دانشکده فنی

گروه مهندسی عمران

رساله برای دریافت درجه دکتری مهندسی عمران گرایش سازه

# طرح بهینه سازه‌ها در مقابل زلزله با استفاده از روشهای پیشرفته هوش مصنوعی

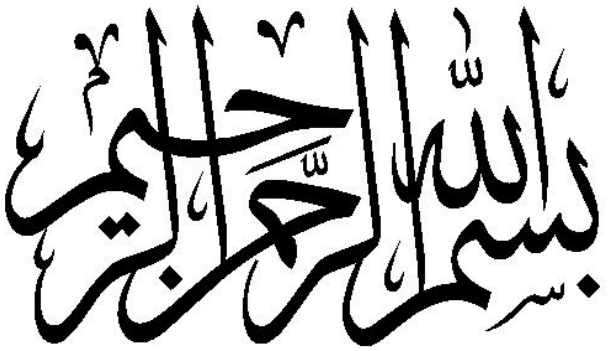
استاد راهنما:

دکتر عیسی سلاجقه

مؤلف:

سعید قلی‌زاده قلعه‌عزیز

تیر ماه ۱۳۸۸


بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی

گروه مهندسی عمران

رساله برای دریافت درجه دکتری مهندسی عمران گرایش سازه

# طرح بهینه سازه‌ها در مقابل زلزله با استفاده از روشهای پیشرفته هوش مصنوعی

استاد راهنما:

دکتر عیسی سلاجقه

مؤلف:

سعید قلی‌زاده قلعه‌عزیز

تابستان ۱۳۸۸

این پایان‌نامه به عنوان یکی از شرایط احراز درجه دکتری به

**بخش مهندسی عمران**
**دانشکده فنی و مهندسی**
**دانشگاه شهید باهنر کرمان**

تسلیم شده و هیچ گونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل از دوره مذکور شناخته نمی‌شود.

**دانشجو** : سعید قلی‌زاده قلعه‌عزیز

**استاد راهنما** : دکتر عیسی سلاجقه

**داور ۱** : دکتر محمدتقی احمدی

**داور ۲** : دکتر حمید محرمی

**داور ۳** : دکتر حامد صفاری

**داور ٤** : دکتر سعید شجاعی

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی یا نماینده دانشکده :

حق چاپ محفوظ و مخصوص دانشگاه است.

**تقدیم به:**

پدر بزرگوار و مادر دلسوزم

**تقدیم به:**

همسر عزیز و فرزند دلبندم

**تشکر و قدردانی**

اگرچه زبان از ذکر عنایات و الطاف الهی قاصر است اما خداوند متعال را سپاسگزارم که در کلیه مراحل انجام این تحقیق لطف و کرمش را شامل حالم نمود و آتش عشق به تحصیل علم را در وجودم شعله‌ور ساخت.

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 محمدتقی احمدی، حمید محرمی، حامد صفاری و سعید شجاعی 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 نموده و از درگاه خداوند متعال آرزوی توفیق برایشان دارم.

از پدر و مادر بزرگوار و مهربانم که تمامی زندگی خود را مرهون حمایتهای عاشقانه ایشان هستم، بینهایت سپاسگزارم.

از همسر فداکار و فرزند 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 تمام دوستان عزیزم جناب آقایان سید محمد سیدپور، رضا کامیاب مقدس، امیدعلی سماواتی، حبیب اکبرزاده بنگر، احد اوریا، مجید توانگری، بهنام شفیعی، مصطفی مشایخی، محسن خطیبی‌نیا، صادق ناصرعلوی و سایر دوستانی که در طول دوره دکتری و انجام مراحل مختلف این رساله، بنده را مورد لطف و مرحمت خویش قرار دادند نیز صمیمانه قدردانی و تشکر می‌نمایم.

