

به نام آنکه جان را فکرت آموخت

مدل سازی کاربردی با استفاده از نرم افزار  
**OpenSees**

تالیف

یونس کماچی

(عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد پردیس)



سرشناسه

عنوان و نام پدیدآور

مشخصات نشر

مشخصات ظاهری

شابک

وضعیت فهرست نویسی

موضوع

موضوع

موضوع

موضوع

رده بندی کنگره

رده بندی دیویی

شماره کتابشناسی ملی

: کماچی، یونس، ۱۳۶۱ -

: مدل سازی کاربردی با استفاده از نرم افزار OpenSees / تالیف یونس کماچی.

: تهران: فدک ایساتیس، ۱۳۹۱.

: ۴۲۰ ص: مصور، جدول، نمودار.

: ۱۲۵۰۰۰ ریال : ۵-۰۶۸-۱۶۰-۶۰۰-۹۷۸

: فیبا

: این سیس

: سازه، تجزیه و تحلیل -- برنامه های کامپیوتری

: سازه، تجزیه و تحلیل -- نرم افزار

: زلزله -- مهندسی

: ۱۳۹۱ م۴/ک۸/TA۶۴۷

: ۶۲۴/۱۱-۲۸۵

: ۲۷۴۴۲۱۷

مدل سازی کاربردی با استفاده از نرم افزار

# OpenSees



تالیف	:	یونس کماچی
مدیر تولید	:	رضا کرمی شاهنده
حروفچینی و صفحه آرای	:	واحد تولید انتشارات فدک ایساتیس (فاطمه نوروزی)
ویراستار ادبی	:	نجمه وقف خرابات
طراح جلد	:	محمد کرمی شاهنده - زهرا صدرالدینی فرشید
نوبت چاپ	:	اول - ۱۳۹۱
تیراژ	:	۱۰۰۰
چاپ و صحافی	:	گنج شایگان
قیمت به همراه CD	:	۱۲۵۰۰۰ ریال
شابک	:	۹۷۸-۶۰۰-۱۶۰-۰۶۸-۵

دفتر انتشارات : تهران- خیابان انقلاب - خیابان اردیبهشت - بین بلفی نژاد و جمهوری - ساختمان ۱۰

تلفن: ۶۶۴۶۵۸۳۱ - ۶۶۴۸۱۰۹۶ - ۶۶۴۸۲۲۲۱

نمایندگی تهران : خیابان انقلاب- نیش ۱۲ فروردین- پلاک ۱۳۱۲- انتشارات صانعی

تلفن: ۶۶۴۰۹۹۲۴ - ۶۶۴۰۵۳۸۵

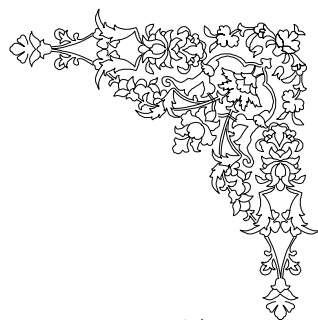
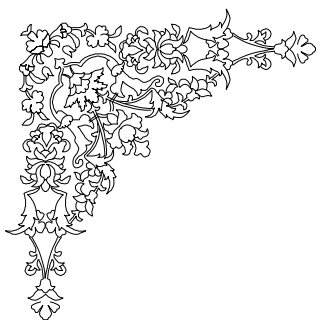
فروشگاه یزد: میدان آزادی (باغ ملی)- ابتدای خیابان فرخی - جنب مجتمع ستاره

تلفن: ۶۲۲۷۴۷۵ - ۶۲۲۶۷۷۱ - ۶۲۲۶۷۷۲

ایمیل و وبسایت: [www.fadakbook.ir](http://www.fadakbook.ir) - [info@fadakbook.ir](mailto:info@fadakbook.ir)

کلیه حقوق و حق چاپ متن و عنوان کتاب که به ثبت رسیده است؛ مطابق با قانون حقوق مولفان و مصنفان مصوب ۱۳۴۸ محفوظ و متعلق به انتشارات فدک ایساتیس می باشد. هرگونه برداشت، تکثیر، کپی برداری به هر شکل (چاپ، فتوکپی، انتشار الکترونیکی) بدون اجازه کتبی از انتشارات فدک ایساتیس ممنوع بوده و متخلفین تحت پیگرد قانونی قرار خواهند گرفت.

