بسم الله الرحمن الرحيم

١٠٨٩٥

۸۷۱/۱۰۹۶۳۳
۸۷-۱۲-۲۱

ارزیابی رفتار کمانشی اعضای فشاری با استفاده از شبکهٔ عصبی

رامین بهرامی‌نژاد

دانشکده فنی – دانشگاه اورمیه

گروه عمران

زمستان ۱۳۸۶

پایان‌نامه برای دریافت درجهٔ کارشناسی ارشد

مهندسی عمران – سازه

۱۳۸۷/۱۲/۲۱

استاد راهنما :

دکتر محمدرضا شیدایی

۱۰۸۹۳۵

۱۵-۵۹۳۵

پایان نامه آقای رامین بهرامی شایسته تاریخ ۸۶/۱۱/۳۰ شماره ۸۶/۱۱/۲۹ مورد پذیرش هیات محترم

داوران با رتبه عالی و نمره ۱۹/- قرار گرفت.

۱- استاد راهنما و رئیس هیئت داوران : محمدرضا شیدائی

۲- استاد مشاور: ———

۳- داور خارجی : حسن شرکی

٤- داور داخلی : سعید دوره

۵- نماینده تحصیلات تکمیلی : حمیدرضا کرمی

حق طبع و نشر مطالب این رساله
در انحصار دانشگاه ارومیه می‌باشد

تقدیم به

پدر و مادرم که وجودم را از آنها دارم.

تقدیم به

پدر و مادرم که زیبائی دنیایم را از آنها دارم.

تقدیم به

پدر و مادرم که شکوه آخرتم را از دعای خیر آنان دارم.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیدهٔ فارسی ۱
فصل اول: مقدمه ۳
۱-۱ شرحی بر تاریخچه پایداری اعضای فشاری ۳
۱-۲ شبکه عصبی مصنوعی: ٤
۱-۳ استفاده از شبکه عصبی مصنوعی جهت بررسی رفتار کمانشی اعضای فشاری ٥
۱-٤ اهداف پروژه ٦
۱-٥ رئوس مطالب پایان نامه ۷
فصل دوم: انواع روش‌های محاسبهٔ بار کمانشی و استخراج مسیر کمانش عضو فشاری ۹
۲-۱ مقدمه ۹
۲-۲ بار بحرانی ستون اولر ۱۰
۲-۳ تئوری خطی ستون ۱۲
۲-٤ تئوری تغییر شکل‌های بزرگ برای ستون‌ها ۱۲
۲-٥ رفتار ستون‌های معیوب ۱٥
۲-٥-۱ ستون با انحناء اولیه ۱٥
۲-٦ کمانش غیرارتجاعی ستون‌ها ۱٦
۲-٦-۱ تئوری مدول مماسی ۱۷
۲-٦-۲ تئوری مدول دوگانه ۱۷
۲-٦-۳ تئوری شانلی برای رفتار غیرارتجاعی ستون ۱۸
۲-۷ روش بسته فرم پاریس [۲۲] ۲۱
۲-۷-۱ مقاطع لوله‌ای جدار نازک ۲۳
۲-۷-۲ مقاطع جدار کلفت ۲٤
۲-۷-۳ مقایسه نتایج حاصله از روش بسته فرم با نتایج آزمایشگاهی ۲۷
۲-۸ روش‌های بسته فرم الیشاکوف جهت تحلیل پایداری اعضای فشاری[۲۸] ۲۷
۲-۸-۱ فرمول بندی روش نوول ۲۷
۲-۹ روش بسته فرم چن ۲۹
۲-۹-۱ رهیافت حل مسأله ۲۹
۲-۹-۲ مدل غیر الاستیک ۲۹

۲-۹-۳ ماتریس سختی مماسی ۳۰
۲-۹-٤ معادلات کلی تعادل ۳۲
۲-۹-٥ روند حل مسأله ۳۳
۲-۹-٦ نتایج عددی: ۳٤
۲-۱۰ معرفی روش اجزای محدود ۳۸
۲-۱۱ روش‌های استخراج مسیرهای غیرخطی پیش کمانش ٤۳
۲-۱۲ روش طول کمان ٤٥
۲-۱۲-۱ موارد استفاده از روش طول کمان ٤٥
۲-۱۳ خلاصه و نتیجه‌گیری ٤۸
فصل ۳: بنیان‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی و کاربرد آن در سازه ٥۱
۳-۱ مقدمه ٥۱
۳-۲ سلول عصبی مصنوعی ٥۲
۳-۳ توابع تحریک ٥۳
۳-٤ شبکه‌های عصبی مصنوعی تک‌لایه ٥٦
۳-٥ شبکه‌های عصبی مصنوعی چندلایه ٥۷
۳-٥-۱ تابع تحریک غیرخطی ٥۷
۳-٦ شبکه‌های بازگشتی ٥۸
۳-۷ آموزش شبکهٔ عصبی ٥۹
۳-۸ تربیت پرسپترون ٥۹
۳-۹ آموزش ویدرو- هاف ٦۱
۳-۱۰ الگوریتم انتشار برگشتی ٦۱
۳-۱۱ ساختار شبکه انتشار برگشتی ٦۱
۳-۱۱-۱ سلول عصبی انتشار برگشتی ٦۱
۳-۱۱-۲ شبکهٔ چندلایه انتشار برگشتی ٦۳
۳-۱۲ نگرشی کلی بر آموزش شبکه ٦٤
۳-۱۲-۱ حرکت به پیش ٦٥
۳-۱۲-۲ برگشت به عقب ٦٦
۳-۱۲-۲-۱ تنظیم وزن‌های لایهٔ خروجی ٦٦
۳-۱۲-۲-۲ تنظیم وزن‌های لایهٔ پنهان ٦۸
۳-۱۳ اندازهٔ حرکت ٦۹
۳-۱٤ نحوهٔ ارائه زوج‌های آموزشی به شبکه ۷۰
۳-۱٥ کاربردهای شبکهٔ عصبی در تحلیل سازه‌ها ۷۰
۳-۱٦ پیش‌بینی خیز سازه‌های فضاکار ۷۱

