بسم الله الرحمن الرحيم

١١٥١١٤

دانشگاه شهید باهنر کرمان

دانشکده فنی

بخش مهندسی عمران

رساله جهت دریافت درجه دکتری مهندسی عمران گرایش سازه

عنوان :

طراحی بهینه سازه‌ها با استفاده از روشهای جدید تقریب‌سازی

استاد راهنما :

دکتر عیسی سلاجقه

مؤلف :

پیمان ترک‌زاده ماهانی

۱۳۸۸/۴/۱۶

آبان ۱۳۸۷

۱۱۵۱۱۴

بسمه تعالی

این رساله به عنوان یکی از شرایط احراز درجه دکتری مهندسی عمران به

بخش مهندسی عمران
دانشکده فنی و مهندسی
دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره شناخته نمی شود.

دانشجو : پیمان ترک زاده ماهانی

استاد راهنما : دکتر عیسی سلاجقه

داور ۱ : دکتر محمد علی برخورداری

داور ۲ : دکتر محسن علی شایانفر

داور ۳ : دکتر محمد جواد فدائی

داور ۴ : دکتر حامد صفاری

معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده : دکتر پور ابراهیم

دانشگاه شهید باهنر کرمان
اداره تحصیلات تکمیلی

حق چاپ محفوظ و مختص مؤلف است.

تقدیم به:

همسر عزیز و فرزند دلبندم

و

تقدیم به:

پدر بزرگوار و مادر دلسوزم

و

تقدیم به:

کلیه جویندگان راه علم و معرفت

تشکر و قدردانی

خداوند سبحان را سپاسگزارم که مرا در کلیه مراحل زندگی و به خصوص در طول دوره تحصیل و انجام این تحقیق یاری نمود.

با تقدیم بهترین سپاسها به محضر استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر عیسی سلاجقه که در طول دوره تحصیل و به خصوص انجام این تحقیقات، همواره راهنما و حامی این حقیر بوده و همچون پدری دلسوز از هیچگونه لطف و مرحمتی در حق اینجانب مضایقه ننمودند.

از داوران گرامی، جناب آقایان دکتر محمد علی برخورداری، دکتر محسن علی شایانفر، دکتر محمد جواد فدایی و دکتر حامد صفاری که قبول زحمت نموده و داوری این رساله را انجام دادند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از ریاست محترم بخش مهندسی عمران جناب آقای دکتر بارانی و سایر استادان و کارکنان محترم این بخش تقدیر و تشکر می شود.

از همسر فداکار و عزیزم که تمامی مشقات زندگی در دوره تحصیل اینجانب را با نهایت صبر و متانت تحمل کرده و هرگز بدون همکاری ایشان، این کار به انجام نمی رسید، تشکر و قدردانی می نمایم.

از پدر و مادر مهربانم که همواره مشوق اینجانب در کلیه مراحل تحصیل بودند، بینهایت سپاسگزارم.

از تمام دوستانی که در طول دوره دکتری و انجام مراحل مختلف این رساله، بنده را مورد لطف و مرحمت خویش قرار دادند، به خصوص آقایان مهندس سعید قلی زاده و سید محمد سیدپور صمیمانه قدردانی و تشکر می‌نمایم.

پیمان ترک‌زاده ماهانی

آبان ۱۳۸۷

چکیده

امروزه استفاده از روشهای مختلف بهینه‌سازی به منظور کاهش وزن و یا قیمت سازه‌ها گسترش روز افزونی یافته است. به طوریکه طراحی بهینه سازه‌ها به صورت یک علم مدون در آمده و روز به روز بر روشهای جدید آن افزوده می شود. از آنجا که در طرح بهینه سازه‌ها، امکان بیان صریح توابع محدودیتها بر حسب متغیرهای طراحی وجود ندارد، استفاده از روشهای عددی اجتناب ناپذیر بوده و در اینصورت برای محاسبه توابع محدودیتها در هر مرحله از عملیات بهینه سازی بایستی صدها مرتبه سازه مورد نظر تحلیل گردد. تحلیل دقیق سازه‌های با درجات آزادی زیاد، مستلزم صرف وقت و هزینه زیاد بوده و بنابراین بایستی در طی عملیات بهینه سازی و جهت فائق آمدن بر این مشکل، از روشهای تقریبی با دقت کافی برای تحلیل سازه‌ها استفاده نمود.

به طور کلی دو روش تقریب سازی کلاسیک و پیشرفته برای تحلیل تقریبی سازه‌ها وجود دارد. به منظور افزایش دقت توأم با سرعت روشهای تقریب سازی کلاسیک که در عملیات طراحی بهینه سازه‌ها مورد استفاده قرار می گیرند، یک تابع جدید تقریبی مرتبه سوم برای تحلیل تقریبی سازه‌ها معرفی شده که در آن فقط از اعضای قطری ماتریس مشتقات مرتبه دوم و سوم استفاده گردیده است. ضمناً یکی از خصوصیات روش جدید تقریبی این است که مشتقات مرتبه بالاتر بر حسب مشتقات در دسترس مرتبه اول به دست می‌آیند.