سعید قلی‌زاده قلعه‌عزیز

تابستان ۱۳۸۸

## چکیده

در این رساله طراحی بهینه سازه‌ها در برابر بارهای ناشی از تاریخچه زمانی زلزله با استفاده از روشهای پیشرفته هوش مصنوعی یا محاسبات نرم مورد نظر می‌باشد. اگرچه در زمینه آنالیز و طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، تحقیقات فراوانی به انجام رسیده‌اند، ولیکن در زمینه طرح بهینه در برابر زلزله، با توجه به تعداد و کیفیت مقالات چاپ شده و طرحهای پژوهشی انجام شده، مطالعات و پژوهشهای اندکی انجام یافته‌اند. در ایران در زمینه آنالیز و طرح بهینه سازه‌ها با روشهای تقریبی، که علاوه بر کاهش زمان محاسبات، باعث کاهش خطا در تحلیل و طرح نهایی می‌شود نیز ندرتاً کاری انجام شده‌است. در کشورهای خارجی نیز در زمینه طرح بهینه سازه‌ها در مقابل زلزله با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی به دو دلیل، مطالعات چندانی انجام نشده است. اول آنکه محققانی که در زمینه طرح بهینه کار می‌کند کمتر در زمینه زلزله صاحب‌نظر هستند. دیگر آنکه طرح بهینه سازه‌ها در برابر زلزله چنان زمانبر است که استفاده از روشهای معمول عملاً بی‌فایده بوده و چاره‌ای به جز استفاده از روشهای تقریبی نمی‌باشد و محققینی که در این زمینه کار می کنند بسیار اندکند.

فرآیند بهینه‌سازی سازه‌ها شامل دو بخش عمده محاسباتی می‌باشد: بخش جستجوی فضای طراحی و بخش تحلیل سازه. عمده‌ترین قسمت محاسبات مورد نیاز بهینه‌سازی مربوط به بخش تحلیل سازه است که خود متاثر از نوع الگوریتم جستجو می‌باشد. تکنیکهای هوش مصنوعی یا محاسبات نرم در این رساله در دو حوزه جستجوی فضای طراحی و تقریب‌سازی تحلیل سازه جهت کاهش قابل توجه میزان محاسبات به کار گرفته شده‌اند. در حوزه جستجو از الگوریتم‌های تکاملی الهام گرفته شده از طبیعت مانند ژنتیک و جامعه پرندگان و ترکیب آنها استفاده شده است. در حوزه تقریب‌سازی تحلیل لحظه به لحظه سازه‌ها چند نوع سیستم عصبی هوشمند پیشنهاد شده است. این سیستم‌های عصبی هوشمند با استفاده از ترکیب پیشرفته‌ترین تکنیکهای ریاضی و ابزارهای هوش مصنوعی طراحی شده‌اند و نسبت به شبکه‌های عصبی معمولی از عملکرد محاسباتی بهتری برخوردارند. نتایج عددی بدست آمده در این رساله بخوبی بیانگر عملکرد محاسباتی بسیار خوب روشهای ارائه شده در تقلیل قابل ملاحظه زمان کل بهینه‌سازی سازه‌ها می‌باشند.

# فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**

## فصل اول: کلّیات


۱-۱- مقدمه ..... ۱
۱-۲- کلیات بهینه‌سازی ..... ۱
۱-۳- فرمولبندی مسائله بهینه‌سازی ..... ۲
۱-٤- روشهای بهینه‌سازی ..... ۳
۱-۵- بهینه‌سازی و تقریب‌سازی مبتنی بر محاسبات نرم ..... ۵
۱-٦- سابقه تحقیق ..... ۸
۱-۵-۲- روش و محتوی تحقیق ..... ۹


## فصل دوم: بهینه‌سازی


۲-۱- مقدمه ..... ۱۰
۲-۲- الگوریتم وراثتی استاندارد (Standard Genetic Algorithm) ..... ۱۱
۲-۲-۱- بهینه‌سازی توابع مقید ریاضی ..... ۱٤
۲-۲-۲- تابع آزاد معادل ..... ۱٤
۲-۲-۳- جمعیت اولیه ..... ۱۵
۲-۲-۴- شاخص شایستگی ..... ۱۵
۲-۲-۵- ضریب شایستگی ..... ۱٦
۲-۲-۶- جمعیت موثر ..... ۱۹
۲-۲-۷- کدگذاری جمعیت موثر ..... ۱۹
۲-۲-۸- انتخاب جفت و پیوند ..... ۲۲

