دانشگاه سمنان
دانشکده مهندسی مکانیک

پایان‌نامه دوره دکتری مهندسی مکانیک–طراحی کاربردی

بهینه سازی اندازه، شکل و توپولوژی سازه های گسسته با استفاده از روش های هیورستیک اصلاح یافته

توسط:

مجتبی شیخی

استاد راهنما:

دکتر علی قدوسیان

تابستان ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

آنان که ناتوان شدند که ما به توانایی برسیم، موهایشان سپید شد تا ما رو سپید باشیم

و عاشقانه سوختند تا گرما بخش وجود ما و روشن گر راه ما باشند.

تشکر و قدردانی

خداوندا ! کمک کن تا چنان باشم که رضایت تو در آن باشد.

از خداوند رحمان و رحیم که نعمت علم آموزی را به اینجانب عطا فرمود سپاسگزارم و از او می‌خواهم همچنان یاریم کند تا آنچه را که آموخته‌ام در طرق صحیح بکار گیرم و در راه خدمت به بندگانش بکار بندم.

بر خود لازم می دانم که مراتب قدر شناسی صادقانه خویش را از کلیه اساتید محترم دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه سمنان که در این دوره افتخار درک محضرشان را داشته ام، بالاخص استاد گرانقدر آقای دکتر علی قدوسیان که این رساله تحت هدایت های علمی ایشان به انجام رسید، ابراز نمایم. توفیق روز افزون را برای این بزرگواران از درگاه باری تعالی مسئلت می نمایم.

خدایا درمانده‌ام از دست خویش و به کمک و لطف تو محتاجم. می دانم از تو باید خواست و با تو باید گفت.

با احترام

مجتبی شیخی

چکیده

سازه‌های گسسته از جمله خرپاها و سازه‌های اسکلتی یکی از پرکاربردترین سازه‌ها در مسائل کاربردی مهندسی است. طراحی بهینه این سازه‌ها در سه دسته بهینه‌سازی اندازه، شکل و توپولوژی انجام می‌پذیرد. این رساله به بهینه‌سازی سازه‌های گسسته از جنبه‌های مختلف با استفاده از روش‌های هیورستیک می‌پردازد. برای این منظور چندین روش مختلف هیورستیک جدید و قدرتمند ارائه شده و سپس با استفاده از این روش‌ها به بهینه‌سازی سازه‌ها پرداخته شده است. برای بهینه‌سازی سازه‌ها با در نظر گرفتن توابع هدف یگانه و چندگانه به لحاظ اندازه و شکل از روش ترکیبی رقابت استعماری-گروه مورچه استفاده شده است. علاوه بر این برای یافتن موقعیت بهینه تکیه‌گاه‌های سازه، در این رساله از روش المان محدود اصلاح یافته برای تحلیل سازه و روش های هیورستیک استفاده شده است. نتایج حاصله در این رساله حاکی از قدرت بالای الگوریتم ارائه شده در یافتن نقطه بهینه مسئله با همگرایی بالا می باشد. برای بهینه‌سازی توپولوژی سازه‌ها دو روش هیورستیک یکی برای سازه‌ها با متغیرهای پیوسته و دیگری با متغیرهای گسسته برای مساحت مقطع اعضای آنها ارائه شده است. در روش ارائه شده برای یافتن توپولوژی سازه‌های گسسته با متغیرهای گسسته از مفهوم آنالیز حساسیت استفاده شده است. استفاده از این ایده، سرعت رسیدن به جواب بهینه را بالا برده و استفاده از عملگر جهش در الگوریتم، قدرت یافتن جواب بهینه کلی را افزایش داده است. در روش هیورستیک ارائه شده برای یافتن توپولوژی بهینه سازه‌های با متغیر پیوسته از ایده حداقل رشد سازه پایه استفاده شده است. نتایج به دست آمده از حل چند مثال استاندارد با استفاده از روش های هیورستیک پیشنهادی در این رساله برای یافتن توپولوژی بهینه، نشان دهنده قدرت آنها در یافتن سازه بهینه با سرعت همگرایی بالا نسبت به کارهای گذشته می باشد.

کلمات کلیدی: سازه‌های گسسته، بهینه‌سازی سازه، روش‌های هیورستیک، المان محدود اصلاح یافته، روش رقابت استعماری-گروه مورچه، منطق فازی، حداقل رشد سازه پایه، روش تدریجی هیورستیکی توپولوژی سازه ها، بهینه‌سازی چندهدفه توپولوژی.

فصل اول

مقدمه و ساختار رساله

۱-۱ مقدمه‌ای در مورد روش‌های بهینه‌سازی..... ۲
۱-۲ تاریخچه روش‌های بهینه‌سازی ۲
۱-۳ بیان مسئله بهینه‌سازی..... ۴
۱-۴ کاربردهای بهینه‌سازی در مهندسی ۵
۱-۵ طرح مسئله..... ۶
۱-۶ تاریخچه‌ی بهینه‌سازی سازه‌ها..... ۷
۱-۷ تقسیم بندی مسائل بهینه سازی سازه‌ها..... ۸
۱-۷-۱ پارامترهای هندسی..... ۸
۱-۸ ساختار رساله ۹
۱-۹ نوآوری‌های رساله..... ۱۰

