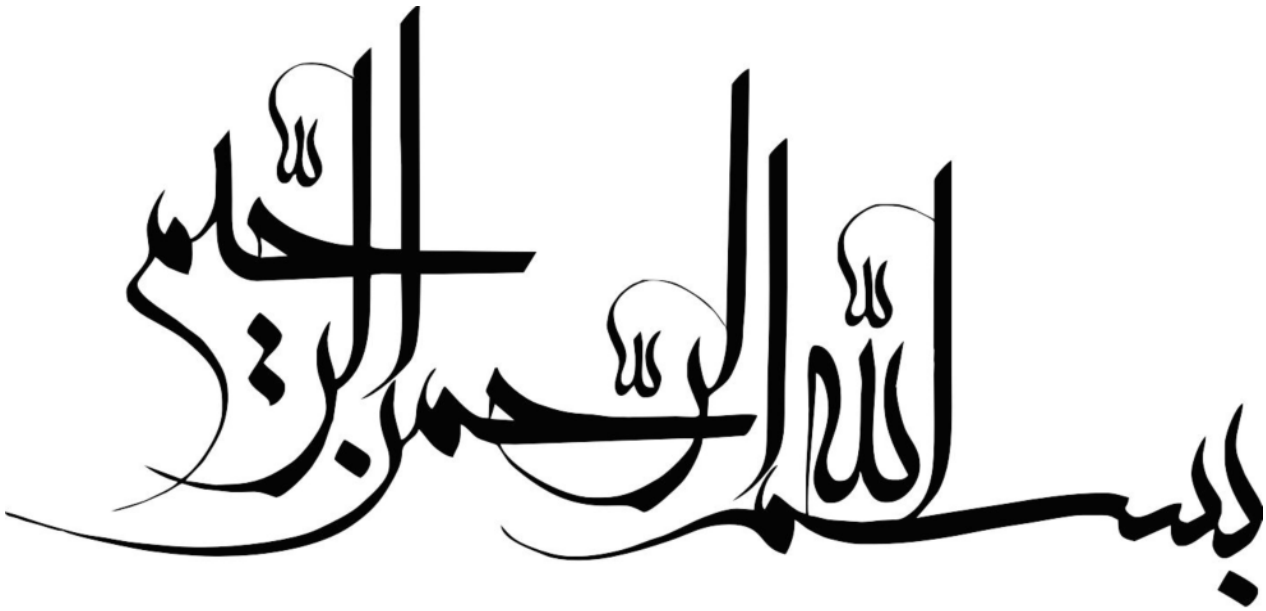
بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی عمران

استفاده از سیستم استنتاج فازی برپایه شبکه عصبی تطبیقی(ANFIS) جهت مدل‌سازی سری‌های زمانی چندمتغیرهٔ هیدرولوژیکی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران-آب

محمدحسین گل‌محمدی

استاد راهنما

دکتر حمیدرضا صفوی

۱۳۸۸

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی عمران

پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد مهندسی آب آقای محمدحسین گل‌محمدی

تحت عنوان

استفاده از سیستم استنتاج فازی برپایه شبکه عصبی تطبیقی(ANFIS) جهت مدل‌سازی سری‌های زمانی چندمتغیرهٔ هیدرولوژیکی

در تاریخ ۱۳۸۸/۱۲/۸ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر حمیدرضا صفوی
۲- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر مریم ذکری
۳- استاد داور	دکتر کیوان اصغری
۴- استاد داور	دکتر بنفشه زهرایی
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر عبدالرضا کبیری

سپاس معبود بی‌همتا را سزاست که آفرید خلق را به فضل خویش و صحت بخشید به لطف خویش؛ عزت بخشید به کسب معارف، و معرفت را قرار داد در قطره آبی و دوام بخشید آفرینش و خلق را به آن. هم اوست که امر کرد به شکرش و قرار داد شکر خلق را جزیی از شکر خویش.

بدین سان زبان به شکر خلق باز می‌کنم که به جا آورم از او شکری.

از اساتید ارجمند و بزرگوار که چراغی فروزان افروختند در راه کسب این معارف؛ که لازم است نام برم از استاد دکتر حمیدرضا صفوی و استاد دکتر مریم ذکری که بسیار بر من لطف و عنایت ارزانی داشتند و از علم و دانش خویش که خود معرفتی الهی است، بی‌هیچ منتی مستفیدم نمودند.

از خانواده خود به خصوص مادر، برادر و عموهایم که معلمان و مشاوران مشفقی بر من بودند و هستند.

از خانواده همسرم که در تمامی مراحل یار و یاور من بودند.

و همه آنان که حق دارند بر من هر چند به کلامی و سلامی.

صمیمانه ترین درودها ارزانی تان.

امید است به یاری حق و به مدد این عزیزان، باشیم از مصادیق این نیایش از سردار علم و عشق، دکتر مصطفی چمران:

"ای خدا؛

من باید از نظر علمم نیز از همه برتر باشم تا مبادا که دشمنان مرا از این راه طعنه زنند؛ باید به آن سنگ دلانی که علم را بهانه کرده، به دیگران فخر می‌فروشند ثابت کنم که خاک پای من هم نخواهند شد؛ باید همه آن تیره‌دلان مغرور و متکبر را به زانو درآورم، آن‌گاه خود خاضع‌ترین و افتاده‌ترین فرد روی زمین باشم."