۳-۱۷ بهینه‌سازی سازه‌های فضاکار با استفاده از الگوریتم ژنتیک اصلاح شده توسط شبکهٔ عصبی..... ۷۲
۳-۱۷-۱ تابع هدف..... ۷۳
۳-۱۷-۲ متغیرهای مساله..... ۷۳
۳-۱۷-۳ قیود مساله..... ۷۳
۳-۱۸ پیش‌بینی بار بحرانی با استفاده از شبکه عصبی..... ۷۵
۳-۱۹ محاسبهٔ بار خرابی سازه‌ها به کمک شبکهٔ عصبی..... ۷۷
۳-۲۰ استفاده از شبکهٔ عصبی در کنترل فعال سازه‌ها..... ۷۸
۳-۲۱ تعیین شدت آسیب‌دیده‌گی در المان‌های سازه‌ای به کمک شبکهٔ عصبی..... ۸۱
۳-۲۲ خلاصه و نتیجه‌گیری..... ۸۲
فصل ٤: استخراج رفتار کمانشی عضو فشاری با استفاده از شبکه عصبی..... ۸٤
٤-۱ مقدمه..... ۸٤
٤-۲ مدلسازی عضو فشاری..... ۸۵
٤-۳ تعیین رفتار کمانشی اعضای فشاری بروش اجزای محدود..... ۸٦
٤-٤ اخذ داده‌ها..... ۸۹
٤-۵ مقایسه نتایج بدست آمده از روش المان محدود..... ۹۱
٤-٦ آموزش شبکهٔ عصبی..... ۹۹
٤-۷ استفاده از شبکه آموزش دیده جهت پیش‌بینی بردارهای جدید..... ۱۰۳
٤-۸ آنالیز حساسیت و بررسی نحوهٔ تأثیر پارامترهای فعال در باربحرانی..... ۱۰۹
٤-۹ انجام آنالیز حساسیت با استفاده از شبکه عصبی..... ۱۰۹
٤-۱۰ انجام آنالیز حساسیت نسبت به پارامتر ناکاملی اولیه..... ۱۱۰
٤-۱۱ انجام آنالیز حساسیت نسبت به پارامتر لاغری..... ۱۱۵
٤-۱۲ انجام آنالیز حساسیت بار بحرانی نسبت به پارامتر تغییرشکل محوری..... ۱۲۰
٤-۱۳ استخراج نمودار سه بعدی بار بحرانی در برابر لاغری و ناکاملی اولیه..... ۱۲۱
٤-۱٤ خلاصه و نتیجه‌گیری..... ۱۲۵
فصل ۵: نتیجه‌گیری..... ۱۲۸
۵-۱ نتیجه‌گیری..... ۱۲۸
۵-۲ توصیه‌های مدلسازی به کمک شبکهٔ عصبی..... ۱۲۹
۵-۳ پیشنهاد مطالعات آینده..... ۱۳۰
مراجع..... ۱۳۱
چکیدهٔ انگلیسی..... ۱۳٦

فهرست اشکال و نمودارها

عنوان — صفحه

شکل۲-۱: ستون اولر ۱۰
شکل۲-۲: رفتار ستون اولر ۱۱
شکل۲-۳: تغییر شکل‌های بزرگ یک ستون ۱۳
شکل۲-٤: منحنی بار – تغییر شکل ستون برای تغییر شکل‌های بزرگ ۱٤
شکل۲-۵: ستون با انحناء اولیه ۱۵
شکل۲-٦: منحنیهای بار – تغییر شکل ستون‌ها با انحناء اولیه ۱٦
شکل۲-۷: تئوری مدول مماسی ۱۷
شکل۲-۸: توزیع تنش‌ها به علت انحنای ناشی ازکمانش (تئوری ضریب الاستیسیتهٔ دوگانه) ۱۸
شکل۲-۹: تئوری شانلی – رفتار ستون واقعی ۱۹
شکل۲-۱۰: منحنی بار تغییرمکان با استفاده از تئوری شانلی ۲۱
شکل۲-۱۱: پارامترهای عضو فشاری مورد نظر و ابعاد آن ۲۱
شکل۲-۱۲: توزیع تنش فرض شده توسط پاریس جهت استخراج رابطه P-δ ۲۳
شکل۲-۱۳: ابعاد و هندسه مقطع جدار نازک ۲۳
شکل۲-۱٤: ابعاد و هندسه مقاطع جدار کلفت ۲٤
شکل۲-۱۵: تاثیرات نسبت جداره به شعاع بر روی منحنی $\overline{N} - \theta$ ۲۵
شکل۲-۱٦: تاثیرات نسبت جداره به شعاع خارجی بر روی منحنی P ۲٦
شکل۲-۱۷: نمودار تاثیر تنش تسلیم بر روی مسیر پس کمانشی تئوری وطول ستون ثابت ۲٦
شکل۲-۱۸: مقایسه نمودارهای آزمایشگاهی و تئوری بدست آمد از روش بسته فرم پاریس ۲۷
شکل۲-۱۹: نمودار تنش-کرنش فولاد ۳۰
شکل۲-۲۰: توضیع تنش و کرنش بعد از تسلیم شدن مقطع ۳۱
شکل۲-۲۱: عضو تغییرشکل یافته ۳۲
شکل۲-۲۲: مقایسه نتایج روش حاضر و نتایج سوگیموتو-چن ۳۵
شکل۲-۲۳: نمودار بار – تغییرمکان محوری برای ناکاملی‌های اولیه مختلف ۳٦
شکل۲-۲٤: مقایسه نمودار بار – تغییرشکل جانبی بدست آمده از روش تئوری وروش تجربی شرمان برای شرایط تکیه‌گاهی دو سر گیردار با ضریب بار جانبی =λ۰ ..... ۳۷
شکل۲-۲۵: مقایسه نمودار بار – تغییرشکل جانبی بدست آمده از روش تئوری وروش تجربی شرمان برای شرایط تکیه‌گاهی دو سر گیردار با ضریب بار جانبی= λ۰.۱ ..... ۳۷