سپس با استفاده از روش جدید تقریب سازی مرتبه سوم و کمک گرفتن از یک روش توسعه داده شده جستجوی مستقیم دو بعدی، طراحی بهینه شکل سازه‌های قاب فولادی سه بعدی مدولار انجام شده و ضمن به دست آوردن حداقل وزن و ابعاد بهینه مقطع اعضا، بهترین موقعیت قرارگیری ستونها در پلان این سازه‌ها تعیین گردیده است.

همچنین با استفاده از تابع جدید تقریبی مرتبه سوم، چهار روش جدید تقریب سازی با کیفیت بالا برای تخمین فرکانسهای طبیعی سازه‌ها پیشنهاد و با کمک آنها طراحی بهینه وزن سازه‌ها تحت محدودیتهای فرکانس انجام و ابعاد بهینه مقطع اعضا تعیین شده‌اند.

از طرف دیگر جهت افزایش دقت و کاهش زمان روشهای تقریب سازی کلی که قادر به تخمین پاسخهای سازه‌ای برای کل فضای طراحی در هر مرحله از عملیات بهینه سازی هستند، از شبکه‌های عصبی مصنوعی که جزو روشهای پیشرفته تقریب سازی هستند، استفاده شده است و ضمن معرفی یک شبکه جدید تحت عنوان شبکه عصبی تابع بنیادی شعاعی موجکی، طراحی بهینه وزن سازه‌ها با استفاده از ترکیب روش وراثتی اصلاح شده و شبکه‌های عصبی

مصنوعی تحت محدودیتهای فرکانس انجام شده و متغیرهای گسسته سطح مقطع اعضا و وزن بهینه سازه‌ها تعیین گردیده‌اند. روش وراثتی مورد استفاده، یک روش توسعه داده شده تحت عنوان زیر جمعیتهای مجازی بوده و برای کاهش زمان عملیات بهینه سازی، فرکانسهای طبیعی سازه‌ها با استفاده از شبکه‌های عصبی آموزش داده شده تابع بنیادی شعاعی و تابع بنیادی شعاعی موجکی برآورد شده‌اند. در شبکه جدید تابع بنیادی شعاعی موجکی، تابع تحریک نرونهای لایه مخفی با یکی از انواع توابع موجکی جایگزین گردیده است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: کلیات

۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- مسائل بهینه‌سازی ۳
۱-۳- روشهای حل مسائل بهینه‌سازی ۳
۱-۴- روشهای بهینه‌سازی برگرفته از طبیعت ۵
۱-۵- روشهای تحلیل تقریبی سازه‌ها ۷
۱-۵-۱- روشهای تقریب سازی کلاسیک ۷
۱-۵-۲- روشهای تقریب سازی پیشرفته - شبکه‌های عصبی مصنوعی ۱۰

فصل دوم: طراحی بهینه سازه‌ها

۲-۱- اصول طراحی بهینه سازه‌ها ۱۳
۲-۲- روش عمومی محاسبات بهینه ۱۴
۲-۳- حداقل توابع بدون محدودیت ۱۵
۲-۴- حداقل توابع با محدودیت ۱۶
۲-۵- روشهای مختلف بهینه‌یابی ۱۸
۲-۵-۱- روشهای مستقیم ۱۸
۲-۵-۲- روشهای غیر مستقیم ۱۹
۲-۶- روش دوگانه ۲۰
۲-۷- روش بهینگی ۲۰
۲-۸- روش شبیه‌سازی بازپخت فلزات ۲۰
۲-۹- روش وراثتی ۲۱
۲-۹-۱- الگوریتم روش وراثتی برای بهینه‌سازی توابع مقید ریاضی ۲۳

۲-۹-۲- شرط همگرایی در الگوریتم وراثتی ۲۴
۲-۱۰- روش وراثتی اصلاح شده ۲۴
۲-۱۱- طراحی بهینه سازه‌ها با محدودیت فرکانس ۲۵

