دانشکده مهندسی مکانیک

گروه طراحی جامدات

پایان‌نامه

برای دریافت درجهٔ کارشناسی ارشد در رشتهٔ مهندسی مکانیک (طراحی کاربردی)

عنوان

تحلیل المان محدود مخازن تحت فشار در ناحیه الاستیک پلاستیک با استفاده از الگوریتم بازگشت شعاعی

استاد راهنما

دکتر تاج بخش نوید چاخرلو

استاد مشاور

دکتر محمدرضا خوشروان

پژوهشگر

امین یعقوبی

مهر 1388

تقدیم به پدر و مادرم

با سپاس فراوان از زحمات بی‌دریغ جناب آقای دکتر تاج بخش نوید چاخرلو که نقش عمده‌ای در پیشبرد این پایان‌نامه داشته‌اند و اینجانب را در طول دوره تحصیلی و انجام پایان‌نامه یاری نموده‌اند.

و تشکر از همکاری صمیمانه استاد مشاور ارجمند، آقای دکتر محمد رضا خوشروان که از توانمندی‌های علمی ایشان بهره فراوان برده‌ام.

نام خانوادگی دانشجو: یعقوبی **نام**: امین

عنوان پایان‌نامه: تحلیل المان محدود مخازن تحت فشار در ناحیه الاستیک پلاستیک با استفاده از الگوریتم بازگشت شعاعی

استاد راهنما: دکتر تاج بخش نوید چاخرلو

استاد مشاور: دکتر محمدرضا خوشروان

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته**: مکانیک **گرایش**: طراحی کاربردی **دانشگاه**: تبریز

دانشکده: فنی و مهندسی مکانیک **تاریخ فارغ‌التحصیلی**: مهر 1388 **تعداد صفحه**: 163

کلید واژه‌ها: اجزا محدود، بازگشت شعاعی، برنامه‌نوسی شی‌گرا، مخازن تحت فشار، پلاستیسیته سیکلی.

چکیده: در این پایان‌نامه به منظور کاهش حجم محاسبات در تحلیل الاستو پلاستیک مواد از الگوریتم بازگشت شعاعی استفاده شده است. برای این کار یک کد اجزا محدود با استفاده از روش برنامه‌نویسی شی‌گرا ایجاد شده است. این برنامه در زبان Visual C# .Net نوشته شده است. برنامه-نویسی شی‌گرا انعطاف‌پذیری، توسعه پذیری و دوباره استفاده کردن از برنامه را افزایش می‌دهد. این قابلیت‌ها به برنامه‌نویس اجازه می‌دهد کد را سریع‌تر و قابل فهم‌تر ایجاد کند. با استفاده از نرم‌افزار نوشته شده در این پایان‌نامه به مدل‌سازی عددی برخی از روش‌های افزایش عمر موسوم به کار سرد پرداخته شده است. ابتدا با استفاده از دو نوع مدل دو بعدی کرنش صفحه‌ای و متقارن محوری، محاسبه تنش‌های پسماند ناشی از پروسه اتوفرتاژ استوانه‌های جدار ضخیم تحت فشار محاسبه شده است. نتایج عددی حاصل برای تنش‌های پسماند مماسی، شعاعی و محوری با نتایج تحلیلی موجود در ادبیات فن مقایسه شده است. مطابقت قابل قبولی بین نتایج مشاهده شده است. اگر چه مدل کرنش صفحه‌ای قادر است تنش‌های پسماند مماسی را دقیق‌تر از مدل متقارن محوری مدل می‌کند. این در مورد تنش‌های شعاعی و محوری صادق نیست و هر دو مدل دارای خطای یکسانی هستند. سپس با استفاده از یک مدل دو بعدی به شبیه‌سازی توزیع تنش‌های پسماند ناشی از پروسه انبساط سرد در