فصل دوم

روش بهینه سازی هیورستیک ترکیبی رقابت استعماری–گروه مورچه

۲-۱ مقدمه..... ۱۴
۲-۲ الگوریتم بهینه سازی رقابت استعماری..... ۱۵
۲-۲-۱ چگونگی پیاده سازی..... ۱۷
۲-۳ الگوریتم بهینه سازی ترکیبی رقابت استعماری-گروه مورچه (ICACO) ۲۲
۲-۳-۱ اعمال قیود..... ۲۵

فصل سوم

بهینه سازی چند هدفه اندازه خرپاها به کمک روش رقابت استعماری–گروه مورچه و منطق فازی

۳-۱ مقدمه ۲۸
۳-۲ مروی بر کارهای انجام شده در این زمینه ۲۹
۳-۳ بهینه سازی چند هدفه با منطق فازی ۳۰

فصل چهارم

طراحی موقعیت بهینه تکیه‌گاه‌های سازه به کمک روش المان محدود اصلاح یافته

۴-۱ مقدمه ۴۴
۴-۲ مروری بر کارهای انجام شده برای طراحی موقعیت بهینه تکیه‌گاه‌ها ۴۴
۴-۳ تعریف مسئله ۴۵
۴-۴ تحلیل مسئله با المان محدود اصلاح یافته ۴۷
۴-۵ طراحی موقعیت بهینه تکیه‌گاه‌های سازه ۴۷

فصل پنجم

طراحی بهینه شکل سازه های گسسته به کمک روش رقابت استعماری–گروه مورچه

۵-۱ مقدمه ۵۸
۵-۲ مروری بر کارهای انجام شده ۵۸
۵-۳ بهینه سازی شکل سازه های اسکلتی ۶۰
۵-۳-۱ تعریف مسئله تحت بارگذاری چندگانه ۶۱
۵-۴ بهینه سازی شکل سازه های خرپایی ۷۲

فصل ششم

بهینه سازی سازه‌های گسسته به کمک روش تکاملی هیورستیکی توپولوژی سازه‌ها با متغیرهای گسسته

۶-۱ مقدمه ۸۰
۶-۲مروری بر کارهای گذشته ۸۱
۶-۳ الگوریتم بهینه سازی توپولوژی خرپا با متغیرهای گسسته ۸۴

فصل هفتم

بهینه سازی توپولوژی سازه‌های گسسته به کمک روش حداقل رشد سازه پایه با متغیرهای پیوسته

۷-۱ مقدمه ۱۰۲
۷-۲ الگوریتم بهینه سازی توپولوژی خرپا با متغیرهای پیوسته ۱۰۲
۷-۳ بهینه سازی توپولوژی چند سازه به کمک MGGSM ۱۰۴
۷-۴ بهینه سازی توپولوژی خرپا با تابع هدف چندگانه با متغیرهای پیوسته ۱۱۳

فصل هشتم

بحث و نتیجه‌گیری

۷-۱ نتیجه گیری ۱۲۰
۷-۲: پیشنهاد برای انجام کارهای آینده ۱۲۴

مراجع ۱۲۵

فهرست شکل ها

صفحه

شکل ۱-۱: شماتیک محاسبه میزان برگشت فنری ۶
شکل ۲-۱: حرکت کشور در حال توسعه به سمت کشور توسعه یافته ۱۸
شکل ۲-۲: فلوچارت روش بهینه سازی رقابت استعماری ۲۱
شکل ۲-۳: فلوچارت روش بهینه سازی ترکیبی رقابت استعماری-گروه مورچه ها ۲۴
شکل ۲-۴: چگونگی جلوگیری از خارج شدن کشور در حال توسعه از ناحیه امکان پذیر ۲۶
شکل ۳-۱: خرپای سه عضوی ۳۴
شکل ۳-۲: نمودار همگرایی و چگونگی تغییرات حداکثر قیود حاکم بر سازه خرپای سه عضوی ۳۵
شکل ۳-۳: چگونگی تغییر توابع هدف در حین فرایند بهینه سازی چند هدفه ۳۵
شکل ۳-۴: خرپای فضایی چهار عضوی ۳۷
شکل ۳-۵: نمودار همگرایی برای خرپای فضایی ۴ عضوی ۳۸
شکل ۳-۶: نمودار همگرایی برای حجم سازه (mm^3) و جابجایی گره ۱ (mm) برای خرپای فضایی ۴ عضوی در حین فرایند بهینه سازی چندگانه ۳۸
شکل ۳-۷: سازه خرپایی ۵۶ عضوی ۴۰
شکل ۳-۸: نمودار همگرایی و چگونگی تغییرات حداکثر قیود حاکم بر خرپای ۵۶ عضوی ۴۱
شکل ۳-۹: چگونگی تغییرات حجم سازه (mm^3) و جابجایی گره ۱ (mm) خرپای ۵۶ عضوی در فرایند بهینه سازی چند هدفه ۴۱
شکل ۴-۱: فلوچارت چگونگی محاسبه تابع هدف در مسئله ۴۸
شکل ۴-۲: تیر یکنواخت ساده با دو ساپورت ساده ۴۹
شکل ۴-۳: نمودار همگرایی به موقعیت بهینه ساپورت های سازه با روش رقابت استعماری ۵۰
شکل ۴-۴ الف: حداکثر ممان خمشی به ازای X/L مختلف برای سازه با دو ساپورت ساده ۵۲
شکل ۴-۴ ب: حداکثر ممان خمشی به ازای X/L مختلف برای سازه با دو ساپورت گیردار ۵۲
شکل ۴-۵: سازه اسکلتی با دو ساپورت الاستیک تحت بارگذاری چندگانه با در نظر گرفتن قید برای ساپورت ها ۵۳
شکل ۴-۶: روند رسیدن به موقعیت بهینه با روش ارائه شده برای سازه اسکلتی با در نظر گرفتن قید فاصله برای ساپورت ها ۵۴
شکل ۴-۷: چگونگی پیشرفت روش ارائه شده جهت رسیدن به موقعیت بهینه برای سازه اسکلتی بدون در نظر گرفتن قید فاصله ۵۵
شکل ۴-۸: سازه اسکلتی با موقعیت بهینه ساپورت های الاستیک ۵۶
شکل ۵-۱: سازه اسکلتی با دو عضو تیری ۶۳