۲-۲-۹- جهش ژنها ..... ۲٤
۲-۲-۱۰- کدگشایی نسل جدید ..... ۲۵
۲-۲-۱۱- تکرار الگوریتم ..... ۲٦
۲-۲-۱۲- شرط همگرایی در الگوریتم وراثتی ..... ۲٦
۲-۲-۱۳- فرآیند الگوریتم وراثتی ..... ۲٦
۲-۳- الگوریتم وراثتی اصلاح‌شده (Improved Genetic Algorithm) ..... ۲۸
۲-٤- الگوریتم زیرجمعیتهای مجازی با مقادیر حقیقی (Real-Coded VSP Algorithm) ..... ۳۲
۲-۵- الگوریتم جامعه پرندگان با مقادیر حقیقی (Particle Swarm Optimization) ..... ۳٤
۲-۵-۱- فرمولبندی الگوریتم PSO ..... ۳۵
۲-٦- الگوریتم PSO-VSP با مقادیر حقیقی (Real-Coded PSO-VSP Algorithm) ..... ۳۸
۲-۷- فرمولبندی مسالهٔ بهینه‌سازی سازه‌ها در برابر زلزله ..... ٤۰

## فصل سوم: شبکه‌های عصبی

۳-۱- مقدمه ..... ٤٤
۳-۲- نرون بیولوژیکی و نرون مصنوعی ..... ٤۵
۳-۳- شبکه عصبی مصنوعی ..... ٤۹
۳-۳-۱- شبکه‌های تک‌لایه ..... ٤۹
۳-۳-۲- شبکه‌های چندلایه ..... ۵۰
۳-۴- توابع تحریک شبکه‌های عصبی ..... ۵۱
۳-۴-۱- تابع تحریک پله‌ای ..... ۵۲
۳-۴-۲- تابع تحریک خطی ..... ۵۲
۳-۴-۳- تابع تحریک سیگموئید ..... ۵۲
۳-۴-۴- تابع تحریک بنیادی شعاعی ..... ۵۳
۳-۵- بایاس ..... ۵۳
۳-۶- آموزش شبکه عصبی ..... ۵٤

۳-۶-۱- آموزش نظارت‌شده ..... ٥٤
۳-۶-۲- آموزش نظارت‌نشده ..... ٥٥
۳-۶-۳- مشکلات آموزش ..... ٥٥
۳-۷- مدهای عملکردی شبکه عصبی ..... ٥٦
۳-۸- شبکه عصبی انتشار برگشتی (Back-Propagation) ..... ٥٧
۳-۸-۱- فرمولبندی آموزش شبکه‌های چند لایه با الگوریتم انتشار برگشتی ..... ٥٨
۳-۸-۲- بهبودبخشی قابلیت تعمیم شبکه BP ..... ٦٣
۳-۸-۲-۱- بهبودبخشی قابلیت تعمیم بوسیله Regularization ..... ٦٣
۳-۸-۲-۲- بهبودبخشی قابلیت تعمیم بوسیله Early Stopping ..... ٦٣
۳-۹- شبکه عصبی تابع بنیادی شعاعی (Radial Basis Function) ..... ٦٥
۳-۹-۱- نکات قابل توجه در خصوص شبکه تابع بنیادی شعاعی ..... ٦٦
۳-۹-۱-۱- نرمال‌سازی بردارهای ورودی ..... ٦٨
۳-۹-۱-۲- خوشه‌بندی بردارهای ورودی ..... ٦٩
۳-۹-۱-۳- ساختار نرون‌های RBF ..... ٦٦
۳-۹-۱-۴- ساختار نرون‌های خطی لایه خروجی (Linear) ..... ٧٠
۳-۹-۲- آموزش شبکه RBF ..... ٧١
۳-۹-۲-۱- طراحی دقیق ..... ٧٢
۳-۹-۲-۲- طراحی کارآمد ..... ٧٤
۳-۱۰- شبکه عصبی رقابتی (Competitive) ..... ٧٤
۳-۱۱- شبکه عصبی خودسازمانده (Self-Organizing Map) ..... ٧٧

