



دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده علوم زمین
گروه هیدروژئولوژی
پایان نامه کارشناسی ارشد

ارزیابی روشهای مفهومی و فازی در

مدل سازی جریان رودخانه

محمد رضا غفوری

اساتید راهنما
دکتر حمید طاهری شهرآئینی
دکتر بهرام ثقفیان

استاد مشاور
دکتر سعید باقری شورکی

شهریور ۱۳۸۸





دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده علوم زمین
گروه هیدروژئولوژی

ارزیابی روشهای مفهومی و فازی در مدل سازی جریان رودخانه

دانشجو: محمدرضا غفوری

اساتید راهنما

دکتر حمید طاهری شهرآئینی

دکتر بهرام ثقفیان

استاد مشاور

دکتر سعید باقری شورکی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۸۸

دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده علوم زمین
گروه هیدروژئولوژی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمدرضا غفوری

تحت عنوان:

ارزیابی روشهای مفهومی و فازی در مدل سازی جریان رودخانه

در تاریخ ۳۰ شهریور ۱۳۸۸ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه عالی مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی : دکتر سعید باقری شورکی		نام و نام خانوادگی : دکتر حمید طاهری شهرآئینی
---	نام و نام خانوادگی : ---		نام و نام خانوادگی : دکتر بهرام تقفیان

امضاء	نمایندة تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی : دکتر فرج الله فردوست		نام و نام خانوادگی : دکتر غلامحسین کرمی
			نام و نام خانوادگی : دکتر سید فضل الله ساغروانی

تعهد نامه

اینجانب **محمد رضا غفوری** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته هیدروژئولوژی (آبشناسی) دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **ارزیابی روشهای مفهومی و فازی در مدل سازی جریان رودخانه** تحت راهنمایی دکتر حمید طاهری شهراآینی و دکتر بهرام ثقفیان متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای دیگران به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود و یا دیگران برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده یا بافت های آنها استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ: ۱۳۸۸/۰۶/۳۰

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب به نحو مقتضی باید در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

مقالات مستخرج از پایان نامه

- شبیه سازی جریان روزانه رودخانه در حوضه کارون با استفاده از مدل HEC-HMS، ۱۳۸۸، اولین کنفرانس بین المللی منابع آب، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.
- ارزیابی مدل پیوسته محاسبه تلفات SMA در شبیه سازی دراز مدت جریان روزانه رودخانه (آماده ارائه به مجلات پژوهشی).
- سایر مقالات در دست تهیه می باشد.

تقدیر و تشکر

"شکر و سپاس ایزد یکتا را که به ما فکرت آموخت"

به مصداق کلام حق تعالی "من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق" و حسب فرموده مولای متقیان علی (ع) "من علمنی حرفاً فقد صیرنی عبداً"، اکنون که در سایه عنایات و الطاف حق تعالی توفیقی حاصل شد بر خود تکلیف می دانم که از یاری بی دریغ و صادقانه و راهنمایی های توأم با سعه صدر و خوشرویی استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر حمید طاهری شهرآئینی و تفقد اساتید فاخرم جناب آقایان دکتر بهرام دکتر ثقفیان و دکتر سعید باقری شورکی در مشاوره ارزشمند و استفاده از تجربیات گرانبهای حاصل از تلاش و تکاپوی آنها در ارتقای جامعه علمی کشور تشکر و سپاسگذاری نمایم. همچنین از سرکار خانم انوری که در گردآوری داده ها کمک بزرگی نمودند نیز کمال تشکر را دارم. از اساتید محترم و بزرگوار دوره تحصیل جناب آقایان دکتر کرمی، دکتر کاظمی، دکتر دولتی ارده جانی، دکتر حافظی مقدس، اعضای محترم دانشکده علوم زمین آقایان شاه حسینی، خانعلی زاده و سرکار خانم سعیدی و کلیه همکلاسی ها و دوستان شفیقم در این دوره بویژه آقای حسین شریفی و دکتر حسین فتحیان و تمامی کسانی که در رسیدن به این مرحله و مرتبه سهمی داشته اند صمیمانه تشکر و قدردانی می نمایم.

تقدیم به:

آقا امام زمان (عج الله)

پدر بزرگوارم (نماد صبر و متانت)

مادر مهربانم (أسوه مهر و شفقت)

برادران عزیزم (مثال عشق و ایثار)

و همه کسانی که گفتند تا بدانیم و رفتند تا بمانیم.

چکیده:

به موازات رشد سریع جمعیت و افزایش نیاز های بشری، تأمین آب از اهمیت ویژه ای برخوردار شده است. استفاده و مدیریت بهینه منابع آب، مستلزم شناخت پدیده های هیدرولوژیکی می باشد که رواناب سطحی یکی از مهم ترین مراحل این چرخه به شمار می آید. برای اعمال سیاستهای مدیریتی و اتخاذ تصمیمات شایسته در بهره برداری از منابع آب، پیش بینی مقدار جریان های حاصل از بارندگی و مقادیر ورودی به مخازن سد ها و ... از نقش و جایگاه ویژه ای برخوردار می باشد. مدل های مختلف با ساختار های متفاوت می توانند در تخمین و پیش بینی جریان رودخانه مورد استفاده قرار گیرند و نتایج قابل قبولی ارائه نمایند. لذا در این تحقیق، ضمن بررسی مدل های مختلف، مدل HEC-HMS به همراه مدل محاسبه تلفات SMA که قابلیت شبیه سازی پیوسته جریان را دارد و اخیراً به آن اضافه شده است به عنوان یک مدل مفهومی مناسب انتخاب گردید و همچنین مدل یادگیری فعال (ALM) به عنوان مدل فازی مناسب انتخاب شد و این مدل جهت شبیه سازی جریان روزانه رودخانه کارون III (حوضه آبریز سد کارون III) در محل ایستگاه هیدرومتری پل شالو در طی سالهای آبی ۷۱-۱۳۷۰ تا انتهای ۷۸-۱۳۷۷ مورد ارزیابی قرار گرفت. تاکنون هیچ تحقیقی مبنی بر پیش بینی جریان رودخانه ای با مدل ALM انجام نشده است. برای کالیبراسیون و آموزش مدل ها از داده های دبی روزانه پنج سال نخست و برای صحت سنجی و آزمون از داده های سه سال انتهایی بهره گرفته شده است. در مدل مفهومی اثر دوره Warm-Up، کارایی مدل بدون تمایز بین انواع بارش و حالت اضافه نمودن مدل ذوب برف بررسی شده است. نتایج نشان داد که با اضافه نمودن مدل ذوب برف، نتایج مدل HEC-HMS بهبود یافته و مدل دبی های اوج را با دقت بیشتری تخمین می زند که نتایج بدست آمده برای مدل HEC-HMS به ترتیب برابر با $R^2=0.84$ ، $Nash-Sutcliffe=0.82$ ، $Bias=36\text{cms}$ ، $MPAE=36.5\%$ ، $PTVE=11.3\%$ ، $RMSE=151.3\text{cms}$ و $PW-RMSE=265\text{cms}$ می باشد. در مدل فازی نیز مدل های متنوعی جهت شبیه سازی جریان استفاده شد. نتایج بدست آمده برای مدل بهینه ALM که ۳۲ قانون داشت و در پارامتر های ورودی آن از دما، بارش، رطوبت و فشار بخار با اضافه تاخیر های زمانی آنها تا چهار روز استفاده شده بود برابر با $R^2=0.33$ ، $Nash-Sutcliffe=0.29$ ، $Bias=65.8\text{cms}$ ، $MPAE=95.5\%$ ، $PTVE=22.3\%$ ، $RMSE=265\text{cms}$ و $PW-RMSE=418\text{cms}$ می باشد. با مقایسه نتایج ALM و مدل HEC-HMS به راحتی می توان دریافت که نتایج مدل مفهومی بسیار بهتر از فازی می باشد. نظر به اینکه مدل HEC-HMS به صورت مفهومی بوده و روابط و ارتباط بین اجزای مختلف حوضه را در نظر می گیرد لذا دور از انتظار نیست که نتایج آن بهتر از روش ALM باشد که در بین متغیر های مختلف دنبال همبستگی با جریان می گردد تا

شرایط مناسبی برای ایجاد همبستگی بین متغیرهای مختلف با جریان بیابد و در حالیکه همبستگی متغیرهای دما، بارش، رطوبت و فشار بخار با جریان رودخانه در حوضه کارون بسیار کم می باشد. از طرفی یکپارچه در نظر گرفتن کل حوضه در مدل ALM در قیاس با مدل HEC-HMS که زیر حوضه ها را در نظر می گیرد عامل دیگری در ضعف آن نسبت به HEC-HMS می باشد. در مرحله بعدی اقدام به مدل سازی با روش ALM در حالیکه جریان های با تاخیرهای مختلف نیز به عنوان ورودی بودند استفاده گردید. نتایج به خاطر همبستگی بالای جریان رودخانه با تاخیرهای آن به نحو چشمگیری بهبود یافت. مدل بهینه ALM در شرایطی که جریان با تاخیرهای مختلف جزء ورودی های مدل بودند دارای ۱۶ قانون شد و نتایج آماری آنها شامل $R^2=0.81$ ، $Nash-Sutcliffe=0.81$ ، $Bias=5.5\text{cms}$ ، $MPAE=12.9\%$ ، $PTVE=1.86\%$ ، $RMSE=137\text{cms}$ و $PW-RMSE=297\text{cms}$ می باشد. مقایسه نتایج آماری و گرافیکی ALM و HEC-HMS نشان می دهد که هر دو مدل با توانایی بالایی توانستند نتایج بسیار مناسب و درخور توجهی در شبیه سازی روزانه جریان در حوضه کاملاً ناهمگون کارون III و شرایط نامطلوب دشوار کننده مدل سازی ارائه نمایند. ولی با در نظر گرفتن فیزیکی بودن مدل مفهومی، کالیبراسیون دشوار و تعداد پارامترهای زیاد مورد نیاز آن، حصول نتایج مشابه توسط ALM که استفاده و مدل سازی توسط آن بسیار ساده بوده می توان به مناسب بودن مدل ALM پی برد. از طرفی مدل ALM توانایی ویژه ای در شناخت پارامترهای موثر در پیش بینی جریان رودخانه ای و رتبه بندی پارامترها و حذف پارامترهای غیر ضروری را دارد و از همه پارامترهای ورودی استفاده نمی نماید. لذا با حداقل تعداد پارامترهای ورودی می توان به دقت مورد نظر دست یافت. بدین رو می توان مدل ALM را به عنوان یک مدل جدید جهت پیش بینی و شبیه سازی جریان رودخانه ای معرفی نمود. همچنین در این پژوهش برای ارزیابی دقیق تر مدل ها، مدل مفهومی با سایر مدل های مفهومی معروف همچون SRM، SWAT و ... و مدل ALM با سایر مدل ها هوش مصنوعی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته اند و توانمندی آنها در قیاس با مدل های دیگر نیز به اثبات رسید.

واژگان کلیدی: شبیه سازی بارش-رواناب، هوش مصنوعی، مدل سازی فازی، مدل محاسبه تلفات
ANN, HEC-HMS, ALM, SMA

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
IV	تقدیر و تشکر.....
V	چکیده.....
۱	فصل اول: مقدمه و کلیات.....
۲	مقدمه و بیان مسئله.....
۵	فصل دوم: مروری بر منابع.....
۶	۱-۲ مدل مفهومی.....
۱۷	۲-۲ مدل فازی ALM.....
۱۸	۳-۲ جمع بندی و انتخاب مدل مفهومی مناسب.....
۲۰	فصل سوم: منطقه مورد مطالعه و پیش پردازش داده ها.....
۲۱	۱-۳ مقدمه.....
۲۱	۲-۳ موقعیت اقلیمی منطقه.....
۲۱	۳-۳ تغییرات ارتفاع.....
۲۲	۴-۳ گردآوری آمار.....
۲۳	۵-۳ روشهای محاسبه توزیع مکانی بارندگی.....
۲۶	فصل چهارم: ساختار و مفاهیم اساسی مدل مفهومی و فازی.....
۲۷	۱-۴ ساختار مدل مفهومی HEC-HMS.....
۲۹	۱-۱-۴ مدل های محاسبه تلفات در HEC-HMS.....
۳۰	۱-۱-۴-۱ معادلات و مفاهیم اساسی مدل SMA.....
۳۰	۲-۱-۴-۱ مولفه های ذخیره در مدل SMA.....
۳۱	۳-۱-۴-۱ مولفه های جریان در SMA.....
۳۵	۴-۱-۴-۱ ترتیب محاسبات مدل SMA.....
۳۶	۵-۱-۴-۱ تخمین پارامتر های مدل SMA.....
۳۷	۲-۱-۴ مدل سازی رواناب مستقیم به کمک HEC-HMS.....
۳۹	۳-۱-۴ مدل سازی جریان پایه به کمک HEC-HMS.....
۴۰	۴-۱-۴ مدل سازی جریان در کانال ها با HEC-HMS.....
۴۰	۱-۴-۱-۴ مفاهیم اساسی و معادلات مدل ماسکینگام.....
۴۲	۲-۴-۱-۴ تخمین پارامتر های مدل ماسکینگام.....
۴۳	۲-۴ مدل های فازی.....
۴۳	۱-۲-۴ تفاوت مجموعه های فازی و کلاسیک.....
۴۴	۲-۲-۴ مدل فازی ALM.....
۴۵	۱-۲-۲-۴ الگوریتم ALM.....
۵۱	۲-۲-۲-۴ روش جستجوی ابتکاری جدید.....
۵۴	۳-۲-۲-۴ تقسیم بندی فازی و مدل سازی فازی برای ALM.....
۵۴	۱-۳-۲-۲-۴ تقسیم بندی فازی.....
۵۵	۲-۳-۲-۲-۴ مدل سازی ALM به صورت فازی.....

۶۰	..... فصل پنجم: مدل سازی مفهومی و فازی.....
۶۱	..... ۱-۵ مدل مفهومی.....
۶۱	..... ۱-۱-۵ انتخاب اجزای مدل HEC-HMS.....
۶۱	..... ۲-۱-۵ خصوصیات فیزیوگرافیک حوضه و ایجاد مولفه های مدل.....
۶۳	..... ۳-۱-۵ خلاصه ای از پروسه کالیبراسیون در HEC-HMS.....
۶۴	..... ۴-۱-۵ اجرای مدل و کالیبراسیون.....
۷۰	..... ۵-۱-۵ صحت سنجی و اعتبار یابی مدل.....
۷۱	..... ۶-۱-۵ شاخص های نیکوئی برازش (Goodness-of-fit Indices).....
۷۲	..... ۲-۵ مدل فازی ALM.....
۷۳	..... ۱-۲-۵ آموزش مدل ALM.....
۷۴	..... ۲-۲-۵ آزمون مدل ALM.....
۷۶	..... فصل ششم: ارزیابی و تحلیل نتایج و مقایسه مدل ها.....
۷۷	..... ۱-۶ مدل مفهومی.....
۷۷	..... ۱-۱-۶ بررسی تاثیر تمایز بین بارش جامد و مایع.....
۷۷	..... ۱-۱-۱-۶ بررسی کارایی مدل در حالت بدون در نظر گرفتن ذوب برف.....
۸۰	..... ۲-۱-۱-۶ بررسی کارایی مدل با در نظر گرفتن ذوب برف.....
۸۸	..... ۲-۱-۶ بررسی تأثیر دوره Warm-Up در بهبود نتایج مدل.....
۸۹	..... ۳-۱-۶ مقایسه نتایج مدل مفهومی HEC-HMS (به همراه مدل SMA) با سایر مدل ها.....
۹۷	..... ۴-۱-۶ جمع بندی و ارزیابی کلی مدل مفهومی HEC-HMS (SMA).....
۹۸	..... ۲-۶ مدل فازی ALM.....
۹۹	..... ۱-۲-۶ بررسی نقاط فازی و توابع عضویت مناسب.....
۱۰۱	..... ۲-۲-۶ تعیین شبکه بندی مناسب فضای متغیر های ورودی و خروجی.....
۱۰۴	..... ۳-۲-۶ مدل سازی جریان بدون استفاده از داده های جریان در روز های قبل.....
۱۱۰	..... ۴-۲-۶ بررسی میزان تأثیر اضافه نمودن داده های جریان به پارامتر های ورودی.....
۱۱۴	..... ۵-۲-۶ بررسی میزان تأثیر داده های غیر جریان در حضور داده های جریان.....
۱۱۹	..... ۶-۲-۶ مدل سازی با استفاده از داده های جریان.....
۱۲۳	..... ۷-۲-۶ مقایسه نتایج حاصل از مدل ALM با سایر مدل های مبتنی بر هوش مصنوعی.....
۱۲۷	..... ۸-۲-۶ جمع بندی و ارزیابی کلی مدل فازی ALM.....
۱۲۸	..... ۳-۶ مقایسه عملکرد و ارزیابی مدل مفهومی و فازی.....
۱۳۲	..... ۴-۶. نتایج کلی و زمینه ای برای ادامه تحقیقات.....
۱۳۲	..... ۱-۴-۶ نتایج حاصل از مدل سازی فازی و مفهومی.....
۱۳۴	..... ۲-۴-۶ پیشنهادات و زمینه هایی برای ادامه تحقیقات.....
۱۳۶	..... فهرست منابع.....

فهرست اشکال و جداول

صفحه	عنوان
۲۲	شکل ۳-۱. موقعیت حوضه کارون III به همراه نقشه رقومی ارتفاع و آبراهه‌های اصلی آن.....
۲۵	شکل ۳-۲. نقشه توزیع مکانی بارندگی برآورد شده توسط IDW برای آذرماه حوضه کارون III.....
۲۷	شکل ۴-۱. نقشه شماتیک عملکرد مدل HEC-HMS برای برآورد رواناب حوضه آبریز.....
۲۹	شکل ۴-۲. مولفه های مدل HEC-HMS.....
۳۱	شکل ۴-۳. طرح شماتیک و مفهومی الگوریتم محاسبه رطوبت خاک.....
۴۱	شکل ۴-۴. ذخیره گوه ای (From Linsley et al., 1982).....
۴۲	شکل ۴-۵. ناحیه قابل قبول پارامتر های مدل ماسکینگام.....
۴۶	شکل ۴-۶. الگوریتم پیشنهادی برای ALM.....
۴۷	شکل ۴-۷. (الف) داده های تصویر شده روی صفحه x_1-y (ب) داده های تصویر شده روی صفحه x_2-y
۴۸	شکل ۴-۸. (الف) نتایج اعمال IDS روی یک نقطه در صفحه x_1-y ، (ب) نتایج اعمال IDS روی تمامی نقاط موجود در صفحه x_1-y ، (ج) نتایج اعمال IDS روی تمامی نقاط موجود در صفحه x_2-y
۴۸	شکل ۴-۹. (الف) مسیر استخراج شده از شکل ۳-۳ ب ، (ب) مسیر استخراج شده از شکل ۳-۳ ج.....
۵۰	شکل ۴-۱۰. فضای متغیرهای تقسیم شده به چهار زیرفضا، به همراه بهترین توابع غیر خطی متناظر.....
۵۳	شکل ۴-۱۱. الگوریتم نگرش جدید روش جستجوی ابتکاری برای تقسیم فضای متغیرها.....
۵۵	شکل ۴-۱۲. نمای شماتیکی از روشهای تقسیم بندی فضای یک متغیر.....
۵۹	شکل ۴-۱۳. تقسیم بندی فازی، توابع عضویت دوزنقه ای و درجه عضویتها برای نقطه $x^1 (x_1, x_2)$
۶۲	شکل ۵-۱. ساختار شماتیک مدل حوضه و عناصر هیدرولوژیکی آن.....
۶۴	شکل ۵-۲. طرح شماتیک فرآیند کالیبراسیون.....
۶۹	شکل ۵-۳. الگوی ذوب برف تعیین شده در روش شاخص دما.....
۷۴	شکل ۵-۴. نمودار های پراکندگی داده های ورودی در برابر دبی های مشاهده ای در دوره آموزش.....
۷۹	شکل ۶-۱. نمایش هیدروگراف (الف) و سری زمانی باقیمانده ها (ب) برای دوره صحت سنجی بدون ذوب برف.....
۸۰	شکل ۶-۲. نمایش معیار های گرافیکی سنجش خطا برای دوره صحت سنجی در حالت بدون ذوب برف.....
۸۰	شکل ۶-۳. نمایش هیدروگراف (الف) و سری زمانی باقیمانده ها (ب) برای دوره کالیبراسیون (معیار گرافیکی).....
۸۲	شکل ۶-۴. نمایش معیار های گرافیکی سنجش خطا برای دوره کالیبراسیون با در نظر گرفتن ذوب برف.....
۸۵	شکل ۶-۵. نمایش هیدروگراف (الف) و سری زمانی باقیمانده ها (ب) برای دوره صحت سنجی (معیار گرافیکی).....
۸۵	شکل ۶-۶. نمایش معیار های گرافیکی سنجش خطا برای دوره صحت سنجی.....
۸۶	شکل ۶-۷. تصویر برجسته شده دبی های اوج از دوره صحت سنجی (به شکل 5-7 توجه شود).....
۸۷	شکل ۶-۸. تعیین دمای بهینه ریزش برف (PX Temp).....
۸۷	شکل ۶-۹. تعیین دمای بهینه شروع ذوب برف (Base Temp).....

۹۳	شکل ۱۰-۶. هیدروگراف های حاصل از شبیه سازی با مدل SDI (رواناب ماهانه).....
۹۴	شکل ۱۱-۶. هیدروگراف و نمودار پراکندگی مدل سازی ماهانه (با ذوب برف) با HEC-HMS.....
۹۵	شکل ۱۲-۶. هیدروگراف شبیه سازی با مدل SRM در حوضه شهرچائی.....
۱۰۱	شکل ۱۳-۶. تغییرات Nash-Sutcliffe و R^2 در تعداد قوانین مختلف و نقاط فازی متفاوت.....
۱۰۳	شکل ۱۴-۶. نتایج آماری معیار های سنجش خطا برای شبکه بندی مختلف در تعداد قوانین مختلف.....
۱۰۴	شکل ۱۵-۶. زمان مورد نیاز برای پردازش اطلاعات در شبکه بندی های متفاوت.....
۱۰۴	شکل ۱۶-۶. مقادیر PTVE, Bias و MPAE در استفاده از تأخیر های اضافی داده های غیر جریان در
۱۰۵	قوانین ۲ و ۳۲.....
	شکل ۱۷-۶. هیدروگراف شبیه سازی مدل در تعداد قوانین فازی ۲ (الف) و ۳۲ تائی (ب) و سری زمانی
	باقیمانده ها برای حالت بهینه ۳۲ قانون فازی (ج) در شرایط استفاده از داده های بدون جریان تا چهار
۱۰۷	تأخیر در حالت آزمون.....
۱۰۹	شکل ۱۸-۶. HPD دوره آزمون با ۳۲ قانون فازی بدون استفاده از داده های جریان.....
۱۰۹	شکل ۱۹-۶. نمودار پراکندگی (الف)، منحنی توزیع فراوانی (ب) و Q-Q دیاگرام (ج) برای دوره آزمون در
۱۰۹	حالت بدون استفاده از داده های جریان و ۳۲ قانون فازی.....
	شکل ۲۰-۶. تغییر در نتایج مدل سازی در دوره آزمون با اضافه نمودن داده های تأخیری جریان به نمونه
۱۱۲	شاهد.....
	شکل ۲۱-۶. هیدروگراف دوره آزمون حاصل از استفاده هر سه داده تأخیری جریان در متغیر های ورودی
	برای تعداد قوانین فازی ۲ (الف) و ۱۲۸ (ب) و نمودار سری زمانی باقیمانده ها برای حالت بهینه ۱۲۸
۱۱۲	قانون فازی (ج).....
۱۱۴	شکل ۲۲-۶. Q-Q دیاگرام مدل سازی دوره آزمون به کمک هر سه داده تأخیری.....
۱۱۴	شکل ۲۳-۶. تصویر برجسته شده تخمین مقادیر اوج در شکل 7-20 برای تعداد قانون ۱۲۸ تائی.....
	شکل ۲۴-۶. تغییرات MPAE در دوره آزمون بر حسب تعداد قوانین فازی برای کل داده ها استفاده شده و
۱۱۶	حالتی که داده های بارش، رطوبت، فشار و دما برای همان روز حذف شده باشند.....
۱۱۷	شکل ۲۵-۶. HPD دوره آزمون با ۳۲ قانون فازی برای حالت استفاده از تمامی داده ها.....
۱۱۷	شکل ۲۶-۶. HPD دوره آزمون با ۳۲ قانون فازی برای حالت بدون استفاده از داده های همان روز.....
	شکل ۲۷-۶. تغییرات R^2 و Nash-Sutcliffe با افزایش تعداد قوانین فازی در استفاده از داده های
۱۲۰	جریان.....
۱۲۱	شکل ۲۸-۶. HPD دوره آزمون با ۱۶ قانون فازی برای حالت استفاده از داده های جریان.....
۱۲۲	شکل ۲۹-۶. هیدروگراف مقادیر شبیه سازی شده و مشاهده ای برای تعداد قانون فازی 16 تائی.....
	شکل ۳۰-۶. Q-Q دیاگرام و نمودار پراکندگی داده های مشاهده ای و شبیه سازی شده با استفاده از ۱۶
۱۲۲	قانون فازی.....
	شکل ۳۱-۶. هیدروگراف و نمودار پراکندگی نتایج روزانه ALM در دوره آزمون که به صورت ماهانه
۱۲۳	محاسبه شده است.....
۱۲۷	شکل ۳۲-۶. هیدروگراف های مشاهده ای و شبیه سازی شده توسط ANN برای سه رودخانه.....
۸	جدول ۱-۲. برخی از تحقیقات انجام شده با مدل SRM و نتایج حاصل از آن.....
۱۰	جدول ۲-۲. برخی از تحقیقات انجام شده با مدل SWAT و نتایج حاصل از آن.....
۱۷	جدول ۳-۲. برخی از تحقیقات انجام شده با مدل مختلف و نتایج حاصل از آن.....
۲۳	جدول ۱-۳. مشخصات ایستگاههای باران سنجی وزارت نیرو مورد استفاده در تحقیق.....

۲۵	جدول ۳-۲. پارامتر های آماری داده های مورد استفاده به عنوان ورودی در مدل مفهومی و فازی.....
۳۶	جدول ۴-۱. تخمین مقادیر ذخیره چالابی.....
۶۵	جدول ۵-۱. مقادیر کالیبره شده پارامتر های مدل مخزن خطی.....
۶۶	جدول ۵-۲. مقادیر کالیبره شده پارامتر های مدل تبدیل کلارک.....
۶۶	جدول ۵-۳. مقادیر کالیبره شده پارامتر های مدل روندیابی ماسکینگام.....
۶۷	جدول ۵-۴. مقادیر کالیبره شده پارامتر های مدل SMA.....
۶۹	جدول ۵-۵. مقادیر استفاده شده برای پارامتر های مدل ذوب برف.....
۷۲	جدول ۵-۶. توابع هدف مختلف برای ارزیابی نیکوئی برازش.....
۷۳	جدول ۵-۷. متغیر های انتخاب شده در ترکیب بندی های متفاوت برای دوره آموزش.....
۷۷	جدول ۶-۱. محاسبه معیار های آماری نیکوئی برازش برای دوره کالیبراسیون و صحت سنجی.....
۸۱	جدول ۶-۲. معیار های آماری نیکوئی برازش دوره کالیبراسیون و صحت سنجی با مدل ذوب برف.....
۸۹	جدول ۶-۳. محاسبه معیار های آماری نیکوئی برازش برای بررسی تأثیر دوره Warm-Up در کالیبراسیون.....
۹۳	جدول ۶-۴. مشخصات زیر حوضه ها و پارامتر های سنجش خطای حاصل از مدل SDI.....
۹۳	جدول ۶-۵. معیار های نیکوئی برازش برای دوره صحت سنجی روزانه و ماهانه مدل HEC-HMS.....
۹۶	جدول ۶-۶. نتایج مدل SWAT در شبیه سازی ماهانه جریان برای چهار نقطه کنترل.....
۹۷	جدول ۶-۷. ارائه نتایج شبیه سازی جریان با مدل SWAT در نقاط مختلف جهان.....
۱۰۰	جدول ۶-۸. نتایج آماری سنجش خطا برای نقاط فازی مختلف در تعداد قوانین مختلف دوره آزمون.....
۱۰۳	جدول ۶-۹. نتایج آماری سنجش خطا برای شبکه بندی مختلف در تعداد قوانین مختلف دوره آزمون.....
۱۰۵	جدول ۶-۱۰. پارامتر های سنجش خطا برای شبیه سازی به کمک داده های غیر جریان با تأخیر های متفاوت در دوره آزمون.....
۱۱۱	جدول ۶-۱۱. نتایج در تعداد قوانین مختلف دوره آزمون با اضافه نمودن داده های جریان تأخیری به نمونه شاهد.....
۱۱۵	جدول ۶-۱۲. تغییرات نتایج آماری سنجش خطا در دوره آزمون برای حالت کل داده با تاخیر های مختلف و برای حالت حذف داده های غیر جریان همان روز.....
۱۱۸	جدول ۶-۱۳. رتبه بندی تعداد دفعات استفاده شده از متغیر ها برای ۳۲ قانون فازی در دوره آزمون برای ارزیابی بهترین متغیر تخمین گر.....
۱۲۰	جدول ۶-۱۴. پارامتر های آماری سنجش خطا در استفاده از داده های جریان برای قوانین فازی مختلف در دوره آزمون.....
۱۲۱	جدول ۶-۱۵. رتبه بندی متغیر های استفاده شده در مدل فازی ALM در تعداد قوانین ۱۶.....
۱۲۳	جدول ۶-۱۶. برآورد معیار های نیکوئی برازش ماهانه از مدل سازی روزانه توسط ALM در دوره آزمون برای استفاده از داده های جریان.....
۱۲۴	جدول ۶-۱۷. نتایج بهبود یافته حاصل از اعمال میانگین متحرک چند روزه بر پارامتر های ورودی توسط ANN و ANFIS.....
۱۲۵	جدول ۶-۱۸. نتایج بدست آمده از ANN و ANFIS در مدل سازی به کمک داده های جریان و اقلیم.....
۱۲۵	جدول ۶-۱۹. مساحت حوضه ها و طول دوره های آموزش و صحت سنجی در مدل سازی با ANN.....
۱۲۶	جدول ۶-۲۰. مقادیر RMSE و R^2 حاصل از شبیه سازی جریان سه رودخانه توسط ANN.....
۱۳۲	جدول ۶-۲۱. خلاصه نتایج آماری مدل سازی های انجام شده و مدل های بهینه یافته شده در دوره صحت سنجی و آزمون در شرایط مختلف.....

فهرست علائم اختصاری

ALM: Active Learning Method
ANFIS: Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems
ANN: Artificial Neural Network
ATI: Antecedent Temperature Index
AVHRR: Advanced Very High Resolution Radar data
CN: Curve Number
DEM: Digital Elevation Model
ET: Evapotranspiration
FIS: Fuzzy Inference System
GW: Groundwater
HEC-HMS: Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System
HPD: Hierarchical Partitioning Diagram
HRU: Hydrologic Response Unit
IDS: Ink Drop Spread
IDW: Inverse Distance Weighting
MAP: Mean Aerial Precipitation
MPAE: Mean Percent of Absolute Error
NOAA: National Oceanic Atmosphere Administration
Nr.Rules: Number of Rules
NS: Nash-Sutcliffe (Model Efficiency)
PW-RMSE: Peak Weighted RMSE
Q-Q: Quantile-Quantile
RMSE: Root Mean Square Error
SCS: Soil Conservation Service
SMA: Soil Moisture Account
SOI: Southern Oscillation Index
SRM: Snowmelt Runoff Model
SWAT: Soil Water Assessment Tool
TPSS: Thin Plate Spline Surface
UH: Unit Hydrograph
USDA, ARS: United State Department of Agriculture, Agriculture Research Service
USACE: United State Army Corps of Engineers

فصل اول

مقدمه و کلیات

مقدمه و بیان مسئله:

ایران کشور پهناوری است که با برخورداری از موقعیت جغرافیایی و اقلیمی خاص خود، سهم اندکی از ریزش های جوی را به عنوان منبع اصلی تامین آب در اختیار دارد. به طوری که با دارا بودن میانگین سالانه حدود ۲۲۰ میلیمتر، یعنی حدود یک سوم قاره آسیا و یک چهارم مقدار ۸۶۰ میلیمتر جهانی، جزو اقلیم های خشک و نیمه خشک به حساب می آید [1]. استفاده و مدیریت بهینه منابع آب، مستلزم شناخت پدیده های هیدرولوژیکی می باشد که رواناب سطحی^۱ یکی از مهم ترین فازهای این چرخه به شمار می آید. رواناب سطحی در بر گیرنده بخشی از آب حاصل از بارش است که مازاد بر ذخیره برگابی^۲، ذخیره گودالی^۳ و نفوذ^۴ می باشد [2].

در بسیاری از موارد، جریان های سطحی مبنای احداث طرح های هیدرولیکی و پروژه های آبی از قبیل تامین آب مصرفی شهری و صنعتی، طراحی مخازن سد ها، کنترل سیلاب ها و پروژه های تامین آب برای بخش کشاورزی می باشد. از طرفی توزیع ناهمگون مکانی و زمانی بارندگی در سطح کشور و تنوع آب و هوایی هر از چند گاهی در برخی نقاط باعث طغیان آب رودخانه ها و وقوع سیلاب های بزرگی می گردد که از بابت خسارت های جانی و مالی، قابل توجه و تأمل است. چرا که جریان های مخرب سطحی علاوه بر شستشوی خاک مناسب و حاصلخیز، اجتماعات انسانی و تأسیسات و سازه های واقع در مسیر خود را تهدید جدی نموده و گاهی نیز سبب خسارات جبران ناپذیری می شوند. از جمله سیلاب های سال های اخیر می توان به مناطقی از استان خوزستان، خراسان شمالی و گلستان اشاره نمود که طبق آمار ۴۰ ساله موجود، بیش از ۱۸۹۰ واقعه سیل در کشور اتفاق افتاده و حدود ۶۲۵ شهر را با خطر جدی مواجه ساخته است [1]. از این رو مسأله تخمین و پیش بینی مقدار

^۱ Surface runoff

^۲ Canopy interception storage

^۳ Depression storage

^۴ Infiltration

جریان رودخانه ای و سیلاب از اهمیت خاصی برخوردار است و پژوهشگران را بر آن داشته تا با کمک علوم مختلف در صدد رفع این نیاز ضروری برآیند. جهت مدیریت و تحلیل یک سیستم آبی، نیاز به دانش اولیه در مورد میزان آب موجود در سیستم آبی می باشد. چنانچه سیستم آبی مورد بررسی یک رودخانه باشد، میزان رواناب آن به عنوان ورودی جهت مدیریت و تحلیل سیستم آبی به کار می رود. رواناب را می توان توسط روش های مختلف مدل سازی تخمین زد.

پیشرفت تکنولوژی نرم افزارهای کامپیوتری و شناخت فرآیندهای بارش-رواناب و تشخیص نسبی عوامل موثر بر آن، امکان استفاده از انواع مدل‌های مفهومی^۱ یا ریاضی^۲ را فراهم نموده است. مدل‌های ریاضی در واقع بروز فرآیند ها و وقایع را به صورت روابط یک سلسله عوامل موجود در جوامع (حقیقی یا غیر حقیقی) ، با زبان ریاضی به نمایش می گذارند. از طرف دیگر روش مدل سازی انسان بسیار مقاوم و پایدار است بنابراین بایستی این روش برای انجام مدل سازی در این زمینه نیز سودمند واقع گردد [3]. مفاهیم فازی^۳ و استنتاجات مرتبط با آن مثل زاده^۴ (1965) و ممدانی^۵ (1974) یک نگرش جدید به روش مدل سازی و محاسبه انسان باز نمودند [4,5]. اگر چه روشهای مدل سازی قدرتمند مختلفی با استفاده از این روش های فازی توسعه داده شده و به کار برده شده اند [6,7,8,9] (مثل Sugeno and Yasukawa, 1993; Tanaka and Sano, 1994; Takagi and Sugeno, 1994; Otsubo and Hayashi, 1996) اما به نظر می رسد که به خاطر محاسبات دقیق و ریاضی موجود در آنها، ساختار آنها با روش حقیقی یادگیری و مدل سازی انسان متفاوت باشد [3]. البته ساختار روش مدل سازی انسان شبیه روش های مذکور است اما از پیچیدگی های ریاضی اجتناب می کند [10]. باقری شورکی و هوندا (1997,a) یک روش مدل سازی فازی جدید را ابداع کردند که روش یادگیری فعال^۶ (ALM)

^۱ Conceptual models

^۲ Mathematical models

^۳ Fuzzy concept

^۴ Zadeh

^۵ Mamdani

^۶ Active Learning Method

نامیده شد که می تواند جهت مدل سازی بارش-رواناب مورد استفاده قرار گیرد [11]. پدیده بارش-رواناب از جمله فرآیندهایی است که در طی سال های اخیر مورد توجه مدل سازی قرار گرفته است و برای این منظور نرم افزارهای مختلفی توسعه یافته است که هر یک با توجه به برخی از ویژگی ها و پارامترها، قادر به پیش بینی رواناب ناشی از بارندگی ها در سطح حوضه می باشند. یکی از حوضه های مهم کشور که بحث رواناب و سیلاب در آن از اهمیت ویژه ای برخوردار است حوضه کارون III می باشد که به سبب طرح های بزرگ عمرانی، سد ها و سازه های هیدرولیکی بسیار بزرگ و همچنین محافظت شهرها و بخش کشاورزی بحث پیش بینی رواناب و سیلاب در آن، برای اتخاذ راهکارها و تصمیمات کنترلی و مدیریتی بسیار مهم می باشد. از این رو بر آن شدیم تا با استفاده از مدل سازی فازی به کمک روش ALM و مدل سازی ریاضی با کمک نرم افزار ¹HEC-HMS 3.3 که در ادامه به صورت مفصل توضیح داده خواهد شد، فرآیند بارش-رواناب را در این حوضه شبیه سازی نموده و قابلیت های مدل های مختلف را مورد ارزیابی قرار داده و مدل مناسبی برای حوضه آبریز کارون انتخاب نمائیم. فصل دوم این نگارش به مروری بر تحقیقات صورت گرفته در این زمینه و انتخاب مدل مفهومی مناسب در برابر مدل ALM اختصاص داده شده است. در فصل سوم توصیفی از منطقه مورد مطالعه و نحوه پیش پردازش و آماده سازی داده ها ارائه شده و در فصل چهارم مفاهیم و ساختار اساسی مدل مفهومی منتخب و همچنین مدل فازی ALM به طور مفصل تشریح گردیده است. در فصل پنجم به بیان نحوه و روش مدل سازی مفهومی و فازی پرداخته شده و فصل ششم نیز به ارزیابی و مقایسه نتایج حاصل از هر دو مدل سازی به همراه نتایج حاصل از سایر مدل های هوش مصنوعی و مدل های مفهومی اختصاص داده شده است.

¹ Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System

فصل دوم

مروری بر منابع

۱-۲ مدل مفهومی:

مسئله تخمین و پیش بینی مقدار سیلاب و زمان وقوع آن و مهار آب های سطحی همواره از بدو شکل گیری تمدن های بشری از اهمیت خاصی برخوردار بوده است و پژوهشگران را بر آن داشته تا با کمک علوم مختلف در صدد رفع این نیاز برآیند. بدست آوردن رابطه بین بارندگی و رواناب تولیدی از گذشته های دور مورد توجه بشر قرار داشته است. بعضی آثار به دست آمده در مصر نشان می دهد که در حدود چهار هزار سال قبل، اقوامی در سواحل رودخانه نیل زندگی می کردند که داغاب رودخانه را در سال های مختلف برای طغیان های بزرگ مشخص می نمودند. مردم هند نیز از ۱۶۰۰ سال پیش برای اندازه گیری باران سعی و کوشش نموده اند [1]. نظریه هیدروگراف واحد^۱ توسط شرمن (Sherman) در سال ۱۹۳۲ ارائه گردید. هیدروگراف واحد یک روش و راهکار ساده و در عین حال بسیار موثر در هیدرولوژی محسوب می گردد. تخمین هیدروگراف واحد از رگبار مرکب توسط کولینز (Collins) در گزارش کمیسیون منابع و خاک در سال ۱۹۳۶ پیشنهاد گردید. اشنايدر (Snyder) در سال ۱۹۳۸ روابطی را بدست آورد که به وسیله آنها اجزای مهم یک هیدروگراف واحد مصنوعی بدست می آید. این روابط بر اساس وضعیت فیزیکی حوضه آبریز و شکل کلی هیدروگراف بنا شده است. کلارک (Clark) در سال ۱۹۴۵ هیدروگراف واحد لحظه ای را ابداع نمود. در سال ۱۹۸۶ سازمان حفاظت خاک آمریکا^۲ با استفاده از تعداد زیادی از هیدروگراف های واحد حوضه های آبریز دارای آمار و اطلاعات، هیدروگراف واحد مثلثی را ارائه کرد [1].

^۱ Unit Hydrograph

^۲ SCS

به کارگیری مدل های کامپیوتری در سال های اخیر فزونی یافته است به طوری که همه ساله نسخه های جدید و یا توسعه یافته نرم افزار ها روانه بازارها می گردند. در حوضه هایی که آمار و اطلاعات هواشناسی هیدرولوژی مورد نیاز در شبیه سازی جریان، به ویژه آمار و اطلاعات برف سنجی معمولاً در دسترس نیست شبیه سازی و یا پیش بینی رواناب و سیلاب حاصل از ذوب برف با مشکلات فراوانی مواجه بوده و به طور معمول با خطای زیادی روبرو می شود به همین منظور مدل شبیه سازی ذوب برف^۱ (SRM) برای اولین بار توسط Martinec و همکارانش در سال ۱۹۷۵ میلادی ابداع و در کوههای آلپ مورد استفاده قرار گرفت و امروزه SRM به عنوان یک مدل کاملاً عملیاتی و کاربردی در ۲۵ کشور بر روی بیش از ۷۵ حوضه آبریز مورد استفاده قرار می گیرد قابلیت شبیه سازی جریان روزانه را بدون استفاده از اطلاعات زمینی برف سنجی دارا است [12]. مدل SRM برای حوضه هایی که ذوب برف عامل اصلی تشکیل رواناب است طراحی گردیده و کاربرد وسیعی پیدا کرده به طوری که نسخه چهارم آن که در سال ۱۹۹۴ ارائه شد، با استفاده از داده های سنجش از دور و تصاویر ماهواره ای، برای حوضه های کوهستانی وسیع به بزرگی ۱۲۰۰۰۰ کیلومتر مربع نیز به طور کاملاً عملیاتی به کار گرفته شد. این مدل توسط سازمان جهانی هواشناسی^۲ به منظور شبیه سازی ذوب برف و رواناب حاصل از آن و پیش بینی رواناب در زمان واقعی^۳ آزمایش و به عنوان دقیق ترین مدل تایید شده است [12,13]. این مدل به طور مستمر از سال ۱۹۷۵ تاکنون مورد استفاده قرار گرفته است. جدول ۱-۲ برخی از تحقیقات انجام شده با استفاده از مدل SRM جهت پیش بینی رواناب ناشی از ذوب برف را نشان می دهد. یکی دیگر از انواع مدل هائی که برای پیش بینی و شبیه سازی فرآیند بارش-رواناب توسعه یافته و غالباً نتایج قابل قبولی ارائه نموده است مدل SWAT^۴ می باشد که

^۱ Snowmelt Runoff Model

^۲ WMO

^۳ Real Time Forecasting

^۴ Soil Water Assessment Tool

در سال ۱۹۹۸ توسط سرویس تحقیقات کشاورزی دپارتمان کشاورزی ایالات متحده^۱ توسعه یافته است [21]. مدل SWAT تکامل یافته بیش از ۴۰ مدل می باشد، اولین مدل شرکت کننده مدل ARS می باشد که خود بوجود آورنده مدل SWRRB (Williams *et al.*, 1985; Arnold *et al.*, 1990) است [21].

جدول ۱-۲ برخی از تحقیقات انجام شده با مدل SRM و نتایج حاصل از آن [12,13,14,15,16,18,17,19,20]

اسم و سال	حوضه آبریز	استخراج اطلاعات و پوشش برف	دقت نتایج حاصل
Baumgartner <i>et al.</i> ,1987	حوضه های ازبکستان	تصاویر NOAA (AVHRR)	R ² = 0.74-0.97 VE= 1-9.6%
Swamy & Birvio,1996	Cordevole	تصاویر Landsat	R ² = 0.89 VE=4.6%
Landesa <i>et al.</i> ,2000	۴۲ حوضه در اسپانیا	تصاویر ماهواره ای	VE=6.9-25.3%
Qobilov <i>et al.</i> ,2000	حوضه های ازبکستان	تصاویر NOAA (AVHRR)	کارایی مناسب و دقت قابل قبول
Malcher,2001	Vent-Rofe,Obergurgel, Hoben, Tumpen	تصاویر MODIS	R ² = 0.93, 0.92, 0.88, 0.87 VE=2.35, 5.56, 0.44, 0.49%
Seidel & Martinec, 2002	۱۳ حوضه در سوئیس	تصاویر Landsat, Spot, NOAA	کارایی مناسب و دقت قابل قبول
شهاب فر، ۱۳۸۱	حوضه کامه	تصاویر NOAA (AVHRR)	کارایی مناسب و دقت قابل قبول
Songveon <i>et al.</i> , 2003	Rio grande, Rio ojo	MODIS, NOAA	R ² = 0.7-0.89, 0.22-0.63 VE= 10.3-12.6, 36.6-46.6%
نجفی و همکاران، ۱۳۸۳	حوضه سد مهاباد	تصاویر NOAA (AVHRR)	R ² = 0.85 VE=3.79%
نجف زاده و همکاران، ۱۳۸۳	زیر حوضه زاینده رود (پلاسجان)	تصاویر NOAA	R ² = 0.92 VE=0.78%
بیرودیان و جندقی،	حوضه آبخیز زیارت	داده های برف سنجی	کارایی مناسب و دقت قابل

^۱ USDA-ARS

۱۳۸۴		زمینی	قبول
Harshburger <i>et al.</i> , 2001	Big Wood Idaho	تصاویر MODIS	R ² = 0.93 VE= 7%
پرهمت و همکاران، ۱۳۸۴	زیر حوضه خرسان کارون	تصاویر NOAA (AVHRR)	R ² = 0.77 VE=1.03%
فولادی پناه، ۱۳۸۴	حوضه آبریز قره سو	--	کارایی مناسب و دقت قابل قبول
Timothy, 2006	Salt, Tonto, Verde	--	R ² = 0.91, 0.89, 0.89

* در جدول فوق VE برابر با اختلاف حجم می باشد.

از مدل‌های خاصی که در گسترش مدل SWAT نقش اساسی داشته اند، می توان مدل CREAMS را ذکر کرد. مدل های CREAMS (Leonard *et al.*, 1987) و پس از آن مدل EPIC (Williams *et al.*, 1984) از جمله مدل‌هایی بودند که نقش ویژه ای را در توسعه و تکامل مدل SWAT ایفا نمودند [21]. SWAT یک مدل پیوسته زمانی با مبنای فیزیکی در مقیاس حوضه ای می باشد که در گام های زمانی روزانه عمل می کند. هدف اصلی این مدل ارزیابی اثرات عملیات مدیریت اراضی (چرخه کاشت، عملیات برداشت و آبیاری) بر آب، رسوبات و مواد شیمیایی کشاورزی در دسترس در حوضه های فاقد آمار می باشد (Arnold *et al.*, 1998). مولفه های اصلی مدل شامل داده های آب و هوایی، هیدرولوژی، فرسایش خاک، دمای خاک، رشد گیاهان، چرخه مواد مغذی، آفت کشها و کودها، مدیریت اراضی و روندیابی کانال ها و مخازن می باشد. در این مدل هر حوضه به چندین زیر حوضه تبدیل شده و هر یک از زیر حوضه ها نیز به نوبه خود به واحد های واکنشی هیدرولوژیکی مجزا (HRU)^۱ تقسیم می گردد. هر یک از این واحد ها در زیر حوضه ها دارای ویژگی های کاربری اراضی و خصوصیات خاکی یکسان می باشند. بیلان آب در هر واحد نمایانگر چهار حجم ذخیره ای شامل برف، پروفیل خاک (0-2m)، سفره کم عمق (2-20m) و سفره عمیق (>20m) است. SWAT از دو روش برای تخمین رواناب بهره می گیرد که یکی روش شماره منحنی سازمان حفاظت خاک آمریکا و دیگری روش محاسبه نفوذ گرین - امپ (Green-Ampt) می باشد. رواناب اوج نشانگر قدرت فرسایش یک

^۱ Hydrological Response Units

سیلاب بوده و از آن برای پیش بینی میزان حمل رسوب و کاهش آن استفاده می گردد. جریان جانبی زیر سطحی در پروفیل خاک (0-2m) نیز همزمان بانفوذ برآورد می گردد. جریان جانبی هنگامی رخ می دهد که ذخیره در هر لایه پس از نفوذ بیش از ظرفیت مزرعه می گردد. سهم جریان زیر زمینی در کل جریان رودخانه نیز با ایجاد یک ذخیره در سفره کم عمق شبیه سازی می گردد [21]. برای پیش بینی میزان ذوب برف روزانه این مدل از حداقل و حداکثر دمای روزانه بهره می گیرد. جریان آب جاری شده در شبکه کانال ها با استفاده از روش روندیابی ذخیره متغیر یا روش روندیابی رودخانه ماسکینگام روندیابی می گردد. این مدل قابلیت اتصال به نرم افزار ArcView 3.2 را دارد، لذا حجم وسیعی از داده ها به صورت لایه های اطلاعاتی توزیعی مانند کاربری اراضی، بارش، دما، شیب، خاک، مدل رقومی ارتفاع (DEM) و ... با استفاده از نرم افزار واسطه ArcView 3.2 توسط مدل بکار می رود. از تواناییهای مهم مدل SWAT ساختن آمار مناسب با تغییر در کاربری اراضی مختلف می باشد. این مدل نیز به وفور توسط محققین مختلف برای مقاصد پیش بینی رواناب و فرسایش رسوب به کار گرفته شده است. جدول ۲-۲ نتایج حاصل از تحقیقات انجام شده توسط مدل SWAT در حوضه های آبریز مختلف را نشان می دهد.

جدول ۲-۲ برخی از تحقیقات انجام شده با مدل SWAT و نتایج حاصل از آن [21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31, 32,33].

