$

در شکل ۷-۲۱ سطح گسیختگی این معیار در فضای تنش‌های دو بعدی و در شکل ۷-۲۲ سطح گسیختگی در فضای تنش‌های اصلی ترسیم شده است.



شکل ۷-۲۱ سطح گسیختگی معیار ویلام - وارنکی در فضای تنش‌های اصلی با تنش‌های نزدیک به حالت دو محوری [۳]



شکل ۷-۲۲ سطح گسیختگی سه بعدی معیار ویلام – وارنکی در فضای تنش‌های اصلی [۳]

۷. ۴. مدل‌های غیر خطی مصالح در نرم‌افزار ANSYS[۱۰]

همانطور که گفته شد در هر نرم‌افزار مدل‌هایی ریاضی برای شبیه سازی مصالح معرفی می‌شوند که فرمول‌بندی آنها بر اساس معیارهای رفتار غیر خطی است. برخی از این مدل‌ها برای فلزات و برخی برای مصالح شکننده مدون شده و برخی نیز از معیارهای ترکیبی استفاده می‌کنند.

در بخش حاضر تعدادی از مدل‌های مصالح معرفی شده در نرم‌افزار ANSYS بطور خلاصه مرور شده و حوزه کاربرد آنها معرفی می‌شود. مجموعه متنوعی از مدل‌های مصالح در نرم‌افزار آمده است که بعضی از آنها به شرح زیر است:

۱. پلاستیسیته مستقل از سرعت (Rate-Independent Plasticity)،
۲. پلاستیسیته وابسته به سرعت (Rate-Dependent Plasticity)،
۳. ماده Gasket،
۴. غیر خطی الاستیک (Nonlinear Elasticity)،
۵. هایپرالاستیسیته (Hyperelasticity)،
۶. مدل آلیاژ حافظه‌دار یا Shape Memory Alloy Material Model،
۷. ویسکوالاستیسیته (Viscoelasticity)،
۸. بتن (Concrete).

هر کدام از این نوع رفتارها را می‌توان با انتخاب المان مناسب در نرم‌افزار ANSYS بکار برد. در نرم‌افزار ANSYS برای شبیه سازی هر گونه مصالح با رفتارهای غیر خطی یا وابسته به سرعت تغییرات تنش-کرنش، از خانواده دستورات TB یا معادل گرافیکی آن در بخش مصالح استفاده می‌شود. با این حال بعضی از مدل‌ها تنها از طریق دستوارت متنی در دسترس هستند.

۷. ۴. ۱. پلاستیسیته مستقل از سرعت

پلاستیسیته برای مدل‌سازی مصالحی بکار می‌رود که در معرض بارگذاری فراتر از حد الاستیک قرار می‌گیرند. این نوع مصالح برای شبیه سازی کرنش‌های غیر قابل بازگشتی که با

[۱۰] مطالب این بخش از راهنمای برنامه ANSYS اقتباس شده است.

رسیدن تنش به سطحی مشخص ایجاد می‌شود، بکار می‌رود. فرض می‌شود که کرنش‌های پلاستیک بطور آنی و مستقل از زمان توزیع می‌شوند. برنامه ANSYS گزینه‌های متعددی برای شبیه سازی انواع مختلف این نوع مصالح ارائه می‌کند که نمودار تنش-کرنش برخی از آنها در شکل ۷-۲۳ نشان داده شده است. این مصالح عبارت‌اند از:

۱. سخت شوندگی کینماتیک دو خطی (Bilinear Kinematic Hardening)،
۲. سخت شوندگی کینماتیک چند خطی (Multilinear Kinematic Hardening)،
۳. سخت شوندگی کینماتیک غیر خطی (Nonlinear Kinematic Hardening)،
۴. سخت شوندگی ایزوتروپیک دو خطی (Bilinear Isotropic Hardening)،
۵. سخت شوندگی ایزوتروپیک چند خطی (Multilinear Isotropic Hardening)،
۶. سخت شوندگی ایزوتروپیک غیر خطی (Nonlinear Isotropic Hardening)،
۷. غیر ایزوتروپیک (Anisotropic)،
۸. دراکر-پراگر (Drucker - Prager)،
۹. چدن (Cast Iron)،

۷. ۴. ۱. الف. مبانی تئوری

تئوری پلاستیسیته رابطه‌ای ریاضی ارائه می‌کند که می‌تواند پاسخ الاستو-پلاستیک مصالح را شبیه سازی کند. در تئوری پلاستیسیته مستقل از سرعت سه جزء اصلی وجود دارند که عبارت‌اند از: معیار جاری شدن یا Yield Criterion، قانون جریان یا Flow Rule و قانون سخت شوندگی یا Hardening Rule.

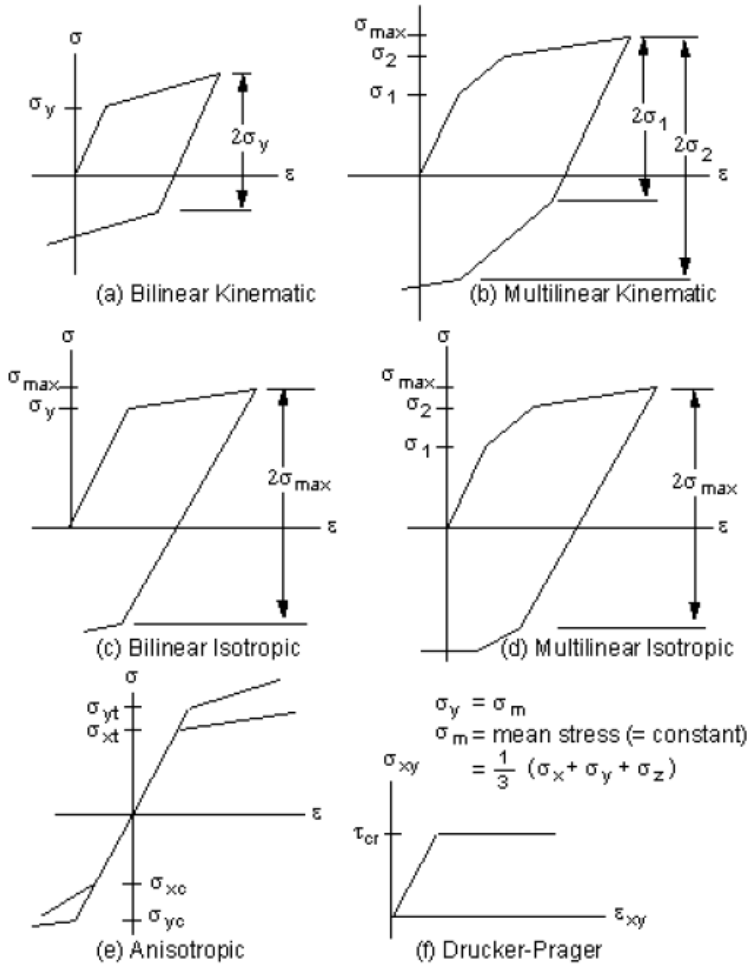
معیار جاری شدن

در بخش قبل با چندین معیار جاری شدن آشنا شدیم. معیار جاری شدن میزان تنش را که در آن جاری شدن رخ می‌دهد بیان می‌کند. برای تنش‌های چند جهته این معیار به‌صورت تابعی از مؤلفه‌های تنش بیان می‌شود که آن را تنش معادل نیز می‌نامند:

$$\sigma_e = f(\{\sigma\})$$

که $\{\sigma\}$ بردار تنش است. هنگامی که تنش معادل برابر تنش جاری شدن مصالح σ_y شود:

$$f(\{\sigma\}) = \sigma_y \qquad ۷-۲$$

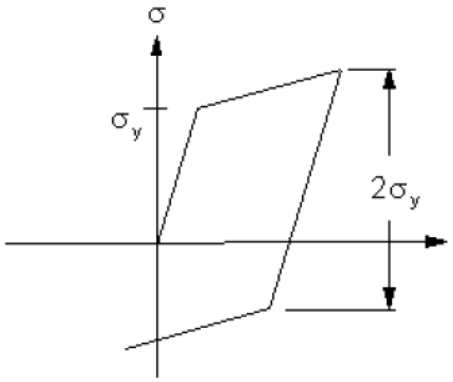


شکل ۷-۲۳ نمودار تنش-کرنش برخی مصالح غیر خطی [۳]

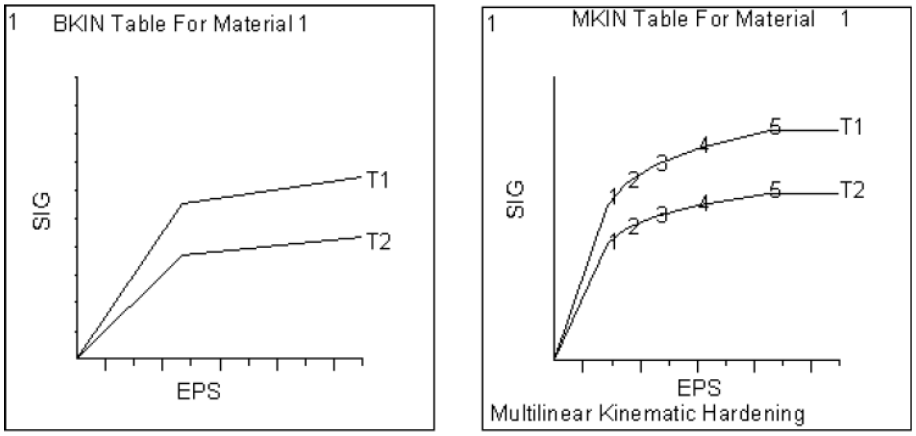
آنگاه کرنش‌های پلاستیک در مصالح به وقوع می‌پیوندد. اگر σ_e کمتر از σ_y باشد مصالح رفتار الاستیک داشته و توزیع تنش‌ها بر اساس روابط تنش-کرنش الاستیک خواهد بود. مقدار تنش معادل هرگز نمی‌تواند از تنش جاری شدن تجاوز کند و به جای آن کرنش‌های پلاستیک بطور آنی توسعه می‌یابند. معادله ۷-۲ را می‌توان در فضای تنش‌های اصلی به شکل ۷-۲۴ نشان داد. در این شکل سطوح جاری شوندگی برخی مصالح غیر خطی ترسیم شده است.

قانون جریان

قانون جریان جهت کرنش پلاستیک را به‌صورت زیر تعیین می‌کند:



شکل ۷-۲۶ پدیده باشینگر



الف ب

شکل ۷-۲۷ سخت شوندگی کینماتیک، الف) مدل دو خطی، ب)مدل چند خطی [۳]

سخت شوندگی کینماتیک چند خطی (Multilinear Kinematic Hardening)

گزینه سخت شوندگی کینماتیک چند خطی که با گزینه KINH و MKIN در دستور TB تعریف می‌شود، می‌تواند از چندین نقطه برای تعریف منحنی تنش-کرنش استفاده نماید. در این مدل نیز اثر باشینگر در نظر گرفته می‌شود. با گزینه KINH می‌توان نمودارهای بیشتر (۴۰ در مقابل ۵) و تعداد نقاط بیشتر بر روی هر نمودار (۲۰ در مقابل ۵) را نسبت به MKIN تعریف کرد. از طرفی با استفاده از گزینه KINH در المان‌های LINK180، SHELL181، PLANE182، PLANE183، SOLID185، SOLID186، SOLID187، SOLSH190، BEAM188، BEAM189، SHELL208 و SHELL209 و تعیین TBOPT=4 (یا پلاستیک) می‌توان تنش را

صفحات میانی حذف شده اند

کلی و تا حد امکان دور از ورود به جزئیات ریاضی ارائه شده است. با این حال لازم است کاربر با مفاهیم ماتریس سختی و بردار جابجایی و نیرو و مفاهیم غیر خطی آشنا باشد.

۷. ۵. ۱. روش نیوتن–رافسون[18]

روش اجزای محدود برای تحلیل سیستم‌های سازه‌ای ابتدا درجات آزادی را تعریف کرده و سپس ماتریس سختی سازه را تشکیل می‌دهد. گام بعدی حل دستگاه معادلات و تعیین جابجایی‌های مجهول است که به رابطه زیر منتهی می‌شود:

$$[K]\{u\} = \{F^a\} \qquad ۳\text{-}۷$$

که در آن:

$[K]$ ماتریس سختی،

$\{u\}$ بردار مقادیر درجات آزادی-DOF- مجهول،

و $\{F^a\}$ بردار نیروهای وارد شده است.