فصل سوم: مروری بر روشهای تحلیل تقریبی سازه‌ها

۳-۱- مقدمه ۲۸
۳-۲- محاسبات تقریبی در طراحی بهینه سازه‌ها ۲۸
۳-۲-۱- تقریب سازی یک نقطه‌ای ۲۹
۳-۲-۱-۱- تقریب سازی خطی ۲۹
۳-۲-۱-۲- تقریب سازی خطی معکوس ۲۹
۳-۲-۱-۳- تقریب سازی ترکیبی ۳۰
۳-۲-۲- تقریب سازی دو نقطه‌ای ۳۰
۳-۲-۲-۱- تقریب سازی معکوس اصلاح شده ۳۰
۳-۲-۲-۲- تقریب سازی توانی ۳۱
۳-۲-۲-۳- تقریب سازی توانی با توان ثابت ۳۲
۳-۲-۲-۴- تقریب سازی توانی اصلاح شده نوع I ۳۳
۳-۲-۲-۵- تقریب سازی توانی اصلاح شده نوع II ۳۳
۳-۲-۲-۶- تقریب سازی مرتبه دوم با اعضای قطری ماتریس هسیان ۳۴
۳-۲-۲-۷- تقریب سازی معکوس مرتبه دوم با اعضای قطری ماتریس هسیان ۳۵
۳-۲-۲-۸- تقریب سازی ترکیبی مرتبه دوم با اعضای قطری ماتریس هسیان ۳۵
۳-۲-۳- تقریب سازی سه نقطه‌ای ۳۶
۳-۲-۳-۱- تقریب سازی سه نقطه‌ای توانی ۳۶
۳-۲-۳-۲- تقریب سازی سه نقطه‌ای با معرفی ماتریس هسیان ۳۷
۳-۲-۳-۳- تقریب سازی مرتبه سوم با اعضای قطری ماتریس مشتقات مرتبه دوم وسوم ۳۷
۳-۲-۳-۴- تقریب سازی معکوس مرتبه سوم با اعضای قطری ماتریس مشتقات مرتبه دوم وسوم ۳۸
۳-۲-۴- تحلیل تقریبی سازه‌ها در مقابل زلزله ۴۰
۳-۳- تحلیل حساسیت ۴۲
۳-۳-۱- مشتق تغییر مکانهای گرهی ۴۳

۳-۳-۲- مشتق نیروهای داخلی اعضا ۴۳
۳-۳-۳- مشتق مقادیر و بردارهای ویژه ۴۴
۳-۳-۴- مشتق صورت و مخرج کسر رایلی ۴۵

فصل چهارم: طراحی بهینه سازه‌ها با استفاده از روشهای جدید تقریب سازی

۴-۱- مقدمه ۴۷
۴-۲- روش جدید تقریب سازی مرتبه سوم ۴۷
۴-۳- روشهای جدید تقریب سازی مقادیر ویژه ۵۰
۴-۴- متغیرهای طراحی ۵۱
۴-۵- محدودیتهای طراحی ۵۱
۴-۶- مثالها ۵۲
۴-۶-۱- مثال۱ : طراحی بهینه سازه قاب فولادی یک طبقه با محدودیتهای تنش و تغییر مکان ۵۲
۴-۶-۲- مثال۲ : طراحی بهینه سازه قاب فولادی پنج طبقه با محدودیتهای تنش و تغییر مکان ۵۵
۴-۶-۳- مثال ۳ : سازه قاب فولادی یک طبقه با محدودیت فرکانس ۵۷
۴-۶-۴- مثال ۴ : سازه قاب فولادی هشت طبقه با محدودیت فرکانس ۶۰
۴-۷- نتیجه گیری ۶۲

فصل پنجم: طراحی بهینه سازه‌های قاب فولادی سه بعدی همراه با تعیین بهترین موقعیت قرارگیری ستونها

۵-۱- مقدمه ۶۵
۵-۲- روش جستجوی مستقیم یک بعدی (یک متغیره) ۶۵
۵-۳- توسعه روش جستجوی مستقیم برای توابع دو متغیره ۶۷
۵-۴- مثالها ۶۹
۵-۴-۱- مثال۱ : طراحی بهینه سازه قاب فولادی یک طبقه با هندسه نامعلوم ۶۹
۵-۴-۲- مثال۲ : طراحی بهینه سازه قاب فولادی هشت طبقه با هندسه نامعلوم ۷۴
۵-۵- نتیجه گیری ۷۶

فصل ششم: طراحی بهینه سازه‌ها با استفاده از روش وراثتی اصلاح شده و شبکه‌های عصبی مصنوعی

۶-۱- مقدمه ۷۹
۶-۲- شبکه‌های عصبی مصنوعی ۷۹
۶-۳- نرون مصنوعی ۸۲
۶-۴- تابع تحریک نرون ۸۳
۶-۵- مدهای عملکردی شبکه‌های عصبی ۸۵
۶-۶- شبکه عصبی تابع بنیادی شعاعی ۸۵
۶-۷- موجک و تبدیل موجکی ۸۹
۶-۸- شبکه عصبی جدید تابع بنیادی شعاعی موجکی ۹۲
۶-۸-۱- مراحل آموزش و تست شبکه ۹۴
۶-۹- طراحی بهینه سازه‌ها تحت محدودیتهای فرکانس با استفاده از روش وراثتی اصلاح شده و شبکه‌های عصبی مصنوعی ۹۴
۶-۱۰- مثالها ۹۵
۶-۱۰-۱- مثال ۱ : خرپای آلومینیومی ۱۰ عضوی ۹۷
۶-۱۰-۲- مثال۲ : شبکه دو لایه فولادی ۲۰۰ عضوی ۱۰۰
۶-۱۱- نتیجه گیری ۱۰۵