شکل ۵-۲: نمودار همگرایی برای سازه با دو المان تیر با روش های هیورستیک ۶۴
شکل ۵-۳: شکل کلی سازه میشل ۶۶
شکل ۵-۴: نمودار همگرایی به شکل بهینه برای سازه میشل ۶۶
شکل ۵-۵: شکل بهینه سازه میشل ۶۷
شکل ۵-۶: شکل کلی پل با دو ساپورت ساده ۶۹
شکل ۵-۷: شکل بهینه سازه پل ۷۰
شکل ۵-۸: نمودار همگرایی به شکل بهینه برای سازه پل با روش های هیورستیک ۷۰
شکل ۵-۹: نمودار همگرایی به جواب بهینه و همچنین چگونگی تغییر قید جابجایی برای سازه میشل ۷۳
شکل ۵-۱۰: شکل خرپای فضایی ۲۵ عضوی ۷۵
شکل ۵-۱۱: نمودار همگرایی به جواب بهینه و چگونگی تغییر قید جابجایی برای سازه میشل ۷۶
شکل ۵-۱۲: شکل کلی خرپای ۳۷ عضوی تحت بارگذاری چندگانه ۷۷
شکل ۵-۱۳: نمودار همگرایی به شکل بهینه و نیزچگونگی تغییرات قیود مسئله در سازه پل ۷۸
شکل ۵-۱۴: شکل بهینه سازه پل ۳۷ عضوی ۷۸
شکل ۶-۱ خرپای زمینه ۱۱ عضوی با ۶ گره ۸۸
شکل ۶-۲ سازه با توپولوژی بهینه برای خرپای ۱۱ عضوی و ۶ گره ای ۸۹
شکل ۶-۳: نمودار همگرایی به توپولوژی بهینه برای سازه ۱۱ عضوی و ۶ گره ای برای حالت اول مجموعه مساحت های گسسته ۹۱
شکل ۶-۴: نمودار همگرایی به توپولوژی بهینه برای سازه ۱۱ عضوی و ۶ گره‌ای برای حالت دوم مجموعه مساحت های گسسته ۹۱
شکل ۶-۵: نمودار همگرایی به توپولوژی بهینه برای سازه ۱۱ عضوی و ۶ گره‌ای برای حالت سوم مجموعه مساحت های گسسته ۹۲
شکل ۶-۶: سازه زمینه با ۱۵ عضو و ۶ گره ۹۳
شکل ۶-۷: سازه با توپولوژی بهینه برای خرپای ۱۵ عضوی و ۶ گره‌ای برای حالت ۲ و ۳ مجموعه مساحت های گسسته و مراجع [۷۱] و [۸۸] ۹۴
شکل ۶-۸: نمودار همگرایی به توپولوژی بهینه برای سازه ۱۵ عضوی و ۶ گره‌ای درحالت ۱ ۹۶
شکل ۶-۹: نمودار همگرایی به توپولوژی بهینه برای سازه ۱۵ عضوی و ۶ گره‌ای برای حالت ۲ ۹۶
شکل ۶-۱۰: نمودار همگرایی به توپولوژی بهینه برای سازه ۱۵ عضوی و ۶ گره‌ای برای حالت ۳ ۹۶
شکل ۶-۱۱: سازه زمینه برای خرپای ۴۵ عضوی با ۱۰ گره ۹۷
شکل ۶-۱۲: سازه بهینه شده خرپای پایه ۴۵ عضوی و ۱۰ گره‌ای ۹۸