یک صفحه سوراخدار و توزیع مجدد (آزاد شدن) آن‌ها تحت بارگذاری متناوب پرداخته شده است. برای شبیه‌سازی دقیق‌تر رفتار تنش/کرنش در بارگذاری متناوب از چهار مدل سخت‌شوندگی سینماتیک غیرخطی چابوکه، اوهنو- وانگ، باری- حسن و چن- جیائو استفاده شده‌اند. مقایسه نتایج حاصل با نتایج تجربی نشان می‌دهد که مدل چن- جیائو تنش‌های پسماند را در نزدیکی سوراخ بهتر پیش‌بینی می‌کند در حالیکه مدل‌های چابوکه و باری- حسن، قادر به محاسبه تنش‌های پسماند در محدوده تنش‌های کششی هستند. علاوه بر آن نرخ آزاد شدن تنش‌های پسماند در سیکل‌های اولیه بالاست و سپس در سیکل‌های بعدی کاهش می‌یابد.

فهرست نمادها

$\underline{a}$	مرکز سطح تسلیم در فضای انحرافی
$\overline{a}_4$	جمله Threshold
C_i	پارامتر مدل سخت‌شوندگی سینماتیک غیرخطی
E	مدول الاستیک
H	مدول پلاستیک
m	پارامتر مدل سخت‌شوندگی سینماتیک غیرخطی
M	تعداد قسمت‌های مورد نیاز برای بیان نمودار تنش-کرنش تک محوره
R	نسبت تنش
$\underline{s}$	تانسور تنش‌های انحرافی
S_u	مقاومت کششی
$\underline{a}$	مرکز سطح تسلیم در فضای اصلی
d'	پارامتر مدل سخت‌شوندگی سینماتیک غیرخطی
$\underline{e}^p$	تانسور کرنش پلاستیک
g_i	پارامتر مدل سخت‌شوندگی سینماتیک غیرخطی
n	نسبت پواسون
$\underline{s}$	تانسور تنش
s_y	تنش تسلیم
s_0	اندازه سطح تسلیم

فهرست مطالب

عنوان | شماره صفحه

مقدمه 1

فصل اول: بررسی منابع (پایه‌های نظری و پیشینه پژوهش)

مقدمه 4

1-1 پیشینه تحقیق 4

1-1-1 برنامه‌نویسی شی‌گرا 5

1-1-2 رچتینگ 9

1-1-3 رچتینگ ناشی از بارهای مکانیکی 12

1-1-4 نقش تنش‌های پسماند و پیش‌تنش در افزایش عمر خستگی اتصالات 14

1-1-4-1 روش انبساط سرد 15

1-1-4-2 روش تداخل 18

1 -2 اجزا محدود خطی (ناحیه الاستیک) 24

1-2-1 روابط اساسی 24

1-2-2 تانسور کرنش 24

1-2-3 روابط تنش- کرنش 25

1-2-4 فرمول‌بندی اجزاء محدود 25

1-2-5 قضیه کار مجازی 26

1-2-6 حالت‌های خاص صفحه‌ای 28
1-2-6-1 تنش صفحه‌ای 28
1-2-6-2 کرنش صفحه‌ای 30
1-2-6-3 متقارن محوری 31
1-2-6-4 نظریه صفحات میندلین 33
1 -3 رفتار مواد در محدوده پلاستیک 37
1-3-1 روابط ریاضی نظریه پلاستیسیته 38
1-3-2 آپدیت کردن تنش: کرنش‌های افزایشی یا تکراری 38
1-3-3 معیار تسلیم 39
1-3-3-1 معیار ترسکا 40
1-3-3-2 معیار ون میزز 41
1-3-4 قانون جریان 44
1-3-5 سخت شوندگی 46
1-3-5-1 سخت شوندگی ایزوتروپیک ناشی از کرنش پلاستیک 46
1-3-5-2 سخت شوندگی ایزوتروپیک ناشی از کار 48
1-3-5-3 سخت شوندگی سینماتیک 49
1-3-5-4 سخت شوندگی مرکب 50
1-3-6 مدل پلاستیسیته ون میزز سه بعدی 51
1-3-7 بازگشت به سطح تسلیم 53