اگر ماتریس سختی خود تابعی از درجات آزادی مجهول $\{u\}$ (یا مشتقات آنها) باشد، آنگاه معادله ۷-۳ معادله‌ای غیر خطی خواهد بود. روش نیوتن-رافسون فرآیندی تکراری را برای حل این‌گونه معادلات غیر خطی ارائه می‌کند که به شکل زیر است:

$$[K_i^T]\{\Delta u_i\} = \{F^a\} - \{F_i^{nr}\} \qquad ۴\text{-}۷$$

$$\{u_{i+1}\} = \{u_i\} + \{\Delta u_i\} \qquad ۵\text{-}۷$$

که در آن:

$[K_i^T]$ ماتریس ژاکوبی[19] یا ماتریس مماسی[20]،

i زیرنویس نمایش دهنده شماره تکرار و

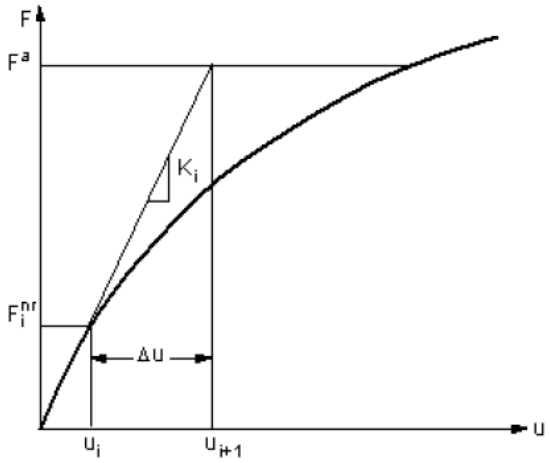
$\{F_i^{nr}\}$ بردار نیروی بازگرداننده[21] حاصل از تنش‌های داخلی المان‌ها است.

ماتریس $[K_i^T]$ و بردار $\{F_i^{nr}\}$ بر اساس مقادیر $\{u_i\}$ بدست می‌آیند. بخش سمت راست معادله ۷-۴ بردار باقیمانده[22] یا بردار متعادل کننده است که باید به صفر نزدیک شود. به معنی

---

[18] Newton-Raphson Method
[19] Jacobian Matrix
[20] Tangent Matrix
[21] Restoring Load Vector
[22] *Residual Vector*

دیگر مقداری است که سیستم خارج از تعادل قرار گرفته است. هنگامی که بردار باقیمانده به صفر یا مقداری ناچیز نزدیک می‌شود همگرایی حاصل شده است. برای دستیابی به همگرایی از روش سعی و خطا یا حل تکراری استفاده می‌شود. نمونه‌ای از حل تک تکراری یک سیستم یک درجه آزاد در شکل ۷-۳۷ نشان داده شده است. خط منحنی پاسخ واقعی و مجهول سیستم است. در هر گام نیروی وارده به سازه، $\{F^a\}$، معلوم است و هدف تعیین جابجایی متناظر با آن است.



شکل ۷-۳۷ حل نیوتن-رافسون – یک تکرار [۳]

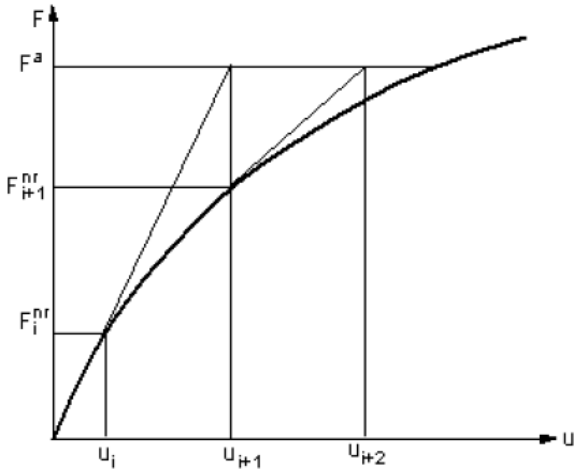
همانطور که از شکل دیده می‌شود برای همگرایی[۲۳] تحلیل بیشتر از یک تکرار نیاز است. فرآیند کلی انجام تکرارها به شکل زیر است:

۱. فرض $\{u_i\}$. $\{u_i\}$ معمولاً تحلیل همگرا شده گام زمانی قبلی است. در اولین گام زمانی خواهیم داشت: $\{u_i\}=\{0\}$،
۲. تعیین $\{F_i^{nr}\}$ از تنش‌های داخلی المان‌ها در وضعیت تغییر شکلی $\{u_i\}$،
۳. محاسبه ماتریس $[K_i^T]$ بر اساس بردار $\{F_i^{nr}\}$ و بردار $\{u_i\}$ از رابطه ۷-۳،
۴. محاسبه بردار $\{\Delta u_i\}$ از معادله ۷-۴،
۵. جمع بردارهای $\{\Delta u_i\}$ و $\{u_i\}$ و تعیین بردار $\{u_{i+1}\}$ – معادله ۷-۵،

[23] *Converge*

گام‌های ۱ تا ۵ آن‌قدر تکرار می‌شوند تا بردار باقیمانده صفر شده یا مقداری ناچیز شود به عبارتی تحلیل همگرا شود.

شکل ۷-۳۸ تکرار بعدی (i+1) تحلیل را در ادامه شکل ۷-۳۷ نشان می‌دهد. تکرارهای بعدی بطور مشابه انجام می‌شوند. در پایان فرآیند تکراری، تحلیل باید به سطح نیروی $\{F^a\}$ رسیده باشد. تحلیل همگرا شده نهایی باید دارای تعادل باشد بطوریکه بردار نیروی بازگرداننده $\{F_i^{nr}\}$ (که از وضعیت تنش‌های موجود محاسبه شده است) برابر با بردار نیروی $\{F^a\}$ گردد یا حداقل با تقریب مناسب نزدیک آن باشد. این تعادل در تکرارهای قبلی تحلیل رخ نخواهد داد.



شکل ۷-۳۸ حل نیوتن-رافسون تکرار بعدی (i+1) [۳]

در تحلیل‌هایی غیر خطی وابسته به مسیر[۲۴] -مانند پلاستیسیته- برای اطمینان از صحت مسیر طی شده هنگام تحلیل لازم است که انجام آن به‌صورت گام به گام صورت گرفته و گام‌های میانی پیش بینی شده باشد. در این حالت فرآیند نیوتن-رافسون برای هر گام تحلیل بطور جداگانه قابل استفاده است و فرمول‌بندی آن به شکل زیر اصلاح می‌شود:

$$\left[K_{n,i}^T\right]\{\Delta u_i\} = \{F_n^a\} - \{F_{n,i}^{nr}\}$$

که در آن:

$\left[K_{n,i}^T\right]$ ماتریس مماسی برای گام زمانی n – تکرار i،

[24] *Path Dependence*

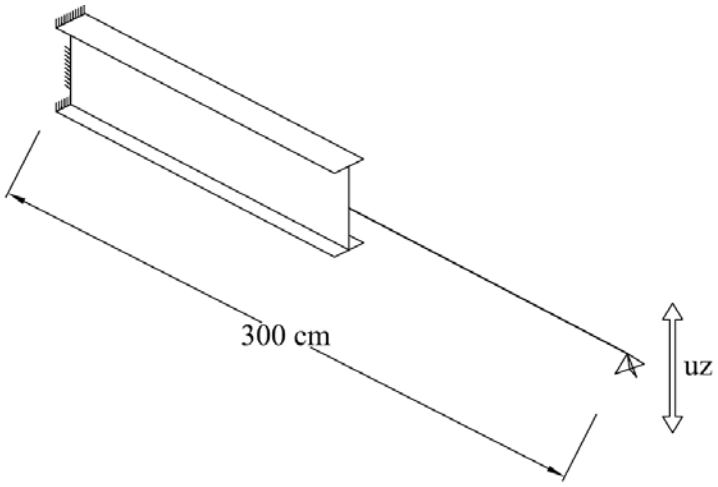
صفحات میانی حذف شده اند

فصل هشتم

بارگذاری تناوبی یک تیر کنسولی فولادی با رفتار غیر خطی

۸. ۱. مقدمه

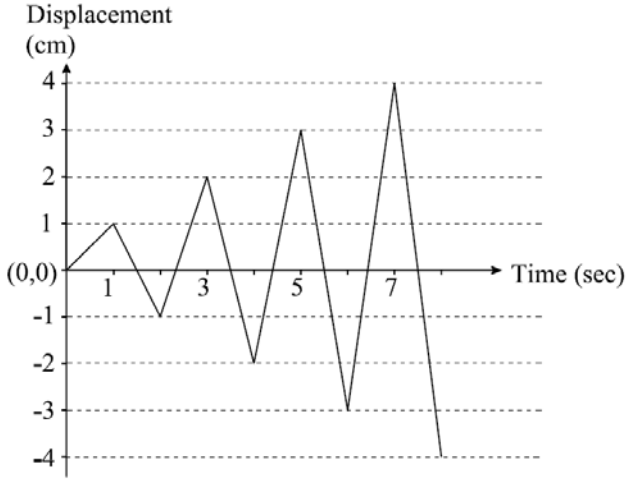
تا اینجا با نحوه مدل‌سازی مدل‌هایی با هندسه خطی و صفحه‌ای آشنا شدیم. اما کلیه تحلیل‌ها در محدوده الاستیک خطی صورت گرفت. در این فصل با نحوه معرفی مصالح غیر خطی فولاد و انجام تحلیل غیر خطی تناوبی آشنا خواهیم شد. مدلی که برای تحلیل پیش بینی شده است همان مدل تیر در فصل پنجم است که در شکل ۸-۱ مجدداً نشان داده شده است. الگوی بارگذاری در شکل ۸-۲ ترسیم شده است. بارگذاری شامل اعمال جابجایی در انتهای آزاد تیر، برداشت آن و جابجایی معکوس در سیکل‌های متوالی با دامنه‌های متفاوت است. دامنه جابجایی از محدوده الاستیک شروع شده و تا محدوده غیر خطی ادامه می‌یابد. مشخصات خطی مصالح فولاد همانند فصل پنجم و مختصات غیر خطی آن در جدول ۸-۱ آورده شده است.



شکل ۸-۱ مدل تیر کنسولی

جدول ۸-۱ مشخصات مصالح و هندسه مقطع تیر- واحدها کیلوگرم و سانتیمتر

ضخامت بال	۱/۰۲	مدول الاستیسیته E	$۲/۱\times۱۰^{۶}$
ضخامت جان	۰/۶۶	ضریب پواسون	۰/۳
عرض کل بال	۱۳/۵	تنش جاری شدن	۲۴۰۰
ارتفاع کل	۲۷	مدول الاستیسیته تانژانت	۰/۰۰۲E