## فصل چهارم: موجک‌ها و سیستمهای استنتاج فازی

۴-۱- مقدمه ..... ٨٠
۴-۲- تبدیلات موجکی ..... ٨٠
۴-۲-۱- توابع مادر موجکی ..... ٨١

۴-۲-۱-۱- موجک هار ..... ۸۱
۴-۲-۱-۲- موجک دابیچیز ..... ۸۲
۴-۲-۱-۳- موجک سیملت ..... ۸۲
۴-۲-۱-۴- موجک کویفلت ..... ۸۳
۴-۲-۱-۵- موجک مکزیکن‌هت ..... ۸۳
۴-۲-۱-۶- موجک مشتقات گوس ..... ۸٤
۴-۲-۱-۷- موجک مختلط مشتقات گوس ..... ۸۵
۴-۲-۱-۸- موجک مختلط مورلت ..... ۸٦
۴-۲-۲- تبدیل پیوسته موجکی ..... ۸۷
۴-۲-۲- تبدیل گسسته موجکی ..... ۸۸
۴-۳- سیستمهای استنتاج فازی ..... ۹۰
۴-۳-۱- مجموعه فازی ..... ۹۰
۴-۳-۲- تابع عضویت مثلثی ..... ۹۲
۴-۳-۳- تابع عضویت گوسی ..... ۹۲
۴-۳-۴- تابع عضویت ذوزنقه‌ای ..... ۹۳
۴-۳-۵- تابع عضویت زنگوله‌ای شکل تعمیم‌یافته ..... ۹٤
۴-۳-۶- قوانین ''اگر- سپس'' فازی ..... ۹۵
۴-۳-۷- سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی ..... ۹۵
۴-۳-۷-۱- ساختار ریاضی ANFIS ..... ۹٦

## فصل پنجم: سیستم‌های عصبی هوشمند

۵-۱- مقدمه ..... ۱۰۰
۵-۲- شبکه‌های عصبی موجکی ..... ۱۰۰
۵-۳- شبکه‌های عصبی WRBF ..... ۱۰۱
۵-۴- سیستم‌های عصبی هوشمند ..... ۱۰۲

۵-۴-۱- مزیتهای محاسباتی INS ..... ۱۰۶
۵-۴-۲- نکات قابل توجه در خصوص INS ..... ۱۰۷
۵-۴-۳- محدودیتهای INS ..... ۱۰۸
۵-۵- شبکه تابع بنیادی شعاعی خودسازمانده (SORBF) ..... ۱۰۹
۵-۶- شبکه تابع بنیادی شعاعی خودسازمانده فازی (FSORBF) ..... ۱۱۰
۵-۶-۱- واحد کلاسبندی ..... ۱۱۱
۵-۶-۱-۱- تعیین فرکانسهای تاثیرگذار با استفاده از ANFIS ..... ۱۱۱
۵-۶-۱-۲- تعیین تعداد بهینه گروه‌ها با استفاده از SA ..... ۱۱۴
۵-۶-۱-۳- کلاسبندی سازه‌ها برحسب پریودهای مهم در $m_s$ گروه با استفاده از SOM ..... ۱۱۶
۵-۶-۲- واحد پیش‌بینی ..... ۱۱۷

## فصل ششم: مثال‌های عددی و نتیجه‌گیری

۶-۱- مقدمه ..... ۱۲۱
۶-۲- بخش اول: بهینه‌سازی سازه‌ها با محدودیت فرکانس ..... ۱۲۱
۶-۲-۱- مثال اول: خرپای ۷۲ عضوی آلومینیومی ..... ۱۲۱
۶-۲-۲- مثال دوم: شبکه دولایه ۲۰۰ عضوی ..... ۱۲۶
۶-۳- بخش دوم: بهینه‌سازی سازه‌ها در برابر زلزله ..... ۱۳۲
۶-۳-۱- مثال سوم: تقریب‌سازی جابجایی بام قاب برشی سه طبقه فولادی ..... ۱۳۲
۶-۳-۲- مثال چهارم: تقریب‌سازی جابجایی گره فوقانی خرپای ۱۰ عضوی فولادی ..... ۱۳۸
۶-۳-۳- مثال پنجم: بهینه‌سازی قاب برشی ۵ طبقه در برابر زلزله با استفاده از VSP و SORBF .. ۱۴۳
۶-۳-۴- مثال ششم: بهینه‌سازی خرپای ۷۲ عضوی در برابر زلزله با استفاده از VSP و SORBF .. ۱۵۱
۶-۳-۵- مثال هفتم: بهینه‌سازی قاب برشی ۵ طبقه در برابر زلزله با استفاده از PSO و FSORBF ... ۱۵۶
۶-۳-۶- مثال هشتم: بهینه‌سازی قاب سه بعدی ۶ طبقه در برابر زلزله با استفاده از PSO و FSORBF .... ۱۶۵
۶-۳-۷- مثال نهم: بهینه‌سازی قاب خمشی سه بعدی ۱۰ طبقه فولادی در برابر زلزله با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی PSO-AVSP و شبکه‌های FWRBF ..... ۱۷۱