شکل۲-۲۷: مقایسه نمودار بار – تغییرشکل جانبی بدست آمده از روش تئوری وروش تجربی شرمان برای شرایط تکیه‌گاهی دو سر گیردار با ضریب بار جانبی= ۰.٤λ ۳۸
شکل۲-۲۸: مقایسه نمودار بار – تغییرشکل جانبی بدست آمده از روش تئوری وروش تجربی شرمان برای شرایط تکیه‌گاهی دو سر گیردار با ضریب بار جانبی= ۰.۸λ ۳۸
شکل۲-۲۹: مقایسه نمودار بار بحرانی– بارگذاری عرضی بدست آمده از روش تئوری و روش تجربی شرمان برای شرایط تکیه‌گاهی دو سر گیردار ۳۸
شکل۲-۳۰: نمودار رفتار ستون تحت کشش و فشار با استفاده از رابطه مارشال ٤۳
شکل۲-۳۱: روش نیوتن رافسون ٤٤
شکل ۲-۳۳: روش نیوتن رافسون اصلاح شده ٤٤
شکل۲-۳۲: روش نیوتن رافسون تکه‌ای ٤٤
شکل۲-۳٤: روش‌های استخراج مسیر غیرخطی کمانش ٤٥
شکل ۲-۳۵: انواع حالات نمودار بار- تغییرمکان ٤٦
شکل۲-۳٦: روش ریکس – ومپنر ٤۸
شکل۲-۳۷: روش وسلز ٤۸
شکل۲-۳۸: روش رام ٤۹
شکل۲-۳۹: روش کریسفیلد ٤۹
شکل ۳-۱ : سلول عصبی بیولوژیکی ٥۲
شکل ۳-۲ : سلول عصبی مصنوعی ٥۳
شکل ۳-۳: سلول عصبی مصنوعی با تابع تحریک ٥٤
شکل ۳-٤ : تابع تحریک سیگموید ٥٤
شکل ۳-٥ : تابع تانژانت هیپربولیک ٥٥
شکل ۳-٦ : شبکه عصبی مصنوعی تک لایه ٥٦
شکل ۳-۷ : شبکهٔ عصبی مصنوعی دولایه ٥۷
شکل ۳-۸ : شبکهٔ عصبی مصنوعی تک لایه ٦۰
شکل ۳-۹ : سلول عصبی مصنوعی با تابع تحریک ٦۲
شکل ۳-۱۰ : تابع تحریک سیگموید ٦۲
شکل ۳-۱۱ : شبکه انتشار برگشتی دولایه ٦٤
شکل ۳-۱۲ :تربیت یک وزن در لایه خروجی ٦۷
شکل ۳-۱۳ : تربیت وزن در یک لایه پنهان ٦۸
شکل ۳-۱٤ : شبکه دولایه فضاکار و گروه بندی اعضای آن ۷۱
شکل ۳-۱۵ : نتایج بدست آمده از شبکه عصبی برای خیز سازه‌های فضاکار ۷۲
شکل ۳-۱٦: شبکهٔ دو لایهٔ ۹٦ عضوی ۷٤
شکل۳-۱۷: نتایج به دست آمده از شبکه به ازای ورودی‌های جدید ۷٦