فصل هفتم: نتیجه‌گیری ۱۰۷

مراجع ۱۰۹

فصل اول

کـــلیات

۱-۱- مقدمه

در اکثر مسائل مهندسی، اغلب با یک تابع هدف مواجه هستیم که با بهینه شدن مقدار آن، عملکرد کلی سیستم مورد مطالعه، بهینه خواهد شد. هدف اساسی در مهندسی عمران، ایجاد طرحی است که در برابر نیازهای مورد نظر و شرایط موجود، بیشترین کارآیی را داشته باشد. در بهینه‌سازی سازه‌ها، این عمل معادل با تعیین محدوده یا گروهی از متغیرهای طراحی است که بر حسب بارها و محدودیتهای اعمال شده، موجب حداقل شدن تابع هدف می‌گردند. متغیرهای طراحی نیز مقادیری را شامل می شوند که در طی فرآیند بهینه‌سازی تغییر کرده و و این تغییرات منجر به یافتن جواب بهینه می‌گردد.

مسائل بهینه‌سازی با روشهای متفاوتی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. این روشها شامل شیوه‌های تحلیلی نظیر حساب تغییرات[۱] ، حساب دیفرانسیل[۲] ، روش مضارب لاگرانژ[۳] و شیوه های عددی[۴] مانند برنامه ریزی خطی[۵] ، روشهای جستجوی مستقیم[۶] ، روشهای مبتنی بر گرادیان[۷] ، روشهای تابع جریمه[۸] ، روشهای دوگانه[۹] و روشهای معیار بهینگی[۱۰] می باشند. هر یک از شیوه‌های تحلیلی و عددی ذکر شده محدودیتهای خاص خود را دارند. برای مثال اگرچه از شیوه‌های تحلیلی، پاسخهای دقیقی می‌توان به دست آورد ولی فقط در مسائل ساده‌ای که دارای محدودیت نیستند و یا محدودیتهای مساوی دارند، قابل استفاده می‌باشند. بیشتر این روشها با رسیدن به بهینه محلی[۱۱] متوقف می شوند و قادر به یافتن بهینه کلی[۱۲] نیستند.

از طرف دیگر، شیوه های عددی را می توان در گستره وسیعی از مسائل به کار برد. در همه این روشها از یک جواب اولیه شروع کرده و با روشهای تکراری، جواب بهینه نهایی را جستجو می‌کنیم. به جز حالتی که فضای طراحی محدب[۱۳] است، هیچ تضمینی برای رسیدن روشهای بهینه‌سازی عددی به پاسخ بهینه وجود ندارد. یکی دیگر از اشکالات روشهای بهینه‌سازی عددی این است که بایستی تابع هدف و محدودیتها به طور دقیق بر حسب متغیرهای طراحی تعیین شوند. عموماً در سازه‌ها تعیین دقیق تابع هدف و محدودیتها به طور

---

۱. Calculus of variation
۲. Differential calculus
۳. Lagrange multipliers
۴. Numerical techniques
۵. Linear programming
۶. Direct search methods
۷. Gradient based methods
۸. Penalty function methods
۹. Dual method
۱۰. Optimality criteria methods
۱۱. Local optimum
۱۲. Global optimum
۱۳. Convex

صریح برحسب متغیرهای طراحی غیر ممکن است. در اینگونه موارد باید از روشهای تقریبی استفاده نمود و به وسیله آن یک فرمول‌بندی مشخصی برای مسئله بدست آورد.

مشکل دیگری که در مورد روشهای بهینه‌سازی عددی مطرح می شود این است که بسیاری از این روشها فقط برای متغیرهای پیوسته کاربرد داشته و در آنها متغیرهای گسسته به صورت پیوسته در نظر گرفته شده و پس از به دست آوردن پاسخ بهینه، چنین متغیرهایی به نزدیکترین مقادیر گسسته تبدیل می‌شوند. چنین تقریبی به این دلیل استفاده می‌شود که در این روشها، بهینه‌سازی مسائل با متغیرهای پیوسته معمولاً آسانتر از متغیرهای گسسته است.

۱-۲- مسائل بهینه‌سازی

به طور کلی مسائل بهینه سازی را می‌توان به دو گروه مسائل بدون محدودیت و مسائل با محدودیت تقسیم نمود. در طراحی بهینه سازه‌ها به دلیل وجود محدودیتهای متعدد برای تنشها، تغییر مکانها، فرکانسها و نیز محدودیتهای حدی و غیره، غالباً با مسائل با محدودیت سروکار داریم.

در طراحی بهینه سازه ها، مقدار متغیرهای طراحی به گونه ای تعیین می شوند که به ازای آنها، وزن و یا قیمت سازه به حداقل ممکن کاهش یافته و کلیه محدودیتهای طراحی نیز ارضا گردند. فرمولاسیون ریاضی این مسئله به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} &\text{Minimize:} && W(X) \\ &\text{Subject to:} && g_j(X) \le 0 \qquad j = 1,2,...,m \\ & && x_i^l \le x_i \le x_i^u \qquad i = 1,2,...,n \end{aligned} \tag{۱-۱}$$

به طوری که W وزن سازه بر حسب بردار متغیرهای X و m تعداد محدودیتهای $g_i(X)$ می باشد. n، تعداد متغیرهای طراحی و x_i^u, x_i^l, x_i به ترتیب متغیرها و حدود پایین و بالای آنها بوده و در سازه های اسکلتی، متغیرهای طراحی، ابعاد یا مشخصات سطح مقطع اعضا هستند.