اسم و سال	حوضه آبریز	گام زمانی	دقت نتایج حاصل
Rosenthal <i>et al.</i> , 1995	Lower Colorado	ماهیهانه	$R^2= 0.75$, Overestimate
Bingner, 1996	Mississippi	سالیهانه	$R^2= 0.9$
Srinivasan <i>et al.</i> , 1998	Mill Creek, Texas	روزانه	$R^2= 0.65$, Overestimate Spring & Summer
مرید و همکاران، ۱۳۸۲	حوضه امامه	--	برتری مدل SNOW-17 نسبت به SWAT
Arnold <i>et al.</i> , 1999	Texas Gulf	ماهیهانه	$R^2= 0.78$ VE= 5%
Spruill <i>et al.</i> , 2000	Kentucky	روزانه	NS= 0.04-0.19
Saleh <i>et al.</i> , 2000	Bosque River	ماهیهانه	NS= 0.99
Arnold <i>et al.</i> , 2000	Upper Mississippi	ماهیهانه	$R^2= 0.65$

Hernandez <i>et al.</i> , 2000	Walnut Gulch	روزانه	نتایج مدل KINEROS بهتر از SWAT
Eckhardt <i>et al.</i> , 2001	حوضه های آلمان	--	نتایج SWAT-G بهتر از SWAT99
سعادت‌ی و همکاران، ۱۳۸۱	حوضه کسپلیان	روزانه، ماهانه، سالانه	حساسیت نتایج به گام زمانی و نتایج مناسب ماهانه و سالانه
Van Live & Garbrecht, 2003	Little Washita, Oklahoma	روزانه و ماهیانه	NS(daily)=0.13-0.56 NS(monthly)=-0.11-0.6
Conan <i>et al.</i> , 2003	Coët-Dan (Brittany, France)	ماهیانه	NS(daily)= 0.42 NS(monthly)= 0.87
Bouraoui <i>et al.</i> , 2004	Vantaanjoki (Finland)	ماهیانه	NS=0.87
Chu & Shirmohammadi, 2004	Warner Creek	ماهیانه	R ² = 0.69 NS=0.63
Di Luzio <i>et al.</i> , 2005	Goodwin Creek (Mississippi)	ماهیانه	R ² = 0.90-0.95 NS=0.87-0.97
Grizzetti <i>et al.</i> , 2005	Parts of four watersheds (United Kingdom)	سالانه	NS= 0.66
El-Nasr <i>et al.</i> , 2005	Jeker (Belgium)	روزانه	R ² = 0.55 NS=0.60
Wang & Melesse, 2005	Wild Rice River	روزانه و ماهیانه	R ² = 0.45-0.49 NS=0.82-0.87
White & Chaubey, 2005	Beaver Reservoir, Arkansas	ماهیانه	R ² = 0.77-0.91 NS=0.72-0.87
Arnold <i>et al.</i> , 2005	USDA-ARS Y-2 (Texas)	روزانه	R ² = 0.84
Wang & Melesse, 2005	Wild Rice River	روزانه و ماهیانه	R ² = 0.45-0.49 NS=0.82-0.87
سید قاسمی و همکاران، ۱۳۸۵	زاینده رود	--	کارایی مناسب و دقت قابل قبول
Behera & Panda, 2006	Kapgari (India)	روزانه	R ² = 0.91 NS=0.85
Vazquez-AmáBILE <i>et al.</i> , 2006	St. Joseph River	روزانه و ماهیانه	R ² = 0.5-76 NS=0.33-0.74
عمانی و همکاران، ۱۳۸۵	حوضه قره سو	ماهیانه	کارایی مناسب و دقت قابل قبول
Cheng <i>et al.</i> , 2006	Heihe River (China)	ماهیانه	R ² = 0.78 NS=0.76
Levesque <i>et al.</i> , 2008	جنوب شرق کانادا	روزانه	NS= 0.4-0.73 VE=3-20%
Rostamian <i>et al.</i> , 2008	زیر حوضه های بهشت آباد و ونک کارون	ماهیانه	کارایی مناسب و دقت قابل قبول

Yao & Wang, 2008	Naoli	سالیانه	R2<0.61 NS=0.61 VE<10%
------------------	-------	---------	------------------------------

* در جدول فوق VE برابر با اختلاف حجم و NS= Nash-Sutcliffe می باشد

از دیگر نرم افزار های مهم که در زمینه مدل سازی رواناب کاربرد وسیعی پیدا کرده است نرم افزار HEC-HMS می باشد که توسط مرکز هیدرولوژی ارتش ایالات متحده توسعه یافته است. در مورد ساختار این مدل به طور مفصل در فصل ۵ توضیح داده خواهد شد.

میرزاخان (۱۳۸۰) دبی سیلابی به روش شیب - سطح و مدل هیدرولیکی HEC-HMS را در حوضه آبریز جاغرق خراسان مقایسه نمود [34]. در ابتدا اقدام به برآورد دبی سیلابی به روش شیب - سطح گردید و سپس با توجه به پارامتر های بدست آمده از این روش، زمان تمرکز حاصل از رابطه کریچ مناسب ترین تشخیص داده شد و اقدام به برآورد دبی سیلابی با استفاده از مدل کامپیوتری HEC-HMS گردید. نتایج تحقیق نشان می دهد که دبی سیلابی برآورد شده با استفاده از مدل کامپیوتری HEC-HMS و دبی های سیلابی برآورد شده به روش شیب - سطح با یکدیگر تفاوت معنی داری ندارند. شقایب فلاح (۱۳۸۰) با استفاده از مدل HEC-HMS در حوضه آبریز محمدآباد (استان گلستان) مقدار سیلاب ناشی از بارش را برآورد نموده و با مقایسه آن با اطلاعات مشاهده ای بارندگی به این نتیجه رسیدند که مقدار برآوردی با مقدار مشاهده ای سیلاب تطبیق یافته است و در آخر از نتایج تعیین دبی به روش شیب - سطح مقطع، جهت مقایسه نتایج حاصل از مدل کالیبره شده HEC-HMS استفاده کرده و مشخص نمودند که مدل HEC-HMS نتایج بسیار نزدیک به واقعیتی را ارائه می نماید [35]. سوری نژاد (۱۳۸۰) برای شبیه سازی بارندگی - رواناب حوضه آبریز رودخانه های خرم آباد - کشکان، نخست تعداد ۱۵ رگبار شدید، متوسط و کوچک انتخاب کرده و پس از آن جهت محاسبه ارتفاع بارش وزنی متناظر با داده های آبسنجی مشاهده ای، نقشه همباران طوفانهای منتخب ۲۴، ۴۸، ۷۲ ساعته و بیشتر را با نرم افزار ArcView3.0a ترسیم نمودند. بدین ترتیب در تحلیل روابط بارش - رواناب زیر حوضه ها ضریب همبستگی داده های محاسباتی و مشاهداتی بین ۰/۹۷۵ تا ۰/۹۹۹ بدست

آمده است و همچنین خطای محاسبه برخی از سیلابها در این حوضه نسبتاً کم میباشد. به نظر می‌رسد خطاها ناشی از محاسبه زمان تاخیر (T_L) نسبتاً زیاد حوضه توسط مدل HEC-HMS می‌باشد. نتایج حاصل از ارزیابی توانائی بکارگیری این مدل به طور یکنواخت در سطح این حوضه بزرگ نشان می‌دهد که در هیدروگرافهای طبیعی با شکل زنگوله‌ای (نرمال) این خطاها بسیار اندک می‌باشد [36]. شوشتریان و همکاران (۱۳۸۰) استفاده از این مدل را در مهندسی رودخانه (رودخانه های کر و سیوند) بررسی نمودند. آنان از روش هیدروگراف واحد اشنایدر، محاسبه تلفات SCS، کاهش دبی پایه نمایی و روند یابی ماسکینگام و داده های سه ایستگاه هیدرومتری برای رگبار آذر ماه سال ۱۳۶۵ استفاده نموده و مدل را کالیبره کردند. گرچه نتایج قبل از کالیبراسیون با مشاهدات اختلاف دارند ولی پس از کالیبراسیون به خوبی با هیدروگراف اندازه گیری شده انطباق پیدا کرده اند [37]. آذری و همکاران (۱۳۸۱) به منظور بررسی رفتار سیلاب و نحوه گسترش آن در بازه‌ای از رودخانه جعفرق در استان خراسان رضوی از تلفیق مدل‌های هیدرولوژیکی HEC-HMS و مدل هیدرولیکی HEC-RAS استفاده کردند. بدین منظور با استفاده از آمار بارش و رواناب ایستگاه های بارانسجی و هیدرومتری حوضه و بکارگیری روش بارش منفرد و سیلاب متناظر مدل HEC-HMS کالیبره گردید و با برداشت مقاطع عرضی رودخانه در محل بازه مسکونی حوضه، پهنه‌های سیلابی مربوط به بارش‌های با دوره بازگشت‌های ۱۰، ۲۰ و ۵۰ سال در GIS با استفاده از الحاقیه HEC-GeoRAS در Arc view نمایش داده شد. نتایج مطالعه نحوه گسترش پهنه‌های سیلابی در بازه مورد مطالعه را به خوبی نشان می‌دهد و واسنجی و اعتبارسنجی مدل در شبیه سازی رفتار هیدرولوژیک دلالت بر متوسط اختلاف ۶/۶۴٪ در دبی اوج سیل و ۲۹/۰۸٪ در حجم بوده است. رحیمی و عابدینی (۱۳۸۱) از دو روش بهینه سازی متعین (در قالب مدل PEST) و آماری (الگوریتم ژنتیک بر پایه تکامل طبیعی) که به ترتیب دارای ۹ و ۱۴ پارامتر برای واسنجی مدل HEC-HMS است برای دو حوضه فرضی ۱ و ۲ استفاده کرده اند. نتایج حاصله دلالت بر حساس بودن مدل PEST به تخمین اولیه پارامترها دارد، به طوری که هر چه تخمین اولیه پارامترها به پارامترهای واقعی نزدیک تر باشد شاهد تخمین مناسب پارامترها و میل کردن تابع

هدف به سمت بهینه می باشیم [38]. نتایج واسنجی مدل HEC-HMS کالیبره شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک از برتری این روش نسبت به مدل PEST حکایت دارد. فرازجو و همکاران (۱۳۸۲) به بررسی اثر تغییرات پوشش گیاهی بر هیدروگراف سیل حوضه آبخیز سد گلستان با استفاده از GIS و مدل HEC-HMS پرداختند. بدین منظور، نقشه پوشش گیاهی حوضه در سالهای ۱۳۴۶ و ۱۳۷۵ تهیه و در محیط ArcView GIS با نقشه گروه های هیدرولوژیک خاک، تلفیق شد و نهایتاً شماره منحنی (CN) متوسط وزنی در هر زیرحوضه تعیین گردید. نتایج این تحقیق تاکید می کنند که می توان با تلفیق سیستم های اطلاعات جغرافیایی و مدل های هیدرولوژیک، اثرات تغییر کاربری اراضی و پوشش گیاهی بر رژیم سیلابی حوضه های آبریز را به نحو موفقیت آمیزی، شبیه سازی و پیش بینی نمود. پقه (۱۳۸۲) به بررسی سهم اثر زیرحوضه ها در سیلخیزی حوضه آبخیز گرمابدشت با استفاده از مدل هیدرولوژی HEC-HMS پرداخت. بدین منظور حوضه مزبور به ۲۰ زیرحوضه تفکیک و برای واسنجی مدل تعداد ۶ واقعه بارندگی و سیل متناظر انتخاب شده اند. نتایج نشاندهنده این واقعیت بود که علاوه بر مساحت، موقعیت مکانی و همزمانی یا عدم همزمانی دبی اوج هر زیر حوضه با سایر زیر حوضه ها نیز در مشارکت نهایی آنها در دبی اوج کل حوضه نقش داشته است [39]. عرفانی آگاه (۱۳۸۳) از تلفیق سامانه های اطلاعات جغرافیایی و مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS برای پیش بینی رواناب حوضه آبریز نوده استفاده نموده است. بدین منظور تعدادی واقعه بارش- رواناب استخراج، و سپس با استفاده از آنها، پارامترهای ورودی مدل HEC-HMS کالیبره گردید. نتایج حاصل از مدل برای رگبار انتخابی به لحاظ کارشناسی معقول و منطقی بوده و در مجموع نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که GIS محیطی مناسب و مدل ارائه شده روشی کارآمد برای پیش بینی سیلاب می باشد.

جهانگیر (۱۳۸۴) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و مدل HEC-HMS فرآیند بارش-رواناب را در حوضه معرف کرده شبیه سازی نمود. به این منظور باران نموده های چندین پیشامد بارندگی و هیدروگراف رواناب آنها در حوضه کرده مبنای کار قرار گرفت. در ANN ضریب همبستگی داده های دبی و حجم رواناب به ترتیب ۰/۹۷۸ و ۰/۹۸۶ و همبستگی اندازه و زمان دبی اوج ۰/۹۸۱ و ۰/۸۳۳

بدست آمد ولی در عملکرد مدل HEC ضریب همبستگی داده های دبی و حجم رواناب به ترتیب ۰/۸۲۳ و ۰/۹۷۶ و همبستگی اندازه و زمان دبی اوج ۰/۹۷۲ و ۰/۹۶۹ برآورد گردید. مقایسه عملکرد شبکه های عصبی و مدل HEC نشان دهنده دقت بیشتر شبکه های عصبی مصنوعی می باشد. در انجام آزمون t با سطح احتمال های ۹۵٪ و ۹۹٪، اختلاف معنی داری میان اندازه های مشاهده ای و شبیه سازی شده مربوط به همه پارامتر های مورد نظر مشاهده نشد. افزون بر این، بزرگی حوضه مورد مطالعه و متفاوت بودن ویژگی های بخش های آن و در دسترس نبودن اطلاعات مربوط به نفوذ پذیری، رطوبت پیشین خاک و زمان واقعی میان آغاز بارش و رواناب دلیل اصلی کم بودن دقت مدل HEC-HMS نسبت به ANN تشخیص داده شد [40]. بشیر گنبد (۱۳۸۴) پتانسیل تولید سیل در حوضه معرف کسلیان را بررسی نمود. با بهره گیری از مدل HEC-HMS و کاربرد روش تکرار حذف انفرادی زیر حوضه، هیدروگراف های سیل متناظر با بارش برای هر یک از زیر حوضه ها محاسبه شد. با حذف متوالی زیر حوضه ها در هر بار اجرای مدل، دبی خروجی کل حوضه پس از روندیابی سیل در آبراهه های اصلی بدون اثر زیر حوضه مورد نظر محاسبه گردید. بدین ترتیب میزان تاثیر هر یک از زیر حوضه ها در تولید سیل خروجی بدست آمد [41].

همچنین اکبرپور و همکاران (۱۳۸۲) با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی (ANN) و مدل HEC-HMS در حوضه رودخانه زرد فرآیند بارندگی-رواناب را شبیه سازی نمودند. دو مدل از شبکه عصبی مصنوعی یعنی شبکه پرسپترون چند لایه (MLP)^۱ با دو ساختار یک و دو لایه پنهان^۲ و شبکه تابع پایه شعاعی (RBF)^۳ برای شبیه سازی این فرآیند مورد استفاده قرار گرفت. از داده های بارندگی و رواناب روزانه حوضه رودخانه زرد استان خوزستان مربوط به سالهای آبی ۷۹-۷۰ استفاده شده است. تعداد ۱۴ واقعه سیلابی در این دوره زمانی جهت شبیه سازی توسط مدل HEC-HMS انتخاب گردید.

^۱ Multi Layer Perceptron

^۲ Hidden Layer

^۳ Radial Basis Function

نتایج حاصل از شبیه سازی ها با سه مدل فوق و مقایسه آنها با مقادیر مشاهداتی نشان دهنده توانایی بیشتر مدل شبکه عصبی RBF نسبت به دو مدل MLP و HEC-HMS در این حوضه می باشد [42].

ایزانلو (۱۳۸۵) اولویت بندی زمانی و مکانی سیل خیزی زیر حوضه های آبخیز کوشک آباد خراسان را با استفاده از مدل HEC-HMS انجام داد [43]. مدل سازی رواناب حوضه رودخانه Mesta بلغارستان نیز توسط لیو و همکاران (Liiev et al. 2007) با استفاده از نرم افزار HEC-HMS صورت گرفته است. داده های مورد استفاده رواناب متوسط ماهانه اندازه گیری شده برای دوره زمانی ۲۰۰۳-۱۹۹۰ می باشد. کارایی مدل بیانگر روش کار خوب و توسعه یافته این مدل در به کارگیری آن در حوضه این رودخانه می باشد به طوری که برای مثال در یک دوره زمانی چهار ماهه اختلاف بین رواناب محاسباتی و اندازه گیری شده در حدود ۲۵٪ می باشد [44]. خسروشاهی (۱۳۸۶) نیز با HEC-HMS در حوضه آبریز دماوند شبیه سازی بارش- رواناب انجام داده است. نقشه کاربری اراضی (نقشه پوشش گیاهی) با استفاده از پردازش تصویر ماهواره ای Landsat TM سال ۱۹۸۸ و نقشه CN، با تلفیق نقشه گروه های هیدرولوژیکی خاک و کاربری اراضی برای کل حوضه تهیه شد. داده های موجود سیل برای ایستگاههای تارقاضی، بومهن و رگبارهای مربوط به این سیلابها برای ۱۲ ایستگاه هواشناسی داخل و مجاور حوضه جمع آوری گشته و با استفاده از بارش روزانه ایستگاههای داخل و اطراف حوضه، نقشه همباران برای رگبارهای مورد نظر تهیه و سپس برای هر یک از زیرحوضه ها بارش متوسط برای هر رگبار محاسبه شد. در مرحله واسنجی به لحاظ اهمیت دبی اوج در وقایع سیل، حداکثر دبی به عنوان شاخص کالیبراسیون مد نظر قرار گرفت [45].

در میان مدل های مشهوری که در بالا ذکر گردید یک سری دیگر از مدل ها نیز وجود دارند که برای شبیه سازی فرآیند بارش-رواناب کمتر مورد استفاده قرار گرفته اند و می توان به مدل هایی از قبیل مدل کانادایی UBC^۱، مدل LEAVESLEY، مدل ژاپنی سوگاوارا TANK، مدل دانمارکی Nam/SII،

^۱ University of British Columbia

مدل سوئدی HBV، مدل های آمریکائی HSP^۱، SSARR^۲، NWSRFS^۳ و STORM^۴ و مدل دانمارکی-انگلیسی SHE^۵ اشاره نمود. در جدول ۲-۳ برخی دیگر از مطالعات صورت گرفته با استفاده از مدل های دیگر ارائه شده است.

جدول ۲-۳ برخی از تحقیقات انجام شده با مدل مختلف و نتایج حاصل از آن [46,47,48,49].

نام مدل	اسم و سال	حوضه آبریز	گام زمانی	دقت نتایج حاصل
SWM-IV	امین و غفوری ۱۳۸۱ روزبهانی،	رود زرد در جنوب غرب ایران	روزانه، ماهیانه و سالیانه	برآورد مناسب حجم ماهیانه و سالیانه، $R^2=0.44-0.81$ در تخمین دبی حداکثر روزانه
SDI	شریفی و همکاران، ۱۳۸۳	چهار زیر حوضه در کارون شمالی با نام بازفت، زرین درخت، فارسان و کوهرنگ	ماهیانه	$R^2= 0.34-73$
AWBM	شریفی و همکاران، ۱۳۸۵	حوضه های کسلیان، کارده، امامه، ليقوان، کن و کامه	--	تخمین مناسب آستانه شروع رواناب و مقدار رواناب خروجی
AWBM	شریفی و همکاران، ۱۳۸۵	پنج زیر حوضه کارون به نام های کتا، بطاری، بارز، ارمند و شاه مختار	روزانه	ارائه نتایج قابل قبول
MIKE-11	Keskin <i>et al.</i> , 2006	Yuvacik	روزانه	ارائه نتایج قابل قبول برای رواناب ذوب برف
KINERUS	Al Qurashi <i>et al.</i> , 2008	حوضه های خشک	رخدادی	نتایج ضعیف و عدم قطعیت زیاد

^۱ Hydrological Simulation Program

^۲ Stream flow Synthesis and Reservoir Regulation

^۳ National Weather Service and River Forecast Centre

^۴ Storage Treatment Overflow Runoff Models

^۵ Systeme Hydrologique European

		عمان		
--	--	------	--	--

۲-۲ مدل فازی ALM^۱:

تاکنون مطالعات و تحقیقات زیادی روی ALM و کاربرد آن در زمینه های مختلف علوم و مهندسی انجام شده است (مثل Bagheri Shouraki & Honda, 1998, 1999a; Bagheri Shouraki et al., 1998; Lotfi & Bagheri Shouraki, 2004; Murakami et al., 2003; Shahdi & Bagheri Shouraki, 2003; Murakami & Honda, 2004). طاهری شهرآئینی (۱۳۸۶) یک روش جستجوی ابتکاری^۲ جدید را برای روش ALM توسعه داده و متناسب با روش جستجوی توسعه یافته، یک روش مدل سازی فازی جدید توسعه داده و بدین ترتیب شکل جدیدی از مدل ALM را ارائه و از این مدل جهت پردازش تصاویر ماهواره ای استفاده نموده است [50]. با توجه به سابقه توضیح داده شده تحقیق در مورد بارش-رواناب، مدل فازی ALM تاکنون جهت پیش بینی رواناب مورد استفاده قرار نگرفته است و در این تحقیق برای اولین بار جهت تخمین رواناب حوضه کارون III استفاده خواهد شد.

۳-۲ جمع بندی و انتخاب مدل مفهومی مناسب:

از نکات مهمی که در انتخاب مدل مفهومی برای شبیه سازی جریان رودخانه کارون بایستی مورد توجه قرار گیرد این است که مدل منتخب از لحاظ زمانی پیوسته (Continuous) بوده و از لحاظ مکانی یکپارچه (Lumped) باشد. زیرا مدل ALM به صورت یکپارچه عمل می کند و لذا برای مقایسه مدل مفهومی با مدل ALM بایستی مدل مفهومی منتخب یکپارچه باشد. با توجه به تحقیقات گذشته با راحتی می توان دریافت که مدل های مشهور و مطمئن برای شبیه سازی جریان رودخانه مدل های SRM، SWAT و HEC-HMS می باشند و به بررسی این مدل ها و مناسب بودن آنها برای مدل سازی مورد نظر پرداخته می شود. در این راستا ابتدا به بررسی مدل SRM و شناخت پارامتر های مورد نیاز

^۱ Active Learning Method

^۲ Heuristic Search Method

آن و همچنین مکانیسم زمانی و مکانی مدل پرداخته شد که بدین لحاظ هر دو شرط لازم جهت مقایسه با مدل ALM را ارضا می نمود و به لحاظ زمانی پیوسته و از نظر مکانی یکپارچه بود.

مدل بعدی که به عنوان یک گزینه مناسب مورد ارزیابی قرار گرفت، مدل SWAT بود. SWAT یک مدل پیوسته زمانی در مقیاس حوضه ای می باشد که در گام های زمانی روزانه عمل می کند و به لحاظ مکانی در مقیاس واحد های واکنشی هیدرولوژیک (HRU) یکپارچه می باشد و ارضا کننده هر دو شرط می باشد و می توانست به عنوان مدل مفهومی انتخاب گردد.

از دیگر نرم افزار های مهم که در زمینه مدل سازی رواناب کاربرد وسیعی پیدا کرده است نرم افزار HEC-HMS می باشد. این برنامه به گونه ای طراحی شده که برخلاف مدل SRM، دامنه گسترده ای از نواحی جغرافیایی را پاسخگو باشد [2]. این مدل حوضه آبریز را به عنوان یک سیستم یکپارچه (Lumped) با مؤلفه های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی نمایش می دهد. در مورد بحث زمان تمامی مدل های موجود در HEC-HMS به جز مدل محاسبه تلفات SMA^۱، برای رخداد ها طراحی شده اند و تنها مدل پیوسته موجود در آن مدل SMA می باشد که اخیرا بدان اضافه شده است و علاوه بر مزیت های مدل های فوق، کاملا نوین می باشد.

اکنون نوبت به انتخاب مدل مناسب تر برای مقایسه با مدل فازی فرا رسید. مدل SRM با توجه به اینکه در حوضه های زیادی مورد آزمایش قرار گرفته بود و همچنین در حوضه کارون نیز قبلا استفاده شده بود حذف گردید. مدل SWAT نیز همانند SRM در چهار زیر حوضه کارون استفاده شده بود و به دلیل اینکه مدل سازی بارش-رواناب از جنبه های فرعی این مدل محسوب می گردد و نیازمند داده های وسیعی به صورت توزیعی می باشد نیز انتخاب نشد. در مورد تنها مدل باقیمانده نکته قابل توجه این است که نرم افزار HEC-HMS به طور جامع خود در بر گیرنده مدل های بسیاری می باشد که در بخش های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است ولی مدل سازی پیوسته با مدل SMA که

^۱ Soil Moisture Account

اخیرا بدان اضافه شده است کاملا نوین بوده و تنها مدلی در آن می باشد که قادر به شبیه سازی دوره های خشک و تر به صورت پیوسته است. با توجه به مطالب ذکر شده سرانجام نرم افزار HEC-HMS با تکیه بر مدل محاسبه تلفات پیوسته SMA جهت ارزیابی و مقایسه با مدل ALM انتخاب گردید و در نهایت برای اولین بار یک مدل مفهومی با مدل فازی ALM در این تحقیق مورد قیاس خواهد گرفت.

فصل سوم

منطقه مورد مطالعه

و

پیش‌پردازش داده‌ها

۱-۳ مقدمه

حوضه آبریز کارون III در جنوب غربی ایران در حد فاصل طول شرقی $30^{\circ} 49'$ تا 52° و عرض شمالی 30° تا $32^{\circ} 30'$ قرار گرفته است. وسعت حوضه کارون III تا محل ایستگاه پل‌شالو (شامل زیر حوضه های خرسان و کارون علیا) حدود 24202 کیلومتر مربع است که بیش از 50 درصد حوضه در ارتفاعات بالای 2400 متری از سطح دریا قرار گرفته و برفگیر می‌باشد. هر یک از استانهای چهار محال و بختیاری، اصفهان، کهگلویه و بویر احمد، خوزستان و فارس بخشی از حوضه آبخیز کارون III را در بر می‌گیرند. محدوده حوضه کارون III و نقشه رقومی ارتفاع و آبراهه‌های اصلی آن در شکل ۱-۳ آمده است [51].

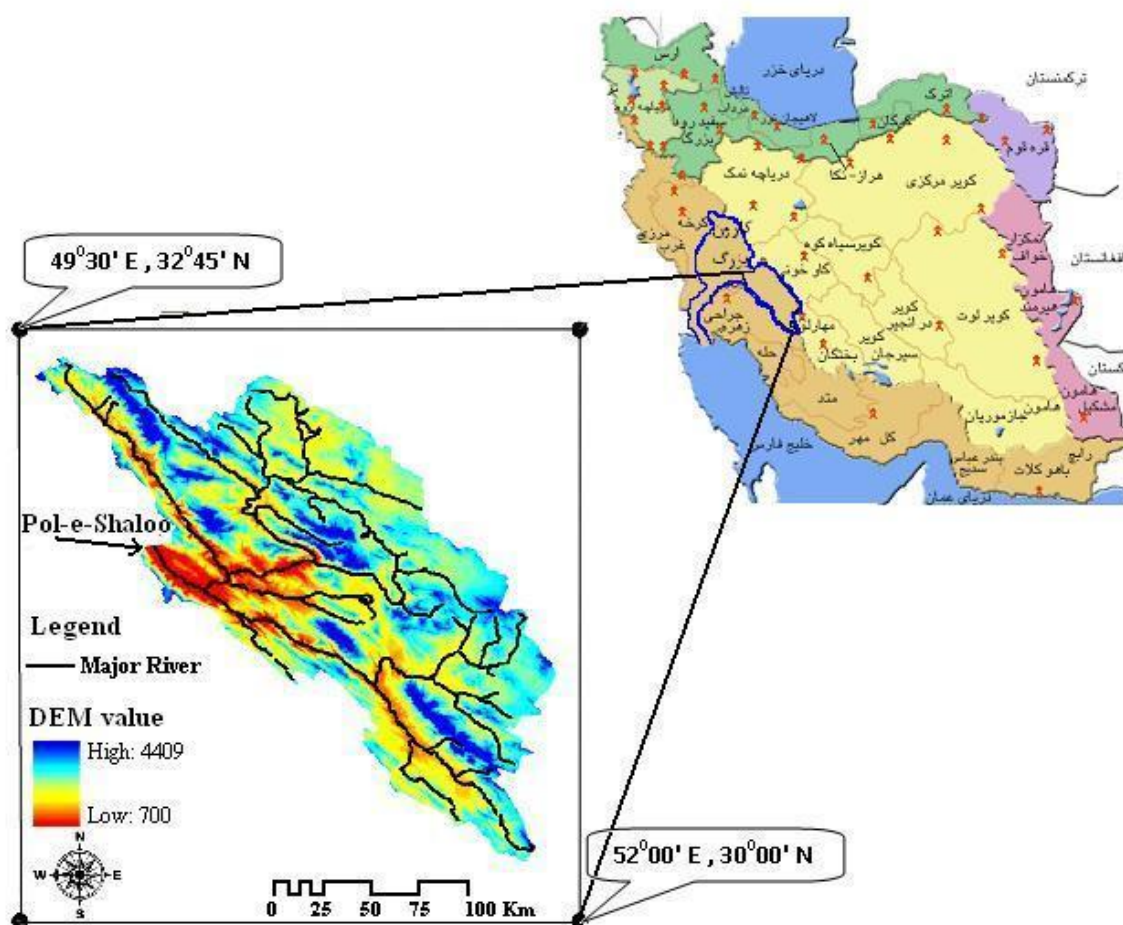
۲-۳ موقعیت اقلیمی منطقه

حوضه کارون جزء نخستین مناطقی از کشور است که فرسایش رطوبتی هوا روی آن انجام می‌گیرد. این موقعیت به همراه صعود انبوه هوای مرطوب بر دامنه‌های کوهستانها، باعث شده که آوردهای مهم

جوی در این منطقه صورت گیرد. رژیم بارش منطقه، مدیترانه‌ای (فصل خشک کاملاً منطبق بر تابستان و فصل بارندگی منطبق بر زمستان) می‌باشد. بیش از ۹۵٪ بارش‌ها در فاصله ماههای آبان لغایت اردیبهشت اتفاق می‌افتد و حداکثر بارش در یکی از ماههای دی یا بهمن است [51].

۳-۳ تغییرات ارتفاع

در مناطق شرقی حوضه کارون، دشت بروجن در ارتفاع ۲۲۰۰ متر و دشت شهرکرد در ارتفاع ۲۱۰۰ متر قرار گرفته است. دیگر نواحی شمالی و شرقی منطقه مطالعاتی از کوهستان‌های متراکم تشکیل گردیده که در نتیجه وجود چنین شرایط توپوگرافی و اقلیمی، حوضه کارون دارای بارندگی قابل توجهی است. ارتفاعات عمده در حوضه رودخانه کارون کوه دنا در شرق حوضه با ارتفاع ۴۲۶۲ متر و در شمال کوه‌رنگ به ارتفاع ۴۲۲۱ متر می‌باشند. در شکل ۱-۳ نقشه رقومی ارتفاع این حوضه آورده شده است. ارتفاع آن از سطح دریا از ارتفاعات حدود ۷۰۰ متری سطح دریا در محل تقاطع با رودخانه دز (ایستگاه پل شالو) شروع و به ارتفاعات ۴۵۰۰ متری دنا و کوه‌رنگ ختم می‌گردد [51].



شکل ۳-۱. موقعیت حوضه کارون III به همراه نقشه رقومی ارتفاع و آبراهه‌های اصلی آن

۳-۴ گردآوری آمار

تاسیس ایستگاههای هواشناسی و برداشت آمار آنها در کشور، توسط سازمان هواشناسی و وزارت نیرو انجام می‌گیرد. پس از جمع آوری داده‌های مورد نیاز اولیه، سری زمانی داده‌ها تکمیل گردید. در این راستا ابتدا ایستگاه‌های با آمار مناسب و دراز مدت شناسایی شده و توزیع مناسب آنها در حوضه و اطراف آن بررسی گردید که در نهایت تعداد ۳۰ ایستگاه انتخاب گردید. در بین آمار این ۳۰ ایستگاه پایه زمانی مشترک داده‌ها تعیین گردید. پایه زمانی مناسبی که برای مدل سازی با توجه با آمار ایستگاه‌ها در نظر گرفته شد به مدت ۸ سال از تاریخ ۲۳ سپتامبر ۱۹۹۱ تا ۲۲ سپتامبر ۱۹۹۹ معادل با شروع سال آبی ۱۳۷۱-۱۳۷۰ تا انتهای سال آبی ۱۳۷۸-۱۳۷۰ تعیین گردید. از آنجا که در آمار بارش ایستگاه‌ها، روزهای مشترک فاقد بارندگی در کل ماه‌ها حذف شده بود، شناسایی و به

سری زمانی داده ها اضافه گردید. در این تحقیق از آمار ایستگاه‌های باران‌سنجی (جدول ۳-۱)، تبخیرسنجی و هیدرومتری متعلق به وزارت نیرو و همچنین داده های دما، رطوبت و فشار بخار ایستگاه های سینوپتیک بروجن، شهرکرد و یاسوج سازمان هواشناسی استفاده شده است. مشخصات آماری داده های مورد استفاده در مدل سازی فازی و مفهومی در جدول ۳-۲ ارائه شده است.

جدول ۳-۱. مشخصات ایستگاه‌های باران‌سنجی وزارت نیرو مورد استفاده در تحقیق

ارتفاع (متر)	عرض	طول	نام ایستگاه	ارتفاع (متر)	عرض	طول	نام ایستگاه
2100	30.63	51.38	سپیدار	---	30.72	51.28	پیراشگفت
2300	31.18	51.72	حنا	764	31.82	49.85	ایذه
2140	31.97	51.28	بروجن	675	31.55	49.87	باغ ملک
600	31.98	49.87	سوسن	560	30.95	50.42	ایدناک
1821	30.65	51.60	یاسوج	740	30.25	51.33	باتون
1730	30.68	51.52	شاه مختار	1122	30.53	50.97	تلچگاه
2100	30.53	51.53	دشت روم	793	30.40	50.68	آبچیرک
1560	30.85	51.33	بطاری	2020	30.68	51.08	طاسوج
1540	30.95	51.27	پاتاوه	---	30.65	50.52	بویری
1600	31.18	51.25	کتا	870	30.55	50.76	دیل
815	31.52	50.42	بارز	650	30.48	50.78	نازمنان
1580	31.50	50.82	لردگان	2400	32.45	50.13	چهلگرد
700	31.75	50.13	پل شالو	1840	30.47	52.12	چم ریز
---	31.75	50.28	ده دز	2280	30.90	52.00	خسروشیرین
---	31.55	51.07	آلونی	2000	30.55	51.88	چوبخله

۳-۵ روشهای محاسبه توزیع مکانی بارندگی

روشهای مختلفی برای برآورد توزیع مکانی وجود دارد که از جمله می‌توان به روشهای کلاسیک معمول یعنی روش میانگین حسابی و پلیگونهای تایسن اشاره کرد. به طور کلی در روشهای درونیابی، تخمین شامل فرآیندی است که طی آن می‌توان، مقدار یک کمیت را در نقطه‌ای با مختصات معلوم با استفاده از مقدار همان کمیت که در تعدادی نقاط اندازه‌گیری شده باشد، بدست

آورد. در این راستا روش‌های نوین زمین آماری مختلفی وجود دارد که عبارتند از: روش کریجینگ، کوکریجینگ، TPSS و IDW^۱. نتایج مطالعه بارش در جنوب غرب ایران نشان داده است که روش IDW برای تخمین بارش در شرایطی که تراکم ایستگاه‌های بارانسنجی پایین است روش مناسبی برای درون‌یابی بارش می‌باشد (Saghafian *et al.*, 2007) [52]. لذا در این تحقیق از بین روش‌های میان-یابی، روش وزنی عکس مجذور فاصله (IDW) برای برآورد توزیع مکانی بارندگی روزانه حوضه کارون جهت معرفی به مدل مفهومی، انتخاب شد. فرمول کلی روش‌های میان‌یابی از جمله IDW، به صورت زیر است:

$$Z^*(x_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot z(x_i) \quad ۱-۴$$

که در آن $Z^*(x_i)$ مقدار تخمینی متغیر، $z(x_i)$ مقدار متغیر مشاهده شده، λ_i وزن یا اهمیت نمونه آم و n تعداد مشاهدات است. در این روش مقدار λ_i بر اساس انتخاب یک شعاع تاثیر، برای تمامی نقاطی که در داخل این شعاع تاثیر قرار می‌گیرند، عبارت است از:

$$\begin{cases} d_i \leq R & \lambda_i = \frac{d_i^{-u}}{\sum_{d_i \leq R} d_i^{-u}} \\ d_i \geq R & \lambda_i = 0 \end{cases} \quad ۲-۴$$

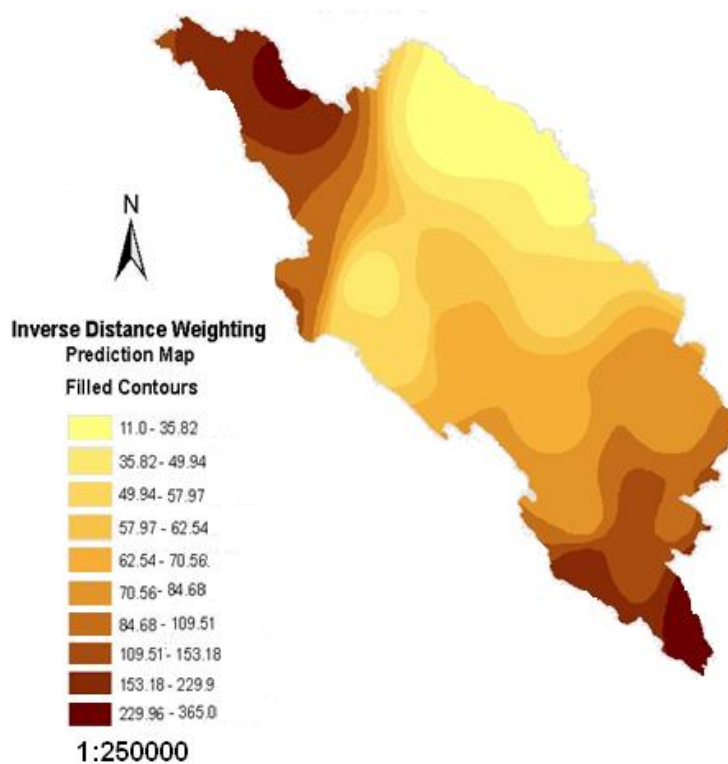
d_i فاصله i امین داده مشاهده شده تا نقطه مورد تخمین، u توان و R شعاع تاثیر است. توان‌های بزرگتر اثر نقاط دورتر را کاهش می‌دهند. لازم به ذکر است که در این روش موقعیت و آرایش نقاط در نظر گرفته نمی‌شود زیرا به نقاط با فاصله یکسان از نقطه مورد تخمین، وزن یکسانی داده می‌شود [51]. شکل ۲-۳ نقشه توزیع مکانی بارندگی را برای ماه آذر سال ۱۳۸۲ نشان می‌دهد که توسط روش IDW محاسبه شده است. روش پلیگونی‌های تاپسن گرچه در برآورد میزان بارش نقطه ای به طور ضعیفی عمل می‌کند اما در برآورد بارش کلی حوضه‌ها کارایی‌های مناسبی از خود نشان داده است.

^۱ Inverse Distance Weighting

بدین رو در بخش مدل سازی فازی از میانگین بارش حاصل از پلیگون های تاپسن نیز در ورودی استفاده شده است و انتخاب روش بهتر بر عهده مدل هوشمند ALM قرار داده شده است.

جدول ۳-۲. پارامتر های آماری داده های مورد استفاده به عنوان ورودی در مدل مفهومی و فازی

پارامتر های آماری	دبی		بارش IDW		بارش تاپسن		دما		رطوبت نسبی		فشار بخار	
	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون
میانگین	437	294	1.97	1.42	2.17	1.67	14.5	15.5	42.9	39.1	7.17	6.9
انحراف معیار	381	315	5.38	4.8	6.34	5.59	8.7	8.8	19.2	18.5	2.08	2.0
واریانس	4.5e+5	9.9e+4	28.9	23.5	40.2	31.3	77	77.8	368.6	342	4.3	4.02
ضریب تغییرات	0.87	1.07	2.7	3.4	2.9	3.35	0.604	0.57	0.45	0.47	0.29	0.28
کشیدگی	12.1>0	42	27.4	58.3	31.9	46.7	1.94	1.81	2.04	2.3	2.9	2.75
چولگی	2.4	4.8	4.2	6.4	4.7	5.7	-0.16	-0.13	0.43	0.71	0.6	0.31
داده های پرت	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد	دارد	دارد



شکل ۳-۲. نقشه توزیع مکانی بارندگی برآورد شده توسط IDW برای آذرماه حوضه کارون III در سال ۱۳۸۲ [51].

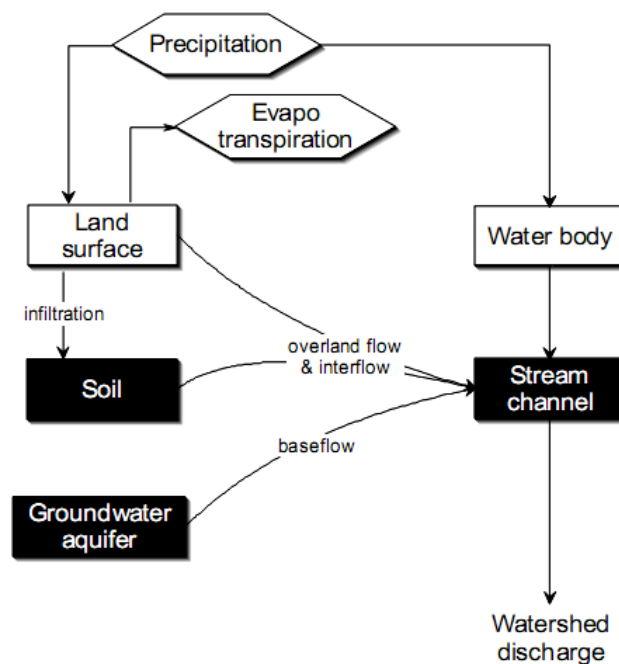
فصل چهارم

ساختار و مفاهیم اساسی

مدل مفهومی و فازی

۱-۴ ساختار مدل مفهومی HEC-HMS [2,53,54]:

نرم افزار HEC-HMS نسخه توسعه یافته HEC-1، تحت ویندوز برای شبیه سازی فرآیند بارش-رواناب حوضه آبریز طراحی شده است. این برنامه قابلیت تحلیل رودخانه های حوضه های آبریز بزرگ، ذخایر آبی و هیدرولوژی سیلاب و رواناب حوضه های طبیعی و شهری را دارا می باشد. هیدروگراف های حاصل از تحلیل نرم افزار HEC-HMS یا مستقیماً در مسائل طراحی بکار برده می شود و یا همراه با نرم افزارهای دیگر برای مطالعات تکمیلی آبی، زهکشی شهری، پیش بینی جریان، طراحی سرریز مخازن، کاهش آسیبهای ناشی از سیلاب و ... مورد استفاده قرار می گیرد. این مدل حوضه آبریز را به عنوان یک سیستم یکپارچه (Lumped) با مؤلفه های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی نمایش می دهد (شکل ۴-۱). هر جزء مدل یک جنبه از فرآیند بارش-رواناب را در داخل بخشی از حوضه که معمولاً به عنوان زیر حوضه در نظر گرفته می شود، شبیه سازی می کند. به عبارت دیگر اجزاء مختلفی برای شبیه سازی سیستم فیزیکی حوضه ترکیب می شوند و هر جزء نماینده یکی از عوامل تبدیل بارش به رواناب در حوضه می باشد که از ترکیب اثر توأم عوامل مذکور هیدروگراف نهایی سیلاب حاصل خواهد شد.



شکل ۴-۱. نقشه شماتیک عملکرد مدل HEC-HMS برای برآورد رواناب حوضه آبریز [2].

هر پروژه کامل در این نرم افزار شامل سه مولفه است که هر یک وظیفه خاصی در ارتباط با تبدیل بارش به رواناب و روندیابی آن دارند. بخش‌های اصلی مدل را سه مجموعه به شرح ذیل تشکیل می‌دهند (شکل ۴-۲) [53]:

- **مدل حوضه**^۱: که شامل پارامترها و داده‌های مرتبط با عناصر هیدرولوژیکی^۲ است. این عناصر عبارتند از زیرحوضه‌ها^۳، بازه‌های^۴ روندیابی، محل اتصال آبراهه‌ها^۵، مخازن^۶، چشمه^۷، نزول^۸ و محل انحراف آب^۹. عناصر فوق الذکر، تعریف کننده اجزاء مختلفی که یک حوضه می‌تواند داشته باشد هستند. رواناب زیرحوضه‌ها می‌تواند به صورت یکپارچه و یا توزیعی محاسبه شود. در مدل یکپارچه، بارش و تلفات بصورت میانگین مکانی روی زیرحوضه در نظر گرفته می‌شود.

- **مدل هواشناسی**^{۱۰}: تحلیل داده های هواشناسی به وسیله مولفه مدل هواشناسی انجام می‌شود. این مولفه ها شامل اطلاعات بارندگی و تبخیر - تعرق است. در این مولفه نوع اطلاعات بارندگی مشخص شده است و در صورت لزوم مقدار بارندگی و توزیع مکانی و زمانی آن مشخص می‌شود.

- **نمایه های کنترل**^{۱۱}: شامل تاریخ و زمان شروع و خاتمه بارش و همچنین گام های زمانی^۱ برای محاسبات شبیه سازی است.

^۱ Basin Model

^۲ Hydrologic Element

^۳ Sub basin

^۴ Reaches

^۵ Junction

^۶ Reservoir

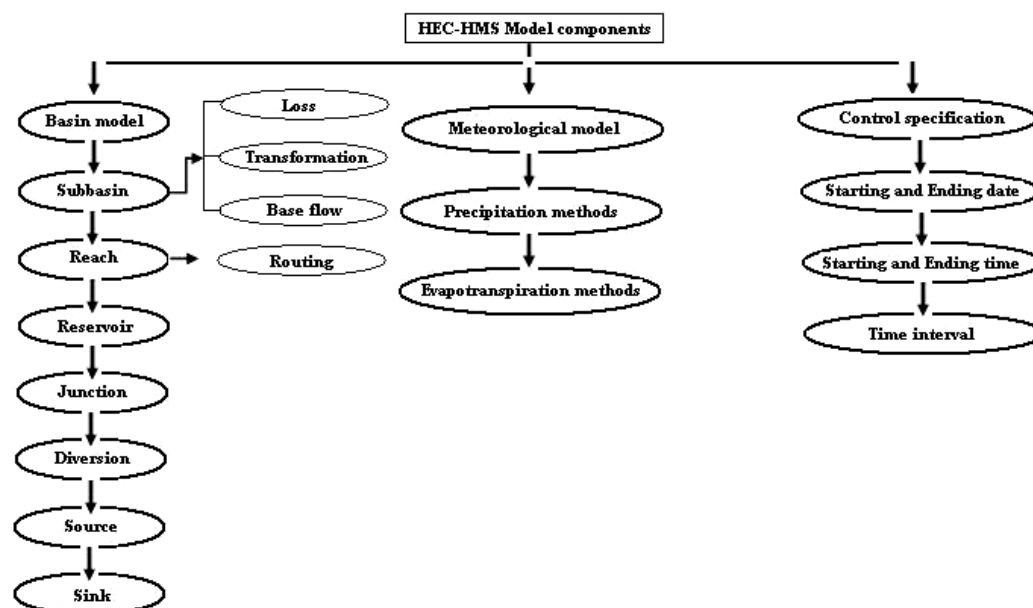
^۷ Source

^۸ Sink

^۹ Diversion

^{۱۰} Meteorologic Model

^{۱۱} Control specifications



شکل ۴-۲. مولفه های مدل HEC-HMS

۴-۱-۱ مدل های محاسبه تلفات^۲ در HEC-HMS [2,53]:

مدل HEC-HMS حجم رواناب را با محاسبه حجم آب گرفته شده توسط ذخیره برگابی، نفوذ، ذخیره سطحی و تبخیر و تعرق و کاهش آنها از میزان بارش کل بدست می آورد. مجموع ذخیره برگابی، ذخیره سطحی، نفوذ و تبخیر و تعرق به صورت کلی در این نرم افزار تحت عنوان تلفات یاد می شود. در این بسته نرم افزاری تمامی اراضی موجود در حوضه آبریز می توانند در دو دسته جای بگیرند:

- سطوح نفوذ ناپذیر با ارتباط مستقیم (Directly-connected impervious surface)
- سطوح قابل نفوذ (Pervious surface)

سطوح نفوذ ناپذیر، بخش هایی از حوضه می باشند که تمامی بارش به صورت رواناب جاری گشته و هیچ گونه مولفه تلفات صورت نمی گیرد. مدل های مختلف محاسبه تلفات در این نرم افزار شامل مدل شرایط اولیه و نرخ ثابت تلفات^۳، مدل کمبود جریان و نرخ ثابت^۴، مدل شماره منحنی SCS

^۱ Time Step

^۲ Loss Models

^۳ The initial and constant-rate loss model

^۴ The deficit and constant-rate model

ساده و شبکه ای^۱، مدل Green-Ampt، مدل نمایی^۲ و مدل پیوسته محاسبه کننده رطوبت خاک (SMA) می باشد. در هر یک از این مدل ها، تلفات بارندگی برای هر بازه زمانی از محاسبات تعیین می گردد و از ارتفاع متوسط بارش سطحی (MAP)^۳ در آن گام زمانی کسر می گردد و میزان باقیمانده به منزله بارش مازاد^۴ محسوب می گردد. همانطور که پیشتر ذکر گردید از فاکتورهای مهم در انتخاب مدل مفهومی پیوسته و نوین بودن آن بوده است که در میان مدل های محاسبه تلفات، مدل SMA تنها مدل موجود در HEC-HMS است که هر دو شرط را دارا می باشد و همچنین توانایی مدل سازی سیستم های هیدرولوژیکی در طی دوره های خشک و تر را به صورت پیوسته دارد در بخش بعدی به تشریح این مدل و مفاهیم اساسی آن پرداخته می شود.

۱-۱-۱-۴ معادلات و مفاهیم اساسی مدل SMA:

مدل SMA بر اساس سیستم مدل سازی لیوزلی (Leavesley, 1983) طراحی گشته و به طور جزئی توسط بنت (Bennett, 1998) توصیف شده است. این مدل حرکت جریان آب و ذخیره آن در گیاهان، سطح خاک، پروفیل خاک و در لایه های آب زیر زمینی را شبیه سازی می نماید [55].

۲-۱-۱-۴ مولفه های ذخیره در مدل SMA^۵:

این مدل با استفاده از یک سری لایه های ذخیره کننده به صورتی که در شکل ۳-۴ نشان داده شده است، حوضه آبریز را معرفی می نماید. نرخ آب ورودی و خروجی از حوضه و همچنین ظرفیت ذخیره لایه ها، کنترل کننده میزان آب از دست رفته و یا اضافه شده به ذخیره هر یک از لایه ها می باشد.

^۱ SCS curve number loss model (composite or gridded)

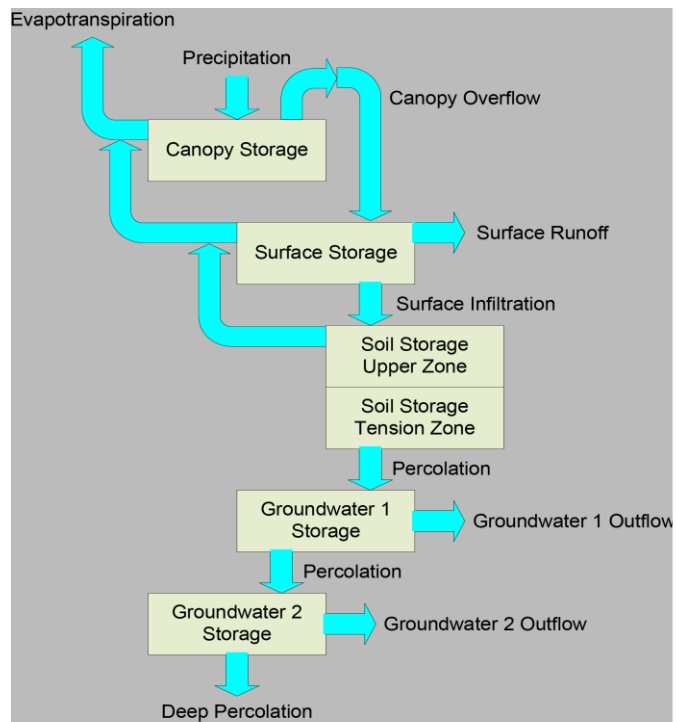
^۲ Exponential Model

^۳ Mean Aerial Precipitation

^۴ Precipitation excess

^۵ Storage component

لایه های ذخیره ای مختلف در SMA شامل ذخیره گیرش برگابی^۱، ذخیره گیرش سطحی^۲، ذخیره پروفیل خاک^۳ و ذخیره آب زیر زمینی^۴ می باشند.



شکل ۳-۴. طرح شماتیک و مفهومی الگوریتم محاسبه رطوبت خاک

۳-۱-۱-۴ مولفه های جریان در SMA [55]:

مدل SMA جریان ورودی، خروجی و میزان ذخیره شده در هر یک از لایه های خاک را به صورت زیر محاسبه می کند:

- بارش: این جریان به عنوان ورودی به سیستم ذخیره محسوب گشته که ابتدا ذخیره برگابی را تامین کرده و سپس مقادیر مازاد بر آن نفوذ در دسترس قرار می گیرد.