1-7-3-1 روش اولر پیش رونده 53

2-7-3-1 روش اولر پس رونده 54

3-7-3-1 پلاستیسیته با سخت‌شوندگی ایزوتروپیک در فضای انحرافی 56

4-7-3-1 روش برگشت شعاعی 57

8-3-1 نیروهای پسماند 58

4-1 تعریف مساله اهداف پژوهش 59

فصل دوم: مبانی و روش‌ها

مقدمه 61

2 -1 مدل‌های شکل پذیری 61

1-1-2 مدل‌های سخت‌شونده کوپل شده 64

1-1-1-2 مدل سخت شوندگی خطی 65

2-1-1-2 مدل چند خطی 66

3-1-1-2 مدل سخت شوندگی غیر خطی 67

4-1-1-2 مدل چابوکه 68

5-1-1-2 مدل اوهنو و وانگ 69

6-1-1-2 مدل باری و حسن 70

7-1-1-2 مدل چن و جیائو 71

8-1-1-2 مدل عبدالکریم و اوهنو 71

2-1-2 تعیین ضرایب مدل‌های سخت شوندگی سینماتیک غیر خطی 72

2-1-2-1 روش دستی برای تعیین پارامترها 73

2-1-2-2 تعیین پارامترها با استفاده از الگوریتم ژنتیک 77

2-1-2-3 تعیین نسل اولیه ضرایب مدل باری – حسن 78

2-1-2-4 استراتژی بهینه‌سازی برای تهیین ضرایب اوهنو – وانگ 81

2-1-2-5 استراتژی بهینه‌سازی برای تهیین ضرایب عبدالکریم – اوهنو 84

2-2 اعمال الگوهای طراحی در برنامه نویسی شی گرا 85

2-2-1 روش برنامه‌نویسی شی‌گرا 87

2-2-2 الگوهای طراحی استفاده شده در این تحقیق 89

2-2-2-1 الگوی جداسازی مدل و تحلیل 90

2-2-2-2 الگوی جداسازی مدل و رابط کابر 90

2-2-2-3 الگوی *Modular Analyzer* 91

2-2-3 کاربرد الگوهای طراحی در برنامه اجزا محدود غیر خطی 91

2-3 نرم افزار نوشته شده در این پایان‌نامه 95

فصل سوم : نتایج و بحث

مقدمه 108

3-1 توزیع تنش در استوانه جدار ضخیم تحت فشار داخلی 108

3-1-1 فرمول‌بندی مساله 109

3-1-2 حل عددی سیلندر اتوفرتاژ شده با استفاده از *FEM* 111

3-2 بررسی عددی آزاد شدن تنش‌های پسماند در سوراخ‌های انبساط سرد شده 116

3-2-1 مقدمه.....116
3-2-2 مواد، نمونه‌ها و تست‌ها.....119
3-2-3 مدل اجزا محدود.....120
3-2-4 مدل پلاستیسیته سیکلی.....121
3-2-5 نتایج..... 126
3-2-5-1 توزیع اولیه تنش‌های پسماند مماسی.....126
3-2-5-2 توزیع دوباره تنش‌های پسماند مماسی بخاطر بارگذاری متناوب..... 128
3-2-5-3 توزیع دوباره تنش‌های پسماند شعاعی بخاطر بارگذاری متناوب..... 133
3-2-6 بحث..... 137
3-2-7 نتیجه‌گیری تنش‌های پسماند در سوراخ‌های انبساط سرد شده.....140
3-3 توزیع تنش در اثر پروسه تداخل و بارگذاری محوری متناوب در یک صفحه سوراخ‌دار.....141
3-3-1 مدل‌سازی مساله تداخل.....142
3-3-2 خواص مواد به کار رفته در مدل‌سازی.....143
3-3-3 شبیه‌سازی تماس بین صفحه و پین.....144
3-3-4 شبکه‌بندی.....145
3-3-5 بارگذاری مرحله اول(ورود پین به نمونه)..... 145
3-3-6 بارگذاری مرحله دوم(اعمال تنش سیکلی به نمونه)..... 148
3-4 نتیجه‌گیری 154
3-5 پیشنهادها برای ادامه انجام کار.....155