۶-۴- خلاصه و نتیجه‌گیری ..... ۱۸۲
۶-۵- پیشنهاد برای تحقیقات بعدی ..... ۱۸۶

**مراجع** ..... ۱۸۷

**ضمیمه: صفحه اول مقالات چاپ‌شده** ..... ۱۹۷

## فهرست جداول


جدول (۲-۱) : اعضای دامنه و رشته‌های وابسته به آنها ..... ۲۱

جدول (٦-۱): گروه‌بندی اعضای خرپای ۷۲ عضوی آلومینیومی ..... ۱۲۲

جدول (٦-۲): مقاطع عرضی قابل دسترس برای خرپای ۷۲ عضوی آلومینیومی ..... ۱۲۳

جدول (٦-۳): نتایج آموزش و آزمایش شبکه‌های عصبی BP و WBP ..... ۱۲٤

جدول (٦-٤): مشخصات VSP ..... ۱۲۵

جدول (٦-۵): نتایج بهینه‌سازی خرپای ۷۲ عضوی ..... ۱۲۵

جدول (٦-٦): خطای بین فرکانسهای پیش‌بینی‌شده و دقیق طرحهای بهینه ..... ۱۲٦

جدول (٦-۷): گروه‌بندی اعضای شبکه دو لایه ۲۰۰ عضوی ..... ۱۲٦

جدول (٦-۸): مقاطع عرضی قابل دسترس برای شبکه دو لایه ۲۰۰ عضوی ..... ۱۲۷

جدول (٦-۹): نتایج آموزش و آزمایش شبکه‌های عصبی RBF و WRBF ..... ۱۲۸

جدول (٦-۱۰): نتایج بهینه‌سازی شبکه دو لایه ۲۰۰ عضوی ..... ۱۳۱

جدول (٦-۱۱): خطای بین فرکانسهای پیش‌بینی‌شده و دقیق طرحهای بهینه شبکه دو لایه..... ۱۳۱

جدول (٦-۱۲): مقاطع عرضی قابل دسترس برای قاب برشی سه طبقه فولادی ..... ۱۳۳

جدول (٦-۱۳): مجموعه آموزش برای قاب برشی سه طبقه فولادی..... ۱۳٤

جدول (٦-۱٤): نتایج گروه‌بندی..... ۱۳۵

جدول (٦-۱۵): نتایج گروه‌بندی..... ۱۳۵

جدول (٦-۱٦): rmse به تفکیک گروه‌ها..... ۱۳٦

جدول (٦-۱۷): $R^2$ به تفکیک گروه‌ها..... ۱۳٦

جدول (٦-۱۸): درصد خطای ماکزیمم به تفکیک گروه‌ها..... ۱۳٦

جدول (٦-۱۹): rmse به تفکیک گروه‌ها بعد از بهبودبخشی قابلیت تعمیم ..... ۱۳۷

جدول (٦-۲۰): $R^2$ به تفکیک گروه‌ها بعد از بهبودبخشی قابلیت تعمیم ..... ۱۳۷

جدول (٦-۲۱): درصد خطای ماکزیمم به تفکیک گروه‌ها بعد از بهبودبخشی قابلیت تعمیم ..... ۱۳۷

