



Estimating Precipitation Data Using a Fuzzy-based Technique

H. Ansari^{1*} and K. Davary¹

Abstract

As a flexible tool that may be adapted to many systems, fuzzy logic was employed to develop a new technique for estimation of precipitation data. This fuzzy-based technique estimates precipitation for any point upon available data from the neighboring meteorological stations. The contributions of each station is weighed due to its differential longitudes, latitudes, and altitudes with respect to the point of interest. This was accomplished through two membership functions for distance and elevation. Each of these functions are composed of four fuzzy sets (triangular and trapezoidal shapes with partial overlaps), which in turn led to sixteen fuzzy rules. Computing weights for each station activates a minimum of two and a maximum of four rules. The technique was tested for Khorasan province in eastern Iran using the data from 48 meteorological stations. Finally, the results from the fuzzy-based technique are compared with the results of two other commonly used methods, namely simple average and inversed-distance. The results generally showed the minimum error for fuzzy technique. The minimum mean-absolute-error and the model deviation of the estimated values were found for the fuzzy-based technique. Inversed-distance and simple average methods showed higher values for these parameters. The role of the number of stations involved in the estimation process was also discussed. The optimal number of stations are found to be four.

Keywords: Fuzzy model, Fuzzy rules, Precipitation data, Average method, Inversed-distance method.

تخمین و بازسازی داده‌های بارندگی با تکنیک فازی

حسین انصاری^{۱*} و کامران داوری^۱

چکیده

منطق فازی به عنوان یک ابزار انعطاف‌پذیر که قابلیت استفاده در بسیاری از سامانه‌ها را دارد، جهت ارائه و توسعه یک تکنیک جدید برای تخمین و بازسازی داده‌های بارندگی بکار گرفته شده است. تکنیک مبتنی بر منطق فازی، بارندگی هر نقطه را با توجه به داده‌های موجود در ایستگاه‌های هواشناسی مجاور و درجه تأثیر ایستگاه‌ها بر مبنای تغییر طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع تخمین می‌زند. این کار با ارائه دو تابع عضویت فازی اختلاف فاصله و ارتفاع انجام شد. هر کدام از این توابع خود ترکیبی از چهار مجموعه فازی با اشکال مثلثی و دوزنقه‌ای با همپوشانی جزئی بوده، که منجر به ایجاد ۱۶ قانون فازی گردید. برای محاسبه وزن و ضریب هر ایستگاه نیز حداقل ۲ و حداکثر ۴ قانون فعال شد. این تکنیک با استفاده از ۴۸ ایستگاه هواشناسی در کل استان خراسان بزرگ آزمون شده و نتایج حاصل از آن با روش عکس فاصله و روش میانگین‌گیری مقایسه گردید. نتایج حاصله حداقل خطا را برای تکنیک فازی بدست داد. به طوریکه متوسط خطای مطلق و انحراف نتایج مدل در تکنیک فازی کمتر از دو روش دیگر و روش عکس فاصله کمتر از روش میانگین‌گیری می‌باشد. همچنین تأثیر تعداد ایستگاه‌ها بر نتایج روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت، که نهایتاً استفاده از چهار ایستگاه، بهترین نتایج را در مدل فازی بدست داد.

کلمات کلیدی: مدل فازی، قوانین فازی، داده‌های بارندگی، روش میانگین‌گیری، روش عکس فاصله.

تاریخ دریافت مقاله: ۲۷ مرداد ۱۳۸۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۳۰ آبان ۱۳۸۸

1- Assistant Professor Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Email: Ansari-hos@yahoo.com, K.davary@gmail.com
*- Corresponding Author

۱- استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد
*- نویسنده مسئول

می‌گیرد. بعضی از محققین معتقد که استفاده از منطق فازی باعث افزایش کیفیت و کمیت فن‌آوری‌های دیگر می‌شود. مثلاً استفاده از این منطق در یک شبکه عصبی برای بیان پارامترهای مورد استفاده به صورت عبارات فازی باعث افزایش سرعت یادگیری^۱ می‌شود. این تنوع کاربری باعث شده که از این منطق به عنوان یک تکنیک اصلی در زمینه‌های مختلف از جمله علوم محیطی و اکولوژیکی که دارای مدل‌های بسیار پیچیده می‌باشند، استفاده شود (Bankert et al., 2001).

در قسمت ذیل به تعدادی از تحقیقات صورت گرفته در ارتباط با استفاده از مدل‌های فازی اشاره می‌شود. در مطالعه‌ای در آلمان، محققین به بررسی استفاده از منطق فازی و مجموعه‌های فازی در اکولوژی، به ویژه آنالیز داده‌ها و مدل‌سازی مرتبط با آنها پرداختند. این محققین بیان داشتند که روش منطق فازی و مجموعه فازی را می‌توان برای محاسبه عدم قطعیت‌ها در تحقیقات اکولوژیکی مورد استفاده قرار داد. مقایسه روش‌های قدیمی پردازش اطلاعات با روش فازی، این محققین را قادر ساخت تا استفاده بهتری از داده‌های ناقص، نادقیق و مبهم بکنند. آنها با استفاده از این روش توانستند که اطلاعات مبهم و داده‌های ناقص و نادقیق را با استفاده از متغیرهای بیانی با عبارات دقیقی در مجموعه فازی بخوبی پردازش کنند (Salaski, 2002).

در موضوعات مربوط به منابع آبی، به جهت پیوستگی پارامترها و انعطاف‌پذیری مجموعه‌های فازی، این مجموعه‌ها وسایل مؤثری را برای کاربردهای عملی در اختیار قرار می‌دهند (Bardossy et al., 1990). یکی دیگر از موارد استفاده از سیستم‌های فازی، تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره با استفاده از داده‌های غیردقیق، (مثل بهره‌برداری چند منظوره از منابع آبی) است. محققین این مسئله را که به صورت بیانی توصیف شده با توابع عضویت فازی مطرح کردند. مطالعه آنها شامل همه پرسش‌ها و نظرسنجی‌های مدیریتی از تصمیم‌گیرندگان و نمایندگان گروه‌های مؤثر بر تصمیم‌گیری بوده که برای توسعه اقدامات چند منظوره فازی با استفاده از توابع عضویت کاهش و افزایش منابع آب ارائه شده است. در این مطالعه، اهداف چندمنظوره به صورت قیود، و کمبود آب پایان سال، به صورت یک هدف تعریف شد (Fontane et al., 1997). محققین حرکت آب در منطقه غیر اشباع خاک را با استفاده از روش فازی مدل کردند. داده‌هایی که از حل معادله ریچاردز بدست آمده بودند، برای فرمول‌بندی قوانین فازی مورد استفاده قرار گرفتند. این محققین همچنین از سیستم‌های فازی سازگار با سری‌های زمانی

