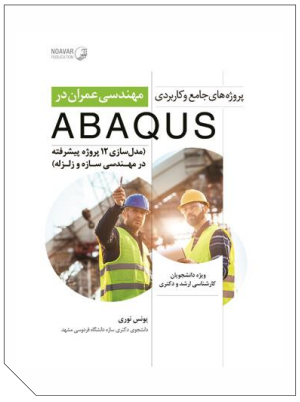
پـروژه‌هـای جـامع و کـاربـردی مهندسی عمران در ABAQUS

مدلسازی ۱۲ پروژه پیشرفته در مهندسی سـازه در زلـزله



مؤلف:

مهندس یونس نوری

دانشجوی دکتری سازه دانشگاه فردوسی مهشد

شناسه: نوری، یونس ۱۳۷۰-
عنوان و نام پدیدآور: پروژه‌های جامع و کاربردی مهندسی عمران در ABAQUS / مولف: یونس نوری
مشخصات نشر: تهران، نوآور ۱۳۹۹.
مشخصات ظاهری: ۴۴۸ ص.
شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۱۶۸-۴۷۲-۲
یادداشت: فهرستنویسی کامل این اثر در نشانی: http://opac.nlai.ir قابل دسترسی است.
شماره کتابشناسی ملی: ۵۹۹۰۳۲۵

پروژه‌های جامع و کاربردی مهندسی عمران در ABAQUS

مؤلف: مهندس یونس نوری
ناشر: نوآور
شمارگان: ۵۰۰ نسخه
مدیر فنی: محمدرضا نصیرنیا
شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۱۶۸-۴۷۲-۲

نشرنوآور

مرکز پخش:
نوآور، تهران، خیابان انقلاب، خیابان فخررازی، خیابان شهدای ژاندارمری نرسیده به خیابان دانشگاه ساختمان ایرانیان، پلاک ۵۸، طبقه دوم، واحد ۶ تلفن: ۹۲ـ ۶۶۴۸۴۱۹۱، www. noavarpub. com

کلیه حقوق چاپ و نشر این کتاب مطابق با قانون حقوق مؤلفان و مصنفان مصوب سال ۱۳۴۸ برای ناشر محفوظ و منحصراً متعلق به نشر نوآور می‌باشد. لذا هر گونه استفاده از کل یا قسمتی از این کتاب (از قبیل هر نوع چاپ، فتوکپی، اسکن، عکس‌برداری، نشر الکترونیکی، هر نوع انتشار به صورت اینترنتی، سی‌دی، دی‌وی‌دی، فیلم فایل صوتی یا تصویری و غیره) بدون اجازه کتبی از نشر نوآور ممنوع بوده و شرعاً حرام است و متخلفین تحت پیگرد قانونی قرار می‌گیرند.

فـهرست مطالب

مقدمه ۹

فصل اول / تحلیل المان محـدود بـا اسـتفاده از نرم‌افزار آباکوس ۱۵

مقدمه ۱۵
زیرمجموعه‌های آباکوس ۱۵
بسته Abaqus/Standard ۱۶
بسته Abaqus/Explicit ۱۶
بسته Abaqus/CFD ۱۶
معرفی مختصر المان محدود ۱۶
تحلیل استاتیکی ۱۷
معرفی عملکرد آباکوس ۱۹
پیش‌پردازش (Abaqus/CAE) ۲۰
شبیه‌سازی (Abaqus/Satndard یا Abaqus/Explicit) ۲۰
پس‌پردازش (Abaqus/CAE) ۲۰
مراحل تحلیل یک مدل ۲۰
هندسه مجزاسازی شده ۲۰
خصوصیات مقطع المان ۲۱
خصوصیات مصالح ۲۱
بارها و شرایط مرزی ۲۱
نوع تحلیل ۲۲
درخواست خروجیها ۲۲
معرفی محیط آباکوس ۲۲
نوار منوها (Menu bar) ۲۳
نوار ابزار (Toolbar) ۲۳
نوار ماژول (Context bar) ۲۳
نوار ابزار کناری (Toolbox) ۲۴
منوی درختی (Model-Tree) ۲۴
محیط اعلام (Message area) ۲۴
ماژول Part ۲۴
بخش Part ۲۴
روش ایجاد قطعه به روش Extrusion ۲۶
روش ایجاد قطعه به روش Revolution ۲۷
روش ایجاد قطعه به روش Sweep ۲۹
روش ایجاد قطعه به روش Planer ۳۰
روش ایجاد قطعه به روش Wire ۳۱
ابزارهای کمکی ترسیم قطعات ۳۱
ابزار Solid From Shell ۳۴
ابزارهای Shell ۳۴
ابزار Shell From Solid ۳۴
ابزارهای Wire ۳۵
ابزار Point to Point ۳۵
ابزار Round between to Wires ۳۵
ابزار Wire from edge ۳۵
ابزارهای Cut ۳۶
ابزارهای Round ۳۸
بخش Feature ۳۸
ابزار Edit ۳۸
ابزار Regenrate ۳۸
ابزار Suppress ۳۹
ابزار Resume ۳۹
ابزار Delete ۳۹
بخش Partition ۴۰
ابزارهای Edge ۴۱
ابزار Specify parameter by location ۴۱
ابزار Enter parameter ۴۱
ابزار Select Midpoint/datum point ۴۱
ابزار Use datum plane ۴۱
ابزارهای Face ۴۲
ابزار Sketch ۴۲
ابزار Shortest path between 2 points ۴۲
ابزار Use datum plane ۴۲
ابزار Curved path normal to 2 edges ۴۲
ابزار Extend another face ۴۳
ابزار Intersect by other faces ۴۳
ابزار Project edges ۴۳
ابزارهای Cell ۴۳
ابزار Define cutting plane ۴۳