^۱ Canopy-interception storage

^۲ Surface-interception storage

^۳ Soil-profile storage

^۴ Groundwater storage

- **نفوذ:** جریان آبی است که از میزان مازاد ذخیره بین راهی (گیرش برگابی) و آب جمع شده در سطح زمین به درون پروفیل خاک نفوذ می کند. حجم آب نفوذی در طی یک بازه زمانی مشخص تابعی از حجم آب در دسترس برای نفوذ، حالت پروفیل خاک (State of soil profile) و حداکثر نرخ نفوذ تعیین شده توسط کاربر می باشد. SMA برای هر گام زمانی، مقدار پتانسیل نفوذ (**PotSoilInfil**) را به صورت زیر محاسبه می نماید:

$$\text{PotSoilInfil} = \text{MaxSoilInfil} - \frac{\text{CurSoilStore}}{\text{MaxSoilStore}} \text{MaxSoilInfil} \quad 1-4$$

که در اینجا، **PotSoilInfil** : پتانسیل نفوذ در خاک، **MaxSoilInfil** : حداکثر نرخ نفوذ در خاک، **CurSoilStore** : حجم آب ذخیره شده در ذخیره خاک در ابتدای گام زمانی و **MaxSoilStore** : حداکثر حجم ذخیره ای در خاک می باشد. نرخ نفوذ واقعی (**ActInfil**) برابر با حداقل پتانسیل نفوذ و یا حداقل حجم آب در دسترس برای نفوذ می باشد. اگر آب در دسترس نفوذ از میزان نرخ نفوذ محاسبه شده بیشتر گردد، مقادیر اضافی آن در ذخیره سطحی شرکت می نمایند.

- **نفوذ عمقی (Percolation):** در طی این فرآیند آب از پروفیل خاک به لایه های عمیق تر و یا سفره های آب زیر زمینی عمیق نفوذ می کند. در مدل SMA، نرخ نفوذ عمقی از پروفیل خاک به لایه آب زیر زمینی و یا بین لایه های آب زیر زمینی وابسته به حجم آب ذخیره شده در لایه های مبدا و مقصد می باشد. میزان نرخ نفوذ هنگامی که لایه های مبدا اشباع از آب باشد و ذخیره مقصد برابر با صفر باشد دارای مقدار حداکثری است و بالعکس، هنگامی که ذخیره مبدا صفر و مقصد اشباع باشد، نرخ نفوذ حداقل می باشد. مدل SMA میزان نفوذ عمقی را از ذخیره پروفیل خاک به لایه آب زیر زمینی اول به صورت زیر محاسبه می نماید :

$$\text{PotSoilPerc} = \text{MaxSoilPerc} \left(\frac{\text{CurSoilStore}}{\text{MaxSoilStore}} \right) \left(1 - \frac{\text{CurGWStore}}{\text{MaxGWStore}} \right) \quad 2-4$$

در این رابطه $PotSoilPerc$: نرخ نفوذ عمقی پتانسیل خاک، $MaxSoilPerc$: حداکثر نرخ نفوذ عمقی خاک، $CurSoilStore$: ذخیره خاک در ابتدای گام زمانی، $MaxSoilStore$: حداکثر ذخیره خاک، $CurGWStore$: ذخیره آب زیر زمینی در ابتدای گام زمانی و $MaxGWStore$: حداکثر ذخیره آب زیر زمینی می باشد. میزان آب موجود برای نفوذ عمقی برابر با میزان اولیه ذخیره خاک بعلاوه میزان آب نفوذ یافته از سطح می باشد. مشابه قبل، پتانسیل نفوذ از لایه آب زیر زمینی نخست به دومین لایه به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$PotGWPer = MaxGWPer \left(\frac{CurGWStore}{MaxGWStore} \right) \left(1 - \frac{CurGWStore}{MaxGWStore} \right) \quad 3-4$$

در این رابطه $MaxGWPer$: حداکثر نرخ نفوذ عمقی، $CurGWStore$: ذخیره آب زیر زمینی محاسبه شده در ابتدای گام زمانی برای لایه دوم و $MaxGWStore$: حداکثر ذخیره آب زیر زمینی برای لایه دوم می باشد. برای حالتی که آب از پروفیل خاک به صورت مستقیم به سفره آب زیر زمینی نفوذ عمقی می کند و لایه های آب زیر زمینی حضور ندارند و یا هنگامی که نفوذ از لایه آب زیر زمینی اول و بدون حضور لایه دوم صورت می گیرد و یا در نفوذ از لایه دوم، نرخ نفوذ، تنها به حجم ذخیره ای در لایه مبدا بستگی دارد. در حالت اخیر نرخ نفوذ به روش زیر محاسبه می گردد:

$$PotSoilPer = MaxSoilPer \frac{CurSoilStore}{MaxSoilStore} \quad 4-4$$

$$PotGWPer = MaxGWPer \frac{CurGWStore}{MaxGWStore} \quad 5-4$$

از ضرب نمودن نرخ نفوذ پتانسیل بدست آمده از روابط در بازه زمانی شبیه سازی، حجم نفوذ پتانسیل قابل محاسبه می باشد.

- رواناب سطحی و جریان آب زیر زمینی :

آب مازاد بر نرخ نفوذ و ذخیره گودالی، تشکیل دهنده رواناب سطحی می باشند. حجم ناشی از رواناب مستقیم به کمک یکی از مدل های هیدروگراف جریان قابل محاسبه است. جریان آب زیر زمینی برابر

با مجموع حجم جریان آب زیر زمینی هر یک از لایه ها در انتهای بازه زمانی می باشد و نرخ جریان به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$GWFlow_{t+1} = \frac{ActSoilPerc + CurGW_iStore - PotGW_iPerc - 0.5GWFlow_t TimeStep}{RoutGW_iStore + 0.5TimeStep} \quad ۶-۴$$

که در آن $GWFlow_t$ و $GWFlow_{t+1}$: نرخ جریان آب زیر زمینی در ابتدای بازه زمانی t و $t+1$ ، $ActSoilPerc$: نرخ نفوذ واقعی از پروفیل خاک به لایه آب زیر زمینی، $PotGW_iPerc$: نفوذ پتانسیل از لایه آب زیر زمینی i ، $RoutGW_iStore$: ضریب روند یابی جریان آب زیر زمینی و $TimeStep$: گام زمانی شبیه سازی می باشد.

حجم جریان آب زیر زمینی ($GW Volume$) که در حوضه آبریز رها می گردد برابر با نرخ جریان آب زیر زمینی ($GWFlow$) در طول گام زمانی ($TimeStep$) است و به صورت زیر قابل محاسبه می باشد:

$$GW Volume = \frac{1}{2}(GWFlow_{t+1} + GWFlow_t) TimeStep \quad ۷-۴$$

که این حجم می تواند به عنوان ورودی مخزن خطی عمل کند و جریان پایه را شبیه سازی نماید.

- تبخیر و تعرق (ET):

این مولفه موجب تلفات از گیرش برگابی، ذخیره سطحی و پروفیل خاک می گردد. در SMA میزان تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از ارتفاع ماهانه تشت تبخیر محاسبه شده و در ضریب تشت ضرب شده و برای بازه زمانی شبیه سازی تعدیل می گردد. میزان ET پتانسیل ابتدا از ذخیره برگابی، سپس از ذخیره سطحی و در نهایت از پروفیل خاک تامین می گردد. در پروفیل خاک ابتدا منطقه فوقانی و سپس منطقه کششی تحت تبخیر و تعرق قرار می گیرند. هنگامی که ET از ذخیره برگابی، ذخیره سطحی و بخش فوقانی پروفیل خاک تکمیل می گردد میزان ET واقعی برابر با ET پتانسیل می باشد اما هنگامی که ET از ناحیه کششی صورت می گیرد، مقدار ET واقعی درصدی از ET پتانسیل می باشد و به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$\text{ActEvapSoil} = \text{PotEvapSoil} \cdot f(\text{CurSoilStore}, \text{MaxTenStore})$$

۸-۴

که در آن ActEvapSoil : مقدار ET واقعی از ذخیره خاک، PotEvapSoil : حداکثر ET پتانسیل محاسبه شده و MaxTenStore : حداکثر ذخیره ناحیه کششی پروفیل خاک می باشد. تابع $f(*)$ در این معادله به صورت زیر تعریف می گردد:

الف) تا هنگامی که ذخیره کنونی در پروفیل خاک بیشتر از حداکثر ذخیره ناحیه کششی است ($\frac{\text{CurSoilStore}}{\text{MaxTenStore}} > 1$)، آب از بخش فوقانی با نسبت یک به یک مشابه با تلفات از ذخیره سطحی و برگابی برداشت می شود.

ب) هنگامی که حجم آب در پروفیل خاک فقط به ناحیه کششی محدود می گردد، تابع $f(*)$ شبیه نفوذ عمقی تعیین می گردد و نشان دهنده کاهش نرخ تلفات تبخیر و تعرق از پروفیل خاک به همراه کاهش ذخیره آب است.

۴-۱-۱-۴ ترتیب محاسبات مدل SMA^۱ [2,55]:

جریان ورودی و خروجی به هر یک از لایه های ذخیره برای هر بازه زمانی توسط مدل SMA محاسبه می گردد. ترتیب محاسبات در هر گام زمانی بر اساس وقوع بارش یا ET به صورت زیر می باشد:

الف) اگر در طی بازه زمانی بارش صورت گیرد، ET مدل سازی نمی گردد. در طی بارش، نخست ذخیره بین راهی یا برگابی را تکمیل می نماید و سپس مازاد بر این ذخیره در دسترس نفوذ قرار می گیرد. اگر شدت بارش بیش از شدت نفوذ پتانسیل محاسبه شده برای آن گام زمانی باشد و یا حجم در دسترس نفوذ بیش از ذخیره در دسترس خاک باشد، میزان آب مازاد بر ذخیره خاک در سطح ذخیره می گردد (ذخیره چالابی) و در نهایت پس از تکمیل این ذخیره، رواناب سطحی را تشکیل می دهد. آب نفوذ یافته به پروفیل خاک در ابتدا ذخیره کششی را تکمیل می نماید. آب در پروفیل

^۱ Order of Model Computation

خاک (اما نه از ذخیره کششی) به نخستین لایه آب زیر زمینی نفوذ می کند. آب در نخستین لایه آب زیر زمینی روندیابی گشته و سپس باقیمانده آن به لایه آب زیر زمینی دوم نفوذ می کند. از دومین لایه آب زیر زمینی به سفره عمیق تر نیز نفوذ صورت می گیرد که در این حالت برای آب خروجی از سیستم، مدل سازی صورت نمی گیرد.

ب) اگر هیچ بارشی در طی گام زمانی رخ ندهد در این هنگام ET مدل سازی می گردد. پتانسیل ET ابتدا از ذخیره برگابی و سپس از ذخیره گودالی و در نهایت (اگر هنوز تکمیل نشده باشد) از ذخیره فوقانی پروفیل خاک تکمیل می گردد.

۴-۱-۱-۵ تخمین پارامترهای مدل SMA [2,55,56]:

اندازه گیری های مستقیمی برای ذخیره برگابی در مورد گونه های مختلف پوشش گیاهی صورت گرفته است. مقادیر گیرش برگابی از ۰/۰۳۶ اینچ شروع شده، در مورد درختان همیشه سبز اغلب به کمتر از ۰/۲ اینچ رسیده و در مورد درختانی که برگ های آنها در زمستان می ریزد اغلب به کمتر از ۰/۰۸ اینچ می رسد. علفزار ها و درختچه ها نهایتاً می توانند ۰/۰۸ اینچ گیرش داشته باشند. جدول ۴-۱ به طور خلاصه تخمین اولیه ای برای حداکثر ذخیره چالابی پیشنهاد می کند [2,56]. برای یک خاک مشخص می توان یک محدوده تقریبی برای نرخ نفوذ حداکثر با استفاده از هدایت هیدرولیکی خاک به دست آورد. البته این رویه دامنه وسیعی از مقادیر را برای هدایت هیدرولیکی به دست می دهد. برای کوچک کردن این محدوده می توان نرخ نفوذ حداکثر را برابر با هدایت هیدرولیکی اشباع^۱ در نظر گرفت. هنگامی که آب نفوذ می کند مقدار نفوذ با نرخ اولیه ای شروع شده و سپس به تدریج از میزان آن کاسته می شود تا به یک میزان ثابت برسد. این مقدار برابر با هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می باشد [56].

جدول ۴-۱. تخمین مقادیر ذخیره چالابی

^۱ Saturated Hydraulic Conductivity

شرایط سطحی	ذخیره چالابی (اینچ)
نواحی پوشش دار و نفوذ ناپذیر	۰,۲۵ - ۰,۱۲۵
شیب تند تا متوسط	۰,۰۴
شیب ملایم و آرام	۰,۲۵ - ۰,۵۰
زمین هموار، زمین شخم زده و شیار دار	۲,۰

پارامترهای مدل SMA همواره بایستی به همراه داده های مشاهده ای در طی فرآیند کالیبراسیون تعیین گردند [2,56]. در طی این فرآیند تکراری، مقادیر منتخب فرض می گردد و مدل با این پارامترها به همراه داده های بارش و تبخیر و تعرق اجرا می گردد. سپس هیدروگراف محاسبه ای با هیدروگراف مشاهده ای در دوره مشابه مقایسه شده و اگر تطابق بین آنها در حد قابل قبول واقع نگردد، دوباره پارامترها تعدیل و تصحیح می گردد و کار بدین نوبه ادامه می یابد و فرآیند تکرار می گردد. Bennett (1998) راهنمایی هایی را جهت کالیبراسیون ارائه نموده است.

۴-۱-۲ مدل سازی رواناب مستقیم به کمک HEC-HMS [2]:

این بخش مدل تبدیل رواناب مستقیم حاصل از بارش مازاد را در یک حوضه به جریان سطحی تشریح می نماید. در این نرم افزار به این فرآیند تحت عنوان تبدیل^۱ بارش مازاد به رواناب نقطه ای اطلاق می گردد. مدل های مختلف تبدیل کننده بارش مازاد به رواناب سطحی شامل مدل هیدروگراف واحد (Unit Hydrograph Model)، مدل هیدروگراف واحد سفارشی (User-specified Unit Hydrograph Model)، مدل هیدروگراف واحد اشنايدر (Snyder's UH Model)، مدل هیدروگراف واحد SCS (SCS UH Model)، مدل هیدروگراف واحد کلارک (Clark's UH Model)، مدل کلارک اصلاح شده یا مودکلارک (ModClark Model) و مدل موج سینماتیک (Kinematic-wave Model) می باشند. در این تحقیق از بین روش های مختلف، مدل هیدروگراف واحد کلارک، به دلیل استفاده عمومی تر در حوضه های بزرگ و عملکرد قابل قبول آن برای تبدیل رواناب مورد استفاده می گیرد.

^۱ Transformation

مدل هیدروگراف واحد کلارک (Clark's UH Model):

کلارک، هیدروگراف واحد یک حوضه آبریز را با نشان دادن صریح دو فرآیند اصلی در تبدیل بارش مازاد به رواناب استخراج می نماید:

- انتقال^۱ یا حرکت بارش مازاد از محل منشا در سرتاسر مسیر زهکشی تا خروجی حوضه
- میرایی^۲ یا کاهش مقدار دبی به صورتیکه بارش مازاد در حوضه ذخیره می گردد [2].

مفاهیم اساسی و معادلات (Basic Concepts and Equations) [2,56]:

ذخیره کوتاه مدت آب در سرتاسر حوضه (در خاک، سطح زمین و کانال ها) نقش مهمی را در تبدیل بارش مازاد به رواناب ایفا می کند. مدل مخزن خطی نمایانگر تاثیرات این ذخیره می باشد. این مدل با معادله پیوستگی^۳ آغاز می گردد:

$$\frac{dS}{dt} = I_t - O_t \quad 9-4$$

که در آن $\frac{dS}{dt}$: تغییرات ذخیره نسبت به زمان، I_t : متوسط ورودی به ذخیره در زمان t و O_t : خروجی از ذخیره در زمان t می باشد. در مدل مخزن خطی، ذخیره در زمان t توسط رابطه زیر به دبی خروجی مرتبط می باشد:

$$S_t = RO_t \quad 10-4$$

که R ثابت مخزن خطی می باشد.

از ترکیب معادلات بالا و حل آنها توسط تقریب تفاضل محدود به دست می آید:

$$O_t = C_A I_t + C_B O_{t-1} \quad 11-4$$

^۱ Transformation

^۲ Attenuation

^۳ Continuity Equation

که C_A و C_B ضرایب روندیابی می باشند و از روابط زیر محاسبه می گردند:

$$C_A = \frac{\Delta t}{R + 0.5\Delta t} \quad ۱۲-۴$$

$$C_B = 1 - C_A \quad ۱۳-۴$$

متوسط خروجی در بازه زمانی t برابر است با:

$$\bar{O}_t = \frac{O_{t-1} + O_t}{2} \quad ۱۴-۴$$

در مدل کلارک، مدل مخزن خطی تاثیرات مجموع کل ذخیره حوضه را نشان می دهد. بنابراین به طور مفهومی، مخزن را می توان در خروجی حوضه در نظر گرفت. با حل معادلات ۴-۱۱ و ۴-۱۴، جریان ورودی تعریف شده و مقدار متوسط جریان خروجی (\bar{O}) حاصل می گردد. به هر حال اگر محورهای جریان ورودی در معادله ۴-۱۱ برابر با رواناب به ازای یک واحد بارش مازاد باشد، در حقیقت محورهای این جریان خروجی مخزن برابر با هیدروگراف واحد (UH) خواهد بود.

۳-۱-۴ مدل سازی جریان پایه به کمک HEC-HMS [2,56]:

در هیدروگراف های جریان سطحی دو مولفه کاملاً مجزا قابل تمایز می باشد:

- رواناب مستقیم ناشی از بارش
- جریان پایه

جریان پایه، جریان پایدار یا جریان در هوای صاف^۱ ناشی از بارش های پیشین که موقتاً در حوضه نگه داشته شده است به اضافه رواناب زیر سطحی تأخیری از بارش کنونی می باشد. مدل های به کار رفته جهت محاسبه دبی پایه در HEC-HMS عبارتند از:

- مدل تغییرات ثابت ماهانه (Constant, monthly-varying value)
- مدل فروکش نمایی (Exponential recession model)

^۱ Fair weather

- مدل محاسبه کننده حجم مخزن خطی (Linear-reservoir volume)

برای انتخاب مدل دبی پایه در کنار مدل محاسبه تلفات SMA تاکید شده است که از مدل مخزن خطی استفاده گردد که در بخش بعدی به توضیح این مدل پرداخته می شود [2,56].

مدل مخزن خطی [2]:

مدل جریان پایه مخزن خطی به همراه مدل پیوسته SMA استفاده می گردد. این مدل ذخیره و حرکت جریان زیر سطحی را همانند ذخیره و انتقال آب در مخازن شبیه سازی می نماید. مخازن خطی هستند و جریان خروجی در هر گام زمانی یک تابع خطی از متوسط ذخیره در آن گام زمانی است. به لحاظ ریاضی، این روش همانند عملکرد روش هیدروگراف واحد کلارک، رواناب حوضه را نشان می دهد. خروجی از نخستین لایه آب زیر زمینی در SMA برابر با جریان ورودی به مخزن خطی می باشد و جریان خروجی از لایه دوم آب زیر زمینی در SMA به عنوان جریان ورودی به مخزن خطی دوم در نظر گرفته می گردد. جریان خروجی از هر دو مخزن خطی با یکدیگر ترکیب می شود تا میزان کل جریان پایه برای حوضه محاسبه گردد. بهترین تخمین از پارامترهای مدل مخزن خطی به همراه مدل SMA در طی فرآیند کالیبراسیون حاصل می گردد [2].

۴-۱-۴ مدل سازی جریان در کانال ها با HEC-HMS [2,57]:

این بخش به معرفی مدل های موجود در HEC-HMS برای مدل سازی جریان در کانال ها که به نام مدل های روندیابی^۱ شناخته می شوند می پردازد. مدل های روندیابی HEC-HMS شامل مدل تأخیر (Lag)، ماسکینگام (Muskingum)، پالس اصلاح شده (Modified Puls)، موج سینماتیک (Kinematic-wave) و ماسکینگام-کانژ (Muskingum Cunge) می باشند. هر یک از این مدل ها هیدروگراف پایین دست را با داشتن هیدروگراف بالا دست به عنوان شرط مرزی محاسبه می نمایند. مدل های روندیابی موجود در HEC-HMS برای غالب موارد مناسب می باشد ولی باید متذکر شد که برای تمامی اهداف

^۱ Routing Models

مطالعات رواناب و سیلاب قابل کاربرد نیست و برای انتخاب مدل مناسب تر در موارد خاص بایستی به مراجع کامل تر و تخصصی مراجعه نمود.

۱-۴-۱-۴ مفاهیم اساسی و معادلات مدل ماسکینگام:

مدل روندیابی ماسکینگام همانند مدل پالس اصلاح شده (Modified Puls) از یک تقریب ساده تفاضل محدود رابطه پیوستگی استفاده می نماید:

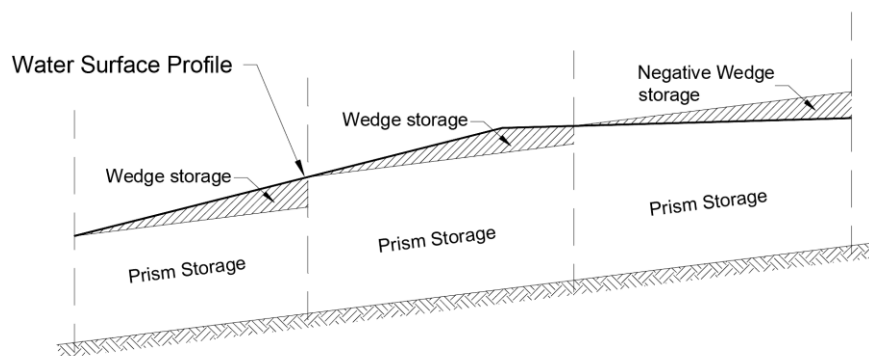
$$\left(\frac{I_{t-1}+I_t}{2}\right) - \left(\frac{O_{t-1}+O_t}{2}\right) = \left(\frac{S_t-S_{t-1}}{\Delta t}\right) \quad ۱۵-۴$$

ذخیره در یک بازه برابر با مجموع ذخیره منشوری و گوه ای^۱ می باشد. همانطور که در شکل ۴-۴ نشان داده شده است، ذخیره منشوری برابر با حجم تعیین شده توسط نیمرخ سطح آب جریان پایدار می باشد در حالیکه ذخیره گوه ای برابر با حجم اضافی در زیر نیمرخ امواج سیلاب می باشد. در طی افزایش سیلاب میزان ذخیره گوه ای مثبت شده و به ذخیره منشوری اضافه می گردد. در دوره های افت و کاهش سیلاب، ذخیره گوه ای منفی بوده و از ذخیره منشوری کاسته می گردد. حجم ذخیره منشوری برابر با حاصلضرب نرخ جریان خروجی (O) در زمان عبور از بازه (K) می باشد. حجم ذخیره گوه ای برابر با اختلاف وزنی بین جریان ورودی و خروجی ضربدر زمان عبور (K) می باشد. بنابراین ذخیره در مدل ماسکینگام به صورت زیر تعریف می گردد:

$$S_t = KO_t + KX(I_t - O_t) = K[XI_t + (1 - X)O_t] \quad ۱۶-۴$$

که K زمان عبور موج سیلاب از بازه روندیابی و X وزن بدون بعد ($0 \leq X \leq 0.5$) می باشد. کمیت $XI_t + (1 - X)O_t$ دبی وزن دهی شده می باشد.

^۱ Prism storage and Wedge storage



شکل ۴-۴. ذخیره گوه ای (From Linsley *et al.*, 1982) [58].

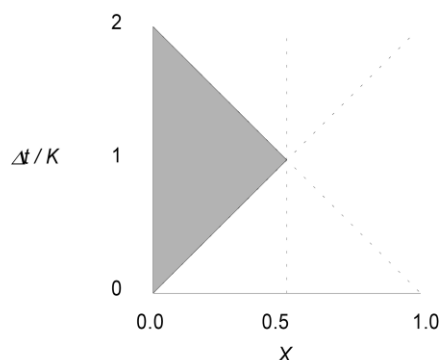
اگر ذخیره کانال توسط شرایط پایین دست کنترل می گردد به طوری که جریان خروجی و ذخیره تطابق بسیار زیاد با یکدیگر دارند در این حالت $X = 0$ می باشد. در این مورد رابطه ۴-۱۶ برای $S = KO$ دوباره حل شده و این همان مدل مخزن خطی است. اگر $X = 0.5$ باشد، وزنی برابر به جریان ورودی و خروجی داده شده و در نتیجه یک موج پیش رونده یکنواخت بدون میرایی در طول بازه حرکت خواهد کرد. اگر رابطه ۴-۱۵ و ۴-۱۶ با هم ترکیب گردد و حاصل برای جدا نمودن مقادیر ناشناخته در زمان t دوباره مرتب گردد، خواهیم داشت:

$$O_t = \left(\frac{\Delta t - 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \right) I_t + \left(\frac{\Delta t + 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \right) I_{t-1} + \left(\frac{2K(1-X) - \Delta t}{2K(1-X) + \Delta t} \right) O_{t-1} \quad ۱۷-۴$$

HEC-HMS رابطه ۴-۱۷ را به صورت بازگشتی برای محاسبه مقادیر هیدروگراف خروجی با استفاده از مقادیر داده شده هیدروگراف جریان ورودی (I_t برای تمام t)، یک شرط اولیه ($O_{t=0}$) و پارامترهای X و K حل می کند.

۲-۴-۱-۴ تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام [2]:

همانطور که قبلاً ذکر گردید محدوده مجاز پارامتر X بین صفر تا ۰/۵ می باشد. همچنین محدودیت های دیگری در انتخاب مقادیر پارامترهای X و K اعمال می گردد. پارامترهای بهینه K و X بایستی به گونه ای انتخاب گردد که ترکیب آنها در بخش سایه دار شکل ۴-۵ قرار گیرد.



شکل ۴-۵. ناحیه قابل قبول پارامترهای مدل ماسکینگام [2].

اگر هیدروگراف جریان مشاهده ای ورودی و خروجی در دسترس باشد مقدار پارامتر K را می توان به صورت فاصله زمانی بین دو نقطه مشابه در هیدروگراف جریان ورودی و خروجی تعیین نمود. به عنوان مثال K را می توان به صورت زمان تأخیر بین مرکز سطحی دو هیدروگراف، فاصله بین اوج های هیدروگراف ها و یا فاصله زمانی بین نقاط وسطی شاخه های صعودی در نظر گرفت. هنگامی که مقدار K تخمین زده شد می توان مقدار X را توسط آزمون و خطا بدست آورد. البته قابل ذکر است که هر دو مقدار پارامترهای K و X را می توان با روش های آزمون و خطا برآورد نمود.

۲-۴ مدل های فازی:

واژه فازی^۱ در فرهنگ لغت آکسفورد به معنای "مبهم، گنگ، نادقیق، مغشوش، درهم و نامشخص" تعریف شده است. تئوری مجموعه های فازی که در سال ۱۹۶۵ توسط پروفیسور عسکر زاده معرفی گردید امروزه به ابزاری توانمند و انعطاف پذیر برای مدل سازی عدم قطعیت ها و عدم صراحت های موجود در دنیای واقعی و بیان عبارت های زبانی بر گرفته از تجربه و دانش بشر در قالب روابط ریاضی تبدیل شده است [51].

۱-۲-۴ تفاوت مجموعه های فازی و کلاسیک:

^۱ Fuzzy

مجموعه های کلاسیک دارای مرز دقیق و صریح^۱ بوده و در نتیجه هر المان یا به یک مجموعه تعلق دارد (گزاره صحیح، عدد یک) و یا ندارد (عدد صفر). در مقابل، مجموعه های فازی دارای مرز های مبهم^۲ می باشند و انتقال از تعلق کامل به یک مجموعه تا عدم تعلق به آن مجموعه به صورت تدریجی شکل می گیرد [59]. سیستم های استنتاج فازی فضای ورودی از متغیر ها را به فضای خروجی نگاشت می دهد. مکانیزم اولیه برای انجام این کار استفاده از مجموعه قوانین فازی^۳ و یا همان عبارات ساده "اگر-آنگاه"^۴ می باشد. قوانین فازی یا عبارات شرطی فازی، عباراتی در فرم اگر A آنگاه B هستند که در آن A و B نشان دهنده مجموعه های فازی هستند که توسط توابع عضویت^۵ مناسب توصیف می گردند [60]. توابع عضویت معرفی کننده میزان درجه عضویت المان های مختلف را به یک مجموعه فازی نشان می دهند و طبیعی است که مقداری در محدوده صفر تا یک را اختیار نمایند.

۲-۲-۴ مدل فازی ALM:

روش مدل سازی انسان بسیار مقاوم و پایدار است بنابراین بایستی این روش برای انجام مدل سازی در این زمینه سودمند واقع گردد. دلایلی وجود دارد که نشان می دهد که مدل سازی به روش انسان به صورت کمی و با مفاهیم غیردقیق در مغز انجام می پذیرد [61]. بنابراین بایستی انتظار داشت که هرگونه کوششی در جهت مدل سازی با استفاده از بیانهای دقیق (مثل ریاضیات) با ساختار مدل سازی توسط انسان متفاوت باشد. به عبارت دیگر استفاده از ریاضیات دقیق در مدل سازی ها با توانمندیهای طبیعی انسان در تناقض می باشد [62]. مفاهیم فازی و استنتاجات مرتبط با آن مثل (Zadeh (1965) و Mamdani (1974) یک نگرش جدید به روش مدل سازی و محاسبه انسان باز نمودند.

^۱ Crisp

^۲ Ambiguous

^۳ Fuzzy rules

^۴ If-Then

^۵ Membership Functions

اگرچه روشهای مدل سازی قدرتمند مختلفی با استفاده از این روشهای فازی توسعه داده شده و بکار برده شده اند (مثل Sugeno and Yasukawa, 1994; Tanaka and Sano, 1994; Otsubo and Hayashi, 1996; Takagi and Sugeno, 1994; Sugeno and Yasukawa, 1993). اما بنظر می رسد که به خاطر محاسبات دقیق و ریاضی موجود در آنها، ساختار آنها با روش حقیقی یادگیری و مدل سازی توسط انسان متفاوت باشد [62]. البته ساختار روش مدل سازی انسان شبیه روش های مذکور است اما از پیچیدگیهای ریاضی اجتناب می کند. (Bagheri Shouraki and Honda (1997a) یک روش مدل سازی فازی جدیدی را ابداع کردند که نه تنها از ریاضیات بسیار مقدماتی استفاده می نماید بلکه می تواند توسط شبکه عصبی بیولوژیکی نیز پیاده سازی شود. این روش جدید، روش یادگیری فعال (ALM) نامیده شد. این روش جدید دارای الگوریتم ساده ای است که از پیچیدگی های ریاضی اجتناب کرده و دقت آن با افزایش تعداد تکرار فرایند ALM به طور نامحدود افزایش می یابد. (Bagheri Shouraki and Honda (1997b) نشان دادند که ALM یک تخمین گر عمومی است. تاکنون تحقیقات زیادی روی ALM و کاربرد آن در زمینه های مختلف علوم و مهندسی انجام شده است [50,63,3,10,64,65,66,67] (مثل Bagheri Shouraki & Honda, 1998, 1999a; Bagheri Shouraki et al., 1998; Lotfi & Bagheri Shouraki, 2004; Murakami et al., 2003; Shahdi & Bagheri Shouraki, 2003; Murakami & Honda, 2004; Taheri Shahraini, 2006). طاهری شهر آئینی (۱۳۸۶) یک روش جستجوی ابتکاری^۱ جدید را برای روش ALM توسعه داده و متناسب با روش جستجوی توسعه یافته یک روش مدل سازی فازی جدید توسعه داده و بدین ترتیب شکل جدیدی از مدل های ALM را ارائه نموده است و از این مدل جهت پردازش تصاویر ماهواره ای استفاده نمود [50]. با توجه به سابقه توضیح داده شده تحقیق در مورد بارش-رواناب، روش ALM توسعه داده شده توسط طاهری شهر آئینی (۱۳۸۶) تاکنون جهت پیش بینی رواناب مورد ارزیابی قرار نگرفته است و برای اولین بار در این تحقیق جهت تخمین رواناب کارون III استفاده خواهد شد.

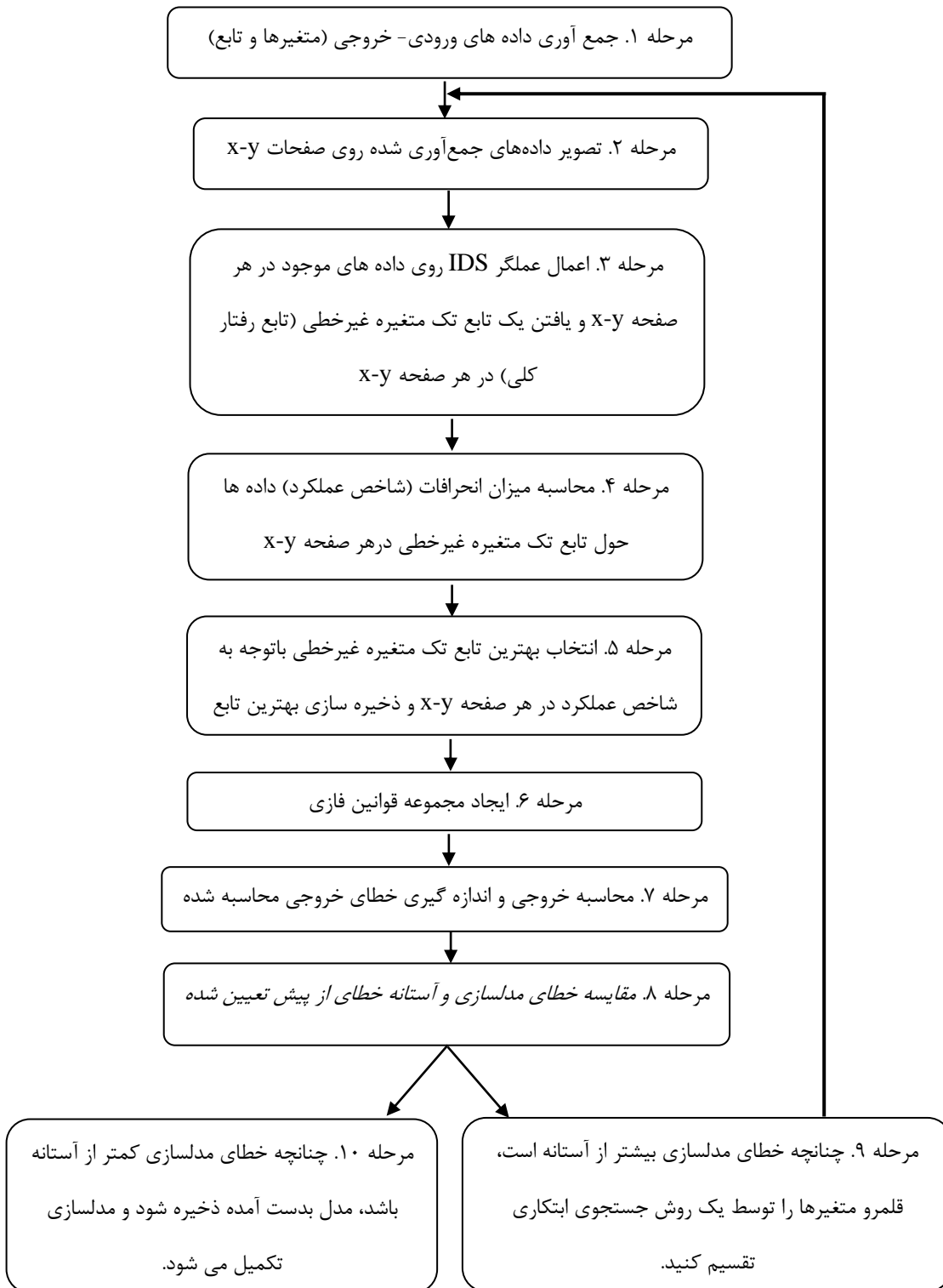
۴-۲-۱-۲-۱ الگوریتم ALM [50]:

^۱ Heuristic Search Method

در این بخش، جزئیات روش ALM توضیح داده می‌شود. الگوریتم ALM در شکل ۴-۶ ارائه شده است. به منظور بهتر مشخص شدن مراحل الگوریتم ALM، یک مسئله ساختگی کوچک در نظر گرفته می‌شود که دارای دو متغیر است و این مسئله در هر مرحله از الگوریتم حل می‌شود. در نظر بگیرید که مسئله ساختگی دارای دو متغیر x_1 و x_2 به عنوان ورودی و یک تابع به عنوان خروجی (y) می‌باشد.

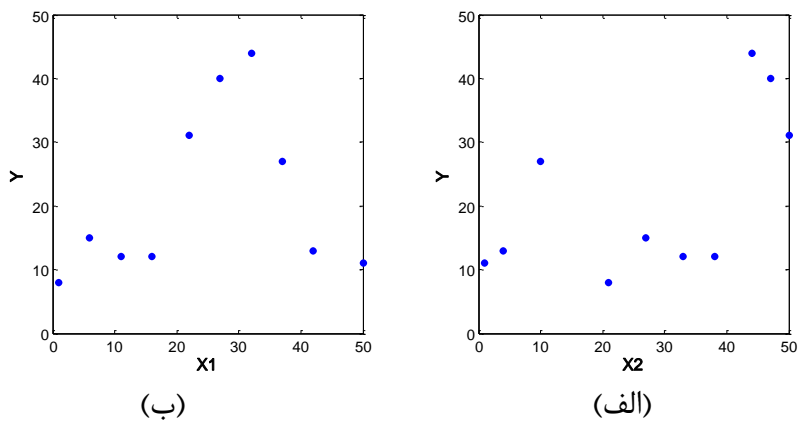
مرحله ۱- الگوریتم مربوط به جمع آوری داده از سیستم مورد نظر است.

مرحله ۲- در این مرحله داده‌های جمع آوری شده روی صفحات $x-y$ تصویر می‌شوند. شکل ۴-۷ داده‌های تصویر شده روی صفحات x_1-y و x_2-y را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۶. الگوریتم پیشنهادی برای ALM [50].

مرحله ۳- قلب محاسبات ALM یک درونیاب فازی است که روش پخش قطره جوهر^۱ IDS نامیده می شود. IDS به طور فازی به دنبال یک مسیر پیوسته ممکن روی داده های درونیابی شده در هر صفحه می گردد [11,50,62]. در IDS، هر داده روی هر صفحه x-y به صورت یک منبع نور در نظر گرفته می شود که الگوی انتشار نور آن به صورت مخروط یا هرم می باشد و با افزایش فاصله از نقطه (منبع) میزان نور کاهش می یابد تا اینکه نهایتاً به صفر می رسد. شعاع قاعده مخروط الگوی نوردهی^۲ بستگی به موقعیت نقاط در صفحه x-y دارد. شعاع قاعده مخروط الگوی نوردهی آنقدر زیاد در نظر گرفته می شود که تمامی قلمرو متغیر، نوردهی شود. شکل ۴-۸ الف الگوی نوردهی مخروطی شکل یک نقطه در صفحه x₁-y را نشان می دهد و شکل های ۴-۸ ب و ۴-۸ ج نتایج نهایی نوردهی با استفاده از یک الگوی نوردهی مخروطی شکل را در صفحات x₁-y و x₂-y نشان می دهد.



شکل ۴-۷. (الف) داده های تصویر شده روی صفحه x₁-y، (ب) داده های تصویر شده روی صفحه x₂-y [50]

همانطور که در این شکلها می بینید روشنایی ایجاد شده در بعضی از مناطق مربوط به ترکیب الگوی نوردهی نقاط مختلف در صفحات x₁-y و x₂-y می باشد. مقایر نشان داده شده در شکل های ۴-۸ ب و ۴-۸ ج مقادیر نوردهی شده (IL) می باشند. اکنون با محاسبه مرکز ثقل روی جهت y در شکل های

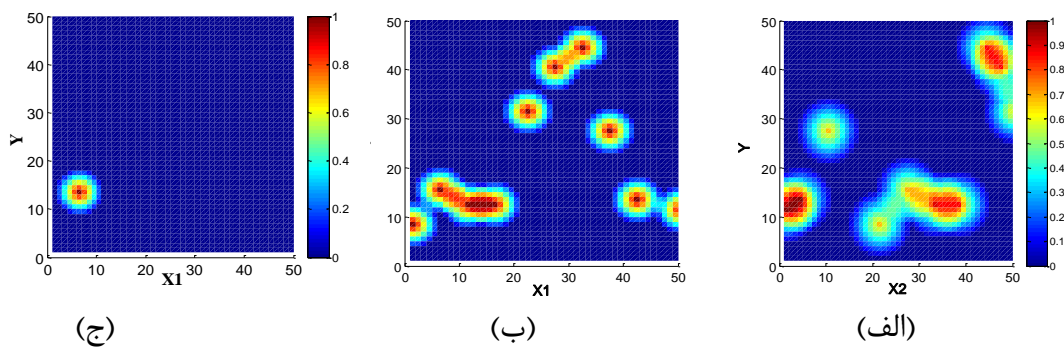
۱ . Ink Drop Spread

۲ . Illumination Pattern

۸-۴ ب و ۸-۴ ج، می توان مسیره‌ها یا رفتارهای کلی^۱ یا توابع غیرخطی تک متغیره غیرصریح^۲ را تولید نمود. مرکز ثقل مذکور با استفاده از معادله ۱۸-۴ محاسبه می شود.

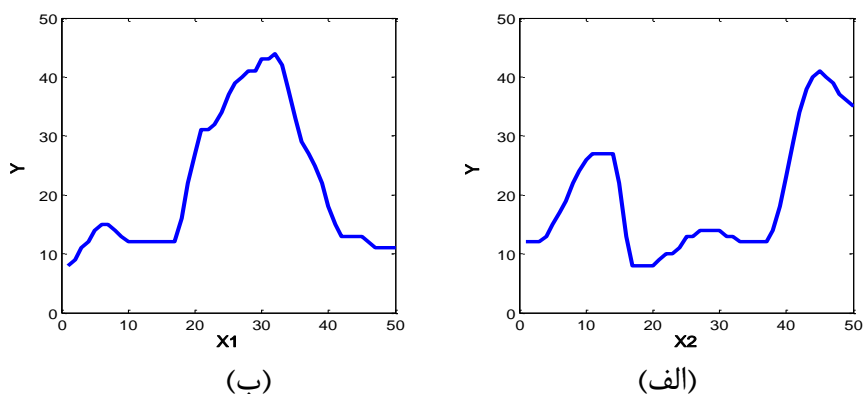
$$Y(x_i) = \frac{\sum_{j=1}^m (y_{ij} \times IL(x_i, y_j))}{\sum_{j=1}^m IL(x_i, y_j)} \quad 18-4$$

که $j = 1 \dots m$ ، قدرت تفکیک جهت y ، x_i نشانگر i امین موقعیت در روی محور x ، y_{ij} مقدار خروجی موقعیت j ام روی محور y و موقعیت i ام روی محور x می باشد. $IL(x_i, y_j)$ مقدار نوردهی شده روی صفحه $(x-y)$ در نقطه (x_i, y_j) و $Y(x_i)$ مقدار تابع مورد نظر متناظر با نقطه x_i می باشد. شکل ۹-۴ مسیره‌های ایجاد شده توسط IDS برای صفحات x_1-y و x_2-y می باشند.



شکل ۸-۴. الف) نتایج اعمال IDS روی یک نقطه در صفحه x_1-y ، ب) نتایج اعمال IDS روی تمامی نقاط موجود در

صفحه x_1-y ، ج) نتایج اعمال IDS روی تمامی نقاط موجود در صفحه x_2-y [50].



شکل ۹-۴. الف) مسیر استخراج شده از شکل ۸-۴ ب، ب) مسیر استخراج شده از شکل ۸-۴ ج [50].

۱ . General Behavior

۲ . Non-Linear Implicit One-Variable Function

در مرحله بعدی (مرحله چهارم) میزان انحراف یا عملکرد مسیر روی هر صفحه x_i-y محاسبه می شود. این عملکرد یا انحراف نشانگر میزان دوری یا نزدیکی نقاط در هر صفحه را به مسیر محاسبه شده در آن صفحه نشان می دهد. معیارهای مختلفی برای محاسبه این عملکرد مانند میانگین درصد خطای مطلق، مجذور ضریب همبستگی، اریبی و مجذور میانگین مربعات خطا وجود دارد. مقدار MPAE و دیگر معیارها توسط مقایسه بین داده های حقیقی (اندازه گیری شده) (شکل ۴-۷) و داده های مدل شده توسط مسیرهای استخراج شده (شکل ۴-۹) محاسبه می شوند. در این مسئله ساختگی، مقادیر MPAE مسیرهای روی صفحات x_1-y و x_2-y به ترتیب $\frac{2}{3}$ و $\frac{1}{0}$ می باشند.

در مرحله پنجم، با توجه به مقادیر MPAE، x_1 به عنوان بهترین یا مؤثرترین ورودی یا متغیر در نظر گرفته می شود. بنابراین مسیر روی صفحه x_1-y بایستی به صورت یک جدول مراجعه ای^۱، یک شبکه Hetero-associative (Fausset, 1994) یا روشهای تطبیق منحنی^۲ به صورت فازی (Takagi and Sugeno, 1985) ذخیره شود [68,8].

در مرحله ششم، مجموعه قوانین فازی ایجاد می شوند. اما در اولین تکرار الگوریتم ALM فقط یک قانون وجود دارد که آن قانون 'y=f(x₁)' می باشد. مسیر ذخیره شده در مرحله پنجم (شکل ۴-۹ الف) می باشد.

در مرحله هفتم، خطای مدل سازی توسط قوانین فازی محاسبه می شود.

در مرحله هشتم، خطای مدل سازی با میزان آستانه از پیش تعریف شده مقایسه شده و نتایج این قیاس نشان می دهد که فرآیند مدل سازی بایستی ادامه یابد (مرحله نهم) یا متوقف شود (مرحله دهم).

۱ . Look-up Table

۲ . Curve Fitting

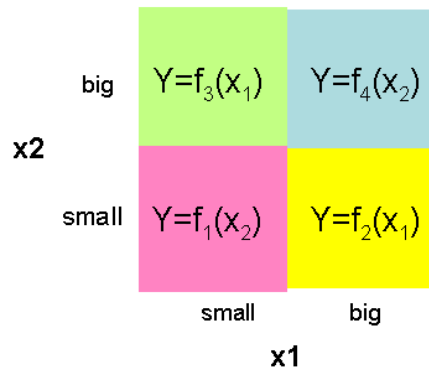
فرض کنید که مدل سازی از طریق مرحله نهم ادامه می یابد. در مرحله نهم، قلمرو یک یا تعدادی از متغیرها با استفاده از یک روش جستجوی ابتکاری تقسیم می شود. تقسیم بندی می تواند بصورت قطعی^۱ یا فازی^۲ انجام شود. فرض کنید که تقسیم بندی با استفاده از یک روش جستجوی ابتکاری بطور قطعی انجام شود و فضای متغیرها به چهار زیر فضای مختلف تقسیم شود (شکل ۴-۱۰). اکنون تمامی فرآیندها از مرحله دوم به بعد برای هر کدام از زیرفضاها تکرار می شود و سپس بهترین مسیر برای هر زیرفضا تعیین می شود. با توجه به شکل ۴-۱۰، قوانین فازی ایجاد شده پس از تقسیم فضای متغیرها به روش قطعی به چهار زیرفضای مختلف، به صورت زیر می باشند:

If (x_1 is small & x_2 is small) then $y=f_1(x_2)$

If (x_1 is big & x_2 is small) then $y=f_2(x_1)$

If (x_1 is small & x_2 is big) then $y=f_3(x_1)$

If (x_1 is big & x_2 is big) then $y=f_4(x_2)$



شکل ۴-۱۰. فضای متغیرهای تقسیم شده به چهار زیرفضا، به همراه بهترین توابع غیر خطی متناظر [50].

که f_1 تا f_4 مسیرهای استخراج شده برای زیرفضاهای مختلف در فضای متغیرها می باشند (شکل ۴-۱۰). این قوانین فازی نشان می دهند که بایستی برای هر زیرفضا بهترین مسیر تعیین شود و همچنین تعداد مسیرها با تعداد قوانین یا تعداد بخشهای فضای متغیرهای تقسیم شده یکسان است. به عبارت دیگر هر زیرفضا در فضای متغیرها معادل یک مسئله کامل در اولین تکرار الگوریتم می

۱ . Crisp

۲ . Fuzzy

باشد. این تکرارها و تقسیم فضای متغیرها آنقدر ادامه می یابد تا خطای مدل بدست آمده از آستانه خطای از پیش تعیین شده کمتر شود. سپس فرآیند مدل سازی متوقف می شود (مرحله دهم).

۴-۲-۲- روش جستجوی ابتکاری جدید [50]:

در این تحقیق، مسئله تقسیم بندی فضای متغیرها یک مسئله ترکیبیاتی^۱ است که یک راه حل تئوری برای آن وجود ندارد. به همین خاطر بایستی از یک روش جستجوی ابتکاری بدین منظور استفاده نمود [8]. تعریف جستجوی ابتکاری از حدود دو دهه قبل ظاهر شده است. جستجوی ابتکاری یک جستجوی هدایت شده است که به وفور از آن استفاده می شود و در بیشتر موارد می تواند جوابهای رضایت بخشی را بدست آورد اما تضمین نمی کند که راه حل بهینه را می یابد [69]. در این بخش یک روش جستجوی ابتکاری جدید که برای مسئله استخراج پارامترهای کیفی آب به کمک تکنیک های سنجش از دور توسط طاهری شهرآئینی (۱۳۸۶) توسعه داده شده است مورد استفاده قرار گرفته است.

فرض کنید که یک سیستم با K متغیر (ورودی) (x_1, x_2, \dots, x_K) و یک تابع (خروجی) وجود دارد. الگوریتم تقسیم بندی در این مسئله با استفاده از این روش جستجوی ابتکاری در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است.

مرحله اول: مرحله اول الگوریتم همان مدل سازی های انجام شده از مرحله یکم تا نهم برای الگوریتم ALM است که در بخش قبلی توضیح داده شد. فرض کنید $f_1(x_i)$ بهترین مسیر استخراج شده برای مدل سازی است و مقدار خطای مدل سازی بیشتر از مقدار آستانه از پیش تعریف شده است. بنابراین فضای متغیرها بایستی تقسیم شود.

مرحله دوم: محدوده x_1 به دو قسمت تقسیم می شود (کوچک و بزرگ) اما متغیرهای دیگر تقسیم نمی شوند. شبیه مرحله اول، بهترین مسیر برای هر قسمت از محدوده x_1 یافت خواهد شد. فرض کنید

۱ . Combinatorial

این مسیره‌ها $f_{11}(x_j)$ و $f_{11}(x_m)$ هستند. بدین ترتیب قوانین بدست آمده از مدل سازی بصورت زیر می باشند.

If (x_1 is small) then $y=f_{11}(x_j)$

If (x_1 is big) then $y=f_{11}(x_m)$

بدین ترتیب می توانیم خطای مدل سازی با استفاده از قوانین فوق را محاسبه کنیم. این خطا e_{11} نامیده می شود که نشانگر خطای مدل سازی است. به شرط آنکه x_1 در اولین مرحله از تقسیم بندی فضای متغیرها تقسیم شود. بطور مشابهی محدوده x_2 تقسیم می شود و خطای مدل سازی (e_{12}) محاسبه می شود. این الگوریتم روی تمامی متغیرها اعمال می شود. که نهایتاً K خطای مختلف ($e_{11}, e_{12}, \dots, e_{1K}$) بدست می آید.

متغیر متناظر با کمترین خطا، بهترین متغیر برای تقسیم بندی است. فرض کنید e_{1s} کمینه است. بنابراین x_s برای تقسیم بندی انتخاب می شود. تقسیم بندی x_s یک حالت پایدار در نظر گرفته می شود زیرا کمترین خطای مدل سازی را ایجاد می نماید. چنانچه باز هم خطای مدل سازی بیشتر از آستانه خطای از پیش تعریف شده باشد تقسیم بندی از حالت پایدار قبلی ادامه می یابد.

