

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



## Market Code

### تحليل اجزا محدود سازه‌های دوبعدی

نسخه: ۱.۰

	مجید احمدی تهرانی: دکترا، دانشجوگرایش سازه‌های هوایی، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف	
	محمد رحمانیان: دکترا، دانشجوگرایش سازه‌های هوایی، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف	توسعه دهنده (گان):
	روح اله دهقانی فیروزآبادی: دکترا، هیئت علمی دانشکده مهندسی هوافضا دانشگاه صنعتی شریف	
	محمد رحمانیان	تهیه کننده مستند:
	۱۳۹۳/۰۳ / ۲۲	تاریخ تنظیم سند:

## فهرست مطالب

۵	<b>فصل ۱: راهنمای کاربری</b>
۵	۱-۱. معرفی کد مهندسی .....
۵	۱-۱-۱. ورودی‌های کد .....
۶	۲-۱. الزامات اجرای برنامه .....
۷	۳-۱. خروجی برنامه .....
۷	۴-۱. معرفی قسمت‌های مختلف برنامه .....
۸	۱-۴-۱. بخش Mesh.cpp .....
۱۱	۲-۴-۱. بخش Element Type.cpp .....
۱۳	۳-۴-۱. بخش MathTools.cpp .....
۱۶	۴-۴-۱. بخش Kernel.cpp .....
۲۷	۵-۴-۱. بخش Main.cpp .....
۲۸	<b>فصل ۲: مستند آموزشی</b>
۲۸	۱-۲. مقدمه .....
۲۹	۲-۲. معادلات و روابط حاکم .....
۲۹	۱-۲-۲. معادلات تعادل خارجی .....
۳۰	۲-۲-۲. معادلات تعادل داخلی .....
۳۱	۳-۲-۲. روابط ساختاری (تنش- کرنش) .....
۳۵	۴-۲-۲. روابط کرنش جابجایی .....
۳۶	۵-۲-۲. شرایط مرزی .....
۳۶	۶-۲-۲. معادلات سازگاری .....
۳۸	۳-۲. آشنایی با مواد هدفمند .....
۳۹	۱-۳-۲. ویژگی‌های مؤثر و حائز اهمیت مواد FG .....
۳۹	۲-۳-۲. مدل‌سازی خواص ماده FG .....
۴۲	۴-۲. تحلیل المان محدود سازه‌های دو بعدی .....
۴۳	۱-۴-۲. المان‌های پر کاربرد در تحلیل دو بعدی سازه‌ها .....
۵۱	۵-۲. تحلیل دینامیکی .....
۵۳	۱-۵-۲. ماتریس‌های جرم Lumped و Consistent .....
۵۴	۲-۵-۲. روش حل نیومارک .....
۵۵	۶-۲. ارتعاشات آزاد (تحلیل مودال) .....
۵۵	۱-۶-۲. سیستم‌های یک درجه آزادی .....

۵۶	.....سیستم‌های چند درجه آزادی.....۲-۶-۲
۵۷	.....میرایی.....۳-۶-۲
۵۹	.....تحلیل کمانش.....۷-۲
۶۰	.....کمانش خطی.....۱-۷-۲
۶۱	.....کمانش غیر خطی.....۲-۷-۲
۶۲	.....پاسخ فرکانسی.....۸-۲
۶۳	.....پاسخ فرکانسی مختلط.....۱-۸-۲

### فصل ۳: اعتبارسنجی

۶۴	.....مثال اول: تحلیل مودال.....۱-۳
۶۶	.....مثال دوم: تحلیل مودال.....۲-۳
۶۹	.....مثال سوم: تحلیل استاتیکی.....۳-۳

۷۱

مراجع

## چکیده

هدف از کد مهندسی حاضر تحلیل اجزا محدود سازه‌های دوبعدی است. بدین منظور، تحلیل‌های استاتیکی، دینامیکی، مودال، پاسخ فرکانسی و کمانش برای مواد همگن، ارتوتروپیک و هدفمند مورد بررسی قرار گرفته است. در تحلیل سازه‌های دوبعدی از المان‌های دو بعدی با دو درجه آزادی در هر نود استفاده شده است. به منظور استفاده از کد مهندسی حاضر، بایستی فایل ورودی شامل موقعیت نودها، شماره و ارتباط المان‌ها با یکدیگر به کد داده شود تا نتایج مورد نظر در هر بخش به دست آیند. در گزارش حاضر جزئیات کامل از روال توسعه، ارزیابی و به کارگیری کد بیان شده است.