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به پدرم؛

که در تمام امور راهنما و راهگشای من است.

به نگاهش آموخت به من زندگی را، به ظاهرش آموخت ایثار را و به باطنش صبر و تحمل را. شادیش، عالمم را به وجد آورد و حزنش، اندوه عالمم دهد. خدایی را می طلبم به یاری، به شادیش.

و تقدیم به همسرم؛

که در تمام مدت، یار و یاور و قوت قلب بود و هست بر زندگی و کسب معارف.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت
چکیده ۱

فصل اول: اهداف و روش انجام تحقیق

۱-۱ مقدمه ۲
۱-۲ هدف از تحقیق و اهمیت آن ۳
۱-۳ روش انجام تحقیق ۵
۱-۳-۱ مروری بر سری‌های زمانی هیدرولوژیکی و مدل‌سازی آن‌ها ۵
۱-۳-۲ مروری بر سیستم‌های هوشمند ۵
۱-۳-۳ مطالعهٔ موردی بر روی سرشاخه‌های زاینده‌رود ۵
۱-۳-۴ مدل‌سازی سری‌های زمانی ۶
۱-۳-۵ پیش‌بینی سری‌های زمانی ۷
۱-۳-۶ مقایسهٔ عملکرد مدل‌های حاصل از سیستمهای انفیس و مدل‌های حاصل از روش‌های دیگر ۷
۱-۴ ساختار پایان‌نامه ۷

فصل دوم: پیشینهٔ علمی تحقیق

۲-۱ مقدمه ۹
۲-۲ پیشینهٔ علمی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی ۱۰
۲-۳ پیشینهٔ علمی شبکه‌های عصبی مصنوعی ۱۲
۲-۴ پیشینهٔ علمی سیستم‌های فازی ۱۴
۲-۵ پیشینهٔ علمی سیستم‌های استنتاج فازی برپایهٔ شبکهٔ عصبی تطبیقی (انفیس) ۱۵
۲-۶ مروری بر تحقیقات گذشته در مدل‌سازی سری‌های زمانی با استفاده از شبکه‌های عصبی و سیستم های انفیس... ۱۹

فصل سوم: کلیات و مبانی نظری تحقیق

۳-۱ مقدمه ۲۱
۳-۲ سری‌های زمانی هیدرولوژیکی ۲۱
۳-۲-۱ مشخصات آماری سری‌های زمانی سالانه ۲۴
۳-۲-۲ نرمال‌کردن سری‌های زمانی ۲۵
۳-۲-۳ آزمون‌های آماری ۲۶
۳-۲-۴ مدل‌سازی سری‌های زمانی ۲۹
۳-۲-۵ پیش‌بینی سری‌های زمانی ۴۰
۳-۳ شبکه‌های عصبی ۴۱

۳-۳-۱ شبکه‌های عصبی بیولوژیک ۴۱
۳-۳-۲ شبکه‌های عصبی مصنوعی ۴۲
۳-۴ تئوری مجموعه‌های فازی ۴۸
۳-۴-۱ سیستم استنتاج فازی (FIS) ۴۹
۳-۵ سیستم استنتاج فازی برپایهٔ شبکهٔ عصبی تطبیقی ۵۲
۳-۵-۱ روش آموزش کمترین مربعات خطا ۵۵

فصل چهارم: مطالعه موردی حوضهٔ آبریز سد زاینده رود

۴-۱ مقدمه ۵۷
۴-۲ رودخانه‌های ورودی به دریاچهٔ سد زاینده‌رود ۵۹
۴-۳ بررسی آمار موجود از دبی اندازه‌گیری شده از شاخه‌های مختلف در حوضهٔ سد زاینده‌رود ۶۱
۴-۳-۱ آمار طبیعی شاخهٔ اصلی زاینده‌رود در ایستگاه قلعه شاهرخ ۶۱
۴-۳-۲ آمار طبیعی رودخانهٔ پلاسجان در ایستگاه اسکندری ۶۳
۴-۳-۳ آمار طبیعی رودخانهٔ سمندگان در ایستگاه مندرجان ۶۴
۴-۳-۴ آمار طبیعی ورودی سد زاینده‌رود ۶۵
۴-۴ تحلیل آماری سری‌های زمانی مورد مطالعه ۶۵
۴-۴-۱ بررسی ایستائی سری‌های زمانی مورد مطالعه ۶۶
۴-۴-۲ بررسی نرمال‌بودن سری‌های زمانی مورد مطالعه ۶۸
۴-۴-۳ بررسی کفایت طول داده‌ها ۶۸

فصل پنجم: مدل سازی سری های زمانی حوضهٔ سد زاینده‌رود با استفاده از سیستم استنتاج فازی بر پایهٔ شبکه عصبی تطبیقی