جدول (٦-۲۲): مقاطع عرضی قابل دسترس برای خرپای ۱۰ عضوی ..... ۱۳۹

جدول (٦-۲۳): گروه‌بندی اعضای خرپای ۱۰ عضوی..... ۱۳۹

جدول (٦-٢٤): rmse به تفکیک گروه‌ها ..... ١٤١
جدول (٦-٢٥): $R^2$ به تفکیک گروه‌ها ..... ١٤١
جدول (٦-٢٦): درصد خطای ماکزیمم به تفکیک گروه‌ها ..... ١٤١
جدول (٦-٢٧): rmse به تفکیک گروه‌ها بعد از بهبودبخشی قابلیت تعمیم ..... ١۴٢
جدول (٦-٢٨): $R^2$ به تفکیک گروه‌ها بعد از بهبودبخشی قابلیت تعمیم ..... ١۴٢
جدول (٦-٢٩): درصد خطای ماکزیمم به تفکیک گروه‌ها بعد از بهبودبخشی قابلیت تعمیم ..... ١۴٢
جدول (٦-٣٠): مقاطع عرضی قابل دسترس برای قاب برشی ۵ طبقه ..... ١٤٤
جدول (٦-٣١): نتایج آزمایش شبکه RBF کلی و SORBF ..... ١۴٧
جدول (٦-٣٢): نتایج آزمایش SORBF به تفکیک گروه‌های سه‌گانه ..... ١۴٧
جدول (٦-٣٣): نتایج آزمایش شبکه RBF کلی و SORBF بعد از بهبودبخشی قابلیت تعمیم . ١۴٩
جدول (٦-٣٤): نتایج بهینه‌سازی ..... ١۴٩
جدول (٦-٣٥): گروه‌بندی اعضای خرپای ٧٢ عضوی ..... ١۵٢
جدول (٦-٣٦): مقاطع عرضی قابل دسترس برای خرپای ٧٢ عضوی ..... ١۵٢
جدول (٦-٣٧): نتایج آزمایش SORBF به تفکیک گروه‌های سه‌گانه ..... ١۵٣
جدول (٦-٣٨): نتایج بهینه‌سازی ..... ١۵۴
جدول (٦-٣٩): خطاهای پاسخهای تقریبی و دقیق سازه‌های بهینه بدست آمده با تحلیلهای تقریبی .....١۵۴
جدول (٦-٤٠): مقایسه ماکزیمم مقادیر پاسخهای سازه‌های بهینه با مقادیر مجازشان ..... ١۵۵
جدول (٦-٤١): نتایج جستجوی جامع با استفاده از ANFIS برای مثال پنجم ..... ١۵٧
جدول (٦-٤٢): نتایج اجرای SA به ازائ مقادیر مختلف $r_a$ ..... ١۵٨
جدول (٦-٤٣): نتایج آزمایش شبکه‌های RBF، RBF+ANFIS و FSORBF ..... ١۵٩
جدول (٦-٤٤): نتایج آزمایش FSORBF به تفکیک کلاسها ..... ١۶٠
جدول (٦-٤۵): نتایج آزمایش RBF و RBF+ANFIS در ازائ افزایش تعداد جفتهای آموزشی ١۶٠
جدول (٦-٤٦): نتایج بهینه‌سازی در ١٠ اجرای مستقل با استفاده از شبکه RBF ..... ١۶١
جدول (٦-٤٧): نتایج بهینه‌سازی در ١٠ اجرای مستقل با استفاده از شبکه RBF+ANFIS ١۶٢
جدول (٦-٤٨): نتایج بهینه‌سازی در ١٠ اجرای مستقل با استفاده از شبکه FSORBF ..... ١۶٢
جدول (٦-٤٩): نتایج نهایی بهینه‌سازی ..... ١۶٣

جدول (٦-٥٠): مقاطع عرضی قابل دسترس برای قاب سه بعدی ۶ طبقه ..... ۱۶۶
جدول (٦-٥١): نتایج جستجوی جامع با استفاده از ANFIS برای مثال هشتم ..... ۱۶۶
جدول (٦-٥٢): نتایج آزمایش شبکه‌های RBF+ANFIS و FSORBF ..... ۱۶۸
جدول (٦-٥٣): نتایج آزمایش FSORBF به تفکیک کلاسها ..... ۱۶۸
جدول (٦-٥٤): نتایج بهینه‌سازی ..... ۱۶۹
جدول (٦-٥٥): خطاهای پاسخهای تقریبی و دقیق سازه‌های بهینه بدست آمده با تحلیلهای تقریبی ..... ۱۶۹
جدول (٦-٥٦): مقایسه ماکزیمم مقادیر پاسخهای سازه‌های بهینه با مقادیر مجازشان ..... ۱۷۰
جدول (٦-٥٧): اطلاعات مربوط به زلزله‌های مختلف ..... ۱۷۳
جدول (٦-٥٨): مقاطع عرضی قابل دسترس برای قاب سه بعدی ۱۰ طبقه ..... ۱۷۵
جدول (٦-٥٩): نتایج جستجوی جامع با استفاده از ANFIS برای مثال نهم ..... ۱۷۷
جدول (٦-٦٠): نتایج آزمایش شبکه WRBF در پیشبینی مقادیر پریودهای مهم ..... ۱۷۷
جدول (٦-٦١): نتایج آزمایش شبکه FWRBF در پیشبینی پاسخهای دینامیکی ..... ۱۷۸
جدول (٦-٦٢): نتایج بهینه‌سازی ..... ۱۷۹
جدول (٦-٦٣): خطاهای پاسخهای تقریبی و دقیق سازه‌های بهینه بدست آمده با تحلیلهای تقریبی ..... ۱۸۰
جدول (٦-٦٤): مقایسه ماکزیمم مقادیر پاسخهای سازه‌های بهینه با مقادیر مجازشان ..... ۱۸۰