۱-۳- روشهای حل مسائل بهینه‌سازی

در حالت کلی مسائل بهینه‌سازی سازه‌ها بر حسب متغیرهای طراحی و کمیتهای کنترل کننده رفتار سازه، به صورت مسائل ریاضی قابل بررسی می‌باشند. به طور کلی روشهای بررسی

و حل چنین مسائلی به دو گروه تقسیم می‌شوند. گروه اول، شامل روشهای مبتنی بر گرادیان است که مشتقات تابع هدف و محدودیتها را برای یافتن طرح بهینه به کار می‌گیرند. در برخی مسائل بهینه‌سازی در مهندسی عمران، می‌توان از روشهای مبتنی بر گرادیان سود برد ولی در تعدادی از مسائل یا نمی‌توان از این روشها استفاده کرد و یا به کار گیری آنها به سادگی امکان‌پذیر نخواهد بود. به طور مثال وقتی که فضای جستجوی مسئله گسسته است و یا با وجود پیوستگی این فضا، بهینه‌های محلی مانع رسیدن روشهای گرادیانی به بهینه کلی می شوند، نمی‌توان از روشهای مبتنی بر گرادیان استفاده نمود. در این موارد از روشهای جستجوی مستقیم که در گروه دوم روشهای ریاضی قرار دارند، استفاده می‌شود. روشهای گروه دوم بر پایه گرادیان نبوده و تنها به ارزیابی مقادیر تابع هدف و محدودیتها برای انجام جستجوهای بعدی نیاز دارند. از آنجایی که روشهای گروه اول، اطلاعات بیشتری از تحلیل سازه را در یک نقطه بکار می‌گیرند، می‌توان انتظار داشت که از کارآیی بیشتری نسبت به روشهای گروه دوم برخوردار بوده و به تعداد کمتری از تحلیل‌های پیاپی سازه نیازمند باشند. ماهیت خطی و یا غیرخطی مسائل بهینه‌سازی، روشهای ریاضی را به دو گروه دیگر تقسیم می کند. در روشهای خطی، تابع هدف و محدودیتها به صورت توابعی خطی از متغیرهای طراحی در نظر گرفته می‌شوند. اگرچه به ظاهر تنها گروه کوچکی از مسائل بهینه سازی را می توان در قالب روشهای خطی مورد ارزیابی قرار داد، ولی به دلیل آنکه روشـــــهای خطی ابزار قدرتمندی در برخی از روشهای حل مسائل غیر خطی مانند مسیرهای قابل قبول[1] و برنامه‌ریزی خطی پیاپی می‌باشند، در عمل روش مزبور در سطح گسترده‌ای از مسائل طراحی بهینه سازه‌ها کاربرد دارد.

گروه عمده‌ای از مسائل بهینه‌سازی سازه‌ها به دلیل وابستگی غیرخطی میان رفتار سازه و متغیرهای طراحی، در چهارچوب مسائل غیرخطی قرار می‌گیرند. با توجه به ماهیت غیرخطی این مسائل، واضح است که حل آنها با دشواریهایی همراه خواهد بود بطوریکه رسیدن به یک پاسخ بهینه کلی با چنین روشهایی با تردید همراه بوده و فرآیند بهینه‌سازی در بسیاری از موارد به پاسخ بهینه محلی همگرا می‌شود.

از دیدگاه دیگر می‌توان این روشها را در دو گروه روشهای قطعی[2] (غیر تصادفی) و تصادفی[3] جای داد. منظور از روشهای تصادفی، روشهایی هستند که از نمونه‌برداری تصادفی فضای جستجو یا مدلهای تصادفی تابع هدف استفاده می‌کنند که در سالهای اخیر مورد توجه فراوان قرار گرفته اند و این به دلیل ارائه روشهای مؤثری در حل مسائل بهینه‌سازی مشکل و

---

۱. Usable-feasible method

۲. Deterministic methods

۳. Stochastic methods

امکان دست‌یابی به نقطه بهینه کلی می‌باشد. از طرف دیگر، بیشتر روشهای قطعی دارای این اشکال اساسی هستند که به محض رسیدن به اولین نقطه بهینه محلی متوقف شده و توانایی خروج از این نقطه و حرکت به سوی نقطه بهینه کلی را از دست می‌دهند. بنابراین مدتهاست که مطالعاتی بر روی الگوریتم‌هایی که بتوانند از نقطه بهینه موضعی بگریزند، آغاز شده و تاکنون روشهای متفاوتی ارائه و مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا الگوریتمهای تصادفی به دلیل عملکرد ساده‌تر و در نتیجه راحتی اجرا به کمک رایانه، مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند.