ابزار Use datum plane ۴۴
ابزار Extend face ۴۴
ابزار Extrude/Sweep edges ۴۵
ابزار Use N-sided patch ۴۵
ابزار Sketch planer partition ۴۶
بخش Datum ۴۶
ابزارهای Point ۴۷
ابزار Enter coordiantes ۴۷
ابزار Offset from point ۴۷
ابزار Midway between 2 points ۴۸
ابزار Offset from 2 edge ۴۸
ابزار Enter parameter ۴۸
ابزار Project point on face/plane ۴۸
ابزار Project point on edge/datum axis ۴۸
ابزارهای Axis ۴۹
ابزار Principal axis ۴۹
ابزار Intersection of 2 planes ۴۹
ابزار Straight edge ۴۹
ابزار 2 Points ۴۹
ابزار Axis of cylinder ۴۹
ابزار Normal to plane, thru point ۵۰
ابزار Parallel to line, thru point ۵۰
ابزار 3 Points on circle ۵۰
ابزار Rotate from line ۵۰
ابزارهای Plane ۵۰
ابزار Offset from principal plane ۵۰
ابزار Offset from plane ۵۱
ابزار 3 points ۵۱
ابزار Line and point ۵۱
ابزار Point and normal ۵۱
ابزار Midway between 2 points ۵۱
ابزار Rotate from plane ۵۲
ابزارهای Coordiane system ۵۲
ابزار 3 Points ۵۲
ابزار Offset from CSYS ۵۲
ابزار 2 Lines ۵۳
ماژول Property ۵۳
ابزارهای ماژول Property ۵۳
ابزار Material ۵۳
خصوصیات مصالح Elastic ۵۶
مصالح Linear Elastic ۵۶
خصوصیات مصالح برای المانهای Cohesive ۶۴
مصالح Hyperelastic-Rubber Materials ۶۵
مدل Arruda-Boyce ۶۶
مدل Marlow ۶۶
مدل Mooney-Rivlin ۶۷
مدل Neo-Hookean ۶۷
مدل Ogden ۶۷
مدل Polynomial ۶۷
مدل Reduced Polynomial ۶۷
مدل Van der Waals ۶۷
مدل Yeoh ۶۸
استخراج پارامترهای مدل از دادههای آزمایشگاهی ۶۸
خصوصیات مصالح Plastic ۷۲
مصالح Classical Metal Plastic ۷۲
مصالح Concrete Damage Plactisity ۷۴
مدل پلاستیسیته بتن ۷۵
نامتغیرهای تنش انحرافی موثر ۷۵
تانسور تنش موثر یا تنش فشار هیدرواستاتیک ۷۵
و تنش موثر معادل میزس ۷۵
جریان پلاستیک مدل ۷۵
سطح تسلیم ۷۵
خرابی و گسیختگی در مصالح کامپوزیتی ۷۸
معیـار Damage for Fiber-Reinforced Composite
(مدل Hashin) ۷۸
شروع خرابی در لایه کامپوزیتی ۷۹
تنش کششی در فیبرها ($\hat{\sigma}_{11} \geq 0$) ۷۹
تنش فشاری در فیبرها ($\hat{\sigma}_{11} < 0$) ۷۹
تنش کششی در ماتریس ($\hat{\sigma}_{22} \geq 0$) ۷۹
تنش فشاری در ماتریس ($\hat{\sigma}_{22} < 0$) ۷۹
گسترش خرابی در لایه کامپوزیتی ۸۰
معیار Maximum Stress theory ۸۲

معیار Tsai-Hill ۸۲
معیار Tsai-Wu ۸۳
معیار Azzi-Tsai-Hill ۸۳
ابزار Profile ۸۴
پروفیلهای با شکل مشخص ۸۵
پروفیلهای با شکل دلخواه ۸۵
ابزارهای Section و Assign Section ۸۵
ابزار Composite Layup ۸۶
ابزارهای Material Orientation ۸۷
ماژول Assembly ۸۷
ابزارهای ماژول Assembly ۸۷
ابزار Create Instance ۸۸
ابزار Linear Pattern و Radial Pattern ۸۹
ابزار Translate Instance و Translate to ۸۹
ابزار Rotate Instance ۹۰
ابزار Merge/Cut Instances ۹۰
ابزار Create Constraine ۹۲
ابزار Parallel Face ۹۲
ابزار Face to face ۹۳
ابزار Parallel edge ۹۳
ابزار Edge to edge ۹۴
ابزار Coaxial ۹۴
ابزار Coicident point ۹۴
ابزار Parallel CSYS ۹۴
ماژول Step ۹۵
ابزارهای ماژول Step ۹۵
ابزار Create Step ۹۵
گام تحلیلی اولیه ۹۵
گام تحلیلی اصلی ۹۵
تحلیلهای خطی و غیرخطی ۹۶
عوامل ایجاد رفتار غیرخطی ۹۷
غیرخطی هندسی و کمانش ۹۷
غیرخطی مصالح ۹۹
غیرخطی شرایط مرزی ۹۹
روش حل معادلات غیرخطی ۹۹
فرآیند همگرایی ۱۰۱
ایجاد نمو خودکار در آباکوس استاندارد ۱۰۲
ابزار Create Field Output ۱۰۴
ابزار Create History Output ۱۰۵
ماژول Interaction ۱۰۶
ابزار Create Interaction ۱۰۷
اندرکنش General Contact ۱۰۷
انـــدرکنش Surfce to Surface، Self-contact و Pressure penetration ۱۰۷
اندرکنش Model Change ۱۰۷
اندرکنش Cylic Symmetry ۱۰۸
اندرکنش Elastic Foundation ۱۰۸
اندرکنش Cavity Radiation ۱۰۸
اندرکنش حرارتی Film condition ۱۰۹
انـدرکنش Radiation to and frome the ambient environment ۱۰۹
اندرکنش Incident Wave ۱۰۹
اندرکنش Acoustic impedance ۱۰۹
اندرکنش Actuator/sensor ۱۰۹
ابزار Create Interaction Property ۱۱۰
خصوصیات اندرکنش Contact ۱۱۰
خصوصیات اندرکنش Film condition ۱۱۰
خصوصیات اندرکنش Cavity radiation ۱۱۰
خصوصیات اندرکنش Acoustic impedance ۱۱۰
خصوصیات اندرکنش Incident wave ۱۱۰
خصوصیات اندرکنش Actuator/sensor ۱۱۰
ابزار Create Constraint ۱۱۰
قید Tie ۱۱۰
قید Rigid body ۱۱۱
قید Display body ۱۱۱
قید Coupling ۱۱۱
قید Adjust points ۱۱۱
قید MPC constraint ۱۱۱
قید Shell-to-solid coupling ۱۱۲
قید Embedded region ۱۱۲
قید Equation ۱۱۲
ابزار Find Contact Pairs ۱۱۲

الگوریتم جستجو تماس در این ابزار ۱۱۳
ابزارهـای Connector Builder، Assignment، Section و Wire ۱۱۵
اتصالات Basic ۱۱۶
مدل رفتاری اتصال ۱۲۳
مدل رفتاری الاستیک ۱۲۶
مدل رفتاری میرایی ۱۲۶
مدل رفتاری اصطکاکی ۱۲۶
مدل رفتاری پلاستیک ۱۲۷
مدل آسیب ۱۲۸
معیار شروع آسیب بر اساس نیرو ۱۲۹
معیار شروع آسیب بر اساس جابجایی پلاستیک ۱۲۹
معیار شروع آسیب بر اساس جابجایی ۱۲۹
مدل توقف و قفل شوندگی ۱۲۹
مدل شکست ۱۲۹
ماژول Load ۱۳۱
ابزار Load ۱۳۲
بار Concentrated force ۱۳۲
ابزار Boundary Condition ۱۳۹
شرایط مرزی مستقیم ۱۳۹
شرایط مرزی تیپ ۱۴۰
ابزار Predifined Field ۱۴۲
ابزار Load Case ۱۴۴
ماژول Mesh ۱۴۴
ابزار Mesh ۱۴۵
فرآیند مشبندی قطعات ۱۴۵
خصوصیات المانهای آباکوس ۱۴۶
خانواده المان ۱۴۶
درجات آزادی المان ۱۴۷
تعداد گرهها و درجه المان ۱۴۸
فرمولبندی المان ۱۴۹
انتگرالگیری المان ۱۴۹
ابزار Seed Part Instance ۱۵۰
ابزار Seed Edges ۱۵۱
ابزار Assign Mesh Controls ۱۵۳
روشهای مشبندی بالا به پایین ۱۵۴
روش مشبندی Structued ۱۵۵
روش مشبندی Sweep ۱۵۶
الگوریتم Medial Axis ۱۵۹
الگوریتم Advancing front ۱۵۹
روش مشبندی Free ۱۵۹
روش مشبندی پایین به بالا ۱۶۱
ابزار Associate Mesh with Geometry ۱۶۴
ابزار Assign Element Type ۱۶۵
المانهای تنش/جابجایی ۱۶۷
درجات آزادی فعال ۱۶۷
انتخاب المانهای تنش/ جابجایی ۱۶۷
المانهای فشار آب حفرهای ۱۶۸
درجات آزادی فعال ۱۶۸
انتخاب المانهای فشار آب حفرهای ۱۶۸
المانهای کوپل حرارت- جابجایی ۱۶۸
درجات آزادی فعال ۱۶۸
انتخاب المانهای کوپل حرارت- جابجایی ۱۶۸
المانهای کوپل حرارت- الکتریکی- سازهای ۱۶۹
درجات آزادی فعال ۱۶۹
المانهای کوپل حرارت- فشار آب حفرهای- جابجایی ۱۶۹
درجات آزادی فعال ۱۶۹
المانهای انتقال (حرارت) ۱۷۰
درجات آزادی فعال ۱۷۰
انتخاب المانهای انتقال ۱۷۰
المانهای انتقال حرارت اجباری ۱۷۰
درجات آزادی فعال ۱۷۰
المانهای جریان تراکمناپذیر ۱۷۱
درجات آزادی فعال ۱۷۱
المانهای کوپل حرارت- الکتریکی ۱۷۱
درجات آزادی فعال ۱۷۱
المانهای پیزوالکتریک ۱۷۱
درجات آزادی فعال ۱۷۲
انتخاب المانهای پیزوالکتریک ۱۷۲
المانهای الکترومغناطیس ۱۷۲
درجات آزادی فعال ۱۷۲
المانهای آکوستیک ۱۷۲