منابع 157

مقدمه

امروزه مشخص شده است که طراحی سازه‌ها در محدوده کاملا الاستیک موجب اتلاف ماده می‌گردد و علاوه بر آن امکان پذیر نیست، زیرا حتی در بارهای کم نیز در نقاطی مانند نوک ترک‌ها، نابجائی‌ها و یا نقاطی که تمرکز تنش در آن‌جا بالا است، ماده تسلیم شده و به ناحیه پلاستیک می‌رود. بنابراین بررسی دقیق‌تر و سریع‌تر رفتار ماده در ناحیه پلاستیک خصوصا برای سازه‌هایی که تحت بار متناوب قرار می‌گیرند با اهمیت خواهد بود.

در فصل اول از این پایان‌نامه ابتدا به اهمیت موضوع و پیشینه تحقیق خواهیم پرداخت سپس مقدماتی در مورد روش اجزا محدود در حالت کلی سه‌بعدی و حالت‌های خاص صفحه‌ای شامل تنش صفحه‌ای، کرنش صفحه‌ای، متقارن محوری و صفحه میندلین اشاره شده است. در پایان رفتار تنش-کرنش مواد در محدوده پلاستیک و روش‌های مختلف حل در این محدوده بررسی می‌شود. مفاهیم اساسی علم پلاستیسیته همانند معیار تسلیم، قانون جریان و قوانین سخت‌شوندگی تعریف می‌شوند. در پایان به توضیح روابط اجزا محدود در ناحیه پلاستیک می‌پردازیم.

در ابتدای فصل دوم به برخی از مدل‌های شکل‌پذیری غیرخطی که اخیرا برای شبیه‌سازی‌های پلاستیسیته سیکلی تک محوره و دو محوره پیشنهاد شده‌اند، خواهیم پرداخت. این مدل‌ها دارای تعداد زیادی پارامتر هستند که تعیین آن‌ها امری پیچیده و زمان‌بر است. بنابراین روش تعیین ضرایب این مدل‌های غیرخطی به هر دو روش دستی و اتوماتیک در این قسمت آمده است. در بخش دوم این فصل روش برنامه‌نویسی شی‌گرا تعریف شده و مهمترین وجه‌ها و مزایای آن در مقایسه با برنامه‌نویسی سنتی شرح داده می‌شود. در پایان به توضیحی مختصر در مورد نرم‌افزار نوشته شده در این تحقیق و توانایی‌ها و معایب آن در مقایسه با نرم‌افزارهای اجزا محدود موجود اشاره می‌شود.

فصل سوم به ارائه نتایج و بحث پیرامون آن‌ها می‌پردازد. در بخش اول این فصل، به نتایج عددی تحلیل تنش پروسه اتوفرتاژ بر روی استوانه جدار ضخیم با استفاده از نرم‌افزار نوشته شده در این پایان‌نامه اشاره شده و با روش‌های حل تحلیلی موجود در ادبیات فن مقایسه می‌شوند. در بخش دوم این فصل، آزاد شدن تنش‌های پسماند ناشی از پروسه انبساط سرد در اطراف سوراخ تحت بارگذاری متناوب محوری به طور عددی شبیه‌سازی می‌شود. برای این کار از مدل‌های غیر خطی سخت‌شوندگی سینماتیک استفاده شده است تا علاوه بر مدل‌سازی بهتر رابطه تنش – کرنش مواد تحت بارگذاری متناوب، قابلیت شبیه‌سازی هر یک از این مدل‌ها تحت این نوع بارگذاری بررسی شود. در بخش پایانی این فصل به مدل‌سازی سه بعدی روش تداخل برای افزایش عمر قطعات سوراخ‌دار و بررسی رفتار تنش متوسط و دامنه تنش تحت بارگذاری متناوب محوری در نقاط نزدیک سوراخ با استفاده از مدل-های سخت‌شوندگی سینماتیک غیرخطی خواهیم پرداخت. یک روش جدید برای شبیه‌سازی تماس میان صفحه و پین ارائه شده است. علاوه بر این که روش جدید مطابقت عالی با شبیه‌سازی بااستفاده از المان‌های تماسی موجود در بسته نرم‌افزاری *ANSYS* دارد، زمان محاسبات در این روش به طور چشمگیری کاهش می‌یابد و از پیچیدگی مساله می‌کاهد.