شکل ۶-۱۳: نمودار همگرایی به توپولوژی بهینه برای سازه ۴۵ عضوی و ۱۰ گره‌ای ۹۹
شکل ۷-۱: فلوچارت کلی روش MGGSM ۱۰۳
شکل ۷-۲: سازه خرپای ۱۲ گره‌ای با ۶۶ عضو ۱۰۴
شکل ۷-۳: توپولوژی بهینه خرپای ۱۲ گره‌ای با ۶۶ عضو گزارش شده در[۸۸] ۱۰۵
شکل ۷-۴: چگونگی رسیدن به توپولوژی بهینه با MGGSM در فازهای مختلف بهینه‌سازی ۱۰۵
شکل ۷-۵: نمودار همگرایی به توپولوژی بهینه خرپایی ۱۲ گره‌ای ۱۰۷
شکل ۷-۶: توپولوژی بهینه سازه خرپای ۱۲ گره‌ای با حداکثر مساحت in^2 ۳۵ در MGGSM ۱۰۷
شکل ۷-۷: چگونگی رسیدن به توپولوژی بهینه با استفاده از MGGSM در فازهای مختلف بهینه سازی در خرپای ۱۲ گره‌ای با حداکثر مساحت مقطع in^2 ۳۵ ۱۰۸
شکل ۷-۸: چگونگی رسیدن به توپولوژی بهینه با استفاده از MGGSM در فازهای مختلف بهینه سازی برای خرپای ۶ گره‌ای ۱۰۹
شکل ۷-۹: نمودار همگرایی به توپولوژی بهینه برای خرپای ۶ گره‌ای ۱۱۰
شکل ۷-۱۰: چگونگی رسیدن به توپولوژی بهینه با استفاده از MGGSM در فازهای مختلف بهینه سازی برای خرپای ۱۰ گره‌ای ۱۱۲
شکل ۷-۱۱: سازه خرپای ۶ گره‌ای تحت دو بار متمرکز ۱۱۵
شکل ۷-۱۲: نمودار پارتو به دست آمده از حل بهینه سازی چند هدفه توپولوژی ۱۱۶
شکل ۷-۱۳: توپولوژی های بهینه به دست آمده برای بهینه سازی توپولوژی خرپای ۶ گره‌ای ۱۱۶
شکل ۷-۱۴: سازه خرپایی ۸ گره ای ۱۱۷
شکل ۷-۱۵: نمودار پارتو برای خرپای ۸ گره ای حل بهینه سازی چند هدفه توپولوژی ۱۱۷
شکل ۷-۱۶: توپولوژی های بهینه به دست آمده برای بهینه سازی توپولوژی خرپای ۸ گره‌ای ۱۱۸

فهرست جداول

صفحه

جدول ۳-۱: مقایسه نتایج به دست آمده از بهینه سازی چند هدفه برای سازه خرپای ۳ عضوی ۳۶
جدول ۳-۲: نتایج حاصله برای بهینه سازی چند هدفه خرپای فضایی ۴ عضوی ۳۹
جدول ۳-۳: نتایج بهینه سازی چند هدفه خرپای ۵۶ عضوی ۴۲
جدول ۴-۱: مقایسه نتایج برای موقعیت بهینه ساپورت های سازه شکل (۴-۲) ۵۱
جدول ۴-۲: مقایسه نتایج برای موقعیت بهینه ساپورت های سازه اسکلتی با در نظر گرفتن قید فاصله ۵۴
جدول ۴-۳: مقایسه نتایج برای موقعیت بهینه ساپورت های سازه اسکلتی بدون در نظر گرفتن قید فاصله برای موقعیت ساپورت ها ۵۶
جدول ۵-۱: پارامترهای به کار رفته در روش های بهینه سازی هیورستیک ۶۳
جدول ۵-۲: بهترین نتیجه به دست برای طراحی بهینه شکل سازه اسکلتی دو عضوی ۶۴
جدول ۵-۳: نتایج آماری برای ۱۰۰ بار اجرای مختلف روش های مختلف برای بهینه سازی شکل سازه اسکلتی با دو عضو ۶۵
جدول ۵-۴: موقعیت بهینه گره های سازه برای رسیدن به شکل بهینه برای سازه میشل ۶۷
جدول ۵-۵: درصد کاهش مقدارممان خمشی حداکثر به وسیله روش های هیورستیک نسبت به روش انتقال تکاملی([۵۴]) ۶۷
جدول ۵-۶: نتایج آماری برای ۱۰۰ بار اجرای مختلف روش های مختلف برای بهینه سازی شکل سازه میشل ۶۸
جدول ۵-۷: موقعیت بهینه گره های سازه میشل برای رسیدن به حداقل تنش حداکثر در سازه ۶۹
جدول ۵-۸: موقعیت بهینه گره های سازه برای رسیدن به شکل بهینه برای سازه میشل ۷۱
جدول ۵-۹: درصد کاهش مقدارممان خمشی حداکثر به وسیله روش های هیورستیک نسبت به روش انتقال تکاملی ([۵۴]) ۷۱
جدول ۵-۱۰: نتایج آماری برای ۱۰۰ بار اجرای مختلف روش های مختلف برای بهینه سازی شکل سازه پل ۷۱
جدول ۵-۱۱: حداکثر ممان خمشی حداکثر برای سازه ۷۲
جدول ۵-۱۲: موقعیت بهینه مختصات گره ها و وزن سازه میشل ۷۴
جدول ۵-۱۳: حالت های بارگذاری اعمالی به خرپای فضایی ۲۵ عضوی (N) ۷۵
جدول ۵-۱۴: موقعیت بهینه مختصات گره ها و وزن خرپای فضایی ۲۵ عضوی ۷۶