سازگار با این بود که با پیشرفت علم و دانش، عدم قطعیت‌ها از بین خواهند رفت. اما در دهه‌های اخیر وجود عدم قطعیت‌ها و تناقض‌ها بصورت اجتناب‌ناپذیری بعنوان قسمت‌هایی از سیستم طبیعی مدنظر قرار گرفته‌اند. در این زمینه شیوه‌های قدیمی مواجهه با عدم قطعیت‌ها منجمله کاربرد تئوری آمار و احتمال در بسیاری از موارد موفقیت‌آمیز بوده، اگرچه کاربرد این تئوری‌ها برای مدل‌های پیچیده نیازمند به فرضیه‌های متعدد تئوریک بوده که عملاً کاربردها آنها را غیرقابل استفاده و بسیار مشکل می‌ساخته است. اکثر اوقات تأکید بیش از اندازه بر دقت بیشتر سبب پیچیدگی مدل‌ها شده تا جائیکه در بعضی موارد، کاربرد آنها برای منظورهای عملی امکان‌پذیر نمی‌باشد (Bardossy and Duckstein, 1995). اما منطق فازی راهکار دیگری را جهت مقابله با عدم قطعیت‌ها ارائه می‌کند. از نظر بسیاری از دانشمندان، منطق فازی به عنوان ابزار قابل قبولی در دنیای واقعی علم بوده که در زمینه‌های بسیاری کاربرد دارد (Zimmermann, 1985).

برخی روش‌های بکار گرفته شده در علوم که مبتنی بر قطعیت هستند، رفتار سیستم‌های فیزیکی را به وسیله یکسری قوانین بر مبنای مکانیزم‌های دینامیکی پیچیده و با استفاده از معادلات دیفرانسیل جزئی بیان می‌کنند. به عنوان مثال، مدل‌های پیش‌بینی هواشناسی یا پیش‌گوئی‌های آب و هوایی را می‌توان نام برد. در واقع این مدل‌ها نسبت به مدل‌های شناخته شده دیگر بسیار پیچیده‌اند [Casti, 1990; 1993]. اغلب اوقات داده‌های موجود برای واسنجی و صحت سنجی مدل‌های پیچیده کافی نیست و به علاوه ناهمگنی و یا ناپایداری این گونه مدل‌ها نیز می‌تواند باعث انحراف نتایج بدست آمده نسبت به مدل‌های تحلیلی شود (Duckstein, and Parent, 1994). همچنین در بسیاری از علوم، مانند علوم زیست‌شناسی، اجتماعی، اکولوژیکی و پزشکی اطلاعات و دانسته‌ها معمولاً نه در چارچوب‌های ریاضی صریح بلکه در قالب‌های مفهومی بیان می‌گردند (Casti et al., 1979).

منطق فازی، روشی منطقی است که می‌تواند پدیده‌های غیرقطعی و ناکامل را به صورت ریاضی بیان نموده و آنرا محاسبه نماید. اولین بار پرفسور عسگرزاده، منطق فازی را به عنوان یک روش جدید برای مدل‌سازی استفاده کرد. این روش موجب انتقال ساده‌تر مفاهیم بین انسان و کامپیوتر برای تصمیم‌گیری، و روش بهتری برای محاسبه اطلاعات غیردقیق و نامطمئن شد. این روش دستخوش توسعه و تحول زیادی شده و در حال حاضر به طور گسترده مورد استفاده قرار

تقاضای روزانه آب در حوزه روهرف^۲ آلمان، برای پیش‌گویی تقاضای آب در آینده استفاده کردند. در این روش از متغیرهای ورودی (مانند روز از هفته، روز کاری یا تعطیل، درجه حرارت ماکزیمم روزانه، و شرایط آب و هوایی معمول در روزهای گذشته) استفاده شد (Bardossy et al., 1995).

محلی به بیش از ۳۰۰ میلیمتر می‌رسد (از نتایج همین تحقیق). حتی بررسی پراکندگی بارندگی‌ها در طول سال در برخی از ایستگاه‌های شاخص نیز نشان می‌دهد که تغییرات ماهانه بارندگی آنها نسبتاً زیاد است (جدول ۱).

مقایسه محلی بارندگی ایستگاه‌ها با یکدیگر در نواحی شمالی و جنوبی استان نیز نشانگر این واقعیت است که دامنه‌های رو به غرب کوهستان‌ها، از بارندگی بیشتری نسبت به دامنه‌های رو به شرق برخوردارند. این افزایش در دامنه‌های غربی کاملاً طبیعی است؛ چرا که منشأ عمده بارندگی‌های استان، توده‌های مرطوب غربی با منشأ مدیترانه‌ای می‌باشد که در بستر بادهای غربی به طرف شرق حرکت می‌کنند.

لازم به ذکر است که برای بازسازی داده‌های بارندگی مفقود در منطقه مطالعاتی، ۱۶ ایستگاه سینوپتیک و ۳۲ ایستگاه کلیماتولوژی که پراکندگی مناسبی در سطح استان خراسان بزرگ داشتند، انتخاب شدند.

۲-۲- معماری کلی مدل فازی

عموماً مدل‌سازی از ساختار سیستم‌های جهان واقعی می‌تواند به سه بخش ورودی‌ها به سیستم، واکنش‌های درونی سیستم و خروج اطلاعات و یا به طور کلی ارائه نتایج تفکیک شود. با الهام از معماری سیستم‌های جهان واقعی، منطق فازی و عوامل فیزیکی مؤثر بر تغییر بارندگی در هراقلیم، مدل فازی بازسازی و تخمین داده‌های بارندگی ارائه شد. در واقع تغییر داده‌های بارندگی از یک ایستگاه به ایستگاه دیگر، عموماً تحت تأثیر مکان (اختلاف طول و عرض جغرافیایی) و اختلاف ارتفاع می‌باشد. در این تحقیق، با استناد به موارد فوق‌الذکر، پارامترهای مکانی مرتبط با هریک از ایستگاه‌ها به عنوان پارامترهای اصلی در تغییرات شرایط بارندگی از یک نقطه به نقطه دیگر، مد نظر قرار گرفتند و مدل فازی به صورت شکل ۱ تعریف شد.