درجات آزادی فعال ۱۷۳

فصل دوم / مدل‌سازی ستون مرکب بتنی ـ فولادی ـ پلیمری دو جداره تحت اثر بار محوری ۱۷۴

معرفی سیستم سازهای ۱۷۴

فصل سوم / مدل‌سازی آزمایش بیرون‌کشیدگی میلگرد از بتن (Pullout Test) با لغزش میلگرد ۲۰۳

معرفی آزمایش بیرون کشیدگی میلگرد ۲۰۳

فصل چهارم / مدل‌سازی کمانش پوسته استوانه‌ای با اثر خوردگی ورق ۲۲۳

معرفی کمانش پوسته‌ها ۲۲۳

فصل پنجم / مدل‌سازی انفجار بر پوسته دو انحنایی FGM ۲۴۰

معرفی رفتار Functionally Graded Materials ۲۴۰

فصل ششم / مدل‌سازی رفتار چرخه‌ای قاب با میراگر ویسکوالاستیک دیواره‌ای ۲۵۷

معرفی میراگرهای ویسکوالاستیک ۲۵۷

حوزه زمان ۲۵۸

حوزه فرکانس ۲۵۸

سری پرونی ۲۵۹

فصل هفتم / بهینه‌سازی توپولوژی یک ساختمان در برابر بار زلزله ۲۸۵

معرفی مبانی بهینه‌سازی توپولوژی ۲۸۵

فصل هشتم / بهسازی اتصال بتنی توسط نبشی و بولت تحت بار چرخه‌ای .. ۲۹۸

مقدمه ۲۹۸

فصل نهم / تشخیص ترک در تیر آلومینومی با استفاده از امواج هدایت شده لمب ۳۳۶

مقدمه ۳۳۶

فصل دهم / بررسی رفتار لرزه‌ای قاب خمشی فولادی با و بدون میراگر ویسکوز خطی ۳۵۴

مقدمه ۳۵۴

فصل یازدهم / ارتعاش آزاد ورق فولادی مستطیلی ۳۸۱

مقدمه ۳۸۱

فصل دوازدهم / مدل‌سازی ستون بتنی با ژاکت فولادی تحت اثر بار جانبی چرخه‌ای ۳۹۲

تقویت ستون بتنی با استفاده از مصالح فلزی ۳۹۲

فصل سیزدهم / مدل‌سازی میراگر تسلیمی خمشی برشی ۴۲۴

میراگرهای تسلیمی ۴۲۴

منابع و مآخذ ۴۴۷

فراخوان مساعدت فرهنگی و علمی

خوانندهٔ فرهیخته و بزرگوار

نشر نوآور ضمن ارج نهادن و قدردانی از اعتماد شما بـه کتـاب‌هـای ایـن انتشـارات، بـه استحضـارتان می‌رساند که همکاران این انتشارات، اعم از مؤلّفان و مترجمان و کارگروه‌های مختلف آماده‌سازی و نشر کتاب، تمامی سعی و همّت خود را برای ارائهٔ کتابی درخور و شایسـتهٔ شـما فرهیختـهٔ گرامـی بـه‌کـار بسته‌اند و تلاش کرده‌اند که اثری را ارائه نمایند که از حدّاقل‌های استاندارد یک کتاب خوب، هم از نظر محتوایی و غنای علمی و فرهنگی و هم از نظر کیفیّت شکلی و ساختاری آن، برخوردار باشد.

بااین‌وجود، علی‌رغم تمامی تلاش‌های این انتشارات برای ارائهٔ اثری با کمترین اشکال، باز هم احتمـال بـروز ایـراد و اشکال در کار وجود دارد و هیچ اثری را نمی‌تـوان الزامـاً مبـرّا از نقـص و اِشـکال دانسـت. ازسـوی‌دیگـر، ایـن انتشارت بنابه تعهّدات حرفه‌ای و اخلاقی خود و نیز بنابه اعتقاد راسخ به حقوق مسلّم خواننـدگان گرامـی، سـعی دارد از هر طریق ممکن، به‌ویژه از طریق فراخوان به خوانندگان گرامـی، ازهرگونـه اشـکال احتمـالی کتـاب‌هـای منتشرهٔ خود آگاه شده و آن‌ها را در چاپ‌ها و ویرایش‌های بعدی رفع نماید.

لذا دراین راستا، از شما فرهیختهٔ گرامی تقاضا داریم درصورتی‌که حین مطالعهٔ کتاب با اشکالات، نواقص و یا ایرادهای شکلی یا محتوایی در آن برخورد نمودید، اگر اصلاحات را بر روی خود کتاب انجام داده‌اید پس از اتمام مطالعه، کتاب ویرایش‌شدهٔ خود را با هزینهٔ انتشارات نوآور، پس از هماهنگی با انتشـارات، ارسال نمایید، و نیز چنانچه اصلاحات خود را بر روی برگهٔ جداگانه‌ای یادداشت نموده‌اید، لطـف کـرده عکس یا اسکن برگهٔ مزبور را با ذکر نام و شمارهٔ تلفن تماس خود به ایمیل انتشارات نوآور ارسال نمایید، تا این موارد بررسی شده و در چاپ‌ها و ویرایش‌های بعدی کتاب اِعمال و اصلاح گردد و باعـث هرچـه پربارترشدن محتوای کتاب و ارتقاء سطح کیفی، شکلی و ساختاری آن گردد.

نشر نوآور، ضمن ابراز امتنان از این عمل متعهّدانه و مسئولانهٔ شما خوانندهٔ فرهیخته و گرانقدر، به‌منظور تقدیر و تشکّر از این همدلی و همکاری علمی و فرهنگی، درصورتی‌که اصلاحات درست و بجـا باشـند، متناسب با میزان اصلاحات، به‌رسم ادب و قدرشناسی، نسخهٔ دیگری از همان کتاب و یا چاپ اصلاح‌شدهٔ آن و نیز از سایر کتب منتشرهٔ خود را به‌عنوان هدیه، به انتخاب خودتان، برایتـان ارسـال مـی‌نمایـد، و درصورتی‌که اصلاحات تأثیرگذار باشند در مقدّمهٔ چاپ بعدی کتاب نیز از زحمات شما تقدیر می‌شود.