شکل ۳-۱۸ : داده‌های به کار رفته جهت آموزش شبکه عصبی..... ۷۶
شکل ۳-۱۹:شرایط هندسی و بارگذاری قاب سه طبقه..... ۷۸
شکل ۳-۲۰: نحوهٔ تخریب قاب و محل تشکیل مفاصل پلاستیک در ستون..... ۷۸
شکل ۳-۲۱:سازهٔ ۵ طبقه دارای کنترل فعال..... ۷۹
شکل ۳-۲۲: شتاب نیروی وارده به سازه..... ۸۰
شکل ۳-۲۳:پاسخ سازه در مقابل نیروی وارده بدون تاثیر سیستم کنترل..... ۸۰
شکل ۳-۲٤:پاسخ سازه در مقابل نیروی وارده با تاثیر سیستم کنترل ۸۰
شکل ۳-۲۵: نتایج حاصل از آزمایش شبکه به وسیلهٔ ۷۰ سناریوی تست ۸۲
شکل٤-۱: عضو فشاری دارای ناکاملی ε در وسط آن..... ۸٦
شکل٤-۲ : نمودار تنش کرنش مصالح..... ۸۹
شکل ٤-۳ : نمودار بار تغییرمکان سه نمونه از اطلاعات به کار رفته جهت آموزش شبکه عصبی برای سه ناکاملی اولیه ولاغری مساوی..... ۹۰
شکل ٤-٤ : نمودار بار تغییر مکان برای سه نمونه از اطلاعات به کار رفته جهت آموزش شبکه عصبی برای سه لاغری متفاوت و ناکاملی مساوی..... ۹۱
شکل ٤-٥ :نمودار بار-تغییرمکان محوری..... ۹۳
شکل ٤-٦ : شکماتیک کلی روش بسته فرم واکاباياشی..... ۹٤
شکل ٤-۷ : شکل تغییرشکل یافته عضو فشاری..... ۹۵
شکل ٤-۸ : مقایسه نتایج آنالیز المان محدود و روش بسته فرم برای لاغری ۱۲۰ و ناکاملی اولیه ۹۸۰.۰۰۱
شکل ٤-۹ : مقایسه نتایج آنالیز المان محدود و روش بسته فرم برای لاغری ۱٤۰ و ناکاملی اولیه ۹۸۰.۰۰۱
شکل ٤-۱۰ : مقایسه نتایج آنالیز المان محدود و روش بسته فرم برای لاغری ۱٤۰ و ناکاملی اولیه ۹۹۰.۰۰۱
شکل ٤-۱۱ : نمودار شبکه عصبی به کار رفته در تحلیل..... ۱۰۱
شکل٤-۱۲ : نمودار میزان خطای پیش بینی در طول آموزش..... ۱۰۳
شکل٤-۱۳ : مقایسه نمودار بار تغییرمکان بدست آمده از شبکه عصبی و نرم افزار المان محدود..... ۱۰٤
شکل٤-۱٤ : مقایسه نمودار بار تغییرمکان بدست آمده از شبکه عصبی و نرم افزار المان محدود..... ۱۰۵
شکل٤-۱۵ : نمودار نسبت تنش به تنش تسلیم در برابر لاغری ۱۰۵
شکل ٤-۱٦: نمودار شبکه عصبی به کار رفته در تحلیل..... ۱۰۷
شکل٤-۱۷: نمودار نسبت تنش به تنش تسلیم در برابر لاغری و مقایسه آن با نمودار تجربی..... ۱۰۸
شکل ٤-۱۸ :نمودار نسبت تنش در برابر ناکاملی اولیه با استفاده از شبکه عصبی ۱۱۱
شکل ٤-۱۹: نمودار پارامتر حساسیت در برابر ناکاملی اولیه به ازای لاغریهای ما بین ۰ تا۱۰۰ ..... ۱۱۲
شکل ٤-۲۰ : نمودار پارامتر حساسیت در برابر ناکاملی اولیه به ازای لاغریهای ما بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ ..... ۱۱۲
شکل ٤-۲۱ : نمودار پارامتر حساسیت نسبت به ناکاملی اولیه در برابر لاغری..... ۱۱٤
شکل ٤-۲۲ : نمودار سه بعدی پارامتر حساسیت نسبت به ناکاملی اولیه در برابر لاغری و ناکاملی اولیه۱۱٤
شکل ٤-۲۳ : نمودار باربحرانی در برابر لاغری به ازای ناکاملی‌های اولیه مختلف..... ۱۱۵

شکل ٤-٢٤ : نمودار پارامتر حساسیت در برابر لاغری به ازای ناکاملی‌های اولیه مختلف..... ١١٦
شکل ٤-٢٥ : نمودار سه بعدی پارامتر حساسیت نسبت به لاغری در برابر ناکاملی اولیه و لاغری..... ١١٧
شکل ٤-٢٦ :نمای مقابل نمودار سه بعدی پارامتر حساسیت نسبت به لاغری در برابر ناکاملی اولیه و لاغری..... ١١٨
شکل ٤-٢٧ : تقسیم‌بندی مناطق کمانش ستون با استفاده از لاغری با استفاده از پارامتر حساسیت..... ١١٩
شکل ٤-٢٨ : سختی پس‌کمانشی منفی در برابر لاغری..... ١٢١
شکل ٤-٢٩ : نمودار سه بعدی تنش بحرانی در برابرناکاملی اولیه و لاغری..... ١٢٢
شکل ٤-٣٠ : نمودار کنتور ناکاملی اولیه در برابر لاغری به ازای یک تنش بحرانی ثابت..... ١٢٣
شکل ٤-٣١ : نمودار پارامتر حساسیت ناکاملی اولیه در برابر لاغری به‌ازای تنش‌های بحرانی مختلف.. ١٢٣
شکل ٤-٣٢ : نمودار سه بعدی پارامتر حساسیت ناکاملی اولیه نسبت به لاغری در برابر تنش بحرانی و لاغری..... ١٢٤

چکیده:

به دلیل کاربرد فراوان عناصر فشاری در سازه‌ها، همواره بررسی رفتار این‌گونه اعضاء مورد توجه بوده است. ستون‌ها، اعضای فشاری خرپاها، و مهاربندها مثال‌هایی از اعضای فشاری در سازه‌ها می‌باشند. به طور کلی در سازه‌های واقعی نمونه‌های بسیاری از عناصر تحت فشار محوری یافت می‌شود. در اعضای تحت فشار محوری، علاو بر جاری شدن مصالح تحت تنش‌های بزرگتر از تنش تسلیم، کمانش یا از بین رفتن پایداری عضو فشاری تحت تنش‌های به مراتب کوچکتر از مقاومت نهایی، می‌تواند باعث خرابی عضو مورد نظر شود. در سازه‌های فولادی به دلیل لاغری اعضای فشاری، بررسی پدیدهٔ کمانش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

روش‌های مختلفی برای بررسی رفتار کمانشی اعضای فشاری وجود دارد که در این میان می‌توان به روش‌های تجربی، نیمه‌تجربی، روش‌های کلاسیک مبتنی بر حل معادلات دیفرانسیل و همچنین روش‌های عددی مبتنی بر نرم‌افزارهای المان محدود اشاره کرد. هر یک از روش‌های فوق‌الذکر دارای پیچیدگی‌های فراوانی بوده و اغلب استفاده از آنها وقت‌گیر می‌باشد. به عنوان مثال استفاده از روش‌های کلاسیک جهت بررسی رفتار کمانشی اعضای فشاری، مستلزم استفاده از روابط پیچیده ریاضی و همچنین حل معادلات دیفرانسیلی می‌باشد. با توجه به موارد فوق‌الذکر، استفاده از روش‌های رایج، جهت انجام مطالعات پارامتریک بر روی رفتار کمانشی اعضای فشاری مشکل بوده و گاه غیرممکن می‌باشد.