مرحله سوم: x_s برای تقسیم بندی انتخاب شده و محدود x_s به دو قسمت تقسیم می شود (کوچک و بزرگ). سپس ترکیبات مختلف $x_s - x_j$ ($j=1,2,\dots,k$) برای هر قسمت از x_s (کوچک و x_s بزرگ)، محدوده تغییرات x_j را به دو قسمت (بزرگ و کوچک) تقسیم کنید. بنابراین تعداد ترکیبات مختلف ایجاد شده برابر $2K$ است (K ترکیبات مختلف از $x_{s(\text{small})} - x_j$ و K ترکیب مختلف از $x_{s(\text{big})} - x_j$). توجه کنید که هر ترکیب از دو قسمت مختلف تشکیل شده است. به عنوان مثال ترکیب $x_{s(\text{big})} - x_j$ نشان می دهد که زمانیکه x_s دارای مقادیر بزرگ است، محدوده تغییرات x_j به دو قسمت مختلف (کوچک و بزرگ) تقسیم می شوند. شبیه به مراحل قبلی، الگوریتم ALM روی هر قسمت اعمال می شود و کوچکترین مقدار خطای مدل سازی برای هر K ترکیب مختلف (e'_{2n} و e_{2m}) محاسبه می شود. کمترین

خطا در هر K ترکیب، نشانگر یک حالت پایدار در این روش است و بدین ترتیب قوانین فازی ایجاد شده به شکل زیر است:

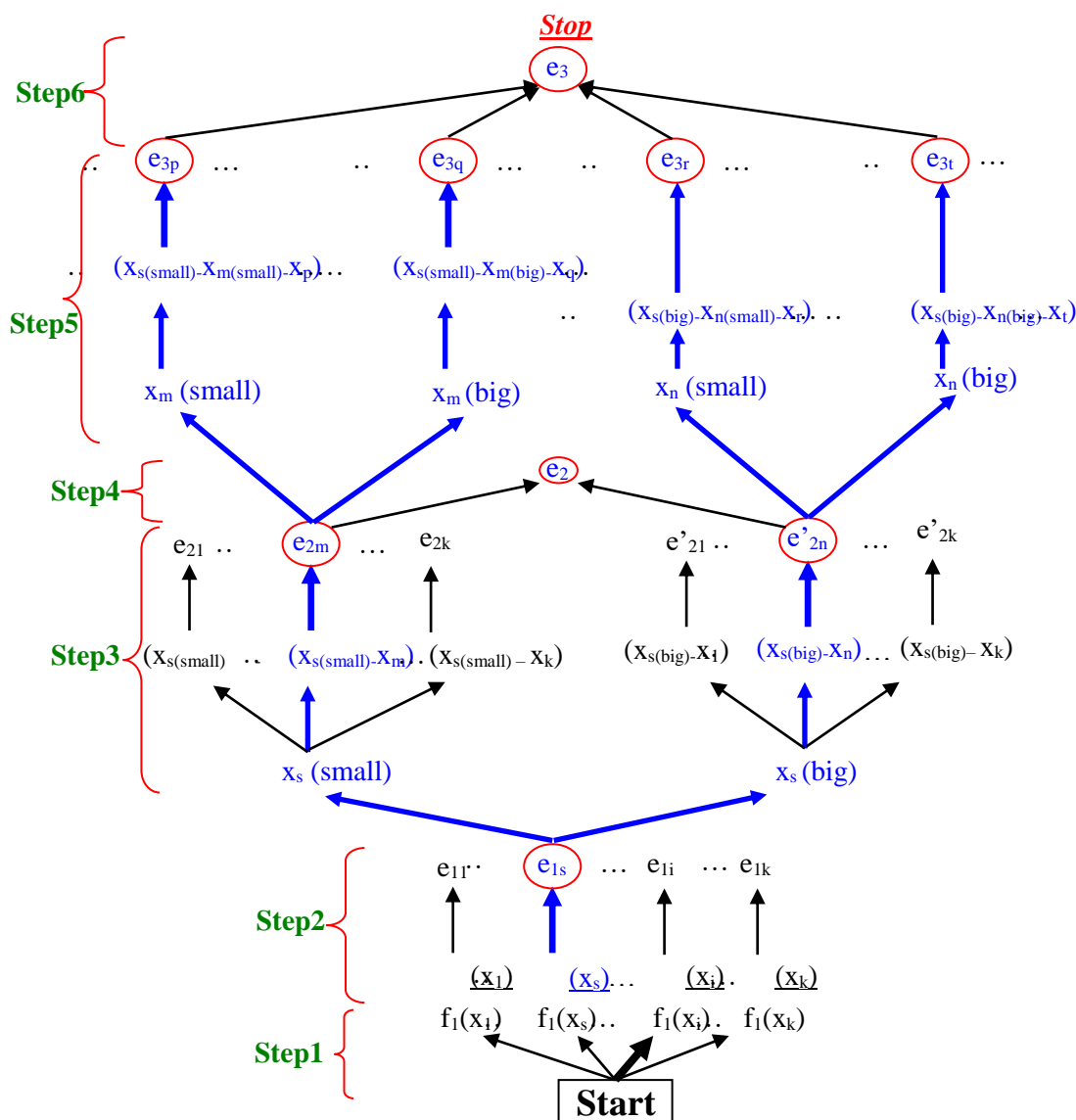
If (x_s is small & x_m is small) then ...

If (x_s is small & x_m is big) then ...

If (x_s is big & x_n is small) then ...

If (x_s is big & x_n is big) then ...

مرحله چهارم: e_{2m} و e'_{2n} خطاهای بهینه محلی هستند. خطای کلی مدل سازی (e_2) می تواند به کمک ترکیب خطاهای بهینه محلی (e_{2m} و e'_{2n}) محاسبه شود. چنانچه بازهم خطای کلی (e_2) از آستانه خطای از پیش تعیین شده بیشتر باشد الگوریتم تقسیم فضای متغیرها ادامه می یابد. مراحل پنجم و ششم نشان داده شده در شکل ۴-۱۱ بیانگر مرحله بعدی تقسیم بندی می باشند.



شکل ۴-۱۱. الگوریتم نگرش جدید روش جستجوی ابتکاری برای تقسیم فضای متغیرها [50].

این روش جستجوی ابتکاری خطای کلی مدل سازی را با کاهش خطاهای محلی انجام می دهد و از معیار بسیار مناسبی برای انتخاب بهترین متغیر برای تقسیم بندی استفاده می نماید. همچنین تعداد داده های موجود در هرکدام از زیرفضاها برابر است. این روش جستجوی ابتکاری جدید دارای محدودیتهای موجود در دیگر روشهای جستجوی ابتکاری (Takagi and Sugeno, 1985) نمی باشد. اگرچه روشهای فازی سازی متعارف نمی توانند از این روش جستجوی ابتکاری استفاده نمایند اما یک روش فازی سازی و مدل سازی فازی ساده توسعه داده توسط طاهری شهراآینی (۱۳۸۶) در بخش ۴-۲-۲-۳ ارائه شده است که با این روش جستجوی ابتکاری سازگار می باشد.

۴-۲-۳-۳ تقسیم بندی فازی و مدل سازی فازی برای ALM [50]:

اگرچه ALM قابلیت استفاده در تقسیم بندیهای قطعی و فازی را داراست اما تقسیم بندی فازی دارای مزایایی است که می تواند باعث بهبود عملکرد نتایج ALM شود. این مزایا شامل موارد زیر می باشند:

1- ارضای شرط پیوستگی

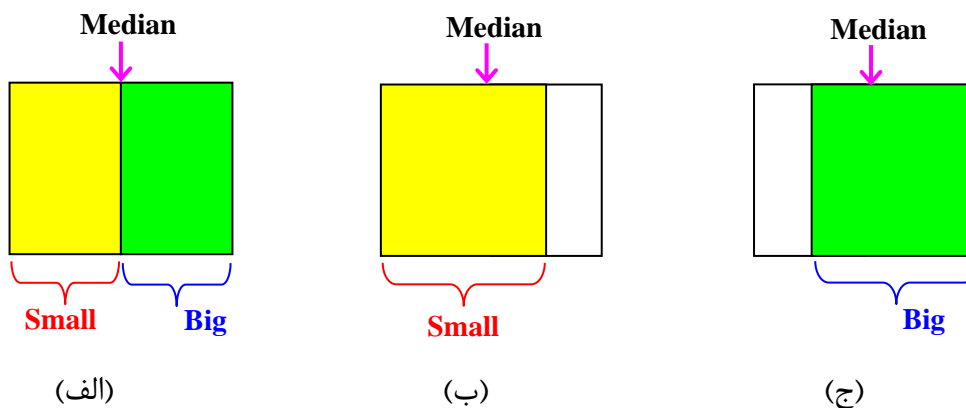
2- استخراج بهتر دانش از سیستم های چند متغیره غیرخطی

3- افزایش مقاومت نسبت به نویز در ALM

در قسمت های بعدی این بخش، روش تقسیم بندی فازی استفاده شده در این تحقیق توضیح داده شده و همچنین یک روش مدل سازی فازی جدید توسعه داده توسط طاهری شهرآئینی (۱۳۸۶) ارائه می شود.

۴-۲-۳-۴ تقسیم بندی فازی:

تقسیم بندی فازی بسیار شبیه تقسیم بندی به روش قطعی است. در تقسیم بندی قطعی مرز تقسیم محدوده تغییرات متغیر، میانه متغیر است (شکل ۴-۱۲ الف) درحالیکه در تقسیم بندی فازی، مرز قسمت مقادیر کوچک متغیر، مقداری بزرگتر از میانه (شکل ۴-۱۲ ب) و مرز قسمت مقادیر بزرگ متغیر، مقداری کوچکتر از میانه (شکل ۴-۱۲ ج) می باشد. بنابراین نواحی مربوط به مقادیر کوچک و بزرگ متغیر با هم همپوشانی دارند. اگرچه نقاط بهینه برای تقسیم بندی فازی می توانند بطور تکراری محاسبه شوند اما سیستمهای فازی به نقاط تقسیم حساسیت زیادی ندارند. مدل سازیهای انجام شده با نقاط تقسیم فازی مختلف نشان داد که در مدل سازی ALM، نقاط مناسب برای تقسیم بندی فازی به ترتیب اولین و سومین چارک داده ها برای مقادیر بزرگ و کوچک متغیر می باشند که مشابه این مطلب توسط Bagheri Shouraki and Honda (1999b) و همچنین Taheri Shahraini *et al.*, (2009) نیز اشاره شده است [62,70].



شکل ۴-۱۲. نمای شماتیکی از روشهای تقسیم بندی فضای یک متغیر، الف) تقسیم بندی به روش قطعی، ب) بخش مقادیر کوچک متغیر در تقسیم بندی به روش فازی و ج) بخش مقادیر بزرگ متغیر در تقسیم بندی به روش فازی [50].

۲-۲-۲-۲-۲ مدل سازی ALM به صورت فازی [50]:

همانطور که قبلاً اشاره شد روش جستجوی ابتکاری ارائه شده در بخش قبلی قابلیت استفاده در مدل سازیهای فازی متداول را ندارد و چنانچه یک روش جستجوی ابتکاری نتواند به سادگی در مدل سازی فازی استفاده شود آن روش جستجو نمی تواند به عنوان یک روش جستجوی مناسب شناخته شود. در این بخش یک روش جدید فازی سازی و مدل سازی فازی ارائه می شود که قابلیت استفاده از روش جستجوی ابتکاری ارائه شده در بخش قبلی را داراست.

تابع عضویت یک مجموعه فازی A_{ij}^{ks} به صورت $A_{ij}^{ks}(x_k^m)$ نمایش داده می شود که i شماره مرحله تقسیم بندی است و j شماره تقسیم در مرحله i ام است و می تواند بین 1 و 2^{i-1} تغییر کند.

s نشانگر زیرفضای مرتبط به تابع عضویت است و بنابراین تابع عضویت مقادیر کوچک و بزرگ متغیر تقسیم شده به ترتیب توسط $s = 1$ و $s = 2$ نمایش داده می شوند، k شماره متغیر تقسیم شده و x_k^m نشاندهنده m امین عضو از متغیر k ام (X_k) است. به عبارت دیگر $x_k^m \in X_k$ و $X_k \in X$ که x مجموعه متغیرهاست که به صورت $X = \{X_1, \dots, X_n\}$ نمایش داده می شود و n تعداد کل متغیرها را نشان می دهد. یک تابع عضویت، درجه عضویت (امکان عضویت) یک نقطه را به یک مجموعه فازی نشان می دهد. بنابراین مقدار آن بین صفر تا یک تغییر می کند و همچنین همه توابع عضویت استفاده شده در

این روش دارای شکل دوزنقه ای هستند. در این روش فازی، یک مجموعه فازی به جای اینکه بصورت یک بخش از محدوده تغییرات یک متغیر تعریف شود به صورت یک زیرفضا از فضای متغیرها تعریف می شود. میزان درستی یک گزاره بوسیله ترکیب درجه عضویتها تعیین می شود. مقدار درستی گزاره " x_1 is A_{11}^{11} and x_2 is $A_{21}^{22}x_1$ " به صورت زیر بیان می شود:

$$(x_1 \text{ is } A_{11}^{11} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{21}^{22}) = (A_{11}^{11}(x_1) \wedge A_{21}^{22}(x_2)) = (A_{11}^{11}(x_1) \times A_{21}^{22}(x_2)).$$

در این روش فازی، بطور کلی یک قانون فازی بصورت زیر نوشته می شوند:

$$R^p: \quad \text{If } (x_k^m \text{ is } A_{1j}^{ks} \& x_k^m \text{ is } A_{2j}^{ks} \& \dots) \text{ then } y_p^m = f_p(x_k^m)$$

که p شماره قانون است و مقدار آن بین 1 و h (تعداد کل قانونها در مجموعه قوانین فازی) تغییر می کند. R^p ، p امین قانون و f_p ، p امین تابع غیر خطی تک متغیره برای p امین زیرفضا (p امین قانون) می باشد. توجه کنید که s ، k و j های مختلف در یک قانون، می توانند مقادیر متفاوتی را دریافت کنند. در طی آموزش مدل، خطای هر مسیر یا تابع تک متغیره ($MPAE(f_p)$) محاسبه می شود. بنابراین معکوس این خطا ($1/PAE(f_p)$) بعنوان وزن p امین قانون (W_p) در نظر گرفته می شود. شدت فعال شدن p امین قانون (W_{fp}^m) برابر مقدار درستی گزاره در p امین قانون است که بصورت زیر محاسبه می شود.

$$W_{fp}^m = A_{1j}^{ks}(x_k^m) \times A_{2j}^{ks}(x_k^m) \times \dots \quad 19-4$$

این یک قانون منطقی است که مجموع مقادیر درستی همه گزاره ها بایستی همیشه برابر با 1 باشد

$$(\sum_{p=1}^h W_{fp}^m = 1)$$

سرانجام خروجی (y^m) متناظر با m امین مجموعه از ورودی ها ($x_1^m, \dots, x_k^m, \dots, x_n^m$) بوسیله معادله

۲۰-۴ محاسبه می شود.

$$y^m = \frac{\sum_{p=1}^h (y_p^m \times W_{fp}^m \times W_{rp})}{\sum_{p=1}^h (W_{fp}^m \times W_{rp})} \quad 20-4$$

اکنون یک مثال کوچک ارائه می شود تا سادگی این روش فازی نشان داده شود.

فرض کنید که یک سیستم دارای دو متغیر است ($X = \{X_1, X_2\}$) و $x_1^1 \in X_1, x_2^1 \in X_2$ و قوانین فازی

برای این سیستم به صورت زیر است:

$$R^1: \quad \text{If } (x_1^1 \text{ is small \& } x_2^1 \text{ is very small}) \quad \text{then } y_1^1 = f_1(x_1^1)$$

$$R^2: \quad \text{If } (x_1^1 \text{ is small \& } x_2^1 \text{ is moderate small}) \quad \text{then } y_2^1 = f_2(x_2^1)$$

$$R^3: \quad \text{If } (x_1^1 \text{ is big \& } x_2^1 \text{ is small}) \quad \text{then } y_3^1 = f_3(x_2^1)$$

$$R^4: \quad \text{If } (x_1^1 \text{ is big \& } x_2^1 \text{ is big}) \quad \text{then } y_4^1 = f_4(x_1^1)$$

اکنون بیانه‌های زبانی فوق می توانند توسط توابع عضویت به صورت زیر بیان شوند:

$$R^1: \quad \text{If } (x_1^1 \text{ is } A_{11}^{11} \& x_2^1 \text{ is } A_{21}^{11}) \quad \text{then } y_1^1 = f_1(x_1^1)$$

$$R^2: \quad \text{If } (x_1^1 \text{ is } A_{11}^{11} \& x_2^1 \text{ is } A_{22}^{12}) \quad \text{then } y_2^1 = f_2(x_2^1)$$

$$R^3: \quad \text{If } (x_1^1 \text{ is } A_{11}^{12} \& x_2^1 \text{ is } A_{23}^{21}) \quad \text{then } y_3^1 = f_3(x_2^1)$$

$$R^4: \quad \text{If } (x_1^1 \text{ is } A_{11}^{12} \& x_2^1 \text{ is } A_{24}^{22}) \quad \text{then } y_4^1 = f_4(x_1^1)$$

تصور کنید که مقدار MPAE برای f_1 تا f_4 به ترتیب برابر 5، 10، 5 و 20 باشند.

بنابراین W_{r1}, W_{r2}, W_{r3} و W_{r4} به ترتیب برابر 0.2، 0.1، 0.2 و 0.05 می باشند.

شکل ۴-۱۳ تقسیم بندی فازی و فازی سازی این مثال را، به همراه توابع عضویت مربوطه نشان می

دهد. همانطور که در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است درجه عضویتها به صورت $A_{11}^{11}(x_1^1) = 0.34$

$$A_{12}^{11}(x_1^1) = 0.66, A_{21}^{11}(x_1^1) = 0, A_{22}^{12}(x_1^1) = 1, A_{23}^{21}(x_2^1) = 0.1 \text{ و } A_{24}^{22}(x_2^1) = 0.9 \text{ می باشند.}$$

باتوجه به درجه عضویتها، مقادیر درستی یا شدت فعال شدن قوانین مختلف (W_{fp}^m) می تواند با

استفاده از محاسبات زیر تعیین شود.

$$W_{f1}^1 = A_{11}^{11}(x_1^1) \times A_{21}^{11}(x_1^1) = 0.34 \times 0 = 0$$

$$W_{f_2}^1 = A_{11}^{11}(x_1^1) \times A_{22}^{12}(x_1^1) = 0.34 \times 1 = 1$$

$$W_{f_3}^1 = A_{11}^{12}(x_1^1) \times A_{23}^{21}(x_2^1) = 0.66 \times 0.1 = 0.066$$

$$W_{f_4}^1 = A_{11}^{12}(x_1^1) \times A_{24}^{22}(x_1^1) = 0.66 \times 0.9 = 0.594$$

فرض کنید که مقادیر تابع قانون (y_p^1) برای نقطه x^1 به صورت زیر باشند:

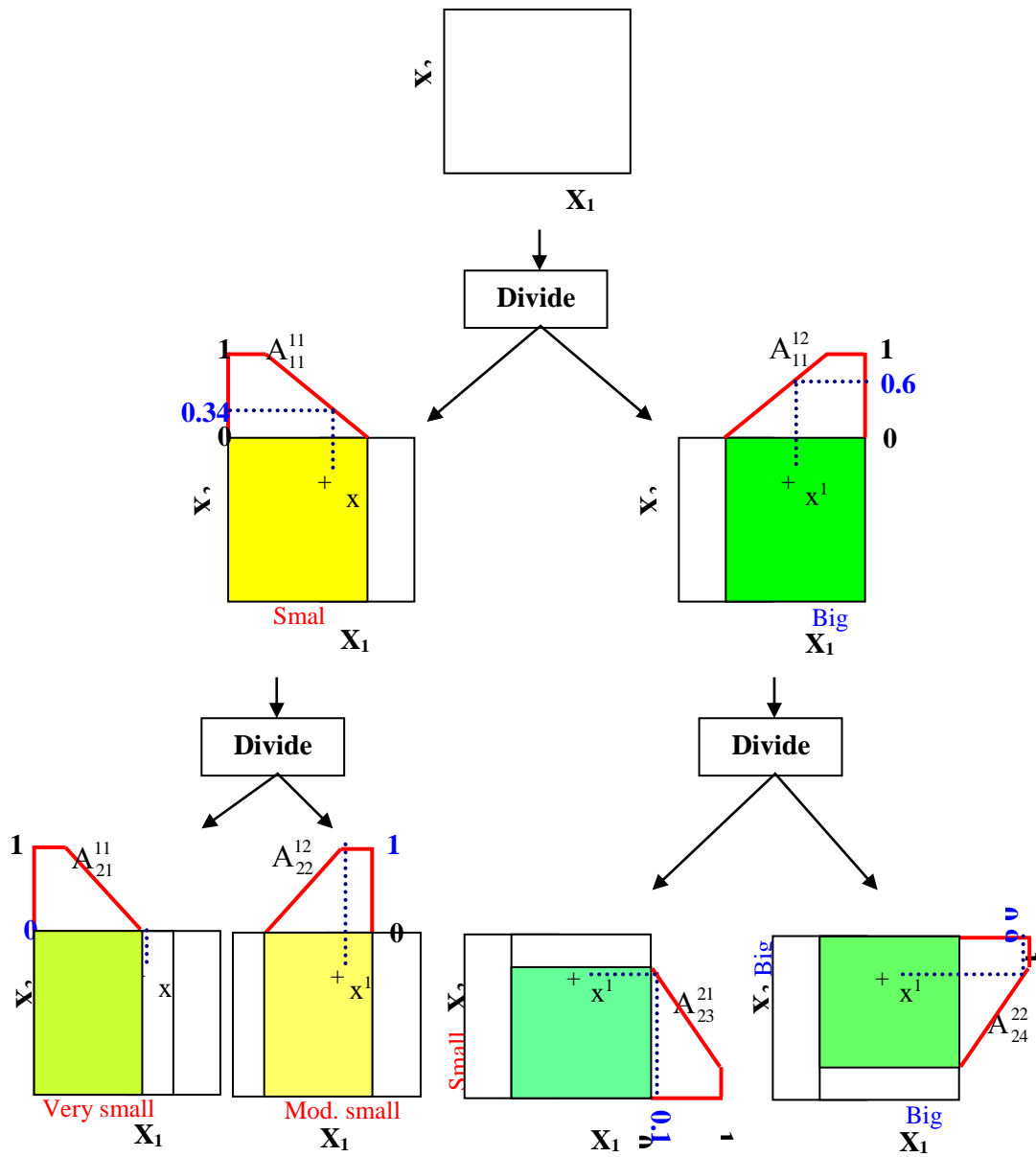
$$y_1^1 = f_1(x_1^1) = 2.0, y_2^1 = f_2(x_2^1) = 1.8, y_3^1 = f_3(x_2^1) = 2.2 \text{ and } y_4^1 = f_4(x_1^1) = 1.7$$

باتوجه به رابطه ۴-۲۰، محاسبه خروجی سیستم (y^1) می تواند به صورت زیر انجام گیرد.

$$y^1 = \frac{\sum_{p=1}^4 (y_p^1 \times W_{f_p}^1 \times W_{r_p})}{\sum_{p=1}^4 (W_{f_p}^1 \times W_{r_p})} = \frac{(y_1^1 \times W_{f_1}^1 \times W_{r_1}) + (y_2^1 \times W_{f_2}^1 \times W_{r_2}) + (y_3^1 \times W_{f_3}^1 \times W_{r_3}) + (y_4^1 \times W_{f_4}^1 \times W_{r_4})}{(W_{f_1}^1 \times W_{r_1}) + (W_{f_2}^1 \times W_{r_2}) + (W_{f_3}^1 \times W_{r_3}) + (W_{f_4}^1 \times W_{r_4})} =$$

$$\frac{(2.0 \times 0 \times 0.2) + (1.8 \times 0.34 \times 0.1) + (2.2 \times 0.066 \times 0.2) + (1.7 \times 0.594 \times 0.05)}{(0 \times 0.2) + (0.34 \times 0.1) + (0.066 \times 0.2) + (0.594 \times 0.05)} = 1.83$$

همانطور که نشان داده شد محاسبات در این روش مدل سازی فازی، ساده می باشد.



شکل ۴-۱۳. تقسیم بندی فازی، توابع عضویت دوزنقه ای و درجه عضویتها برای نقطه x^1 (x_1^1, x_2^1). [50].

فصل پنجم

مدل سازی مفهومی

وفازی

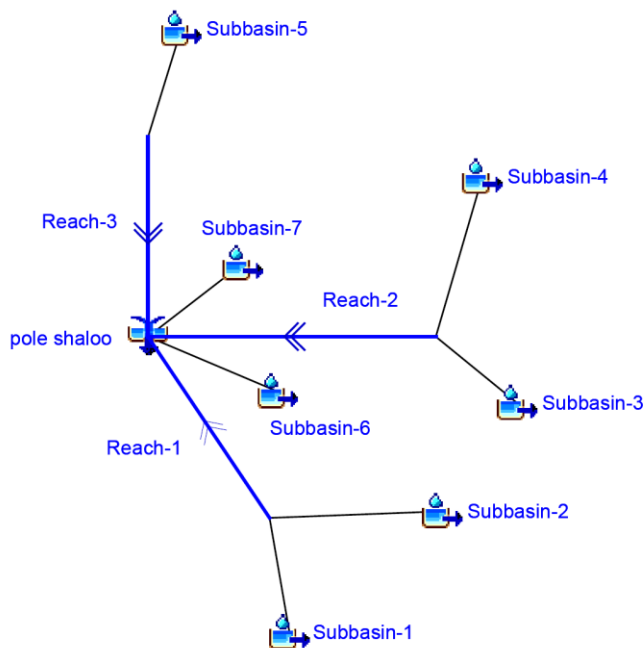
۵-۱ مدل مفهومی:

۵-۱-۱ انتخاب اجزای مدل HEC-HMS:

در این نرم افزار برای مدل سازی فرآیند بارش-رواناب چهار مدل مختلف که در کنار یکدیگر هر یک عهده دار بخشی از فرآیند شبیه سازی پدیده بارش-رواناب می باشند شامل مدل محاسبه تلفات، مدل تبدیل بارش مازاد به رواناب سطحی، مدل شبیه سازی جریان پایه و در نهایت مدل روندیابی جریان در بازه ها و کانال ها به خدمت گرفته شده است. در بخش محاسبه تلفات از تنها مدل پیوسته موجود در این نرم افزار یعنی SMA استفاده شده است. همچنین برای تبدیل بارش مازاد، مدل هیدروگراف واحد کلارک، برای روندیابی از مدل ماسکینگام و همچنین بنابر توصیه های صورت گرفته، به همراه مدل SMA از مدل جریان پایه مخزن خطی برای محاسبه دبی پایه بهره گرفته شده است [2,55].

۵-۱-۲ خصوصیات فیزیوگرافیک حوضه و ایجاد مولفه های مدل:

در این پژوهش حوضه آبریز بر اساس شبکه آبراهه های زهکشی به هفت قسمت تقسیم شده و هر یک به عنوان یک زیر حوضه به مدل حوضه معرفی شده است (اشکال ۳-۱ و ۵-۱). همچنین تعداد ۳ بازه (Reach) نیز در محل تقاطع زیر حوضه ها در نظر گرفته شد. برای خروجی حوضه یعنی ایستگاه هیدرومتری پل شالو هم یک تقاطع در نظر گرفته شد. عناصر هیدرولوژیکی فوق الذکر تعریف کننده اجزاء مختلف تشکیل دهنده یک حوضه هستند. در مدل حوضه مقادیر پارامترهای مدل های محاسبه تلفات، مدل تبدیل بارش مازاد به جریان، مدل محاسبه جریان پایه و مدل روندیابی جریان در کانالها برای هر یک از زیر حوضه ها تعریف می گردد. قدم بعدی پس از ایجاد مدل حوضه، ایجاد مدل هواشناسی می باشد. تحلیل داده های هواشناسی بوسیله این مدل انجام می شود. این مولفه ها شامل اطلاعات بارندگی، تبخیر و تعرق و مدل سازی ذوب برف است. برای معرفی نوع اطلاعات بارندگی از داده های بارش روزانه ۳۰ ایستگاه وزارت نیرو در درون و کناره های حوضه استفاده شده است.



شکل ۵-۱. ساختار شماتیک مدل حوضه و عناصر هیدرولوژیکی آن

روش‌های محاسباتی بارش میانگین که برای این مدل انتخاب گردید روش وزنی مجذور عکس فاصله است. در این روش میانگین بارش سطحی برای هر زیر حوضه از میانگین بارش نقاط (Node) معرفی شده برای همان زیر حوضه تعیین می گردد. میانگین بارش نقاط اختصاص داده شده برای هر زیر حوضه نیز با توجه به چهار ایستگاه بارش در اطراف آن نقطه تعیین می گردد [53,54]. برای اعمال میزان تبخیر و تعرق از روش میانگین ماهانه استفاده شده است. ذوب برف سومین مؤلفه مدل هواشناسی است. برای مدل سازی نحوه ذوب برف و مشارکت آن در دبی جریان از روش شاخص دما^۱ یا همان درجه-روز^۲ استفاده شده است. در این مدل، دمای اختصاص داده شده به هر یک از باند های ارتفاعی تعیین شده برای زیر حوضه ها نقش تعیین کننده این را دارد که بارش صورت گرفته در آن زمان به صورت باران مایع و یا برف جامد است [2]. گام نهایی در ایجاد چهارچوب کلی مدل ایجاد نمایه های کنترلی می باشد که شامل تاریخ و زمان شروع و خاتمه بارش و همچنین گام های زمانی برای محاسبات شبیه سازی است. در این قسمت نیز از دو نمایه استفاده شده است که در اولین نمایه

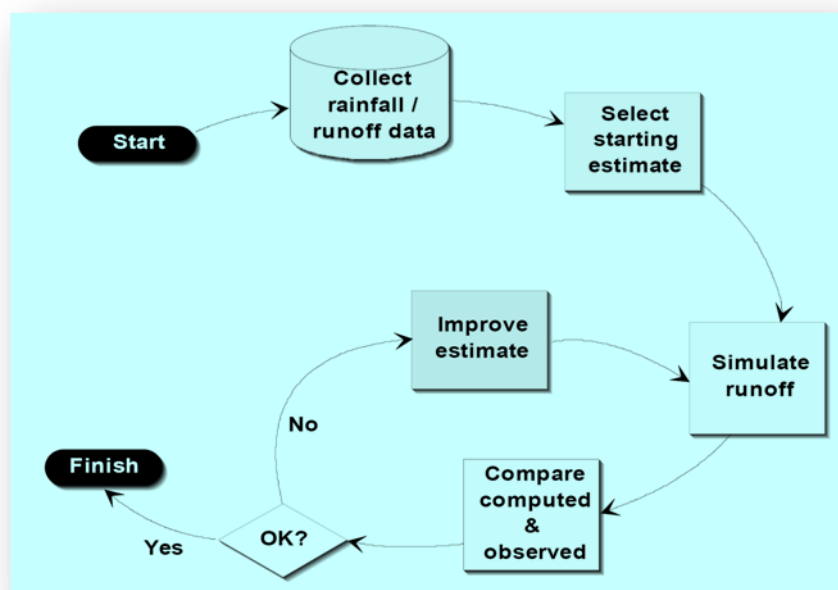
^۱ Temperature Index

^۲ Degree-Day

یک دوره پنج ساله برای کالیبراسیون با گامهای زمانی ۱۲ ساعته و دومین نمایه یک دوره سه ساله برای صحت سنجی با همان گام های زمانی ۱۲ ساعته در نظر گرفته شده است. البته داده های معرفی شده به مدل همگی روزانه بوده و فقط محاسبات به کمک درونیابی مدل به صورت ۱۲ ساعته محاسبه می گردد.

۳-۱-۵ خلاصه ای از پروسه کالیبراسیون در HEC-HMS.

در HEC-HMS فرآیند جستجوی سیستماتیک برای تعیین مقادیر بهینه پارامتر ها به صورت شکل ۲-۵ ادامه می یابد. این پروسه با گردآوری داده ها آغاز می گردد. داده های مورد لزوم برای مدل های بارش-رواناب همان داده های بارندگی و سری زمانی جریان می باشد. همچنین برای مدل های روندیابی داده های مشاهده ای جریان ورودی و خروجی به بازه ها مورد نیاز است. مرحله بعدی در فرآیند کالیبراسیون انتخاب مقادیر اولیه برای پارامتر ها می باشد. با دادن مقادیر اولیه و با استفاده از شرایط مرزی (بارش یا جریان در نقاط بالادست)، مدل قادر است تا خروجی حاصل یعنی هیدروگراف رواناب حوضه و یا هیدروگراف جریان خروجی از کانال را در محل عنصر هدف (Objective element) محاسبه نماید. در این نقطه مقادیر هیدروگراف مشاهده ای و محاسبه ای مقایسه می گردد. هدف اصلی از این مقایسه، قضاوت درباره خوبی انطباق با سیستم هیدرولوژیکی واقعی می باشد. روش های مقایسه و سنجش نیکوئی برآزش در ادامه توضیح داده خواهد شد. اگر انطباق هیدروگراف ها رضایت بخش نباشد، بایستی با یک روش بهینه سازی، مقادیر پارامتر ها را تصحیح و تعدیل نمود و فرآیند دوباره تکرار می گردد. عملیات بهینه سازی می تواند به صورت دستی و با استفاده از قضاوت مهندسی به روش تصحیح مکرر پارامتر ها و یا به صورت خودکار توسط مدل انجام گیرد. هنگامی که انطباق به خوبی صورت گیرد و رضایت بخش باشد، مقادیر بهینه و نهایی پارامتر ها گزارش خواهد شد.



شکل ۵-۲. طرح شماتیک فرآیند کالیبراسیون [2].

۴-۱-۵ اجرای مدل و کالیبراسیون:

پس از اینکه چهارچوب کلی مدل و مدل های مختلف شرکت کننده در انجام شبیه سازی به نرم افزار معرفی گردید، مقادیر اولیه ای برای پارامتر های آنها شامل مدل SMA، روندیابی جریان ماسکینگام، مدل مخزن خطی و هیدروگراف کلارک در نظر گرفته شد. پس از معرفی مقادیر اولیه، مدل اجرا شده و نتایج حاصل مورد بررسی قرار گرفته است. چنانچه انطباق بین داده های مشاهده ای و شبیه سازی شده مناسب تشخیص داده نشده است مقادیر پارامتر های مدل ها در محدوده های مجاز با استفاده از قضاوت مهندسی و به صورت دستی تا حصول نتایج مناسب و رضایت بخش کالیبره شده است. نکته مهم در ارزیابی و کارایی مدل استفاده توأمان و جامع از توابع هدف و معیار های آماری و گرافیکی متفاوت سنجش خطا می باشد. در این پژوهش برای کالیبراسیون از داده های روزانه ۲۳ سپتامبر ۱۹۹۱ تا ۲۲ سپتامبر ۱۹۹۶ یعنی یک دوره پنج ساله استفاده شده است. نکته مهم در انتخاب سال ها برای هر دو دوره کالیبراسیون و صحت سنجی قرار گیری سال های آبی تر و خشک در هر دو دوره

^۱منطبق بر سالهای آبی ۱۳۷۱-۱۳۷۰ تا ۱۳۷۵-۱۳۷۴

می باشد. جهت تعیین ترسالی و خشک سالی از میانگین متحرک^۱ مرتبه ۱۱ و داده های حجم جریان ۴۵ ساله در خروجی حوضه استفاده شده است. برای مدل سازی و محاسبه تلفات، تبدیل رواناب مستقیم به جریان سطحی و محاسبه دبی پایه به پارامتر های زیادی نیازمند می باشیم که اغلب آنها به صورت مستقیم و یا توسط روابط، قابل اندازه گیری نمی باشند و تنها از طریق کالیبراسیون مدل مقادیر بهینه آنها تعیین می گردد [2,55].

جدول ۵-۱. مقادیر کالیبره شده پارامتر های مدل مخزن خطی

Parameter	Initial Type	GW1 Initial cms	GW1 Coefficient	GW1 Reservoir	GW2 Initial cms	GW2 Coefficient	GW2 Reservoir
SubBasin1	Discharge	0	450	1	25	1200	1
SubBasin2	Discharge	0	450	1	20	1200	1
SubBasin3	Discharge	0	450	1	20	1200	2
SubBasin4	Discharge	0	450	1	15	1200	2
SubBasin5	Discharge	0	450	1	15	1200	2
SubBasin6	Discharge	0	450	1	17	1200	2
SubBasin7	Discharge	0	450	1	15	1200	2

* در جدول فوق GW1,2 Initial به ترتیب برابر با دبی اولیه نخستین و دومین لایه آب زیر زمینی، GW1,2 Coefficient برابر با ضرایب روندیابی آب در لایه های اول و دوم آب زیر زمینی و GW1,2 Reservoir تعداد مخازن لایه ها را نشان می دهد.

در بخش محاسبه تلفات که از مدل پیوسته SMA استفاده شده است نیازمند به تعیین هجده پارامتر برای پنج لایه ذخیره ای و در بخش دبی پایه نیز نیازمند شش پارامتر برای هر زیر حوضه می باشیم و همانطور که پیشتر ذکر گردید مقادیر بهینه اغلب آنها توسط کالیبراسیون تعیین شده است (جدول ۵-۱، ۵-۲، ۵-۳ و ۵-۴) و برخی مانند ذخیره برگابی، ذخیره سطحی و نرخ نفوذ، ذخیره ناحیه کششی و پروفیل خاک از طریق جداول راهنمای موجود در منابع مختلف برآورد شده است [2,56,57]. در مدل تبدیل بارش مازاد به رواناب برای تخمین اولیه زمان تمرکز از رابطه محاسبه زمان تمرکز کریچ برای هر یک از زیر حوضه ها استفاده شده و سپس در طی کالیبراسیون مقادیر بهینه آنها تعیین شده است. در مدل روندیابی جریان ماسکینگام از آنجا که در طول مسیر بازه ها شاهد افزایش

^۱ Moving Average

یا کاهش چشمگیری در جریان نمی‌باشیم مقادیر اولیه پارامتر X برابر با $0/35$ در نظر گرفته شده که در طی مراحل کالیبراسیون برای هر سه بازه به بیش از $0/4$ افزایش یافته است و همچنین برای پارامتر K مقادیر آن با توجه به طول و سرعت متوسط تقریبی $7-11$ کیلومتر بر ساعت جریان در طول بازه‌ها منطبق بر پژوهش‌های انجام شده در این حوضه آبریز و سایر مراجع راهنما [71,72] در نظر گرفته شده است. در مدل محاسبه تلفات SMA برای تعیین مقدار اولیه به ترتیب ذخایر برگابی، چالابی، پروفیل خاک و لایه‌های آب زیر زمینی اول و دوم از آنجا که ابتدای دوره شبیه سازی (مهر ماه) منطبق بر اواخر دوره خشک می‌باشد و از آنجا که تلفات ناشی از تبخیر در لایه‌های ذخیره‌ای به ترتیب از برگابی به سمت لایه دوم آب زیر زمینی پیش می‌رود بدین رو مقادیر آنها اولاً نزدیک به صفر و ثانیاً به ترتیب از دست رفتن مقدار ذخیره توسط تبخیر و تعرق در طی دوره خشک از ذخیره برگابی به سمت لایه دوم آب زیر زمینی با نرخ افزایشی تعیین شده است. به همین دلیل میزان اولیه ذخایر برگابی و چالابی برابر با صفر درصد، ذخیره پروفیل خاک پنج درصد، لایه نخست آب زیرزمینی بیست درصد و آخرین لایه ذخیره‌ای یعنی آب زیرزمینی دوم برابر با سی درصد تعیین شده است.

جدول ۵-۲. مقادیر کالیبره شده پارامترهای مدل تبدیل کلارک

Parameter	Time of concentration (hr)	Storage coefficient (hr)
SubBasin1	16	10
SubBasin2	17	10
SubBasin3	12	10
SubBasin4	15	10
SubBasin5	12	10
SubBasin6	12	10
SubBasin7	12	10

جدول ۵-۳. مقادیر کالیبره شده پارامترهای مدل روندیابی ماسکینگام

Parameter	Muskingum K (hr)	Muskingum X
Reach 1	13	0.41
Reach 2	14	0.41
Reach 3	12	0.47

در تعیین برخی مقادیر پارامترهای مدل ذوب برف شاخص دما نیز از پژوهش‌های انجام شده با مدل SRM که بر اساس همان روش درجه-روز استوار است، استفاده شده است [12,13,14,17,18]. از پارامترهای بسیار مهم این بخش دمای ریزش برف (PX Temperature) و دمای شروع ذوب (Base Temperature) و نرخ ذوب (Meltrate Function) می‌باشد که مقادیر اولیه آنها با توجه به تحقیقات صورت گرفته تعیین شده و سپس در طی کالیبراسیون مقادیر بهینه آنها تعیین شده است [2,12,13,14,17,18]. دمای ریزش برف آستانه ای می‌باشد که با توجه به آن مدل می‌تواند تشخیص دهد که بارش صورت گرفته به صورت مایع یا جامد می‌باشد. دمای شروع ذوب نیز آستانه ای برای تشخیص مدل می‌باشد که چنانچه دما از آن فراتر رود توده‌های برفی انباشته شده در دوره‌های قبل با نرخ ذوب تعیین شده شروع به ذوب شدن و تشکیل رواناب می‌نمایند [2].

جدول ۵-۴. مقادیر کالیبره شده پارامترهای مدل SMA

Parameters	Ave values for all Subbasin
Canopy%	0
Surface%	0
Soil%	5
Groundwater1%	20
Groundwater2%	30
CanopyStorage (mm)	1.75
SurfaceStorage (mm)	4.5
MaxInfiltration (mm/hr)	11
Impervious %	15
SoilStorage (mm)	115
TensionStorage (mm)	17.5
SoilPercolation (mm/hr)	3.75
GW1Storage (mm)	85
GW1Percolation (mm/hr)	2
GW1Coefficient (hr)	400
GW2Storage (mm)	95
GW2Percolation (mm/hr)	0.08
GW2Coefficient (hr)	600

همچنین نرخ ذوب مرطوب^۱ نیز برای گام‌های زمانی که بارش مایع بیشتر از حد تعیین شده (Rain Rate Limit) بر روی توده برفی صورت می‌گیرد نیز از پارامترهایی می‌باشد که از طریق کالیبراسیون

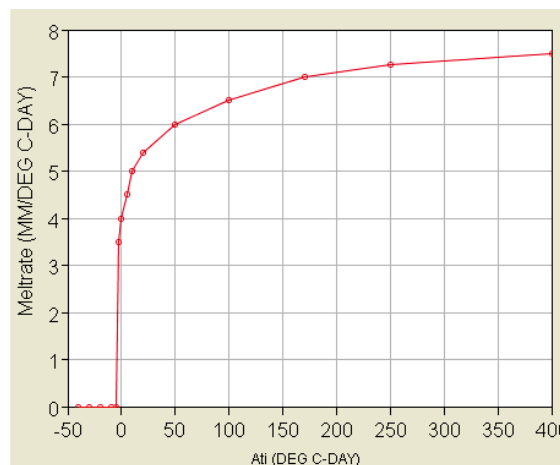
^۱ Wet Meltrate

حاصل شده است. Rain Rate Limit برای تمایز بین بارش خشک و تر معرفی می گردد و هنگامی که نرخ بارش کمتر از آن باشد به عنوان بارش خشک محسوب می گردد و نرخ ذوب به صورتی محاسبه می گردد که هیچ گونه بارشی بر روی توده برفی رخ نداده است. در گام های زمانی که که نرخ بارش کمتر از Rain Rate Limit می باشد نیازمند محاسبه نرخ ذوب می باشیم که این مهم از طریق تابع نرخ ذوب ATI^1 معرفی شده (شکل ۵-۳) و توسط ضریب نرخ ذوب ATI^2 (مقدار توصیه شده برابر با ۰,۹۵ می باشد [2]) برای هر گام زمانی بهنگام می شود. Cold Limit برای محاسبات در هنگام تغییرات ناگهانی دمایی که توده برفی در هنگام بارش زیاد با آن مواجه می گردد به کار می رود و ATI-Coldrate Function برای بهنگام سازی آن در طی گام های زمانی استفاده می شود که مقدار آن بنابر توصیه صورت گرفته برابر با ۰,۸۴ قرار داده شده است [2]. Water Capacity نشان دهنده حداکثر مقدار آب ذوب شده ای می باشد که در داخل توده بایستی نگهداری شود تا پس از آن در معرض سطح خاک برای نفوذ یا تشکیل رواناب سطحی قرار گیرد. به طور ویژه مقدار آب نگه داشته شده در توده برفی برابر با ۳-۵ درصد از آب معادل برف می باشد. این مقدار آب تا زمانی که دمای توده برفی در کمتر از دمای ذوب برف باشد در آن باقی می ماند [2]. هنگامی که توده برفی بر روی زمین انباشته می شود به نوعی یک ایزولاسیون و عایق بر روی زمین گرم تشکیل شده و گرمای زمین می تواند باعث ذوب شدن قسمت تحتانی توده گردد. با تعریف یک مقدار ثابت (Fixed Value)، مدل بدون در نظر گرفتن شرایط اتمسفری بالای توده و زمان، با یک مقدار ثابت نرخ ذوب صورت گرفته در اثر تماس با زمین را لحاظ کرده و از مقدار جامد کسر می نماید. برای در نظر گرفتن مقدار دمایی میانگین در ارتفاعات مختلف برای هر زیر حوضه دو باند ارتفاعی تعریف می گردد و مدل با استفاده از داده های دمایی ایستگاه های دماسنجی معرفی شده به آن و شیب حرارتی تعیین شده (Lapse rate)، ارتفاع ایستگاه دما سنجی مبنا و ارتفاع میانگین باند ارتفاعی، میزان دمایی میانگین روزانه را برای هر

¹ Antecedent Temperature Index Meltrate Function

² ATI-Meltrate Coefficient

یک از طبقات تعیین می نماید. شیب حرارتی معرفی شده برای زیر حوضه ها با توجه به تحقیقات صورت گرفته در همین حوضه آبریز برابر با $-۶,۵$ درجه به ازای هر هزار متر افزایش ارتفاع می باشد [17]. مقادیر استفاده شده برای پارامترهای مدل ذوب برف کل زیر حوضه ها در جدول ۵-۵ نمایش داده شده است. همچنین در این پژوهش برای رسیدن به شرایط اولیه بهتر از دوره Warm-Up یکساله در ابتدای دوره کالیبراسیون و صحت سنجی استفاده شده است. در طی این دوره به کالیبره کردن مقادیر پارامترهای مدل پرداخته نمی شود و فقط مقادیر آنها در طی اجرا به مقادیر اولیه حقیقی نزدیکتر می شود.



شکل ۵-۳. الگوی ذوب برف تعیین شده در روش شاخص دما

جدول ۵-۵. مقادیر استفاده شده برای پارامترهای مدل ذوب برف

Parameter	Value
PX Temperature (DEG C)	0
Base Temperature (DEG C)	-2.5
Wet Meltrate (mm/DEG C-day)	7
Rain Rate Limit (mm/day)	0.4
ATI-Meltrate Coefficient	0.95
ATI-Meltrate Function	شکل 2-6
Cold Limit (mm/day)	20
ATI-Coldrate Function	0.84
Water Capacity %	6
Groundmelt Method	Fixed value
Groundmelt (mm/day)	2

همچنین از مقادیر خروجی مدل در طی این دوره در محاسبات سنجش خطا و ... صرف نظر می گردد. یکی از ضعف های مدل HEC-HMS انتخاب یک مقدار پتانسیل تبخیر و تعرق برای هر ماه

می باشد که چنانچه دوره مدل سازی بیش از یکسال انتخاب گردد (مانند دوره کالیبراسیون و صحت سنجی چندین ساله در این پژوهش) بایستی از مقادیر میانگین تبخیر برای هر ماه استفاده نمود که خود گاهی موجب بروز خطای زیاد در مدل سازی می گردد. از دیگر کمبود هایی که در این مدل به شدت احساس می شود قابلیت در نظر گرفتن اثراتی مانند شکل حوضه^۱، اثرات ناهمگونی های زمین شناسی و خصوصیات توپوگرافی مانند شیب برای محاسبه پتانسیل سیل خیزی در هر یک از زیر حوضه ها می باشد. ساده سازی در معادلات و فاکتور های مورد نیاز مدل اساساً یک نیاز ضروری می باشد ولی ذکر این نکته ضروری می باشد که اصولاً ساده سازی نباید با حذف پارامتر های کلیدی و ضروری مانند شکل حوضه که نقش مهمی در پتانسیل سیل خیزی و مقادیر زمان و دبی اوج ایفا می کند اشتباه گرفته شود و با وجود نتایج قابل قبول و مناسب کنونی بهتر است که از نقش کلیدی این فاکتورها در بهبود خروجی های مدل صرف نظر نگردد.

۵-۱-۵ صحت سنجی و اعتبار یابی مدل:

در دوره صحت سنجی مقادیر پارامتر های کالیبره شده حاصل از دوره کالیبراسیون ثابت نگه داشته می شود و بدون اینکه در مقادیر آنها تغییری ایجاد شود مدل با مقادیر جدیدی از داده های ورودی در معرض آزمون قرار داده می شود. در طی این دوره هر چقدر که بین معیار های سنجش خطا اختلاف بیشتری با دوره کالیبراسیون وجود داشته باشد حاکی از کالیبراسیون نامناسب مدل و درک غیر صحیح سیستم واقعی و ناتوانی پیاده سازی آن در مدل می باشد. نمایه ای که برای دوره صحت سنجی تعیین گردید از تاریخ ۲۳ سپتامبر ۱۹۹۶ تا ۲۲ سپتامبر ۱۹۹۹^۲ یعنی یک دوره ۳ ساله در نظر گرفته شد که سال نخست به عنوان دوره Warm-Up در نظر گرفته شده است.

^۱ Form Factor

^۲ منطبق بر سالهای آبی ۱۳۷۶-۱۳۷۵ تا ۱۳۷۸-۱۳۷۷

۵-۱-۶ شاخص های نیکوئی برازش (Goodness-of-fit Indices):

برای مقایسه هیدروگراف های مشاهده ای با هیدروگراف های شبیه سازی شده در مراحل کالیبراسیون و صحت سنجی مدل ها، شاخص های نیکوئی برازش مختلفی را می توان استفاده نمود. این شاخص ها به دو گروه معیار های گرافیکی و توابع هدف (پارامتر های سنجش خطای آماری) قابل تقسیم هستند. به طور کلی پارامتر های آماری سنجش خطا یک شاخص عددی از عملکرد مدل فراهم می آورند و نمی توانند رفتار های غیر خطی یا عملکرد های خاص بین مدل و داده های مشاهده ای را به نحو مطلوب بیان نمایند [50]. به همین دلیل از تعدادی معیار های گرافیکی به منظور نمایش این رفتار ها و روند ها در این پژوهش استفاده شده است. از دسته معیار های گرافیکی می توان به ترسیم هیدروگراف های جریان مشاهده ای و شبیه سازی شده در کنار هم، ترسیم نمودار های پراکندگی^۱، منحنی های توزیع احتمال^۲ و ترسیم Quantile-Quantile دیاگرام تجربی [73] اشاره نمود که از این به بعد با Q-Q نمایش داده می شوند. Q-Q دیاگرام به سادگی توسط داده های مرتب شده شبیه سازی شده نسبت به داده های مشاهده ای ترسیم می گردد. Q-Q دیاگرام نشان دهنده رفتار کلی سری داده های مشاهده ای و شبیه سازی شده می باشند و Q-Q دیاگرام مدلی بهتر می باشد که نقاط حاصل به خط ۱-۱ نزدیکتر باشند و رفتار خطی داشته باشند [74] (البته نباید با نمودار پراکندگی اشتباه گرفته شود). همچنین بایستی توجه داشت که منحنی های توزیع فراوانی و Q-Q دیاگرام به بررسی زمان وقوع داده ها کاری نداشته و مستقل از زمان هستند و فقط به صورت کلی به ارزیابی رفتار داده های مشاهده ای و شبیه سازی شده می پردازند. از شاخص های آماری سنجش خطا می توان به درصد اختلاف حجم کل رواناب، اریبی^۳، مجذور ضریب همبستگی (R^2).

^۱ Scatter plot

^۲ Probability Distribution Curve

^۳ Bias

RMSE^۱، MPAE^۲، PWRMSE^۳ و پارامتر راندمان مدل^۴ یا Nash-Sutcliffe که اخیراً در مسائل هیدرولوژی به وفور مورد استفاده قرار گرفته است اشاره نمود که هر یک به نوعی به ارزیابی نتایج شبیه سازی و نیکویی برازش می پردازند. روابط مختلف توابع هدف در جدول ۵-۶ نشان داده شده است.

جدول ۵-۶. توابع هدف مختلف برای ارزیابی نیکویی برازش

Goodness-of-fit Indices (statistical criteria)	Equation
Nash-Sutcliffe (NS)	$1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right]$
Bias	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)$
R ²	$(\text{Cov}(O_i, S_i) / \sqrt{\text{Cov}(O_i, O_i) \cdot \text{Cov}(S_i, S_i)})^2$
Percent of Total Volume Error (PTVE)	$\frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n O_i} * 100$
Mean Percent of Absolute Error (MPAE)	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|O_i - S_i|}{O_i} * 100$
Root Mean Square Error (RMSE)	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}$
Peak-Weighted RMSE (PWRMSE)	$\left\{ \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2 \left(\frac{O_i + \bar{O}}{2\bar{O}} \right) \right) \right\}^{0.5}$

* در جدول فوق، n برابر با تعداد داده های جریان، O_i و S_i داده های جریان مشاهده ای و شبیه سازی شده در گام زمانی tام، \bar{O} دبی میانگین مشاهده ای و Cov کوواریانس داده ها می باشد.