شکل ۸-۲ بارگذاری جابجایی رفت و برگشتی در انتهای آزاد تیر

صفحات میانی حذف شده اند

ترتیب چاپ شده است. هرگاه مقدار Value کمتر از Criterion شود، تحلیل در آن Substep همگرا شده و نتیجه ذخیره می‌شود. داده بعدی عددی است که در مقابل EQUIL ITER چاپ شده است. این عدد بیانگر تعداد سعی و خطایی است که برنامه برای رسیدن به مقدار کمتر از نرم در معیارهای همگرایی تلاش کرده است. تعداد تکرارها تا عدد پیش فرض برنامه برابر ۲۵ یا عددی که می‌تواند توسط کاربر تعیین شود ادامه می‌یابد مگر آنکه قبل از آن به همگرایی دست پیدا شود. در غیر این صورت برنامه از ریزگام‌های کوچک‌تری استفاده کرده و یا در صورت ناپایداری مدل، تحلیل متوقف می‌شود. در پایان گام بارگذاری هنگامی که زمان در مقابل عبارت TIME برابر ۵ شود، تحلیل با موفقیت در این LS به پایان رسیده و پیغام !Solution Done در خروجی چاپ می‌شود. حال برنامه تحلیل LS بعدی را آغاز می‌کند.

```
 Load step file number 5.  Begin solution ...

 *****  ANSYS SOLVE    COMMAND  *****

     FORCE CONVERGENCE VALUE  = 0.1221E+07  CRITERION=  6232.
     MOMENT CONVERGENCE VALUE = 0.5794E+08  CRITERION= 0.2956E+06
curEqn=   8599  totEqn=   8598 Job CP sec=    182.188
      Factor Done= 100% Factor Wall sec=      0.192 rate=     805.8 Mflops
    EQUIL ITER   1 COMPLETED.  NEW TRIANG MATRIX.  MAX DOF INC=   5.000
     FORCE CONVERGENCE VALUE  =  1940.      CRITERION=  98.53
     MOMENT CONVERGENCE VALUE =  170.2      CRITERION= 0.5391
curEqn=   8599  totEqn=   8598 Job CP sec=    183.359
      Factor Done= 100% Factor Wall sec=      0.159 rate=     971.3 Mflops
    EQUIL ITER   2 COMPLETED.  NEW TRIANG MATRIX.  MAX DOF INC=  0.6313E-01
     FORCE CONVERGENCE VALUE  =  9563.      CRITERION=  101.3
     MOMENT CONVERGENCE VALUE =  568.7      CRITERION=  2.499
curEqn=   8599  totEqn=   8598 Job CP sec=    184.609
      Factor Done= 100% Factor Wall sec=      0.180 rate=     858.2 Mflops
    EQUIL ITER   3 COMPLETED.  NEW TRIANG MATRIX.  MAX DOF INC=  0.6400E-02
     FORCE CONVERGENCE VALUE  =  1142.      CRITERION=  104.2
     MOMENT CONVERGENCE VALUE =  83.27      CRITERION=  2.053
curEqn=   8599  totEqn=   8598 Job CP sec=    185.938
      Factor Done= 100% Factor Wall sec=      0.183 rate=     844.3 Mflops
    EQUIL ITER   4 COMPLETED.  NEW TRIANG MATRIX.  MAX DOF INC=  0.5391E-03
     FORCE CONVERGENCE VALUE  =  75.72      CRITERION=  106.4     <<< CONVERGED
     MOMENT CONVERGENCE VALUE =  24.89      CRITERION=  2.113
curEqn=   8599  totEqn=   8598 Job CP sec=    187.172
      Factor Done= 100% Factor Wall sec=      0.178 rate=     868.0 Mflops
    EQUIL ITER   5 COMPLETED.  NEW TRIANG MATRIX.  MAX DOF INC=  0.8107E-04
     FORCE CONVERGENCE VALUE  =  8.615      CRITERION=  108.6     <<< CONVERGED
     MOMENT CONVERGENCE VALUE = 0.1353      CRITERION=  2.172     <<< CONVERGED
    >>> SOLUTION CONVERGED AFTER EQUILIBRIUM ITERATION   5
*** LOAD STEP     5   SUBSTEP     1  COMPLETED.    CUM ITER =      9
*** TIME =   5.00000         TIME INC =   1.00000
*** MAX PLASTIC STRAIN STEP = 0.4277E-02   CRITERION = 0.1500

*** NOTE ***                              CP =     188.859   TIME= 14:24:25
Solution is done!
ANSYS RELEASE 15.0    UP20131014       16:29:02    01/30/2015

PRINTOUT RESUMED BY /GOP

Load step file number 6.  Begin solution ...
```

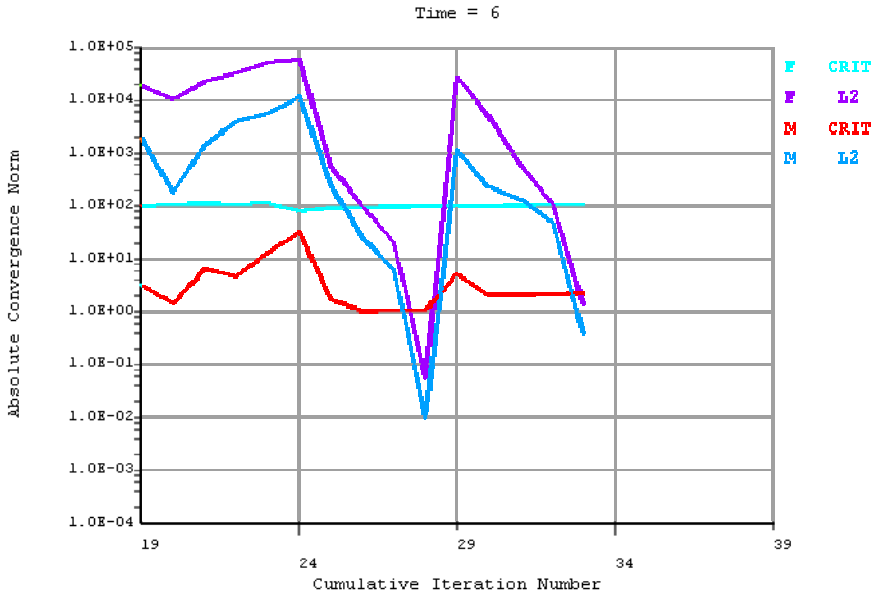
شکل ۸-۱۷ خروجی برنامه حین تحلیل LS-5

در همین هنگام اطلاعات مربوط به معیار همگرایی و مقدار قاعده آن در پنجره گرافیکی به‌صورت نمودار ترسیم می‌شود، شکل ۸-۱۸. چهار نمودار که دو عدد از آنها مربوط به معیار

همگرایی نیرو یا Froce و دو عدد برای معیار همگرایی لنگر یا Moment هستند ترسیم شده و تغییرات آن نمایش داده می‌شود. در هر معیار یک نمودار مربوط به نرم همگرایی (F L2 یا M L2) و نمودار دیگر ملاک همگرایی (F CRIT یا M CRIT) است. هرگاه در پایان یک Substep مقدار قاعده همگرایی کمتر از ملاک آن باشد، تحلیل همگرا شده و آن substep پایان می‌یابد. اما اگر چنین نشود، برنامه با انتخاب Substep کوچک‌تر تحلیل را ادامه می‌دهد.

این نمودارهای بر اساس معیارهای انتخاب شده توسط کاربر می‌تواند متفاوت باشد. اما استفاده از معیار همگرایی نیرو از توصیه‌های برنامه است. معیار همگرایی در آدرس زیر قابل تغییر است:

Main Menu → Solution → **Load Step Opt** → Nonlinear → **Convergence Crit**

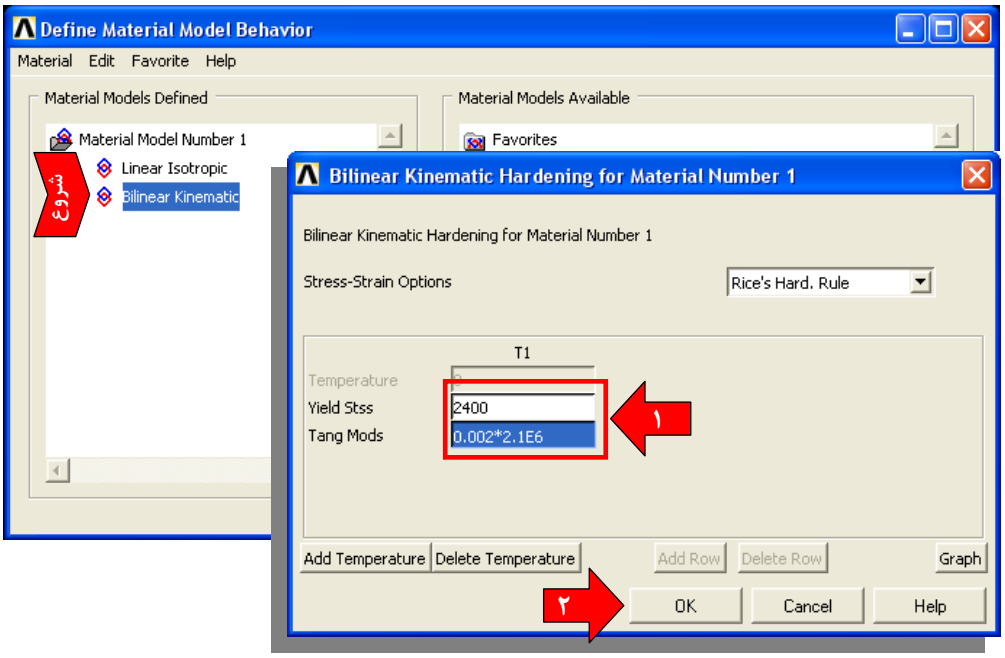


شکل ۸-۱۸ نمودارهای معیارهای همگرایی در پنجره نمایش

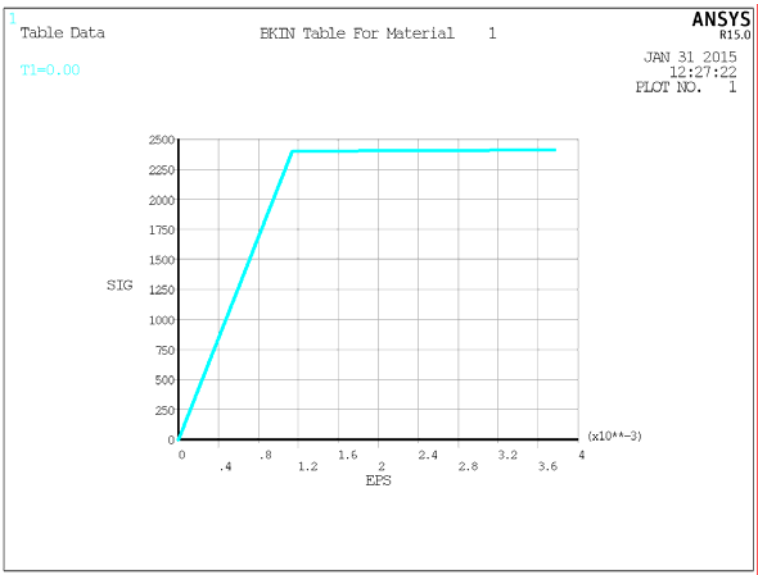
۸.۴. مشاهده نتایج

مشاهده نتایج در این مثال شامل مشاهده وضعیت تنش پلاستیک در انتهای گام‌های بارگذاری در زمان‌های ۴ و ۸ ثانیه و ترسیم نمودار چرخه‌ای نیرو – تغییر مکان تیر است. نتیجه اول از منوی General Post Proc و نتیجه دوم از منوی Timehist Post Pro استخراج می‌شود.

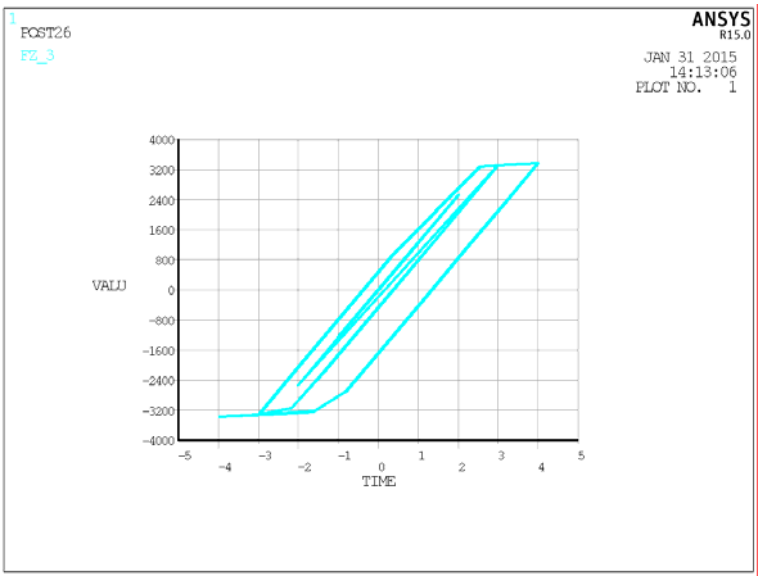
صفحات میانی حذف شده اند



شکل ۸-۲۹ اصلاح مصالح به الاستو پلاستیک سخت شونده



شکل ۸-۳۰ ترسیم نمودار مصالح جدید در پنجره گرافیکی



شکل ۸-۳۱ نمودار نیرو تغییر مکان برای مدل الاستو پلاستیک سخت شونده

۸.۶. مرجع

۱- تحلیل قابلیت اعتماد لرزه‌ای قابهای صلب فولادی، رساله دکترای عمران-سازه، همامی پیمان، ۱۳۸۷، دانشگاه تربیت مدرس.