۲-۳- مقایسه روشهای تخمین و بازسازی داده‌ها

برای ارزیابی و بررسی روش‌های مختلف تخمین و بازسازی داده‌های بارندگی، از روشی به نام روش اعتبارسنجی متقابل^۳ استفاده شده است. در این روش، داده‌های هر ماه به صورت موقتی حذف شده و مقدار آن با استفاده از روش‌های مختلف بازسازی شده و در نهایت

در تحقیقی در نبراسکا محققین به بررسی تکنیک مدل‌سازی فازی جهت پیش‌گویی خشکسالی‌های منطقه‌ای پرداختند. این محققین در تحقیقات خود سعی کردند که از الگوهای چرخشی اتمسفری در مقیاس بزرگ (CPS) و پدیده‌های جوی النینو/ نوسانات جنوبی (ENSO) جهت پیش‌گویی شاخص خشکسالی اصلاح شده پالمیر (PMDI) در صحراهای بزرگ گرمسیری آمریکا استفاده کنند. آنها دریافتند که اگرچه رابطه معنی‌داری بین CPها، سری‌های شاخص نوسانات جنوبی (SOI) و PMDI وجود دارد، اما ضعف این همبستگی‌ها، کوتاه بودن دوره آماری و داده‌ها و وابستگی بین CPها و SOI سبب محدود شدن کاربرد تکنیک‌های آماری جهت پیش‌گویی می‌گردد. با توجه به مشکلات فوق این محققین جهت پیش‌گویی خشکسالی‌ها به استفاده از تکنیک‌های فازی روی آوردند. در روش ارائه شده در این تحقیق از CPهای روزانه و سری‌های SOI به عنوان استدلال‌های قوانین فازی و PMDI ماهانه، به عنوان استنتاج این قوانین استفاده شده است. با این روش، محققین به نتایج قابل قبولی دست یافتند. بررسی‌ها نشان دادند که منطق فازی جهت پیش‌گویی خشکسالی‌های منطقه‌ای با استفاده از PMDI و شاخص‌های دیگر خشکسالی مناسب است (Pongracz et al., 1999). نتایج مطالعات فازی مانند نتایج مطالعات فوق نشان دادند که عموماً می‌توان برای بیان میزان تأثیرات اقلیمی و محیطی یک یا چند متغیر بر یک پدیده اقلیمی یا محیطی که بصورت بیانی ارائه می‌گردند، استفاده کرد. لذا سعی شد با توجه به توضیحات فوق و خصوصیات مدل‌های فازی، از این روش برای تخمین و بازسازی داده‌های بارندگی استفاده شود.

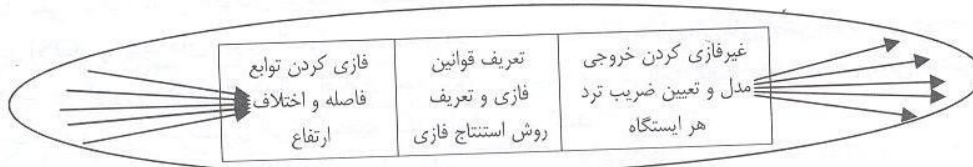
۲- مواد و روشها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، استان خراسان با وسعتی بالغ بر ۳۱۳ هزار کیلومترمربع، به عنوان وسیعترین استان کشور بوده که متوسط بارندگی آن ۲۰۹ میلیمتر می‌باشد و میزان تغییرات بارندگی این استان به جهت پراکندگی آن در عرض جغرافیایی، تأثیر ارتفاعات بر شرایط آب و هوایی و تنوع اقلیمی و به علت وجود توده‌های هوای

جدول ۱- پراکندگی فصلی بارندگی دوره آماری ۲۰۰۱-۱۹۶۸ به میلیمتر

ضریب تغییرات بارندگی ماهانه	فصل				نام ایستگاه
	پاییز	تابستان	بهار	زمستان	
۲۶٪	۵۶	۲۳	۹۴	۸۸	بجنورد
۳۲٪	۲۶	۱	۴۷	۹۸	بیرجند
۲۸٪	۴۹	۳	۷۶	۱۵۸	تربت حیدریه
۲۸٪	۴۰	۳	۵۲	۱۰۶	سبزوار
۳۰٪	۴۵	۵	۹۱	۱۲۴	مشهد



شکل ۱- معماری کلی مدل فازی تخمین داده‌های بارندگی

مناطق جنوب استان و در دشت‌ها بیشتر و در مناطق شمال استان و مناطق کوهپایه‌ای و کوهستانی کمتر است؛ لذا در فاصله ۰ تا ۱۵۰ کیلومتری زیر مجموعه فازی به صورت زیر تعریف شد:

$$A = \{ (x, \mu_A(x)) ; x \in X, \mu_A(x) \in [0, 1] \}$$

که در آن، x : فاصله ایستگاه‌های اطراف از ایستگاه مبدأ و $\mu_A(x)$: مقدار تابع عضویت x در A است. با توجه به تعریف فوق‌الذکر، ایستگاه‌های اطراف برحسب اختلاف فاصله‌شان از ایستگاه مبدأ در چهار گروه فازی تقسیم‌بندی شدند که این گروه‌های فازی عبارتند بودند از: ایستگاه‌های مجاور (Near)، ایستگاه‌های متوسط نزدیک (Near_m)، ایستگاه‌های متوسط دور (Far_m)، و ایستگاه‌های دور (Far). توابع عضویت فازی عموماً دارای اشکال متفاوتی بوده که براساس روند تغییرات تابع عضویت، خصوصیات فیزیکی مسئله مورد بحث و نظرات کارشناسی می‌توان یک یا چند نوع از این توابع را در یک مدل فازی را استفاده کرد. هر نوع از توابع، خود می‌تواند دارای درجات مختلف همپوشانی باشند (Bardossy et al., 1990). معمولاً توابع فازی در دو گروه کلی همپوشانی جزئی و کامل قرار می‌گیرند (شکل ۲). توابع فازی مورد استفاده در این تحقیق از نوع توابع مثلثی و دوزنقه‌ای با همپوشانی جزئی می‌باشند. این نوع از توابع فازی اختلاف فاصله و ارتفاع با توجه به نحوه تغییر آنها و فیزیک مسئله به عنوان مناسب‌ترین گزینه انتخاب شدند.