جدول ۵-۱۵: موقعیت بهینه مختصات گره ها و وزن خرپای ۳۷ عضوی ۷۸
جدول ۶-۱: مقایسه مساحت اعضای سازه با توپولوژی بهینه برای خرپای ۱۱ عضوی و ۶ گره‌ای ۸۹
جدول ۶-۲: تنش در اعضای سازه با توپولوژی بهینه برای خرپای ۱۱ عضوی و ۶ گره‌ای(*ksi*) ۹۰
جدول ۶-۳: جابجایی در گره های سازه (*in*) با توپولوژی بهینه برای خرپای ۱۱ عضوی و ۶ گره‌ای ۹۰
جدول ۶-۴: مقایسه مساحت اعضای سازه با توپولوژی بهینه برای خرپای ۱۵ عضوی و ۶ گره‌ای ۹۴
جدول ۶-۵: تنش در اعضای سازه با توپولوژی بهینه برای خرپای ۱۵ عضوی و ۶ گره‌ای ۹۵
جدول ۶-۶: جابجایی در گره های سازه با توپولوژی بهینه برای خرپای ۱۵ عضوی و ۶ گره‌ای ۹۵
جدول ۶-۷: مقایسه مساحت اعضای سازه با توپولوژی بهینه خرپای ۴۵ عضوی و ۱۰ گره‌ای ۹۸
جدول ۶-۸: تنش در اعضای سازه با توپولوژی بهینه برای خرپای ۴۵ عضوی و ۱۰ گره‌ای(*psi*) ۹۹
جدول ۶-۹: جابجایی در گره های سازه با توپولوژی بهینه برای خرپای ۴۵ عضوی و ۱۰ گره‌ای ۹۹
جدول ۷-۱: مقایسه مساحت اعضای سازه با توپولوژی بهینه برای خرپای ۱۲ گره‌ای ۱۰۶
جدول ۷-۲: جابجایی در گره های سازه با توپولوژی بهینه برای خرپای ۱۲ گره‌ای (*in*) ۱۰۶
جدول ۷-۳: مشخصات توپولوژی بهینه برای خرپای ۱۲ گره‌ای با حداکثر مساحت مقطع in^2 ۱۰۸
۳۵ در الگوریتم MGGSM
جدول ۷-۴: توپولوژی های بهینه به دست آمده برای خرپای ۱۲ گره‌ای ۱۰۹
جدول ۷-۵: مقایسه مساحت اعضای سازه با توپولوژی بهینه برای خرپای ۶ گره‌ای ۱۱۰
جدول ۷-۶: تنش در اعضای سازه با توپولوژی بهینه برای خرپای ۶ گره‌ای ۱۱۱
جدول ۷-۷: جابجایی در گره های سازه با توپولوژی بهینه برای خرپای ۶ گره‌ای ۱۱۱
جدول ۷-۸: مقایسه مساحت اعضای سازه با توپولوژی بهینه برای خرپای ۱۰ گره‌ای ۱۱۲
جدول ۷-۹: تنش در اعضای سازه با توپولوژی بهینه برای خرپای ۱۰ گره‌ای (*psi*) ۱۱۲
جدول ۷-۱۰: جابجایی در گره های سازه با توپولوژی بهینه برای خرپای ۱۰ گره‌ای(*in*) ۱۱۳
جدول ۷-۱۱: مقایسه مشخصات بهینه اعضای سازه خرپای ۶ گره‌ای برای دو جواب پارتو ۱۱۶
جدول ۷-۱۲: مقایسه مشخصات بهینه اعضای سازه خرپای ۸ گره‌ای برای دو جواب پارتو ۱۱۸

فصل اول

مقدمه و ساختار رساله

خلاصه : در آغاز این فصل مقدمه و تاریخچه‌ای از بهینه‌سازی بیان شده و سپس به بیان دسته بندی بهینه‌سازی سازه‌ها پرداخته می شود. در انتها نیز رئوس مطالبی که در فصول آینده آورده شده است، ذکر می گردد.

فهرست فصل

۱-۱ مقدمه‌ای در مورد روش‌های بهینه‌سازی ۲
۱-۲ تاریخچه روش‌های بهینه‌سازی ۲
۱-۳ بیان مسئله بهینه‌سازی ۴
۱-۴ کاربردهای بهینه‌سازی در مهندسی ۵
۱-۵ طرح مسئله ۶
۱-۶ تاریخچه‌ی بهینه‌سازی سازه‌ها ۷
۱-۷ تقسیم بندی مسائل بهینه سازی سازه‌ها ۸
۱-۸ ساختار رساله ۹
۱-۹ نوآوری های رساله ۱۰

۱-۱ مقدمه‌ای در مورد روش‌های بهینه‌سازی

یکی از مسائل اساسی که انسان در زندگی روزمره امروزی با آن سر و کار دارد، انتخاب بهترین راه حل برای مسئله مورد نظر است. در دنیای پر رقابت امروز دیگر کافی نیست سیستمی طراحی شود که صرفاً دارای یک عملکرد خاص باشد، بلکه باید به بهترین سیستم ممکن با عملکرد مورد نظر و کارایی بالا دست پیدا کرد. بهترین سیستم به معنای سیستمی کارآمد، همه جانبه، منحصر به فرد و مقرون به صرفه می باشد. به عبارتی اگر چه ممکن است سیستم های متعددی بتوانند وظیفه مشابهی را انجام دهند ولی بعضی از آنها از بقیه بهترند.

بهینه‌سازی عبارت است از انتخاب یک راه حل برای تعیین منطقی بهترین نتیجه یا خروجی ممکن برای یک عملکرد یا سیستم معین به گونه‌ای که همزمان محدودیت ها، نیازها و قیود مسئله برآورده شود. در واقع هر مساله‌ای که لازم باشد در آن به پارامتر های معینی تحت یک سری قیود دست یافت، می تواند به عنوان یک مساله بهینه سازی مدل سازی گردد. بنابراین محدوده کاربرد روش طراحی بهینه تقریباً بدون محدودیت بوده و تنها میزان توانایی و مهارت طراح است که آن را محدود می کند[۱].