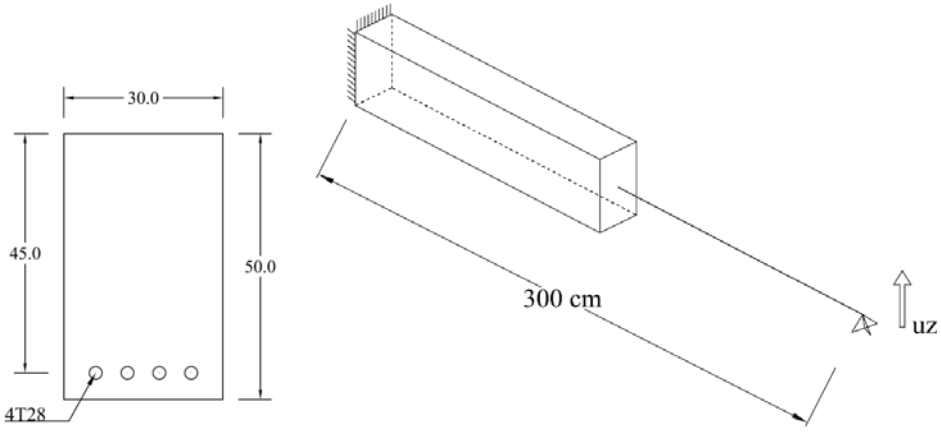
فصل نهم
مدل‌سازی و تحلیل غیر خطی یک تیر بتنی مسلح

۹. ۱. مقدمه

در مهندسی عمران نوع دیگری از رفتار غیر خطی که مورد مطالعه قرار می‌گیرد مربوط به مصالح بتنی است. مصالح بتنی به دلیل مقاومت کم در کشش بطور مسلح بکار می‌روند تا پس از ترک خوردگی بطور ناگهانی دچار شکست نشده و مقاومت خود را حفظ کنند. در فصل حاضر یک تیر بتنی کنسولی که در تار تحتانی خود مسلح شده است مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف آشنایی خواننده با المان Solid 65 و مصالح بتنی نرم‌افزار به نام Concrete است. مبانی این مدل مصالح بر اساس تئوری ویلام – وارنکی است که توضیحاتی کلی درباره آن در فصل هفتم داده شد. در این فصل پس از معرفی جزئیات مدل تیر بتنی، فرمول‌بندی المان Solid 65 ارائه شده تا خواننده با نحوه استفاده از جدول مصالح آن آشنا شود. پس از آن مدل‌سازی، بارگذاری و تحلیل انجام شده و نتایج مرور می‌شوند. از جمله نتایج مورد نظر در این مثال مشاهده ترک‌های ایجاد

شده در بتن است. با توجه به اینکه مسئله غیر خطی بتن به پارامترهای غیر خطی تحلیلی و مصالح حساس است، تحلیل‌ها برای حالت‌های مختلف تنظیمات تحلیل غیر خطی انجام شده و نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

مشخصات تیر انتخاب شده در شکل ۹-۱ نشان داده شده است. یک تیر کنسولی با مقطع مستطیلی که ویژگی‌های مکانیکی آن در محدوده خطی و غیر خطی در جدول ۹-۱ آورده شده است. ظرفیت خمشی تیر با مشخصات داده شده ۳۰ T.m است [۱]. همانند مثال تیر فولادی نیمی از تیر بطور دقیق با المان حجمی و نیمی دیگر با المان Beam با هندسه خطی شبیه سازی می‌شود. با فرض اینکه مفصل پلاستیک در نقطه‌ای با بیشترین لنگر و برش در محل تکیه‌گاه اتفاق می‌افتد، رفتار نیمه دوم تیر الاستیک خطی فرض شده است. بارگذاری تیر شامل اعمال جابجایی در انتهای آزاد به سمت بالاست تا هنگامی که خرابی در آن اتفاق افتد.



شکل ۹-۱ مشخصات و ابعاد هندسی تیر بتنی

جدول ۹-۱ مشخصات مکانیکی بتن و فولاد – واحدها kg و cm

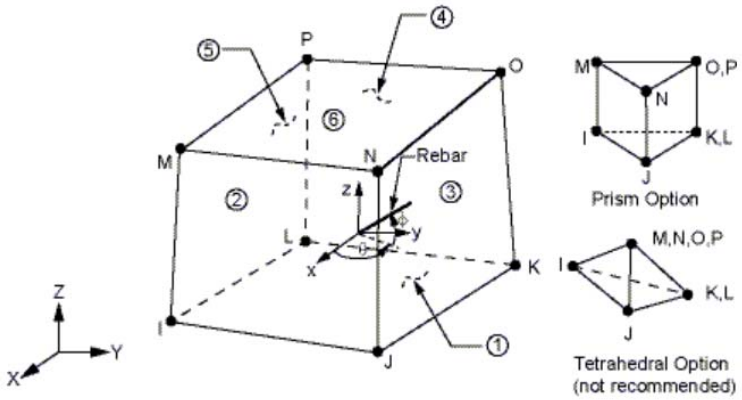
مدول الاستیسیته بتن	۲/۷۹×۱۰^۵
ضریب پواسون بتن	۰/۲
مقاومت فشاری بتن	۳۰۰
مدول الاستیسیته فولاد	۲/۰×۱۰^۶
ضریب پواسون فولاد	۰/۳۵
تنش جاری شدن فولاد	۴۰۰۰

برای شروع به کار داخل پوشه ANSYS Files پوشه دیگری به نام Example-7 بسازید تا محتویات مثال شماره ۷ در آن ذخیره شود. حال وارد نرم‌افزار شوید. دگمه Mechanical APDL Product Launcher 15.0 را فشار دهید تا پنجره ورودی برنامه باز شود. در این پنجره در بخش Working Directory و به کمک دگمه Browse پوشه Example-7 را انتخاب و در مقابل Jobname نام Conc-Beam را وارد کنید. حال دگمه Run را بفشارید تا وارد برنامه شوید.

۹. ۲. آشنایی با المان SOLID 65

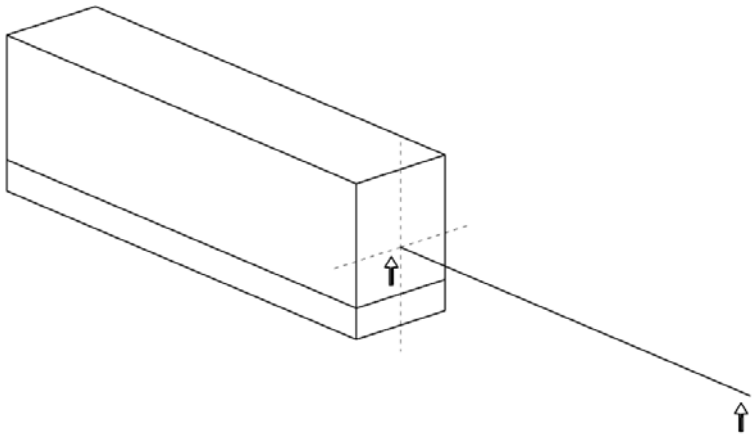
۹. ۲. ۱. فرمول‌بندی ماتریسی المان با رفتار غیر خطی

در نرم‌افزار ANSYS المان SOLID 65 مطابق با مدل گسیختگی ویلام – وارنکی که در فصل هفتم معرفی گردید فرمول‌بندی شده است. این المان دارای ۸ گره با درجات آزادی جابجایی در سه جهت x، y و z است. در این المان امکان تعریف مصالح بتنی ترد با قابلیت شبیه سازی ترک خوردگی و خرد شدگی همراه با رفتار پلاستیک و خزش وجود دارد و در کنار آن تسلیح فولادی در سه جهت اصلی قابل تعریف است. تسلیح فولادی در هر جهت تنها به‌صورت سختی تک محوری اثر داده می‌شود و فرض شده است که فولاد در داخل المان بطور یکنواخت توزیع شده است. در شکل ۹-۲ مشخصات المان Solid 65 نشان داده شده است. دستگاه مختصات المان در راستای دستگاه مختصات اصلی نرم‌افزار قرار دارد.



شکل ۹-۲ مشخصات المان Solid 65

صفحات میانی حذف شده اند

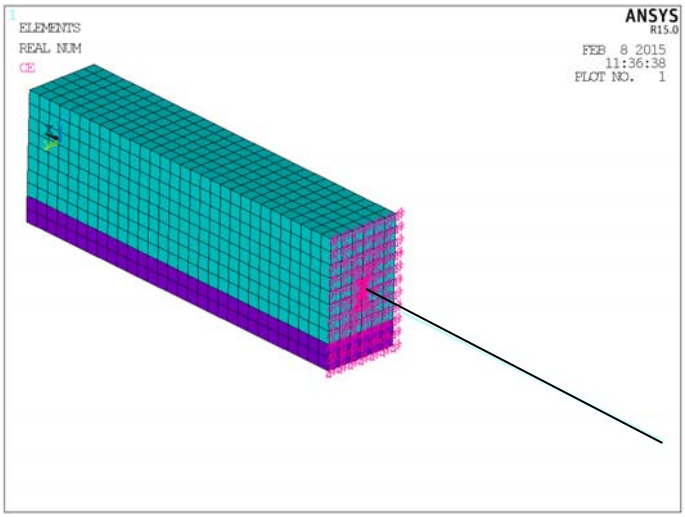


شکل ۹-۱۹ ترسیم المان Beam

در انتخاب گره مرکز سطح مقطع بتنی باید دقت کافی داشته باشید تا اشتباهاً گره دیگری از مدل انتخاب نشود. می‌توانید با بزرگنمایی مناسب و تنظیم زاویه دید انتخاب گره مورد نظر را تسهیل نمایید.

گره المان Solid 65 فقط درجات آزادی جابجایی دارد، اما گره المان Beam علاوه بر درجات آزادی جابجایی، درجات آزادی دورانی حول سه محور را نیز داراست. بنابراین هنگام اتصال یک المان Beam به یک المان Solid، فقط جابجایی‌ها در امتداد سه محور و متناظراً نیروها در سه جهت می‌توانند از گره Beam به گره Solid منتقل شوند. از طرفی نیروهای زیاد داخل المان Beam به دلیل اتصال تنها در یک گره به مدل Solid می‌تواند ایجاد تمرکز نیرو در انتقال نیروهای Fx، Fy و Fz نماید. با در نظر گرفتن مجموع این دلایل لازم است یک سطح صلب در فصل مشترک دو نوع المان ایجاد شود تا از تمرکز نیرو جلوگیری کرده و بتواند لنگرهای ایجاد شده در المان Beam را به المان Solid منتقل نماید.

تعریف بخش صلب همانند کاری است که در تیر فولادی صورت گرفت و انجام آن به کاربر واگذار می‌شود. در نهایت مدل ایجاد شده در شکل ۹-۲۰ نشان داده شده است. در این مرحله مدل را ذخیره نمایید.



شکل ۹-۲۰ مدل تکمیل شده تیر بتنی

۹. ۴. بارگذاری، تحلیل و مشاهده نتایج

تحلیل مورد نظر یک تحلیل استاتیکی غیر خطی است که با وارد کردن جابجایی تدریجی در انتهای تیر صورت می‌گیرد. ابتدا در محل تکیه‌گاه قیدهای جابجایی در امتداد x، y و z را تعریف کرده، سپس یک جابجایی ۵ سانتیمتری در امتداد محور مثبت z در انتهای آزاد تعریف کنید. در این مثال برای آشنایی کاربر با تأثیرات پارامترهای غیر خطی بر نتایج بدست آمده، تحلیل‌های مکرری با انتخاب ترکیبات مختلف از معیارهای همگرایی، تعداد ریزگام‌ها یا Substepها و اثر پارامترهای مدل شکست مصالح بر پاسخ تیر به‌صورت نمودار نیرو-تغییر مکان با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در نهایت برای گزینه نهایی توزیع ترک‌ها در مدل نمایش داده می‌شود.