**کلمات کلیدی:** روش اجزا محدود، تنش صفحه‌ای، کرنش صفحه‌ای، تحلیل مودال، تحلیل دینامیکی، تحلیل پاسخ فرکانسی

# فصل ۱: راهنمای کاربری

## ۱-۱. معرفی کد مهندسی

### ۱-۱-۱. ورودی‌های کد

در آغاز و قبل از شروع تحلیل، بایستی صورت مسئله به صورت فایل ورودی در فرمت مشخص آماده شود. بدین منظور در هر یک از مدل‌های دوبعدی، کافی است فایلی با پسوند \*.txt\* و حاوی مشخصات نودها و Element Connectivity فراهم شود. بدین منظور در سطرهای اول و دوم از فایل مذکور، تعداد نودها و تعداد المان‌ها نوشته می‌شود. در ادامه مختصات  $X, Y, Z$  هر نود در یک سطر درج خواهد شد. بالاخره مشخصه Element Connectivity در بخش پایانی فایل ورودی و به صورت سطر به سطر درج می‌شود.

1	3	25	24	45		
3	4	28	25	32	0.0000000000	0.0000000000
4	5	31	28		2.0000000000	0.0000000000
5	6	34	31		.2500000000	0.0000000000
6	7	37	34		.5000000000	0.0000000000
7	8	40	37		.7500000000	0.0000000000
8	9	43	40		1.0000000000	0.0000000000
9	2	11	43		1.2500000000	0.0000000000
24	25	26	23		1.5000000000	0.0000000000
25	28	29	26		1.7500000000	0.0000000000
28	31	32	29		2.0000000000	1.0000000000
31	34	35	32		2.0000000000	0.2500000000
34	37	38	35		2.0000000000	0.5000000000
37	40	41	38		2.0000000000	0.7500000000
40	43	44	41		0.0000000000	1.0000000000
43	11	12	44		1.7500000000	1.0000000000
23	26	27	22		1.5000000000	1.0000000000
26	29	30	27		1.2500000000	1.0000000000
29	32	33	30		1.0000000000	1.0000000000
32	35	36	33		.7500000000	1.0000000000
35	38	39	36		.5000000000	1.0000000000
38	41	42	39		.2500000000	1.0000000000
41	44	45	42		0.0000000000	0.7500000000
44	12	13	45		0.0000000000	0.5000000000
					0.0000000000	0.2500000000
					.2500000000	0.2500000000

Element Connectivity – ب

الف – مختصات هر نود به همراه تعداد نود و المان

نمونه‌ای از فرمت فایل ورودی در یک مسئله دوبعدی

## ۲-۱. الزامات اجرای برنامه

پس از آماده‌سازی فایل‌های ورودی، برنامه قابل اجرا خواهد بود. باید دقت داشت که برنامه حاضر به زبان C نوشته شده و در آن به منظور انجام عملیات ریاضی از کتابخانه متن‌باز EIGEN استفاده شده است. لذا برای اجرای برنامه می‌بایست کتابخانه مذکور در نرم‌افزار Microsoft Visual Studio افزوده شده و سپس اقدام به اجرای برنامه نمود. منبع کتابخانه موردنظر از آدرس ذیل قابل دانلود و استفاده است.

[http://eigen.tuxfamily.org/index.php?title=Main\\_Page](http://eigen.tuxfamily.org/index.php?title=Main_Page)

### ۳-۱. خروجی برنامه

برنامه حاضر در هر یک از بخش‌های خود، خروجی‌ها مناسب را در فرمت مشخص و در متغیرهای معلوم ذخیره نموده و نتیجه را در قالب فایل‌های گرافیکی Techplot ارائه می‌نماید. به‌عنوان مثال در تحلیل استاتیکی، مقادیر تنش، جابجایی و نیرو به‌عنوان خروجی محسوب می‌شوند. در تحلیل مودال شکل مودها و فرکانس طبیعی سازه در خروجی نمایش داده شده و بالاخره در تحلیل دینامیکی و فرکانسی به ترتیب پاسخ زمانی و Receptance به‌عنوان خروجی نمایش داده خواهند شد.

### ۴-۱. معرفی قسمت‌های مختلف برنامه

برنامه حاضر دارای ۵ بخش عمده است که در هر بخش، عملیات خاصی انجام می‌شود. قسمت‌های پنج‌گانه عبارت‌اند از:

۱- Mesh.cpp

۲- ElementType.cpp

۳- MathTools.cpp

۴- Kernel.cpp

۵- Main.cpp

در ادامه به تشریح هر یک از بخش‌های مذکور پرداخته شده است.

## ۱-۴-۱. بخش Mesh.cpp

در این بخش از برنامه، فایل ورودی مشخصات نودها و المان‌ها که توسط نرم‌افزار Ansys تولید شده، فراخوانی خواهند شد. پس از فراخوانی متغیرهای موردنیاز و انجام محاسبات، نتایج در فرمت استاندارد ذخیره خواهند شد. در ادامه به تشریح توابع و متغیرهای مورد استفاده در این بخش پرداخته شده است.