اخیرا استفاده از شبکهٔ عصبی، به عنوان یکی از پویاترین حوضه‌های تحقیق، برای حل مسائل پیچیده در شاخه‌های مختلف علوم گسترش چشم‌گیری یافته است. سادگی منطق ریاضی به کار رفته در این زمینه در مقایسه با سایر روش‌های موجود و همچنین توانایی این روش در مدل‌سازی مسائل پیچیدهٔ علمی باعث افزایش استفاده از شبکهٔ مصنوعی عصبی شده است. اساس کار شبکهٔ عصبی بر مبنای خصوصیات مرتبهٔ اول سلول عصبی مغز انسان استوار است. شبکهٔ عصبی قادر است تا با چند دور آموزش، یک رابطهٔ کلی بین متغیرهای ورودی یک مسأله و عناصر خروجی آن برقرار کند. در سال‌های اخیر پیشرفت‌های زیادی در زمینهٔ آموزش شبکهٔ عصبی ایجاد شده است. الگوریتم‌های پیشرفتهٔ آموزش شبکهٔ عصبی، ما را قادر می‌سازد تا از این رهیافت علمی بتوان جهت مدل کردن مسائل پیچیدهٔ غیرخطی بهره جست.

از جمله زمینه‌های کاربرد شبکهٔ عصبی می‌توان به مهندسی عمران اشاره کرد. با توجه به رابطهٔ غیر خطی بار-تغییرمکان در رفتار کمانشی اعضای فشاری و همچنین موارد ذکر شده در مورد شبکهٔ عصبی، می‌توان از این رهیافت علمی جهت ارزیابی رفتار کمانشی اعضای فشاری استفاده کرد. تحقیقات و بررسی‌های انجام شده بر روی رفتار یک عضو فشاری نشان می‌دهد که پارامترهای ناکاملی اولیه، لاغری و شرایط تکیه‌گاهی بیشترین تأثیر را بر روی مقاومت یک عضو فشاری دارند. بنابراین با تعریف پارامترهای تغییرشکل، ناکاملی اولیه و لاغری به عنوان ورودی‌های شبکهٔ عصبی و پارامتر بار محوری به عنوان خروجی شبکهٔ عصبی و در نهایت آموزش این شبکه می‌توان مطالعات پارامتریک گسترده‌ای بر روی رفتار کمانشی عناصر فشاری انجام داد. در این داده‌هایی که جهت آموزش شبکهٔ عصبی به‌کار رفته‌اند به کمک تحلیل المان محدود رفتار عضو فشاری به‌دست آمده است. با استفاده از این شبکه می‌توان رفتار کمانشی

و پس‌کمانشی عضو فشاری را به‌دقت تخمین زد و نمودار بار-تغییرمکان را به ازای ناکاملی‌های اولیه مختلف استخراج نمود. همچنین این شبکه قادر است تا نمودار بار بحرانی-لاغری ستون، که برای طراحی اعضای فشاری به کار می‌رود را استخراج کند. به کمک این شبکه می‌توان مطالعات دقیقی بر روی نحوهٔ تأثیر پارامترهای مختلف بر روی بار بحرانی و همچنین میزان حساسیت بار بحرانی نسبت به هر یک از پارامترهای ورودی انجام داد.

فصل اول

مقدمه

۱-۱ شرحی بر تاریخچهٔ بحث پایداری اعضای فشاری

از زمان اولر تا به امروز تئوری‌های زیادی برای بیان پدیدهٔ کمانش گسترش یافته‌اند. از جمله اولین تئوری‌های ارائه شده، می‌توان به تئوری جانستون[1] اشاره کرد. اولر اولین کسی بود که فهمید در اعضای فشاری لاغر شرایط پایداری بیشتر از شرایط تسلیم مصالح نقش دارند (Tall 1984). اولر مسأله کمانش ستون را به صورت ریاضی بررسی کرد و توانست با این روش بار بحرانی ستون لاغر را که تحت آن، ستون دچار کمانش می‌شود محاسبه کند. با وجود اینکه فرمول ارائه شده توسط اولر مبتنی بر معادلات ریاضی بود، اما در تئوری ارائه شده توسط اولر رفتار ستون به صورت کاملاً الاستیک فرض شده بود [۱].

در سال 1889، انگسر[2] مدول الاستیسیته را در فرمول اولر با مدول مماسی (E_t) جایگزین کرد تا بتواند پدیدهٔ کمانش غیرالاستیک را توجیه کند. این روش استدلال بعدها توسط کارمان[3] با بیان مفهوم مدول کاهش یافته (E_r) گسترش داده شد. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده بر روی اعضای فشاری نشان می‌داد که بار لحظهٔ خرابی اینگونه اعضاء قدری بیشتر از بار بحرانی ارائه شده توسط رابطهٔ انگسر می‌باشد[4] [۲].

بعدها شانلی نظریهٔ ارائه شده توسط انگسر را اصلاح کرد. امروزه تئوری انگسر – شانلی کاربرد گسترده‌ای در استخراج بار بحرانی اعضای فشاری دارد. در تئوری شانلی از اثر تنش‌های پس‌ماند در کمانش ستون چشم‌پوشی شده است، در حالی که اغلب مقاطع دارای تنش پس‌ماند می‌باشند. زان[5] مسألهٔ پایداری ستون را به صورت اندرکنش بین کمانش و خاصیت تسلیم مصالح بیان کرد [۳].

---

[1] Johnston (1983)

[2] Engesser

[3] Karman

[4] Timoshenko 1953 & Johnston 1983

[5] Zahn 1922

تحقیقات حاضر نشان می‌دهد که نیاز به مطالعهٔ بیشتر در زمینهٔ بررسی رفتار کمانشی اعضای فشاری و ارائهٔ راهکارهای جدید جهت بررسی رفتار این اعضاء وجود دارد.