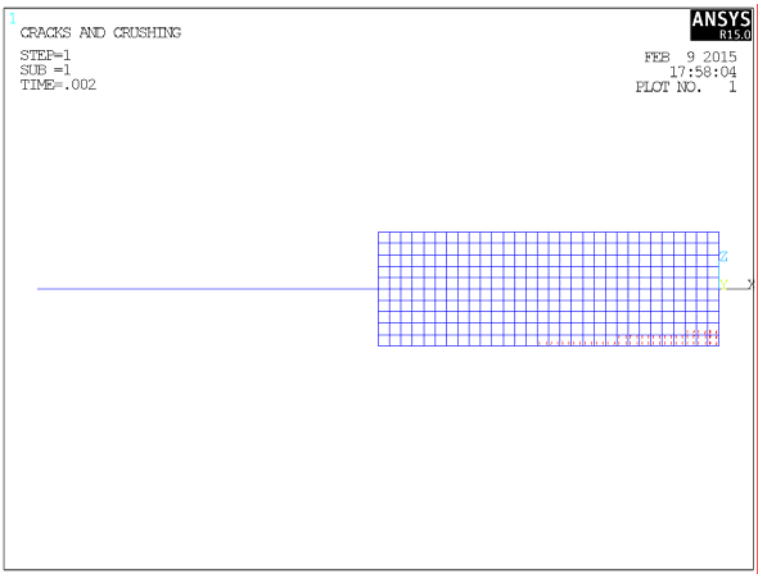
در تحلیل حاضر از دو نوع معیار همگرایی شامل: معیار همگرایی نیرو+لنگر و معیار همگرایی جابجایی به تنهایی استفاده می‌شود. همچنین تعداد ریزگام‌ها یا Substepهای تحلیلی ۲۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ در نظر گرفته شده و برای هر یک نتایج جداگانه استخراج می‌شود. عامل سوم پارامتر C1 یا ضریب انتقال سختی برشی در ترک باز است که در یک بازه عددی در نظر گرفته شده و تأثیر آن بر مقاومت و رفتار تیر مطالعه می‌شود.

از آنجائیکه تحلیل‌ها و مشاهده نتایج برای هر تغییر بطور همزمان صورت می‌گیرد، بخش‌های بارگذاری، تحلیل و مشاهده نتایج در یک بخش آورده شده‌اند.

صفحات میانی حذف شده اند

در المان Solid 65 ترک به‌صورت دایره‌ای در صفحه ترک خوردگی و خرد شدگی به‌صورت یک شش‌گوش قرمز رنگ ترسیم می‌شوند. اگر ترک پس از باز شدن بسته شود، در دایره نمایش ترک یک علامت X قرار داده می‌شود. ترک خوردگی در سه صفحه مختلف می‌تواند رخ دهد. اولین ترک با دایره قرمز، دومین ترک با دایره سبز رنگ و سومین ترک با دایره آبی رنگ نمایش داده می‌شود.

نتیجه گزینه قبلی در شکل ۹-۳۲ نشان داده شده است. شاید نمای مناسب برای مشاهده ترک‌ها از کنار باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود در اولین گام تحلیلی بخش‌هایی از پوشش بتن در زیر آن ترک خورده است. حال در بخش Read Results گزینه Next Set را انتخاب کرده و Replot کنید. توزیع ترک‌ها در گام بعدی نمایش داده می‌شود. این کار را می‌توانید برای تمام‌Substepها تکرار کنید.



شکل ۹-۳۲ ترک خوردگی و خرد شدگی در Substep=1

بیشترین مقاومت تیر در Substep=۱۳ اتفاق افتاده است بنابراین مشاهده ترک‌ها در آن جالب خواهد بود. وارد آدرس زیر شده و شماره Load Step را برابر ۱ و شماره Substep را برابر ۱۳ قرار دهید:

Main Menu → General Post proc → **Read Results**→ By Load Step

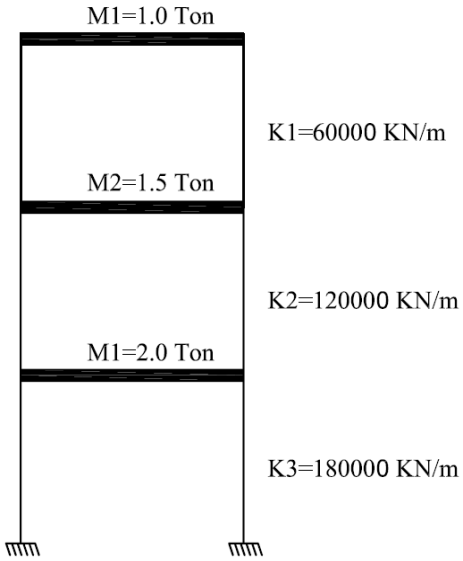
فصل دهم

تحلیل مودال، طیفی و دینامیکی تاریخچه زمانی یک مدل سه درجه آزاد دینامیکی

۱۰. ۱. مقدمه

انجام تحلیل‌های دینامیکی از نیازهای مهم مهندسین زلزله و سازه در بررسی رفتار لرزه‌ای ساختمان‌ها محسوب می‌شود. گام اول در تحلیل دینامیکی تعیین مودهای اصلی و استخراج پارامترهای دینامیکی ارتعاش آزاد سیستم است. پریود مودهای اصلی سازه و جرمی از سازه که در هر مود مشارکت می‌کند، تعیین کننده پاسخ دینامیکی آن در برابر زلزله هستند. برای تعیین پاسخ لرزه‌ای دو روش می‌توانند بکار روند. روش اول تحلیل طیفی است که با استفاده از مشخصات دینامیکی گام اول و طیف لرزه‌ای ساختگاه صورت می‌گیرد و روش دوم تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی است که برای تعیین پاسخ زمانی سازه در طول رخداد یک زمین لرزه مشخص بکار رفته و از رکوردهای تاریخچه زمانی ثبت شده از زلزله‌ها استفاده می‌کند.

مثالی که برای این فصل در نظر گرفته شده است، مدل یک قابل سه طبقه است که در شکل ۱۰-۱ نشان داده شده است [۱]. از جرم ستون‌ها در مقایسه با جرم طبقه صرف نظر شده و رفتار جرم طبقه همانند یک جرم متمرکز در نظر گرفته شده است. پای ستون‌ها گیردار در نظر گرفته شده است. سختی و جرم هر طبقه در شکل یادداشت شده است و مقدار نسبت میرایی برابر ۵٪ در نظر گرفته شده است.

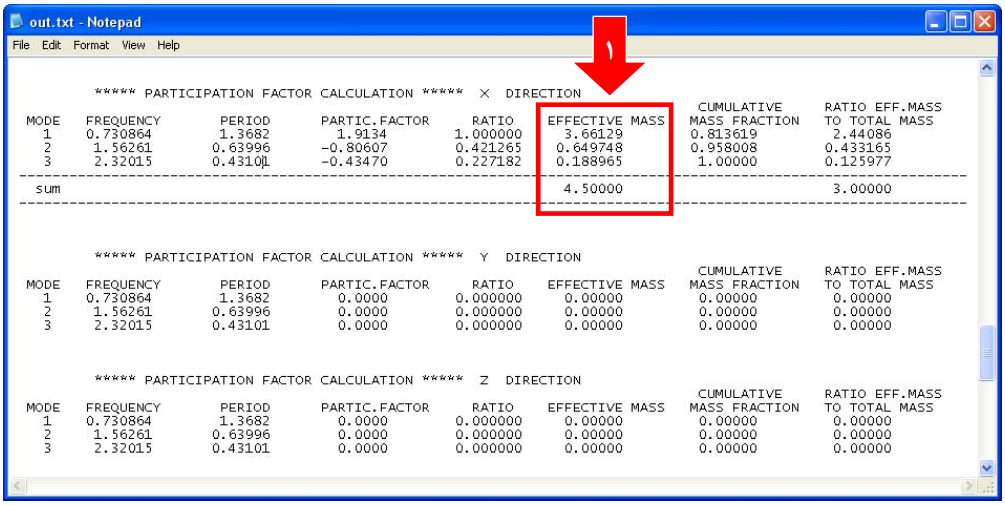


شکل ۱۰-۱ مدل قاب سه طبقه با دیافراگم صلب

برای شبیه سازی یک قاب یک دهانه با دیافراگم صلب می‌توان از یک مدل معادل و ساده شده متشکل از جرم‌های متمرکز و فنر همانند شکل ۱۰-۲ استفاده کرد. سختی برشی هر طبقه به‌صورت فنرهای K1، K2 و K3 و جرم هر طبقه به‌صورت جرم‌های متمرکز M1، M2 و M3 شبیه سازی می‌شود.

پس از مدل‌سازی ابتدا نحوه انجام تحلیل مودال و استخراج مشخصات دینامیکی مدل شامل فرکانس‌ها و پریودهای طبیعی و شکل‌های مودی آن نشان داده می‌شوند. سپس به کمک نتایج بدست آمده تحلیل طیفی صورت می‌گیرد. برای کنترل صحت محاسبات نتایج تحلیل طیفی با نتایج محاسبات دستی مقایسه خواهد شد. پس از کنترل صحت عملکرد مدل، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی برای رکورد زلزله طبس انجام می‌شود. تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی یک‌بار

صفحات میانی حذف شده اند



شکل ۱۰-۱۵ محتوای فایل out.txt شامل مشخصات دینامیکی ارتعاش آزاد مدل

برای تعیین تعداد مودهای مناسب در تحلیل طیفی که جمع جرم مؤثر آنها حداقل برابر ۹۰٪ جرم سازه باشد لازم است جمع جرم‌های مودهای بدست آمده با وزن سازه مقایسه شود. جمع جرم‌های مؤثر مودی در انتهای ستون Effective Mass تحت عنوان Sum آورده شده است. با مقایسه این عدد با جرم کل سازه می‌توان تعداد مودهای مناسب برای تحلیل طیفی را انتخاب نمود. همانطور که ملاحظه می‌شود جمع جرم‌های مؤثر مودی برابر ۴/۵ ton است که برابر جرم کل سازه است.

برای کنترل صحت مدل مقادیر پریودهای تحلیل حاضر (اعداد ستون سوم) با نتایج بدست آمده از حل دستی در جدول ۱۰-۴ مقایسه شده‌اند. تطابق بین نتایج به خوبی دیده می‌شود. نتایج تحلیلی از فایل out.txt خوانده می‌شوند.

جدول ۱۰-۴ مقایسه مقادیر پریودهای مدل تحلیلی و محاسبات دستی - ثانیه

شماره مود	پریود تحلیلی	پریود حل دستی
۱	1.3682	1.370
۲	0.63996	0.640
۳	0.43101	0.431

برای کنترل دوم، مقادیر جرم مؤثر مودی (اعداد ستون ششم) حاصل از تحلیل با محاسبات دستی در جدول ۱۰-۵ مقایسه شده‌اند. نتایج بدست آمده نشان‌دهنده دقت خوب نتایج تحلیلی است.

جدول ۱۰-۵ مقایسه مقادیر جرم مؤثر مودی مدل تحلیلی و محاسبات دستی - تن

شماره مود	تحلیلی	حل دستی
۱	3.661	3.656
۲	0.650	0.641
۳	0.189	0.188

برای مشاهده شکل‌های مودی همانند قبل وارد آدرس زیر شوید. هر شکل مودی سازه تحت عنوان یک Substep در حافظه ذخیره می‌شود. به عبارتی اگر هدف مشاهده نتایج مود اول باشد کافی است نتایج Substep اول را به حافظه بازخوانی کنید. برای این کار می‌توانید از کلیه گزینه‌های منوی Read Results در General Postproc استفاده کنید که شامل خواندن اولین Set، Set بعدی، Set قبلی یا Set آخر یا انتخاب براساس شماره Set در گزینه By Load Step است. در گزینه آخر شماره Load Step برابر ۱ (مقدار پیش فرض) و مقدار Substep برابر شماره مود ارتعاشی مورد نظر قرار داده می‌شود.

برای مثال گزینه زیر را انتخاب کنید:

Main Menu → General Post proc → **Read Results** → First Set

سپس وارد Plot Results شده و تغییر شکل را به‌صورت دلخواه ترسیم کنید. می‌توانید برای درک بهتر تغییر شکل‌ها گزینه Deformed+Undeformed Shape را انتخاب کنید. به عنوان تمرین برای هر سه مود تغییر شکل سازه را ترسیم کنید.