### ۱-۴-۱-۱. تابع LoadFromANSYS

<b>هدف</b>	بارگذاری اطلاعات شبکه همچون تعداد نود، تعداد المان، مختصات هر نود، شماره و تعداد المان‌های متصل به هر نود، شماره نودهای متصل به هر المان
<b>ورودی</b>	Filename: متغیری رشته‌ای حاوی نام و آدرس فایل ورودی موردنظر. از نوع Void و شامل:
<b>خروجی</b>	Nodes: آرایه نودهای موجود در شبکه (Data Type Struct) nNodes: متغیری صحیح از تعداد نودهای موجود در شبکه Elements: آرایه المان‌های موجود در شبکه (Data Type Struct) nElems: متغیری صحیح از تعداد المان‌های موجود در شبکه

### ۱-۴-۱-۲. تابع ExportMesh

<b>هدف</b>	ذخیره اطلاعات (مختصات نودها، شماره نودها و المان‌ها) مسئله موردبررسی به همراه نتایج به دست آمده از تحلیل (تنش، کرنش، نیرو، جابجایی در هر نود و المان مشخص) در فرمت استاندارد نرم‌افزار Techplot.
<b>ورودی</b>	Filename: متغیری رشته‌ای حاوی نام و آدرس فایل ورودی موردنظر Nodes: آرایه نودهای موجود در شبکه (Data Type Struct) nNodes: متغیری صحیح از تعداد نودهای موجود در شبکه Elements: آرایه المان‌های موجود در شبکه (Data Type Struct) nElems: متغیری صحیح از تعداد المان‌های موجود در شبکه
<b>خروجی</b>	از نوع Void و شامل فایلی با فرمت استاندارد و حاوی اطلاعات کامل از ورودی و خروجی‌های تحلیل.



### ۳-۱-۴-۱. تابع ExportMesh\_ModalResult

**هدف** ذخیره اطلاعات (مختصات نودها، شماره نودها و المان‌ها) مسئله موردبررسی به همراه نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل مودال (شکل مود و فرکانس طبیعی) در فرمت استاندارد نرم‌افزار Techplot.

**ورودی** Filename: متغیری رشته‌ای حاوی نام و آدرس فایل ورودی موردنظر  
Nodes: آرایه نودهای موجود در شبکه (Data Type Struct)  
nNodes: متغیری صحیح از تعداد نودهای موجود در شبکه  
Elements: آرایه المان‌های موجود در شبکه (Data Type Struct)  
nElems: متغیری صحیح از تعداد المان‌های موجود در شبکه  
Modes: عددی صحیح حاوی تعداد شکل مودها جهت ذخیره‌سازی در فایل  
VectorXcd & lambda: آرایه‌ای از نوع VectorXcd فرکانس‌های طبیعی (مقادیر ویژه)  
MatrixXcd & x: آرایه‌ای از نوع MatrixXcd حاوی شکل مودها (بردارهای ویژه)  
**خروجی** از نوع Void و شامل فایلی با فرمت استاندارد، حاوی اطلاعات کامل از ورودی و خروجی‌های تحلیل مودال.

## ۴-۱-۴-۱. تابع ExportMesh\_DynamicResponse

**هدف** ذخیره اطلاعات (مختصات نودها، شماره نودها و المان‌ها) مسئله موردبررسی به همراه نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل دینامیکی (پاسخ زمانی) در فرمت استاندارد نرم‌افزار Techplot.

**ورودی** Filename: متغیری رشته‌ای حاوی نام و آدرس فایل ورودی موردنظر  
Nodes: آرایه نودهای موجود در شبکه (Data Type Struct)  
nNodes: متغیری صحیح از تعداد نودهای موجود در شبکه  
Elements: آرایه المان‌های موجود در شبکه (Data Type Struct)  
nElems: متغیری صحیح از تعداد المان‌های موجود در شبکه  
dt: متغیری اعشاری که معرف گام زمانی در تحلیل دینامیکی است.  
Export: متغیری صحیح که معرف تعداد گام زمانی جهت ذخیره‌سازی داده است.  
MatrixXd X: ماتریسی از نوع MatrixXd و حاوی موقعیت نودهای سازه در هر زمان. هر ستون از این ماتریس معرف یک گام زمانی است و موقعیت همه نودها در آن ثبت شده است.

**خروجی** از نوع Void و شامل فایلی با فرمت استاندارد و حاوی اطلاعات کامل از ورودی و خروجی‌های تحلیل دینامیکی.