فصل اول

بررسی منابع
پایه‌های نظری و پیشینه پژوهش

مقدمه

در فصل اول از این پایان‌نامه ابتدا به اهمیت موضوع و پیشینه تحقیق پرداخته شده و سپس مقدماتی در مورد روش اجزا محدود در حالت کلی سه‌بعدی و حالت‌های خاص صفحه‌ای شامل تنش صفحه‌ای، کرنش صفحه‌ای، متقارن محوری و تئوری صفحه میندلین اشاره شده است. در پایان رفتار تنش-کرنش مواد در محدوده پلاستیک و روش‌های حل در این محدوده بررسی می‌شود. مفاهیم اساسی علم پلاستیسیته همانند معیار تسلیم، قانون جریان و قوانین سخت‌شوندگی تعریف می‌شوند. در پایان به توضیح روابط اجزا محدود در ناحیه پلاستیک می‌پردازیم.

1-1- پیشینه تحقیق

بسیاری از مصالحی که اهمیت کاربردی دارند، مانند فلزات، در تنش‌های زیاد، رفتار فرا الاستیک از خود نشان می‌دهند. غیر ارتجاعی بودن مصالح به این معنی است که هنگامی که جسم از تنش آزاد می‌شود، به حالت اولیه خود باز نمی‌گردد و تغییرشکل‌های دائمی در آن دیده می‌شود. مدل‌ها و تئوری‌های رفتاری متفاوتی مانند پلاستیسیته، ویسکوپلاستیسیته و ... به‌طور معمول برای لحاظ کردن چنین اثرهای دائمی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

دانستن علم پلاستیسیته و حل مسایل آن یکی از چالش‌های مهم در مکانیک جامدات بالاخص پس از شروع جنگ جهانی دوم بوده است. این علم در مواردی همچون تولید قطعات فلزی از طریق شکل دادن آن‌ها مثل کشش عمیق، اکستروژن، آهنگری، خمش قطعات و ... کاربرد زیادی دارد. از این علم برای محاسبه تنش و کرنش در قطعات مکانیکی و سازه‌ها که تحت بار المانی ($over\ \ load$) و یا زلزله قرار می‌گیرند، نیز استفاده می‌شود. حل مسایل پلاستیسیته که در آن قطعه و یا جسم در اثر بارگذاری از ناحیه الاستیک عبور کرده و به حالت خمیری درمی‌آید، بخاطر ماهیت غیرخطی بسیار

مشکل‌تر از علم الاستیسیته است. برای حل مسایلی که علم پلاستیسیته در آن‌ها رخ می‌دهند، معمولا از آنالیز ریاضی و یا آنالیزهای عددی همچون *FEM* و *FDM* استفاده می‌گردد. البته آنالیز ریاضی اغلب در مسایلی که مرز قطعه منظم است و رفتار ماده الاستیک کاملا پلاستیک فرض شده است، استفاده می‌شود. ولی روش‌های عددی برای مرزهای پیچیده و رفتار واقعی مواد زیاد مورد توجه قرار می‌گیرند.

در طول 50 سال اخیر، توسعه روش‌های عددی بهتر و کامپیوترهای قوی‌تر، تعهد بزرگی را برای جامعه علمی به‌همراه داشته است. در همان زمان، روش اجزا محدود مقبولیت و پذیرش عمومی را به عنوان یک ابزار قوی و کلی برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های فیزیکی کسب کرده است و بطور گسترده‌ای در زمینه‌هایی نظیر مکانیک جامدات، مکانیک سیالات، الکترو مغناطیس و ... قابل استفاده است.