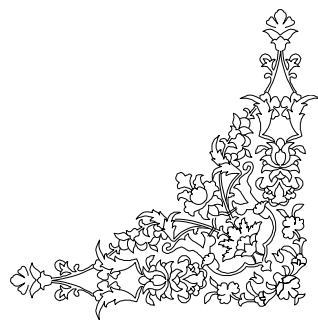
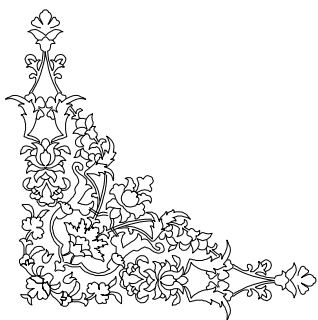
معاونت حقوقی  
انتشارات فدک ایساتیس



تقدیم به:

بمهرم

که این کتاب، همچون بقیه زندگی مرهون شکیبایی اوست.





## مقدمه

در دنیای پرهیاهوی امروزه، هر روز و هر روز شاهد مطالعه و پژوهش در زمینه‌های مختلف می‌باشیم. برای امر پژوهش علاوه بر پایه علمی و همت بالا، نیاز به یک سری ابزارها می‌باشد. یکی از این ابزارها که به خصوص در میان جامعه مهندسی بسیار کاربرد دارد، یک نرم‌افزار مناسب برای بررسی مدل‌های مختلف برای اثبات صحت فرضیات می‌باشد.

امروزه نرم‌افزارها و کدهای بسیاری برای امر پژوهش وجود دارد. یکی از این نرم‌افزارها که امروزه کاربرد بسیار یافته است و به وفور در تحقیقات علمی از آن استفاده می‌شود، نرم‌افزار OpenSees می‌باشد. این برنامه شامل مجموعه‌ای از مواد، مقاطع، المان‌ها و ابزارهای قدرتمند آنالیز برای شبیه‌سازی عددی سیستم‌های غیرخطی است. با استفاده از این برنامه می‌توان انواع مدل‌های خطی و غیرخطی، ژئوتکنیکی و غیره را ساخت. این برنامه قابلیت انجام انواع مختلف آنالیز از جمله استاتیکی پوش‌آور، استاتیکی دوره‌ای، دینامیکی تاریخچه‌-زمانی خطی و غیرخطی و غیره را داراست. از قابلیت‌های متمایز برنامه می‌توان به مواردی مانند قابلیت تحریک چندنقطه‌ای سازه، مقاطع فیبر، قابلیت مدل‌سازی دقیق اندرکنش خاک-شمع-سازه، آرشیو کامل مواد، قابلیت انجام انواع آنالیز به صورت متوالی و ذخیره خروجی‌های هر آنالیز در فایل‌های مجزا، قابلیت نوشتن کد مجزا (مانند عبارت شرطی و غیره) در داخل کد مدل و غیره اشاره کرد. مواردی از مزایای برنامه به شرح ذیل می‌باشد:

- رایگان بودن و عدم مشکلات حقوقی احتمالی در چاپ مقالات
- دقت بسیار بالای نتایج، زمان بسیار کم آنالیز و قابلیت تغییر زمان آنالیز و دقت نتایج
- دسترسی آسان و قابلیت نصب و اجرای ساده
- پژوهش-محور بودن برنامه در مقایسه با قابلیت‌های تجاری بالای آن، به طوری که بسیاری از تحقیقات با استفاده از این برنامه انجام شده و بسیاری از مقالات معتبر در این مورد به چاپ رسیده است.
- حجم بسیار کم مدل و نتایج حاصل از آنالیز که باعث سهولت انتقال فایل‌ها (به فرض از طریق ایمیل)، راحتی مدیریت نتایج و مزایای دیگر می‌شود.
- به‌روز بودن برنامه و توسعه آن برای مقاصد جدید
- دسترسی آسان به منابع پاسخگویی سوالات پیرامون برنامه، چه در داخل و چه در خارج کشور
- قوی‌ترین برنامه مدل‌سازی ماکرو
- قابلیت روزآمد کردن برای اهداف خاص
- سادگی کدنویسی در مقایسه با سایر برنامه‌های کدنویسی

- سرعت پردازش بالا و اشغال حجم کمی از حافظه موقت کامپیوتر
- پشتیبانی از نرم‌افزار در سایت تحت نظر اساتید و برنامه‌نویسان و سایر کاربران و پاسخ‌گویی به موارد مطرح شده از طرف کاربران
- قابلیت‌های بسیار بالای مدل‌سازی، به طوری که طیف وسیعی از رفتارهای سازه‌ای و غیره را می‌توان با استفاده از این برنامه مدل کرد.