۵-۱ مقدمه ۶۹
۵-۲ تخمین پارامترهای مدل های سری‌های زمانی با استفاده از انفیس ۷۰
۵-۲-۱ تخمین پارامترهای مدل‌های سری‌های زمانی تک‌متغیره با استفاده از انفیس ۷۰
۵-۲-۲ تخمین پارامترهای مدل‌های سری‌های زمانی چندمتغیره با استفاده از انفیس ۷۲
۵-۳ بررسی نتایج حاصل از روش انفیس ۷۵
۵-۴ تشکیل و پیش‌بینی مدل‌های سری‌های زمانی حوضهٔ آبریز سد زاینده‌رود ۷۷
۵-۴-۱ مدل‌های تک‌متغیره سری زمانی ورودی سد زاینده‌رود ۷۷
۵-۴-۲ مدل‌های چندمتغیرهٔ سری‌های زمانی ۷۹

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱ نتیجه‌گیری کلی ۸۶
۶-۲ پیشنهادات ۸۸
پیوست ۱ ..... ۹۱
پیوست ۲ ..... ۹۴
مراجع ۹۷

چکیده

مدل‌سازی و پیش‌بینی سری‌های زمانی یک مسئله بسیار مهم در چند دهه اخیر بوده و کاربرد وسیعی در زمینه‌های مختلف علوم و مهندسی از جمله هیدرولوژی دارد. در این راستا تخمین پارامترهای مدل‌های مختلف سری‌های زمانی یکی از مراحل اساسی در مدل‌سازی سری‌های زمانی است. روش‌های ارائه‌شده در این زمینه از جمله روش گشتاورها، دارای روابطی پیچیده و تقریبی به خصوص در مدل‌های چندمتغیرهٔ زمانی و مکانی می‌باشندکه مستلزم صرف وقت زیاد و بررسی روابط مختلف برای هر مدل می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از سیستم‌های استنتاج فازی بر پایهٔ شبکهٔ عصبی تطبیقی، روشی جدید و مؤثر جهت تخمین پارامترهای مدل‌های مختلف سری‌های زمانی تک متغیره و چند متغیره ارائه شده است. جهت بررسی کارآیی این روش از داده‌های هیدرولوژیکی حوضهٔ آبریز سد زاینده‌رود استفاده شده و پارامترهای مدل‌های مختلف سری‌های زمانی تخمین زده شده است. همچنین مدل‌هایی که پارامترهای آن‌ها از روش گشتاورها حاصل شده است، تشکیل شده‌اند. سپس پیش‌بینی سری‌های زمانی با استفاده از این مدل‌ها انجام شده است. جهت بررسی بهتر، پیش‌بینی‌ها با سیستم استنتاج فازی بر پایهٔ شبکهٔ عصبی تطبیقی و شبکهٔ پرسپترون چندلایه نیز انجام شده‌است و نتایج حاصل با نتایج قبلی مقایسه شده‌اند. جهت مقایسه نتایج، از معیار میانگین قدرمطلق تفاوت(MAE) استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد روش ارائه شده از کارآیی بالایی برخوردار می‌باشد و می‌توان از آن به عنوان مدلی هوشمند جهت مدل‌سازی سری‌های زمانی تک‌متغیره و چندمتغیره استفاده نمود.

کلمات کلیدی: سری‌های زمانی هیدرولوژیکی، پیش‌بینی، تک‌متغیره ، چندمتغیره، سیستم استنتاج فازی برپایهٔ شبکهٔ عصبی تطبیقی (انفیس)، شبکه‌های عصبی مصنوعی

فصل اول
اهداف و روش انجام تحقیق

۱-۱ مقدمه

مدل‌سازی بسیاری از فرآیندهای هیدرولوژی که نتیجهٔ تأثیرات متقابل پارامترهایی است که اولاً تعداد آن‌ها زیاد و ثانیاً در اندرکنش با یکدیگر سیستم پیچیده‌ای را به وجود می‌آورند، امری مشکل ولی حائز اهمیت است. به عنوان مثال دبی عبوری از یک مقطع مشخص از رودخانه که می‌تواند محل احداث یک سازهٔ هیدرولیکی نظیر سد، تونل، ایستگاه پمپاژ و یا کانال انحراف آب باشد، در زمان‌های مختلف مقادیر متفاوتی دارد، زیرا که دبی در این مقطع نتیجهٔ تأثیرات متقابل عوامل هواشناسی، مشخصات فیزیوگرافی حوضهٔ بالادست، کاربری اراضی، مصارف آب و آب‌های برگشتی، مشخصات ژئومورفولوژیکی و نهایتاً مشخصات هندسی حوضهٔ بالادست این نقطه از رودخانه است. از طرف دیگر به لحاظ مکانی نیز دبی رودخانه در مقاطع مختلف آن مقادیر متفاوتی داشته و لذا توزیع مکانی دبی نیز در کل طول رودخانه یکسان نیست. از این‌رو به دلیل تعداد زیاد عوامل مؤثر در بررسی دبی رودخانه به صورت زمانی و مکانی مدل‌سازی فیزیکی آن بسیار پیچیده است. لذا جهت طراحی‌ها و به‌ویژه بهره‌برداری ازسیستم‌های منابع آب نیاز است با توجه به آمارهای گذشته و ثبت داده‌شده به صورت سری‌های زمانی و مکانی، اقدام به پیش‌بینی عوامل هیدرولوژیکی نظیر دبی رودخانه، میزان بارندگی، رطوبت هوا، درجه

حرارت و ... نمود. این امر به‌ویژه در نحوهٔ بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های منابع آب نظیر سدها، رودخانه‌ها، آب‌های زیرزمینی و سیستم‌های تلفیقی از آن‌ها بسیار حائز اهمیت است.