همچنین نشر نوآور و پدیدآورندگان کتاب، از هرگونه پیشنهادها، نظـرات، انتقـادات و راه‌کارهـای شـما عزیزان در راستای بهبود کتاب، و هرچه بهتـر شـدن سـطح کیفـی و علمـی آن صـمیمانه و مشـتاقانه استقبال می‌نمایند.

نشر نوآور

تلفن: ۲-۶۶۴۸۴۱۹۱

www.noavarpub.com

info@noavarpub.com

مقدمه

با پیدایش روش اجزای محدود[1] در دهه ۱۹۴۰، به دلیل حجم محاسبات بالا و نبود سیستم‌های محاسباتی پیشرفته، با اقبال چندانی مواجه نشد. ولی بعدها که سازه‌ها پیچیده‌تر شد و سیستم‌های محاسباتی مناسبی ارایه شد، این روش، با شتاب زیادی گسترش یافت و به یک روش محبوب برای مهندسین سازه و مکانیک تبدیل شد. البته در سال‌های اخیر روش‌های جدیدی همانند روش‌های اجزای مرزی[2]، اجزای مجزا[3] و روش‌های بدون مش[4] نیز به وجود آمده‌اند.

روش اجزای محدود سیستم را به یک سری اجزای کوچک‌تر تقسیم‌بندی کرده و معادلات تعادل و سازگاری را برای هر المان برای بارهای خارجی تامین می‌نماید. در نهایت با کنار هم قرار دادن این معادلات و یافتن مجهولات (معمولا جابجایی‌ها و کرنش‌ها) رفتار کل سیستم، مشخص می‌شود. این دستگاه معادلات تعداد مجهولات زیادی داشته و برای حل مستلزم یک سیستم محاسباتی و روش‌های محاسبات خاصی می‌باشد. امروزه نرم‌افزارهای متعددی با قابلیت‌های گوناگونی برای شبیه‌سازی سازه‌ها به روش اجزا محدود ارایه شده‌اند. یکی از این نرم‌افزارها بسته تحلیلی ABAQUS می‌باشد که توسط شرکت Dassault Systemes در سال ۱۹۷۸ ارایه شد. این نرم‌افزار با قابلیت‌های زیادی که داشته توانسته در بسیاری از تحقیقات مهندسین عمران و مکانیک و سایر رشته‌ها به کار گرفته شود.

در سال‌های اخیر با ارتقا دانش مهندسین و نیاز مبرم به مطالعه هر چه دقیق‌تر سازه‌ها، کمبود یک مرجع مناسب برای حل مثال‌ها و نیازهای دانشجویان تحصیلات تکمیلی در مقطع ارشد و دکتری به طور چشم‌گیری احساس می‌شد. با توجه به اینکه اکثر کتب و مطالب منتشر شده در زمینه شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار ABAQUS صرفا حل مثال‌های ساده و نمادین بوده، نویسنده را ترغیب نمود که مجموعه‌ای از مثال‌های کاربردی، جدید و پرتکرار را تالیف و در اختیار دانش‌پژوهان گرامی قرار دهد. مجموعه حاضر با توجه به نیازسنجی تحقیقاتی دانشجویان گرایش‌های سازه و زلزله شکل گرفته است.

در این کتاب سعی شده تا تعاریف و ماژول‌های نرم افزار به شکل کاربردی و ساده‌تری توضیح داده شود و فقط بخش هایی که کاربرد زیادی در مدل‌سازی دارند مورد توجه قرار گیرند. در بخش مدل-سازی انواع روش‌های ایجاد قطعات، ویرایش، پارتیشن‌بندی و مش‌بندی به طور کاربردی توضیح داده شده است و سعی شده تا کلیه موارد مورد نیاز کاربر رفع گردد. مدل‌های مصالح فولاد، بتن، ماتریس‌ها، فایبرها، کامپوزیت‌ها و هایپرالاستیک‌ها بررسی و ثابت‌های مصالح مورد نیاز نیز در کتاب گنجانده شده است. با توجه به اینکه کتاب حاضر بیش‌تر به صورت پروژه محور نوشته شده و تمرکز اصلی بر روی مثال‌های کاربردی می باشد. بخش مدل‌سازی و پیش‌نیازهای شبیه‌سازی به صورت کاربردی توضیح داده شده و از ذکر کلیه مدل‌های مصالح و تئوری‌های نرم افزار اجتناب شده است. همچنین رفتار غیرخطی در سازه‌ها شامل هندسی، مصالح، بارگذاری و شرایط مرزی شرح داده شده و با ذکر مثال-هایی چگونگی رفتار آنها بررسی شده است. در ادامه روند حل مسایل غیرخطی با روش‌های عددی

---

1 Finite Element Method
2 Boundary Finite Element
3 Discrete Element Method
4 Mesh Free Method

توضیح داده شده است. این کتاب شامل ۱۲ مثال کاربردی در زمینه مهندسی عمران سازه و زلزله می‌باشد. این مثال‌ها عمدتا به صورت ترکیبی و هدفمند تدوین شده‌اند که هر مثال شامل چند مثال کوچکتر و کاربردی می‌باشد. در ادامه مثال‌های کتاب مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

❖ مثال ۱: در اولین مثال، رفتار محوری یک ستون مرکب فولادی – بتنی – پلمیری دو جداره مورد بررسی قرار گرفته است. در این مثال نحوه بارگذاری محوری ستون‌ها و استخراج منحنی بار-تغییرمکان محوری ستون توضیح داده شده است. در این مثال سه نوع مصالح فولادی، بتنی و پلیمری یا FRP استفاده شده که نحوه تعریف آن‌ها شرح داده شده است.

- اهداف: نحوه تعریف مصالح مختلف همانند فولاد، بتن و FRP، نحوه بارگذاری محوری، اندرکنش ستون‌ها مرکب، تعیین نحوه قرارگیری الیاف لایه پلیمری

❖ مثال ۲: در بسیاری از سازه‌ها، فرض بر این است که لغزشی بین آرماتور و بتن رخ نمی‌دهد، ولی در برخی موارد این فرض درست نیست و آرماتور در داخل بتن لغزش دارد. در این مثال چگونگی مدل‌سازی این پدیده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

- اهداف: مدل‌سازی متقارن محوری و تعریف اندرکنش Cohesive یا چسبنده بین قطعات

❖ مثال ۳: در این مثال سه مثال کلی، تحلیل مودال، خوردگی در فلزات و کمانش پوسته‌ها گنجانده شده است. رفتار پوسته‌های نازک استوانه‌ای که در اثر عوامل محیطی دچار خوردگی شده‌اند، تحت اثر بار محوری مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مثال، خوردگی به صورت یک تابع تصادفی به ضخامت پوسته اعمال شده و در مرحله بعدی، این پوسته تحت اثر بارهای کمانشی قرار می‌گیرد.