بدون شک برای کارهای تحقیقاتی و پژوهشی مختلف در زمینه مهندسی عمران و حتی رشته‌های مهندسی دیگر می‌توان از قابلیت‌های بالای این برنامه استفاده کرد. این برنامه با استفاده از مجموعه کامل و در حال توسعه مواد و مقاطع و المان‌های موجود، قادر است انواع شبیه‌سازی‌های ماکرو و میکرو را انجام دهد.

یکی از قابلیت‌های مناسب برنامه، که در برنامه‌های دیگر کمتر دیده می‌شود، قابلیت انواع آنالیزهای متنوع در بازه‌های زمانی مختلف است. با استفاده از قابلیت‌های نوشتاری برنامه می‌توان هرگونه آنالیز را انجام داد. به فرض با استفاده از برنامه می‌توان یک نیروی خاص را به یک سازه اعمال نموده، سپس با حذف نیروی مورد نظر، ارتعاش آزاد سازه را مورد بررسی قرار داد. به عنوان مثالی دیگر می‌توان مواردی مانند اعمال نیروی پیش‌کشیدگی و غیره را به سادگی انجام داد. با استفاده از قابلیت حذف در برنامه، می‌توان ماده، المان، بار، و یا موارد دیگر را از مدل حذف نمود. به طور مثال در بحث کوبیدن شمع‌های سپری، که بعد از کوبیدن شمع یک طرف دیوار خاک‌برداری می‌شود، می‌توان با استفاده از قابلیت‌های برنامه، المان‌های خاک یک طرف دیوار را حذف نموده و روند آنالیز را در پیش گرفت.

به دلیل خاصیت متنی بودن ورودی سازه و قابلیت نوشتن انواع کد و عبارات شرطی و حلقه و غیره می‌توان موارد متنوعی را انجام داد. به طور مثال می‌توان یک متن ورودی نوشت که در زمان‌های مختلف پیروی سازه را ارائه کند و به عبارت دیگر، تاریخچه پیروی سازه را به دست آورد. این مورد می‌تواند برای مطالعات شاخص خرابی کاربرد داشته باشد.

یکی از قابلیت‌های بسیار خوب برنامه قابلیت لینک شدن آن با برنامه MATLAB است. با استفاده از این قابلیت می‌توان آنالیزهای پارامتری و تکراری مانند آنالیزهای تاریخچه پاسخ غیرخطی (برای رسم منحنی IDA) را به سادگی هرچه تمام‌تر انجام داد. با استفاده از این قابلیت، در برنامه MATLAB متنی را می‌توان نوشت که ورودی‌های مورد نیاز OpenSees را به آن بدهد، خروجی‌های آنالیز را از آن بگیرد و با استفاده از قابلیت‌های ریاضی، موارد مورد نظر را لحاظ کند. در یکی از مثال‌های کتاب به این مورد پرداخته شده است.

کتاب حاضر در ابتدا به بیان کلیات برنامه و مشخصات و محاسن آن می‌پردازد. در ادامه دستورات مربوط به مدل‌سازی بدنه مساله بیان می‌شود. موارد مربوط به بارگذاری مدل و ثبت خروجی‌های مورد نظر و معرفی پارامترهای آنالیز، موارد دیگری است که در ادامه معرفی می‌شود. نهایتاً در سه فصل جداگانه به تشریح مثال‌های متعدد پرداخته می‌شود. با استفاده از این مثال‌ها، روند به‌کارگیری