از جنبه دیگر، روشهای حل مسائل بهینه سازی را می توان به دو دسته مستقیم و غیر مستقیم دسته بندی نمود. در روشهای مستقیم، توابع هدف و محدودیتها تواماً در نظر گرفته شده و جهت بردار جستجو[1] طوری تعیین می گردد که هم تابع هدف را تقلیل داده و هم محدودیتها را ارضا نماید. ولی در روشهای غیر مستقیم، ابتدا توابع با محدودیت به توابع بدون محدودیت تبدیل شده و سپس عملیات بهینه سازی انجام می‌گردد.

اساساً در تمام روشهای بهینه‌سازی نیاز به محاسبات مکرر توابع هدف و محدودیتها بوده و بایستی برای هر دفعه محاسبه محدودیتها، تحلیل سازه انجام شده که نهایتاً در هر مرحله بهینه‌سازی بایستی صدها بار سازه مورد نظر تحلیل گردد. حال چنانچه سازه مورد نظر، پیچیده و دارای اعضا و محدودیتهای زیاد باشد، زمان لازم برای انجام این محاسبات بسیار زیاد خواهد بود. لذا برای طراحی بهینه سازه های بزرگ و کاربردی کردن طراحی بهینه در صنعت ساختمان، ضروری است که مقادیر تنشها، نیروها، تغییر مکانها، فرکانسها و غیره با روشهای تقریبی و با دقت مناسب محاسبه شوند. سپس با استفاده از این روابط تقریبی در هر مرحله از بهینه سازی فقط یک مرتبه سازه، تحلیل و مقادیر پاسخهای مورد نیاز به همراه مشتقات مرحله اول آنها محاسبه، ذخیره و استفاده شده و در نتیجه تعداد مراحل تحلیل سازه محدود می‌گردد.

۱-۴- روشهای بهینه‌سازی برگرفته از طبیعت

بسیاری از سیستمهای زنده و غیر زنده طبیعی، نسبت به سیستم‌های ساخت دست بشر از لحاظ کارآیی برتری کاملی دارند. ترکیبی از خود تعمیری، راهنمای خود بودن و تولید مثل،

---

۱. Search vector

قوانینی در سیستمهای زیستی می‌باشند که به سختی می‌توان حتی بعضی از آنها را در سیستم‌های ساخت دست بشر یافت. همین امر محققین را بر آن داشته که سیستمهای طبیعی را بعنوان الگوی طراحی سیستمهای مهندسی مورد توجه قرار دهند. چنین تلاشهایی به ایجاد مجموعه روشهای بهینه‌سازی برگرفته از طبیعت منجر شده است که به دو زیر مجموعه اصلی تقسیم می‌شوند: روشهای مبتنی بر طبیعت جاندار و روشهای برگرفته از طبیعت بی‌جان. اکثر روشهای مبتنی بر طبیعت جاندار از فرآیند تکاملی جانداران در طبیعت ایده می‌گیرند. در این فرآیند، ویژگیهای جانداران بهبود می‌یابد تا بهتر بتوانند با محیط سازگار شوند و در رقابت با سایر جانداران برای دست‌یابی به منابع محدود طبیعی پیروز گردند. گروه عمده این زیر مجموعه، الگوریتمهای وراثتی[۱] می‌باشند که در فصلهای بعد برخی از ویژگیهای آنها مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

روشهای برگرفته از طبیعت بی‌جان در فرآیندهای فیزیکی موجود در طبیعت ریشه دارند و شناخته شده‌ترین روش این زیرمجموعه، شبیه سازی بازپخت فلزات[۲] است.

در روشهای برگرفته از طبیعت، ابتدا جمعیتی از نقاط به طور تصادفی از میان جوابها انتخاب و سپس مقدار تابع هدف به ازای تک‌تک نقاط جمعیت محاسبه می‌شود. در مرحله تولید جمعیت نقاط جدید، با کمک جمعیت موجود و استفاده از تابع توزیع احتمال مشخص و یا هر عملگر تصادفی دیگر، جمعیت نقاط دیگری تولید و مقدار تابع هدف به ازای هر یک از نقاط جمعیت بوجود آمده، محاسبه می‌شود. در اینجا جمعیت جدید با جمعیت مولد سنجیده شده و بر اساس این سنجش، جمعیت نقاط جدید برای مرحله بعد انتخاب می‌شوند.

روشهای بهینه‌سازی برگرفته از طبیعت، وابسته به گروه روشهای مستقیم بوده و شباهت زیادی به روشهای جستجوی تصادفی دارند. روشهای جستجوی تصادفی تنها از استراتژی جستجوی کلی برخوردارند، در حالیکه روشهای برگرفته از طبیعت به طور همزمان هر دو استراتژی جستجوی کلی و محلی را اجرا می‌کنند.