با توجه به نوع تابع عضویت فازی انتخاب شده، خصوصیات ذکر شده بر توابع عضویت فازی، زیرمجموعه‌های فازی تعریف شده برای

ضریب همبستگی بین داده‌ها، انحراف نتایج (MBE⁴) و دقت روش (MAE⁵) براساس روابط زیر محاسبه شد:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (E_S - E_O)}{n} \quad (1)$$

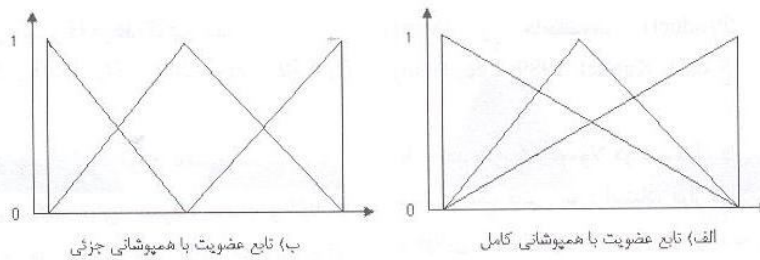
$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |E_S - E_O|}{n} \quad (2)$$

که در آن، E_S : مقدار برآورد شده، E_O : مقدار اندازه‌گیری شده، MBE: مقدار انحراف مدل، MAE: دقت مدل، n : اندیس مربوط به ایستگاه، و n : تعداد ایستگاه است.

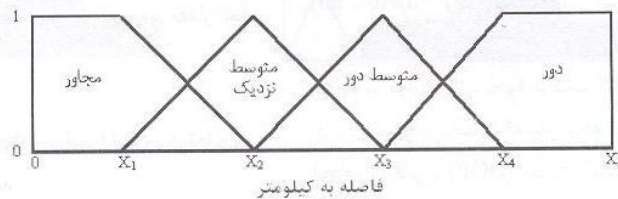
۳- نتایج و بحث

۳-۱- تعریف مجموعه‌های فازی و فازی کردن توابع ورودی

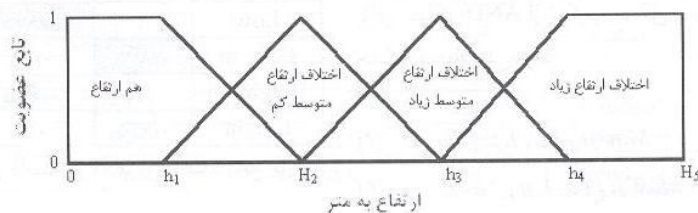
همانطور که اشاره شد، یکی از فرانسجه‌های مؤثر بر تغییر داده‌های بارندگی از یک ایستگاه به ایستگاه دیگر، تغییر طول و عرض جغرافیایی (اختلاف فاصله ایستگاه‌ها) است. بنابراین برای تعیین درجه تأثیر هر یک از ایستگاه‌های اطراف در بازسازی و تخمین داده‌های بارندگی ایستگاه مبدأ، با توجه به تغییرات طول و عرض جغرافیایی، در ابتدا توابع فازی فاصله تعریف شدند. برای تعریف توابع فازی فاصله در کل سطح استان، از ایستگاه‌هایی که در یک محدوده حدوداً ۱۵۰ کیلومتری قرار می‌گیرند، برای بازسازی استفاده شدند (این فاصله تنها با بررسی‌های اولیه بر روی داده‌های بارندگی و ضریب همبستگی داده‌های قرار گرفته در داخل این محدوده که بیش از ۱۵ درصد بود، انتخاب شد). هرچند که این همبستگی در



شکل ۲- همپوشانی توابع عضویت فازی



شکل ۳- نوع و نحوه ترکیب توابع عضویت فازی فاصله



شکل ۴- نوع و نحوه ترکیب توابع عضویت فازی ارتفاع

$$A = \{ (h, \mu_{A(h)}) ; h \in H, \mu_{A(h)} \in [0,1] \}$$

که در آن: h : نشان دهنده اختلاف ارتفاع دو ایستگاه و $\mu_A(h)$: مقدار تابع عضویت h در A است.

با توجه به تعریف بالا، درجه تأثیر اختلاف ارتفاع، و توابع عضویت تعریف شده بر توابع اختلاف ارتفاع و میزان همبستگی داده‌های هواشناسی با قدمطلق اختلاف ارتفاع، توابع مورد استفاده عبارت بودند از: ایستگاه‌های هم ارتفاع (Low)، ایستگاه‌های با اختلاف ارتفاع متوسط کم (Low-m)، ایستگاه‌های با اختلاف ارتفاع متوسط زیاد (High-m)، و ایستگاه‌های با اختلاف ارتفاع زیاد (High).

مقادیر H مشابه مقادیر X بسته به نحوه قرارگیری ایستگاه‌های اطراف و اختلاف ارتفاع آنها با ایستگاه مبدا که داده‌های آن باید بازسازی شود، تعیین می‌شود. البته نهایتاً حدود بازه‌های توابع فوق هم می‌تواند تغییر کند. در این تحقیق با بررسی تغییرات ارتفاعی

اختلاف فاصله و نحوه تغییر درجه عضویت آنها و درجه همپوشانی انتخاب شده بر توابع عضویت فازی، مجموعه‌های فازی اختلاف فاصله و توابع عضویت آن بصورت نموداری در یک دستگاه مختصات به صورت شکل ۳ قابل ارائه است.

مقادیر X مربوط به توابع عضویت فاصله، بسته به نحوه قرارگیری ایستگاه‌ها در اطراف ایستگاه مبدأ، نحوه تغییر بازه زیرمجموعه‌های فازی و نظرات کارشناسی و اینکه ایستگاه‌ها در چه دامنه‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند، قابل تغییر است. در این تحقیق با بررسی‌های صورت گرفته بر روی فاصله ایستگاه‌ها و نحوه قرارگیری ایستگاه‌ها نسبت به یکدیگر، مقادیر زیر برای متغیر X در نظر گرفته شد:

$$X_1 = 20, X_2 = 40, X_3 = 60, X_4 = 80, X_5 = 150$$

۳-۲- مجموعه و تابع عضویت فازی ارتفاع

برای تغییرات ارتفاع هم مجموعه فازی‌ای مشابه مجموعه فازی فاصله تعریف شد:

(Min) و حاصلضرب (Product) استفاده شده است (Coa & Kandel, 1989; Lee, 1990).