۵-۲ مدل فازی ALM:

^۱ Root Mean Square Error

^۲ Mean Percent of Absolute Error

^۳ Peak-Weighted RMSE

^۴ Model Efficiency

در این بخش مدل سازی فازی با کمک روش یادگیری فعال به منظور تعیین جریان روزانه شرح داده می شود. تمامی عملیات مدل سازی فازی با روش هوشمند ALM توسط کد های MATLAB7.8 (2009a) کدنویسی شده توسط طاهری شهرآئینی (۱۳۸۶) که قابلیت اجرای خودکار و انجام کلیه پردازش ها و تجزیه و تحلیل ها بر روی داده های معرفی شده را دارا می باشد به انجام رسیده است.

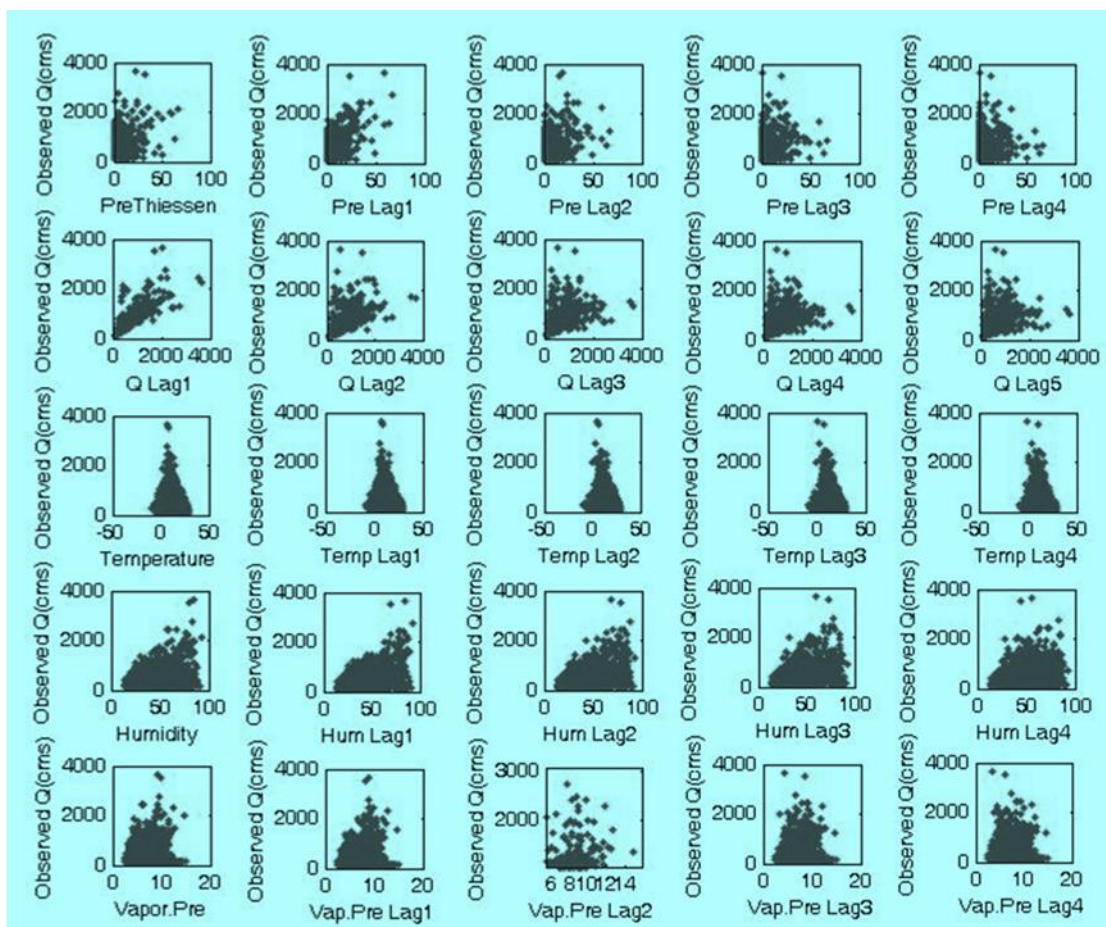
۵-۲-۱ آموزش مدل ALM:

برای آموزش مدل فازی همانند دوره کالیبراسیون مدل مفهومی از دوره پنج ساله داده های روزانه ۲۳ سپتامبر ۱۹۹۱ تا ۲۲ سپتامبر ۱۹۹۶ استفاده شده است. در دوره آموزش مدل فازی از الگوریتم ها و ترکیب بندی های متفاوتی از داده های بارش میانگین حاصل از IDW، بارش میانگین حاصل از پلیگون های تاپسن، میانگین دمای روزانه، رطوبت نسبی، فشار بخار و دبی جریان به همراه تأخیر های مختلف استفاده گردیده است (جدول ۵-۷) که پارامتر های آماری آنها در جدول ۳-۲ محاسبه شده و همچنین نمودار های پراکندگی آنها در برابر دبی خروجی مشاهده ای در شکل ۵-۴ ترسیم شده است. مدل هوشمند ALM از بین متغیر های مختلف معرفی شده به آن، توانایی انتخاب مناسب ترین ورودی ها برای تقسیم بندی فضای متغیر ها و تخمین مقدار خروجی از روی آن را دارد و به همین دلیل در سناریو های مختلف از ترکیب بندی های مختلف داده ها استفاده شده که تا حد امکان و در صورت لزوم، مدل ALM به انتخاب مناسب ترین ورودی ها برای هر قسمت پردازد.

جدول ۵-۷. متغیر های انتخاب شده در ترکیب بندی های متفاوت برای دوره آموزش

NO	Variables
2	Precipitation IDW Lag 0,1
4	Precipitation Thiessen Lag 0,1,2,3,4,5
5	Discharge Lag 1,2,3,4,5
7	Temperature Lag 0,1,2,3,4,5
9	Humidity Lag 0,1,2,3,4,5
11	Vapor Pressure Lag 0,1,2,3,4,5

ALM در هر مرحله از مدل سازی یا آموزش، بهترین متغیر برای تقسیم بندی فضای متغیر ها و بهترین متغیر برای استخراج تابع ضمنی غیر خطی را مشخص می نماید. به همین ترتیب متغیر های مناسب مشخص شده و بقیه متغیر های ورودی حذف می گردند [50]. همچنین از دیگر مواردی که در طی دوره های آموزش و آزمون مورد بررسی قرار گرفته است سهم هر یک از متغیر ها در تقسیم فضای متغیر ها و همچنین نقاط مناسب بعنوان نقاط فازی سازی در متغیر ها (یا شدت فازی بودن متغیر ها) می باشد. همچنین به بررسی شبکه مناسب فضای متغیر های ورودی و خروجی (قدرت تفکیک در جهت x و y در هنگام انتشار الگوی نور توسط عملگر IDS) نیز پرداخته شده است که نکته قابل ذکر در این مسئله این است که زمان اجرای مدل ALM به شدت با شبکه بندی داده ها در ارتباط بوده و سرعت پردازش با افزایش تقسیمات محور های شبکه کاهش می یابد.



شکل ۴-۵. نمودار های پراکندگی داده های ورودی در برابر دبی های مشاهده ای در دوره آموزش (Temp, Q, Pre).

(Hum و Vap.Pre) به ترتیب بیانگر بارش، دبی، دما، رطوبت و فشار بخار هستند.

۵-۲-۲ آزمون مدل ALM:

برای دوره آزمون مدل فازی از همان داده های دوره صحت سنجی مدل مفهومی سه ساله یعنی داده های روزانه ۲۳ سپتامبر ۱۹۹۶ تا ۲۲ سپتامبر ۱۹۹۹ استفاده شده است. قضاوت در مورد اینکه تعداد قوانین مناسب برای مدل سازی فازی و همچنین مقادیر توابع عضویت و اینکه شبکه بندی مناسب فضای متغیر ها و دبی خروجی چگونه باشد بر عهده این بخش گذاشته شده است. همانطور که در فصل چهارم توضیح داده شد در مدل سازی ALM دو گروه از متغیر ها نقش دارند. گروه اول متغیر هایی هستند که از آنها به منظور تقسیم بندی فضای متغیر ها استفاده می شود و گروه دوم متغیر هایی هستند که در توابع تک متغیره ضمنی مورد استفاده قرار می گیرند [50]. دیاگرام های تقسیم بندی سلسله مراتبی^۱ (HPD) متغیر های مناسب برای تقسیم فضا و متغیر های تخمین گر را در تعداد تعداد قوانین مختلف نشان می دهند که در مواقع مورد نیاز برای الگوریتم های مختلف ترسیم شده است. رتبه بندی متغیر های مختلف با استفاده از HPD ها به سادگی قابل انجام است. در HPD ها فقط متغیر هایی که در مدل سازی ALM نقش داشته اند نشان داده می شوند و بقیه متغیر ها، اضافی شناخته شده و حذف گشته اند.

^۱ Hierarchical Partitioning Diagram

فصل ششم

ارزیابی و تحلیل نتایج

و مقایسه مدل ها

۱-۶ مدل مفهومی:

۱-۱-۶ بررسی تاثیر تمایز بین بارش جامد و مایع:

۱-۱-۱-۶ بررسی کارایی مدل در حالت بدون در نظر گرفتن ذوب برف:

در مدل سازی جریان رودخانه ای توسط مدل مفهومی HEC-HMS الگوریتم های متفاوتی را می توان استفاده نمود که به عنوان مثال انجام مدل سازی به همراه ذوب برف و یا بدون در نظر گرفتن این گزینه می باشد. در این پژوهش برای بررسی تاثیر در نظر گرفتن ذوب برف و یا ساده سازی آن و در نظر گرفتن تمامی بارش به صورت مایع از دو سناریو استفاده شده است. در سناریوی نخست، مدل با در نظر گرفتن تمامی بارش به صورت مایع و به کمک داده های پنج سال (۲۳ سپتامبر ۱۹۹۱ تا ۲۲ سپتامبر ۱۹۹۶) کالیبره شد. سپس برای صحت سنجی مدل از سه سال (۲۳ سپتامبر ۱۹۹۶ تا ۲۲ سپتامبر ۱۹۹۹) داده استفاده شد. در ابتدای هر دو دوره یکسال بعنوان دوره Warm-Up در نظر گرفته شده است. معیار های آماری سنجش خطا برای این الگو در جدول ۱-۶ محاسبه شده است. همانطور که در جدول ۱-۶ مشاهده می گردد بدون در نظر گرفتن پدیده ذوب برف مدل HEC-HMS توانسته است که جوابهای قابل قبولی ارائه نماید.

جدول ۱-۶. محاسبه معیار های آماری نیکوئی برازش برای دوره کالیبراسیون و صحت سنجی

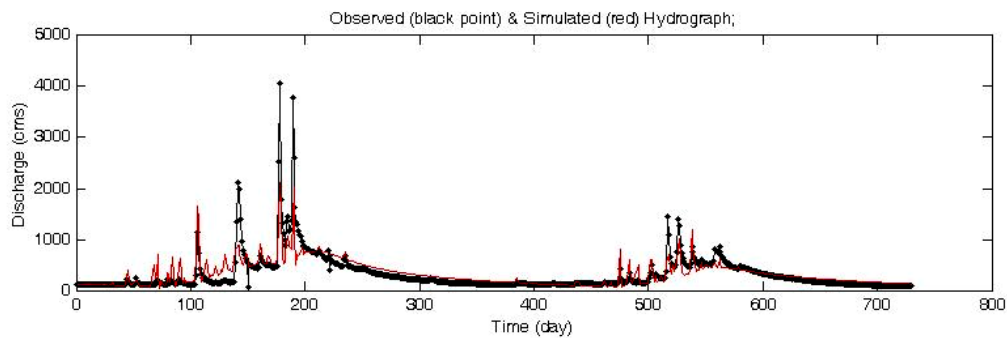
صحت سنجی	کالیبراسیون	معیارهای آماری نیکوئی برازش
Mean Discharge (cms)	437	294
Nash-Sutcliffe	0.77	0.67
Bias(cms)	-3.5	15
R ²	0.77	0.7
MPAE %	26	38
PTVE %	-0.8	4.7
RMSE (cms)	182	205
PW-RMSE (cms) [2]	270	391

از نکات قابل توجهی که در جدول ۶-۱ بایستی به آن توجه نمود معیار PW-RMSE می باشد. در شبیه سازی پیوسته جریان روزانه رودخانه ای که دوره شبیه سازی طولانی می باشد و در آن رخداد های زیادی بوقوع پیوسته اند نمی توان از معیار های ارزیابی مانند خطای دبی اوج^۱ که در مسائل تک رخداد استفاده می گردد بهره گرفت. چرا که در شبیه سازی پیوسته تعداد زیادی رخداد وجود داشته و در ارزیابی مدل سازی نباید تنها به محاسبه خطای مقدار حداکثر دبی اوج اکتفا نمود و به نحوی بایستی به طور کلی تمامی اوج های رخداد ها مورد ارزیابی قرار گیرند. برای رفع این مشکل از معیار PW-RMSE استفاده شده است که در این پارامتر، محاسبه مقدار RMSE با توجه به مقادیر دبی مشاهده ای وزن دهی می شود و هر مقدار که دبی مشاهده ای بیشتر باشد وزن بیشتری به محاسبه بخش^۲ MSE اختصاص داده می شود و بدین ترتیب مقادیر دبی اوج اهمیت بیشتری می یابند (برای درک بهتر به جدول ۵-۶ مراجعه شود). اگر در طول دوره شبیه سازی مقادیر خطا در دبی های اوج تفاوت زیادی با مقادیر میانگین خطا در سایر بخش های هیدروگراف نداشته باشد بدین ترتیب مقادیر RMSE و PW-RMSE دارای اختلاف جزئی خواهند بود. همانطور که در جدول ۶-۱ مشاهده می گردد اختلاف زیادی بین RMSE و PW-RMSE وجود دارد که حاکی از برآورد نامناسب تر مقادیر دبی اوج نسبت به سایر بخش های هیدروگراف می باشد. همچنین این مهم به سادگی در معیار های گرافیکی سنجش خطا همانند سری زمانی باقیمانده ها، نمودار پراکندگی و Q-Q دیاگرام قابل تشخیص می باشد (اشکال ۶-۱ و ۶-۲). همانطور که در Q-Q دیاگرام مشاهده می گردد به ازای مقادیر دبی های تقریباً بیشتر از ۱۵۰۰ cms حتی بدون در نظر گرفتن ترتیب زمانی، هیچ داده شبیه سازی شده ای برابر با آن مقدار وجود ندارد و اغلب اوج ها کمتر از مقدار واقعی برآورد شده است. در توجیه این پدیده می توان اینگونه بیان نمود که بارش های جامد که در فصول سرد ریزش می کنند

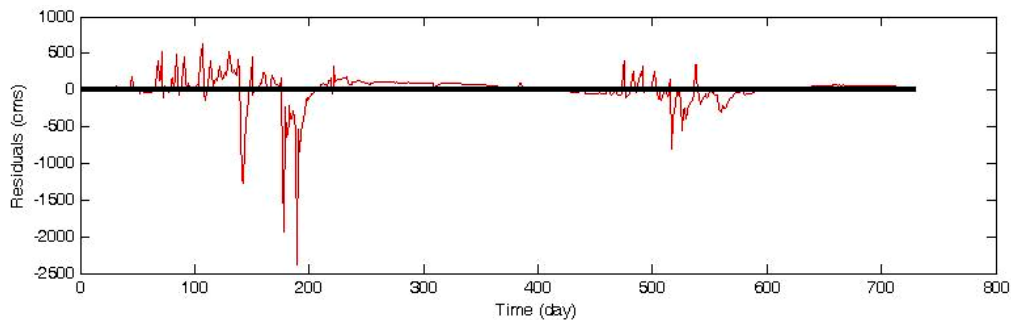
^۱ Percent error in peak = $100 \left| \frac{q_p(\text{peak}) - q_o(\text{peak})}{q_o(\text{peak})} \right|$

^۲ Mean Square Error

معمولاً مدت زمانی (به ویژه در ارتفاعات) در سطح انباشته می شوند و با گرم شدن هوا (مثلاً در اواخر اسفند و اوایل فروردین) تشکیل رواناب سطحی می دهند و چون مدل تمامی بارش را به صورت مایع در نظر گرفته است و تقریباً بلافاصله پس از هر رخداد رواناب سطحی مایع سریعاً تخلیه می گردد در نتیجه هیچ مقدار آبی در طی فصل سرد ذخیره نشده (فاصله بین روز های ۱۶۰-۱۰۰ از ابتدای هر سال آبی) و در همان موقع جاری شده است. ولی به صورت طبیعی، برف ذخیره شده در طی فصول سرد با گرم شدن هوا شروع به ذوب نموده و به همراه بارش های اواخر اسفند و اوایل فروردین سیلاب های شدیدی را بوجود می آورد.



(الف)

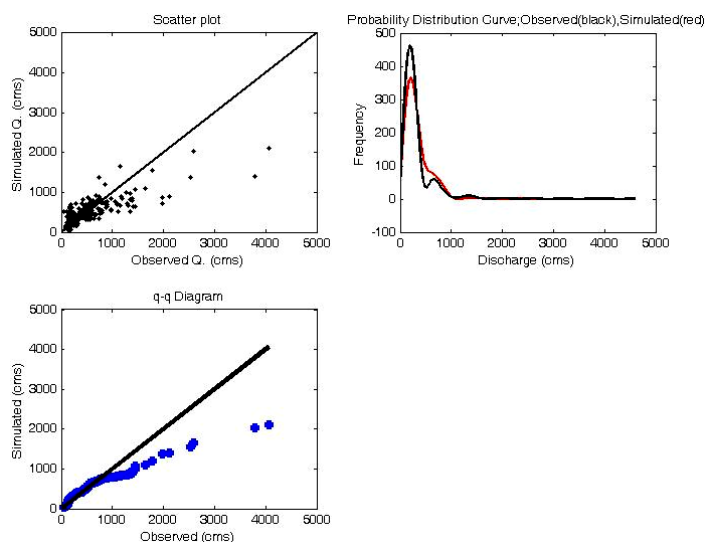


(ب)

شکل ۶-۱. نمایش هیدروگراف (الف) و سری زمانی باقیمانده ها (ب) برای دوره صحت سنجی بدون ذوب برف

همانطور که در شکل سری زمانی باقیمانده ها (۶-۱ ب) مشاهده می گردد، چون که بارش در طی دوره سرد (فاصله بین روز های ۱۶۰-۱۰۰ از ابتدای هر سال آبی) مایع در نظر گرفته شده بنابراین مدل تمامی بارش اضافی را به رواناب تبدیل نموده و در نتیجه مقادیر دبی در فاصله روز های ۱۰۰ تا ۱۶۰ از ابتدای هر سال آبی بیشتر برآورد شده است و در طرف مقابل چون هیچ مقدار ذخیره قبلی

برای اواخر دوره سرد و اوائل دوره گرم (فاصله روز های ۱۶۰ تا ۲۰۰ از ابتدای هر سال آبی) وجود نداشته است بنابراین در طی این دوره ها فقط بارش های بوقوع پیوسته را به رواناب تبدیل نموده و مقادیر ذخیره ای برای اضافه نمودن به این مقادیر وجود نداشته و در نتیجه دبی ها کمتر برآورد شده است. البته ذکر این نکته ضروری می باشد که برون یابی و تخمین نامناسب تر دبی های اوج تا حدی قابل قبول می باشد و حتی تخمین این مقدار دبی های شدید (به داده های پرت و کشیدگی بسیار زیاد داده ها در جدول ۲-۳ توجه شود) رخ داده در طول دوره، حتی در مدل هایی که ذوب برف را در نظر می گیرند نیز به خوبی صورت نمی پذیرد.



شکل ۲-۶. نمایش معیار های گرافیکی سنجش خطا برای دوره صحت سنجی در حالت بدون ذوب برف

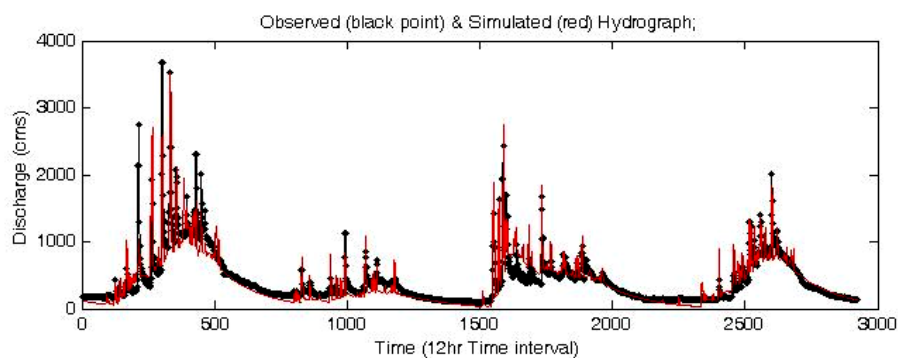
۲-۱-۱-۶ بررسی کارایی مدل با در نظر گرفتن ذوب برف:

آلگوریتم بعدی که در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفت ایجاد تمایز بین بارش جامد و مایع می باشد. برای مدل سازی ذوب برف و مشارکت آن در دبی جریان از روش شاخص دما یا همان درجه - روز استفاده شده است. در این روش، دمای اختصاص داده شده به هر یک از باند های ارتفاعی و دمای آستانه تعیین شده برای ریزش برف، نقش تعیین کننده این را دارد که بارش صورت گرفته در آن زمان به صورت باران مایع و یا برف جامد باشد. دمای شروع ذوب (Base Temperature) نیز آستانه ای برای تشخیص مدل می باشد که چنانچه دما از آن فراتر رود توده های برفی انباشته شده در دوره

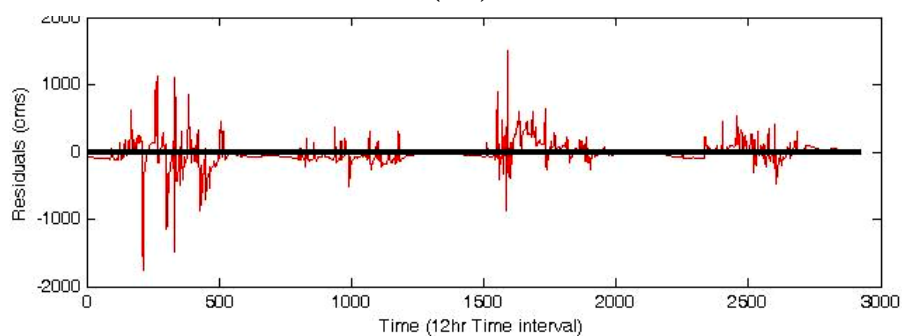
های قبل با نرخ ذوب تعیین شده شروع به ذوب شدن و تشکیل رواناب می نمایند [2]. در این مرحله نیز همانند سری قبلی به کمک داده های پنج سال کالیبره و سپس تحت صحت سنجی قرار گرفت. شکل های ۳-۶ و ۴-۶ نتایج معیار های گرافیکی مدل کالیبره شده در شرایط در نظر گرفتن ذوب برف را نشان می دهد. معیار های آماری سنجش خطا برای این حالت در دوره صحت سنجی نیز در جدول ۲-۶ محاسبه شده است. معیار های گرافیکی ارزیابی مدل در دوره صحت سنجی نیز در شکل های ۵-۶ و ۶-۶ نشان داده شده است.

جدول ۲-۶. محاسبه معیار های آماری نیکوئی برازش برای دوره کالیبراسیون و صحت سنجی با مدل ذوب برف

صحت سنجی	کالیبراسیون	معیارهای آماری نیکوئی برازش
Mean Discharge (cms)	437	294
Nash-Sutcliffe	0.80	0.82
Bias(cms)	-19	36
R ²	0.81	0.84
MPAE %	27.5	36.5
PTVE %	-4.5	11.3
RMSE (cms)	168	151.3
PW-RMSE (cms)	240	265



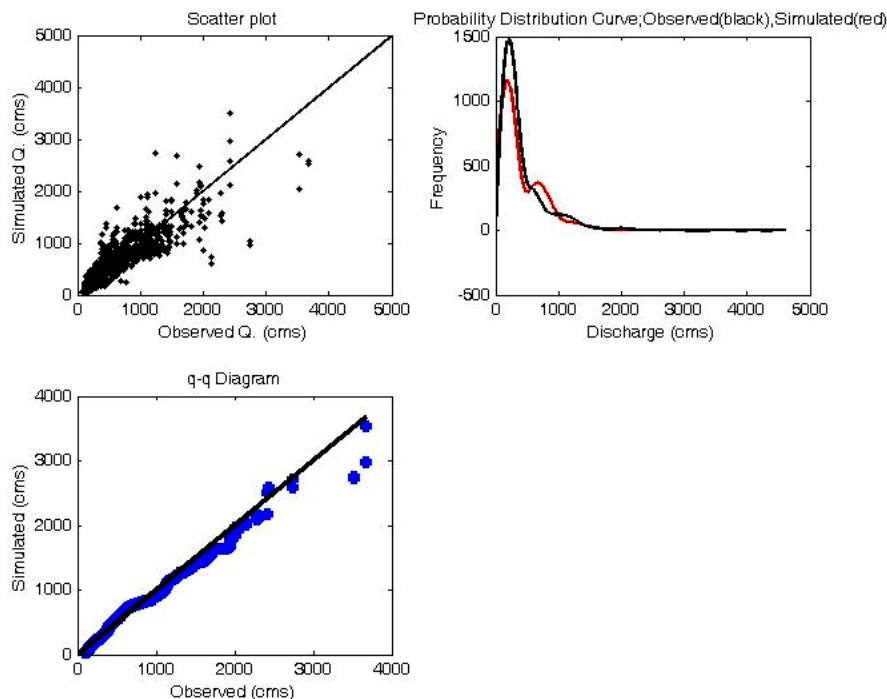
(الف)



(ب)

شکل ۳-۶. نمایش هیدروگراف (الف) و سری زمانی باقیمانده ها (ب) برای دوره کالیبراسیون (معیار گرافیکی)

با نگاهی به معیارهای آماری سنجش خطا دوره های صحت سنجی در حالت قبل (بدون ذوب برف) (جدول ۱-۶) و حالت کنونی (با در نظر گرفتن ذوب برف) (جدول ۲-۶) به خوبی افزایش در مقادیر R^2 ، NS و کاهش در مقادیر $RMSE$ و $PW-RMSE$ مشاهده می گردد که نشان دهنده بهبود کلی نتایج شبیه سازی با در نظر گرفتن پدیده ذوب برف در محاسبات می باشد.



شکل ۴-۶. نمایش معیار های گرافیکی سنجش خطا برای دوره کالیبراسیون با در نظر گرفتن ذوب برف

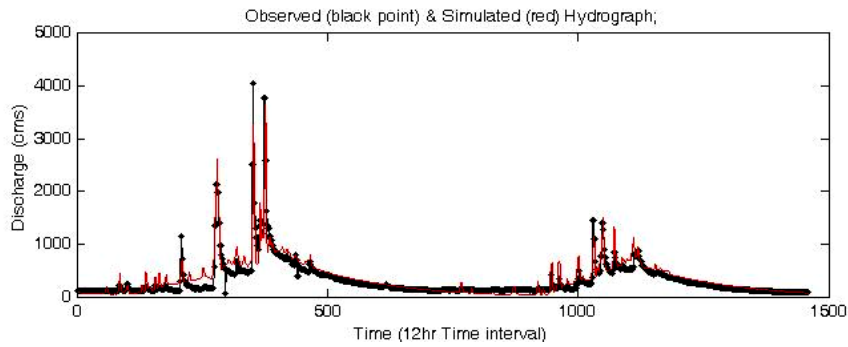
نکته ای که حائز اهمیت می باشد این است که مقادیر $RMSE$ و $PW-RMSE$ نسبت به حالت قبلی به یکدیگر نزدیکتر شده است و نشان از تخمین مناسب تر مقادیر دبی اوج در این حالت بر اساس مقایسه $RMSE$ و $PW-RMSE$ دارد. البته اگر به هیدروگراف مقادیر شبیه سازی شده و مقادیر واقعی توجه نمائیم نکته ای که مشخص می گردد این است که مقادیر دبی های اوج بسیار خوب برآورد شده است. با نگاهی دقیق به هیدروگراف در این حالت به خوبی واضح است که مقادیر دبی اوج در برخی موارد با کمی تأخیر ولی بسیار خوب برآورد شده است و به همین دلیل است که اختلاف مقادیر $RMSE$ و $PW-RMSE$ نسبت به حالت پیشین علیرغم بهبود مناسب هیدروگراف خیلی کاهش نیافته

است و بهبود نتایج را به درستی نشان نمی دهد. به طور مثال اگر فرضاً مقدار دبی اوج مشاهده ای در روز ۲۰ دسامبر برابر با ۵۰۰۰ cms باشد، مدل نیز این مقدار دبی سیلاب را به خوبی با وجود اوج بسیار شدید ولی با چند ساعت تاخیر برآورد نموده است که نشان از این دارد که مدل رفتار سیستم هیدرولوژیکی به خوبی تشخیص داده شده است. یکی از ضعف های معیار های سنجش خطا نیز در برخورد با این حالات رخ می دهد که ارزیابی ضعیفی از رفتار سیستم ارائه می نمایند. برای غلبه بر این مشکل بهترین راه حل پناه بردن به معیار های گرافیکی سنجش خطا می باشد که توانایی بسیار خوبی در ارزیابی های رفتار سیستم ارائه می نمایند. جهت وضوح بیشتر درباره این مسئله و اینکه به خوبی مشخص شود بهبود کم در پارامتر های آماری سنجش خطا نسبت به حالت بدون ذوب برف در اثر جابجایی کوچک در زمان های وقوع می باشد و اینکه پارامتر های آماری سنجش خطا در برخورد با این مسائل ناتوان هستند بهتر است به صورت دقیق تر به Q-Q دیاگرام در هر دو حالت بدون برف و با در نظر گرفتن برف توجه شود تا مسئله به خوبی روشن شود. در حالت بدون ذوب برف به ازای مقادیر دبی های تقریباً بیشتر از ۱۵۰۰ cms حتی بدون در نظر گرفتن ترتیب زمانی (اصل ترسیم Q-Q دیاگرام)، هیچ داده شبیه سازی شده ای برابر با آن مقدار وجود ندارد در حالیکه در حالت اخیر که ذوب برف در نظر گرفته شده است با ازای مقادیر تمامی دبی های اوج مقدار مشابهی در داده های شبیه سازی شده نیز وجود دارد که با حذف اثر زمان در ترسیم این دیاگرام بهبود بسیار مناسب نتایج بارز شده است و در اینجا است که اهمیت استفاده توأم از معیار های گرافیکی متفاوت و معیار های مختلف آماری سنجش خطا در بررسی های نیکوئی برآزش به خوبی مشهود می گردد. همچنین اگر به نمودار سری زمانی باقیمانده ها و هیدروگراف دبی ها با همدیگر توجه شود مشخص می گردد که با اینکه مقادیر دبی اوج برآورد شده مناسب است ولی توزیع باقیمانده ها این مطلب را نشان نمی دهد و این تنها به همان دلیل اختلاف زمانی و تاخیر اندک در داده های شبیه سازی شده می باشد. ذکر این نکته ضروری است که اندک تأخیر های زمانی بوقوع پیوسته در مدل سازی دراز مدت و پیوسته جریان از اهمیت خاصی برخوردار نمی باشد و نباید به این مسئله از منظر کاملاً متفاوت مدل سازی

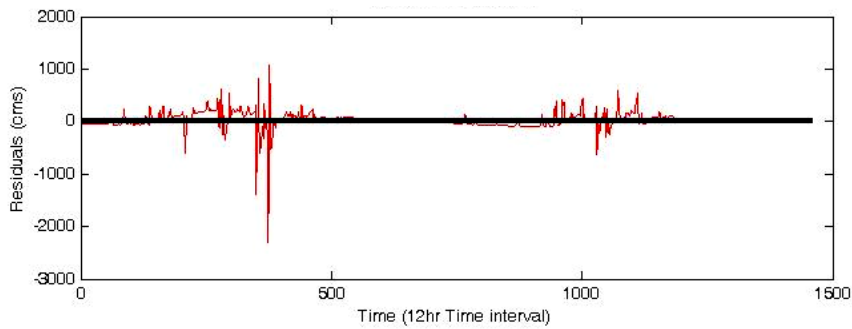
تک رخدادی (Single Event) نگاه نمود. چرا که پیش بینی های کوتاه مدت که اغلب دارای افق زمانی چند ساعته تا چند روزه می باشند، بیشتر در سیستم های هشدار سیل و ... کاربرد دارند و در مقابل انواع بلند مدت که دارای افق زمانی بیش از یک هفته هستند در مدیریت کلان منابع آب مانند بهره برداری بهینه آب از حجم ذخیره شده در مخازن سد ها و پایش خشکسالی ها کاربرد دارند [75]. اگر به شکل ۶-۵ توجه بیشتری گردد مشاهده می گردد که دبی های اوج همگی با تأخیر شبیه سازی شده است (شکل ۶-۷ تصویر برجسته شده را نمایش می دهد) و تقریباً موردی یافت نمی شود که دبی های اوج شبیه سازی شده زودتر به وقوع پیوسته باشد. توجیه این پدیده که چرا اساساً بایستی در مدل سازی این خطا (هر چند که از درجه اهمیت برخوردار نباشد) بوجود آمده باشد نیز با توجه به تأخیر مقادیر شبیه سازی شده به خوبی قابل درک خواهد بود. این پدیده را می توان اینگونه توجیه نمود که:

مشکلی که در کاربرد مدل های ذوب برف وجود دارد در استفاده از داده های دما رخ می دهد. در برخی روزهای فصول سرد سال که متوسط درجه حرارت روزانه زیر صفر درجه (یا دمای بحرانی ذوب که عددی نزدیک به این مقدار است) می باشد بر اساس مدل ذوب برف هیچگونه ذوبی در آن گام زمانی یا آن روز صورت نمی گیرد و افزایش متناسب با بارش، در هیدروگراف مدل سازی شده در زمان حقیقی مشاهده نمی گردد حال آنکه در حالت طبیعی با اینکه میانگین درجه حرارت زیر صفر درجه است ولی در اواسط روز دمای هوا از دمای بحرانی ذوب بالاتر رفته و مقدار زیادی رواناب تولید می گردد و شاهد افزایش چشمگیر دبی جریان مشاهده ای در دوره بارش برفی و جامد هستیم. به همین دلیل است که مقادیر دبی های سیلابی تا زمان بالا رفتن درجه حرارت در گام های زمانی بعد بوقوع نمی پیوندد و با تأخیر صورت می گیرد. بنابراین اساساً منبع خطایی که در بروز این پدیده دخالت دارد داده های نامناسب دمای میانگین روزانه می باشد که نمی تواند افزایش دمای اواسط روز را به بالاتر از دمای بحرانی نشان دهد. برای غلبه بر این مشکل نیز بهتر است که در صورت در دسترس بودن داده، گامهای زمانی مدل سازی کوچکتر انتخاب گردد تا مثلاً با داده های ساعتی از دما

بتوان توزیع زمانی تغییرات دما را به خوبی به مدل معرفی نمود. مشابه این مطلب نیز توسط نجف زاده و همکاران (۱۳۸۳) در کاربرد مدل SRM برای شبیه سازی جریان روزانه با مدل ذوب برف اشاره شده است [12].

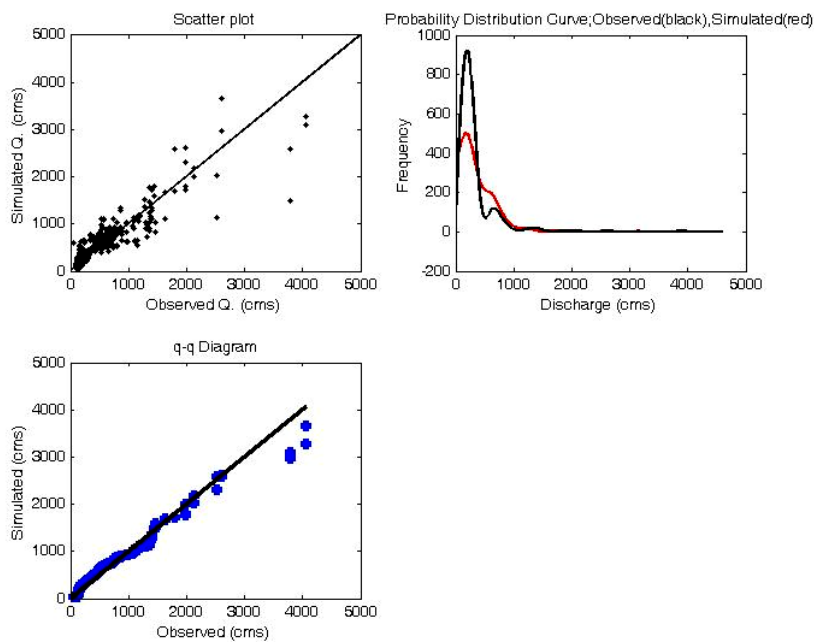


(الف)



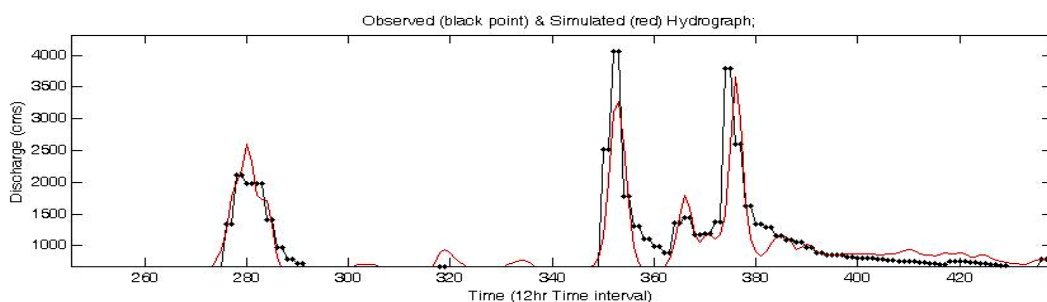
(ب)

شکل ۵-۶. نمایش هیدروگراف (الف) و سری زمانی باقیمانده ها (ب) برای دوره صحت سنجی (معیار گرافیکی)



شکل ۶-۶. نمایش معیار های گرافیکی سنجش خطا برای دوره صحت سنجی

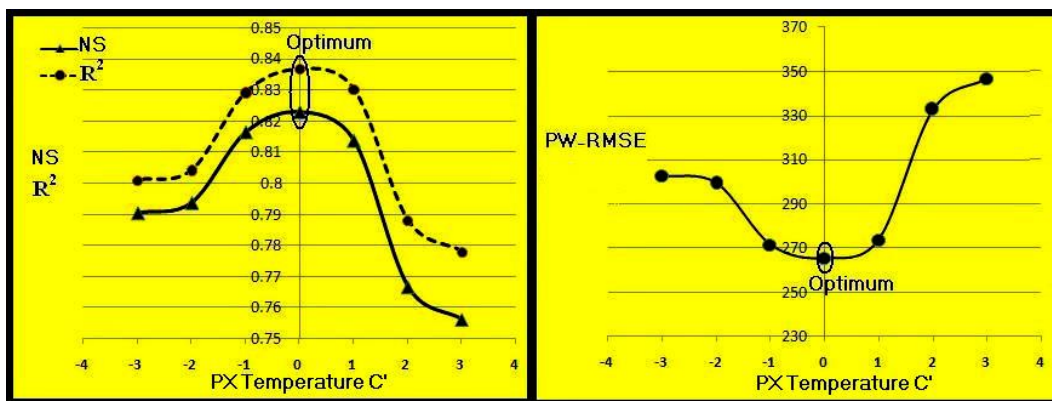
از پارامترهای بسیار مهم برای مدل سازی ذوب برف دمای ریزش برف (PX Temperature) و دمای بحرانی ذوب (Base Temperature) می باشد که مقادیر اولیه آنها با توجه به تحقیقات صورت گرفته تعیین شده و سپس در طی کالیبراسیون مقادیر بهینه آنها تعیین شده است. به طور معمول دمای ریزش و ذوب برف به ترتیب برابر با ۲ و صفر درجه سانتیگراد و یا نزدیک به این اعداد در نظر گرفته می شود [2,17] که در این پژوهش به بررسی این مهم نیز پرداخته شده است و مقادیر بهینه آنها تعیین شده است.



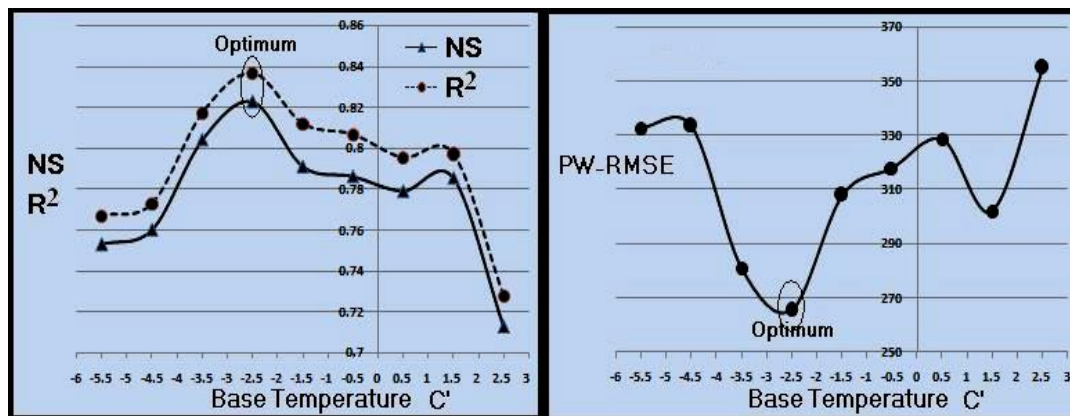
شکل ۶-۷. تصویر برجسته شده دبی های اوج از دوره صحت سنجی (به شکل 5-7 توجه شود)

در ابتدای امر با توجه به توصیه های صورت گرفته توسط USACE (2000) [2] مقادیر دمای ریزش و ذوب برف برابر با ۲ و صفر درجه در نظر گرفته شد و با این پیش فرض به کالیبره نمودن سایر پارامترهای مدل پرداخته شده است. پس از اینکه از مقادیر نهایی سایر پارامتر اطمینان حاصل شد به بررسی اثر دمای ریزش و ذوب برف پرداخته شد. در ابتدای امر دمای ریزش برف در محدوده اطراف عدد ۲ تغییر داده شد و مشاهده گردید که با کاهش دمای ریزش برف نتایج بهبود می یابد و مقدار تقریبی این دما، با توجه به حداکثر شدن مقادیر NS و R^2 و حداقل شدن PW-RMSE بدست آمد. سپس به کالیبره نمودن دمای شروع ذوب نیز پرداخته شد و مقدار بهینه آن مشخص گردید. سپس دوباره به کالیبره کردن دمای ریزش برف و بعد از آن دوباره به کالیبره کردن دمای شروع ذوب پرداخته شد که پس از چندین بار تکرار این الگوریتم نهایتاً مناسب ترین مقادیر برای دمای ریزش برف برابر با صفر درجه و برای شروع ذوب ۲/۵- درجه حاصل شد. برای اطمینان کامل از انتخاب این مقادیر، ابتدا با ثابت نگه داشتن مقدار دمای شروع ذوب (۲/۵- درجه)، مقادیر دمای ریزش برف به ازای مقادیر کمتر

و بیشتر از صفر درجه تغییر داده شد و به ارزیابی نتایج پرداخته شد. شکل ۶-۸ نشان دهنده تغییرات پارامترهای سنجش خطا در دماهای ریزش برف متفاوت است و نشان دهنده همان مقدار بهینه صفر درجه می باشد. در سناریوی بعدی مقدار دمای ریزش برف (صفر درجه) ثابت نگه داشته شد و به بررسی نتایج با تغییر مقدار دمای شروع ذوب پرداخته شد. در این حالت نیز نتایج تأیید کننده مقدار بهینه ۲/۵- درجه برای شروع ذوب برف بود. نتایج این بخش نیز در شکل ۶-۹ نمایش داده شده است.



شکل ۶-۸. تعیین دمای بهینه ریزش برف (PX Temp) با توجه به Nash-Sutcliffe, R^2 و PW-RMSE.



شکل ۶-۹. تعیین دمای بهینه شروع ذوب برف (Base Temp) با توجه به معیار Nash-Sutcliffe, R^2 و PW-RMSE.

شاید در وهله اول این سوال به نظر برسد که چرا دمای ذوب برف یک عدد منفی بدست آمده است و اینکه چرا مثلاً مقدار صفر درجه که ظاهراً معقول تر به نظر می رسد به عنوان بهینه تأیید نشده است؟ در پاسخ به این پرسش می توان اینگونه اظهار نظر نمود که مقدار دمای صفر درجه که برای شروع ذوب یخ و برف در نظر گرفته می شود برای حالتی می باشد که ترکیب آب خالص باشد. طبیعی به نظر می رسد که در وضعیت کنونی که مقدار آلاینده های زیادی در اتمسفر وجود دارند بارش صورت

گرفته دارای املاح محلول می باشد. با اضافه شدن املاح به آب، نقطه انجماد به پایین تر از صفر تنزل کرده و به طور مشابه دمای شروع ذوب نیز کاهش می یابد. از طرف دیگر عامل مهمتری که در کاهش درجه ذوب برف دخالت دارد عامل فشار می باشد. همانطور که قبلاً اشاره شد برای اینکه آب در صفر درجه منجمد شود هم باید عاری از املاح محلول باشد و هم اینکه این دما برای ارتفاع صفر از سطح دریا (فشار اتمسفری برابر با یک) تعریف شده است. چنانچه دو ظرف از آب خالص در اختیار داشته باشیم و تحت فشار های متفاوت شروع به سرد کردن آنها بپردازیم ظرفی که تحت فشار بیشتری است در دمای بالاتر و زودتر انجماد می یابد. در عمل عکس این پدیده در حوضه های آبریز مرتفعی چون کارون III که دارای متوسط ارتفاع بیش از ۲۴۰۰ متر می باشند اتفاق می افتد. یعنی هنگامی که برف بر ارتفاعات باریده می شود از آنجا که با افزایش ارتفاع از فشار هوا کاسته می شود باعث می شود که مولکول های برف آزادانه تر در حرکت باشند و در نتیجه قبل از اینکه دما به صفر درجه برسد عمل ذوب اتفاق بیافتد و بدین ترتیب دمای شروع ذوب به زیر صفر درجه تنزل می یابد.

۶-۱-۲ بررسی تأثیر دوره Warm-Up در بهبود نتایج مدل:

در این پژوهش برای رسیدن به شرایط اولیه بهتر از دوره Warm-Up یکساله در ابتدای دوره کالیبراسیون و صحت سنجی استفاده شده است. برای بررسی تأثیر دوره Warm-Up در سه سناریوی جدید، دوره Warm-Up از ابتدای دوره کالیبراسیون (برای حالت در نظر گرفتن ذوب برف) حذف گردید و مدل اجرا شد. در سناریوهای بعدی به ترتیب از یکسال و دو سال دوره Warm-Up در ابتدای کالیبراسیون استفاده شده است. همانطور که در جدول ۶-۳ نشان داده شده است با بکارگیری دوره Warm-Up در اکثر پارامتر های سنجش خطا بهبود نتایج دریافت می گردد. همچنین به طور واضح تر با افزایش طول دوره Warm-Up مدل تخمین های مناسب تری از دبی جریان را ارائه می نمایاند.

جدول ۳-۶. محاسبه معیار های آماری نیکوئی برازش برای بررسی تأثیر دوره Warm-Up در کالیبراسیون

معیارهای آماری نیکوئی برازش	بدون Warm-Up	Warm-Up یکساله	Warm-Up دو ساله
Nash-Sutcliffe	0.79	0.80	0.79
Bias(cms)	-48	-19	-5.3
R ²	0.81	0.81	0.84
PTVE %	-11.4	-4.5	-1.5
RMSE (cms)	172	168	125
PW-RMSE (cms)	252	240	151.9

۳-۱-۶ مقایسه نتایج مدل مفهومی HEC-HMS (به همراه مدل SMA) با سایر مدل ها:

جهت ارزیابی مناسب و کامل مدل سازی انجام شده در این پژوهش، مقایسه آن با سایر مدل های مفهومی شبیه سازی کننده جریان رودخانه خالی از لطف نمی باشد. نکته ای که در این ارزیابی ها بایستی جزو ملاک های ارزیابی قرار گیرد این است که در کنار مقایسه پارامتر های آماری و گرافیکی سنجش خطا برای هر مدل بایستی به نکات مهمی همچون طول دوره شبیه سازی، گام های زمانی، وضعیت اقلیمی منطقه، تعداد ایستگاه های باران سنجی مورد استفاده، یکپارچه یا توزیعی بودن داده های ورودی، مساحت ناحیه مورد مطالعه، اختلاف ارتفاعات مناطق، متوسط آورد جریان و واریانس داده ها و وجود و عدم وجود داده های پرت (اوج های شدید) در سری جریان توجه نمود.

نجفی و همکاران (۱۳۸۳) برای محاسبه جریان ناشی از ذوب برف و بارش باران در حوضه سد مهاباد، چهارده پارامتر ورودی به مدل را برای ۴ طبقه ارتفاعی محاسبه و تعیین کرده و بعد از اعمال ورودی ها، هیدروگراف شبیه سازی شده و اندازه گیری شده دارای ضریب رگرسیون و اختلاف حجم به ترتیب برابر با ۰/۸۵ و ۳/۷۹- درصد حاصل شده است [13]. مقدار ضریب رگرسیون حاصل از مدل سازی با SRM مشابه با مقدار بدست آمده از مدل سازی با HEC-HMS (با تکیه بر مدل SMA) می باشد (به جدول ۲-۶ رجوع گردد) ولی مقدار اختلاف حجم در مدل SRM نسبت به HEC-HMS کمتر بدست آمده است. اگر شرایط مدل سازی SRM به خوبی مورد بررسی قرار گیرد مشاهده

می‌گردد که حصول این نتایج خوب در حالتی رخ داده است که اولاً طول دوره کوتاه مدت چهار ماهه (۱۲ اسفند ۱۳۷۵ تا ۳۰ خرداد ۱۳۷۶) برای شبیه‌سازی انتخاب شده است و اینکه مساحت ناحیه مورد مطالعه (۸۴۱ کیلومتر مربع) نسبت به حوضه کارون III (۲۴۲۰۰ کیلومتر مربع) بسیار کوچک می‌باشد. پیش‌بینی‌های کوتاه مدت از دقت بیشتر و قابلیت بهتری در شبیه‌سازی برخوردارند چرا که در شرایط همگن تر و یکنواخت تری قرار می‌گیرند و در عوض در پیش‌بینی‌های دراز مدت منابع خطای بیشتری ظهور یافته و شبیه‌سازی آنها بسیار پیچیده تر می‌گردد که به همین نسبت هم از اهمیت بیشتری برخوردارند [75,76]. در پیش‌بینی‌های کوتاه مدت مدل فقط برای شرایط ترسالی یا خشکسالی کالیبره می‌گردد در حالیکه در این پژوهش مدل به گونه‌ای کالیبره شده است که علاوه بر اینکه در دو سال شبیه‌سازی (یک سال تر و یک سال خشک) جواب‌های بسیار خوبی ارائه نموده است حتی در یک سیکل هیدرولوژیکی یکساله هم در فصول بدون بارندگی برآورد بسیار مناسبی از جریان ارائه کرده است که این مهم (برآورد جریان در دوره فاقد بارش) در مدل‌سازی با SRM در اواخر دوره شبیه‌سازی بد برآورد شده است و دلیل آن نیز افزایش دما، تبخیر و برداشت احتمالی آب توسط روستائیان گزارش شده است. همچنین با افزایش مساحت تحت پوشش حوضه آبریز ناهمگنی‌های ویژگی‌های حوضه بیشتر شده و به نوعی موجب دشواری مدل‌سازی و دقت کمتر می‌گردد. همچنین در مدل‌سازی با SRM برای حوضه آبریز مهاباد از ۷ ایستگاه باران‌سنجی استفاده نموده‌اند (با ازای هر ۱۰۰ کیلومتر مربع یک ایستگاه باران‌سنجی) در حالیکه در این پژوهش به دلیل کمبود ایستگاه‌های با آمار کامل برای حوضه بسیار بزرگ کارون III فقط از آمار ۳۰ ایستگاه (به ازای هر ۸۰۰ کیلومتر مربع یک ایستگاه باران‌سنجی) استفاده شده است. همچنین حداکثر اختلاف ارتفاع در حوضه مهاباد ۱۴۶۳ متر است در حالیکه ناهمگونی ارتفاعی بسیار زیادی (۳۷۰۹ متر اختلاف ارتفاع) در حوضه کارون III وجود دارد و با اینکه در حوضه مهاباد اختلاف ارتفاع خیلی کمتر از کارون III می‌باشد ولی برای مدل ذوب برف از چهار طبقه ارتفاعی استفاده شده است در حالیکه در این پژوهش برای هر زیر حوضه تنها از دو طبقه ارتفاعی استفاده شده است. مدل SRM

علاوه بر استفاده از داده های دمایی برای مدل سازی ذوب برف به مساحت پوشش برف در مقیاس روزانه و مقدار آب معادل ذوب برف نیازمند بوده و بایستی به مدل معرفی گردد که کارایی مدل را در نواحی فاقد آمار با دشواری روبرو می سازد ولی در مدل HEC-HMS به هیچ یک از این داده های مهم (در SRM) نیازمند نمی باشد. با توجه به تمامی موارد ذکر شده می توان شرایط سخت دشواری در حوضه کارون III نسبت به حوضه مهاباد را خاطر نشان کرد و اینکه با توجه به این شرایط مدل HEC-HMS با تکیه بر مدل محاسبه تلفات SMA نتایج بسیار مناسب تری از مدل SRM ارائه نموده است. همچنین Songveon و همکاران (۲۰۰۳) با عکس های ماهواره های MODIS و NOAA سطح پوشش برف حوضه ریواجو^۱ را به دست آوردند و رواناب ناشی از ذوب برف را شبیه سازی کردند. مدل SRM رواناب حوضه ریواجو را با استفاده از عکس های ماهواره های MODIS و NOAA به ترتیب با اختلاف حجم ۴۶/۶- و ۳۸/۶- درصد و با مجذور ضریب همبستگی ۰/۲۲ و ۰/۶۳ شبیه سازی کرده است. با در نظر گرفتن نتایج حاصل از مدل سازی در حوضه ریواجو می توان کارایی بسیار مناسب تر مدل HEC-HMS در برآورد حجم کل رواناب حتی بدون داده های پوشش برف را نتیجه گیری نمود [13,18].