در بهینه‌سازی سازه‌ها با استفاده از الگوریتم وراثتی در هر نسل برای محاسبه محدودیتهای حاکم بر طرح، نیازمند تحلیل سازه می‌باشیم. تحلیل مستقیم سازه به خصوص سازه‌های با درجات آزادی زیاد مستلزم صرف زمانهای طولانی می‌باشد. بنابراین طبیعی است که در پی چاره‌ای برای کاهش این زمان باشیم. در این راستا، یکی از مؤثرترین کارها استفاده از روشهای مختلف تحلیل تقریبی سازه‌ها می‌باشد.

---

۱. Genetic algorithm

۲. Simulated annealing

۱-۵- روشهای تحلیل تقریبی سازه‌ها

با توجه به اینکه عموماً توابع محدودیتها بر حسب متغیرهای طراحی به صورت غیر صریح[۱] می باشند، بنابراین باید برای حل چنین مسائلی از روشهای بهینه سازی عددی سود جست. از طرف دیگر در صورت استفاده از روشهای مبتنی بر گرادیان، باید توابع هدف، محدودیتها و مشتقات آنها در طی عملیات بهینه‌سازی، صدها مرتبه برآورد شده که هر برآورد مستلزم یک تحلیل سازه می‌باشد و در نتیجه بایستی صدها مرتبه تحلیل سازه انجام شده که منجر به صرف زمان زیاد و کم شدن کارآیی عملیات می‌شود. برای حل این مشکل باید از روشهای تقریب سازی جهت تحلیل سازه همراه با تعداد محدودی تحلیل دقیق (اجزاء محدود) سازه استفاده شود. در حقیقت کلید افزایش راندمان عملیات بهینه‌سازی، تولید روشهای تقریبی با کیفیت بالا جهت تحلیل تقریبی سازه‌ها می‌باشد. در سالهای اخیر جهت محاسبات تقریبی و توسعه و بهبود آنها تحقیقات گسترده‌ای صورت گرفته است.

۱-۵-۱- روشهای تقریب سازی کلاسیک

عمدتاً این روشها مبتنی بر استفاده از سری تیلور بوده و طبیعتاً هر چه تعداد بیشتری از جملات این سری مورد استفاده قرار گیرد، نتایج بهتری حاصل خواهد شد. با توجه به اینکه در صورت در نظر گرفتن دو جمله اول سری تیلور، مشتقات مرتبه اول و در صورت در نظر گرفتن سایر جملات، مشتقات مرتبه بالاتر (دوم، سوم و ...) نیاز بوده و هر دفعه محاسبه مشتقات، خود مستلزم تحلیل سازه می‌باشد، لذا در صورت استفاده از تعداد جملات بیشتر، هزینه محاسبات بیشتر خواهد شد. در نتیجه از یک طرف بایستی با انتخاب تعداد بیشتر جملات، دقت تقریب سازی افزایش داده شده و از طرف دیگر با انتخاب تعداد مناسب و قابل قبولی از جملات، هزینه محاسبات کاهش داده شود. در این راستا تحقیقات زیادی انجام شده که در فصل سوم به تفصیل شرح داده شده‌اند.

خلاصه‌ای از اقدامات انجام شده در این راستا به شرح زیر می‌باشد:

بعضی از اصول محاسبات تقریبی بر اساس دو جمله اول سری تیلور در سالهای ۱۹۷۴ و ۱۹۷۶ ارائه گردید[۱ و ۲]. در سال ۱۹۷۹ روش ترکیبی درجه اول مورد بررسی و استفاده قرار گرفت[۳]. سپس در سال ۱۹۸۳ برای بهبود محاسبات تقریبی، استفاده از متغیر واسطه برای

---

۱. Implicit

متغیرهای طراحی (سطح و ممان اینرسی مقاطع) پیشنهاد شد[۴].

ایده تقریب سازی نیروها به جای تنشها و محاسبه تنشهای تقریبی بر اساس نیروهای به دست آمده، با کمک دو جمله اول سری تیلور در سالهای ۱۹۸۶و۱۹۸۷ ارائه شد و نتایج نشان داد که حساسیت نیروها به تغییرات سطح مقطع اعضا در سازه های فضایی زیاد نمی‌باشد[۵]. همچنین، در سال ۱۹۸۹ یک روش جدید برای محاسبات تقریبی تنشها با استفاده از دو جمله اول سری تیلور ارائه و مورد استفاده واقع شد[۶]. سپس با کمک دو جمله اول سری تیلور و استفاده از متغیر واسطه $y_i = \frac{1}{x_i}$ برای محاسبه تغییر مکانهای تقریبی، روشهای ترکیبی و تقریب سازی درجه دوم به طور مستقیم و معکوس در سال ۱۹۸۸ توسط هفتکا[۱] جمع بندی و ارائه گردید[۷].

در سال ۱۹۹۰ یک روش تقریب سازی دو نقطه ای با کمک سه جمله اول سری تیلور ارائه گردید[۸]. مقاله ای برای طراحی بهینه صفحات با محدودیت فرکانس و استفاده از ماتریسهای جرم، سختی و مقادیر ویژه تقریبی با کمک دو و سه جمله سری تیلور انتشار یافت[۹].