روش‌های آماری در تعیین مقادیر میانگین‌ها، انحرافات، حداقل و حداکثرها و غیره، به تنهایی قادر به پیش‌بینی عوامل هیدرولوژی به صورت پیوسته در زمان و مکان نمی‌باشند، بلکه مقادیری را به صورت ناپیوسته در اختیار قرار می‌دهند که عمدتاً در طراحی سیستم‌های منابع آب نظیر محاسبهٔ ظرفیت سرریزها، سیستم‌های انحراف آب، تأسیسات جمع‌آوری و دفع آب‌های سطحی، سیستم‌های هشدار سیلاب و از طرف دیگر سیستم‌های پیش‌بینی خشکسالی و دبی‌های حداقل به کاربرده می‌شوند. در تحلیل سیستم‌های منابع آب به جز این موارد نیاز به داده‌های پیوسته چه از نظر زمانی و چه مکانی جهت برنامه‌ریزی می‌باشد و لذا نیاز است ضمن بررسی و تحلیل داده‌های گذشتهٔ ثبت‌شده، اقدام به مدل‌سازی و پیش‌بینی این عوامل برای زمان آینده نمود[۱].

۱-۲ هدف از تحقیق و اهمیت آن

پیش بینی سری‌های زمانی[1] یک مسئله بسیار مهم و قابل توجه در چند دههٔ اخیر می‌باشد و کاربرد وسیعی در زمینه‌های مختلف علمی از جمله هیدرولوژی پیدا کرده است. در زمینهٔ مهندسی عمران و هیدرولوژی، نیاز به منابع آب به سرعت در حال رشد است، به طوری‌که تهیهٔ یک مدل مناسب برای تأمین نیازهای آبی، کنترل سیل و مدیریت آن ضروری به نظر می‌رسد. در این راستا، یکی از مهم‌ترین موارد قابل توجه، تمایل به مدل‌های پیش‌بینی می‌باشد.

در تحلیل و مدل‌سازی سری‌های زمانی، نیاز به نگاشت گروهی رابطهٔ بین ورودی‌ها و خروجی‌ها برای مقادیر موجود از گذشته می‌باشد. روش‌های مرسوم در مدل‌سازی سری‌های زمانی از جمله روش‌های باکس و جنکینز[2]، خودهمبسته[3]، خودهمبسته با میانگین متحرک[4]، آریما[5] و غیره به صورت تک‌متغیره و چندمتغیره[6]، مدت زمان زیادی است که در علوم پایه به کاربرده می‌شود و جهت مدل‌سازی به وسیلهٔ آنها، فرضیات ایستایی و خطی بودن در نظرگرفته می‌شود. اما واقعیت آن است که پدیده‌های طبیعی از جمله پدیده‌های هیدرولوژیکی، دارای خواص ناشناخته و پیچیدهٔ بسیار می‌باشند. این نوع پدیده‌ها اساساً دارای ماهیت دینامیکی و غیرخطی هستند. با

[1] Time Series Forecasting
[2] Box-Jenkins
[3] Auto-Regressive (AR)
[4] Auto-Regressive Moving Average (ARMA)
[5] Auto-Regressive Integrated Moving Average (ARIMA)
[6] Univariate & Multivariate

وجود روابط غیرخطی، عدم قطعیت، ویژگی‌های متغیر زمانی و مکانی، به‌کارگیری مدل‌های مزبور با فرض ایستایی و خطی‌بودن، مناسب نیست و به خوبی عمل نمی‌کنند. از طرفی، دینامیکی و غیرخطی‌بودن این پدیده‌ها، مدل‌سازی را بسیار پیچیده و مشکل می‌سازد[۳,۲].

امروزه به‌کارگیری شبکه‌های غیرخطی به عنوان یکی از سیستم‌های هوشمند[1] در پیش‌بینی پدیده‌های پیچیدهٔ طبیعی از جمله هیدرولوژی، بسیار مورد توجه قرارگرفته است. روش‌های شبکهٔ عصبی[2] و منطق فازی[3] و همچنین سیستم استنتاج فازی برپایهٔ شبکهٔ عصبی تطبیقی(ANFIS)[4] ، از این قبیل سیستم‌ها می‌باشند. این سیستم‌ها به سیستم‌های انفیس معروف شده‌اند. سیستم انفیس از الگوریتم‌های یادگیری شبکهٔ عصبی و منطق فازی به منظور نگاشت غیرخطی بین فضای ورودی و خروجی استفاده می‌کند و با توجه به استفاده از مزیت زبانی یک سیستم فازی و توانایی یادگیری یک شبکهٔ عصبی، در مدل‌سازی فرآیندهای زیادی از جمله فرآیندهای هیدرولوژیکی، بسیار قدرتمند می‌باشد[۳,۲].