همچنین نجف زاده و همکاران (۱۳۸۳) برای شبیه سازی جریان رودخانه در یکی از زیر حوضه های حوضه آبریز زاینده رود (پلاسجان)، تغییرات سطح پوشش برف را با استفاده از ۲۸ عکس ماهواره نوآ به مدل SRM معرفی نمودند. آنها برای ارزیابی مدل SRM از داده های سال ۷۱-۱۳۷۰ استفاده نموده و مدل حجم رواناب سالانه را با ۰/۷۸ درصد اختلاف و دبی جریان روزانه را با مجذور ضریب همبستگی ۰/۹۲ برآورد کرد در حالیکه HEC-HMS دارای درصد خطای حجم سالانه ۱۱/۴ درصد و مجذور ضریب همبستگی ۰/۸۴ می باشد (جدول ۶-۲ را ببینید). اکنون شرایط شبیه سازی در مدل سازی با SRM بیان شده و قیاسی با شرایط این پژوهش مقایسه می گردد. زیر حوضه پلاسجان از

^۱ Rio Ojo

حوضه آبریز زاینده رود دارای اختلاف ارتفاع ۱۸۵۴ متر بوده و مساحت این زیر حوضه ۱۶۳۴ کیلومتر مربع می باشد. تا بدین جا می توان بیان نمود که گرچه مدل HEC-HMS پارامتر های آماری سنجش خطای مشابه با مدل SRM را کمی نامناسب تر برآورد نموده است ولی با در نظر گرفتن این دو ویژگی می توان این نتیجه گیری را نمود که مدل HEC-HMS نتایج قابل قبولی ارائه کرده است. همچنین دوره آماری استفاده شده در تحقیق نجف زاده و همکاران (۱۳۸۳) نیز کوتاه بوده و دوره های ترسالی و خشکسالی را به صورت توأم در بر نداشته است. چنانچه طول دوره شبیه سازی در SRM بیشتر انتخاب گردد (مانند سه سال صحت سنجی در این پژوهش) قطعاً در برخورد با سالهای مختلف، کارایی مدل به این خوبی نخواهد بود و ضعیف تر عمل خواهد نمود. علاوه بر این در مدل سازی با SRM از تعداد ۱۱ ایستگاه باران سنجی (با ازای هر ۱۵۰ کیلومتر مربع یک ایستگاه) استفاده شده است که نسبت به پژوهش انجام شده با HEC-HMS در این رساله خیلی تراکم مناسب تری داشته و در معرفی میزان بارش واقعی به مدل از دقت بالاتری بهره گرفته شده است.

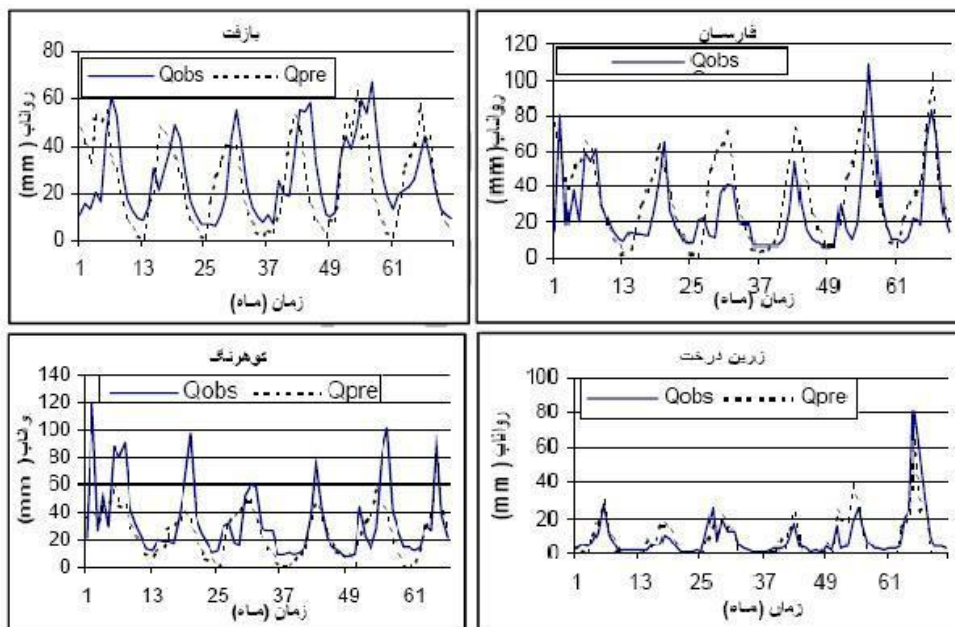
از دیگر مدل هایی که در زمینه مدل سازی جریان رودخانه در زیر حوضه های کارون مورد استفاده قرار گرفته است مدل SDI می باشد. شریفی و همکاران (۱۳۸۳) پس از تکمیل و انطباق مدل SDI^۱ با شرایط ایران و اضافه نمودن تبخیر روزانه و سیستم بهینه سازی خودکار پارامتر ها بنام ISDI به ارزیابی مدل در هشت زیر حوضه پرداختند که چهارتا از آنها با نام بازفت، فارسان، کوهنگ و زرین درخت در ناحیه کارون شمالی قرار می گیرند [46]. مشخصات زیر حوضه ها و پارامتر های سنجش خطای گزارش شده توسط آنان در جدول ۶-۴ ارائه شده است. با توجه به مقادیر ضریب همبستگی، اختلاف حجم و هیدروگرافهای ماهانه (شکل ۶-۱۰) می توان نتیجه گیری نمود که مدل سازی انجام شده با مدل SDI جوابهای مناسبی ارائه نموده است. این نتایج در حالی می باشد که از پارامتر های روزانه برای انجام مدل سازی بهره گرفته شده است در حالیکه ارائه نتایج به صورت ماهانه می باشد. واضح است که در این هنگام به دلیل اینکه برآیند خطاها در طول روزهای ماه، عددی کوچک

^۱ Soil Dryness Index (Mount, 1972)

می شود به همین دلیل به طور مشخص هنگامی که نتایج مدل سازی روزانه به صورت ماهانه بیان می گردد عملکرد مدل بهتر از حالت ارائه نتایج روزانه نشان داده می شود.

جدول ۴-۶. مشخصات زیر حوضه ها و پارامترهای سنجش خطای حاصل از مدل SDI..

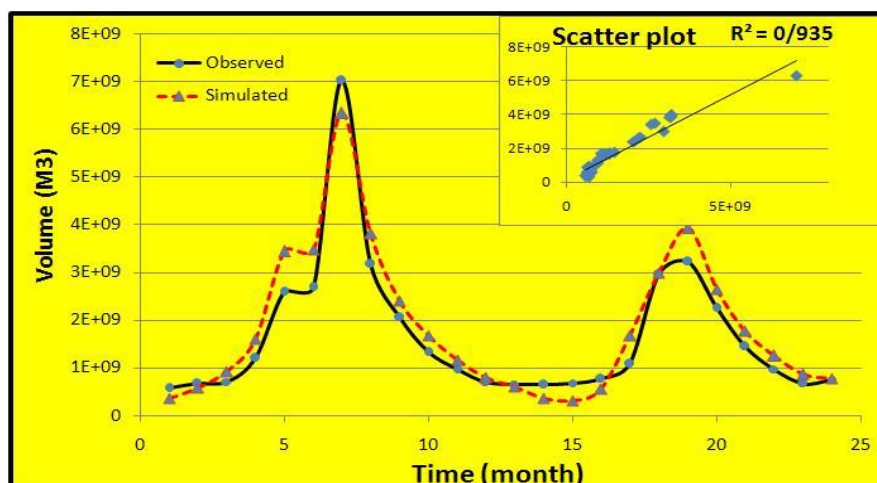
زیر حوضه	مساحت km2	اختلاف ارتفاع m	اختلاف حجم ماهانه %	R ²
بازفت	۲۱۸۳	۳۵۹۰	۱۱,۲۶	۰,۳۴
کوهرنگ	۶۲۴	۱۶۶۸	۱۶,۵۷	۰,۵۰
فارسان	۹۲۸	۱۷۰۱	۲۱,۱	۰,۵۰
زرین درخت	۴۲۲	۱۱۲۵	۹,۲۷	۰,۷۳



شکل ۶-۱۰. هیدروگراف های حاصل از شبیه سازی با مدل SDI (رواناب ماهانه) [46].

جدول ۵-۶. معیارهای آماری نیکویی برازش برای دوره صحت سنجی روزانه و ماهانه مدل HEC-HMS

صحت سنجی ماهانه	معیارهای آماری نیکویی برازش	صحت سنجی روزانه
Nash-Sutcliffe	0.82	0.91
Bias/ Mean Volume	0.122	0.113
R ²	0.84	0.93
MPAE %	36.5	24.6
PTVE %	11.3	11.3
RMSE/ Mean Volume	0.51	0.25
PW-RMSE/ Mean Volume	0.90	0.29

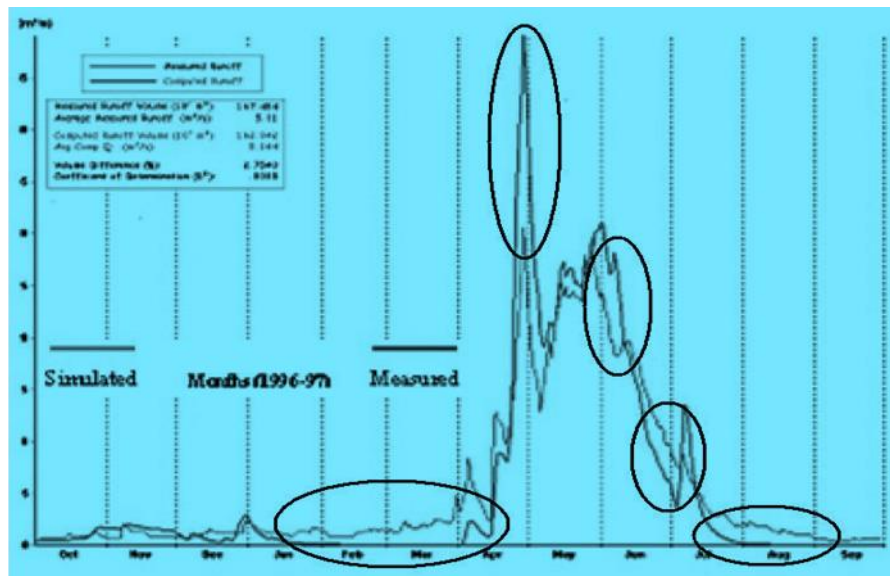


شکل ۶-۱۱. هیدروگراف و نمودار پراکندگی مدل سازی ماهانه (با ذوب برف) در دوره صحت سنجی با HEC-HMS.

برای مقایسه راحت تر نتایج مدل سازی SDI با نتایج حاصل از مدل سازی با HEC-HMS، معیار های آماری و گرافیکی سنجش خطای ماهانه نیز برای مدل سازی انجام شده با HEC-HMS در جدول ۶-۵ و شکل ۶-۱۱ ارائه شده است. اگر حتی سایر شرایط مدل سازی (از قبیل مساحت کم نسبت به مدل سازی انجام شده با HEC-HMS) در نظر گرفته نشود و فقط به مقایسه پارامتر های آماری و هیدروگراف ماهانه دو مدل پرداخته شود (جدول ۶-۴ و ۶-۵ و اشکال ۶-۱۰ و ۶-۱۱ مقایسه گردد) به خوبی عملکرد بسیار مناسب و دقیق تر مدل سازی انجام شده با HEC-HMS نسبت به SDI در مقیاس ماهانه (و حتی روزانه) مشخص می گردد.

نجفی ایگدیر و همکاران (۱۳۸۶) برای برآورد رواناب حاصل از ذوب برف به کمک مدل SRM در حوضه شهرچائی (ارومیه) با استفاده از تصاویر ماهواره NOAA-AVHRR سطح پوشش برف را به صورت روزانه استخراج نموده و میزان رواناب را شبیه سازی نمودند (Oct 1996-Sep 1997). این حوضه دارای مساحت ۲۰۰ کیلومتر مربع و اختلاف ارتفاع ۲۰۸۲ متر می باشد که به سه طبقه ارتفاعی تقسیم شده است [18]. میزان ضریب همبستگی و اختلاف حجم گزارش برای این مدل سازی به ترتیب برابر با ۰/۸۱ و ۲/۷۵٪ می باشد. برای ارزیابی بهتر مدل بهتر است که به هیدروگراف شبیه سازی شده (شکل ۶-۱۲) و شرایط مدل سازی (مساحت کم، اختلاف ارتفاع، طبقات ارتفاعی، طول دوره مدل سازی و ...) توجه گردد. همانطور که در هیدروگراف بوضوح قابل دریافت است مدل نه تنها

دبی های اوج را نتوانسته است به درستی برآورد نماید بلکه در خیلی از بازه ها (Jan-Apr, Jun-Aug) میزان رواناب را با اختلاف زیادی برابر با صفر تخمین زده است. به طور کلی مدل در دوره بارش و ذوب برف (Sep-Aug) تخمین نامناسبی ارائه نموده است.



شکل ۶-۱۲. هیدروگراف شبیه سازی با مدل SRM در حوضه شهرچائی [18].

از دیگر مدل هایی که در زمینه مدل سازی جریان رودخانه مشهور می باشد مدل SWAT می باشد که به فراوانی در ایالات متحده و سایر نقاط دنیا مورد استفاده قرار گرفته است. (Omani et al., 2007) از این مدل برای ارزیابی عملیات مدیریتی در حوضه آبریز قره سو (از زیر حوضه های کرخه) استفاده نمودند [22]. مساحت این حوضه ۵۹۷۳ کیلومتر مربع بوده و اختلاف ارتفاع حداکثری در آن برابر با ۲۰۷۷ متر می باشد. طول دوره مدل سازی در این پژوهش برای کالیبراسیون شش سال (Jan1991- Dec1996) و برای صحت سنجی چهار سال (Jan1997-Dec2000) انتخاب شده است. همچنین مدت چهار سال (1987-1990) به عنوان دوره Warm-Up اختصاص داده شده است. حوضه در محیط GIS و با کمک DEM و شبکه آبراهه ای به ۶۶ زیر حوضه تقسیم شده است. هر زیر حوضه نیز به ۴۳۷ HRU^۱ قسمت شده است. سپس داده های توزیعی خاک، پوشش سطحی و DEM برای هر HRU به

^۱ Hydrologic Response Unit

صورت یک ناحیه یکپارچه^۱ به همراه داده های روزانه باران و رواناب سطحی به مدل معرفی شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی ماهانه جریان در جدول ۶-۶ ارائه شده است.

جدول ۶-۶. نتایج مدل SWAT در شبیه سازی ماهانه جریان برای چهار نقطه کنترل [22].

Monitorig Station	Calibration		Validation	
	R ²	Nash-Sutcliffe	R ²	Nash-Sutcliffe
Khers abad	0.89	0.90	0.91	0.50
Doab merek	0.85	0.87	0.94	0.93
Hojat abad	0.80	0.78	0.86	0.85
Gharabaghestan	0.72	0.71	0.71	0.70

همانطور که از نتایج مشخص شده در جدول ۶-۶ بر می آید مدل SWAT به خوبی توانسته است که جریان ماهانه را شبیه سازی نماید اما با مقایسه با نتایج ماهانه مدل HEC-HMS (جدول ۵-۶) به سادگی می توان قضاوت نمود که با توجه با شرایط حوضه آبریز مطالعه شده، نتایج مدل سازی با HEC-HMS بهتر از تحقیق مذکور بوده است. به دلیل گستردگی استفاده از مدل SWAT پاره ای از پژوهش های معتبر گزارش شده توسط USDA-ARS با این مدل به صورت خلاصه در جدول ۶-۷ گرد آوری شده است [21]. با توجه به جدول ۶-۷ به خوبی می توان کارایی بسیار مناسب مدل HEC-HMS (به همراه مدل SMA) را نسبت به مدل SWAT حتی با وجود شرایط نامناسب تر مدل سازی (مدل سازی یکپارچه، مساحت زیاد حوضه، اختلاف ارتفاع و ...) در هر دو مقیاس روزانه و ماهانه نتیجه گیری نمود.

^۱ Lumped Area

جدول ۶-۷. ارائه نتایج شبیه سازی جریان با مدل SWAT در نقاط مختلف جهان [21]*

Reference	Watershed	Area Km ²	Time period C:Calibration V:Validation	Calibration				Validation			
				Daily		Monthly		Daily		Monthly	
				R ²	NS	R ²	NS	R ²	NS	R ²	NS
Wu and Xu, 2006	Amite, Tamgipahoa and Tickfaw (Louisiana)	660 to 3434	C:1975-77 V:1979-99	**	0.83 to 0.93	**	0.94 to 0.96	**	0.69 to 0.78	**	0.81 to 0.87
Watson et al, 2005	Woody Yaloak (Australia)	306	C:1978-89 V:1990-2001	**	0.51	**	0.77	**	0.47	**	0.79
Saleh and Du, 2004	Upper North Bosque, Texas	932.5	C:1994-Jun95 V:Jul95-Jul99	**	0.17	**	0.50	**	0.62	**	0.78
Kaur et al, 2004	Nagwan (India)	9.58	Varying periods	0.76	0.71	**	**	0.83	0.54	**	**
Cao et al, (2006)	Motueka New Zealand	47.9 to 1756	C:1990-94 V:1995-2000	0.52 to 0.82	0.36 to 0.78	**	**	0.41 to 0.75	0.35 to 0.72	**	**
Arabi et al, 2006	Dreisbach & Smith Fry (Indiana)	6.2 to 7.3	C:1975-May77 V:Jun1977-78	**	**	0.92 & 0.86	0.84 & 0.73	**	**	0.87 & 0.81	0.73 & 0.63
Green et al, 2006	South Fork of Iowa River	580.5	C:1995-98 V:1999-2004	0.7	0.7	0.9	0.9	0.5	0.4	0.6	0.5
Jha et al, 2006	Upper Mississippi	44750	C:1968-87 V:1988-97	0.67	0.58	0.74	0.69	0.75	0.65	0.82	0.81
Mishra et al, 2007	Banha India	17	C:1996 V:1997-2001	0.93	0.70	0.99	0.99	0.78	0.60	0.92	0.88
Zhang et al, 2007	Loohe River China	5239	C:1992-96 V:1997-2000	0.82	0.65	0.82	0.64	0.74	0.54	0.86	0.82
Kalin and Hantush, 2006	Pocono Creek Pennsylvania	98.8	**	0.74	0.74	0.85	0.83	0.70	0.64	0.81	0.66

* با جدول ۶-۵ مقایسه گردد (به تفاوت ارائه نتایج در مقیاس روزانه و ماهانه توجه گردد).

۶-۱-۴ جمع بندی و ارزیابی کلی مدل مفهومی (SMA) HEC-HMS:

بررسی های آماری صورت گرفته روی داده های دبی در سالهای منتخب نشانگر شرایط متفاوت انتخاب شده جهت کالیبراسیون و صحت سنجی مدل می باشد که به نوعی دشواری عملیات مدل سازی و همچنین توانایی مدل HEC-HMS و مدل نوین پیوسته محاسبه تلفات SMA را نمایانگر می باشد. وجود اوج های بسیار شدید، کشیدگی زیاد در داده های بارش-رواناب، تعداد زیاد داده های پرت^۱، مساحت بسیار زیاد و اختلاف ارتفاع و ناهمگونی های بسیار در خصوصیات فیزیوگرافیک حوضه، دوره دراز مدت و شرایط مختلف مدل سازی، کمبود تعداد ایستگاه های باران سنجی با آمار مناسب، همبستگی های بسیار ضعیف بین داده های بارش-رواناب (به شکل ۴-۵ توجه شود) و مدل

^۱ Outliers data

سازی یکپارچه حوضه بزرگی چون کارون III همگی دلالت بر شرایط بسیار دشوار مدل سازی می کند (به جدول ۳-۲ مراجعه گردد). در این شرایط دشوار عملیات بهینه سازی پارامترها با وجود درجه آزادی بسیار زیاد (درجه آزادی ۱۸ برای مدل SMA، ۶ برای مدل مخزن خطی، ۲ برای هیدروگراف کلارک در هر زیر حوضه و ۲ برای مدل روندیابی ماسکینگام برای هر بازه) مدل های مورد استفاده به صورت دستی و با استفاده از قضاوت مهندسی به روش تصحیح مکرر پارامترها به انجام رسیده است. همانطور که معیارهای مختلف سنجش خطا نشان می دهد مدل کارایی بسیار مناسبی حتی فراتر از حد انتظار ارائه نموده است. مدل نه تنها حجم رواناب را به دقت مناسبی برآورد نمود بلکه مقادیر دبی های اوج بسیار شدید و جریان در دوره های فاقد بارش و دبی پایه را نیز به خوبی تخمین زده است. مدل HEC-HMS (به همراه مدل پیوسته محاسبه تلفات SMA) در مقایسه با سایر مدل های مفهومی توانایی بسیار بالاتری نه تنها در مدل سازی با مقیاس روزانه بلکه حتی در برآورد رواناب ماهانه از خود نشان داده است. همچنین حصول این نتایج ارزنده نه تنها بیانگر دقت بسیار مناسب مدل بوده، همچنین نشان دهنده قابلیت کالیبراسیون مناسب مدل که با قضاوت مهندسی و سعی و خطا صورت گرفته است نیز می باشد.

۲-۶ مدل فازی ALM:

یکی از مهم ترین مسائلی که در مدل سازی های هوشمندی از قبیل شبکه های عصبی مصنوعی در ابتدای کار با آن مواجه هستیم تعیین ورودی های مناسب برای شبیه سازی مقادیر خروجی می باشد که این تشخیص بر عهده کاربر گذاشته شده و بنابراین تجربه و دانش انسانی نقش بسزایی در نتایج خروجی خواهد داشت [77]. در این روشها معمولاً به کمک روشهای ^۱CC و با در نظر گرفتن نمودارهای خودهمبستگی ^۲(ACF) و خودهمبستگی جزئی ^۳(PACF) به بررسی ارتباط متغیرهای ورودی و

^۱ Cross Correlation

^۲ Auto Correlation Function

^۳ Partial ACF

متغیر های پیش بینی پرداخته می شود و بدین گونه از بین متغیر های مختلف مناسب ترین ها انتخاب می گردند [51]. اما همانطور که پیشتر ذکر گردید یکی از قابلیت های مدل هوشمند ALM این است که از بین متغیر های مختلف معرفی شده به آن توانایی انتخاب مناسب ترین ورودی ها برای تقسیم بندی فضاهای متغیر ها و متغیر های تخمین گر را دارد. ALM نیازی به شرایط اولیه برای شروع مدل سازی ندارد و در هر مرحله از مدل سازی یا آموزش، بهترین متغیر برای تقسیم بندی فضای متغیر ها و بهترین متغیر برای استخراج تابع ضمنی غیر خطی را مشخص می نماید. به همین ترتیب متغیر های مناسب مشخص شده و بقیه حذف می گردد [50]. با توجه به مطالب ذکر شده در سناریو های مختلف از ترکیب بندی های مختلف داده ها استفاده شده که تا حد امکان و در صورت لزوم، ALM به کمک قابلیت خود به انتخاب مناسب ترین ورودی ها برای پردازد.

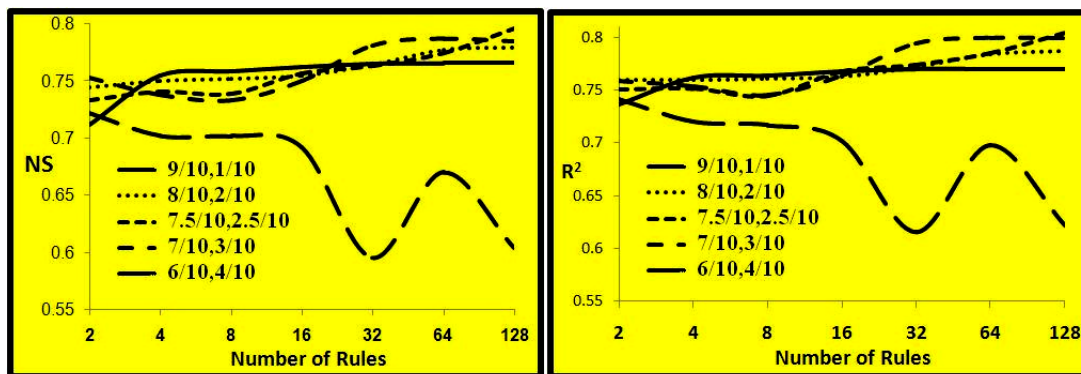
۶-۲-۱ بررسی نقاط فازی و توابع عضویت مناسب:

در تقسیم بندی فازی، مرز قسمت مقادیر کوچک، مقداری بزرگتر از میانه و مرز قسمت مقادیر بزرگ، مقداری کوچکتر از میانه می باشد. بنابراین نواحی مربوط به مقادیر کوچک و بزرگ با هم همپوشانی دارند. اگرچه نقاط بهینه برای تقسیم بندی فازی می توانند بطور تکراری محاسبه شوند اما سیستمهای فازی به نقاط تقسیم حساسیت زیادی ندارند [50,60,62]. مدل سازیهای انجام شده با نقاط تقسیم فازی مختلف نشان داده است که در مدل سازی ALM، نقاط مناسب برای تقسیم بندی فازی به ترتیب اولین و سومین چارک داده ها برای مقادیر بزرگ و کوچک متغیر می باشند که مشابه این مطلب توسط Bagheri Shouraki and Honda (1999b) و Taheri Shahraini *et al.*, (2009) اشاره شده است [60,62]. بدین رو اولین الگوریتمی که برای ارزیابی مدل فازی ALM در شبیه سازی جریان رودخانه طراحی گردید تعیین نقاط فازی مناسب برای تقسیم بندی می باشد. برای بررسی این موضوع ابتدا داده های بارش میانگین حاصل از IDW، بارش میانگین حاصل پلیگون های تاپسن، دبی جریان با یک و دو روز تأخیر، دمای میانگین روزانه، رطوبت نسبی هوا و داده های فشار بخار روزانه

هرکدام به همراه یک روز تأخیر به عنوان متغیرهای ورودی مورد استفاده قرار گرفت. برای شبکه بندی فضای متغیرهای مختلف ورودی و خروجی برای تمام نقاط فازی مورد ارزیابی قرار گرفته از شبکه $x=200 \times y=280$ استفاده شده است. نقاط فازی به گونه ای انتخاب گردید که در هر مرحله به سمت تقسیم بندی قطعی (Crisp) پیش رود. نقاط فازی نشان دهنده بخش مقادیر کوچک و بزرگ متغیر در تقسیم بندی به روش فازی را نشان می دهند (به شکل ۴-۱۲ ب و ج توجه کنید). بدین منظور به ترتیب از نقاط فازی $\frac{9}{10}, \frac{1}{10}; \frac{8}{10}, \frac{2}{10}; \frac{7.5}{10}, \frac{2.5}{10}; \frac{7}{10}, \frac{3}{10}; \frac{6}{10}, \frac{4}{10}$ استفاده شده است. برای آموزش مدل داده های پنج ساله از ۲۳ سپتامبر ۱۹۹۱ تا ۲۲ سپتامبر ۱۹۹۶ (برابر با دوره کالیبراسیون مدل مفهومی) استفاده شده است. سپس برای دوره آزمون، داده های سه سال ۲۳ سپتامبر ۱۹۹۶ تا ۲۲ سپتامبر ۱۹۹۹ (برابر با دوره صحت سنجی مدل مفهومی) مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج آماری سنجش خطای دوره آزمون در نقاط فازی مختلف برای تعداد قوانین فازی مختلف در جدول ۶-۸ و شکل ۶-۱۳ ارائه شده است.

جدول ۶-۸. نتایج آماری معیارهای سنجش خطا برای نقاط فازی مختلف در تعداد قوانین مختلف برای دوره آزمون

Fuzzy Point	9/10 1/10	8/10 2/10	7.5/10 2.5/10	7/10 3/10	6/10 4/10	9/10 1/10	8/10 2/10	7.5/10 2.5/10	7/10 3/10	6/10 4/10
Nr. Rules	Bias					PTVE				
2	24.90	13.08	18.17	10.56	5.92	8.44	4.43	6.16	3.58	2.01
4	0.56	4.68	13.43	12.07	-6.39	0.19	1.58	4.55	4.09	-2.16
8	-1.00	4.17	6.05	6.66	-14.19	-0.34	1.41	2.05	2.25	-4.81
16	-2.68	3.77	0.35	0.96	-16.2	-0.90	1.27	0.12	0.32	-5.48
32	-6.1	4.28	2.72	-4.01	-36.2	-2.07	1.45	0.92	-1.36	-12.26
64	-6.0	-1.15	-1.67	-3.97	-35.1	-2.06	-0.39	-0.56	-1.34	-11.90
128	-6.03	-0.80	-3.71	-8.09	-31.1	-2.04	-0.27	-1.25	-2.74	-10.56
	RMSE					PWRMSE				
2	169.1	159.3	162.6	156.6	166.0	357.97	354.63	354.67	350.69	377.21
4	156.0	157.4	160.4	161.1	171.8	352.71	354.47	356.09	358.12	393.45
8	154.8	156.7	161.0	162.7	172.0	352.09	352.90	358.83	362.32	395.83
16	153	155.8	155.2	157.5	174.9	350.87	351.82	349.23	356.70	400.18
32	152.5	152.9	153.2	147.2	200.4	350.40	339.10	342.15	330.32	440.77
64	152.4	148.6	149.5	145.2	180.9	350.30	336.57	339.29	324.73	385.59



شکل ۶-۱۳. تغییرات Nash-Sutcliffe و R^2 در تعداد قوانین مختلف و نقاط فازی متفاوت در دوره آزمون

با توجه به ارزیابی های انجام شده در این پژوهش (جدول ۶-۸ و شکل ۶-۱۳) حساسیتی نسبت به نقاط فازی مشاهده نمی گردد ولی همانطور که واضح هست هنگامی که تقسیم بندی به حالت کلاسیک و قطعی نزدیک شده است (نقاط فازی 6/10,4/10) نتایج خوبی بدست نیامده و حتی با افزایش تعداد قوانین نه تنها بهبودی حاصل نشده بلکه موجب کاهش دقت مدل شده است. بنابراین همانطور که Bagheri Shouraki and Honda (1999b) و Taheri Shahraini *et al* (2009) پیشنهاد نموده اند از این مرحله به بعد همان چارک اول و سوم داده ها (نقاط فازی $\frac{7.5}{10}, \frac{2.5}{10}$) به عنوان نقاط فازی بهینه انتخاب گشته و در سایر مراحل با این نقاط مدل سازی صورت می گیرد.

۶-۲-۲ تعیین شبکه بندی مناسب فضای متغیر های ورودی و خروجی:

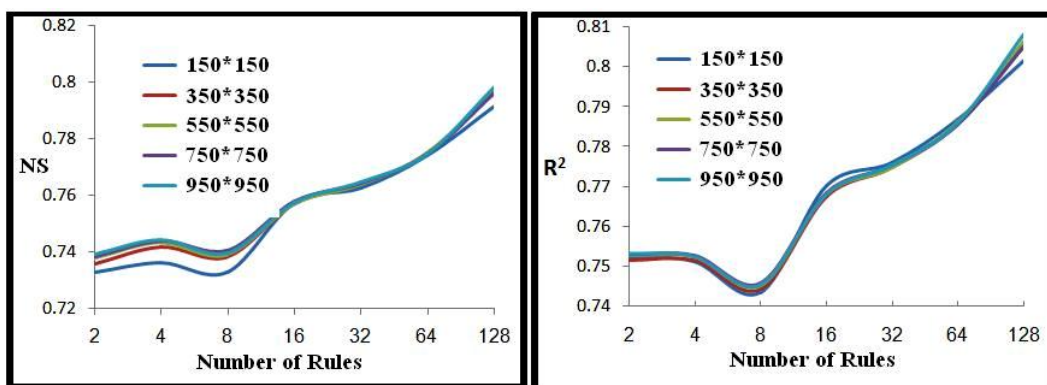
یکی دیگر از مسائلی که بایستی مقادیر بهینه آن تعیین می گردید شبکه مناسب فضای متغیر های ورودی و خروجی (قدرت تفکیک در جهت x و y در هنگام انتشار الگوی نور توسط عملگر IDS) می باشد. شبکه بندی در محاسبه دقیق تر مرکز ثقل (رابطه ۴-۱۸) جهت تعیین مسیر ها یا رفتار های کلی به کار می رود. شاید به نظر برسد که هر چه شبکه بندی فضای متغیر ها ریزتر انتخاب شود موجب افزایش دقت عملگر IDS می شود. اهمیت تعیین شبکه بندی در مسئله این می باشد که با افزایش تعداد اجزای شبکه (یعنی ایجاد شبکه ریزتر) سرعت پردازش داده ها و اجرای برنامه به شدت

کند می گردد. به همین دلیل لزوم تعیین حداقل تعداد شبکه (به طوریکه دقت انجام کار کاهش نیابد) جهت افزایش سرعت پردازش اطلاعات مشخص می گردد. برای تعیین دقیق حداقل تعداد شبکه مورد نیاز در چندین سناریوی مختلف شبکه بندی های متفاوتی مورد ارزیابی قرار گرفت تا در نهایت بهترین حالت برای مدل سازی های بعدی مورد استفاده قرار گیرد. برای بررسی این موضوع ابتدا داده های بارش میانگین حاصل از IDW، بارش میانگین حاصل پلیگون های تاپسن، دبی جریان با یک و دو تأخیر، دمای میانگین روزانه، رطوبت نسبی هوا و داده های فشار بخار هر یک به همراه یک تأخیر به عنوان متغیر های ورودی و دبی روزانه جریان به عنوان متغیر پیش بینی مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به اینکه در حالت قبل چارک اول و سوم داده ها به عنوان نقاط فازی بهینه انتخاب گردیده بود در این مرحله نیز برای تمام شبکه های مورد ارزیابی از این نقاط استفاده شده است. به ترتیب شبکه های $150 \times 150, 350 \times 350, 550 \times 550, 750 \times 750, 950 \times 950$ در این سناریو مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این مرحله نیز از داده های پنج سال نخست به عنوان دوره آموزش و سه سال انتهایی برای آزمون مدل استفاده شده است. نتایج آماری سنجش خطای دوره آزمون در شبکه بندی های مختلف برای تعداد قوانین فازی مختلف در جدول ۶-۹ و شکل ۶-۱۴ ارائه شده است. اگر به نتایج حاصل از جدول ۶-۹ و همچنین شکل ۶-۱۴ توجه گردد به راحتی می توان دریافت که افزایش مولفه های i و z در شبکه بندی هیچ تاثیری در بهبود نتایج شبیه سازی جریان نداشته است و فقط در قسمتی که تعداد i و z خیلی کم در نظر گرفته شده است و در تعداد قوانین کم، نتایج به صورت جزئی بدتر شده است. همچنین زمان پردازش اطلاعات در برنامه اصلی مدل سازی با توجه به شبکه بندی های مختلف در شکل ۶-۱۵ ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می گردد با افزایش مولفه های i و z در شبکه بندی، زمان لازم برای پردازش داده ها بطور نمایی افزایش یافته و در شبکه بندی های ریزتر که تاثیری هم در بهبود نتایج ندارد، ساعتها زمان تنها برای اجرای برنامه اصلی نیازمند می باشد!

لازم به ذکر است که زمان های ثبت شده فقط مربوط مرحله آموزش مدل ALM می باشد و همه مدل سازی ها در شرایط

جدول ۶-۹. نتایج آماری معیار های سنجش خطا برای شبکه بندی مختلف در تعداد قوانین مختلف برای دوره آزمون

	150 × 150	350 × 350	550 × 550	750 × 750	950 × 950
Bias					
	3.64	16.51	13.92	12.84	11.82
	2.53	11.71	9.13	7.80	6.99
	8.95	7.34	4.76	2.41	2.79
	9.68	0.53	-1.82	-2.99	-4.09
	2.63	2.23	0.30	-0.78	-1.68
	8.39	-2.24	-3.87	-5.05	-6.01
	5.99	-4.22	-5.63	-7.17	-8.26
RMSE					
	162.85	162.00	161.37	161.13	160.90
	161.85	160.12	159.67	159.45	159.41
	162.89	161.27	160.96	160.52	160.79
	155.21	155.33	155.28	155.03	155.19
	153.51	153.09	153.10	152.95	152.89
	149.78	149.54	149.52	149.67	149.55
	143.82	142.09	141.79	142.22	141.48
PTVE					
	8.01	5.59	4.72	4.35	4.00
	7.64	3.97	3.09	2.64	2.30
	6.42	2.49	1.61	0.81	0.90
	3.28	0.18	-0.62	-1.01	-1.30
	4.28	0.75	0.10	-0.26	-0.50
	2.84	-0.76	-1.31	-1.71	-2.00
	2.03	-1.43	-1.90	-2.43	-2.80
PWRMSE					
	354.26	355.55	354.90	355.11	354.90
	355.74	357.06	356.78	356.98	356.78
	358.68	360.34	360.05	360.03	360.03
	347.23	349.66	350.02	349.98	350.02
	339.95	342.33	342.79	342.80	342.79
	337.47	339.62	339.74	340.36	340.36
	319.67	318.39	317.94	318.88	318.88

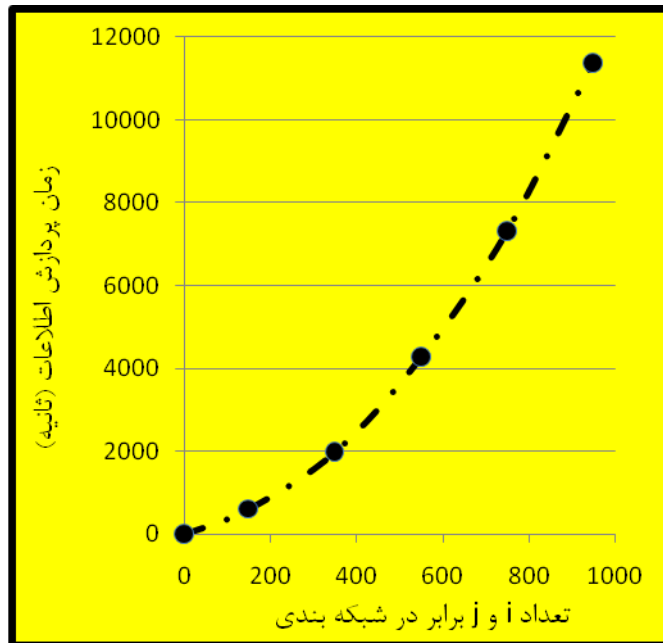


شکل ۶-۱۴. نتایج آماری معیار های سنجش خطا برای شبکه بندی مختلف در تعداد قوانین مختلف

با توجه به اینکه افزایش شبکه بندی تأثیری در بهبود نتایج نداشته است و همچنین با افزایش تعداد مولفه های شبکه، زمان اجرای برنامه به شدت افزایش می یابد از این مرحله به بعد از شبکه بندی

200 × 200 برای انجام مدل سازی بهره گرفته شده است تا زمان پردازش داده ها تا حداقل مقدار

ممکن بدون تأثیر در نتایج، تقلیل یابد.



شکل ۶-۱۵. زمان مورد نیاز برای پردازش اطلاعات در شبکه بندی های متفاوت

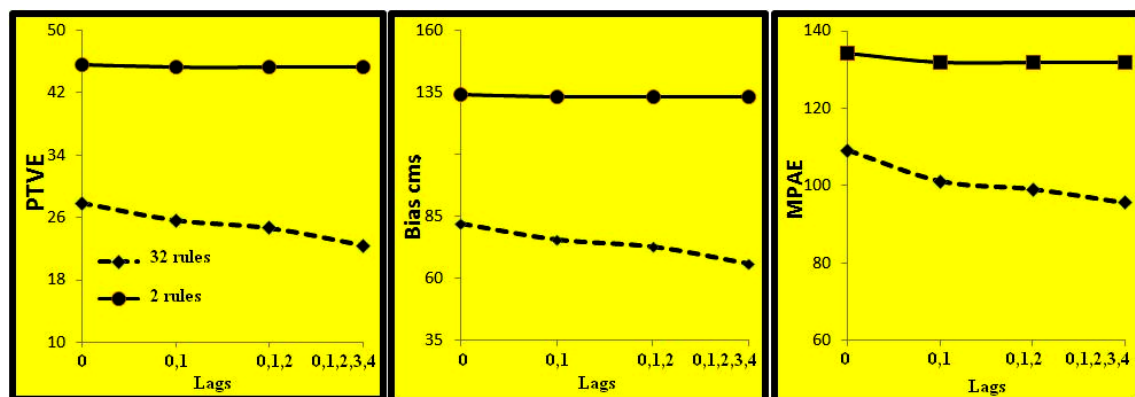
۳-۲-۶ مدل سازی جریان بدون استفاده از داده های جریان در روز های قبل:

پس از اینکه نقاط فازی (چارک اول و سوم داده ها) و شبکه بندی مناسب (200×200) در طی مراحل قبل تعیین گردید اولین سناریو که مورد آزمون قرار گرفته است ارزیابی توانایی ALM در شبیه سازی جریان به کمک داده های غیر جریان می باشد. در این مرحله از الگوریتم های متفاوتی استفاده شده است. در نخستین الگوریتم فقط با کمک داده های بارش، دما، رطوبت و فشار بخار بدون هیچ تأخیری عمل شبیه سازی صورت گرفته است. در حالت بعدی به هر یک از داده های فوق یک تأخیر هم اضافه شده است و دوباره عملکرد مدل تحت آزمون قرار گرفته است (مجموع پارامتر های ورودی ۸ عدد). در سومین الگوریتم هر یک از داده های ذکر شده به همراه دو تأخیر دیگر به عنوان مقادیر ورودی معرفی شده است (مجموع پارامتر ها ۱۲ عدد). در مرحله آخر از داده های مذکور به

همراه چهار تأخیر در بخش متغیر های ورودی استفاده شده است و شبیه سازی به انجام رسیده است (مجموع متغیر های ورودی ۲۰ عدد). نتایج آماری معیار های سنجش خطا در جدول ۶-۱۰ و شکل ۶-۱۶ برای تعداد قوانین ۲ تا ۳۲ تایی و اضافه نمودن تأخیر های اضافی به داده ها ارائه شده است.

جدول ۶-۱۰. پارامتر های سنجش خطا برای شبیه سازی به کمک داده های غیر جریان با تأخیر های متفاوت در دوره آزمون.

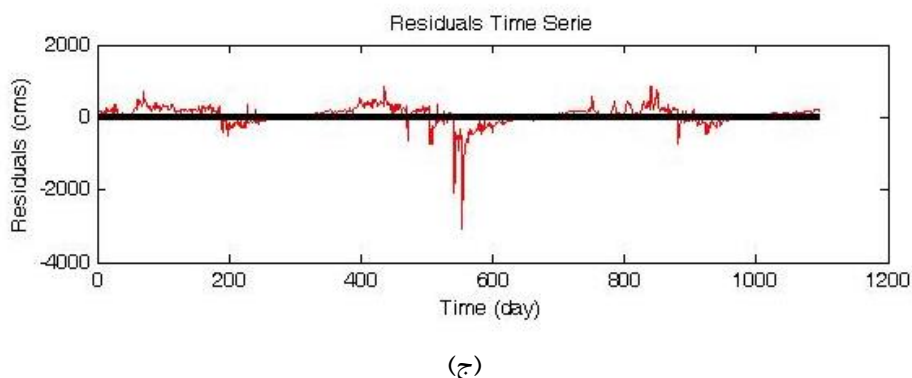
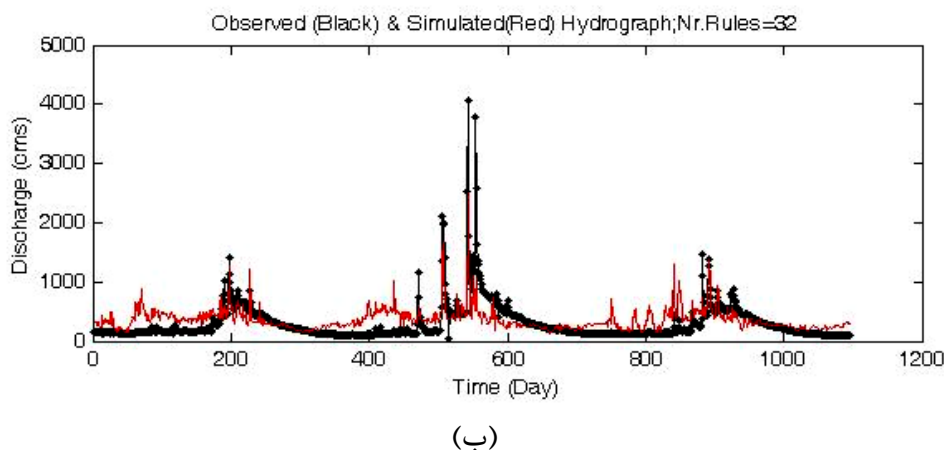
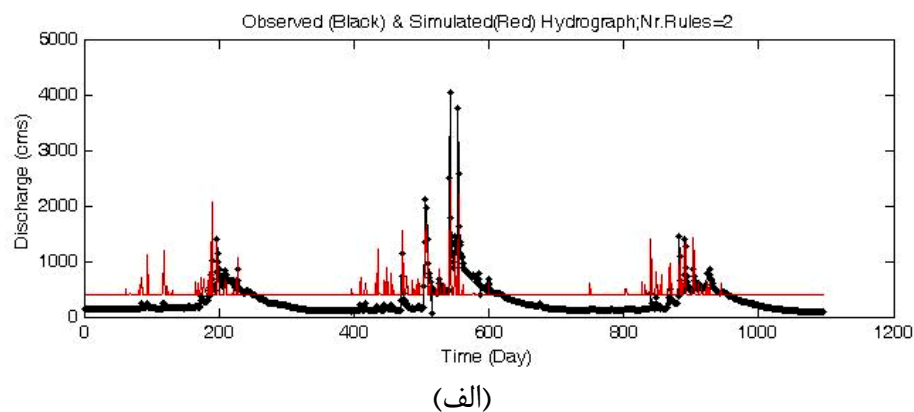
Lags Nr. Rules	Nash-Sutcliffe				R ²			
	0	0,1	0,1,2	0,1,2,3,4	0	0,1	0,1,2	0,1,2,3,4
2	0.0682	0.1311	0.1311	0.1311	0.2551	0.312	0.312	0.312
4	0.1176	0.1815	0.22	0.2294	0.2683	0.3272	0.3393	0.3521
8	0.131	0.2164	0.2312	0.2489	0.2512	0.3317	0.338	0.3486
16	0.1241	0.2077	0.2462	0.2713	0.2375	0.3004	0.3311	0.3436
32	0.1265	0.2171	0.2763	0.2906	0.2007	0.2802	0.3295	0.3344
64	0.0769	0.2286	0.2586	0.2909	0.1599	0.2752	0.2947	0.3181
128	0.092	0.2087	0.2476	0.284	0.1658	0.2537	0.2806	0.302
	RMSE				PWRMSE			
2	304.181	293.743	293.743	293.743	461.425	431.050	431.050	431.050
4	296.013	285.0836	278.312	276.621	451.308	425.548	422.846	420.233
8	293.748	278.9371	276.307	273.098	458.205	424.565	423.491	420.593
16	294.916	280.4856	273.5844	268.989	459.506	435.191	426.334	419.012
32	294.509	278.8248	268.0689	265.403	474.051	439.336	423.906	418.931
64	302.767	276.7668	271.3308	265.359	492.705	437.734	435.043	426.310
128	300.276	280.311	273.333	266.639	491.8527	444.111	439.132	435.709



شکل ۶-۱۶. PTVE، Bias و MPAAE در استفاده از تأخیر های اضافی داده های غیر جریان در قوانین ۲ و ۳۲ دوره آزمون.