۱-۲ تاریخچه روش‌های بهینه‌سازی

گذشته‌ی روش‌های بهینه‌سازی را می توان در روزگار نیوتن، لاگرانژ و کوشی ردیابی کرد. بسط روش‌های بهینه‌سازی حساب دیفرانسیل با کارهای نیوتن و لایبنیتز ممکن گشت. حساب تغییرات توسط برنولی، اولر، لاگرانژ و ویرشتراس بنیان گذاری شد. یک روش بهینه‌سازی برای مسائل مقید، که شامل افزودن ضرایب مجهول می باشد به نام یابنده آن، لاگرانژ، نامگذاری شد. کوشی برای

اولین بار روش تندترین کاهش را در حل مسائل کمینه سازی نامقید به کار گرفت. با وجود سهم این افراد تا قرن بیستم پیشرفت بسیار اندکی حاصل شد. در این قرن کامپیوترهای سریع، به کارگیری روش های بهینه سازی را ممکن ساخت و تحقیقات بیشتر برای روش های جدید را بر انگیخت. پیشرفت های بعدی به روش های بهینه سازی ابعاد گسترده‌ای داد. این پیشرفت ها به چند زمینه جدید در تئوری بهینه سازی انجامید[۲].

بسط روش سیمپلکس در ۱۹۴۷ توسط دنتزیگ برای مسائل برنامه ریزی خطی، راه را برای توسعه روش های بهینه سازی مقید گشود. مطالعات کان و تاکر در ۱۹۵۱ برای شرایط لازم و کافی جواب بهینه مسائل برنامه ریزی ریاضی، زیر بنای تحقیقات بعدی در برنامه ریزی غیر خطی شد. سهم زوتندیک و روزن در اوایل دهه ۱۹۶۰ در برنامه ریزی غیر خطی بسیار با اهمیت بود. گاموری در زمینه‌ی بهینه سازی با اعداد صحیح که یکی از مهمترین و رو به گسترش ترین زمینه های بهینه سازی است و بیشتر کاربردهای دنیای واقعی در این طبقه از مسائل قرار می گیرد، پیشگام شد. دنتزیگ، چارنز و کوپر روش های بهینه سازی تصادفی را توسعه دادند. تمایل به بهینه سازی مسئله‌ای با بیش از یک هدف و با قید های فیزیکی، به توسعه روش های بهینه سازی چند هدفه انجامید. در دهه های اخیر نتایج محققین حاکی از آن بود که برای مسائل مهندسی که معمولاً در رده مسائل غیر خطی هستند، اغلب روش های بهینه سازی که تاکنون مطرح شده قادر به یافتن حل بهینه کلی مسئله نخواهند بود. بنابراین نیاز به روش های بهینه سازی دیگری که بتوانند در فضای حالت مسائل غیر خطی به طرف جواب بهینه سراسری حرکت کنند، احساس شد. به همین دلیل روش های بهینه سازی هیورستیک[1] (ابتکاری، کاوشی) مطرح گردیدند که نسبت به روش های بهینه سازی گذشته می‌توانند به سمت بهینه سراسری مسئله حرکت کنند. یکی از مشهورترین و قدیمی ترین روش های هیورستیک، روش الگوریتم ژنتیک است که بر اساس نظریه داروین ارائه شده است. این الگوریتم اولین بار توسط فراسر و بعد از آن توسط برمرمن و رید و همکارانش مطرح گردید. سپس جان هلند در ۱۹۷۵و گلدبرگ در ۱۹۸۹به توسعه آن پرداخت [۳]. با توجه به کارایی بالا، امروزه استفاده از روش های بهینه سازی هیورستیک در حال گسترش بوده و روش های جدید هیورستیک مطرح می گردد.

[1] Heuristic

۱-۳ بیان مسئله بهینه‌سازی

یک مسئله بهینه سازی را می توان به صورت یافتن بردار $X = \{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$ برای رسیدن به کمترین مقدار تابع هدف $f(X)$ با در نظر گرفتن قیدهای لازم به صورت رابطه (۱-۱) تعریف کرد.

$$Minimize\ f(x)$$
$$Subject\ to \begin{cases} g_i(X) \le 0 \quad i = 1,2,...,m \\ l_j(X) = 0 \quad j = 1,2,...,p \end{cases} \qquad (۱-۱)$$

در رابطه فوق X یک بردار n بعدی بوده و بردار طراحی نامیده می شود. $f(X)$ تابع هدف و $g_i(X)$ و $l_j(X)$ به ترتیب قیدهای نامساوی و مساوی هستند. مسائل بهینه سازی را می توان با در نظر گرفتن معیارهای مختلف به دسته های زیر تقسیم بندی کرد.