1-1-1- برنامه‌نویسی شی‌گرا[1]

در سال‌های اخیر، محافظت آسان، قابلیت‌های توسعه پذیری و انعطاف پذیری برنامه اجزا محدود، بسیاری از محققها را برای تغییر از برنامه‌نویسی پروسه‌ای سنتی[2] به برنامه‌نویسی شی‌گرا در جهت ایجاد نرم‌افزار اجزا محدود منعطف‌تر سوق داده است.

روش برنامه‌نویسی شی‌گرا در دهه 70 پدیدار شد ولی اولین کاربرد آن در زمینه اجزا محدود در اوایل دهه 90 توسط زیمرمن [1] و دابویس و پلرین [2] شروع و سپس بطور گسترده‌ای برای مسائل مختلف اجزا محدود استفاده شد [3-6]. برنامه‌های پروسه‌ای محدودیت‌هایی به خصوص در برنامه‌های اجزا محدود بزرگ که حاوی صدها هزار خط کد هستند، دارند. چنین برنامه‌های پروسه‌ای اغلب در زبان *FORTRAN* نوشته می‌شوند. این کدها دارای تعداد قابل توجهی از ساختارهای اطلاعاتی هستند

[1] Object Oriented Programming
[2] Procedural Programming

که در سراسر برنامه قابل دسترس هستند و این موجب کاهش انعطاف‌پذیری برنامه می‌شود. کاهش انعطاف‌پذیری در موارد زیر نمایان می‌شوند:

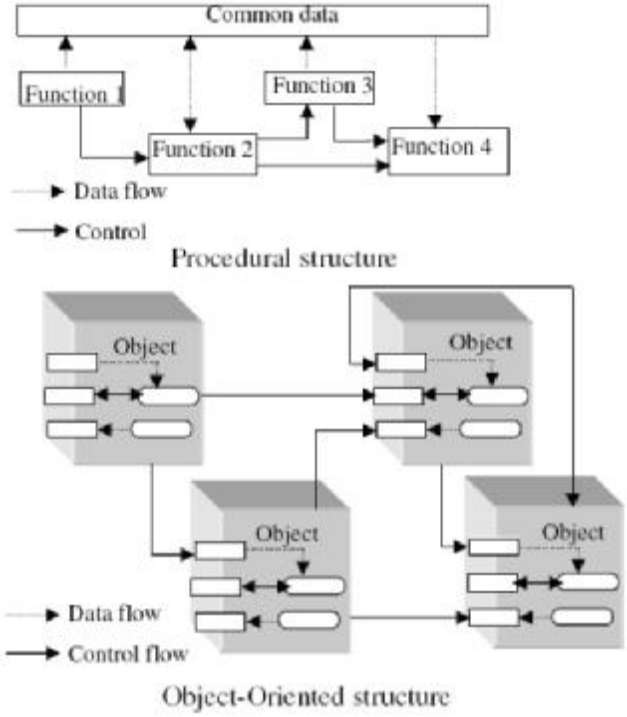
- شناخت جزئی از برنامه نیازمند کار روی قسمت‌های کوچک برنامه است.
- دوباره استفاده کردن از قسمت‌های مختلف برنامه مشکل است.
- یک تغییر کوچک در ساختار برنامه بر کل سیستم اثر می‌گذارد.
- وابستگی‌ها میان قسمت‌های مختلف برنامه آشکار نیست و برقراری آن‌ها امری پیچیده است.
- تمامیت ساختارهای برنامه محافظت نمی‌شود.

برنامه‌نویسی شی‌گرا برپایه مفاهیم کلاس[3]، شی[4]، وراثت[5]، چند ریختی[6] و کپسوله‌سازی[7] است. تفاوت بین برنامه‌نویسی شی‌گرا و برنامه‌نویسی پروسه‌ای در شکل (1-1) نشان داده شده است.