- اهداف: تعریف متغیرهای میدانی برای مشخصات پوسته همانند تغییرات ضخامت، تحلیل مودال و بدست آوردن مودهای سازه، اعمال خوردگی به ضخامت ورق پوسته، اعمال نقص هندسی به ورق پوسته و تحلیل کمانشی به روش Static, Riks

❖ مثال ۴: مواد تابعی هدفمند یا FGM ها یکی از جدیدترین دستاوردها در حوزه مهندسی می‌باشند. این مصالح تلفیقی تدریجی از دو مصالح در ضخامت قطعه می‌باشند. در این مثال، نحوه تعریف این نوع مصالح توضیح داده شده است. علاوه بر این، نحوه بارگذاری انفجار بر سازه‌ها به روش CONWEP نیز ارایه شده است. این روش مدل‌سازی انفجار با توجه به تحقیقات آزمایشگاهی گسترده کالیبره شده و دقت نسبتا بالایی در پیش‌بینی بارهای انفجاری دارد.

- اهداف: ارایه روابط تعریف مواد تابعی، چگونگی تعریف مصالح FGM در نرم‌افزار و نحوه تعریف بارگذاری انفجار به روش CONWEP

❖ مثال ۵: میراگرهای ویسکوالاستیک به عنوان یکی از ابزارهای میراکننده انرژی زلزله مورد استفاده قرار می‌گیرند. تعریف و تحلیل این نوع میراگرها در نرم‌افزار، از چالش برانگیزترین مسائل مدل‌سازی می‌باشد. در این مثال نحوه بارگذاری چرخه‌ای بر روی یک نمونه میراگر ویسکوالاستیک دیواره‌ای جدید، مورد بررسی قرار گرفته است.

- اهداف: نحوه تعریف مصالح ویسکوالاستیک در نرم‌افزار، بارگذاری چرخه‌ای جانبی، ترسیم منحنی هیسترزیس میراگر

❖ مثال ۶: در مهندسی عمران معمولا بهینه‌سازی در سازه‌های گسسته همانند خرپاها و قاب‌ها انجام می‌گیرد. ولی در این مثال، یک نمونه بهینه‌سازی شکل بر روی یک قاب ساختمانی تحت اثر بارهای جانبی زلزله بررسی می‌شود. این قاب در ابتدا توپر بوده و در ادامه بر اساس معیارها و قیدهای تعریف شده بخشی از حجم مصالح حذف شده و بخش موثر باقی می‌ماند.

- اهداف: بهینه‌سازی محیط پیوسته در اثر بارهای وارده

❖ مثال ۷: در این مثال یک اتصال بتنی توسط نبشی، ورق و بولت‌های فولادی تقویت می‌شود. تقویت مورد نظر به منظور بهبود رفتار برشی چشمه اتصال صورت می‌گیرد. این اتصال تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار می‌گیرد و ترک‌های کششی در اتصال و چشمه اتصال بررسی می‌شود.

- اهداف: نحوه سرهم کردن قطعات در یک مدل‌سازی پیچیده، تعریف و پیدا کردن صفحات مورد نظر برای تعریف اندرکنش، تعریف اندرکنش بین قطعات، بارگذاری چرخه‌ای و ترسیم منحنی هیسترزیس اتصال

❖ مثال ۸: پایش سلامت سازه‌ها یکی از جدیدترین مباحث در مهندسی عمران می‌باشد. طی یک مثال، تشخیص ترک در یک تیر آلومینیومی با استفاده از امواج Lamb هدایت شده، توضیح داده شده است. تئوری این امواج نیز مورد بررسی قرار گرفته و نحوه انتشار و تشخیص ترک در تیر بررسی می‌شود.

- اهداف: تئوری امواج هدایت شونده، تعریف یک موج Lamb در نرم‌افزار، استخراج خروجی‌های مورد نیاز برای تشخیص ترک و محاسبات به منظور تعیین موقعیت ترک

❖ مثال ۹: در این مثال یک قاب فولادی که به میراگر ویسکوز مجهز شده است، تحت بارگذاری زلزله قرار می‌گیرد. در این مثال نحوه مدل‌سازی میراگرهای ویسکوز خطی و همچنین نحوه بارگذاری زلزله بر روی سازه‌ها توضیح داده می‌شود. همچنین تفاوت بین انرژی‌های مستهلک شده و سایر انرژی‌ها در سازه با و بدون میراگر مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

- اهداف: مدل‌سازی میراگر ویسکوز خطی به وسیله لینک‌ها، تعریف شتاب‌نگاشت زلزله در نرم‌افزار، اعمال شتاب پایه به سازه، استخراج خروجی انرژی وارد شده و ایجاد شده در سازه طی زلزله

❖ مثال ۱۰: در این مثال، مودهای کمانشی و فرکانس هر مورد برای ورق مستطیلی استخراج می‌شود. در این مثال مودهای کمانشی از تحلیل فرکانسی بدست آمده و با مقادیر تحلیل بدست آمده از رابطه‌های تئوری صفحات و پوسته‌ها مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

- اهداف: تعریف سازگاری بین واحدهای نرم‌افزار در تحلیل فرکانسی، بدست آوردن مودهای کمانشی ورق و فرکانس متناظر با هر مود

❖ مثال ۱۱: در تقویت و بهسازی لرزه‌ای سازه‌های بتنی، استفاده از ژاکت فولادی یکی از راهکارهای افزایش مقاومت و شکل‌پذیری می‌باشد. در این مثال، یک ستون بتنی با استفاده از نبشی و بست‌های فولادی تقویت شده است. این ستون تحت بارهای ثقلی و بارهای جانبی چرخه‌ای قرار گرفته است.

- اهداف: تعریف اندرکنش بین قطعات، بارگذاری مرحله‌ای، تعریف بارگذاری چرخه‌ای و استخراج منحنی هیسترزیس ستون

❖ مثال ۱۲: یک نمونه دیگر از میراگرها، میراگرهای تسلیمی می‌باشند که توسط پلاستیسیته فولاد انرژی وارده ناشی از زلزله را میرا می‌کنند. این میراگرها تحت اثر تنش‌ها وارد عملکردهای متفاوتی شامل محوری، خمشی، برشی و پیچشی دارند. در این مثال، یک نمونه میراگر تسلیمی با عملکرد توام برشی و خمشی مورد مدل‌سازی قرار گرفته است. بارگذاری نمونه به صورت چرخه‌ای می‌باشد.

- اهداف: بررسی رفتار چرخه‌ای میراگر تسلیمی و منحنی هیسترزیس استخراج شده

ذکر چند نکته در رابطه با نرم‌افزارهای اجزا محدود خالی از لطف نیست. بسیاری از نرم‌افزارهای اجزا محدود، ابزارهای تحلیل محسوب می‌شوند و بر خلاف نرم‌افزارهای تجاری همانند ETABS یا SAP2000 از قدرت طراحی بسیار کمی برخوردار می‌باشند. فلذا کاربر باید برای حصول اطمینان از خروجی نتایج به بسیاری از مباحث و تئوری‌ها در سطوح تحصیلات تکمیلی آشنا و مسلط باشد. مباحث تئوری الاستیسیته و پلاستیسیته کاربردی، اجزا محدود خطی و دینامیک سازه‌ها در دوره کارشناسی ارشد و مکانیک شکست و اجزا محدود غیرخطی در دوره دکتری از اصلی‌ترین مراجع برای پیش مطالعه این گونه نرم‌افزارها می‌باشند. چند مرجع مناسب برای هر مبحث معرفی می‌شود.