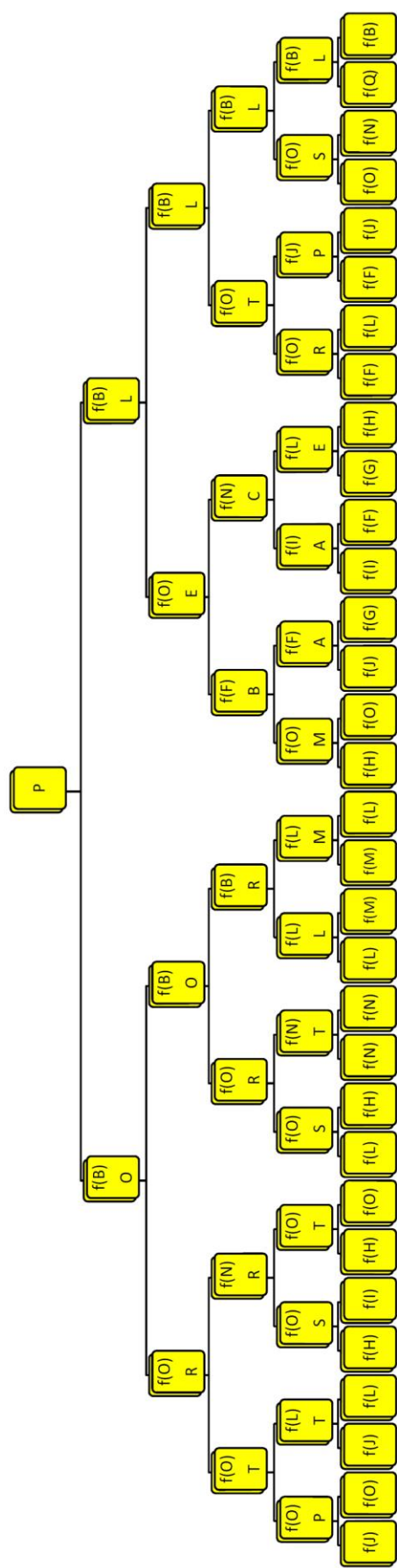
اگر به نتایج حاصل از اضافه نمودن تأخیر های بیشتر در تعداد قانون ۲ تائی توجه نمائیم مشاهده می گردد که تأخیر های اضافی هیچ تأثیر محسوسی در نتایج نداشته است. اما قضاوت به اینجا خلاصه نمی گردد چرا که تعداد قانون دو تائی توانایی در نظر گرفتن پیچیدگی های بسیار کمی را داشته و اساساً به همین دلیل نیز اغلب اوقات با افزایش تعداد قوانین شاهد بهبود نتایج مدل سازی می باشیم. با بررسی دقیق تر در تعداد قوانین بیشتر مشاهده می گردد که با اضافه نمودن تأخیر های بیشتر به متغیر های ورودی روند مناسبی در بهبودی نتایج مشاهده می گردد که برای درک بهتر در شکل ۶-۱۶ روند تغییرات نتایج در تعداد قوانین ۲ و ۳۲ تائی به ازای اضافه نمودن داده های تأخیری بیشتر به متغیر های ورودی در دوره آزمون نمایش داده شده است. با توجه به این شکل می توان گفت که در داده های با چند روز تأخیر هم مقداری دانش و اطلاعات نهفته بوده است که ALM توانسته است به کمک تعداد قوانین بیشتر از ۲ تا که قادر اند پیچیدگی های بیشتری از سیستم تحت مدل سازی را در نظر بگیرند آنها را استخراج و در شبیه سازی جریان مورد استفاده قرار دهد. با توجه به نتایج بدست آمده (جدول ۶-۱۰) بهترین مدل ALM با ۳۲ قانون فازی می باشد. در شکل ۶-۱۷ هیدروگراف های حاصل از نتایج شبیه سازی جریان در دوره آزمون برای تعداد قوانین ۲ و ۳۲ تائی (نامناسب ترین و بهترین حالت شبیه سازی بدون استفاده از داده های جریان) و همچنین سری زمانی باقیمانده ها برای حالت بهینه به نمایش در آمده است. در شکل ۶-۱۸ HPD مدل فازی دارای ۳۲ قانون ترسیم شده است. با توجه به این شکل متغیر های مناسب برای تقسیم بندی فضای متغیر ها به ترتیب رطوبت با یک تاخیر، فشار بخار با ۲ و ۴ تاخیر هر سه در رتبه اول، سپس فشار بخار با صفر و سه تاخیر در رتبه دوم، بارش با ۱ و ۴ تاخیر به همراه رطوبت با ۲ و ۴ تاخیر در رتبه سوم و بارش با ۱ و ۲ تاخیر در آخرین رتبه قرار می گیرند. همچنین متغیر های مناسب برای تخمین توابع تک متغیره غیر خطی ضمنی به ترتیب رطوبت با ۴ تاخیر، سپس رطوبت با ۱ تاخیر، بارش با صفر تاخیر در مرتبه بعدی، رطوبت با تاخیر ۳ در رتبه چهارم، دما با تاخیر صفر، ۲ و ۴ هر سه در رتبه پنجم، دما با ۳ تاخیر در رتبه بعدی، دما با ۱ تاخیر به همراه رطوبت با ۲ تاخیر در رتبه هفتم و فشار

بخار با یک تاخیر در آخرین رتبه قرار می گیرد. در بخش متغیر های تخمین گر، داده های بارش با صفر، ۲، ۳ و ۴ تاخیر و همچنین رطوبت با تاخیر صفر و فشار بخار با تاخیر های صفر، ۲، ۳ و ۴ اضافی تشخیص داده شده و حذف گشته اند. در HPD ها متغیر های بخش $f(*)$ نشان دهنده بهترین تابع تک متغیره ضمنی و بقیه نشان دهنده بهترین متغیر قابل تقسیم در آن فضا می باشند.

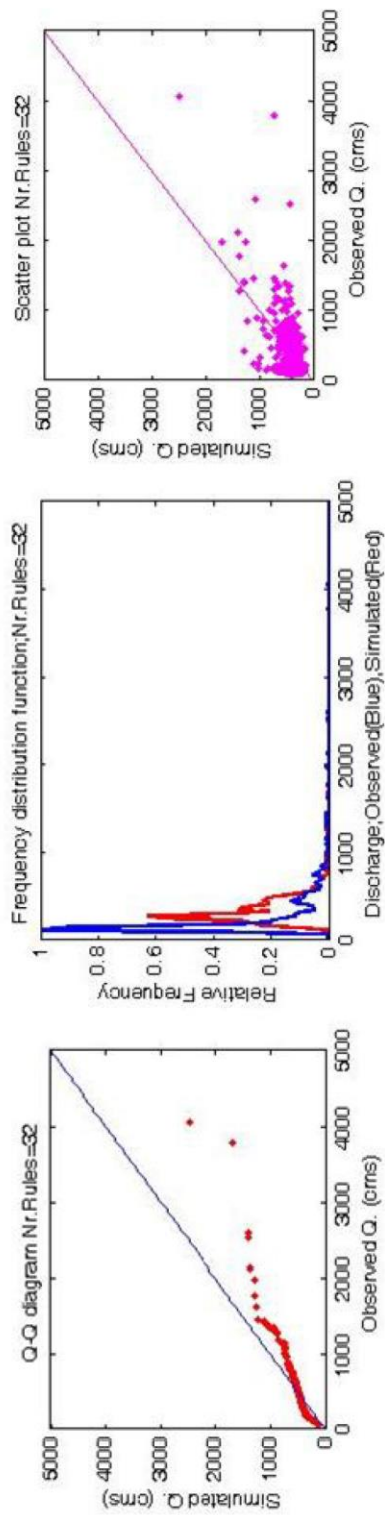


شکل ۶-۱۷. هیدروگراف شبیه سازی مدل در تعداد قوانین فازی ۲ (الف) و ۳۲ تائی (ب) و سری زمانی باقیمانده ها برای حالت بهینه ۳۲ قانون فازی (ج) در شرایط استفاده از داده های بدون جریان تا چهار تأخیر در حالت آزمون.

در شکل ۶-۱۹ نمودار پراکندگی، Q-Q دیاگرام و منحنی توزیع فراوانی برای حالت بهینه (۳۲ قانون فازی) در دوره آزمون ترسیم شده است. اگر بخواهیم به طور کلی قضاوتی در مورد شبیه سازی جریان بدون استفاده از داده های جریان داشته باشیم شاید اگر صرفاً به نتایج آماری و گرافیکی حاصل از نتایج دوره آزمون توجه کنیم شاید نتیجه چندان رضایت بخشی را مشاهده نمائیم. ولی قضاوت صحیح و واقع گرایانه چیزی جز این نتیجه به نظر می رسد. اگر بخواهیم ارزیابی صحیحی از کارکرد مدل داشته باشیم در نظر گرفتن این نکته که ALM بر خلاف مدل مفهومی که جزء جزء فیزیک مسئله را در نظر می گیرد و به شبیه سازی جریان می پردازد، فقط به استخراج دانش از داده های معرفی شده به آن جهت محاسبه خروجی می پردازد و به هیچ عنوان با فیزیک مسئله که چگونه و چه فرآیندهایی بر متغیرهای ورودی اثر گذاشته تا اینکه خروجی حاصل گردد کاری ندارد، از نکات ضروری می باشد. علاوه بر آن چنانچه شرایط مدل سازی از قبیل وجود اوج های بسیار شدید، کشیدگی زیاد در داده های بارش-رواناب، تعداد زیاد داده های پرت، مساحت بسیار زیاد و اختلاف ارتفاع و ناهمگونی های بسیار در خصوصیات فیزیوگرافیک حوضه، دوره دراز مدت و شرایط مختلف مدل سازی، کمبود تعداد ایستگاه های باران سنجی با آمار مناسب، همبستگی های بسیار ضعیف بین داده های ورودی در این الگوریتم و رواناب (به شکل ۵-۴ توجه شود) و مدل سازی یکپارچه حوضه بزرگی چون کارون III همگی دلالت بر شرایط بسیار دشوار مدل سازی می کند (به جدول ۳-۲ مراجعه گردد). با در نظر گرفتن نکاتی که در بالا بدان اشاره گردید قطعاً می توان به توانایی بالای ALM حتی بدون استفاده از داده های جریان و در همبستگی های ضعیف بین متغیرهای ورودی و خروجی معرفی شده به آن در استخراج اطلاعات و دانش های مورد نیاز در مدل سازی جریان آنهم در مقیاس روزانه پی برد.



شکل ۶-۱۸. دوره آزمون با ۳۲ قانون فازی بدون استفاده از داده های جریان. A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K به ترتیب داده های دما با 0, 1, 2, 3 و 4 روز تأخیر، f(O), f(L), f(M), f(N), f(H), f(R), f(S), f(T), f(P), f(Q), f(U), f(V), f(W), f(X), f(Y), f(Z) به ترتیب داده های فشار بخار با 0, 1, 2, 3 و 4 روز تأخیر می باشند. O, N, M, L, K, روز تأخیر، 0, 1, 2, 3 و 4 روز تأخیر می باشند.



شکل ۶-۱۹. نمودار پراکندگی (الف)، منحنی توزیع فراوانی (ب) و Q-Q دیگرام (ج) برای دوره آزمون در حالت بدون استفاده از داده های جریان و ۳۲ قانون فازی (الف)

۴-۲-۶ بررسی میزان تأثیر اضافه نمودن داده های جریان به پارامتر های ورودی:

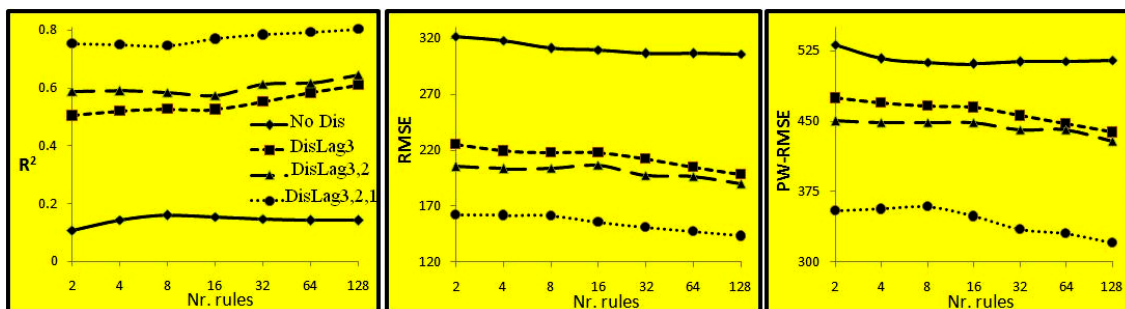
در بخش قبلی بدون استفاده از داده های تأخیری جریان به شبیه سازی جریان رودخانه و ارزیابی کارایی مدل پرداخته شد. به نظر می رسد که بین داده های جریان روزانه و داده های روزهای پیشین آن همبستگی هائی وجود داشته باشد (شکل ۴-۵ را ببینید) و بتوان از دانش نهفته در آنها برای پیش بینی جریان بهره گرفت. بدین جهت در این سناریو به ارزیابی توانایی ALM در استفاده از دانش و اطلاعات نهفته در داده های تأخیری جریان پرداخته شده است تا اینکه مشخص گردد آیا ALM از این توانمندی برخوردار می باشد که از آن دانش جهت ارتقای نتایج مدل سازی استفاده نماید یا خیر!

در این سناریو برای نمونه شاهد ابتدا با استفاده از داده های بارش تایسن، بارش IDW، دما به همراه یک تأخیر، رطوبت به همراه یک تأخیر و فشار بخار به همراه یک تأخیر، جریان روزانه مدل شده است. سپس در مرحله بعد داده های جریان با ۳ تأخیر (Lag=3) به سری داده های قبلی اضافه شده و مدل سازی صورت گرفته است. سپس در طی مراحل بعدی نیز به ترتیب ابتدا داده های جریان با تأخیر ۲ و سپس داده های جریان با یک تأخیر هم به سری داده ها اضافه و مدل سازی جریان انجام شده است. نتایج آماری پارامتر های سنجش خطا دوره آزمون در جدول ۶-۱۱ و شکل ۶-۲۰ ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول و شکل مذکور به آسانی می توان دریافت که با اضافه نمودن تک تک داده های تأخیری جریان به گروه متغیر های ورودی، بهبود شگرفی در نتایج مدل سازی جریان اتفاق می افتد. نکته جالب توجهی که در شکل ۶-۲۰ علاوه بر بهبود نتایج با اضافه نمودن داده های تأخیری جریان به چشم می خورد دو سری تغییر ناگهانی در پارامتر های سنجش خطا می باشد. در اولین حالت با اضافه نمودن داده های جریان با ۳ تأخیر به نمونه شاهد، افزایش چشمگیری در بهبود نتایج مشاهده می گردد. سپس با اضافه نمودن داده های جریان با تأخیر ۲ به سری قبلی نتایج کمی بهبود می یابد. تغییر ناگهانی دوم زمانی بوقوع می پیوندد که داده های جریان با یک تأخیر به متغیر های ورودی افزوده می گردد. هنگامی که اولین سری داده های جریان (تأخیر

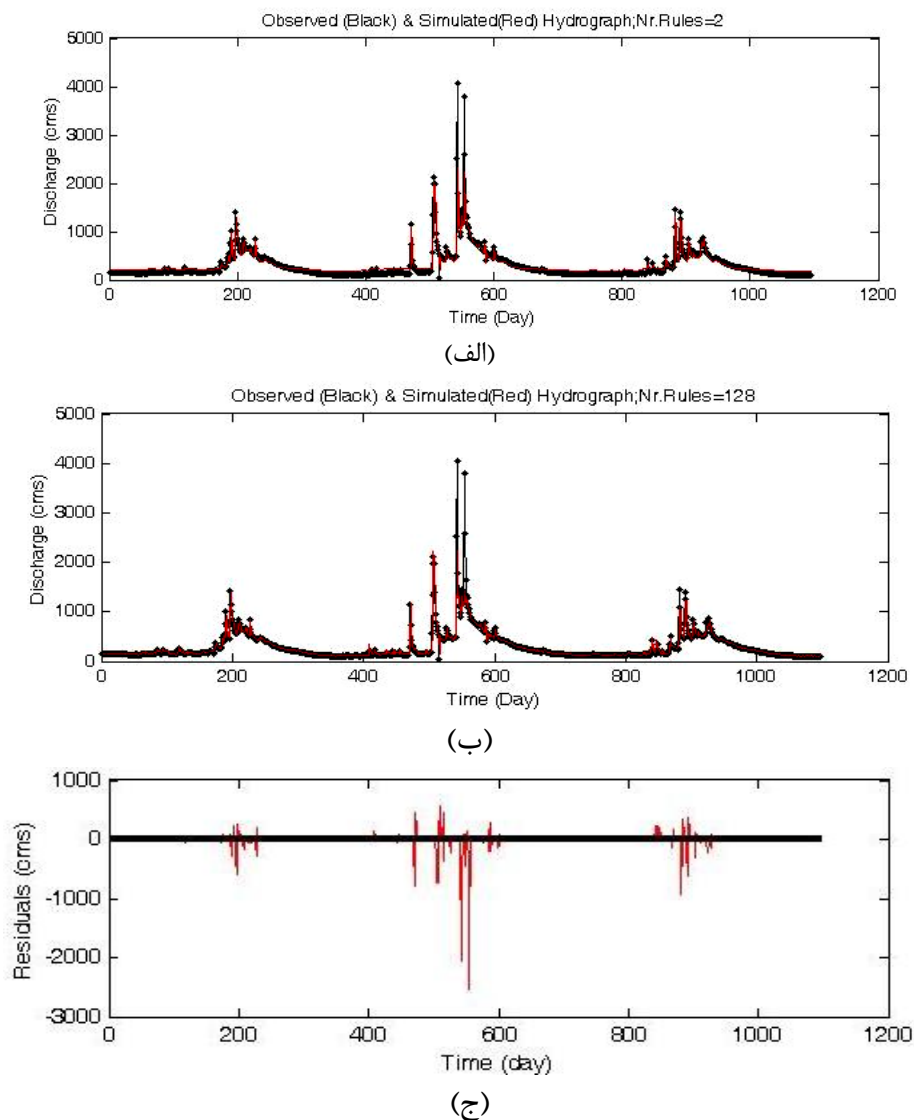
۳) به نمونه شاهد اضافه می گردد چون نسبت به متغیر های نمونه شاهد حاوی اطلاعات و دانش با ارزشی برای شبیه سازی می باشد در نتیجه بهبود چشمگیری در نتایج رخ می دهد. با اضافه نمودن داده های تأخیر ۲ (چون اطلاعات با ارزش تأخیر ۳ قبلاً اضافه شده است) نسبت به حالت قبل خیلی اطلاعات با ارزش جدیدی افزوده نشده و نتیجتاً بهبود کمتری در نتایج مشاهده می گردد. در آخر با اضافه نمودن داده های جریان تأخیری مرتبه ۱ برای بار دوم اطلاعات بسیار با ارزش تری نسبت به حالات قبل به متغیر های ورودی افزوده شده و باعث بهبود چشمگیر نتایج می گردد. زیرا همانطور که در شکل (۴-۵) می بینید همبستگی دبی با تأخیر یک روزه (دبی دیروز) با دبی امروز بسیار بیشتر از همبستگی متغیر های دیگر است.

جدول ۶-۱۱. نتایج در تعداد قوانین مختلف دوره آزمون با اضافه نمودن داده های جریان تأخیری به نمونه شاهد

Dis Lag Nr.rules	No Dis	Dis Lag3	Dis Lag3,2	Dis Lag3,2,1	No Dis	Dis Lag3	Dis Lag3,2	Dis Lag3,2,1
Nash-Sutcliffe					Bias(cms)			
2	-0.041	0.4878	0.5752	0.7339	118.35	22.5269	17.0357	19.736
4	-0.019	0.5154	0.5833	0.7365	125.58	8.1242	9.5341	18.887
8	0.0245	0.5217	0.5799	0.7368	111.28	10.2311	9.9891	11.657
16	0.0323	0.5214	0.5689	0.756	104.54	12.2035	15.0204	6.3278
32	0.0537	0.5456	0.6068	0.7699	89.65	13.2577	6.5783	7.3819
64	0.0542	0.5768	0.6105	0.7805	80.30	5.8103	1.7479	4.2412
128	0.059	0.6031	0.6371	0.7928	77.51	1.938	-0.4918	1.9888
MPAE					PTVE			
2	127.62	47.1737	34.2132	34.5105	40.13	7.6382	5.7763	6.6919
4	129.48	29.8524	24.5625	27.4497	42.58	2.7547	3.2327	6.404
8	119.13	27.6609	23.6812	20.385	37.73	3.4691	3.387	3.9525
16	117.46	27.3833	26.7473	17.0894	35.44	4.1378	5.093	2.1456
32	111.37	27.4665	20.4918	16.9423	30.39	4.4953	2.2305	2.503
64	107.51	22.1752	17.996	14.5416	27.22	1.9701	0.5927	1.4381
128	106.20	19.092	15.7733	12.0889	26.28	0.6571	-0.1668	0.6744

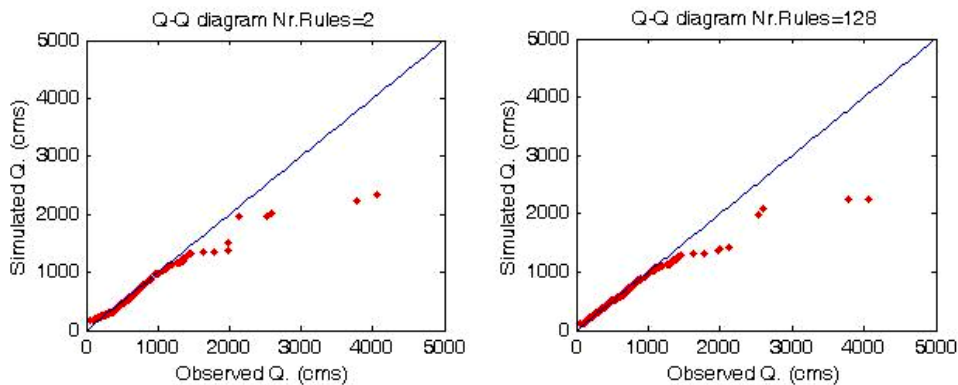


شکل ۶-۲۰. تغییر در نتایج مدل سازی در دوره آزمون با اضافه نمودن داده های تأخیری جریان به نمونه شاهد. No Dis برای داده های ورودی بارش تاپسن، IDW، دما، رطوبت و فشار بخار به همراه یک تاخیر از هر کدام می باشد. Dis Lag3 شامل تمامی داده های No Dis با اضافه دبی های ۲ و ۳ روز قبل، Dis Lag3,2 شامل تمامی داده های No Dis با اضافه دبی های ۱، ۲ و ۳ روز قبل می باشد. Dis Lag3,2,1 نیز شامل تمامی داده های No Dis با اضافه دبی های ۱، ۲ و ۳ روز قبل می باشد.



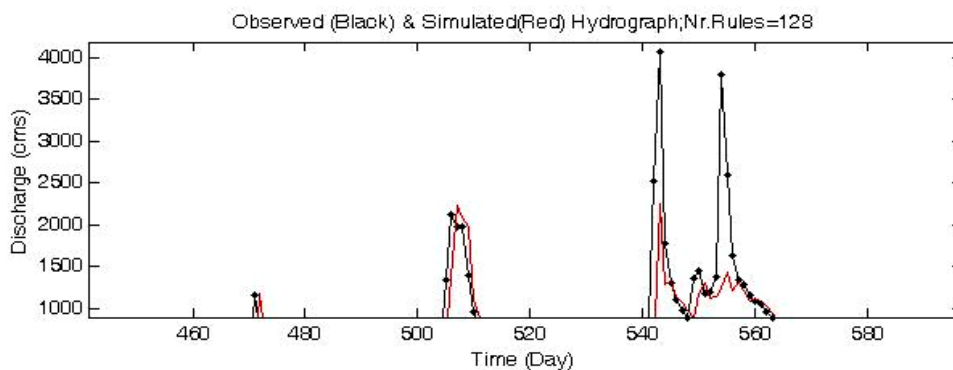
شکل ۶-۲۱. هیدروگراف دوره آزمون حاصل از استفاده هر سه داده تأخیری جریان در متغیر های ورودی برای تعداد قوانین فازی ۲ (الف) و ۱۲۸ (ب) و نمودار سری زمانی باقیمانده ها برای حالت بهینه ۱۲۸ قانون فازی (ج).

همچنین در شکل ۶-۲۱ هیدروگراف های مقادیر مشاهده ای و شبیه سازی شده دوره آزمون در تعداد قوانین فازی ۲ و ۱۲۸ تائی به همراه مقادیر باقیمانده ها در حالت بهینه ۱۲۸ قانون فازی و در حالت استفاده از هر سه داده تأخیری جریان نمایش داده شده است که به خوبی نمایانگر کیفیت بسیار مناسب شبیه سازی حتی در مقیاس روزانه و حتی در نامناسب ترین شرایط می باشد. نکته حائز اهمیتی که پرداختن جزئی تر بدان خالی از لطف نمی باشد تخمین مقادیر دبی های اوج در این حالت می باشد. هنگامی که سخن از ارزیابی مقادیر اوج به سراغ می آید شاید اولین چیزی که به آن رجوع گردد اختلاف بین PW-RMSE و RMSE می باشد. همانطور که در شکل ۷-۲۰ قابل مشاهده می باشد برای مثال در تعداد قانون ۱۲۸ تائی مقدار PW-RMSE برابر با ۳۲۰ cms و مقدار RMSE برابر با ۱۴۳ cms در حالت استفاده از هر سه داده جریان (مناسبترین حالت در این سناریو) می باشد که اختلاف بین این مقادیر نسبتاً زیاد می باشد. فاصله زیاد مقدار این دو پارامتر در حقیقت بیانگر شبیه سازی نامناسب تر مقادیر اوج نسبت به سایر بخش های هیدروگراف می باشد. با اینکه به طور کلی هر دو پارامتر نشانگر مدل سازی بسیار خوب جریان می باشند ولی بد نیست که بیشتر به بررسی تخمین نامناسب تر مقادیر اوج پرداخته شود. البته ذکر این نکته ضروری می نماید که این موضوع تا حدودی طبیعی و قابل پذیرش می باشد چرا که اساساً مقادیر اوج به عنوان اختلال ها و ناهنجاری های رخ داده در سیستم مطرح می باشند که از الگو های رفتاری سایر اعضای مجموعه کمتر تبعیت کرده و بدین رو در نظر گرفتن تعداد اندک آنها در سیستم مدل سازی با دشواری همراه خواهد بود. برای روشن شدن مسئله بهتر است نگاهمان را به Q-Q دیاگرام های حاصل از این مدل سازی معطوف نمائیم (شکل ۶-۲۲). شکل ۶-۲۲ برای مناسب ترین حالت این سناریو یعنی در استفاده از هر سه داده تأخیری جریان حاصل شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می گردد تقریباً برای جریان های بیشتر از ۱۵۰۰ cms (اوج های بزرگ) رفتار خطی در Q-Q از بین رفته است و به ازای این مقادیر در جریان مشاهده ای تقریباً تمامی مقادیر متناظر (نه به لحاظ زمانی) شبیه سازی شده، کمتر برآورد شده است.



شکل ۶-۲۲. Q-Q دیاگرام مدل سازی دوره آزمون به کمک هر سه داده تأخیری جریان در قوانین ۲ و ۱۲۸ تائی.

این شکل بیانگر این مسئله می باشد که اختلاف نسبتاً زیاد بین RMSE و PW-RMSE در این مسئله به طور صحیحی ناشی از تخمین نامناسب تر اوج ها بوجود آمده است. برای وضوح بیشتر تصویر برجسته شده مقادیر اوج از شکل ۶-۲۱ در حالت تعداد قانون ۱۲۸ تائی در تصویر ۶-۲۳ به نمایش در آمده است.



شکل ۶-۲۳. تصویر برجسته شده تخمین مقادیر اوج در شکل 7-20 برای تعداد قانون ۱۲۸ تائی دوره آزمون

۶-۲-۵ بررسی میزان تأثیر داده های غیر جریان در حضور داده های جریان:

در بخش پیشین به بررسی تأثیر اضافه نمودن داده های جریان و توانمندی ALM در استخراج دانش موجود در آنها پرداخته شد و اینکه مشخص گردید که داده های جریان تا حد زیادی به بهبود نتایج کمک می نماید. همانطور که قبلاً در بخش توانمندی های ALM بیان شده است در هر تکرار و هر تقسیم بندی فضای متغیر ها از بهترین متغیر برای استفاده در تابع تک متغیره غیر خطی استفاده می گردد. بدین رو ممکن است که این سوال در ذهن ما خطور نماید که در حضور داده های

ارزشمندی چون جریان های تأخیری آیا استفاده از داده های غیر جریان تأخیری در نتایج دارد و آیا از

این داده ها در توابع تک متغیره غیر خطی استفاده می شود یا خیر؟

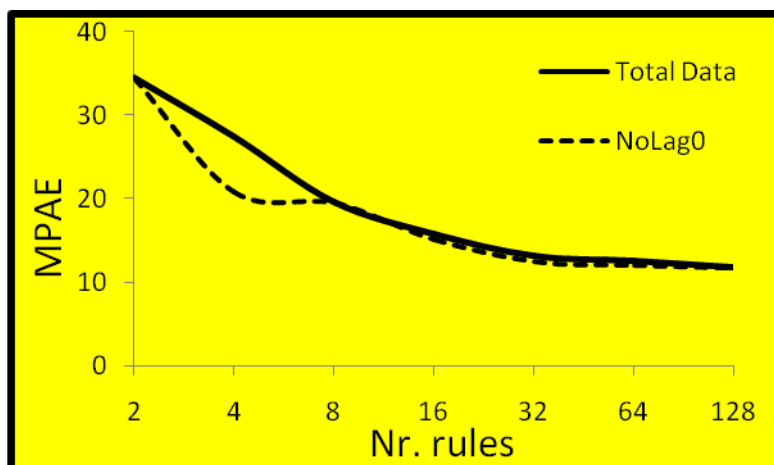
برای پاسخ به این سوال نیز سناریوی دیگری طراحی شده است. در نخستین مرحله به کمک پنج داده تأخیری جریان و داده های روزانه بارش، رطوبت، دما و فشار بخار هر یک به همراه چهار تأخیر در مدل سازی جریان استفاده شده است (مجموع متغیر های ورودی ۲۵ عدد). سپس داده های روزانه بارش، دما، رطوبت و فشار بخار (Lag=0) از سری داده ها حذف شده و تنها از پنج داده تأخیری آنها استفاده شده است (مجموع متغیر های ورودی ۲۵ عدد). برای هر یک از حالات فوق، مدل سازی صورت گرفته و نتایج آماری سنجش خطای آنها در جدول ۶-۱۲ و شکل ۶-۲۴ ارائه شده است.

جدول ۶-۱۲. تغییرات نتایج آماری سنجش خطا در دوره آزمون برای حالت کل داده با تاخیر های مختلف

(Total Data) و برای حالت حذف داده های غیر جریان همان روز (NoLag0 for Pr,T,H,VP)*

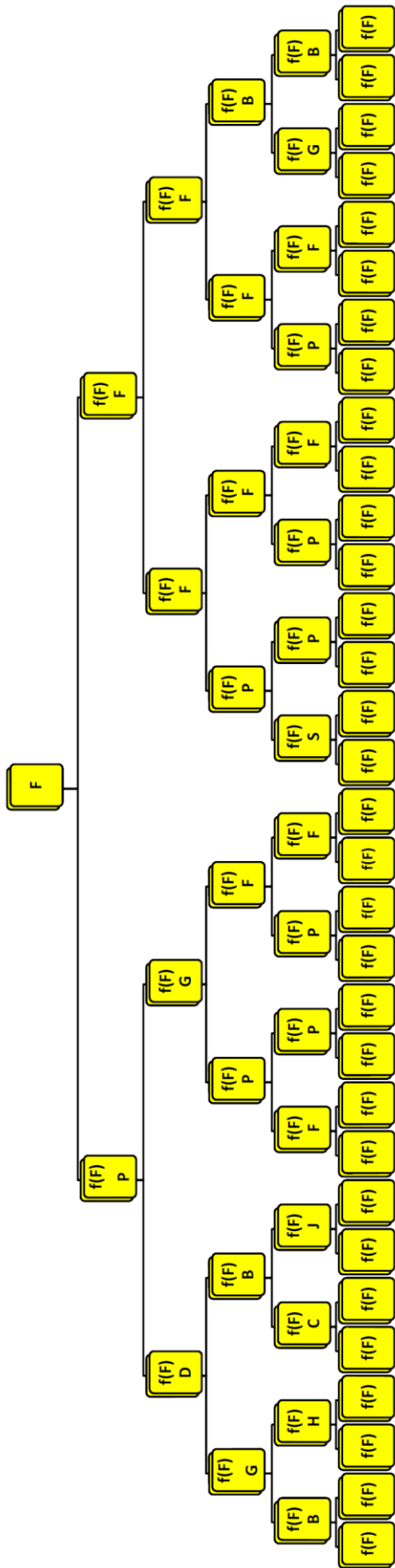
Input Nr.rule	Total Data	NoLag0 for Pr,T,H,VP	Total Data	NoLag0 for Pr,T,H,VP
	NashSutcliffe			Bias
2	0.7339	0.7339	19.736	19.736
4	0.7365	0.7414	18.887	9.2981
8	0.7367	0.7375	11.7411	10.5227
16	0.7494	0.7506	5.9388	5.0586
32	0.7527	0.7543	1.3708	1.5674
64	0.7521	0.7548	-1.2227	1.6104
128	0.7532	0.7564	-2.3424	1.2517
R²			PTVE	
2	0.7514	0.7514	6.6919	6.6919
4	0.7498	0.7501	6.404	3.1527
8	0.7439	0.7449	3.9811	3.5679
16	0.7561	0.7572	2.0137	1.7152
32	0.7592	0.7596	0.4648	0.5314
64	0.7606	0.7593	-0.4146	0.546
128	0.7616	0.7607	-0.7942	0.4244
RMSE			PW-RMSE	
2	162.5411	162.5411	354.738	354.738
4	161.7579	160.2579	356.5106	356.0182
8	161.682	161.4564	359.1162	358.8012
16	157.7477	157.3561	357.123	356.6733
32	156.7083	156.1845	356.6886	356.0033
64	156.909	156.05	357.3459	356.0382
128	156.5469	155.525	356.4285	354.7509

* در جدول فوق Pr, T, H و VP به ترتیب نشانگر بارش، دما، رطوبت و فشار بخار هستند.

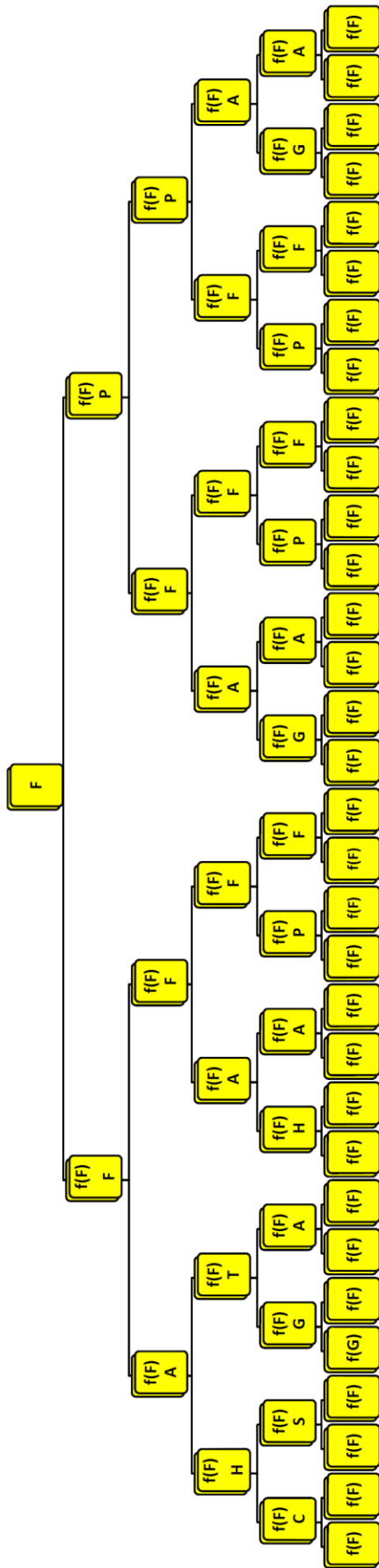


شکل ۶-۲۴. تغییرات MPAAE در دوره آزمون بر حسب تعداد قوانین فازی برای کل داده‌ها استفاده شده (Total Data) و حالتی که داده‌های بارش، رطوبت، فشار و دما برای همان روز حذف شده باشند (NoLag0).

نخستین نکته‌ای که از تأمل در جدول ۶-۱۲ و شکل ۶-۲۴ حاصل می‌گردد این است که در این سناریو به طور کلی با افزایش تعداد قانون فازی بیشتر از ۳۲ بهبود چندانی در هیچیک از حالات مدل سازی شده مشاهده نمی‌گردد و با توجه به Bias، PTVE و MPAAE (جدول ۶-۱۲) بهترین مدل حالت ۳۲ قانون فازی می‌باشد. همانگونه که در شکل ۶-۲۴ نیز مشاهده می‌گردد با حذف داده‌های غیر جریان روزانه (Lag=0) از گروه متغیرهای ورودی در حضور داده‌های جریان تغییر محسوسی در نتایج مدل سازی صورت نمی‌گیرد و باز هم مدل دارای ۳۲ قانون فازی بهترین مدل می‌باشد. این نتیجه احتمالاً در اثر این می‌باشد که در حضور داده‌های جریان از سایر داده‌ها در بخش توابع تک متغیره غیر خطی استفاده نمی‌گردد و بدین جهت با حذف داده‌های غیر جریان تأثیر چشمگیری در نتایج مشاهده نمی‌شود. در مدل سازی ALM دو گروه از متغیرها نقش دارند. گروه اول متغیرهایی هستند که از آنها به منظور تقسیم بندی فضای متغیرها استفاده می‌شود و گروه دوم متغیرهایی هستند که در توابع تک متغیره ضمنی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اشکال ۶-۲۵ و ۶-۲۶ به ترتیب HPD های (دیاگرام‌های تقسیم بندی سلسله مراتبی) مدل سازی‌های انجام شده در تعداد قانون فازی ۳۲ تائی این سناریو برای بررسی بیشتر تأثیر داده‌های غیر جریان در حضور داده‌های جریان می‌باشد.



شکل ۶-۱۵. دوره آزمون با HPD. قانون فزای برای حالت استفاده از تمامی داده ها. A, B, C, D, E به ترتیب داده های بارش با ۰, ۱, ۲, ۳ و ۴ روز تأخیر, F, G, H, I, J به ترتیب داده های دبی با ۰, ۱, ۲, ۳ و ۴ روز تأخیر, K, M, N, O به ترتیب داده های دما با ۰, ۱, ۲, ۳ و ۴ روز تأخیر, P, Q, R, S, T به ترتیب داده های رطوبت با ۰, ۱, ۲, ۳ و ۴ روز تأخیر, U, V, W, X, Y به ترتیب داده های فشار بخار با ۰, ۱, ۲, ۳ و ۴ روز تأخیر می باشند.



شکل ۶-۱۶. دوره آزمون با HPD. قانون فزای بدون استفاده از داده های همان روز. A, B, C, D, E به ترتیب داده های بارش با ۰, ۱, ۲, ۳ و ۴ روز تأخیر, F, G, H, I, J به ترتیب داده های دبی با ۰, ۱, ۲, ۳ و ۴ روز تأخیر, K, M, N, O به ترتیب داده های دما با ۰, ۱, ۲, ۳ و ۴ روز تأخیر, P, Q, R, S, T به ترتیب داده های رطوبت با ۰, ۱, ۲, ۳ و ۴ روز تأخیر و U, V, W, X, Y به ترتیب داده های فشار بخار با ۰, ۱, ۲, ۳ و ۴ روز تأخیر می باشند.

نکته جالب توجه که در همه HPD ها مشخص شده است این است که داده های جریان با یک تأخیر را به عنوان بهترین متغیر برای شبیه سازی جریان معرفی می نماید و این درست همان دلیلی می باشد که با حذف داده های غیر جریان با تأخیر صفر، تفاوت چشمگیری در نتایج رخ نمی دهد (برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد HPD ها به طاهری شهرآئینی (۱۳۸۶) مراجعه شود).

جدول ۶-۱۳. رتبه بندی تعداد دفعات استفاده شده از متغیرها برای ۳۲ قانون فازی در دوره آزمون برای ارزیابی بهترین متغیرهای مورد استفاده در تقسیم فضا و متغیرهای تخمین گر*

Variable	Total Data (Q,Pr,T,H,VP)		NoLag0 for Pr,T,H,VP	
	Nr.of used for Dividing	Nr. of used for 1Variable function	Nr.of used for Dividing	Nr. of used for 1Variable function
PreLag0	0	0	***	***
PreLag1	4	0	8	0
PreLag2	1	0	0	0
PreLag3	1	0	1	0
PreLag4	0	0	0	0
PreLag5	***	***	0	0
DisLag1	11	62	9	61
DisLag2	3	0	3	1
DisLag3	1	0	2	0
DisLag4	0	0	0	0
DisLag5	1	0	0	0
TempLag0	0	0	***	***
TempLag1	0	0	0	0
TempLag2	0	0	0	0
TempLag3	0	0	0	0
TempLag4	0	0	0	0
TempLag5	***	***	0	0
HumLag0	8	0	***	***
HumLag1	0	0	6	0
HumLag2	0	0	0	0
HumLag3	1	0	0	0
HumLag4	0	0	1	0
HumLag5	***	***	1	0
V.PreLag0	0	0	***	***
V.PreLag1	0	0	0	0
V.PreLag2	0	0	0	0
V.PreLag3	0	0	0	0
V.PreLag4	0	0	0	0
V.PreLag5	***	***	0	0

* در جدول فوق Pre, Dis, Temp, Hum, و V.Pre (Pre,Q,T,H,VP) به ترتیب نمایانگر بارش، دبی، دما، رطوبت و فشار بخار هستند.

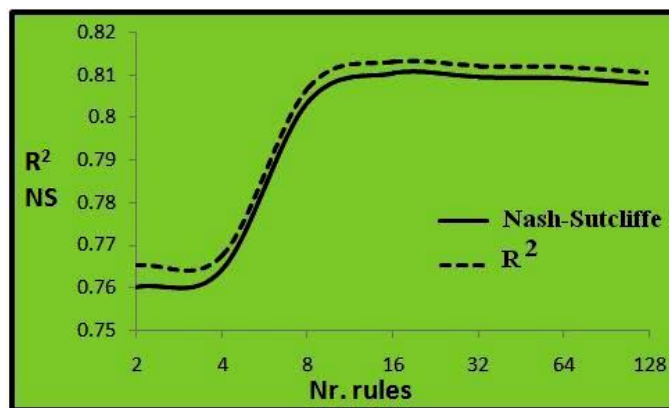
فرض کنید معیار رتبه بندی متغیرها در این دو گروه از متغیرها، تعداد دفعاتی باشد که یک متغیر در مدل سازی مورد استفاده قرار می گیرد. بدین صورت متغیرهای استفاده شده در مدل سازی برای تعداد قوانین فازی ۳۲ تائی به صورت جدول ۶-۱۳ می باشد. به خوبی در این جدول مشخص می گردد که هیچ یک از داده های غیر جریان در بخش توابع غیر خطی تک متغیره که تخمین گر می باشند استفاده نشده است و در حالی که تمامی داده ها مورد استفاده قرار گرفته است رتبه بندی متغیر های تقسیم گر فضا به ترتیب اهمیت ابتدا دبی با یک روز تاخیر، سپس رطوبت روزانه، بارش روز قبل در رتبه سوم، دبی دو روز قبل در رتبه چهارم و در آخر رطوبت با ۳ تاخیر، دبی با ۳ و ۵ تاخیر و بارش با ۲ و ۳ تاخیر همگی در رتبه آخر قرار می گیرند و سایر متغیر ها حذف شده اند. بنابراین به جرأت می توان بیان نمود که ALM در زمینه استخراج دانش و اطلاعات از سیستم های غیرخطی و رتبه بندی متغیر ها می تواند موثر باشد.

۶-۲-۶ مدل سازی با استفاده از داده های جریان:

در تمامی سناریو های پیشین از ترکیب مختلفی از داده ها استفاده شده است. آخرین حالتی که برای ارزیابی مدل فازی ALM مورد بررسی قرار گرفته است استفاده از داده های جریان به عنوان تنها متغیر های بخش ورودی می باشد. در این سناریو از داده های جریان تا پنج تأخیر برای شبیه سازی جریان روزانه بهره گرفته شده است. نتایج حاصل از آن در جدول ۶-۱۴ و شکل ۶-۲۷ ارائه شده است. اولین نکته ای که با ملاحظه نتایج حاصل از شبیه سازی به کمک داده های جریان در جدول ۶-۱۴ و شکل ۶-۲۷ قابل دریافت می باشد این است که نتایج از تعداد قوانین فازی ۸ و ۱۶ تائی که بیشتر می شود بهبودی در نتیجه مشاهده نشده و تقریباً شیب تغییرات پارامتر های سنجش خطا برابر با صفر می گردد. همانگونه که قبلاً ذکر گردید دلیل این امر این است که تا تعداد قانون ۱۶ تائی تقریباً تمامی اطلاعات قابل استخراج از داده های جریان تأخیری به کار گرفته شده است.

جدول ۶-۱۴. پارامترهای سنجش خطا در استفاده از داده های جریان برای قوانین فازی مختلف در دوره آموزش و آزمون

ErrorCriteria Nr.rules	Bias	MPAE	PTVE	RMSE	PWRMSE
	Training				
2	-10.7421	10.5174	-2.4526	147.2419	241.1602
4	-4.0726	10.316	-0.9298	145.533	238.6356
8	1.0216	10.5952	0.2332	140.3799	227.072
16	1.8891	10.3688	0.4313	139.9273	227.2349
32	3.044	10.3402	0.695	139.3082	226.3242
64	4.6108	10.4453	1.0527	137.579	223.1754
128	5.6926	10.3357	1.2997	136.1508	221.1867
Test					
2	-3.5677	12.9834	-1.2097	154.3288	350.8697
4	1.5161	12.8561	0.5141	153.0501	349.0213
8	5.499	13.1527	1.8646	139.6037	306.6576
16	5.4901	12.9238	1.8615	137.1753	297.1645
32	5.9067	13.0679	2.0028	137.5189	297.3429
64	6.8849	13.419	2.3345	137.5554	296.7974
128	7.5162	14.0232	2.5485	138.1138	297.5018



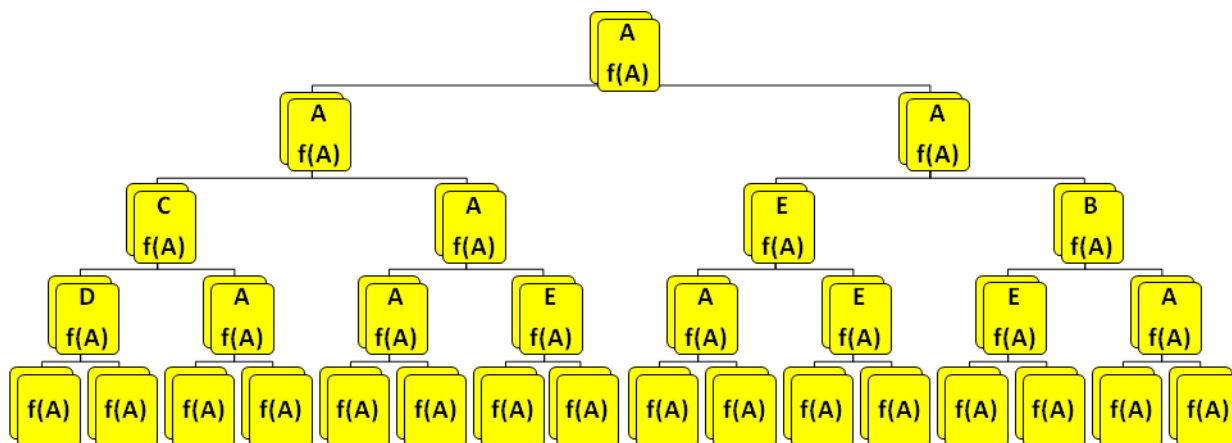
شکل ۶-۲۷. تغییرات R^2 و Nash-Sutcliffe با افزایش تعداد قوانین فازی در استفاده از داده های جریان دوره آزمون

HPD برای تعداد قانون فازی ۱۶ تائی در شکل ۶-۲۸ و رتبه بندی تمامی متغیرهای مورد استفاده در بخش متغیر قابل تقسیم و تابع تک متغیره غیر خطی نیز در جدول ۶-۱۵ ارائه شده است. همانگونه که از آنها بر می آید مدل، متغیر جریان با یک تأخیر را به عنوان بهترین متغیر برای تقسیم بندی فضا و همچنین بهترین متغیر برای تابع ضمنی استفاده نموده است و این همان چیزی است که با توجه به شکل ۵-۴ (به دلیل همبستگی زیاد جریان $Lag=1$ و جریان $Lag=0$) مورد انتظار بود و تصدیق بر توانمندی ALM در انتخاب برترین متغیرها به منظور تخمین خروجی می باشد. ارائه مقادیر ضرایب خود همبستگی داده های جریان (ACF) در کنار رتبه بندی بهترین متغیر تخمین گر خالی از لطف

نمی باشد و اینکه ALM تشخیص مناسبی در زمینه استفاده از بهترین متغیر تخمین گر ارائه نموده است.

جدول ۶-۱۵. رتبه بندی متغیر های استفاده شده در مدل فازی ALM در تعداد قوانین ۱۶.

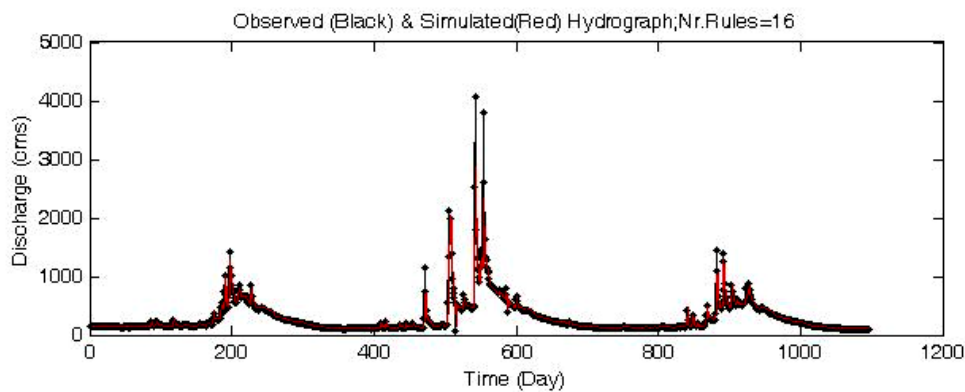
Variable	Nr.of used for Dividing	Nr. of used for One-Variable Function	ACF with Discharge Lag0	
			Training	Test
Discharge Lag1	8	30	0.91	0.87
Discharge Lag2	1	0	0.81	0.73
Discharge Lag3	1	0	0.74	0.66
Discharge Lag4	1	0	0.71	0.63
Discharge Lag5	4	0	0.69	0.59



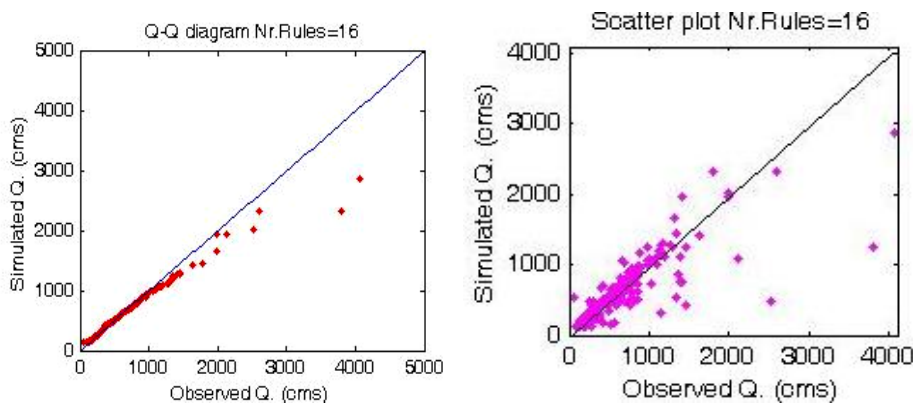
شکل ۶-۲۸. HPD دوره آزمون با ۱۶ قانون فازی برای حالت استفاده از داده های جریان. A, B, C, D, E به ترتیب داده های دبی با 1, 2, 3, 4 و 5 روز تأخیر می باشند.

همچنین هیدروگراف داده های مشاهده ای و شبیه سازی شده توسط ALM برای تعداد قانون فازی ۱۶ تائی (بهینه ترین حالت) در شکل ۶-۲۹ نمایش داده شده است که به خوبی کیفیت بسیار منایب شبیه سازی جریان را مشخص نموده است. در این حالت مدل ALM بسیار شبیه به یک مدل AR (آتورگرسو) مرتبه ۱ می باشد. نمودار پراکندگی و Q-Q دیاگرام نیز برای این حالت در شکل ۶-۳۰ ترسیم شده است. اینکه مدل توانسته است با تعداد قوانین کم، تمامی اطلاعات ارزشمند متغیر ها را در شرایط کاملاً پیچیده حاکم بر این حوضه آبریز و داده های معرفی شده به عنوان ورودی در مقیاس

روزانه و دوره طولانی مدت سه ساله استخراج نماید و اینچنین نتایج بسیار مناسبی^۱ همچون اختلاف حجم ۱/۸۶ درصد، مجذور ضریب همبستگی ۰/۸۱، بایاس برابر با ۵/۴cms، میانگین درصد قدر مطلق خطای ۱۳ درصدی، RMSE برابر با ۱۳۷cms و PW-RMSE برابر با ۲۹۷cms (مقدار میانگین داده های جریان در دوره آزمون را برابر با ۲۹۵cms در نظر بگیرید) و از همه مهم تر با میزان راندمان مدل (NS) برابر با ۰/۸ ارائه نماید چیزی جز توانمندی مدل بر پایه هوش مصنوعی ALM را نمی نمایند و اثباتی محکم بر کارایی این مدل در استخراج دانش موجود در داده ها در شرایط کاملاً پیچیده و فرآیندهای غیر خطی ناشناخته می باشد.



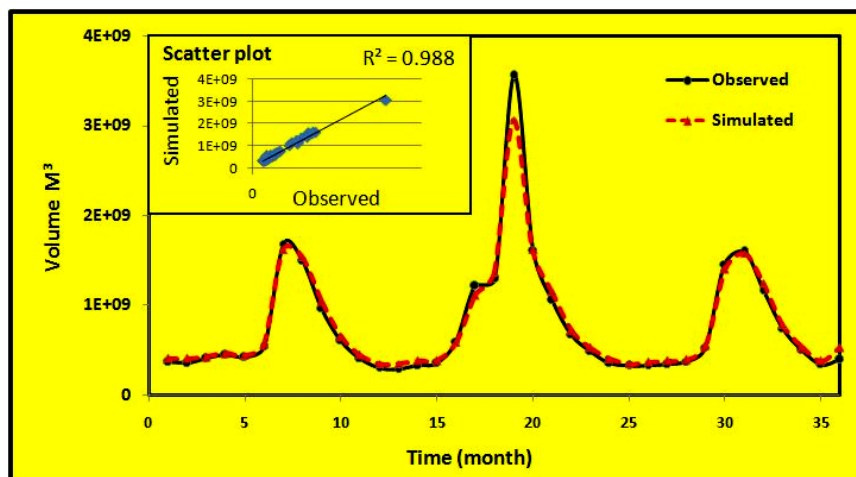
شکل ۶-۲۹. هیدروگراف مقادیر شبیه سازی شده و مشاهده ای برای تعداد قانون فازی ۱۶ تائی در دوره آزمون.