۱) دسته بندی بر مبنای وجود قیدها: مقید و نامقید

۲) دسته بندی بر اساس طبیعت معادلات مربوطه: دسته بندی مهم دیگری از مسائل بهینه سازی بر مبنای طبیعت تابع هدف و قیدها است. طبق این دسته بندی، مسائل بهینه سازی را می توان به مسائل بهینه سازی خطی، غیر خطی، درجه دوم و ... تقسیم بندی کرد. این دسته بندی از دیدگاه محاسباتی بسیار مفید است زیرا روش های زیادی وجود دارند که تنها برای حل یک دسته خاص از این مسائل بسط یافته اند. بنابراین اولین کار یک طراح، بررسی نوع مسئله‌ای است که با آن مواجه است. با این کار در بسیاری حالات نوع روش هایی که باید در حل مسئله به کار گرفته شوند مشخص می شود.

۳) در یک دسته بندی دیگر می توان روش های بهینه‌سازی را به دو دسته روش های کلاسیک و روش های هیورستیک تقسیم بندی کرد. روش های بهینه سازی هیورستیک در عین حال که نیازی به محاسبات پیچیده ندارند و پیاده سازی آنها ساده است، الگوریتم هایی قدرتمندند و توانایی فرار از دام مینیمم محلی را دارند. بنابراین با احتمال بیشتری به بهینه سراسری مسئله همگرا می شوند.

بیشتر مسائل طراحی سازه ها بیش از یک مینیمم محلی داشته و بسته به نقطه شروع این الگوریتم ها به یکی از مینیمم های محلی همگرا می شوند[۲]. در این روش ها، ساده ترین راه برای به دست آوردن یک جواب محلی بهتر این است که بهینه سازی از نقاط اولیه مختلفی که به شکل اتفاقی انتخاب شده‌اند، دوباره انجام شود تا امکان جواب های دیگر بررسی شود. با این وجود، برای مسائلی که تعداد زیادی متغیر دارند امکان نرسیدن به مینیمم کلی زیاد است، مگر آن که به تعداد دفعات زیادی بهینه سازی انجام شود که این کار احتیاج به زمان زیادی دارد. موضوع بهینه

سازی کلی زمینه‌ای است که پژوهش در آن فعال است و الگوریتم های جدیدی پیشنهاد می‌شوند و الگوریتم های قدیمی بهبود می یابند. اخیراً الگوریتم های هیورستیک که به عنوان ابزارهای بسیار مطلوب برای بهینه سازی که دنبال مینیمم کلی هستند مطرح شده‌اند. الگوریتم های بهینه سازی هیورستیک غالباً بر مبنای پدیده های طبیعی و قوانین فیزیکی بوده و در پیاده سازی آن ها از فرآیند انتخاب تصادفی استفاده می شود و با تصمیم سازی احتمالی هدایت می‌گردند.

۴) دسته بندی بر اساس نوع متغیرهای مسئله به لحاظ پیوسته و گسسته بودن: در صورتی که متغیرهای طراحی مسئله دارای مقادیر گسسته باشند، مساله به لحاظ داشتن مینیمم های محلی و چگونگی یافتن آنها دشوارتر می شود. قبل از هر چیز برای چنین مسائلی فضای طراحی ناپیوسته و نامتصل است و بنابراین اطلاعات مشتق یا بی فایده و یا تعریف نشده است. در درجه دوم، استفاده از متغیر های گسسته برای متغیر های طراحی سبب به وجود آمدن مینیمم های چندگانه که مربوط به ترکیب های مختلف متغیرها است، می شود (هر چند که مقدار تابع هدف برای مسئله با متغیر های پیوسته فقط یک مینیمم داشته باشد). یک راه منطقی برای حل مسائل بهینه سازی گسسته با مینیمم های چند گانه استفاده از فنون جستجوی اتفاقی در فضای امکان پذیر می باشد.

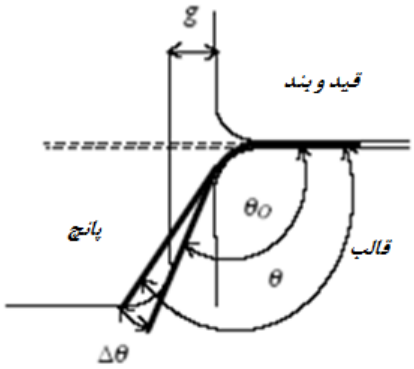
۱-۴ کاربردهای بهینه‌سازی در مهندسی

بهینه‌سازی در مفهوم گسترده‌ی خود، می تواند در حل هر مسئله مهندسی به کار گرفته شود. برای نشان دادن گستردگی این موضوع، به نمونه هایی از کاربردهای بهینه‌سازی در مهندسی اشاره می شود.

- طراحی سازه‌ها مانند قاب‌ها، پی ها، پل‌ها، برج‌ها، دکل‌ها، اسکلت ساختمان‌ها و سدها با هزینه و وزن حداقل و استحکام مورد نیاز
- طراحی هواپیما و سازه‌های فضایی با حداقل وزن ممکن
- طراحی بهینه سازوکارها، بادامک‌ها، چرخ دنده‌ها، ماشین‌های ابزار و دیگر اجزای مکانیکی
- انتخاب شرایط ماشین کاری در فرایندهای برش فلزات برای حداقل شدن هزینه تولید
- طراحی تجهیزات حمل مواد مانند نقاله‌ها، کامیون‌ها و واگن‌ها با هزینه حداقل
- طراحی پمپ‌ها، توربین‌ها و تجهیزات انتقال حرارت با بازده حداکثر
- برنامه ریزی، کنترل و زمان بندی بهینه تولید
- طراحی بهینه شبکه‌های خط لوله برای فرایندهای صنعتی