در چند دههٔ اخیر با استفاده از سیستم استنتاج فازی برپایهٔ شبکهٔ عصبی تطبیقی تحقیقاتی در زمینهٔ مدل‌سازی سری‌های زمانی صورت گرفته است. اما در اکثر این تحقیقات با استفاده از بسته‌های موجود نرم‌افزاری پس از طی مراحل مشخص و مربوط به نرم‌افزار، خروجی این نرم‌افزارها به عنوان نتایج ارائه شده و به مفاهیم اساسی و پایه‌ای سیستم‌های هوشمند کمتر توجه شده است. همچنین در تمامی این تحقیقات بررسی‌ها بر روی سری‌های زمانی تک‌متغیره صورت گرفته است[۵,۴,۳,۲].

هدف از این تحقیق آن است که علاوه بر بررسی قابلیت سیستم‌های انفیس در مدل‌سازی سری‌های زمانی تک‌متغیره، قابلیت این سیستم‌ها در مدل‌سازی سری‌های زمانی چندمتغیرهٔ هیدرولوژیکی جهت پیش‌بینی مورد بررسی قرار گیرد. سپس مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از پیش‌بینی این مدل‌ها و مدل‌های قبلی انجام شود.

جهت بررسی نتایج، مطالعات بر روی داده‌های شاخه‌های مختلف ورودی به مخزن سد زاینده‌رود صورت گرفته است. رودخانه زاینده‌رود مهم‌ترین رودخانه مرکزی ایران است که دارای مصارف گوناگون شهری، کشاورزی و صنعتی می‌باشد. این رودخانه به طول تقریبی ۳۶۰ کیلومتر از ارتفاعات زردکوه بختیاری سرچشمه گرفته و نهایتاً با عبور از شهر اصفهان به باتلاق گاوخونی ختم می‌گردد. سرچشمه‌های رودخانه زاینده‌رود در فاصله ۱۱۰ کیلومتری غرب اصفهان به سد مخزنی زاینده‌رود به حجم ۱۴۵۰ میلیون مترمکعب وارد می‌شوند[۶]. دو

[1] Intelligent Systems
[2] Artificial Neural Network(ANN)
[3] Fuzzy Logic
[4] Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System or Adaptive Network-based Fuzzy Inference System

رودخانه مهم در حوضه آبریز سد زاینده‌رود به نام‌های رودخانه پلاسجان و شاخه اصلی زاینده‌رود جریان دارند که با به هم پیوستن این دو رودخانه، رودخانه زاینده‌رود تشکیل می‌شود. علاوه بر آن‌ها رودخانه سمندگان نیز یکی از رودخانه‌هایی است که به دریاچه سد وارد می‌شود ولی نسبت به دو رودخانه دیگر از اهمیت کمتری برخوردار است. مساحت کل حوضه آبریز سد زاینده‌رود ۴۲۰۰ کیلومترمربع برآورد شده است[۷].

۱-۳ روش انجام تحقیق

در این تحقیق مراحل مدل‌سازی سری‌های زمانی با استفاده از سیستم‌های انفیس به صورت زیر انجام شده است.

۱-۳-۱ مروری بر سری‌های زمانی هیدرولوژیکی و مدل‌سازی آن‌ها

در این مرحله مبانی سری‌های زمانی اعم از تک‌متغیره و چندمتغیره و روش‌های تئوریک مدل‌سازی آن‌ها مانند روش گشتاورها و روش حداکثر درستنمایی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

۱-۳-۲ مروری بر سیستم‌های هوشمند

جهت مدل‌سازی سری‌های زمانی با استفاده از سیستم‌های استنتاج فازی برپایهٔ شبکهٔ عصبی تطبیقی لازم است که در ابتدا با سیستم‌های فازی و شبکهٔ عصبی مصنوعی آشنایی کاملی صورت گیرد. بنابراین در این مرحله مبانی اساسی و کاربردی این سیستم‌ها و به دنبال آن سیستم‌های انفیس مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۳-۳ مطالعهٔ موردی بر روی سرشاخه‌های زاینده‌رود

برای مدل‌سازی سری‌های زمانی مربوط به دبی سرشاخه‌های ورودی سد زاینده‌رود موارد زیر مورد مطالعه قرار گرفته است.

فیزیوگرافی حوضه: این مرحله شامل شناخت موقعیت شاخه‌های ورودی به مخزن سد، محل به هم پیوستن آن‌ها و بررسی دبی‌های طبیعی و غیرطبیعی آن‌ها می‌باشد.

تاریخچهٔ حوضه: شامل زمان احداث سد، ایستگاه‌های اندازه‌گیری و سازه‌های مختلف بر روی سرشاخه‌های ورودی سد از جمله سازه‌های انتقال آب بین حوضه‌ای می‌باشد. همچنین نحوهٔ مدیریت این سازه‌ها و سازمان‌های اداره‌کنندهٔ آن‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

جمع‌آوری داده‌ها: پس از شناخت فیزیوگرافی حوضه و تاریخچهٔ حوضه، داده‌های لازم از سازمان‌های معتبر مربوطه اخذ شده است.

آماده‌سازی داده‌ها: در مواردی‌که داده‌های موجود از ایستگاه‌های مختلف دارای نقص یا اشکال بوده است، ابتدا علل این نقص‌ها بررسی شده و در صورت امکان با روش‌های مربوطه برطرف شده است. سپس داده‌ها با استفاده از آزمون‌های مختلف از جهت ایستا یا ناایستابودن سری‌های زمانی، مناسب بودن طول آماری و نرمال‌بودن مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در صورت ارضاشدن شرایط این آزمون‌ها، مراحل بعدی صورت گرفته است و در غیر اینصورت بررسی‌ها جهت رفع اشکال مربوطه انجام شده است.