## فهرست اشکال


شکل (۲-۱): پیوند یک و دو نقطه‌ای..... ۲۳

شکل (۲-۲): پیوند یکنواخت ..... ۲٤

شکل (۲-۳): عملکرد عملگر جهش..... ۲۵

شکل (۲-۴): فرآیند الگوریتم وراثتی استاندارد ..... ۲۷

شکل (۲-۵): فرآیند الگوریتم VSP ..... ۳۱

شکل (۲-۶): فرآیند الگوریتم PSO ..... ۳۷

شکل (۲-۷): فرآیند الگوریتم PSO-VSP ..... ۳۹

شکل (۲-۸): تبدیل قیود وابسته به زمان به قیود مستقل از زمان ..... ۴۲

شکل (۳-۱): نواحی اصلی یک نرون بیولوژیکی ..... ٤۵

شکل (۳-۲): ساختار یک نرون مصنوعی ..... ٤۷

شکل (۳-۳): ساختار یک شبکه تک‌لایه ..... ۵۰

شکل (۳-٤): ساختار یک شبکه دولایه ..... ۵۸

شکل (۳-۵): روند آموزش شبکه عصبی ..... ٦۲

شکل (۳-٦): منحنی نمایش تابع تحریک نرونهای RBF ..... ٦٦

شکل (۳-۷): سطح پاسخ یک نرون RBF با دو ورودی ..... ٦۷

شکل (۳-۸): مدل ریاضی یک نرون RBF ..... ۷۰

شکل (۳-۹): مدل ریاضی یک نرون خطی لایه خروجی ..... ۷۱

شکل (۳-۱۰): ساختار یک شبکه RBF ..... ۷۱

شکل (۳-۱۱): ساختار کلی CNN ..... ۷۵

شکل (۳-۱۲): دو بردار که باهم زاویه $\theta$ ساخته‌اند ..... ۷٦

شکل (۳-۱۳): حالتی دو بعدی از نحوه عملکرد شبکه رقابتی در حین آموزش ..... ۷٦

شکل (۳-۱٤): ساختار یک شبکه خودسازمانده ..... ۷۸

شکل (۳-۱۵): همسایگی به شعاع 1 و 2 حول نرون 13 ..... ۷۹

شکل (۳-۱٦): توپولوژی نرونهای SOM ..... ۷۹

شکل (٤-١): تابع مادر موجک هار ..... ٨٢
شکل (٤-٢): موجکهای db2 تا db10 ..... ٨٢
شکل (٤-٣): موجکهای sym2 تا sym8 ..... ٨٣
شکل (٤-٤): موجکهای coif1 تا coif5 ..... ٨٣
شکل (٤-٥): موجک مادر مکزیکن‌هت ..... ٨٤
شکل (٤-٦): موجک مادر gaus8 ..... ٨٥
شکل (٤-٧): موجک cgau8 ..... ٨٦
شکل (٤-٨): موجک مختلط مورلت ..... ٨٦
شکل (٤-٩): تابع عضویت مثلثی ..... ٩٢
شکل (٤-١٠): تابع عضویت گوسی ..... ٩٣
شکل (٤-١١): تابع عضویت ذوزنقه‌ای ..... ٩٤
شکل (٤-١٢): تابع عضویت زنگوله‌ای شکل تعمیم‌یافته ..... ٩٤
شکل (٤-١٣): ساختار نمونه ANFIS در مدل فازی سوگنو ..... ٩٦
شکل (٥-١): پوشش فضای ورودی با نرونهای RBF یکسان ..... ١٠٣
شکل (٥-٢): پوشش فضای ورودی با تعداد بیشتر نرونهای RBF با Receptive Field کم ... ١٠٤
شکل (٥-٣): شبکه RBF کلی ..... ١٠٥
شکل (٥-٤): ساختار INS ..... ١٠٥
شکل (٥-٥): آرایش نرونهای SOM قبل a) و بعد b) از آموزش ..... ١١٠
شکل (٥-٦): فرآیند آموزش FSORBF، بلوک A: تولید داده، بلوک **B**: واحد کلاسبندی، بلوک **C**: واحد پیش‌بینی ..... ١١٩
شکل (٦-١): خرپای ٧٢ عضوی آلومینیومی ..... ١٢٢
شکل (٦-٢): a) تابع سیگموئید و b) تابع POLYWOG1 ..... ١٢٣
شکل (٦-٣): مقایسه خطاهای شبکه‌های عصبی BP و WBP در تقریبسازی $F_1$ ..... ١٢٤
شکل (٦-٤): مقایسه خطاهای شبکه‌های عصبی BP و WBP در تقریبسازی $F_3$ ..... ١٢٤
شکل (٦-٥): لایه‌ها پایین، بالا و جان شبکه دو لایه ٢٠٠ عضوی فولادی ..... ١٢٧