- برنامه ریزی تعمیرات، نگهداری و جایگزینی تجهیزات برای کاهش هزینه‌های بهره برداری
- طراحی بهینه سیستم های کنترل

به عنوان یک مثال مکانیکی می توان به بهینه‌سازی میزان برگشت فنری یک ورق اشاره کرد. در این مساله تعیین ضخامت ورق و فاصله بین ماتریس جهت ایجاد کمترین برگشت فنری مد نظر می باشد. برگشت فنری اختلاف بین دو زاویه ورق در حالت های قبل و بعد از بارگذاری است. در این مسئله هدف رسیدن به حداقل این اختلاف زاویه بعد از تغییر شکل است. در شکل (۱-۱) چگونگی تغییر شکل ورق قبل و بعد از بارگذاری نشان داده شده است.



شکل ۱-۱: شماتیک محاسبه میزان برگشت فنری

۱-۵ طرح مسئله

سازه‌های گسسته نظیر خرپاها، تیرها، سازه‌های اسکلتی مانند اسکلت ساختمان‌ها، پل‌ها، سازه‌های فضایی و دریایی و ... دارای کاربرد عملی وسیعی در مهندسی هستند. یافتن سازه بهینه به لحاظ اندازه، شکل و توپولوژی، تاثیر بسزایی در رسیدن به طراحی مناسب به لحاظ استحکام و سختی سازه‌ها دارد. از جمله معیارهای مهم در طراحی سازه‌ها می‌توان به کاهش دادن مقدار حداکثر ممان خمشی، کاهش مقدار حداکثر تنش در اعضای سازه، کاهش جابجایی گره‌های سازه، افزایش فرکانس‌های طبیعی و افزایش بار بحرانی ناشی از کمانش در سازه اشاره کرد. با توجه به اهمیت بهینه‌سازی سازه‌های گسسته و کاربردهای فراوان این سازه‌ها در مسائل مهندسی در این رساله با استفاده از روش‌های هیورستیک جدید ارائه شده، به یافتن طراحی بهینه این سازه‌ها به لحاظ‌های مختلف پرداخته شده است. روش‌های پیشنهادی در این رساله توانسته‌اند به سازه‌ای با مشخصات مکانیکی بهینه تر و کارایی بهتر با سرعت همگرایی بالاتری نسبت به کارهای انجام شده در گذشته دست پیدا کنند.

در ابتدای هر فصل این رساله بعد از انجام مروری بر کارهای گذشته به ارائه هدف آن فصل و علت مطرح شدن آن پرداخته می شود.

۱-۶ تاریخچه‌ی بهینه‌سازی سازه‌ها

نخستین تلاش‌ها در موضوع بهینه سازی سازه‌ها، در مورد سازه‌های خرپایی انجام پذیرفت. ماکسول[1] نخستین کسی بود که این دو مفهوم را در سال ۱۸۷۲ همزمان به کار برد. کار او مینیمم کردن وزن خرپاهایی بود که نیرو در تمام اعضای آنها علامت یکسانی داشت. ولی این کار به اندازه کافی عمومیت نداشت تا قابل تعمیم به همه انواع سازه‌های خرپایی باشد. ۳۲ سال طول کشید تا میشل[2] توانست بر پایه کارهای ماکسول، شرط بهینگی مربوط به خرپاهای با وزن مینیمم را ارائه دهد و در سال ۱۹۰۴ اصول بنیادین تئوری خود موسوم به تئوری چیدمان بهینه[3] را معرفی کند [۴]. رزوانی و همکارانش در سال ۱۹۶۴ نظریه تئوری چیدمان را برای تیر ها گسترش دادند.

به موازات تئوری چیدمان بهینه، بهینه سازی محاسباتی مسایل سازه‌ای نیز توسعه پیدا کرد [۵]. هر چند که این روش ها برای مسائل نسبتاً کوچک و ساده مناسب می باشند ولی مسائلی که به وسیله روش های کلاسیک بهینه سازی محاسباتی حل شده اند، پاسخ های استانداردی برای مقایسه نتایج حاصل از روش های دیگر بهینه سازی فراهم آورده اند. پیشرفت تکنولوژی رایانه این امکان را برای محققان فراهم آورد تا محاسبات ریاضی را با روش های چرخه‌ای نسبتاً ساده تر و در مدت زمان کمتری انجام دهند. با ترکیب روش های بهینه سازی و روش‌های عددی تحلیل سازه ها مانند روش اجزای محدود یا روش مرز محدود روش های سریع تر و کاراتری ارائه شده اند. در دهه های اخیر، روش هایی برای بهینه سازی سازه های پیوسته و گسسته نیز ارائه شده اند که از مهمترین آنها می توان به روش همگن سازی[4] [۶]، روش ریز ساختار همسانگرد با تابع جریمه[5] (SIMP)، روش بهینه سازی تکاملی سازه ها[6] (ESO) [۷] و اخیراً روش های بهینه‌سازی هیورستیک اشاره نمود. در ادامه این رساله، در ابتدای هر فصل به کارهای انجام شده در این زمینه به کمک روش‌های هیورستیک اشاره می‌شود.

---

[1] Maxwell
[2] Michell
[3] Optimal Layout Theory
[4] Homogenization approach
[5] Solid Isotropic Material with Penalization
[6] Evolutionary topology optimization