۱-۳-٤ مدل‌سازی سری‌های زمانی

پس از طی مراحل بالا مدل‌سازی سری‌های زمانی انجام شده است. این مدل‌سازی‌ها به صورت زیر صورت گرفته‌اند:

مدل‌سازی سری‌های زمانی تک‌متغیره و چندمتغیره با استفاده از روش‌های تئوریک:

در این قسمت مدل‌های مختلف حاصل از روش‌های متداول قبلی مانند روش گشتاورها تشکیل شده‌اند.

مدل‌سازی سری‌های زمانی با استفاده از سیستم استنتاج فازی برپایهٔ شبکهٔ عصبی تطبیقی:

در این تحقیق مدل‌سازی سری‌های زمانی با استفاده از انفیس به دو صورت زیر انجام شده است:

۱. **مدل‌سازی با استفاده از سیستم انفیس:** در این قسمت با تشکیل سیستم انفیس و آموزش آن مدل‌های مربوط به سری‌های زمانی تک‌متغیره و چندمتغیره تشکیل شده است.
۲. **مدل‌سازی با استفاده از روش ارائه‌شده در این تحقیق:** در تحقیق حاضر با استفاده از مبانی پایه‌ای و اساسی سیستم‌های انفیس، روشی جدید و مؤثر جهت تخمین پارامترهای سری‌های زمانی تک‌متغیره و چندمتغیره ارائه شده‌است. با استفاده از این روش پس از به دست آوردن پارامترهای سری‌های زمانی، مدل‌های تک‌متغیره و چندمتغیره تشکیل شده‌اند.

مدل‌سازی سری‌های زمانی با استفاده از شبکهٔ عصبی پرسپترون چندلایهٔ پیشخور

در این مرحله که جهت مقایسهٔ بهتر عملکرد مدل‌های تشکیل‌شده، صورت گرفته‌است، مدل‌های مختلف سری‌های زمانی تک‌متغیره و چندمتغیره با استفاده از شبکه‌های پرسپترون چندلایه[1] پیشخور با روش آموزش پس‌انتشار خطا[2] تشکیل شده‌است. انتخاب این نوع از شبکه‌های عصبی مصنوعی به این دلیل بوده است که در تحقیقات قبلی، عملکرد بهتر این نوع شبکه‌ها نسبت به انواع دیگر شبکه‌های عصبی در زمینهٔ هیدرولوژی و منابع آب به اثبات رسیده است[۸].

۱-۳-۵ پیش‌بینی سری‌های زمانی

در این مرحله با استفاده از مدل‌های تشکیل‌شده، پیش‌بینی سری‌های زمانی تک‌متغیره و چندمتغیره انجام شده است.

۱-۳-٦ مقایسهٔ عملکرد مدل‌های حاصل از سیستم‌های انفیس و مدل‌های حاصل از روش‌های دیگر

در این مرحله، عملکرد سیستم‌های انفیس در پیش‌بینی سری‌های زمانی تک‌متغیره و چندمتغیره با عملکرد مدل‌های حاصل از روش‌های دیگر که در بالا ذکر شد، مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-٤ ساختار پایان‌نامه

ساختار این پایان‌نامه در فصل‌های بعد به ترتیب زیر می‌باشد:

در **فصل دوم** پیشینهٔ علمی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی و سیستم‌های محاسبات نرم[3] از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی، سیستم‌های فازی و سیستم‌های استنتاج فازی برپایهٔ شبکهٔ عصبی تطبیقی مورد بررسی قرار گرفته است.

در **فصل سوم** مبانی علمی و مفاهیم اساسی و کاربردی مورد استفاده در این تحقیق ارائه شده است.

---

[1] Feed Forward MultiLayer Perceptron
[2] Back Propagation
[3] Soft Computing

در **فصل چهارم** مطالعهٔ موردی این تحقیق که حوضهٔ آبریز زاینده‌رود می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته است.

در **فصل پنجم** مدل‌سازی سری‌های زمانی با استفاده از سیستم‌های انفیس و روش‌های دیگر ارائه و سپس نتایج حاصل از پیش‌بینی این مدل‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند.

در **فصل ششم** نتیجه گیری کلی حاصل از تحقیق و چگونگی عملکرد سیستم‌های استنتاج فازی برپایهٔ شبکهٔ عصبی تطبیقی در مدل‌سازی سری‌های زمانی تک‌متغیره و چندمتغیره ارائه شده است. همچنین در این فصل پیشنهاداتی در زمینهٔ کار با سیستم استنتاج فازی برپایهٔ شبکهٔ عصبی تطبیقی در زمینه‌های علمی به خصوص هیدرولوژی برای تحقیقات آینده ارائه شده است.