در این پایان‌نامه سعی شده است تا با معرفی شبکهٔ عصبی به عنوان یک رهیافت جدید در حل مسائل غیرخطی، کمانش غیرالاستیک ستون‌ها به صورت دقیق‌تری مورد بررسی قرار گیرد. با تربیت شبکهٔ عصبی مبتنی بر داده‌های تئوری و تجربی، می‌توان دستهٔ عظیمی از داده‌های خروجی را از شبکه استخراج کرد و کمانش ستون را در محدودهٔ وسیعتری، بدون پیچیدگی فرمول‌های ریاضی، بررسی کرد.

۱-۲ شبکه عصبی مصنوعی:

شبکه عصبی یکی از پویاترین حوضه‌های تحقیق در دوران معاصر می‌باشد که نظر محققین متعددی از رشته‌های گوناگون علمی را به خود جلب کرده است. هر کدام از این افراد پشتوانهٔ علمی متفاوتی را بر این حوضه افزوده‌اند. شبکه عصبی در حقیقت مدل ریاضی الگوبرداری شده از مغز انسان می‌باشد که سعی دارد توانایی یادگیری مغز انسان را با یک الگوریتم ریاضی بیان کند. شبکه‌های عصبی مصنوعی که امروزه در کاربردهای فراوانی ارزش بالای خود را نشان داده‌اند، بر اساس مدل بیولوژیکی مغز بوجود آمده‌اند. در مغز انسان حدود 10^{10} واحد سازنده، به نام نرون وجود دارد و هریک از این نرون‌ها به حدود 10^4 نرون دیگر اتصال دارد و هر کدام دارای کارکردی به صورت ورودی یا خروجی است که مغز انسان را به ماهیچه‌ها مرتبط می‌سازد و یا علائم را از ارگان‌های حساس به مغز انتقال می‌دهد. شبکه‌های عصبی مصنوعی ممکن است از چند نرون تا چندهزار نرون تشکیل شده باشند. و اندازهٔ شبکه بستگی به پیچیده‌گی مسأله دارد. نرون، ورودی‌هائی را که به طریق خاصی جمع می‌شوند پذیرا می‌گردد. این ورودی‌ها با توجه به ضرائب وزنی هرکدام با یکدیگر جمع شده و ورودی تابع انتقال را تشکیل می‌دهند. وظیفهٔ اصلی تابع انتقال برقراری ارتباط بین ورودی و خروجی می‌باشد. پس از محاسبه خروجی نرون از روی ورودی، این خروجی‌ها به لایهٔ بعدی انتقال می‌یابد تعداد این لایه‌ها به درجه غیرخطی بودن مساله بستگی دارد.

با پیشرفت علم کامپیوتر گامهای جدیدی در زمینه شبکه عصبی برداشته شده وقابلیت شبیه سازی این ابزار قدرتمند افزایش یافته و الگوریتم‌هایی با توانایی آموزش فضاهای غیرخطی ارائه گردیده است. از جمله این الگوریتم ها می‌توان به الگوریتم لونبرگ مارکوآرت[6] و الگوریتم آموزش انتشاربرگشتی[7] اشاره کرد. ارائه الگوریتم انتشار برگشتی در سال ۱۹۸٦ توسط رومل هارت، مک کللند و ویلیامز باعث ایجاد انقلابی در این زمینه شد [٤]. قبل از ارائه این الگوریتم آموزشی، شبکه‌های عصبی قابلیت یادگیری مسائل غیرخطی را نداشتند و توانائی‌های آنها محدود به مسائل خطی می‌شد. در حقیقت الگوریتم انتشار

---

[6] Levenberg-marquart
[7] Back propagation

برگشتی ما را قادر می‌سازد تا پیچیده‌ترین مسائل ریاضی را به‌سادگی با استفاده از شبکه عصبی مدل‌سازی کنیم.

۱-۳ استفاده از شبکه عصبی مصنوعی جهت بررسی رفتار کمانشی اعضای فشاری

روشهای مختلفی برای بررسی کمانش اعضای فشاری وجود دارد، که در این میان می‌توان به روشهای تجربی نیمه‌تجربی بسته فرم[8] و همچنین روشهای عددی مبتنی بر نرم افزارهای المان محدود اشاره کرد. به کارگیری این روش‌ها جهت تعیین رفتار کمانشی و پس‌کمانشی اعضای فشاری اغلب وقت‌گیر بوده و هر یک از آنها دارای پیچیدگی خاصی می‌باشد . اخیراً به کارگیری شبکه عصبی در شاخه‌های مختلف علوم برای حل مسائل پیچیده مطرح گردیده است. شبکه عصبی با چند دور آموزش، یک تابع کلی را بعنوان پاسخی برای مسأله غیرخطی، که در این مساله رابطه بار تغییرمکان می‌باشد، ارائه می‌دهد.