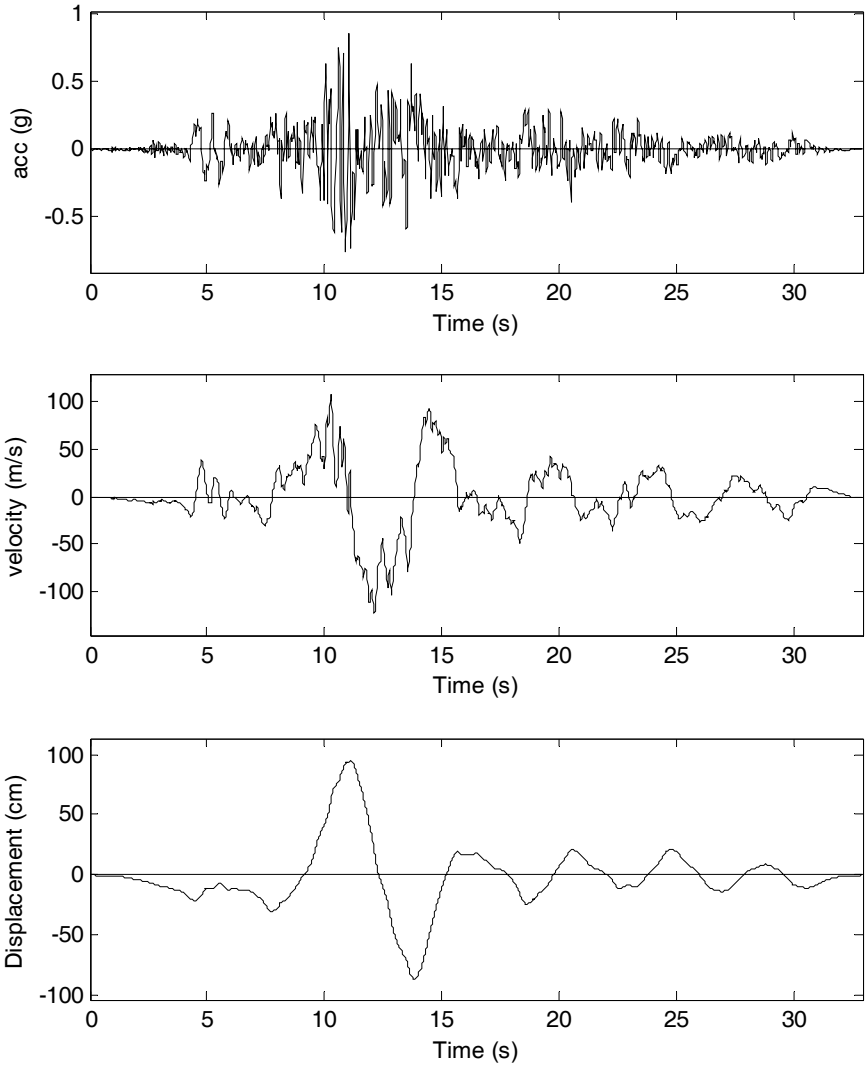
روش دیگر برای مشاهده تغییر شکل‌ها، تهیه انیمیشن از شکل‌های مودال است. برای این کار ابتدا شماره مود را در آدرس فوق انتخاب کرده سپس وارد آدرس زیر شوید، شکل ۱۰-۱۶:

Utility Menu → Plot Ctrls → **Animate** → Mode Shape …

در پنجره باز شده می‌توان تعداد فریم‌ها، زمان هر یک و نوع اطلاعاتی که از تحلیل مودال مد نظر است انتخاب نمود، شکل ۱۰-۱۷. برای مثال تعداد فریم‌ها برابر پیش فرض آن ۱۰ و مقدار زمان هر فریم برابر ۰/۰۷ ثانیه قرار داده می‌شود. حال در Nodal Solution Data در

صفحات میانی حذف شده اند

می‌توان بطور دستی این Load Stepها را ایجاد کرد اما معمولاً زمین لرزه‌ها تعداد بالایی گام زمانی دارند که ممکن است به چندین هزار نیز برسد. به همین دلیل برای ساخت این Load Stepها از روش برنامه نویسی در ANSYS استفاده می‌شود.

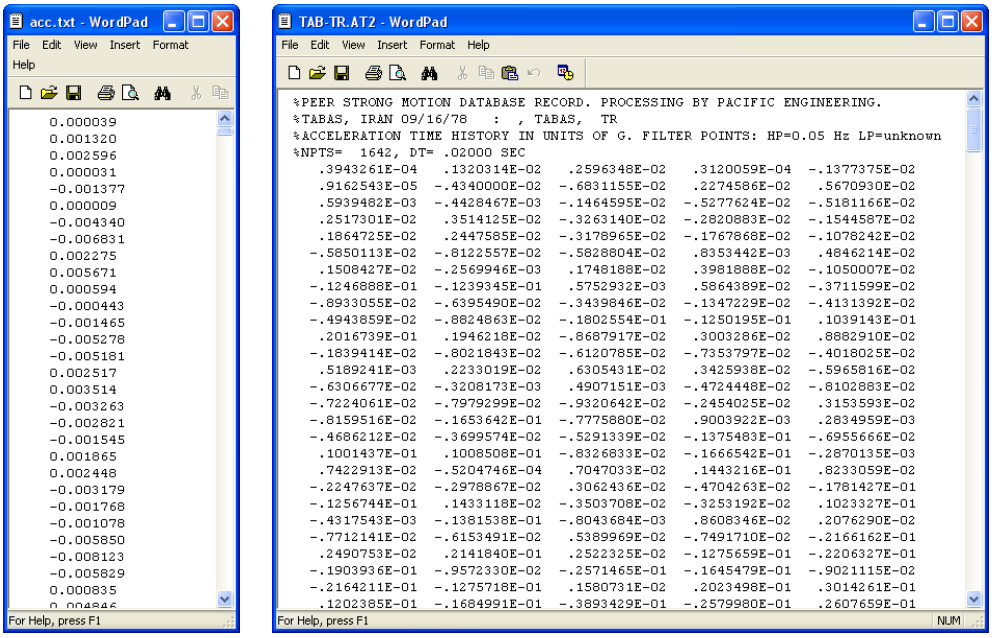


شکل ۱۰-۳۱ رکوردهای شتاب، سرعت و جابجایی زلزله طبس – ایستگاه طبس [۳]

برای نوشتن چنین ماکرویی اولین گام معرفی رکورد شتاب یا جابجایی به نرم‌افزار است. برای این کار از بخش Parameters استفاده می‌شود. سه پارامتر یکی برای شتاب، دیگری برای جابجایی و آخری برای زمان ساخته می‌شود. فایل‌های تک ستونی شتاب و جابجایی در دو پارامتر اول ذخیره می‌شوند و پارامتر زمان با کمک گزینه‌های داخل نرم‌افزار ساخته می‌شود. برای ساخت پارامترها وارد آدرس زیر شوید، شکل ۱۰-۳۳:

Utility Menu → Parameters → **Array Parameters** → Define/Edit …

ابتدا پارامتر شتاب ساخته می‌شود. در پنجره باز شده دگمه … Add را بفشارید و وارد پنجره دوم شوید. هر پارامتر باید یک نام داشته باشد. نام پارامتر شتاب acc گذاشته می‌شود. نوع پارامتر را Array قرار دهید و تعداد سطرها و ستون‌ها آن را به ترتیب ۲۰۰۰ و ۱ در مقابل I,J,K بنویسید. سپس دگمه Ok را بفشارید. به این ترتیب یک پارامتر جدید در پنجره اول دیده می‌شود.

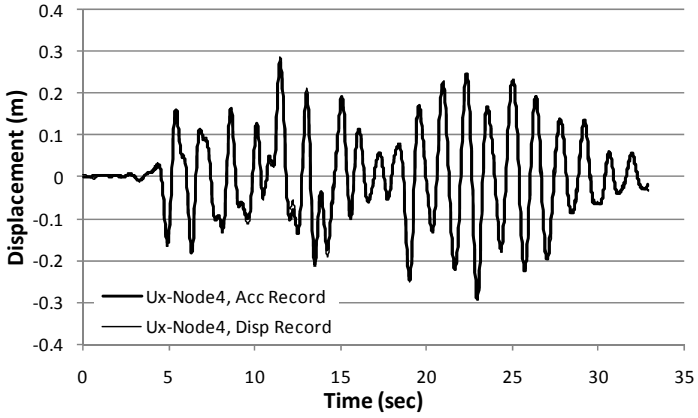


ب الف

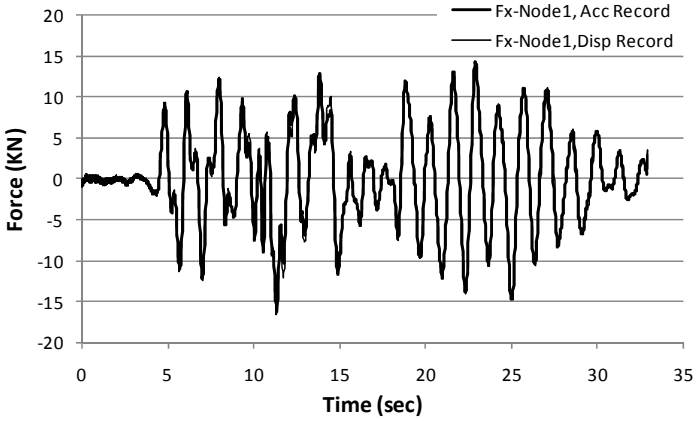
شکل ۱۰-۳۲ رکورد زمین لرزه، الف) چند ستونی مرجع [۳] ب) تک ستونی

صفحات میانی حذف شده اند

چنانچه ملاحظه می‌شود دو نمودار بر هم منطبق شده‌اند. برای این مقایسه از نرم‌افزار Excel استفاده شده است.



شکل ۱۰-۴۳ مقایسه پاسخ نسبی جابجایی گره ۴ برای دو رکورد جابجایی و شتاب، بر حسب متر



شکل ۱۰-۴۴ مقایسه عکس‌العمل تکیه‌گاهی در گره ۱ برای دو رکورد جابجایی و شتاب، KN

۱۰.۹. مرجع

۱- ارتعاشات راندوم و کاربرد آن در مهندسی زلزله، محسن غفوری آشتیانی، در دست چاپ.

۲- دینامیک سازه‌ها و تعیین نیروهای زلزله، آنیل چوپرا، ترجمه شاپور طاحونی. چاپ سوم، انتشارات علم و ادب، ۱۳۷۷.

3- http://www.Peer.Berkeley.edu/products/strong_ground_motion_db.html

پیوست الف: جداول آدرس یابی

پ. ۱. جداول آدرس یابی

در سال‌های متمادی بخشی از مهم‌ترین مشکلات کاربران ANSYS ناآشنایی با موقعیت یا آدرس یک دستور، گزینه یا عملکرد خاص بوده است که حین مدل‌سازی به آن نیاز داشته‌اند. برای مثال در کدام بخش ANSYS می‌توان مختصات یکی گره را چرخاند یا در چه آدرسی می‌توان بار سطحی متغیر تعریف کرد. برای پاسخگویی به این سؤالات جداولی از آدرس‌های مرتبط با عملکردها و اشیاء مختلف موجود در برنامه برای کاربردهای عمومی سازه‌ای تهیه شده است. در هر جدول ستون سمت چپ عملکرد گزینه مفروض و ستون سمت راست آدرس گزینه در برنامه است. جدول‌ها بطور موضوعی طبقه‌بندی شده و بر اساس حروف الفبای عملکرد مرتب شده‌اند.

موضوعات جداول شامل گره، المان، نقطه، خط ... تا مصالح، انواع بارها، تحلیل، روش‌های نتیجه گیری، فایل و خروجی‌ها است. برای مثال آدرس گزینه چرخاندن محورهای مختصات یک گره در جدول گره (Node) سطر ۲۲ و آدرس تعریف بار سطحی متغیر در جدول بارگذاری-بار سطحی سطر سوم و چهارم آورده شده است.