فصل دوم
پیشینهٔ علمی تحقیق

۲-۱ مقدمه

مدل‌سازی سری‌های زمانی به منظور تولید داده و پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی، یک گام مهم در طراحی و تحلیل سیستم‌های منابع آب می‌باشد[۳]. امروزه مدل‌های ARMA به طور گسترده‌ای جهت مدل‌کردن سری‌های زمانی منابع آب به‌کارگرفته می‌شود، زیرا این مدل‌ها به عنوان مدل استاندارد سری‌های زمانی احتمالاتی[1] شناخته شده است[۹]. ولی، این مدل‌ها برای تحلیل فرآیندهای ذاتاً دینامیکی و غیرخطی هیدرولوژیکی، مناسب نبوده و خوب عمل نمی‌کنند[۱۰]. همان طور که بیان گردید، تحلیل سری‌های زمانی به نگاشت گروهی رابطهٔ بین ورودی‌ها وخروجی‌ها نیاز دارد و این در حالی‌است که مقادیر ثبت‌شده‌ای از ورودی‌ها و خروجی‌ها در گذشته وجود داشته است. به دلیل وجود مشکلات ساخت مدل غیرخطی تخمین پارامترها در سری‌های زمانی، در نظر-گرفتن سیستم غیرخطی در مدل‌های هیدرولوژیکی بسیار کم مشاهده شده‌است [۱۳,۱۲,۱۱]. در اکثر موارد، فرض خطی یا خطی تکه‌ای[2]، در نظرگرفته شده‌است[۱۵,۱۴].

در اوایل سال ۱۹۹۹، این موضوع مورد توجه قرارگرفت که یک نوع روش آزمایشی جهت مشخص‌کردن سیستم‌های خطی و غیرخطی استنتاج شود. اما اگر هدف از تحلیل سری‌های زمانی، پیش‌بینی باشد، مشخص‌شدن

[1] Stochastic Time Series
[2] Linearity or Piecewise Linearity

این‌که سیستم خطی یا غیرخطی است کافی نیست، بلکه در صورت غیرخطی‌بودن، یک مدل مناسب نیاز می‌باشد. این در حالی بود که برای بسیاری از کاربردهای سیستم‌های دینامیکی و غیرخطی، تئوری یا توابع خاصی ارائه نشده‌است که با دادن ورودی به آن، خروجی به دست‌آید. اما در عین حال مدل‌های غیرتئوریک انعطاف‌پذیری جهت سیستم‌های غیرخطی، تحت عنوان مدل محاسبات نرم ارائه شده‌است[۱۶].

۲-۲ پیشینهٔ علمی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی

مطالعات اولیهٔ هایزن[۱] در سال ۱۹۱۴ و سودلر[۲] در سال ۱۹۲۷، نشان داد که استفاده از تئوری آمار و احتمالات در تحلیل سری جریان رودخانه مناسب می‌باشد[۱۸,۱۷]. هرست[۳] در سال ۱۹۵۱ در تحقیقی بر روی بر روی رودخانهٔ نیل برای پروژهٔ سد آسوان[۴]، مطالعاتی از ثبت طولانی‌مدت سری زمانی جریان رودخانه و سری زمانی ژئوفیزیکی آن ارائه نمود. او در گزارش مطالعات خود گفت: "جنبه‌های نظری و کاربردی تحلیل سری‌های زمانی هیدرولوژیکی و ژئوفیزیکی مربوط به پدیده‌های هیدرولوژیکی و ژئوفیزیکی به طور عجیبی به هم مربوطند"[۱۹]. بارنز[۵] در سال ۱۹۵۴ مطالعات اولیهٔ هایزن و سودلر را ادامه داد و ایدهٔ تولید مصنوعی داده‌های جریان را با استفاده از جدول اعداد تصادفی نرمال ارائه نمود[۲۰]. این ایده در ابتدا مورد توجه قرار نگرفت تا اینکه در اوایل دههٔ ۱۹۶۰، به صورت رسمی، توسعه و پیشرفت مدل‌سازی استوکستیک با معرفی و کاربرد مدل‌های خودهمبسته برای جریان‌های سالیانه و فصلی آغاز شد. این کار توسط توماس و فیرینگ[۶] در سال ۱۹۶۲ و یوجویچ[۷] در سال ۱۹۶۳ صورت گرفت[۲۲,۲۱].

از آن پس بسیاری از محققین در تمامی جهان در جهت گسترش و پیشرفت ایده و مدل‌های ارائه‌شده، ارائهٔ دلایل فیزیکی وتوجیه آن مدل‌ها، معرفی و ارائهٔ مدل‌های تناوبی و کاربرد آن‌ها در برنامه‌ریزی، مدیریت و بهره‌برداری سیستم‌های منابع آب[۸] بسیار تلاش کردند. تحقیقات و بررسی‌های انجام‌شده در این زمینه بسیار وسیع است و تمامی آن‌ها توسط متخصصان و کارشناسان خبره در زمینهٔ هیدرولوژی بازبینی و بازنویسی شده است. از آن

[1] Hazen
[2] Sudler
[3] Hurst
[4] Aswan Dam
[5] Barnes
[6] Thomas and Fiering
[7] Yevjevich
[8] Water Resources Systems Planning, Design and Operation

جملـه مـی‌تـوان بـه تحقیقـات چیـو[1][۲۳]، ردریگـز[2] و همکـاران[۲۴]، کلمـز[3][۲۵]، جکسـون[4][۲۶]، لاورنـس و کوتگدا[5][۲۷] و مک لود و هیپل[6][۲۸] اشاره نمود.