با توجه به اینکه معمولاً در هر مدل فازی برای محاسبه خروجی، بیشتر از یک قانون مورد استفاده قرار می‌گیرد، لذا باید نتایج هر یک از قوانین را با شکل مناسب که معروف به روش‌های تجمیع قوانین فازی است، ترکیب کرد. روش‌های زیادی برای تجمیع قوانین فازی ارائه شده‌اند که در این تحقیق از روش حداکثر (Max) و جمع جبری $(\text{Probor}(a,b) = a + b - ab)$ استفاده شده است.

علاوه بر موارد فوق، نحوه ترکیب گزاره‌ها در هر قانون هم از اهمیت خاصی برخوردار است که به درجه برآوردسازی هر قانون یا قابلیت انجام آن قانون (DOF) معروف است. بسته به عملگر مورد استفاده برای ارتباط گزاره‌ها مثل عملگر AND یا عملگر OR، این ترکیبات می‌توانند متفاوت باشند. معمولاً در استنتاج حداقل (روش ممدانی) برای عملگر AND از ترکیب حداقل و برای عملگر OR از ترکیب حداکثر استفاده می‌شود:

$$DOF(A_1 \text{ AND } A_2) = \text{Min}(\mu_{A_1}(a_1), \mu_{A_2}(a_2)) \quad (3)$$

$$DOF(A_1 \text{ OR } A_2) = \text{Max}(\mu_{A_1}(a_1), \mu_{A_2}(a_2)) \quad (4)$$

در این تحقیق، به جهت استفاده از روش استنتاج ممدانی برای عملگر AND، جهت محاسبه DOF از ترکیب حداقل استفاده شده است.

۳-۵- غیرفازی کردن^{۱۳} خروجی مدل

پس از محاسبه استنتاج نهایی در یک مدل فازی، که منجر به یک نتیجه به صورت فازی می‌شود باید جواب بدست آمده را به حالت ترد^{۱۳} (اعداد ترد همان اعداد ترتیبی معمولی‌اند که در مقابل اعداد فازی قرار می‌گیرند) تبدیل کرد. تبدیل یک نتیجه فازی بصورت یک نتیجه ترد را غیرفازی کردن، می‌نامند. روش‌های غیرفازی‌سازی زیادی توسط محققین ارائه شده که مهمترین این روش‌ها عبارتند از: روش میانگین مقادیر حداکثر (MOM)، روش مرکز ثقل^{۱۴}، روش محل تقاطع نیمسازها^{۱۵}، روش کمترین مقدار حداکثر (SOM) و روش بیشترین مقدار حداکثر (LOM). در تحقیق حاضر، از روش مرکز ثقل (به شرح توصیفی در شکل ۶)، استفاده شده است.

مشخصات روش‌های مختلف ترکیب عملگرهای فازی مورد استفاده در مدل که در این تحقیق بکار رفته، در جدول (۳) درج گردیده است.

ایستگاه‌ها، مقادیر زیر برای متغیر H در نظر گرفته شد:

$$H_1=50, H_2=200, H_3=350, H_4=500, H_5=1000$$

۳-۳- تعریف قوانین فازی و ترکیب توابع عضویت

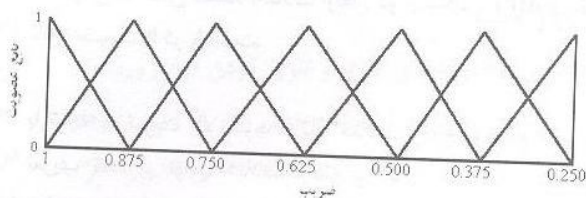
تعریف قوانین فازی برای ترکیب توابع عضویت فاصله و اختلاف ارتفاع یکی از مهمترین مراحل ساخت مدل فازی می‌باشد. برای اینکار در ابتدا توابع فاصله و اختلاف ارتفاع در مقابل همدیگر قرار گرفتند و برای بهترین حالت ضریب ۱ و بدترین حالت ضریب ۰/۲۵ مدنظر قرار گرفت و مقادیر میانی با توجه به این دو مقدار تعیین شدند (جدول ۲).

جدول ۲- ضرایب ترکیبات مختلف توابع اختلاف ارتفاع و فاصله

D \ H	Near	Near_m	Far_m	Far
Low	۱	۰/۸۷۵	۰/۷۵	۰/۶۲۵
Low_m	۰/۸۷۵	۰/۷۵	۰/۶۲۵	۰/۵
Height_m	۰/۷۵	۰/۶۲۵	۰/۵	۰/۳۷۵
Height	۰/۶۲۵	۰/۵	۰/۳۷۵	۰/۲۵

*: D نشان دهنده تابع فازی فاصله و H نشان دهنده تابع فازی اختلاف ارتفاع است.

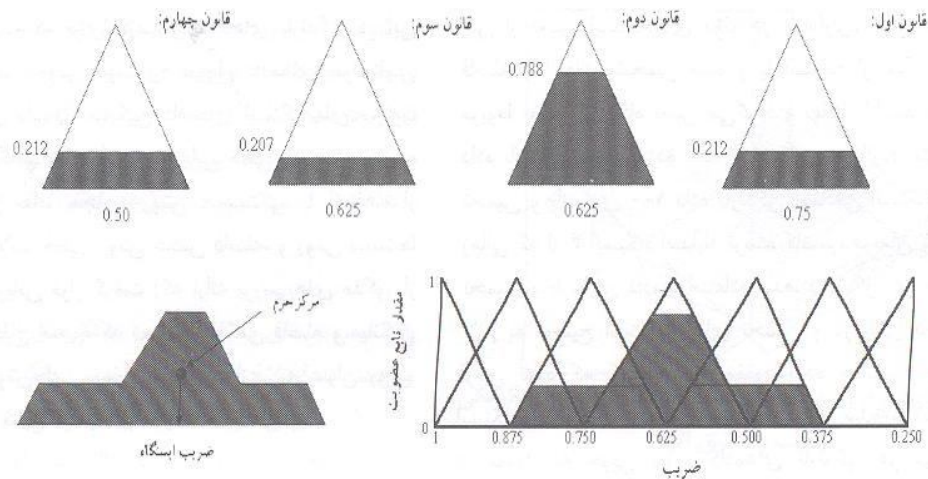
برای تعیین ضریب هر ایستگاه بصورت فازی با توجه به جدول فوق مجموعه فازی ضریب هر ایستگاه به صورت شکل ۵ تعریف شد. این مجموعه مقادیر فازی (۱، ۰/۲۵) را شامل می‌شود.