تئوری الاستیسیته و پلاستیسیته کاربردی	• Elasticity: Theory, Applications, and Numerics, Sadd, 2004. • Applied Elasticity and Plasticity, Kassir, 2017
اجزا محدود خطی	• Finite Element Procedures, K.J. Bathe, 2007. • Structural Analysis with the Finite Element Method. Linear Statics Volume 1: Basis and Solids, Oñate, 2009.
دینامیک سازه‌ها	• Dynamics of Structures, Chopra, 2016 • Structural Dynamics Theory and Computation, Paz and Leigh, 2004
مکانیک شکست	• Fracture Mechanics of Concrete: Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Rock and Other Quasi-Brittle Materials, Shah, Swartz, Ouyang, 1995.
اجزا محدود غیرخطی	• Non-Linear Finite Element Analysis of Solids and Structures, Crisfield, 1996. • Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis, Kim, 2015.

البته برای هر مبحث می‌توان کتاب‌ها و مراجع متنوعی معرفی نمود، ولی مراجع معرفی شده به صورت روان و کاربردی به موضوع پرداخته‌اند.

به دلیل اینکه این نرم‌افزارها، وظیفه تحلیل را دارند، اگر ورودی مناسبی نداشته باشند، خروجی نیز نامناسب و حتی نامناسب‌تر خواهد بود. در مبحث اجزا محدود اصطلاح garbage in, garbage out بسیار متداول می‌باشد. با بررسی رفتار سازه‌ها و دانش کافی می‌توان نتایج نرم‌افزار را تا حد بسیار زیادی کنترل نمود. بنابراین توصیه می‌شود قبل از کار با نرم‌افزار و شروع مدل‌سازی ابتدا ورودی‌های مدل، تئوری مصالح، تئوری حاکم بر مدل، نحوه بارگذاری و خروجی‌های آن مشخص شوند. سپس بر اساس

شرایط مرزی و اندرکنش‌های نزدیک به واقعیت، مدل‌سازی انجام گیرد. در مدل‌سازی سازه‌های پیچیده که متشکل از چند مرحله و تحلیل می‌باشند، ابتدا یک مساله ساده به صورت مجزا در هر مرحله انجام شود و نتایج هر بخش جداگانه کنترل شوند. بعد از اطمینان از نتایج خروجی، مدل‌سازی سازه پیچیده انجام گیرد. اگر مساله به شکلی باشد که بتوان آن را با نتایج یک مساله تحلیلی ریاضی صحت‌سنجی نمود، بر اعتبار مدل‌سازی افزوده می‌شود.

این اثر قطعا خالی از اشکال و لغزش نیست، لذا از همه مهندسین و عزیزان صاحب‌نظر تقاضا می‌شود تا موارد انتقادی و پیشنهادی خود را منعکس بفرمایند تا در ویرایش‌های بعدی مدنظر قرار گیرد. پیشاپیش از نقطه نظرات ارسالی شما تشکر و قدردانی می‌نمایم.

یونس نوری

هشـــدار

کلّیهٔ حقوق چاپ و نشر این کتاب مطابق با قانون حقوق مؤلّفان و مصنّفان و هنرمندان مصوّب سال ۱۳۴۸ و آیین‌نامهٔ اجرایی آن مصوّب ۱۳۵۰، برای ناشر محفوظ و منحصراً متعلّق به نشر نوآور است. لذا هر گونه استفاده از کل یا قسمتی از مطالب، اشکال، نمودارها، جداول، تصاویر این کتاب در دیگر کتب، مجلات، نشریات، سایت‌ها و موارد دیگر، و نیز هر گونه استفاده از کل یا قسمتی از کتاب به هر شکل از قبیل هر نوع چاپ، فتوکپی، اسکن، تایپ از کتاب، تهیّهٔ پی دی اف از کتاب، عکس‌برداری، نشر الکترونیکی، هر نوع انتشار به‌صورت اینترنتی، سی دی، دی وی دی، فیلم، فایل صوتی یا تصویری و غیره بدون اجازهٔ کتبی از نشر نوآور ممنوع و غیرقانونی بوده و **شرعاً نیز حرام** است، و متخلّفین تحت **پیگرد قانونی و قضایی** قرار می‌گیرند.

با توجّه به اینکه هیچ کتابی از کتب نشر نوآور به‌صورت فایل ورد یا پی دی اف و موارد این‌چنین، توسط این انتشارات در هیچ سایت اینترنتی ارائه نشده است، لذا درصورتی‌که هر سایتی اقدام به تایپ، اسکن و یا موارد مشابه نماید و کل یا قسمتی از متن کتب نشر نوآور را در سایت خود قرار داده و یا اقدام به فروش آن نماید، توسط کارشناسان امور اینترنتی این انتشارات، که مسئولیّت ادارهٔ سایت را به عهده دارند و به طور روزانه به بررسی محتوای سایت‌ها می‌پردازند، بررسی و درصورت مشخص شدن هرگونه تخلّف، ضمن اینکه این کار از نظر قانونی غیرمجاز و از نظر شرعی نیز حرام می‌باشد، وکیل قانونی انتشارات از طریق وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی، **پلیس فتا** (پلیس رسیدگی به جرایم رایانه‌ای و اینترنتی) و نیز سایر مراجع قانونی، اقدام به مسدود نمودن سایت متخلّف کرده و طیّ انجام مراحل قانونی و اقدامات قضایی، خاطیان را مورد **پیگرد قانونی و قضایی** قرار داده و کلّیّهٔ خسارات وارده به این انتشارات از متخلّف اخذ می‌گردد.

همچنین درصورتی‌که هر کتابفروشی، اقدام به تهیّهٔ کپی، جزوه، چاپ دیجیتال، چاپ ریسو، اُفست از کتب انتشارات نوآور نموده و اقدام به فروش آن نماید، ضمن اطلاع‌رسانی تخلّفات کتابفروشی مزبور به سایر همکاران و مُوَزّعین محترم، از طریق وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی، اتحادیهٔ ناشران، و انجمن ناشران دانشگاهی و نیز مراجع قانونی و قضایی اقدام به استیفای حقوق خود از کتابفروشی متخلّف می‌نماید.

خرید، فروش، تهیّه، استفاده و مطالعه از روی نسخهٔ غیراصلِ کتاب،
از نظر قانونی غیرمجاز، و شرعاً نیز حرام است.

انتشارات نوآور از خوانندگان گرامی خود درخواست دارد که در صورت مشاهدهٔ هر گونه تخلّف از قبیل موارد فوق، مراتب را یا از طریق تلفن‌های انتشارات نوآور به شماره‌های ۲- ۶۶۴۸۴۱۹۱ ۰۲۱ و ۰۹۱۲۳۰۷۶۷۴۸ و یا از طریق ایمیل انتشارات به آدرس *info@noavarpub.com* و یا از طریق منوی تماس با ما در سایت *www.noavarpub.com* به این انتشارات ابلاغ نمایند، تا از تضییع حقوق ناشر، پدیدآورنده و نیز خود خوانندگان محترم جلوگیری به‌عمل آید، و نیز به‌عنوان تشکّر و قدردانی، از کتب انتشارات نوآور نیز هدیه دریافت نمایند.