ورودی‌های شبکه عصبی که در این تحقیق به عنوان متغیر در نظر گرفته شده‌اند عبارتند از لاغری، ناکاملی اولیه و تغییرشکل محوری عضو فشاری. اساس کار به این ترتیب است که ابتدا با توجه به نوع غیرخطی بودن مساله پارامترهای موثر در بردار هدف تعیین می‌شود و تابع تحریک مناسب انتخاب می‌گردد سپس شبکه عصبی متناسب با نوع مساله طراحی می‌شود. این شبکه باید با داده‌های مناسب آموزش ببیند تا ضرائب وزنی آن تعدیل و اصلاح گردند. آموزش شبکه با استفاده از داده‌هایی انجام می‌پذیرد که از تحلیل المان محدود اعضای فشاری بدست آمده است. با تغییر پارامترهای موثر در پدیدهٔ کمانش همانند لاغری یا ناکاملی اولیه مجموعه‌ای از داده‌ها بدست می‌آیند که برای آموزش شبکه مناسب هستند. پس از آموزش شبکه می‌توان مسیر کمانشی اعضای فشاری جدید را با معرفی مشخصات آن به شبکه بدست آورد. پس از آموزش شبکه عصبی، می‌توان رفتار کمانشی و پس کمانشی ستون‌ها را با استفاده از شبکه عصبی با دقت مطلوبی تخمین زد و نمودار بار-تغییرمکان را به ازای لاغری‌ها و ناکاملی‌های مختلف بدست آورد. همچنین شبکه عصبی قادر است تا پس از آموزش، نمودار لاغری-بار بحرانی ستون، که برای طراحی اعضای فشاری به کار می‌رود، را استخراج کند. این نمودارها را می‌توان به ازای ناکاملی‌های اولیه مختلف استخراج کرد و از روی این نمودارها می‌توان محدودهٔ رفتار غیر الاستیک عضو فشاری موردنظر را تعیین کرد [۵].

شبکه‌ای که به این ترتیب آموزش می‌بیند دارای توانائی‌های زیادی در زمینهٔ بررسی رفتار کمانشی اعضای فشاری می‌باشد از جمله این توانائی‌ها می‌توان به انجام آنالیزحساسیت با استفاده از شبکهٔ عصبی اشاره کرد. انجام آنالیز حساسیت به‌سادگی انجام می‌پذیرد، حال‌آنکه انجام این آنالیز با استفاده از

---

[8] closed form

نرم‌افزارهای المان محدود دارای پیچیده‌گی‌های فراوانی می‌باشد. شبکه عصبی قادر است تا آهنگ تغییرات توابع خروجی خود را نسبت به هر یک از متغیرهای ورودی محاسبه نماید.

در این پایان‌نامه روش جدیدی مبتنی بر استفاده از شبکه عصبی برای بررسی رفتار کمانشی ستون و همچنین پیش‌بینی بار بحرانی ستون بیان شده است. اهمیت استفاده از شبکه‌های عصبی جهت تعیین رفتار کمانشی و پس کمانشی از این موضوع ناشی می‌شود که فرمولهای بسته فرم ارائه شده دراین زمینه اغلب با توجه به لاغری تقسیم بندی شده‌اند و فرمول واحدی برای تمامی نواحی وجود ندارد. قبل از این پژوهش تحقیقاتی جهت بدست آوردن فقط بار کمانشی ستون‌های لاغر انجام شده است و رفتار پس کمانشی مورد بررسی قرار نگرفته است.

۱-٤ اهداف پروژه

در این پایان‌نامه سعی شده است به پرسش های زیر در خصوص پایداری اعضای فشاری پاسخ داده شود :

۱. چه پارامترهایی نقش اساسی در رفتار پایداری اعضای فشاری دارند؟
۲. با تغییر دادن هر پارامتر، چه تغییراتی در رفتار اعضای فشاری رخ می‌دهد؟
۳. چه روش‌هایی جهت استخراج رفتار کمانشی و پس‌کمانشی عضو فشاری وجود دارد؟
٤. معایب و محاسن هر کدام از این روشها چیست؟
۵. شبکه عصبی مناسب برای بررسی رفتار کمانشی یک عضو فشاری چگونه به دست می‌آید؟
٦. چگونه می‌توان از شبکهٔ عصبی جهت استخراج رفتار کمانشی اعضای فشاری استفاده کرد؟
۷. چه داده‌هائی جهت آموزش شبکهٔ عصبی مناسب هستند؟
۸. از چه روشهایی می‌توان برای تعیین میزان حساسیت باربحرانی نسبت به هر یک از پارامترهای موثر استفاده کرد؟
۹. چگونه می‌توان با استفاده از شبکه عصبی حساسیت بار بحرانی را نسبت به پارامترهای مختلف سنجید؟
۱۰. چه پارامترهایی در سختی سازه در هنگام کمانش نقش دارند؟

با توجه به اهمیت خاص رفتار کمانشی اعضای فشاری وجایگاه ویژه این اعضا در طراحی سازه‌ها، لزوم تحقیق بیشتر در زمینه پایداری و رفتار خرابی اعضای فشاری، احساس می‌شود. کمانش اعضای فشاری توسط دانشمندان زیادی مورد بررسی قرار گرفته است، تحقیقات در زمینه کمانش ستون‌ها به صورت آزمایشگاهی یا با استفاده از روش‌های تحلیلی انجام شده است. البته هر یک از این روش‌ها دارای نقایصی نیز می‌باشند که از آن جمله می‌توان به پیچیدگی روابط تحلیلی ارائه شده و همچنین خطاهای

موجود در روش‌های آزمایشگاهی اشاره کرد. لذا در این پایان نامه سعی بر این است که با معرفی این روش‌ها، روش نوینی جهت مطالعه رفتار کمانشی اعضای فشاری ارائه کرد.

بعد از ارائه انواع روشهای تحلیلی جهت محاسبه بار کمانشی اعضای فشاری، روشی جدید مبتنی بر استفاده از شبکه عصبی ارائه شده است. با استفاده از این شبکه آنالیزهای جدیدی همانند آنالیز حساسیت انجام می‌شود که انجام آن در روش‌های پیشین دشوار یا ناممکن بود. اهم اهداف مورد نظر در این پایان نامه شامل موارد زیر می‌باشد:

۱- مدل سازی عناصر محدود عضو فشاری
۲- ارائه مدل شبکه عصبی مناسب جهت بررسی رفتار کمانشی عضو فشاری
۳- آموزش شبکه عصبی با استفاده از داده‌های مرحله یک
٤- بهینه سازی شبکه عصبی جهت استخراج نمودار طراحی ستون
٥- انجام انالیز حساسیت با استفاده از شبکه عصبی

۱-۵ رئوس مطالب پایان نامه

مطالب این پایان نامه در پنج فصل تنظیم شده است. در فصل اول به عنوان مقدمهٔ کار، به معرفی اجمالی تاریخچهٔ مطالعات انجام گرفته بر روی کمانش ستون، معرفی کلی شبکه عصبی، بیان روند استفاده از شبکه عصبی در یک مسألهٔ پایداری، اهداف پایانامه و روش مطالعه پرداخته شده است.