شکل ۵- نوع و توابع عضویت فازی ضریب حاصل از ترکیب توابع فاصله و ارتفاع

۳-۴- محاسبه خروجی مدل

برای محاسبه خروجی مدل، قبل از هرچیز باید روش‌های استنتاج فازی^۶، استلزام فازی^۷، تجمیع^۸ قوانین و روش محاسبه درجه برآوردسازی^۹ را مشخص کرد. در این تحقیق برای استنتاج فازی از روش ممدانی^{۱۱} و برای استلزام فازی از روش استلزام حداقل



شکل ۶- نحوه ترکیب قوانین فازی و محاسبه خروجی ترد با روش مرکز ثقل

جدول ۳- مشخصات روشهای مختلف ترکیب عملگرها در مدل فازی بازسازی و تخمین دادههای بارندگی

عملگرهای مورد استفاده در قسمت‌های مختلف مدل فازی بازسازی داده‌های بارندگی					نام روش ترکیب
غیرفازی کردن	تجمیع قوانین	استنتاج	DOF	استلزام	
Centroid	Probor	Mamdani	Min	Min	C ₁
Centroid	Probor	Mamdani	Min	Product	C ₂
Centroid	Max	Mamdani	Min	Min	C ₃
Centroid	Max	Mamdani	Min	Product	C ₄

۳-۶- تخمین داده‌های بارندگی

بعد از محاسبه ضرایب مربوط به هر ایستگاه، با توجه به معادله زیر داده‌های بارندگی در ایستگاه مورد نظر بازسازی شد:

$$Data_m = \frac{\sum_{i=1}^n Coef_i * Data_i}{\sum_{i=1}^n Coef_i} \quad (5)$$

که در رابطه اخیر Coef_i: ضریب مربوط به ایستگاه نام، Data_i: میزان بارندگی معلوم در زمان مورد نظر در ایستگاه نام، Data_m: میزان بارندگی تخمینی در ایستگاه مورد نظر، i: شمارنده ایستگاه و n: تعداد کل ایستگاه‌های مورد استفاده برای بازسازی و تخمین داده‌های بارندگی می‌باشد.

علاوه بر مدل فازی مورد استفاده جهت مقایسه نتایج از دو روش دیگر بازسازی و تخمین داده‌های بارندگی، یعنی روش عکس فاصله و روش میانگین هم استفاده شد. در روش عکس فاصله از فرمول زیر برای بازسازی داده‌ها استفاده شد:

$$P_x = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i * W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (6)$$

که در آن: P_x: داده بارندگی تخمینی، W = I/L: اختلاف فاصله ایستگاه با داده معلوم با ایستگاه با داده مفقود که با کد توسعه‌ای XTools نرم‌افزار ArcView، محاسبه می‌شود، P_i: داده بارندگی معلوم، n: تعداد ایستگاه‌های با داده معلوم که برای بازسازی و تخمین داده مفقود مورد استفاده قرار گرفته است، و i: شمارنده ایستگاه می‌باشد.

در روش میانگین‌گیری هم از رابطه زیر استفاده شده است:

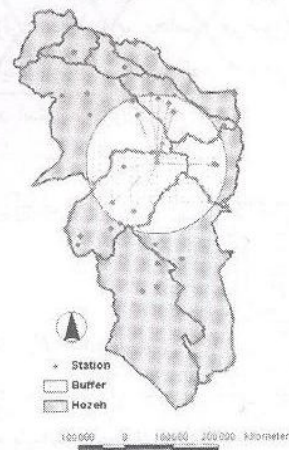
$$P_x = \frac{I}{n} \left[\sum_{i=0}^n \left(P_i \frac{\bar{P}_x}{P_i} \right) \right] \quad (7)$$

که در این رابطه: P_x: داده بارندگی تخمینی، P_i: داده بارندگی معلوم، P_i: متوسط بارندگی ایستگاه با داده تخمینی، P_i: داده بارندگی معلوم، P_i: متوسط بارندگی ایستگاه با داده معلوم، n: تعداد ایستگاه‌های با داده معلوم که برای تخمین و بازسازی مورد استفاده قرار گرفته است، و i: شمارنده ایستگاه می‌باشد.

لازم به توضیح است که برای بازسازی داده‌های بارندگی در این تحقیق، در ابتدا هفت روش بازسازی معمول داده‌های هواشناسی یعنی میانگین سری داده‌ها، میانگین داده‌های ایستگاههای مجاور، میانگین داده‌های ایستگاههای مجاور، درون‌یابی خطی با توجه به شیب خط عبور کرده از نقاط مجاور، روش همبستگی با استفاده از مجموعه‌ای از معادلات خطی، روش عکس فاصله، و روش نسبت‌ها و تفاضلها، مورد ارزیابی قرار گرفت (که ارائه بررسی‌های مذکور از حوصله این مقاله خارج است)، که دو روش عکس فاصله و میانگین به عنوان نماینده روش‌های معمول و روش فازی به عنوان روش پیشنهادی انتخاب و نتایج آنها با هم مقایسه شدند.

۴- نتیجه‌گیری

برای نمونه، نحوه تخمین و بازسازی داده‌های بارندگی ایستگاه تربت‌حیدریه در بخش زیر آمده است. برای تخمین داده‌ها با توجه به ورودی مدل در ابتدا با ایجاد یک محدوده ۱۵۰ کیلومتری، ایستگاه‌های مؤثر در بازسازی مشخص شدند (شکل ۷). از بین ایستگاه‌های قرار گرفته در داخل محدوده، ایستگاه‌های با داده معلوم در زمانی که داده‌های ایستگاه تربت‌حیدریه باید تخمین زده شود، انتخاب شدند و توابع عضویت آنها مشخص گردید، تا بتوان خروجی مدل را محاسبه کرد. تعداد ایستگاه مورد استفاده برای تخمین و بازسازی داده‌ها می‌تواند از ۲ تا ۵ ایستگاه متفاوت باشد. از بین ایستگاه‌های مشخص شده در محدوده ۱۵۰ کیلومتری، ایستگاه‌های مورد استفاده در مدل که در زمان مورد نظر دارای داده معلوم بوده و مجموع قدر مطلق اختلاف فاصله و قدرمطلق اختلاف ارتفاع آن کمترین مقدار است، انتخاب شدند و سپس با استفاده از مدل فازی ارائه شده، ضریب هر ایستگاه مشخص گردید.