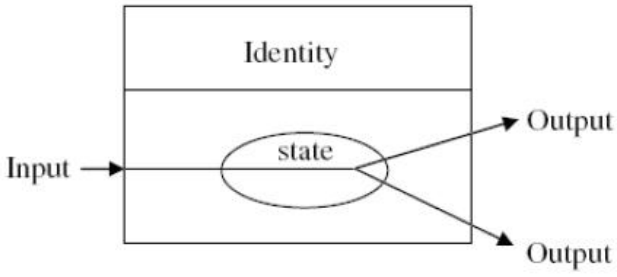
هر شی توسط هویت، حالت و رفتار آن مشخص می‌شود. هویت موجب تمییز شدن آن از دیگر شی‌ها می‌شود. حالت شی توسط مقادیر جاری متغیرهای آن توصیف می‌شود. رفتار شی چگونگی برخورد آن با پاسخ‌های خروجی را نشان می‌دهد (به شکل (1-2) نگاه کنید).

رفتار شی بوسیله مجموعه‌ای از عملگرها ایفا می‌شود که متدها[8] نامیده می‌شوند. متدها و داده‌ها در برخی حصارها (شی‌ها) کپسوله می‌شوند و بوسیله سطح مشترک (میانجی) با جهان خارج در ارتباط هستند (به شکل (1-3) نگاه کنید).

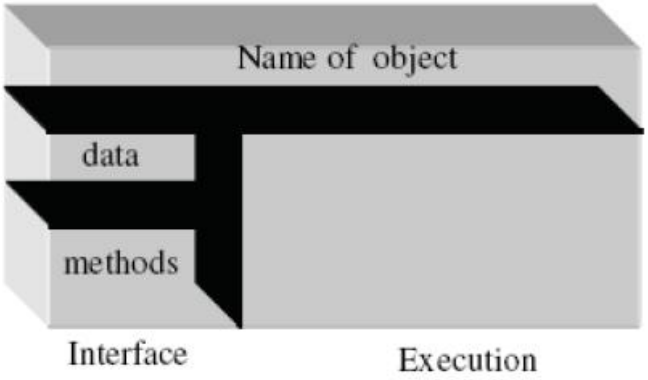
[3] Class
[4] Object
[5] Inheritance
[6] Polymorphism
[7] Encapsulation
[8] Methods



شکل (1-1) انواع مختلف روش‌های برنامه‌نویسی [6].



شکل (1-2) رفتار و حالت یک شی [6].

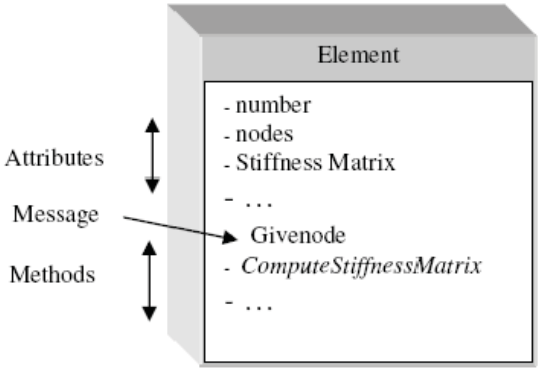


شکل (1-3) کپسوله سازی داده‌ها و شی‌ها در یک شی [6].

مزایای کلیدی استفاده از شی‌ها عبارتند از:

- آسانی فهم و دوباره استفاده کردن از کد
- بهبود در اعتبار (قابلیت اطمینان) بوسیله کپسوله‌سازی
- افزایش خلاصه‌سازی و پوشاندن اطلاعات

کلاس مجموعه‌ای از شی‌ها با خواص و متدهای یکسان است. کلاس دارای خواصی است که متدها بر روی این خواص اعمال می‌شوند. پس از اینکه پیام خاصی به کلاس می‌رسد، کلاس شی‌های مربوطه را فعال کرده و پاسخ مناسب داده می‌شود اما جزئیات عملیات در داخل کلاس باقی می‌ماند که این بعنوان کپسوله‌سازی داده‌ها و متدها شناخته می‌شود (شکل (1-4)).



شکل (1-4) مفهوم کلی کلاس [6].