فصل اول

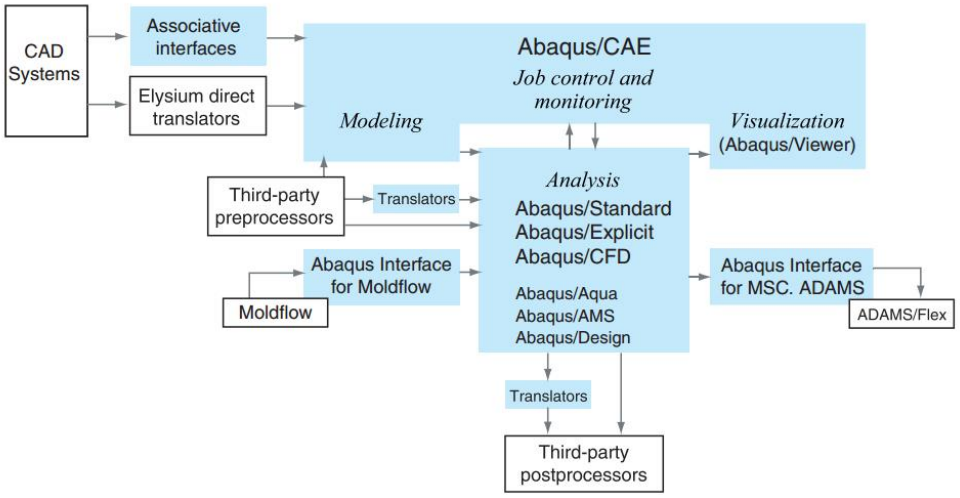
تحلیل المان محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس

مقدمه

نرم‌افزار آباکوس (ABAQUS) مجموعه‌ای از برنامه‌های قدرتمند شبیه‌سازی مهندسی است که بر اساس روش المان محدود، می‌تواند مسائل را از آنالیزهای خطی ساده تا شبیه‌سازی غیرخطی پیچیده حل نماید. این نرم‌افزار شامل کتابخانه وسیعی از المان‌ها است که می‌توانند تقریبا هر نوع هندسه را مدل‌سازی کنند. این نرم‌افزار مدل‌های متنوعی برای مواد دارد که می‌تواند رفتار اکثر مواد شامل فلزات، لاستیک، پلیمر،کامپوزیت، بتن مسلح، فوم‌های ترد و مصالح خاک و سنگ را شبیه‌سازی کند. همچنین می‌تواند مسائل مختلفی همانند انتقال حرارت، انتشار جرم، تحلیل‌های کوپل حرارتی-الکتریکی، تحلیل آکوستیک، تحلیل مکانیک خاک، تحلیل پیزوالکتریک، تحلیل الکترومغناطیسی و دینامیک سیالات را شبیه‌سازی نماید. طیف وسیعی از قابلیت‌ها برای شبیه‌سازی مسائل خطی و غیرخطی را ارائه می‌دهد. در تحلیل مسائل هر قطعه را می‌توان به صورت مجزا مدل‌سازی نمود، مصالح خاص خود را به آن اختصاص داد، تماس و اندرکنش بین این قطعات را تعریف نمود و در نهایت با اعمال شرایط مرزی و بارگذاری دلخواه، آن را تحلیل نمود.

زیرمجموعه‌های آباکوس

آباکوس شامل سه بسته تحلیل اصلی شامل، Abaqus/Satndard، Abaqus/Explicit و Abaqus/CFD می‌باشد. چندین بسته الحاقی دلخواه دیگر نیز برای افزایش کارایی بسته‌های Abaqus/Satndard و Abaqus/Explicit در دسترس می‌باشند. بسته الحاقی Abaqus/Aqua با بسته‌های Abaqus/Satndard و Abaqus/Explicit، بسته‌های الحاقی Abaqus/Design و Abqus/AMS با بسته Abaqus/Satndard و بسته الحاقی Abaqus/Foundation با بسته Abaqus/Satndard کار می‌کنند. همچنین Abaqus/CAE یک محیط کامل از قابلیت‌های ساخت مدل آباکوس، ثبت تحلیل و بازبینی فایل‌های تحلیل و ارزیابی نتایج می‌باشد. محیط Abaqus/Viewer یک زیر مجموعه Abaqus/CAE است که وظیفه پس‌پردازش نتایج را دارد. به علاوه، رابط‌های نرم‌افزاری برای نرم‌افزارهای MSC.ADAMS و Moldflow نیز در دسترس می‌باشند. آباکوس همچنین قابلیت انتقال و تبدیل هندسه از نرم‌افزارهای پیش‌پردازش همانند CAD برای مدل‌سازی در محیط Abaqus/CAE و ایجاد خروجی از آباکوس به محیط‌های پس‌پردازش را نیز دارا می‌باشد. ارتباطات ذکر شده در این قسمت را می‌توان در شکل ۱ مشاهده نمود.



شکل ۱ ارتباط بین بسته‌های اصلی و بسته‌های الحاقی نرم‌افزار آباکوس.

بسته Abaqus/Standard

این بسته نرم‌افزاری، یک بسته با عملکرد کلی است که می‌تواند محدوده وسیعی از مسائل خطی و غیرخطی با پاسخ‌های استاتیکی، دینامیکی، حرارتی، الکتریکی و الکترومغناطیسی را حل نماید. این بسته یک سری معادلات را به صورت نموی در هر گام حل می‌نماید. گاهی عملیات همگرایی پاسخ در این بسته نیاز به دقت در انتخاب عوامل متعددی دارد.

بسته Abaqus/Explicit

این بسته نرم‌افزاری، یک بسته ویژه است که با استفاده از معادلات المان محدود دینامیکی صریح مسائل را حل می‌نماید. از این بسته در مسائلی که اغلب پاسخ گذرای سازه همانند تحلیل‌های ضربه و انفجار و همچنین خصوصیات غیرخطی زیادی مدنظر است، استفاده می‌شود.

بسته Abaqus/CFD

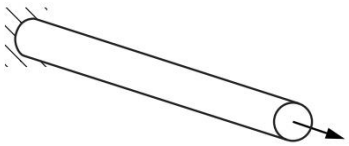
این بسته نرم‌افزاری، یک بسته تحلیل دینامیک سیالاتی محاسباتی می‌باشد. این بسته توانایی حل طیف وسیعی از مسائل سیالات تراکم‌ناپذیر شامل جریان‌های آرام، جریان‌های آشفته و جریان همرفتی حرارتی را دارا می‌باشد. سایر بسته‌های الحاقی موضوع بحث در این کتاب نمی‌باشد.

معرفی مختصر المان محدود

اولین مرحله در هر شبیه‌سازی المان محدود، مجزا سازی هندسه واقعی سازه با استفاده از مجموعه‌ای از المان‌ها می‌باشد. المان‌ها به وسیله گره‌های مشترکی به هم متصل می‌شوند. مجموعه گره‌ها و المان‌ها، شبکه یا مش نامیده می‌شود. تعداد المان‌ها در واحد طول یا مساحت را به عنوان چگالی مش می‌نامند. در تحلیل تنش، جابجایی‌های گره‌ها، متغیرهای اصلی هستند که آباکوس آنها را محاسبه می‌کند. هنگامی که جابجایی‌های گره‌ای مشخص شدند، تنش‌ها و کرنش‌ها در هر المان را می‌توان به آسانی تعیین نمود.