دستورات بهتر مشخص می‌شود. مثال‌های کتاب شامل مثال‌های مربوط به سازه‌های ساختمانی، سازه‌های غیرساختمانی و ژئوتکنیکی می‌شود. در کتاب حاضر سعی شده است از فرمت‌های مشخصی استفاده شود تا مطالعه آن ساده‌تر شود. به عنوان مثال فرمت اصلی دستورات ورودی در داخل کادر با سایه قرار گرفته است. برای راحتی بیشتر، مجموعه آموزشی حاضر، علاوه بر کتاب آموزشی، شامل یک عدد CD حاوی برنامه OpenSees و برنامه‌های مرتبط دیگر و همین‌طور مثال‌های عنوان شده در کتاب نیز می‌باشد. هر یک از مثال‌های کتاب شامل یک یا چندین متن ورودی است که در پوشه مخصوص به آن مثال در داخل CD ارائه شده است. استفاده‌کننده از کتاب به سادگی می‌تواند پس از مراجعه به کتاب و مطالعه توضیحات مربوط به هر یک از مثال‌ها به پوشه مربوط به آن مثال مراجعه نموده و به متن مثال دسترسی داشته باشد و آن را مطالعه نموده، اجرا کند و یا برای مدل‌های دیگر به کار گیرد. استاد ارجمند، آقای دکتر محمدرضا تابش‌پور (عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی شریف) در تهیه کتاب و در ترجمه لغات، راهنمایی‌های ارزشمندی را ارائه کرده‌اند، از ایشان کمال تشکر را دارم. در نهایت آرزو دارم، که خواننده محترم کتاب بهره کامل را از آن برده و به نحو مناسبی بتواند از آن استفاده کند. پیشاپیش از کاستی‌های احتمالی کتاب پوزش خواسته و پذیرای پیشنهادات و انتقادات خوانندگان محترم کتاب، هستیم.

یونس کماچی

فروردین ۹۱





# فهرست مطالب

## فصل ۱ مقدمه و کلیات ۱

مقدمه ۲	۱.۱
<b>OpenSees</b> چیست؟ ۳	۲.۱
محاسن برنامه ۶	۳.۱
دانلود <b>OpenSees</b> ۷	۴.۱
اجرای <b>OpenSees</b> ۷	۵.۱
روش نوشتن ۷	۶.۱
مفسر <b>OpenSees</b> ۸	۷.۱
تعریف واحدها و ثابت‌ها ۸	۸.۱
تولید دستورات Matlab ۹	۹.۱
تعریف روند <b>Tcl</b> ۹	۱۰.۱
خواندن فایل‌های خارجی ۹	۱۱.۱

## فصل ۲ آشنایی با برنامه **Tcl** ۱۱

مقدمه ۱۲	۱.۲
قواعد نوشتن ۱۳	۲.۲
علامت‌های مورد استفاده برای نوشتن ۱۳	۳.۲
دستورات <b>Tcl</b> ۱۴	۴.۲
اپراتورها ۲۰	۵.۲
توابع ریاضی ۲۱	۶.۲
برنامه <b>Tcleditor</b> ۲۲	۷.۲

## فصل ۳ دستورات مدل‌سازی ۲۵

مقدمه ۲۶	۱.۳
روند مدل‌سازی ۲۶	۲.۳
مفسر OpenSees ۲۷	۳.۳
روش نوشتن ۲۸	۴.۳
دستور ساخت مدل ۳۰	۵.۳
دستور ساخت ۳۰	۶.۳
دستور گره ۳۰	۷.۳
دستور جرم ۳۱	۸.۳
گزینه قیدها (constraints) ۳۱	۹.۳
دستور ماده یک-بعدی ۳۴	۱۰.۳
مواد چندبعدی ۸۷	۱۱.۳
دستور انتقال هندسی ۹۵	۱۲.۳
دستور مقطع ۹۹	۱۳.۳
دستور المان ۱۰۹	۱۴.۳
دستور block ۱۴۵	۱۵.۳
دستور block3D ۱۴۸	۱۶.۳
دستورات مختلف ۱۴۹	۱۷.۳
دستور save ۱۵۶	۱۸.۳
دستور Restore ۱۵۶	۱۹.۳
دستور مدل اصطکاکی (FrictionModel Command) ۱۵۶	۲۰.۳