در سال ۱۹۹۴ با کمک تقریب سازی دو نقطه ای و با استفاده از متغیر واسطه $y_i = x_i^r$ طرح بهینه قابهای دو بعدی انجام شد[۱۰]. برای بهبود تقریب سازی دو نقطه ای در سال ۱۹۹۵ یک روش دیگر بر اساس سه جمله اول سری تیلور و با فرض مساوی بودن اعضای روی قطر ماتریس هسیان پیشنهاد گردید[۱۱]. سپس در سال ۱۹۹۵ یک روش تقریب سازی دو نقطه ای [۱۲] و به دنبال آن در سال ۲۰۰۰ نیز یک روش دیگر تقریب سازی دو نقطه ای ارائه گردید که در آن، کسر رایلی بر حسب متغیرهای واسطه تقریب زده شده و در این روش مشتقات دقیق مقادیر ویژه مورد استفاده واقع گردیدند[۱۳].

یک روش تقریب سازی سه نقطه ای با کمک سه جمله اول سری تیلور و با استفاده از متغیر واسطه $y_i = x_i^{P_i}$ در سال ۱۹۹۷ ارائه گردید[۱۴]. در سال ۱۹۹۷ طراحی بهینه شکل سازه ها با در نظر گرفتن سه جمله اول و اثر جملات بعدی سری تیلور و با کمک متغیر واسطه $y_i = x_i^{p_i}$ همراه با یک روش جدید برای محاسبه ماتریس هسیان ارائه شد[۱۵]. در سال ۱۹۸۷ تقریب سازی تنشها[۱۶] و همچنین استفاده از روشهای خطی، خطی معکوس و ترکیبی

---

۱. Haftka

در تقریب سازی مرتبه اول مقادیر و بردارهای ویژه در سال ۱۹۹۰ بررسی شد[۱۷]. در دو مقاله دیگر در سال ۱۹۹۷ و یک مقاله در سال ۱۹۹۸ برای طراحی بهینه سازه های مختلف با محدودیت فرکانس و تقریب سازی ماتریسهای جرم، سختی و مقادیر ویژه با روش خطی (دو جمله اول سری تیلور) و مرتبه دوم با ماتریس هسیان قطری با اعضای روی قطر نامساوی و با کمک متغیر واسطه مناسب ارائه گردید[۱۸ الی ۲۰].

یک روش جدید برای استفاده از تقریب سازی دو نقطه ای و محاسبات تقریبی ماتریس هسیان در سال ۱۹۹۸ ارائه شد[۲۱]. برای سازه های سه بعدی با محدودیت فرکانس، یک روش جدید تقریب سازی سه نقطه ای در سال ۲۰۰۰ پیشنهاد گردید[۲۲]. روش دیگری برای محاسبه کلیه اعضای ماتریس هسیان و استفاده از آن در تقریب سازی دو نقطه‌ای در سال ۱۹۹۸ ارائه شد[۲۳].

در سالهای ۱۹۹۳ و ۱۹۹۴ دو مقاله با مروری بر روشهای تقریب سازی در طراحی بهینه پیوسته و گسسته منتشر گردید[۲۴ و ۲۵]. همچنین، طراحی بهینه گسسته قابها و صفحات با روش دوگانه[۱] در سال ۱۹۹۶ طی دو مقاله پیشنهاد گردید[۲۶ و ۲۷].

در زمینه طراحی بهینه سازه‌ها در سالهای ۱۹۸۹، ۱۹۹۲ و ۱۹۹۳ سه کتاب چاپ شد[۲۸ الی ۳۰].

برای طراحی بهینه سازه‌ها تحت محدودیتهای تنش، تغییر مکان، فرکانس و اندازه پاسخ دینامیکی یک روش مؤثر و تقریبی برای محاسبه اندازه پاسخهای دینامیکی در مرجع[۳۱] بیان گردید. در این روش ابتدا منحنی شتاب - زمان زلزله با کمک سری فوریه نوشته شده و سپس بردارهای ویژه و ماتریسهای سختی و جرم سازه با کمک دو جمله اول سری تیلور و با انتخاب متغیر واسطه $y_i = x_i^{p_i}$ تقریب سازی شدند و در نهایت محدودیت فرکانس و اندازه پاسخ دینامیکی بر حسب اجزای حقیقی و موهومی تابع اندازه پاسخ به صورت تقریبی محاسبه و در نتیجه امکان طراحی بهینه سازه‌ها تحت اثر بارهای دینامیکی و با کمک محاسبات تقریبی میسر گردید.

در سال ۱۹۹۶، یک روش تقریب سازی چند نقطه ای با استفاده از درونیابی هرمیت و بر اساس اطلاعات به دست آمده برای تابع و مشتقاتش در نقاط طراحی قبل ارائه گردید[۳۲].

در سال ۲۰۰۰ روش دیگر تقریب سازی دو نقطه ای بر حسب متغیرهای خطی و معکوس

---

۱. Duality.