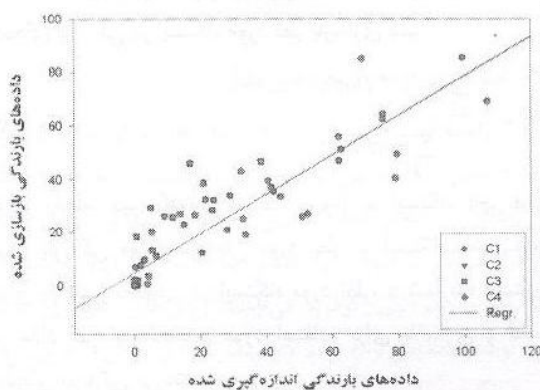


شکل ۷- بافر ۱۵۰ کیلومتری ایستگاه تربت‌حیدریه برای بازسازی داده‌های بارندگی

پس از تعیین ایستگاه‌های مؤثر در بازسازی، توابع عضویت فازی فاصله و ارتفاع مشخص شده و با استفاده از مدل فازی ضریب مربوط به هر ایستگاه تعیین می‌گردد و نهایتاً با استفاده از معادله ۵، داده بارندگی تخمین زده شده یا بازسازی می‌گردد. نتایج مربوط به تخمین و بازسازی ۱۰۰ داده بارندگی تصادفی ایستگاه تربت‌حیدریه زمانی که از ۴ ایستگاه اسدآباد تربت، کاشمر، فریمان و نیشابور برای تخمین و بازسازی داده‌ها استفاده شده، در شکل ۸ ارائه شده است. لازم به توضیح است که برای تخمین و بازسازی داده‌ها، در ابتدا فرض شده که کلیه داده‌ها مفقود بوده و سپس با استفاده از ایستگاه‌های مجاور داده‌ها تخمین و بازسازی شده‌اند. نتایج ارائه شده در نمودار به خوبی توزیع داده‌های بارندگی در دو طرف خط رگرسیون را نشان می‌دهند.

این فرآیند برای تخمین و بازسازی داده‌های بارندگی در کل سطح استان و در حالات مختلف با داده‌های بارندگی ۲، ۳، ۴ و یا ۵ ایستگاه، مورد استفاده قرار گرفت.

بررسی نحوه تلفیق و ترکیب توابع عضویت فازی فاصله و ارتفاع در مدل فازی نشان داد که با توجه به نحوه قرارگیری توابع فازی فاصله و اختلاف ارتفاع در مقابل هم و ترکیب آنها، نهایتاً $(4 \cdot 16)$ قانون فازی بدست می‌آید که در هر مرحله حداکثر چهار و حداقل دو قانون فعال می‌شود (شکل ۹).



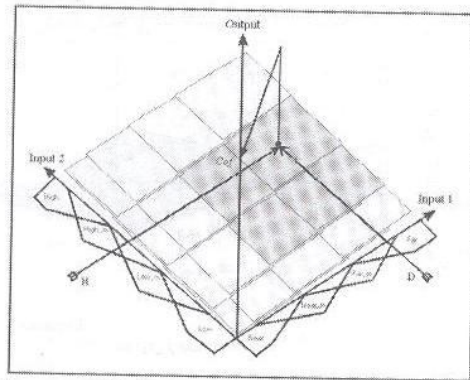
شکل ۸- مقایسه داده‌های بارندگی بازسازی شده و مشاهده‌ای در ایستگاه تربت‌حیدریه

این بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهند که با توجه به مقادیر مختلف فاصله، اختلاف ارتفاع و قوانین فازی فعال شده در هر مرحله یک خروجی فازی بدست آمده که در نهایت به یک عدد ترد یا همان ضریب ایستگاه قابل تبدیل شده است.

می‌شود. هرچه این اختلافات بیشتر شود، ضریب همبستگی به صفر نزدیکتر خواهد شد. سطح منحنی بوجود آمده بین دو تابع عضویت فازی فاصله و ارتفاع نشان می‌دهد که میزان تغییرات ضریب همبستگی دو ایستگاه در اختلافات کم، تند بوده و با افزایش مقادیر اختلاف، از شدت تغییر ضریب همبستگی کاسته خواهد شد (شکل ۱۱).

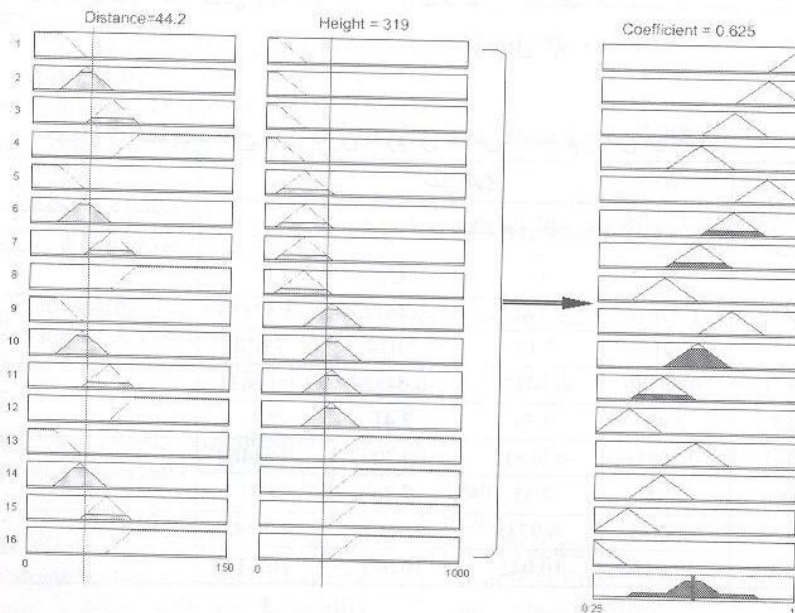
مقایسه روش‌های مختلف ترکیب عملگرهای فازی (جدول ۳) نشان می‌دهد که اختلاف مقادیر دو پارامتر عملکرد مدل یعنی MBE و MAE در روش‌های مختلف ترکیب، کمتر از ۱٪ بوده و عملاً نمی‌توان تفاوتی را بین روش‌ها قائل شد. این بررسی‌ها همچنین نشان دادند که مدل کلی فازی تحت تأثیر تعداد ایستگاه‌های مورد استفاده برای بازسازی داده‌ها بوده، بطوریکه در صورت استفاده از دو ایستگاه کمترین دقت و در صورت استفاده از ۴ ایستگاه بیشترین دقت و کمترین مقدار خطا بدست آمد؛ هرچند که این روند ممکن است در مناطق دیگر تغییر کند (جدول ۴).