شکل (٦-٦): مقایسه خطاهای شبکه‌های عصبی RBF و WRBF در تقریبسازی $F_1$ ..... ۱۲۹
شکل (٦-٧): مقایسه خطاهای شبکه‌های عصبی RBF و WRBF در تقریبسازی $F_3$ ..... ۱۲۹
شکل (٦-٨): مقایسه خطاهای شبکه‌های عصبی RBF و WRBF در تقریبسازی $F_5$ ..... ۱۳۰
شکل (٦-٩): مقایسه خطاهای شبکه‌های عصبی RBF و WRBF در تقریبسازی $F_7$ ..... ۱۳۰
شکل (٦-١٠): قاب برشی سه طبقه فولادی ..... ۱۳۲
شکل (٦-١١): زلزله ناغان ..... ۱۳۳
شکل (٦-١٢): خرپای ۱۰ عضوی ..... ۱۳۸
شکل (٦-١٣): مولفه S-N زلزله ال-سنترو ..... ۱۳۸
شکل (٦-١٤): rmse شبکه RBF کلی و INS ..... ۱۴۰
شکل (٦-١٥): $R^2$ شبکه RBF کلی و INS ..... ۱۴۰
شکل (٦-١٦): درصد خطای ماکزیمم شبکه RBF کلی و INS ..... ۱۴۰
شکل (٦-١٧): قاب برشی ۵ طبقه ..... ۱۴۳
شکل (٦-١٨): زلزله ال-سنترو ..... ۱۴۴
شکل (٦-١٩): خوشه‌ای شدن نرونهای SOM بعد از آموزش شبکه SOM با توپولوژیهای مختلف .. ۱۴۵
شکل (٦-٢٠): الگوهای پاسخهای دینامیکی سازه‌های قرار گرفته در کلاسهای ۱ تا ۳ برای
(a) جابجایی طبقه پنجم و (b) جابجایی نسبی ماکزیمم ..... ۱۴۶
شکل (٦-٢١): پاسخهای دینامیکی تقریبی و دقیق سازه بهینه ..... ۱۴۸
شکل (٦-٢٢): پاسخهای تقریبی و دقیق سازه‌های بهینه بدست آمده با تحلیلهای تقریبی ..... ۱۵۰
شکل (٦-٢٣): خرپای ۷۲ عضوی ..... ۱۵۱
شکل (٦-٢٤): تنش در گروه ۷ سازههای بهینه بدست آمده با استفاده از RBF و SORBF ..... ۱۵۵
شکل (٦-٢٥): خطاهای مربوط به پیش‌بینی پریودهای موثر دادهای آزمایشی ..... ۱۵۹
شکل (٦-٢٦): جابجایی طبقه پنجم سازه‌های بهینه بدست آمده با استفاده از شبکه‌های RBF،
RBF+ANFIS و FSORBF ..... ۱۶۴
شکل (٦-٢٧): قاب سه بعدی ۶ طبقه فولادی ..... ۱۶۵
شکل (٦-٢٨): قیود فعال سازه‌های بهینه بدست آمده با استفاده از RBF+ANFIS و FSORBF ..... ۱۷۰
شکل (٦-٢٩): قاب خمشی سه بعدی ۱۰ طبقه فولادی ..... ۱۷۱

شکل (٦-٣٠): طیف طرح الاستیک 5% میرای UBC و طیفهای متناظر با زلزله‌ها ..... ١٧٤
شکل (۶-۳۱): فرآیند کلی کار در مثال نهم ..... ۱۷۶
شکل (۶-۳۲): تاریخچه همگرایی فرآیندهای بهینه‌سازی ..... ۱۷۹
شکل (۶-۳۳): پاسخهای دینامیکی سازه بهینه بدست آمده با الگوریتم PSO-AVSP و با استفاده از FWRBF ..... ۱۸۲