## فصل ۴ بارگذاری و خروجی ۱۵۹

مقدمه ۱۶۰	۱.۴
سری‌های زمانی (Time Series) ۱۶۰	۲.۴
دستور بارگذاری (pattern Command) ۱۶۴	۳.۴
دستورات خروجی برنامه ۱۶۹	۴.۴

## فصل ۵ دستورات آنالیز ۱۷۹

مقدمه ۱۸۰	۱.۵
-----------	-----

گزینه‌های آنالیز ۱۸۰	۲.۵
فیدها ۱۸۱	۳.۵
شمارنده (Numberer) ۱۸۳	۴.۵
سیستم (System) ۱۸۴	۵.۵
تست (test) ۱۸۹	۶.۵
الگوریتم (Algorithm) ۱۹۵	۷.۵
تجمیع‌کننده (Integrator) ۲۰۲	۸.۵
آنالیز ۲۱۴	۹.۵
آنالیز ۲۱۵	۱۰.۵
دستور eigen ۲۱۵	۱۱.۵
دستور ریلی (rayleigh) ۲۱۶	۱۲.۵
تعیین پربندهای ارتعاش سازه ۲۱۶	۱۳.۵
یافتن شکل‌های مودی یک سازه ۲۱۷	۱۴.۵
پارامترهای آنالیز برای روش‌های مختلف آنالیز سازه ۲۱۷	۱۵.۵

## فصل ۶ مثال‌های ساختمانی ۲۲۳

مقدمه ۲۲۴	۱.۶
قاب پرتال ۲۲۶	۲.۶
ستون طره‌ای الاستیک دوبعدی ۲۳۶	۳.۶
قاب پرتال الاستیک ۲۳۶	۴.۶
ستون طره‌ای با متغیرها ۲۳۷	۵.۶
آنالیز مقادیر ویژه یک قاب دوطبقه یک دهانه ۲۳۸	۶.۶
آنالیز استاتیکی ۲۴۱	۷.۶
ستون طره‌ای یک درجه آزادی ۲۴۲	۸.۶
ستون طره‌ای غیرخطی: مقطع غیرالاستیک یک‌بعدی ۲۵۰	۹.۶
قاب پرتال غیرخطی ۲۵۱	۱۰.۶
قاب پرتال غیرخطی ۲۵۲	۱۱.۶
ستون طره‌ای با واحدها ۲۵۳	۱۲.۶
آنالیز پوش-آور قاب بتنی دوبعدی ۲۵۳	۱۳.۶
قاب دو بعدی عمومی، سه طبقه، سه دهانه، مقطع بتن مسلح و مقطع فولادی W ۲۵۴	۱۴.۶
قاب دو بعدی عمومی، N طبقه، N دهانه، مقطع بتن مسلح و مقطع فولادی W ۲۵۵	۱۵.۶
قاب سه‌بعدی، سه طبقه، سه دهانه در جهت X، سه دهانه در جهت Z، مقطع بتن مسلح و مقطع فولادی W ۲۵۶	۱۶.۶
قاب سه‌بعدی فولادی با مقطع W به‌صورت فیبری ۲۵۷	۱۷.۶
قاب سه‌بعدی ساده ۲۶۱	۱۸.۶

قاب سه‌بعدی عمومی N طبقه، N دهانه در جهت X، N دهانه در جهت Z، مقطع بتن مسلح و مقطع فولادی W ۲۶۱	۱۹.۶
آنالیز پوش-آور یک قاب دوجبه‌ای ۲۶۲	۲۰.۶
آنالیز پوش-آور قاب خمشی دوطبقه با پلاستیسیته متمرکز و گسترده ۲۶۲	۲۱.۶
قاب دوطبقه با پلاستیسیته گسترده ۲۷۲	۲۲.۶
قاب خمشی دو طبقه با پلاستیسیته متمرکز، چشمه اتصال (PANEL ZONES) و RBS ۲۷۶	۲۳.۶
قاب بتنی دوجبه‌ای تحت تحریک زلزله پایه ۲۸۳	۲۴.۶
قاب بتنی سه‌بعدی تحت تحریک زلزله پایه ۲۸۴	۲۵.۶