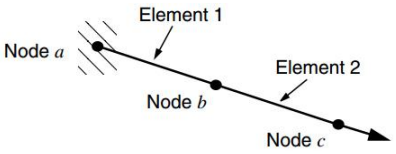
تحلیل استاتیکی

یک مثال ساده از یک عضو خرپایی که یک طرف آن مقید شده و در طرف دیگر بارگذاری شده است را مطابق شکل ۲ در نظر بگیرید.



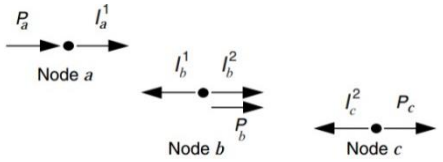
شکل ۲ یک مدل خرپای ساده.

هدف از تحلیل یافتن جابجایی انتهای خرپا، تنش در آن و واکنش تکیه‌گاهی می‌باشد. این میله توسط دو المان خرپایی ساده مجزاسازی می‌شود. المان خرپا تنها قادر به تحمل نیروی محوری می‌باشد. در شکل ۳ مدل مجزا شده مدل نشان داده شده است.



شکل ۳ مدل مجزا شده میله توسط دو المان خرپایی.

دیاگرام آزاد نیرو برای هر گره در شکل ۴ آورده شده است. در گره c نیروی خارجی P اثر کرده و نیروی Ic نیروی حاصل از تنش‌های محوری عضو ۲ می‌باشد. نیروهای I نیروهای داخلی بین گره‌های مدل می‌باشند. برای یک مدل استاتیکی باید برآیند نیروها برابر صفر باشد. یعنی نیروهای خارجی و داخلی باید در تعادل استاتیکی باشند.



شکل ۴ دیاگرام آزاد نیروی در گره‌ها.

با فرض اینکه تغییر طول میله کوچک بوده، کرنش محوری در المان ۱ از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\varepsilon_{11} = \frac{u^b - u^a}{L} \qquad (۱)$$

که در این رابطه، u^a و u^b جابجایی‌های گره‌های a و b و L طول هر المان می‌باشد. با فرض رفتار الاستیک مصالح، تنش در میله از حاصلضرب کرنش در مساحت مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\sigma_{11} = E\varepsilon_{11} \qquad (۲)$$

نیروی محوری اعمال شده در انتهای گره برابر تنش میله در مساحت میله می‌باشد. بنابراین، رابطه بین نیرو داخلی، مشخصات مصالح و جابجایی از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$I_a^1 = \sigma_{11}A = E\varepsilon_{11}A = \frac{EA}{L}\left(u^b - u^a\right) \qquad (۳)$$

تعادل در گره a باید به صورت زیر برقرار باشد.

$$P_a + \frac{EA}{L}\left(u^b - u^a\right) = 0 \qquad (۴)$$

تعادل در گره b باید با توجه به نیروهای داخلی ناشی از تنش‌ها در گره، در نظر گرفته شود. نیروی داخلی اعمال شده از المان ۱ در جهت مخالف و با علامت منفی در نظر گرفته می‌شود. نیروی برآیند از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$P_b - \frac{EA}{L}\left(u^b - u^a\right) + \frac{EA}{L}\left(u^c - u^b\right) = 0 \qquad (۵)$$

برای گره c نیز تعادل به شکل زیر نوشته می‌شود.

$$P_c - \frac{EA}{L}\left(u^c - u^b\right) = 0 \qquad (۶)$$

در روش استاتیکی، معادلات تعادل باید به صورت همزمان حل شوند تا جابجایی‌های همه گره‌ها مشخص شوند. این کار نیازمند عملیات ماتریسی است. بنابراین، باید نیروهای داخلی و خارجی و تعادل آنها به صورت ماتریسی نوشته شود. اگر خصوصیات و ابعاد دو المان مشابه باشد، معادلات تعادل به صورت زیر خلاصه می‌شوند.

$$\begin{Bmatrix} P_a \\ P_b \\ P_c \end{Bmatrix} - \left(\frac{EA}{L}\right)\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} u^a \\ u^b \\ u^c \end{Bmatrix} = 0 \qquad (۷)$$

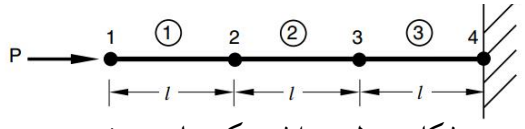
به طور کلی در برخی مواقع عبارت EA/L برای همه المان‌ها برابر نیست، بنابراین، آن را به صورت سختی هر المان به شکل K_1 و K_2 برای دو المان می‌نویسند. تعادل کلی سازه به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\{P\} - \{I\} = 0 \qquad (۸)$$

برای یک سازه دو عضوی همانند شکل بالا، با استفاده از مفهوم سختی، رابطه تعادل کلی به صورت زیر نوشته می‌شود.

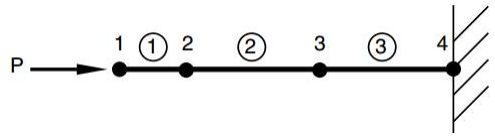
$$\begin{Bmatrix} P_a \\ P_b \\ P_c \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 & 0 \\ -K_1 & (K_1+K_2) & -K_2 \\ 0 & -K_2 & K_2 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} u^a \\ u^b \\ u^c \end{Bmatrix} = 0 \qquad (۹)$$

در روش استاتیکی، همانند روش استفاده شده در Abaqus/Standard برای بدست آوردن متغیرهای نامعلوم u^b ، u^c و P_u باید رابطه ۹ حل شود. به محض اینکه جابجایی‌های مجهول بدست آمدند، می‌توان تنش در هر المان را محاسبه نمود. در روش استاتیکی، دستگاه معادلات باید در انتهای هر گام حل شود. بر خلاف این، در روش صریح یا دینامیکی، همانند Abaqus/Explicit نیاز به محاسبه همزمان دستگاه معادلات برای محاسبه ماتریس سختی کلی ندارد. در عوض، پاسخ از یک گام، به گام دیگر برده می‌شود. کاربرد این روش در مثال دیگر شرح داده خواهد شد. یک خرپای سه عضوی همانند شکل ۵ در نظر بگیرید.



شکل ۵ مدل مجزا شده یک میله سه عضوی.

نیروی اعمالی به انتهای خرپا متغیر با زمان است. وضعیت خرپا با گذر زمان بررسی می‌شود. در نمو زمانی ۱، چون نیروی P به گره ۱ وارد شده، این گره شتاب $\ddot{u}_1$ دارد. گره ۱ چون شتاب دارد پس سرعت $\dot{u}_1$ نیز دارد که باعث نرخ کرنش $\dot{\varepsilon}_{el1}$ در المان ۱ می‌شود. نمو کرنش $\Delta\varepsilon_{el1}$، در المان ۱، از انتگرال‌گیری نرخ کرنش در بازه زمانی نمو ۱ بدست می‌آید. کل کرنش ε_{el1} حاصل جمع کرنش اولیه ε_0 و نمو کرنش $\Delta\varepsilon_{el1}$ بدست می‌آید که در این مساله، کرنش اولیه صفر می‌باشد. به محض اینکه کرنش محاسبه شد، تنش المان، σ_{el1} با استفاده از خصوصیات مصالح بدست می‌آید. برای یک مصالح الاستیک خطی، تنش حاصلضرب کرنش در مدول الاستیسیته عضو است. روند توضیح داده شده در شکل ۶ و روابط زیر نشان داده شده است.



شکل ۶ المان‌ها در انتهای گام زمانی ۱.