پ. ۱. ۱. گره (Node)

آدرس در برنامه	عملکرد
Utility Menu > Select > Entities > Node	انتخاب گره
Utility Menu > WorkPlane > Offset WP to > Nodes +	انتقال صفحه کار به یک گره مشخص
Main Menu > PreProcessor > Coupling/Ceqn > Rigid Region	ایجاد بخش صلب بین گره‌ها
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Nodes > in Active CS	ایجاد گره بر روی دستگاه مختصات
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Nodes > on Working Plane	ایجاد گره بر روی صفحه کار WP
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Nodes > on Keypoints	ایجاد گره بر روی نقطه
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Nodes > Fill Between Nds	ایجاد گره بین چند گره
Main Menu > PreProcessor > Coupling/Ceqn > Constraint Eqns	ایجاد معادله تقید بین درجات آزادی گره‌ها
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Keypoints > on Nodes	ایجاد نقطه بر روی گره
Main Menu > PreProcessor > Loads > Define Loads > Setting > for Surface Load > Node Function	بارگذاری متغیر روی گره‌ها
Main Menu > Solution > Define Loads > Setting > for Surface Load > Node Function	بارگذاری متغیر روی گره‌ها
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Nodes > Read Node File	بازخوانی مشخصات گره‌ها از یک فایل
Main Menu > General PostProc > Nodal Calcs > Total Force Sum	برآیند نیروهای گره‌های انتخاب شده
Main Menu > PreProcessor > Coupling/Ceqn > Couple DOFs	بستن درجات آزادی گره‌ها به یکدیگر
Main Menu > PreProcessor > Coupling/Ceqn > Cupl DOFs w/Mstr	بستن درجات آزادی گره‌ها به یکدیگر با یک نقطه مرجع
Main Menu > PreProcessor > Coupling/Ceqn > Coincident Nodes	بستن درجات آزادی گره‌های مجاور به یکدیگر
Main Menu > General PostProc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu	ترسیم کانتور رنگی نتایج گره‌ی
Main Menu > PreProcessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment	تعریف نیروی متمرکز روی گره یا نقطه
Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment	تعریف نیروی متمرکز روی گره یا نقطه
Main Menu > General PostProc > Nodal Calcs > Summation Point	تعیین نقطه برآیند گیری از نیروهای گره‌ی
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Move/Modify > Rotate Node CS	چرخاندن دستگاه مختصات گره‌ی
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Nodes > Rotate Node CS	چرخش دستگاه مختصات گره
Main Menu > PreProcessor > Loads > Define Loads > Delete > All Load Data > All F.E. Loads	حذف بار روی المان‌ها و گره‌ها
Main Menu > Solution > Define Loads > Delete > All Load Data > All F.E. Loads	حذف بار روی المان‌ها و گره‌ها
Main Menu > PreProcessor > Loads > Define Loads > Delete > Structural > Displacement	حذف جابجایی یا تکیه‌گاه روی گره یا نقطه انتخاب شده با موس
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Delete > Nodes	حذف گره
Main Menu > PreProcessor > Coupling/Ceqn > Del Coupled Sets	حذف معادلات بستن درجات آزادی گره‌ها
Main Menu > PreProcessor > Coupling/Ceqn > Del Constr Eqn	حذف معادلات مقید شدگی یا بخش صلب بین گره‌ها
Main Menu > PreProcessor > Loads > Define Loads > Delete > All Load Data > All Forces	حذف نیروهای متمرکز روی گره یا نقطه
Main Menu > Solution > Define Loads > Delete > All Load Data > All Forces	حذف نیروهای متمرکز روی گره یا نقطه
Main Menu > PreProcessor > Loads > Define Loads > Delete > Structural > Force/Moment	حذف نیروی متمرکز روی گره یا نقطه انتخاب شده با موس
Main Menu > Solution > Define Loads > Delete > Structural > Force/Moment	حذف نیروی متمرکز روی گره یا نقطه منتخب
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Move/Modify > Nodes	حرکت دادن گره
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Nodes > Write Node File	ذخیره مشخصات گره‌ها در یک فایل
Utility Menu > WorkPlane > Align WP with > Nodes +	سازگار کردن صفحه کار با گره‌ها

فاصله دو گره	Main Menu > PreProcessor > Modeling > Check Geom > ND Distances
فهرست جزئیات بار سطحی روی گره‌ها	Utility Menu > List > Loads > Surface > on All Nodes
فهرست جزئیات بار سطحی روی گره‌ها با انتخاب در پنجره نمایش	Utility Menu > List > Loads > Surface > on Picked Nodes +
فهرست جزئیات تکیه‌گاه یا جابجایی گره‌ها	Utility Menu > List > Loads > DOF Constraints > on All Nodes
فهرست جزئیات تکیه‌گاه یا جابجایی گره‌های انتخاب شده در پنجره نمایش	Utility Menu > List > Loads > DOF Constraints > on Picked Nodes +
فهرست جزئیات درجات آزادی بسته شده	Utility Menu > List > Other > Coupled Set
فهرست جزئیات درجات آزادی مقید شده	Utility Menu > List > Other > Constraint Eqns
فهرست جزئیات گره‌ها	Utility Menu > List > Nodes
فهرست جزئیات نیروی متمرکز روی گره‌ها	Utility Menu > List > Loads > Forces > on All Nodes
فهرست جزئیات نیروی متمرکز روی گره‌ها با انتخاب آنها در پنجره نمایش	Utility Menu > List > Loads > Forces > on Picked Nodes +
فهرست گیری از نتایج تحلیلی گره‌ها	Main Menu > General PostProc > List Results > Nodal Solution
فهرست گیری از نتایج گره‌های انتخاب شده با موس	Main Menu > General PostProc > Query Results > Subgrid Solu
فهرست مشخصات کلی درجات آزادی بسته شده	Utility Menu > List > Status > Preprocessor > Coupled Sets
فهرست مشخصات کلی درجات آزادی مقید شده	Utility Menu > List > Status > Preprocessor > Constraint Eqns
فهرست مشخصات کلی گره‌ها	Utility Menu > List > Status > Preprocessor > Nodes
فهرست نتایج گره‌ها	Utility Menu > List > Results > Nodal Solution ...
فهرست نیروهای گره‌ی	Utility Menu > List > Results > Nodal Loads ...
فهرست نیروهای گره‌ی	Main Menu > General PostProc > List Results > Nodal Loads
کپی انعکاسی گره	Main Menu > PreProcessor > Modeling > Reflect > Nodes
کپی کردن گره	Main Menu > PreProcessor > Modeling > Copy > Nodes
مقیاس کردن مختصات گره‌ها	Main Menu > PreProcessor > Modeling > Operate > Scale > Nodes
مقیاس کردن مقادیر جابجایی اعمال شده به گره‌ها	Main Menu > Solution > Define Loads > Operate > Scale FE Loads > Constraints
نمایش گره	Utility Menu > Plot > Nodes
نیروهای گره‌های انتخاب شده و بر آیند آنها	Main Menu > General PostProc > Nodal Calcs > Sum @ Each Node

پ. ۱. ۲. المان (Element)

عملکرد	آدرس در برنامه
انتخاب المان	Utility Menu > Select > Entities > Element
ایجاد المان با شماره‌گذاری اتوماتیک	Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Elements > Auto Numbered
ایجاد، اصلاح یا حذف ثابت المان‌ها	Main Menu > PreProcessor > Real Constants > Add/Edit/Delete
ایجاد، اصلاح یا حذف ثابت المان‌ها	Main Menu > PreProcessor > Loads > Load Step Opts > Other > Real Constants > Add/Edit/Delete
ایجاد، اصلاح یا حذف ثابت المان‌ها	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Other > Real Constants > Add/Edit/Delete
بازخوانی مشخصات المان‌ها از یک فایل	Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Elements > Read Elem File
پیدا کردن بیشینه جداول المانی	Main Menu > General PostProc > Element Table > Find Maximum
پیدا کردن کمینه جداول المانی	Main Menu > General PostProc > Element Table > Find Minimum
تابع نمایی بر جداول المانی	Main Menu > General PostProc > Element Table > Exponentiate
ترسیم کانتور رنگی نتایج المانی	Main Menu > General PostProc > Plot Results > Contour Plot > Element Solu
ترسیم کانتور رنگی نتایج جداول خروجی المان‌ها	Main Menu > General PostProc > Plot Results > Contour Plot > Elem Table
ترسیم نتایج جدول المانی	Main Menu > General PostProc > Element Table > Plot Elem Table
ترسیم نمودار رنگی نتایج المان‌های با هندسی خطی	Main Menu > General PostProc > Plot Results > Contour Plot > Line Elem Res
تعریف جدول المانی برای نتایج المان‌ها	Main Menu > General PostProc > Element Table > Define Table
تعریف مقطع برای المان پوسته‌ای	Main Menu > PreProcessor > Sections > Shell
تعریف مقطع برای المان تیر	Main Menu > PreProcessor > Sections > Beam
تعریف نوع المان	Main Menu > PreProcessor > Element Type > Add/Edit/Delete
تعیین مشخصات المان برای ساخت المان	Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Elements > Element Attributes
تغییر شماره مصالح المان‌ها	Main Menu > PreProcessor > Loads > Load Step Opts > Other > Change Mat Props > Change Mat Num

تغییر شماره مصالح المان‌ها	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Other > Change Mat Props > Change Mat Num
تغییر مصالح المان‌ها	Main Menu > PreProcessor > Material Props > Change Mat Num
حذف المان	Main Menu > PreProcessor > Modeling > Delete > Elements
حذف بار روی المان‌ها و گره‌ها	Main Menu > PreProcessor > Loads > Define Loads > Delete > All Load Data > All F.E. Loads
حذف بار روی المان‌ها و گره‌ها	Main Menu > Solution > Define Loads > Delete > All Load Data > All F.E. Loads
حذف جدول المانی	Main Menu > General PostProc > Element Table > Erase Table
حذف مقطع المان	Main Menu > PreProcessor > Sections > Delete Section
حرکت دادن المان	Main Menu > PreProcessor > Modeling > Move/Modify > Elements
ذخیره مشخصات المان‌ها در یک فایل	Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Elements > Write Elem File
زنده کردن المان‌ها	Main Menu > PreProcessor > Loads > Load Step Opts > Other > Birth & Death > Activate Elem
زنده کردن المان‌ها	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Other > Birth & Death > Activate Elem
ضرب برداری خارجی جداول المانی	Main Menu > General PostProc > Element Table > Cross Product
ضرب برداری داخلی جداول المانی	Main Menu > General PostProc > Element Table > Dot Product
عمل ریاضی جمع برای جداول المانی	Main Menu > General PostProc > Element Table > Add Items
عمل ریاضی ضرب برای جداول المانی	Main Menu > General PostProc > Element Table > Multiply
فهرست ثوابت تعریف شده المان‌ها	Utility Menu > List > Status > Preprocessor > Real Constant
فهرست جداول خروجی المان‌ها	Utility Menu > List > Results > Element Table Data ...
فهرست جزئیات المان‌ها	Utility Menu > List > Elemets
فهرست جزئیات بار سطحی روی المان‌ها	Utility Menu > List > Loads > Surface > on All Elements
فهرست جزئیات بار سطحی روی المان‌ها با انتخاب در پنجره نمایش	Utility Menu > List > Loads > Surface > on Picked Elems +
فهرست جزئیات ثوابت تعریف شده المان‌ها	Utility Menu > List > Properties > All Real Constants
فهرست جزئیات مقاطع تعریف شده برای المان‌ها	Utility Menu > List > Properties > Section Properties
فهرست جزئیات نوع المان‌های موجود	Utility Menu > List > Properties > Element Types
فهرست جزئیات یک یا چند ثابت المان با شماره مشخص	Utility Menu > List > Properties > Specified Real Const ...
فهرست جزئیات یک یا چند مقطع خاص	Utility Menu > List > Properties > Specified Section Props ...
فهرست گیری از جداول المانی	Main Menu > General PostProc > List Results > Elem Table Data
فهرست گیری از نتایج المان‌ها	Main Menu > General PostProc > List Results > Element Solution
فهرست گیری از نتایج المان‌های انتخاب شده با موس	Main Menu > General PostProc > Query Results > Element Solution
فهرست گیری از نتایج جدول المانی	Main Menu > General PostProc > Element Table > List Elem Table
فهرست مشخصات کلی المان‌ها	Utility Menu > List > Status > Preprocessor > Element
فهرست مشخصات کلی المان‌های مرده و زنده	Utility Menu > List > Status > Solution > Element Birth/Death
فهرست مقاطع تعریف شده	Main Menu > PreProcessor > Sections > List Section
فهرست نتایج المان‌ها	Utility Menu > List > Results > Element Solution ...
فهرست نوع المان‌ها	Utility Menu > List > Status > Preprocessor > Element Type
کپی انعکاسی المان	Main Menu > PreProcessor > Modeling > Reflect > Elements
کپی کردن المان	Main Menu > PreProcessor > Modeling > Copy > Elements
کشتن المان‌ها	Main Menu > PreProcessor > Loads > Load Step Opts > Other > Birth & Death > Kill Elements
کشتن المان‌ها	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Other > Birth & Death > Kill Elements
نحوه نمایش المان‌ها	Utility Menu > PlotCtrls > Style > Size and Shape
نمایش المان	Utility Menu > Plot > Elements