## فصل ۷ مثال‌های غیر ساختمانی ۲۸۷

مقدمه ۲۸۸	۱.۷
خرپای دوجبه‌ای ۲۸۸	۲.۷
آنالیز خرپا ۲۹۱	۳.۷
ساخت و آنالیز مقطع ۲۹۱	۴.۷
آنالیز چرخه‌ای یک عضو فشاری (مدل‌سازی رفتار پس‌کمانشی و پس‌جاری‌شدگی) ۲۹۱	۵.۷
آنالیز پوش-آور یک قاب با اتصال K ۲۹۳	۶.۷
آنالیز لنگر-انحنای یک مقطع یک‌بعدی بتنی دوجبه‌ای فیبری ۲۹۴	۷.۷
مدل تیر با استفاده از المان‌های BLOCK2D ۲۹۵	۸.۷
آنالیز دینامیکی پوسته ۲۹۶	۹.۷
ماده الاستوپلاستیک گپ ۲۹۷	۱۰.۷
ماده نفوذ کرنش ۲۹۸	۱۱.۷
ماده ISOLATOR2SPRING ۲۹۸	۱۲.۷
ماده خستگی ۲۹۸	۱۳.۷
مدل ماده PINCHING4 ۲۹۸	۱۴.۷
ماده با حالت حدی ۳۰۲	۱۵.۷
تیر دو سر مفصل مدل شده با دو المان ابعادی صلب ۳۰۳	۱۶.۷
مدل طره سه‌بعدی با استفاده از المان BLOCK3D ۳۰۷	۱۷.۷
مدل‌سازی میراگر اصطکاکی ۳۰۸	۱۸.۷
المان تماسی با طول صفر NTS2D ۳۱۳	۱۹.۷
آنالیز پوش-آور اتصال با نفوذ کرنش ۳۱۳	۲۰.۷
دیوار پرکننده و حذف دیوار ۳۱۴	۲۱.۷
مدل المان اتصال تیر-ستون ۳۲۰	۲۲.۷
حلقه ۳۲۳	۲۳.۷
میراگر ویسکوز ۳۲۳	۲۴.۷
مدل یک سکوی دریایی با در نظر گرفتن اندرکنش شمع-خاک-سازه و اندرکنش با سیال ۳۲۳	۲۵.۷

مدل یک سکوی دریایی با در نظر گرفتن اندرکنش شمع-خاک-سازه و اندرکنش با سیال و مجهاز به میراگر اصطکاکی ۳۲۶	۲۶.۷
پل ۳۲۶	۲۷.۷
رسم منحنی IDA برای یک سازه ۳۲۸	۲۸.۷

## فصل ۸ مثال‌های ژئوتکنیکی ۳۲۹

مقدمه ۳۳۰	۱.۸
مدل دوبعدی خاک رس ۳۳۰	۲.۸
مدل سه‌بعدی خاک رس ۳۳۰	۳.۸
اندرکنش شمع با خاک ۳۳۱	۴.۸
فونداسیون شمعی با بار جانبی ۳۳۱	۵.۸
مدل سازی آزمایش سنترفیوژ ۳۳۶	۶.۸
تحکیم یک بعدی ۳۴۴	۷.۸
آنالیز پاسخ تنش مؤثر سایت یک ستون از لایه‌های خاک ۳۴۸	۸.۸
آنالیز پاسخ تنش کل سایت یک ستون از لایه‌های خاک ۳۵۵	۹.۸
آنالیز تنش مؤثر دینامیکی یک شیب ۳۵۸	۱۰.۸
انواع مسئله GiD برای تولید فایل ورودی آنالیز شیب دوبعدی ۳۶۶	۱۱.۸
خاک‌برداری نگه داشته شده به وسیله دیوار سپری طره‌ای ۳۶۷	۱۲.۸
ستون خاک دوبعدی تحت تحریک زلزله پایه ۳۷۶	۱۳.۸
بلوک سه‌بعدی خاک تحت پوشش-آور استاتیکی ۳۷۹	۱۴.۸

## فصل ۹ روندها، نکات و صحت سنجی ۳۸۱

مقدمه ۳۸۲	۱.۹
روندها ۳۸۲	۲.۹
نکات مفید ۳۸۹	۳.۹
چند مثال از صحت‌سنجی برنامه OpenSees ۳۹۲	۴.۹

## واژه‌نامه ۴۰۱

## فهرست الفبایی ۴۰۴





# فصل ۱



## مقدمه و کلیات