شکل ۶-۳۰. Q-Q دیاگرام و نمودار پراکندگی داده های مشاهده ای و شبیه سازی شده دوره آزمون در ۱۶ قانون فازی.

برای درک مناسب تر از تخمین های ALM در مقیاس ماهانه، نتایج حاصل از مدل سازی روزانه به صورت ماهانه نیز در شکل ۶-۳۱ و جدول ۶-۱۶ نشان داده شده است.

^۱ در تعداد قانون فازی ۱۶ تائی.



شکل ۶-۳۱. هیدروگراف و نمودار پراکندگی نتایج روزانه ALM در دوره آزمون که به صورت ماهانه محاسبه شده است.

جدول ۶-۱۶. برآورد معیار های نیکوئی برازش ماهانه از مدل سازی روزانه توسط ALM در دوره آزمون برای استفاده از داده های جریان در تعداد قانون فازی ۱۶.

Goodness of fit criteria	Value
Nash-Sutcliffe	0.977
Bias/ Mean Volume	0.018
R ²	0.988
MPAE %	8.3
PTVE %	1.86
RMSE/ Mean Volume	0.13
PW-RMSE/ Mean Volume	0.19

۶-۲-۷ مقایسه نتایج حاصل از مدل فازی ALM با سایر مدل های مبتنی بر هوش مصنوعی:

یکی دیگر از روش های مبتنی بر هوش مصنوعی که در سالیان اخیر تمایل بسیار زیادی به استفاده از آن نشان داده شده است شبکه های عصبی مصنوعی (ANN) می باشد. شبکه های عصبی مصنوعی یک شبیه سازی از دستگاه عصبی طبیعی می باشد که شامل مجموعه ای از واحد های عصبی بنام نرون است و توسط واحد های ارتباطاتی بنام آکسون به یکدیگر متصل شده اند. نرونهای مصنوعی کوچک ترین واحد های پردازش اطلاعات هستند. در شبکه های عصبی سعی بر این است که ساختاری مشابه ساختار بیولوژیکی مغز انسان و شبکه عصبی بدن طراحی شود تا همانند آن قدرت تصمیم گیری و یادگیری داشته باشد. در این شبکه ها هدف آن است که با معرفی تاریخچه عملکرد

یک سیستم دینامیکی، مدل آموزش یافته و نحوه عملکرد سیستم در حافظه ذخیره شود و در مواردی که مدل قبلاً با آن مواجه نشده است، مورد استفاده قرار می گیرد [78].

دستورانی و همکاران (۱۳۸۸) به مقایسه نتایج حاصل از شبکه عصبی مصنوعی و سیستم نرو - فازی در برآورد بارش-رواناب روزانه در دو زیر حوضه اسکندری و قلعه شاهرخ در حوضه آبخیز سد زاینده رود پرداخته اند. شبکه عصبی بهینه مورد استفاده در این تحقیق از نوع شبکه های Feed-Forward با دو لایه میانی و تابع آموزش Levenberg-Marquardt پس انتشار خطا می باشد. سیستم نرو - فازی مورد استفاده ANFIS با سیستم استنتاجی سوگنو به کار گرفته شده است. در این تحقیق با استفاده از داده های اقلیمی روزانه به همراه تاخیر های مختلف نتایج مناسبی حاصل نشده است ولی با کمک میانگین متحرک چند روزه که بر داده های اقلیمی اعمال شده است نتایج بهبود یافته است که در جدول ۶-۱۷ ارائه شده است. همچنین در سناریوی دیگر نیز از داده های جریان تاخیری در بخش ورودی ها استفاده شده است که نتایج آن نیز در جدول ۶-۱۸ ارائه شده است [79].

جدول ۶-۱۷. نتایج بهبود یافته حاصل از اعمال میانگین متحرک چند روزه بر پارامتر های ورودی توسط ANN و ANFIS.

زیر حوضه	پارامتر های ورودی	میانگین متحرک X روزه	R ²		RMSE		Nash-Sutcliffe	
			ANN	ANFIS	ANN	ANFIS	ANN	ANFIS
اسکندری	بارش، دمای میانگین و حداکثر	3	0.17	0.22	5.02	5.14	0.1	-0.9
		5	0.18	0.23	5.19	4.79	0.1	-0.5
	7	0.20	0.24	4.27	4.76	0.1	-0.36	
	بارش و رطوبت	3	0.09	0.26	9.98	7.94	-1.7	-2.9
		5	0.23	0.30	8.75	7.74	-2.75	-2.5
		7	0.19	0.39	8.9	7.13	-3.08	-2.08
قلعه شاهرخ	بارش و دمای حداقل و حداکثر	3	0.15	0.19	37.6	36.57	0.14	-3.5
		5	0.15	0.24	36.5	35.93	0.14	-2.76
	7	0.13	0.25	36.3	33.71	0.14	-2.84	
	بارش و رطوبت	3	0.34	0.17	41.3	41.68	-0.32	-1.06
		5	0.38	0.17	33.1	41.40	0.24	-0.77
		7	0.43	0.18	35.02	39.42	-0.17	-0.94

جدول ۶-۱۸. نتایج بدست آمده از ANN و ANFIS در مدل سازی به کمک داده های جریان و اقلیم.

زیر حوضه	پارامتر های ورودی	R ²		RMSE		Nash-Sutcliffe	
		ANN	ANFIS	ANN	ANFIS	ANN	ANFIS
اسکندری	بارش و دبی روز قبل	0.87	0.88	16.7	14.2	0.82	0.87
	بارش و دبی دو روز قبل	0.77	0.76	21.4	20.4	0.70	0.71
	بارش و دبی سه روز قبل	0.72	0.70	24.3	23.1	0.60	0.63
قلعه شاهرخ	بارش و دبی روز قبل	0.88	0.94	1.9	1.5	0.81	0.94
	بارش و دبی دو روز قبل	0.87	0.88	3.1	2.2	0.43	0.83
	بارش و دبی سه روز قبل	0.83	0.85	3.3	2.5	0.41	0.84

با توجه به مقادیر پارامتر های سنجش خطا حاصل شده از ANN و ANFIS برای هر دو زیر حوضه کارایی مناسب ANN و ANFIS را می توان نتیجه گیری نمود. ANN و ANFIS بدون استفاده از داده های جریان نتایج مناسبی ارائه نکرده اند و حتی با اعمال میانگین متحرک چند روزه بر روی داده های ورودی نیز نتایج آنها در قیاس با نتایج حاصل از ALM در شبیه سازی بدون استفاده از داده های جریان ضعیف تر می باشد. در ANN و ANFIS نیز با کمک گرفتن از داده های جریان تاخیری در بخش ورودی نتایج مانند ALM بهبود چشمگیری یافته است. با توجه به این نتایج می توان اظهار نمود که ALM نتایج مناسبی را به نسبت مدل های هوش مصنوعی هم رده خود ارائه نموده است.

Kisi (2005) با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی و مدل اتورگرسیو (AR) به پیش بینی جریان روزانه رودخانه های Blackwater و Gila در ایالات متحده و همچنین رودخانه Filoy در ترکیه پرداخته است [80]. مساحت حوضه های آبریز هر یک از رودخانه ها و طول دوره های آماری مورد استفاده در جدول ۶-۱۹ ارائه شده است. در این قسمت نتایج مدل AR ارائه نشده است.

جدول ۶-۱۹. مساحت حوضه های آبریز و طول دوره های آموزش و آزمون در مدل سازی با ANN و AR.

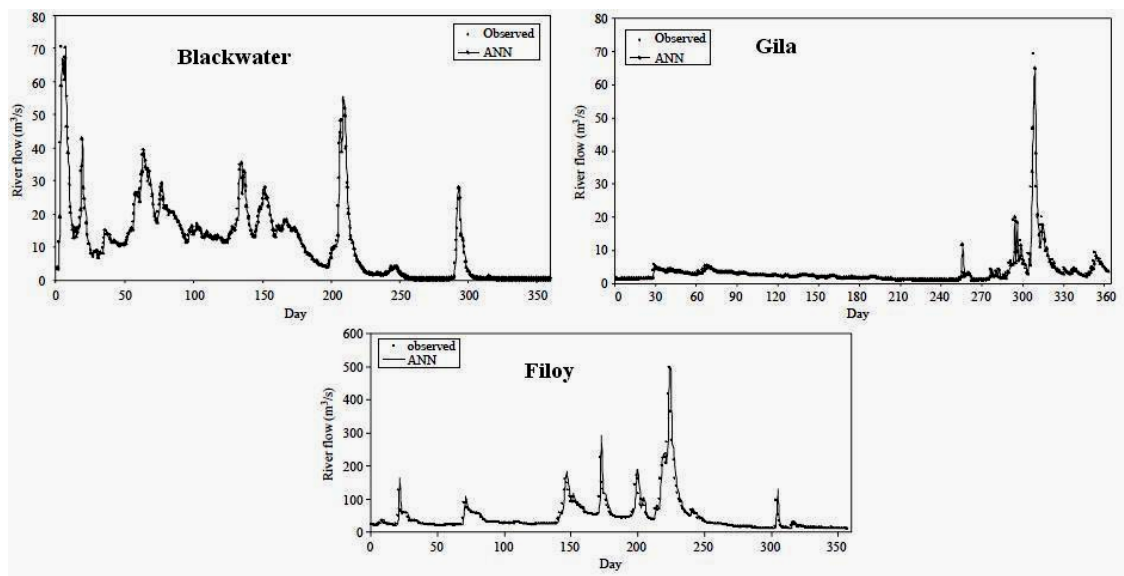
	Basin Area (km ²)	Training period	Testing period
Blackwater	761	Oct1990-Sep1996	Oct1996-Sep1997
Gila	10386	Oct1995-Sep1998	Oct1998-Sep1999
Filoy	133300	Oct1999-Sep2000	Oct2000-Sep2001

شبکه ای که برای این کار در نظر گرفته شده است یک شبکه سه لایه Feed-Forward ANN با یک لایه پنهان می باشد و نتایج حاصل از آن در جدول ۶-۲۰ ارائه شده است.

جدول ۶-۲۰. مقادیر R^2 و RMSE حاصل از شبیه سازی جریان سه رودخانه توسط ANN.

River	Blackwater		Gila		Filoy	
	R^2	RMSEcms	R^2	RMSEcms	R^2	RMSEcms
Q_{t-1}	0.92	66.3	0.75	56.4	0.87	373
Q_{t-1}, Q_{t-2}	0.95	49	0.81	48.9	0.88	388
$Q_{t-1}, Q_{t-2}, Q_{t-3}$	0.96	43	0.81	48.9	0.90	347
$Q_{t-1}, Q_{t-2}, Q_{t-3}, Q_{t-4}$	0.96	44.8	0.81	49.9	0.88	378
$Q_{t-1}, Q_{t-2}, Q_{t-3}, Q_{t-4}, Q_{t-5}$	0.96	42.9	0.81	49.8	0.88	392
$Q_{t-1}, Q_{t-2}, Q_{t-3}, Q_{t-4}, Q_{t-5}, Q_{t-6}$	0.96	43.5	0.81	50.0	0.88	380

با توجه به مقادیر R^2 گزارش شده برای هر سه رودخانه کارایی بسیار مناسب ANN را می توان نتیجه گیری نمود. ولی اگر قضاوت بر عهده مقادیر RMSE گذاشته شود با توجه به مقادیر میانگین جریان (به هیدروگراف های حاصل در شکل ۶-۳۲ توجه نمائید) نشان دهنده کارایی خیلی مناسبی نمی باشد و مقادیر RMSE در حدود ۲ تا ۱۰ برابر جریان میانگین می باشد که این مقدار برای ALM در حدود نصف جریان میانگین برآورد شده است. البته در کاربرد ANN طول دوره شبیه سازی نسبت به ALM کمتر بوده و همچنین به لحاظ خصوصیات همانند مساحت نیز دو حوضه از سه حوضه بسیار کوچکتر از کارون III می باشند ولی به طور کلی هر دو مدل نتایج تقریباً مشابهی را ارائه نموده اند. از نقاط ضعفی که در شبیه سازی با مدل های مبتنی بر هوش مصنوعی همچون ANN قابل تأمل می باشد این است که استفاده از آنها و حصول نتایج قابل اعتماد، وابستگی زیادی به تجربه و دانش فرد استفاده کننده دارد. مثلاً نخستین مسئله انتخاب پارامتر های ورودی می باشد که ANN توانایی تشخیص ورودی های مناسب را نداشته و با هر پارامتری که به آن معرفی گردد سعی در تخمین خروجی دارد و همانند ALM از هوش انتخاب بهترین پارامتر ها و حذف متغیر های اضافی بهره مند نمی باشد.



شکل ۶-۳۲. هیدروگراف های مشاهده ای و شبیه سازی شده توسط ANN برای سه رودخانه [80].

نکته مهم دیگری که در به کارگیری ANN و حصول نتایج تاثیر بسیار زیادی دارد معماری شبکه و اینکه از چندین لایه، چه تعداد نرون، نوع تابع محرک، مقادیر اولیه وزنها و بایاس ها و تعیین نرخ آموزش و ... که همه این انتخاب ها بر عهده کاربر می باشد و بایستی دفعات زیادی در الگوریتم های متفاوت به شبیه سازی جریان اقدام نمود تا در نهایت بتوان مناسب ترین معماری شبکه را انتخاب نمود. ولی در ALM از این سازوکار استفاده نشده است و مدل با هوش و قابلیت یادگیری خود فضای ورودی ها را به خروجی ها نگاشت می دهد. بدین رو به کمک ALM نه تنها می توان به نتایج مناسب و حتی بهتر از ANN دسترسی پیدا نمود بلکه استفاده از آن به این دلیل که مشابهت بیشتری با هوش انسانی دارد بسیار راحت تر و قابل اعتماد تر می باشد.

۶-۲-۸ جمع بندی و ارزیابی کلی مدل فازی ALM:

بررسی های آماری صورت گرفته روی داده های دبی در سالهای منتخب نشانگر شرایط متفاوت انتخاب شده جهت آموزش و آزمون مدل هوشمند ALM می باشد. همانگونه که به طور مفصل در بخش های پیشین اشاره گردید تقریباً تمامی شرایط برای انجام مدل سازی در این حوضه آبریز نامناسب بوده و توانمندی بالای مدل فازی ALM در ارائه نتایج مناسب و فراتر از حد انتظار در این

شرایط و دوره مدل سازی طولانی مدت سه ساله به اثبات رسیده است. همانطور که معیار های مختلف سنجش خطا نشان می دهد مدل کارایی بسیار مناسب و دقیقی در برآورد حجم رواناب کلی داشته است. مدل جز در موارد بسیار اندکی که اوج های بسیار شدیدی رخ داده است توانسته دبی های سیلابی و اوج را با دقت قابل قبولی شبیه سازی نماید. به دلیل هوشمندی و توانایی یادگیری و تصمیم گیری مناسب تر در ALM، کاربرد آن ساده تر نسبت به سایر مدل های هوشمند می باشد.

۳-۶ مقایسه عملکرد و ارزیابی مدل مفهومی و فازی:

مقایسه نتایج ALM با ۳۲ قانون فازی و با استفاده از داده های متغیر های ورودی بارش، دما، رطوبت و فشار بخار (هر کدام صفر تا ۴ روز تاخیر) که در شکل های ۶-۱۶ تا ۶-۱۹ و جدول ۶-۱۰ ارائه شده است با نتایج مدل بهینه HEC-HMS که در شکل های ۶-۳ تا ۶-۶ و جدول ۶-۲ ارائه شده است نشان می دهد که مدل HEC-HMS نتایج بهتری از مدل ALM ارائه نموده است و دلیل آن مفهومی بودن مدل HEC-HMS و در نظر گرفتن جزء جزء فیزیک مسئله مورد نظر بوده است و از طرفی همانطور که در شکل ۵-۴ نشان داده شده است همبستگی بین متغیر های غیر جریان با جریان رودخانه بسیار کم است و اساس کار ALM به یافتن همبستگی در شرایط خاص بین پدیده ها و استخراج دانش از این همبستگی ها می باشد که همبستگی کم مذکور، موجب بروز چنین خطاهایی شده است. به نحویکه جواب مدل HEC-HMS از ALM بهتر شده است. از طرفی در مدل ALM تمامی پارامتر های استفاده شده بصورت یکپارچه می باشد در حالیکه در مدل مفهومی برای انجام مدل سازی، حوضه کارون III به هفت زیر حوضه همگن تر تقسیم شده است که تا حدودی موجب کاسته شدن از درجه ناهمگنی زیاد حوضه می گردد. همچنین در مدل مفهومی قابلیت تشخیص بارش جامد و مایع وجود دارد که این مهم در مدل فازی ALM وجود نداشته و پارامتر های بارش و دما به عنوان دو پارامتر کاملاً مستقل و مجزا از هم در ورودی ها معرفی شده اند. همانطور که در شکل ۵-۴ نشان داده شده است جریان های با تاخیر مختلف با جریان هر روز ارتباط بسیار مناسبی

دارد و می توان انتظار داشت که با اضافه شدن این متغیر ها به مدل ALM نتایج به نحو چشمگیری بهبود یابد. نتایج مدل بهینه با ۱۶ قانون در شکل های ۶-۲۷ تا ۶-۳۱ و جداول ۶-۱۴ و ۶-۱۵ ارائه شده اند. با مقایسه این نتایج با نتایج مدل منتخب HEC-HMS می توان گفت که ALM نیز همانند مدل مفهومی به نتایج بسیار مناسبی در شبیه سازی جریان دست یافته است. نکته ای که در بخش مدل سازی ALM بایستی بدان اشاره گردد این بود که تخمین مقادیر بسیار شدید جریان سیلابی توسط ALM به خوبی مدل مفهومی صورت پذیرفته است و در آن اختلاف بین RMSE و PW-RMSE بیشتر از مدل مفهومی برآورد گردیده است. البته همانگونه که ذکر گردید هر دو مدل نسبت به مدل های هم ارز خود (مدل مفهومی با مفهومی و مدل فازی با سایر مدل های هوش مصنوعی) نتایج بسیار مناسب تری را ارائه نموده اند و مقایسه های صورت گرفته در این بخش فقط نسبت به همدیگر بیان می گردد. اگر به پارامتر های آماری و گرافیکی سنجش خطا برای شبیه سازی جریان توسط هر دو مدل توجه گردد (جدول ۶-۲ و اشکال ۶-۳ تا ۶-۶ برای مدل مفهومی و جدول ۶-۱۴ و اشکال ۶-۲۷ تا ۶-۳۱ برای مدل فازی) مشاهده می شود که در برخی موارد مانند R^2 ، PW-RMSE و Nash-Sutcliffe مدل مفهومی مقادیر بهتری ارائه نموده است و در برخی پارامتر ها مانند RMSE، Bias، PTVE و MPAE مقادیر مناسب تر توسط ALM تخمین زده شده است. اگر به مقادیر PTVE و Bias هر دو مدل توجه نمائیم مشاهده می گردد که مدل ALM تخمین بسیار مناسب تری را به نسبت مدل مفهومی ارائه نموده است و مشهود است که حجم رواناب کلی را ALM خیلی دقیق تر از HEC-HMS برآورد نموده است. اما چنانچه به مقادیر PW-RMSE و اختلاف مقادیر PW-RMSE و RMSE و همچنین Q-Q دیاگرام و نمودار پراکندگی حاصل از هر دو مدل توجه گردد مشاهده می شود که مدل مفهومی مقادیر رواناب اوج را به دقت مناسب تری نسبت به مدل فازی شبیه سازی نموده است. به طور کلی تا بدین جا بر اساس معیار آماری و گرافیکی سنجش خطا کارایی هر دو مدل در حد بسیار مناسبی بوده و تفاوت چندانی در آنها احساس نمی گردد. در مدل مفهومی کالیبره نمودن مقادیر پارامتر های مختلفی که بیان کننده شرایط هیدرولوژیکی سیستم می باشند یک پروسه

دشوار و وقت گیر می باشد. چرا که مقادیر پارامترها، طیف وسیعی را شامل شده که اغلب آنها در حوضه ها اندازه گیری نشده و یا اساساً پارامترهای فیزیکی قابل اندازه گیری نمی باشند و همگی بایستی برای هر حوضه کالیبره شوند [2]. چه بسا ممکن است در حالت هایی که مدل ها درجه آزادی بسیار زیادی مانند مدل SMA و مخزن خطی دارند و مقادیر تعداد زیادی از آنها در طی کالیبراسیون بایستی بهینه شوند این اتفاق صورت نگیرد و قابل استفاده نباشند. در کالیبراسیون مقادیر پارامترها نقش تجربه و هوش انسانی تأثیر زیادی در حصول نتایج مناسب داشته و لزوماً هر پروژه مدل سازی منجر به حصول نتایج مناسب نخواهد شد. ولی برخلاف مدل مفهومی، سرعت آموزش در ALM بسیار بالاتر بوده و تصمیم گیری های مناسب بر عهده هوش مصنوعی مدل گذاشته شده است و خیلی کمتر به کمک و هوش انسانی نیازمند می باشد. این مدل حتی نسبت به سایر مدل های هوش مصنوعی نیز از دقت و سرعت بالاتری برخوردار بوده و مثلاً برخلاف ANN نیازی به تعیین پارامترهای ورودی و مقادیر اولیه وزن ها و بایاس و به طور کلی معماری شبکه ندارد و به همین خاطر نیازی به تکرار فرآیند آموزش در شرایط مختلف نمی باشد و با یک مرتبه آموزش ALM، می توان مدل های مختلفی از ALM (تعداد قوانین فازی مختلف) را ایجاد نمود [50].

ملاک دیگری که بایستی در ارزیابی مدل ها مورد توجه قرار گیرد معیار امساک^۱ در مصرف پارامترها می باشد. بر طبق این اصل، مدلی بهتر می باشد که ضمن حصول نتایج مناسب، از تعداد کمتری پارامتر استفاده نموده و دارای پیچیدگی کمتری باشد. پیچیدگی با افزایش تعداد پارامتر بیشتر شده و نیازمند پایگاه داده های کاملتری می باشد و داده های ورودی زیاد در یک مدل یک ویژگی نامطلوب محسوب می گردد. بدین لحاظ نیز مدل ALM از ارجحیت بیشتری نسبت به مدل مفهومی برخوردار می باشد. با توجه به مزایا و معایب ذکر شده برای هر یک از مدل ها که مختصراً در بالا بدان اشاره گردید می توان نتیجه گیری نهایی را وابسته به هدف تحقیقات اینچنین بیان نمود:

^۱ Parsimony of Parameters

اگر شبیه سازی و پیش بینی جریان در حوضه ای فاقد آمار هیدرومتری ثبت شده صورت پذیرد استفاده از مدل مفهومی نتایج مناسب تری را ارائه خواهد نمود و چنانچه آمار هیدرومتری مناسبی در دسترس باشد کاربرد مدل ALM ارجحیت و سهولت بیشتری را خواهد داشت. همچنین اگر هدف از انجام تحقیقات برای اهدافی از قبیل طراحی سرریز های سد ها و مخازن یا پهنه بندی سیلاب و ... (که در آنها مقدار دبی اوج از اهمیت زیادی برخوردار است) می باشد با توجه به اینکه مدل مفهومی در تخمین دبی های اوج نتایج ارزنده تری ارائه نموده است استفاده از آن در صورت وجود آمار مناسب برای کالیبره نمودن مدل توصیه می گردد. ولی چنانچه هدف از تحقیقات، مدیریت آب مخازن و سد ها و ... می باشد که در آن پیش بینی حجم جریان از اهمیت زیادی برخوردار است با توجه به اینکه ALM مقادیر بسیار مناسب تری از PTVE و Bias ارائه نموده است بنابراین استفاده از آن دقت بیشتری را در بر خواهد داشت. به طور کلی هر دو مدل نتایج بسیار ارزنده ای ارائه نموده اند که نسبت به سایر مدل های هم رده خود با دقت بسیار مناسب تری عمل نموده اند.

۴-۶. نتایج کلی و زمینه ای برای ادامه تحقیقات:

۴-۶-۱ نتایج حاصل از مدل سازی فازی و مفهومی:

خلاصه نتایج آماری مدل سازی های انجام شده و مدل های بهینه یافته شده در شرایط مختلف به شرح زیر می باشد:

جدول ۴-۲۱. خلاصه نتایج آماری مدل سازی های انجام شده و مدل های بهینه یافته شده در دوره صحت سنجی و آزمون در شرایط مختلف.

PW-RMSE cms	RMSE cms	MPAE%	PTVE%	R ²	Bias cms	Nash- Sutcliffe	آلگوریتم های ارزیابی مدل ها
391.0	205.0	38.0	4.7	0.70	15.0	0.67	مدل مفهومی بدون در نظر گرفتن ذوب برف
265.0	151.3	36.5	11.3	0.84	36.0	0.82	مدل مفهومی با در نظر گرفتن ذوب برف
418.9	265.4	95.5	22.33	0.33	65.8	0.29	مدل ALM بدون داده های جریان (۳۲ قانون)
297.16	137.17	12.92	1.86	0.81	5.49	0.81	مدل ALM با داده های جریان (۱۶ قانون)

* مدل مفهومی HEC-HMS به همراه مدل محاسبه تلفات SMA و همچنین مدل فازی ALM به کمک جستجوی ابتکاری توانستند نتایج بسیار مناسبی را در شبیه سازی جریان روزانه رودخانه در شرایط کاملاً ناهمگون حوضه کارون III ارائه نمایند که هر کدام در مقایسه با مدل های هم رده خود دقت قابل قبول تری ارائه نموده اند.

* مدل HEC-HMS در حالتی که تمایز بین بارش جامد و مایع در آن وجود ندارد و ذوب برف مدل سازی نمی گردد توانسته است نتایج مناسبی ارائه نماید اما در برآورد مقادیر دبی های اوج ضعیف تر عمل نموده است که با فعال سازی مدل ذوب برف علاوه بر اینکه ارتقای مناسبی در عملکرد داشته است مقادیر دبی های اوج شدید را نیز به خوبی تخمین زده است.

* با وجود درجه آزادی بسیار زیاد (درجه آزادی ۱۸ برای مدل SMA، ۶ برای مدل مخزن خطی، ۲ برای هیدروگراف کلارک در هر زیر حوضه و ۲ برای مدل روندیابی ماسکینگام برای هر بازه) مدل های مورد استفاده در HEC-HMS، کالیبراسیون پارامترها به صورت دستی و با استفاده از قضاوت مهندسی قابل انجام می باشد.

* در مدل مفهومی با گنجاندن دوره Warm-Up در ابتدای دوره مدل سازی نتایج بهبود پیدا نموده است و به حصول شرایط اولیه مناسب تر کمک نموده است.

* مدل محاسبه تلفات SMA که از مهم ترین بخش های مدل مفهومی محسوب می گردد با در نظر گرفتن لایه های ذخیره ای مختلف قابلیت مناسبی در شبیه سازی پیوسته جریان در کنار سایر مدل ها مورد استفاده از خود نشان داده است.

* مدل ALM به شبکه بندی فضای متغیر های ورودی-خروجی و نقاط تقسیم فازی و توابع عضویت حساسیت زیادی نشان نداده است ولی هنگامی که به سوی تقسیم بندی قطعی (Crisp) پیش می رویم عملکرد مدل نامناسب تر می شود. نقاط مناسب تقسیم بندی چارک های اول و سوم تشخیص داده شد و در شبکه بندی فضاها حالت 200×200 مناسب تشخیص داده شد.

* مدل فازی ALM نسبت به سایر مدل های هوش مصنوعی سهولت کاربری بیشتری داشته و کمتر به کمک هوش انسانی در شبیه سازی ها نیازمند می باشد و نیازی به تکرار دوره های آموزشی در آن نمی باشد و به طور کلی با توانمندی های بالاتر و یادگیری مناسب تری نسبت به ANN و ANFIS عمل نموده است. عملکرد مدل فازی ALM در مدل سازی بدون استفاده از داده های جریان تأخیری نسبت به مدل مفهومی مناسب نبوده و نتایج ضعیفی به دلیل عدم همبستگی های معنی دار بین هیچ یک از پارامتر غیر جریان و داده های جریان داشته است. برخلاف سایر مدل های هوش مصنوعی ALM قابلیت انتخاب پارامتر های مهم و رتبه بندی متغیر های تقسیم بندی فضا و متغیر های تخمین گر را داشته و می تواند متغیر های اضافی را یافته و از آنها در مدل استفاده ننماید. نتایج نشان داد که مدل با ۳۲ قانون فازی بهترین مدل بدست آمده می باشد در حالت بدون استفاده از داده های جریان می باشد.

* مدل ALM با اضافه کردن داده های جریان با تاخیر های مختلف به عنوان ورودی، توانست بهترین مدل را با تعداد قانون فازی ۱۶ توسعه دهد. با توجه به HPD می توان بهترین متغیر استفاده شده برای تقسیم فضا و تنها متغیر تخمین گر را دبی با یک روز تاخیر معرفی نمود.

* به طور کلی مدل مفهومی به صورت خاص برای اهداف مستلزم پیش بینی دبی های اوج و سیستم های هشدار سیل و مدل فازی برای اهداف پیش بینی حجمی رواناب و مدیریت مخازن کارایی مناسب تری نسبت به هم ارائه نموده اند.

* هر دو مدل مفهومی و فازی به صورت کلی نتایج مشابهی را ارائه نموده اند ولی با در نظر گرفتن تعداد پارامتر های زیاد مورد نیاز HEC-HMS، نقش تجربه و هوش انسانی در کارایی مدل، نتایج

مناسب ALM بدون لحاظ اثر برف و یکپارچه تر بودن آن و ... می توان مدل ALM را بعنوان مدلی جدید با کارایی مناسب جهت تخمین جریان رودخانه ای معرفی نمود.

* مدل HEC-HMS با مدل های مختلف در حوضه های مختلف مورد قیاس قرار گرفت و نتایج حاکی از مناسب بودن نتایج بدست آمده در مدل سازی جریان رودخانه کارون III بود و همچنین ALM نیز در قیاس با دیگر مدل های هوش مصنوعی مانند ANN و ANFIS قابلیت خود را به اثبات رسانید.

۶-۴-۲ پیشنهادات و زمینه هایی برای ادامه تحقیقات:

* در نظر نگرفتن اثر شکل حوضه (Form factor) و خصوصیات توپوگرافی مانند شیب برای محاسبه پتانسیل سیل خیزی در هر یک از زیر حوضه ها و همچنین انتخاب یک مقدار پتانسیل تبخیر و تعرق برای هر ماه در دوره های بزرگتر از یک سال از عوامل بروز خطا و ویژگی های نامطلوب در مدل HEC-HMS می باشند که با وجود نتایج قابل قبول کنونی بهتر است که از نقش موثر این فاکتورها در بهبود خروجی های مدل صرف نظر نگردد.

* پیشنهاد می گردد برای کالیبراسیون دقیق تر، در صورت در دسترس بودن داده ها در خروجی هر زیر حوضه ابتدا هر یک از زیر حوضه ها کالیبره گردد و سپس به کالیبراسیون نهایی در خروجی کل حوضه پرداخته شود.

* استفاده از داده های رادار و یا هایتوگراف های بارش در مدل سازی مفهومی برای تعیین مناسب تر توزیع زمانی بارش.

* مشکلی که در کاربرد مدل های ذوب برف وجود دارد در استفاده از داده های دما رخ می دهد که نشان دهنده افزایش دما و شروع ذوب در اواسط روز در دوره های سرد نمی باشند. برای غلبه بر این مشکل نیز بهتر است که در صورت در دسترس بودن داده، گامهای زمانی مدل سازی کوچکتر انتخاب گردد تا مثلاً با داده های ساعتی دما بتوان توزیع زمانی تغییرات دما را به خوبی به مدل معرفی نمود.

* در مدل فازی ALM از نقش موثر داده هایی چون عامل برف و پدیده هایی بزرگ مقیاسی چون ENSO برای بهبود عملکرد مدل کمک گرفته شود.

* انجام مدل سازی روزانه دراز مدت با سایر مدل های مفهومی و هوش مصنوعی در حوضه کارون III و ارائه نتایج حاصل از پژوهش ها با معیار های متعدد آماری و گرافیکی سنجش خطا تا در شرایط کاملاً برابر بتوان به ارزیابی دقیق مدل های برتر پرداخت.

- * انجام مدل سازی دراز مدت روزانه با HEC-HMS و ALM در حوضه های فاقد نزولات برفی و در شرایط بارش یک جنس معرفی شده به هر دو مدل برای ارزیابی دقیق نحوه عملکرد آنها.
- * انجام مدل های مختلف استوکستیک در مقیاس های زیر سالانه و مقایسه با نتایج مدل قطعی HEC-HMS و مدل فازی ALM.
- * انجام شبیه سازی های کوتاه مدت و فصلی (در شرایط همگن تر) به کمک مدل هوشمند ALM و بررسی کارایی و عملکرد مدل در این شرایط.
- * بررسی میزان مقاومت و پایداری مدل های فازی و مفهومی نسبت به شدت های مختلف نویز در داده های ورودی.

League and Freeze, 1985:

The hydrologic modeling is more *an Art than a Science*.....

..... The usefulness of the results depends in large measure on the talents and experience of the hydrologist.

پایان

فهرست منابع

- [1] اکبر پور، م، (۱۳۸۲)، پایان نامه کارشناسی ارشد، شبیه سازی فرآیند بارندگی-رواناب با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی و مدل HEC-HMS: مطالعه موردی حوضه رودخانه زرد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده کشاورزی، بخش مهندسی آب.
- [2] Davis C.A., (2000), "HEC-HMS Technical Reference Manual", US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources (USACE), <http://www.hec.usace.army.mil/>.
- [3] Bagheri Shouraki S., and Honda N, (1999a) "Hardware simulation of brain learning process", In 15th Fuzzy System Symposium, 2-5 June, Osaka, Japan, 91-94.
- [4] Zadeh L. A., (1965), "Fuzzy sets, *Information and Control*", 338-353.
- [5] Mamdani E.A. (1976), Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers, *International Journal of Man-Machine Studies*, 8, pp669-678.
- [6] Sugeno M. and Yasukawa T. (1993), A fuzzy-logic based approach to qualitative modeling, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1, 7-31.
- [7] Tanaka K. and Sano M. (1994), A robust stabilization problem of fuzzy control system and its application to backing up control of a truck-trailer, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2, pp119-133.
- [8] Takagi T. and Sugeno M. (1985), Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 15, pp116-132.
- [9] Otsubo A., and Hayashi K, (1996) "Fuzzy hybrid control method applying simplified indirect inference method", In 5th IEEE Conference of Fuzzy Systems, September, 283-289.
- [10] Bagheri Shouraki S., Yuasa G., and Honda N, (1998) "Fuzzy interpretation of human intelligence", In Vietnam Japan Bilateral Symposium of Fuzzy Systems and Applications, October 1998, Halong Bay, Vietnam, 441-448
- [11] Bagheri Shouraki S., and Honda N, (1997a) "A new method for establishing and saving fuzzy membership functions", In 13th Fuzzy Symposium, 4-6 June, Toyama, Japan, 91-94.
- [12] نجف زاده، ر، ابریشم چی، ا، تجربی، م، طاهری شهرآئینی، ح، (۱۳۸۳)، شبیه سازی جریان رودخانه با مدل ذوب برف، *مجله آب و فاضلاب*، شماره ۵۲.
- [13] نجفی، م، شیخی وند، ج، پرهت، ج، (۱۳۸۳)، برآورد رواناب حاصل از ذوب برف در حوضه های برف گیر با استفاده از مدل SRM، مطالعه موردی حوضه سد مهاباد، *مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی*، سال یازدهم، شماره ۳.
- [14] بیرویدیان، ن، جندقی، ن، (۱۳۸۴)، برآورد رواناب ذوب برف به وسیله مدل اس.آر.ام و مقایسه نتایج آن با اطلاعات آبنمود رودخانه در آبخیز زیارت، *مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی*، شماره ۶، ص ۱۸۸ - ۱۸۱.
- [15] Harshburger B.J., Blandford T.R., Moore B.C., Humes K.S., Walden V.P., Qualls R.J., and Zhao W, (2001) "Improved short-term operational streamflow forecasting for snow-melt dominated basins in Idaho", http://water.usgs.gov/wri/02-03grants_new/prog-compl-reports/2003ID10B.pdf.
- [16] Spruill C.A. Workman S.R. Taraba J.L. 2000, Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model, *Transactions of the ASAE*, Vol. 43(6), pp1431-1439.
- [17] پرهت، ج، ثقفیان، ب، صدقی، ح، (۱۳۸۴)، بررسی کاربرد مدل SRM در شبیه سازی رواناب حاصل از ذوب برف با استفاده از داده های ماهواره ای در حوضه های بدون آمار برف: مطالعه موردی حوضه خرسان در کارون، *تحقیقات منابع آب ایران*، بهار ۱۳۸۴، (۱)، ص ۱-۱۱.
- [18] نجفی ایگدیر، الف، قدوسی، ج، ثقفیان، ب، پرهت، ج، (۱۳۸۶). برآورد رواناب حاصل از ذوب برف با استفاده از سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در حوضه شهرچائی ارومیه، *مجله پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی*، شماره ۷۶.
- [19] Richard C., Gratton D.J, (2001) "The Importance of the Air Temperature Variable for the Snowmelt Runoff Modelling Using the SRM Model", 58th Eastern Snow Conference Ottawa, Ontario, Canada.
- [20] Verdhen A., and Prasad T, (1993) "Snowmelt Runoff Simulation Models and their Suitability in Himalayan Conditions", *Snow and Glacier Hydrology* (Proceedings of the Kathmandu Symposium), IAHS Publ, No. 218.

- [21] Gassman P.W, Reyes M.R. Green C.H. Arnold J.G, (2008), The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions, *Transactions of the ASABE*, Vol. 50(4), pp1211-1250.
- [22] Omani N., Tajrishy M., Abrishamchi A, (2008) "Modeling of a River Basin Using SWAT Model and SUFI-2", 4th International Conference of SWAT Model, UNESCO-IHE, Delft, Netherlands, 4-6 July.
- [23] Hernandez M. Miller S.C. Goodrich D.C. Goff B.F. Kepner W.G. Edmonds C.M. Jones K.B, (2000), Modelling Runoff Response to Land Cover and Rainfall spatial variability in semi-arid Watersheds, *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 64, pp285-298.
- [24] Eckhardt K. Haverkamp S. Fohrer N. Frede H.G. (2001), SWAT-G, a version of SWAT99.2 modified for application to low mountain range catchments, *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 27, pp641-644.
- [25] سعادت‌ی، ح، غلامی، ش، شریفی، ف، ایوب زاده، س.ع، (۱۳۸۵)، بررسی اثرات تغییر کاربری اراضی در رواناب سطحی مدل شبیه سازی، *مجله منابع طبیعی ایران*، ج ۵۹، شماره ۲.
- [26] عمانی، ن، تجریشی، م، ابریشم چی، ا، (۱۳۸۵)، شبیه سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل GIS و SWAT، هفتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه. http://www.civilica.com/Paper-IREC07-IREC07_328.html
- [27] Rostamian R. Jalali A. Afyuni M. Mousavi S.F. Heidarpour M. Jalalian A. Abbaspour K.C. 2008, Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran, *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, 53(5) Oct.
- [28] Levesque E. Anctil F. Griensven A.V. Beauchamp N. (2008), Evaluation of streamflow simulation by SWAT model for two small watersheds under snowmelt and rainfall, *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 53(5).
- [29] Manguerra. H.B. Engel B.A. (2008), Hydrologic parameterization of Watersheds for Runoff prediction using SWAT, *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 34, Issue 5, pp1149 - Profile 1162.
- [30] Mulungu. D.M.M. Munishi S.E. (2007), Simiyu River catchment parameterization using SWAT mode, *Journal of Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. (online; in press), pp. doi:10.1016/j.pce.2007.07.053.
- [31] Wu K. Johnston C. 2007, Hydrologic response to climatic variability in a Great Lakes Watershed: A case study with the SWAT model, *Journal of Hydrology*, Vol. 337(1-2), pp187-199.
- [32] Zhang X. Hao F.h. Cheng H.g. Li D.f. 2003, Application of SWAT model in the Upstream Watershed of the Luohe River, *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 44, No. 1, pp48-61.
- [33] Zhang X. Srinivasan R. Debele B. Hao F. 2008, Runoff simulation of the headwaters of Yellow River using the SWAT model with three snowmelt algorithms, *journal of American Water Resources Association*, Vol. 44, No.1.
- [34] میرزا خان، ح، (۱۳۸۰)، پایان نامه کارشناسی ارشد، مقایسه مدل شبیه سازی شده بارش-رواناب به روش شیب-سطح با مدل HEC-HMS در حوضه آبریز جعفرق خراسان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکده مرتع و آبریز داری.
- [35] شقایب فلاح، ر، (۱۳۸۰)، پایان نامه کارشناسی ارشد، شبیه سازی دبی حداکثر سیلابی در شاخه های فرعی رودخانه با استفاده از مدل HEC-HMS: مطالعه موردی حوضه محمد آباد گلستان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکده مرتع و آبریز داری.
- [36] سوری نژاد، ع، (۱۳۸۰)، پایان نامه دکترای تخصصی، نظیرسازی هیدروکلیماتولوژیکی مدل‌های بارش-رواناب در حوضه های آبریز جنوب غربی ایران، مطالعات موردی حوضه آبخیز رودخانه های خرم آباد-کشکان در استان لرستان، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم انسانی، گروه علوم جغرافیا و سنجش از دور <http://alpha-5.irandoc.ac.ir>
- [37] محمودیان شوشتری، م، مجد زاده طباطبایی، م.ر، یوسفی، ع، (۱۳۸۱)، بررسی و کاربرد مدل HEC-HMS در مهندسی رودخانه، بررسی موردی رودخانه های کر و سیوند استان فارس، ششمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- [38] عابدینی، م.ج، رحیمی، ی، (۱۳۸۲)، واسنجی مدل بارندگی-رواناب HEC-HMS با بهره گیری از الگوریتم ژنتیک و مدل متعین PEST، ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۷-۱۵ اردیبهشت.
- [39] پقه، ا، (۱۳۸۲)، پایان نامه کارشناسی ارشد، بررسی سهم اثر زیر حوضه ها در سیل خیزی حوضه آبریز گرمابدشت با استفاده از مدل هیدرولوژی HEC-HMS، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، دانشکده مرتع و آبریز داری.

- [40] جهانگیر، ع.، (۱۳۸۴)، پایان نامه کارشناسی ارشد، شبیه سازی فرآیند بارش-رواناب با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی (ANN) و مقایسه با مدل HEC-HMS در حوضه معرف کارده، دانشگاه مازندران، مجتمع آموزش عالی علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، دانشکده مهندسی زراعی، گروه مهندسی آب.
- [41] بشیر گنبد، م.، (۱۳۸۴)، پایان نامه کارشناسی ارشد، بررسی پتانسیل تولید سیل در حوضه های آبریز با استفاده از مدل HEC-HMS در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی: مطالعه موردی حوضه معرف کسلیان، دانشگاه مازندران، دانشکده منابع طبیعی.
- [42] اکبر پور، م.، رهنما، م.ب.، بارانی، غ.، (۱۳۸۲)، مقایسه شبکه عصبی مصنوعی و مدل HEC-HMS در فرآیند بارندگی-رواناب، چهارمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شیراز، ۲۹ مهر-۱۱ آبان.
- [43] ایزانلو، ح.، (۱۳۸۵)، پایان نامه کارشناسی ارشد، اولویت بندی زمانی و مکانی سیل خیزی زیر حوضه های آبریز کوشک آباد خراسان رضوی با استفاده از مدل HEC-HMS، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، گروه مهندسی آبریز داری.
- [44] Iliiev R., Bournaski E., Kirilov L., Terziev I, (2007) "Computer Modeling of Watershed Runoff with Data for the Mesta River", International Conference on Computer Systems and Technologies - CompSysTech'07.
- [45] خسروشاهی، م.، (۱۳۸۶)، اولویت بندی مکانی مناطق سیلخیز-راهکاری برای عملیات اجرایی مهار و کنترل سیل در حوضه های آبخیز- <http://khosromk.blogfa.com/>
- [46] شریفی، ف.، نام درست، ج.، ایوب زاده، س.ع.، وکیل پور، ج.، (۱۳۸۳)، تکمیل، اصلاح و ارزیابی مدل رایانه ای ISDI در تعدادی از حوضه های آبریز ایران، *مجله منابع طبیعی ایران*، ج ۵۷، شماره ۴.
- [47] شریفی، ف.، صفا پور، ش.، ایوب زاده، س.ع.، (۱۳۸۵)، ارزیابی مدل رایانه ای AWBM2002 در شبیه سازی فرآیند های هیدرولوژیکی تعدادی از حوضه های آبریز ایران، *مجله پژوهش و سازندگی*، شماره ۶۳.
- [48] Keskin F., Sensoy A., Sorman A., Sorman A.U, (2006) "Application of MIKE11 Model for the simulation of Snowmelt Runoff in Yuvacik Dam basin, Turkey", International congress on River basin management.
- [49] Al-Qurashi A. McIntyre N. Wheater H. Unkrich C. (2008), Application of the Kineros2 rainfall-runoff model to an arid catchment in Oman, *Journal of Hydrology*, Vol. 355, pp91- 105.
- [50] طاهری شهرآئینی، ح.، (۱۳۸۶)، پایان نامه دکتری گرایش آب، استخراج پارامتر های کیفی آب به کمک تصاویر ماهواره ای و مدلسازی معکوس معادله انتقال تشعشع به روش یادگیری فعال، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی عمران.
- [51] انوری، ص.، (۱۳۸۷)، پایان نامه کارشناسی ارشد، ارتقاء مدل های هوشمند جهت پیش بینی جریان رودخانه با استفاده از داده های توزیع مکانی اقلیمی و سطح برف، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده کشاورزی، گروه سازه های آبی.
- [52] Saghafian B., Tajrishi M., Taheri Shahraini H., Jalali M., (2003) "Modeling Spatial Variability Of Daily Rainfall In Southwest Iran", *Scientica Iranica*, Vol 10, No 2, pp 164-174.
- [53] Davis C.A., (2000), "HEC-HMS Hydrologic Modeling System User's Manual", US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources (USACE), <http://www.hec.usace.army.mil/>.
- [54] Davis C.A., (2008), "HEC-HMS Hydrologic Modeling System Applications Guide", US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources (USACE), <http://www.hec.usace.army.mil/>.
- [55] Bennett T, (1998), MS thesis, Development and application of a continuous soil moisture accounting algorithm for the Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Dept. Of Civil and Environmental Engineering, Univ of California, Davis, Calif.
- [56] موسوی ندوشنی، س.س.، داننده مهر، ع.، (۱۳۸۴)، سیستم مدل سازی هیدرولوژیکی HEC-HMS، نشر موسسه فرهنگی هنری دیباگران تهران.
- [57] Fleming M., Neary V, (2004), "Continuous Hydrologic Modeling Study with the Hydrologic Modeling System", ASCE, MAY/JUNE, 2004 / 175.
- [58] Linsley R.K., Kohler M.A., and Paulhus J.L.H, (1982), "Hydrology for engineers", McGraw-Hill, New York, NY.

- [59] Jang J.S.R., Sun C.T. (1995), "Nero-Fuzzy Modeling and Control", Proceeding of the IEEE, 83(3):378-405.
- [60] Jang J.S.R. (1993), ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference Systems, *IEEE Transaction on systems manual and cybernetic*, 23(3): pp665-685.
- [61] Schmidt R.F. (1985), "Fundamentals of Neurophysiology", Springer-Verlag.
- [62] Bagheri Shouraki S. and Honda N. (1999b), Recursive fuzzy modeling based on fuzzy interpolation, *Journal of Advanced Computational Intelligence*, 3, pp114-125.
- [63] Bagheri Shouraki S., and Honda N. (1998) "Fuzzy controller design by an active learning method", In 31th Symposium of Intelligent Control, 26 August, Japan, Tokyo, 1-10.
- [64] Bagheri Shouraki S., and Honda N. (1997b) "Outlines of a living structure based on biological neurons for simulating the active learning method", In 7th Intelligent Systems Symposium, November, Sapporo, Japan, 183-188.
- [65] Shahdi S. A. and Bagheri Shouraki S. (2003), Use of active learning method to develop an intelligent stop and go cruise control, In *Intelligent Control and Systems (ISC 2003)*, 25-27 June, Salzburg, Austria, Paper No. 388-157.
- [66] Taheri Shahraiyini, H., Bagheri Shouraki S., Fell, F., Schaale, M., Fischer, J., Tavakoli, A., Preusker, R., Tajrishy, M, Vatandoust, M., and Khodaparast, H., 2006, Application of Active Learning Method to retrieve pigment from spectral remote sensing reflectance data, *International Journal of Remote Sensing*.
- [67] Taheri Shahraiyini, H., 2006, Extraction of water quality parameters using the satellite data and inverse modeling of radiative transfer equation by active learning method, Report for UNESCO (UNESCO/KEIZO OBUCHI Research Fellowships Programme-2005).
- [68] Fausett L., (1994), "Fundamentals of neural networks: Architectures, algorithms and applications", Prentice Hall, pp.461.
- [69] Abbass H.A., Sarker R.A., and Newton C.S., (2002), "Data mining: A heuristic approach", Idea Group Publishing.
- [70] Taheri Shahraiyini, H., Bagheri Shouraki S., Fell, F., Schaale, M., Fischer, J., Tavakoli, A., Preusker, R., Tajrishy, M, Vatandoust, M., and Khodaparast, H., 2009, Application of the active learning method to the retrieval of pigment from spectral remote sensing reflectance data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 30, No. 4, 20 February, pp 1045-1065.
- [71] اکبر پور، م، معتمدی، ع، (۱۳۸۴)، روند یابی جریان رودخانه کارون در بازه اهواز- ملاتانی با استفاده از مدل HEC-HMS. <http://www.civilica.com>
- [72] Cunge J.A. (1969), On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method), *Journal of Hydraulic Research*, 7(2), pp205-230.
- [73] Chambers J.M., Cleveland W.S., Kleiner B., Tukey P.A. (1983), "Graphical methods for data analysis", Wadworth, Belmont, California, pp.395.
- [74] O'Reilly J. Maritorea S. Mitchell B. Siegel D. Carder K. Garver S. Kahru M. and McClain C. (1998), Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS, *Journal of Geophysical Research*, 103, 24937-24953.
- [75] Morid S., Shahkarami N., Rahimi Jamnani M.A. (2006) "Optimization of cropped area based on forecasted stream flows", International conference on Integrated water resources management, Buchom, Germany.
- [76] عراقی نژاد، ش، (۱۳۸۴)، پایان نامه دکتری، برنامه ریزی و مدیریت منابع آب بر اساس تحلیل های اقلیمی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- [77] رستم افشار، ن، فهمی، ه، پیره، ع، (۱۳۸۲)، شبیه سازی جریان رودخانه ها با استفاده از طرح شبکه عصبی بر اساس مدل ریاضی فوریه، چهارمین کنفرانس هیدرولک ایران، دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز، ۲۹ مهر - ۱ آبان.
- [78] رضوی، س.س، (۱۳۸۲)، پایان نامه کارشناسی ارشد، کاربرد شبکه های عصبی مصنوعی در روندیابی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر تهران، دانشکده عمران، سازه های هیدرولیکی.
- [79] دستورانی، م.ت، طالبی، ع، مقدم نیا، ع، شریفی دارانی، ح. (۱۳۸۸)، مقایسه شبکه عصبی مصنوعی و سیستم عصبی - فازی در برآورد بارش - رواناب در حوضه آبریز سد زاینده رود، کنفرانس بین المللی منابع آب، شاهرود، ایران.
- [80] Kisi O. (2005), Daily River Flow Forecasting Using Artificial Neural Network and Auto-Regresive Models, *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 29.



Shahrood University of Technology
Faculty of Earth Sciences
Hydrogeology Division

M.Sc. Thesis

Evaluation of conceptual and fuzzy methods
for stream flow modeling

Mohammad Reza Ghafouri

Supervisors:

Dr. Hamid Taheri Shahraiyni

Prof. Bahram Saghafian

Advisor:

Dr. Saeed Bagheri Shouraki

September 2009