پ. ۱. ۳. المان بندی (Meshing)

عملکرد	آدرس در برنامه
اصلاح المان بندی روی مدل	Main Menu > PreProcessor > Meshing > Modify Mesh > Refine at
باز کردن پنجره ابزار المان بندی	Main Menu > PreProcessor > Meshing > MeshTool
پاک کردن المان بندی حجم	Main Menu > PreProcessor > Meshing > Clear > Volumes
پاک کردن المان بندی خط	Main Menu > PreProcessor > Meshing > Clear > Lines

Main Menu > PreProcessor > Meshing > Clear > Areas	پاک کردن المان بندی سطح
Main Menu > PreProcessor > Meshing > Clear > Keypoints	پاک کردن المان بندی نقطه
Main Menu > PreProcessor > Meshing > Size Cntrls > Manual Size	تعیین اندازه المان‌ها
Main Menu > PreProcessor > Meshing > Mesh Attributes > Default Attribs	تعیین مشخصات پیش فرض برای المان بندی
Main Menu > PreProcessor > Meshing > Mesh Attributes > All Volumes	تعیین مشخصات حجم‌ها برای المان بندی
Main Menu > PreProcessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Volumes	تعیین مشخصات حجم‌های انتخاب شده با موس برای المان بندی
Main Menu > PreProcessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Lines	تعیین مشخصات خطوط انتخاب شده با موس برای المان بندی
Main Menu > PreProcessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Areas	تعیین مشخصات سطوح انتخاب شده با موس برای المان بندی
Main Menu > PreProcessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked KPs	تعیین مشخصات نقاط انتخاب شده با موس برای المان بندی
Main Menu > PreProcessor > Meshing > Mesh Attributes > All Lines	تعیین مشخصات همه خطوط برای المان بندی
Main Menu > PreProcessor > Meshing > Mesh Attributes > All Areas	تعیین مشخصات همه سطوح برای المان بندی
Main Menu > PreProcessor > Meshing > Mesh Attributes > All Keypoints	تعیین مشخصات همه نقطه‌ها برای المان بندی
Main Menu > PreProcessor > Meshing > Mesher Opts	تنظیمات المان بندی
Utility Menu > List > Status > Preprocessor > Meshing	فهرست مشخصات کلی المان بندی
Main Menu > PreProcessor > Meshing > Check Mesh > Indivisual Elm	کنترل مناسب بودن یا نبودن شکل المان‌ها
Main Menu > PreProcessor > Meshing > Mesh > Volumes	المان بندی احجام
Main Menu > PreProcessor > Meshing > Mesh > Lines	المان بندی خطوط
Main Menu > PreProcessor > Meshing > Mesh > Areas	المان بندی سطوح
Main Menu > PreProcessor > Meshing > Mesh > Keypoints	المان بندی نقاط

پ. ۱. ۴. نقطه (Keypoiny)

آدرس در برنامه	عملکرد
Utility Menu > Select > Entities > Keypoint	انتخاب نقطه
Utility Menu > WorkPlane > Offset WP to > Keypoints +	انتقال صفحه کار به یک نقطه مشخص
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Volume > Arbitrary	ایجاد حجم دلخواه بین چند سطح یا چند نقطه
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Operate > Extrude > Keypoints	ایجاد خط با حرکت دادن یک نقطه
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary	ایجاد سطح بطور دلخواه، مانند بین خطوط یا بین نقاط
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Nodes > on Keypoints	ایجاد گره بر روی نقطه
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Keypoints > on Line	ایجاد نقطه بر روی خط
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Keypoints > on Line With Ratio	ایجاد نقطه بر روی خط با یک نسبت
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Keypoints > on Nodes	ایجاد نقطه بر روی گره
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Keypoints > on Working Plane	ایجاد نقطه بر صفحه کار WP
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Keypoints > KP Between KPs	ایجاد نقطه بین نقطه‌های دیگر
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Keypoints > in Active CS	ایجاد نقطه در دستگاه مختصات
Main Menu > PreProcessor > Meshing > Clear > Keypoints	پاک کردن المان بندی نقطه
Main Menu > PreProcessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment	تعریف نیروی متمرکز روی گره یا نقطه
Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment	تعریف نیروی متمرکز روی گره یا نقطه
Main Menu > PreProcessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked KPs	تعیین مشخصات نقاط انتخاب شده با موس برای المان بندی
Main Menu > PreProcessor > Meshing > Mesh Attributes > All Keypoints	تعیین مشخصات همه نقطه‌ها برای المان بندی
Main Menu > PreProcessor > Loads > Define Loads > Delete > Structural > Displacement	حذف جابجایی یا تکیه‌گاه روی گره یا نقطه انتخاب شده با موس
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Delete > Volumes Only	حذف حجم بدون سطوح، خطوط و نقاط آن
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Delete > Volumes and Below	حذف حجم و کلیه سطوح، خطوط و نقاط آن
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Delete > Lines Only	حذف خط بدون حذف نقاط آن
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Delete > Line and Below	حذف خط و نقاط آن
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Delete > Areas Only	حذف سطح بدون نقاط و خطوط آن
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Delete > Area and Below	حذف سطح و نقطه‌ها و خطوط آن
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Delete > Keypoints	حذف نقطه
Main Menu > PreProcessor > Loads > Define Loads > Delete > All Load Data > All Forces	حذف نیروهای متمرکز روی گره یا نقطه

Main Menu > Solution > Define Loads > Delete > All Load Data > All Forces	حذف نیروهای متمرکز روی گره یا نقطه
Main Menu > PreProcessor > Loads > Define Loads > Delete > Structural > Force/Moment	حذف نیروی متمرکز روی گره یا نقطه انتخاب شده با موس
Main Menu > Solution > Define Loads > Delete > Structural > Force/Moment	حذف نیروی متمرکز روی گره یا نقطه منتخب
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Move/Modify > Keypoints	حرکت دادن نقطه
Utility Menu > WorkPlane > Align WP with > Keyponts +	سازگار کردن صفحه کار با نقاط
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Check Geom > KP Distances	فاصله دو نقطه
Utility Menu > List > Loads > DOF Constraints > on All Keypoints	فهرست جزئیات تکیه‌گاه یا جابجایی نقطه‌ها
Utility Menu > List > Loads > DOF Constraints > on Picked KPs +	فهرست جزئیات تکیه‌گاه یا جابجایی نقطه‌های انتخاب شده در پنجره نمایش
Utility Menu > List > Keypoint	فهرست جزئیات نقطه‌ها
Utility Menu > List > Loads > Forces > on All Keypoints	فهرست جزئیات نیروی متمرکز روی نقطه‌ها
Utility Menu > List > Loads > Forces > on Picked KPs +	فهرست جزئیات نیروی متمرکز روی نقطه‌ها با انتخاب آنها در پنجره نمایش
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Reflect > Keypoints	کپی انعکاسی نقطه
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Copy > Keypoints	کپی کردن نقطه
Main Menu > PreProcessor > Meshing > Mesh > Keypoints	المان بندی نقاط
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Operate > Calc Geom Items > of Keypoints	مشخصات هندسی شامل وزن و حجم نقطه‌ها
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Operate > Scale > Keypoints	مقیاس کردن مختصات نقاط با یک ضریب
Utility Menu > Plot > Keypoints	نمایش نقطه

پ. ۱. ۵. خط (Line)

آدرس در برنامه	عملکرد
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Operate > Extend Line	افزایش طول یک خط تا حد مشخص
Utility Menu > Select > Entities > Line	انتخاب خط
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Check Geom > Set Small Lines	انتخاب خط‌های کوتاه
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Operate > Extrude > Keypoints	ایجاد خط با حرکت دادن یک نقطه
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Operate > Extrude > Lines	ایجاد سطح با حرکت دادن یک خط
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary	ایجاد سطح بطور دلخواه، مانند بین خطوط یا بین نقاط
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Keypoints > on Line	ایجاد نقطه بر روی خط
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Keypoints > on Line With Ratio	ایجاد نقطه بر روی خط با یک نسبت
Main Menu > PreProcessor > Meshing > Clear > Lines	پاک کردن المان بندی خط
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Lines > Splines	ترسیم Spline با روش‌های مختلف
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Lines > Lines	ترسیم خط مستقیم به روش‌های مختلف
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Lines > Arcs	ترسیم قوس به روش‌های مختلف
Main Menu > PreProcessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Lines	تعیین مشخصات خطوط انتخاب شده با موس برای المان بندی
Main Menu > PreProcessor > Meshing > Mesh Attributes > All Lines	تعیین مشخصات همه خطوط برای المان بندی
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Create > Lines > Line Fillet	تقاطع منحنی دو خط
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Delete > Volumes Only	حذف حجم بدون سطوح، خطوط و نقاط آن
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Delete > Volumes and Below	حذف حجم و کلیه سطوح، خطوط و نقاط آن
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Delete > Lines Only	حذف خط بدون حذف نقاط آن
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Delete > Line and Below	حذف خط و نقاط آن
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Delete > Areas Only	حذف سطح بدون نقاط و خطوط آن
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Delete > Area and Below	حذف سطح و نقطه‌ها و خطوط آن
Main Menu > PreProcessor > Modeling > Move/Modify > Lines	حرکت دادن خط
Utility Menu > WorkPlane > Align WP with > Plane Normal to Line +	سازگار کردن صفحه کار به صفحه عمود بر یک خط
Utility Menu > List > Loads > Surface > on All Lines	فهرست جزئیات بار سطحی روی خطوط
Utility Menu > List > Loads > Surface > on Picked Lines +	فهرست جزئیات بار سطحی روی خطوط با انتخاب در پنجره نمایش
Utility Menu > List > Loads > DOF Constraints > on All Lines	فهرست جزئیات تکیه‌گاه یا جابجایی خطوط
Utility Menu > List > Loads > DOF Constraints > on Picked Lines +	فهرست جزئیات تکیه‌گاه یا جابجایی خطوط انتخاب شده در پنجره

راهنمای کاربردی نرم افزار

ANSYS® v15.0 در مهندسی زلزله و سازه

مؤلف: دکتر محمد جواد جبارزاده

در این کتاب می آموزید:

- مدل سازی سازه های با هندسه خطی مانند قاب و خرپا،
- مدل‌سازی اعضایی با هندسه صفحه ای مانند ورق تحت کشش و تیر فولادی،
- مدل سازی سازه ها و اجزایی با هندسه حجمی مانند طاق بنایی و تیر بتنی،
- آشنایی با مدل ها، روش ها و گزینه های تحلیل غیر خطی در ANSYS و انجام تحلیل های غیرخطی فولادی و بتنی،
- تحلیل مودال، طیفی و دینامیکی تاریخچه زمانی،
- روش های مختلف بارگذاری استاتیکی، تناوبی و دینامیکی،
- انواع روش‌های مشاهده نتایج مهندسی مانند: برش زدن در صفحه و حجم، محاسبه برش پایه و طبقه، خروجی‌های برداری و کانتوری و ترسیم نمودارهای رفتاری اعضا مانند نمودار نیرو- تغییر مکان در بارگذاری های تناوبی و ...

به همراه:

- جداول آدرس یابی جامع برای دسترسی سریع به کارکردهای مختلف نرم افزار،
- جداول مشخصات المان های کاربردی در مهندسی زلزله و سازه،

انتشارات فرشچی

9786009252039