در فصل دوم به معرفی انواع روش‌های تحلیلی موجود جهت محاسبه بار کمانشی همچنین استخراج مسیر کمانشی و پس کمانشی اعضای فشاری پرداخته شده است. از این جمله می‌توان به انواع روش‌های مبتنی بر معادلات دیفرانسیل و روشهای بسته فرم اشاره کرد. به دلیل اهمیت بار کمانشی ستون‌های تحت بار محوری، ابتدا بار کمانشی ستون تحت بار محوری با استفاده از روشهای معمول مبتنی بر معادلات دیفرانسیل محاسبه شده است. در ادامه تئوری ارتجاعی ستون بیان شده است و با استفاده از این تئوری مسیر کمانشی و پس کمانشی اعضای فشاری استخراج شده است. سپس تئوری تغییرشکل‌های بزرگ بیان شده است و تفاوت‌های این تئوری با تئوری ارتجاعی ستون مورد مقایسه قرار گرفته است. پس از آن به بیان انواع تئوری‌های غیر ارتجاعی ستون پرداخته شده است ونحوه استخراج رفتار غیرالاستیک ستون‌ها با استفاده از این تئوری‌ها بیان شده است. در ادامه این فصل به مطالعه رفتار ستون‌های معیوب با استفاده از روش‌های تحلیلی پرداخته شده است. در انتها انواع روشهای موجود جهت استخراج مسیرهای غیرخطی پیش کمانش و پس‌کمانش معرفی شده است.

در فصل سوم مبانی طراحی معماری شبکه عصبی برای مسائل مختلف ارائه شده است. پس از تعریف سلول عصبی مصنوعی، انواع توابع تحریک مناسب برای مسائل غیرخطی از جمله کمانش ستون در این فصل معرفی شده است و در ادامه به معرفی انواع روش‌های آموزش شبکه عصبی پرداخته شده است. از میان انواع روش‌های آموزش، الگوریتم انتشار برگشتی به علت کاربرد فراوان آن در مهندسی عمران از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مبانی الگوریتم انتشار برگشتی که در این پایان‌نامه نیز از آن

استفاده شده است. ارایه شده است. در انتها به تعدادی از کاربردهای شبکه عصبی در مهندسی عمران اشاره شده است.

در فصل چهارم روش طراحی معماری شبکه عصبی مناسب برای مسأله کمانش عضو فشاری ارائه شده است. در ابتدا نحوه مدل‌سازی عضو فشاری به صورت المان محدود و استخراج داده‌های مناسب جهت آموزش شبکه عصبی بیان شده است. شبکه عصبی مورد نظر با استفاده از داده‌های بدست آمده از مرحله قبل آموزش داده شده و سپس صحت نتایج خروجی شبکه عصبی با معرفی ورودی‌های جدید بررسی شده است. سپس این شبکه برای استخراج منحنی طرح ستون بهینه‌سازی شده است، در نهایت از این شبکه جهت انجام آنالیز حساسیت استفاده شده است.

در فصل پنجم خلاصه نتایج حاصل از مطالعه حاضر آورده شده است و همچنین پیشنهادهایی در مورد مطالعات بعدی که مرتبط با این موضوع تحقیق می‌باشند ارائه شده است.

فصل دوم

انواع روش‌های محاسبهٔ بار کمانشی و استخراج مسیر کمانش عضو فشاری

۲-۱ مقدمه

روشهای مختلفی برای بررسی کمانش اعضای فشاری وجود دارد، که در این میان می‌توان به روشهای تجربی، نیمه‌تجربی، بسته فرم و همچنین روشهای عددی مبتنی بر نرم افزارهای المان محدود اشاره کرد. در این فصل مبانی روش‌های تحلیلی ارزیابی رفتار کمانشی اعضای فشاری ارائه شده‌است. اغلب روش‌های تحلیلی، مبتنی بر معادلات دیفرانسیل خطی ستون می‌باشند. مبنای محاسبه بار کمانشی ارتجاعی اعضای فشاری تئوری خطی ستون می‌باشد. منحنی طراحی ستون نیز در ابتدا بر پایه تئوری تئوری خطی ستون قرار داشت. سپس تئوری تغییرشکل‌های بزرگ جایگزین تئوری خطی شد و آزمایشها نشان داد که در محدوده لاغری‌های متوسط استفاده از تئوری خطی ستون صحت نداشته وناکاملی‌های اولیه موجود در ستون و همچنین تنشهای پسماند رفتار ستون را متأثر می‌سازد. بنابراین برای دستیابی به رفتار واقعی اعضای فشاری در محدوده لاغری‌های متوسط آزمایشات مختلفی انجام شده است. همزمان با این آزمایشات تئوری‌های متفاوتی جهت مدل‌سازی رفتار غیرارتجاعی ستون بیان شده است. از جمله این تحقیقات می‌توان به الگوریتم‌های ارائه شده توسط انگسر و شانلی اشاره کرد. در ادامه رفتار ستون‌های معیوب با استفاده با استفاده از تئوری‌های غیر ارتجاعی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در انتهای این فصل انواع روشهای موجود جهت استخراج مسیرهای غیرخطی پیش کمانش و پس‌کمانش معرفی شده است.