در گذشته انواع مدل‌های استوکستیک جهت مدل‌سازی سری‌هـای زمـانی ارائـه شـده اسـت. از انـواع ایـن مدل‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- مدل‌های خودهمبسته که توسط توماس و فیرینگ در سال ۱۹۶۲ و یوجویچ در سال ۱۹۶۳ ارائـه شـد و توسط ماتالاس و سلاس[7] به ترتیب در سال‌هـای ۱۹۶۷ و ۱۹۷۸ بـا کـار بـر روی مـدل‌هـای چنـدمتغیره گسترش یافت[۳۰,۲۹].

۲- مدل‌هایFGN[8] که توسط ماندلبرت و والاس[9] در سال ۱۹۶۸ و همچنین توسـط ماتـالاس و والاس در سال ۱۹۷۱ ارائه گردید[۳۲,۳۱].

۳- مدل‌های خودهمبسته با میانگین متحرک(ARMA) که توسط کارلسون[10] و همکاران در سال ۱۹۷۰ و اکنل[11] در سال ۱۹۷۱ ارائه شد[۳۴,۳۳].

۴- مجیا[12] در سال ۱۹۷۱ مدل‌های BL[13] را ارائه کرد[۳۵].

۵- والنسیا و شاکه[14] در سال ۱۹۷۳ مدل‌های شکننده[15] را ارائه نمودند[۳۶].

۶- مدل‌های زنجیرهٔ مارکوف[16] که توسط جکسون در سال ۱۹۷۵ ارائه گردید[۳۷].

۷- مدل‌های خودهمبسته با میانگین متحرک مارکوف توسط لتنمیر و بارگز[17] در سال ۱۹۷۷ ارائه شد[۳۸].

۸- مدل‌های ترکیبی عمومی[18] که توسط بویز[19] و سلاس در سال ۱۹۷۸ ارائه گردید[۳۹].

---

[1] Chiu
[2] Rodriguez
[3] Klemes
[4] Jackson
[5] Lawrance and Kottegoda
[6] McLeod and Hipel
[7] Matalas and Salas
[8] Fractional Gaussian Noise Models
[9] Mandelbrot and Wallis
[10] Carlson
[11] O'Connell
[12] Mejia
[13] Broken-Line Models
[14] Valencia and Schaake
[15] Disaggregation Models
[16] Markov Mixture
[17] Lettenmaier and Burges
[18] General Mixture Models
[19] Boes

تمامی این مدل‌ها با این هدف ارائه و بسط داده شده‌اند که مدل به‌دست آمده بیشترین شباهت را با مشخصه‌های آماری سری‌های زمانی هیدرولوژیکی داشته باشد. اما این سؤال مطرح است که کدام مدل جهت بهره‌برداری و یا طراحی سیستم‌های منابع آب بهتر است؟ و یا کدام مدل در این راستا دارای بهترین عملکرد است؟ هر یک از مدل‌های فوق دارای ویژگی‌های خاص خود است و تنها بعضی از آن‌ها در هیدرولوژی قابل استفاده است. در تمامی مدل‌های فوق یک یا چند نقص از نقایص زیر وجود دارد:

۱) عدم توانایی در بررسی سری‌های زمانی دارای استقلال زمانی کوتاه مدت[1]

۲) عدم توانایی در بررسی سری‌های زمانی دارای استقلال زمانی بلند مدت[2]

۳) مشکل و پیچیده‌بودن تخمین پارامترهای مدل

۴) وجود محدودیت در تولید نمونه‌های زیاد از داده‌های مصنوعی

۵) عدم وجود اساس و پایهٔ فیزیکی برای مدل

۶) وجود پارامترهای زیاد

تجربهٔ استفاده از مدل‌های سری‌های زمانی نشان می‌دهد که مدل‌های خودهمبسته، خودهمبسته با میانگین متحرک و مدل‌های شکننده در هیدرولوژی دارای نتایج کاربردی و رضایت‌بخشی نسبت به مدل‌های دیگر می‌باشند. دیگر مدل‌ها یا دارای پیچیدگی بسیار زیاد هستند و یا کاربرد آن‌ها در هیدرولوژی مناسب نمی‌باشد[۴۰].

۲-۳ پیشینهٔ علمی شبکه‌های عصبی مصنوعی

ایدهٔ اولیهٔ شبکه‌های عصبی مصنوعی در واقع توسط دونالد هب[3] در سال ۱۹۴۹ ارائه گردید؛ هرچند قبل از آن فعالیت‌های اساسی در شناخت نرون[4] و نحوهٔ عملکرد آن توسط دانشمندانی چون هرمان فون هلمهلتز[5]، ارنست ماخ[6] و ایوان پاولف[7] صورت پذیرفت[۴۱]. همچنین در سال ۱۹۴۳ وارن‌مک‌کلوث و والترپیتز[8] با مدل کردن نرون‌ها به عنوان محاسبه‌گرهای دودویی[9] با حد آستانهٔ مشخص و اتصالات سیناپسی بین نرون‌ها، ثابت کردند که

[1] Short-Term Dependence
[2] Long-Term Dependence
[3] Donald Hebb
[4] Neuron
[5] Hermann Von Helmholtz
[6] Ernst Mach
[7] Ivan Pavlov
[8] Warren McCulloch and Walter Pitts
[9] Binary