مقایسه بین مدل فازی، روش عکس‌فاصله و روش میانگین‌گیری نشان می‌دهد که مدل فازی نتایج دقیق‌تری را نسبت به هر دو روش ارائه می‌دهد؛ بخصوص زمانی که از ۳، ۴، یا ۵ ایستگاه برای تخمین و یا بازسازی داده‌های بارندگی استفاده شود (جدول ۴).

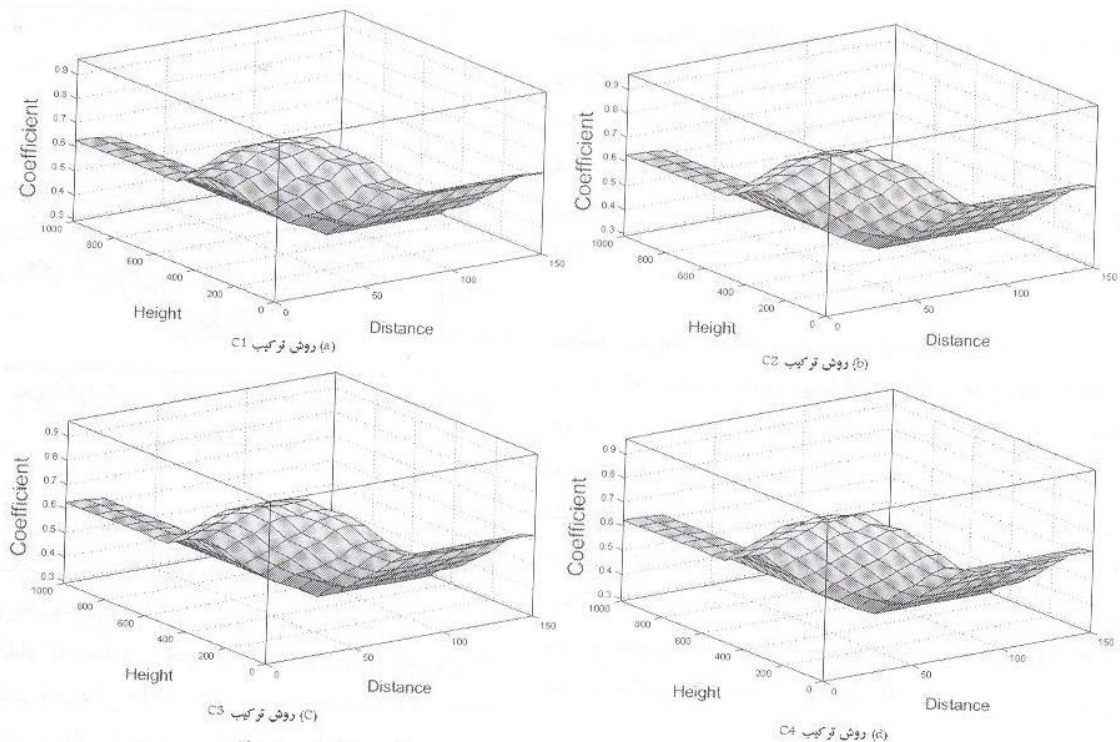


شکل ۹- نحوه قرارگیری قوانین فازی در مقابل هم و چگونگی ترکیب و تلفیق آنها

به عنوان مثال برای ایستگاه اسداباد تربت‌حیدریه که اختلاف ارتفاع آن با ایستگاه تربت ۳۱۹ متر و فاصله آن با ایستگاه تربت ۴۴/۲ کیلومتر می‌باشد، عدد ترد $0/625$ بدست می‌آید (شکل ۱۰) و یا برای ایستگاه گناباد که اختلاف ارتفاع آن با ایستگاه تربت حیدریه ۴۴۱ متر و اختلاف فاصله آن $114/4$ کیلومتر است، عدد ترد $0/334$ بدست می‌آید که این اعداد ترد همان ضرایب مورد استفاده برای بازسازی داده‌های ایستگاه تربت‌حیدریه می‌باشند. در شکل ۱۱، نحوه فعال شدن قوانین، ترکیب آنها، تجمع و روش غیرفازی کردن مدل و ضریب مربوطه برای ایستگاه اسداباد تربت مشخص شده است. با بررسی نحوه تغییرات همبستگی داده‌های ایستگاه‌های مختلف هواشناسی در مدل فازی ارائه شده، مشخص شد که با کم شدن اختلاف ارتفاع و فاصله ایستگاه‌ها ضریب همبستگی به یک نزدیک



شکل ۱۰- قوانین مورد استفاده، نحوه ترکیب و محاسبه خروجی مدل فازی



شکل ۱۱- سطح بوجود آمده بین توابع عضویت فازی فاصله و ارتفاع

با بررسی نتایج مدل فازی، مشخص شد که خروجی مدل فازی تحت تأثیر روش ترکیب عملگرهای فازی نبوده و بیشتر تحت تأثیر تغییرات داده‌های ورودی به مدل می‌باشد. با توجه به سطح منحنی بوجود آمده بین دو تابع فازی فاصله و اختلاف ارتفاع مشخص می‌شود که روند تغییرات ضریب همبستگی بین داده‌های بارندگی در ایستگاه‌های مختلف متناسب با تغییر ارتفاع و فاصله ایستگاه‌ها می‌باشد (جدول ۴).

لازم به توضیح است که در مناطقی که تغییرات ارتفاعی بیشتر بوده (مانند مناطق شمالی استان)، تفاوت بین نتایج مدل فازی با روش عکس فاصله و میانگین به مراتب بیشتر از مناطق مرکزی و جنوب استان می‌باشد، بطوریکه در ایستگاه بجنورد، زمانیکه از ۴ ایستگاه برای تخمین و بازسازی استفاده شده (بیشترین دقت و کمترین انحراف در این ایستگاه با ۴ ایستگاه بدست آمد)، نتایج ارائه شده در جدول ۵ حاصل شدند.

جدول ۴- مقایسه نتایج مدل فازی با روش عکس فاصله و روش میانگین

میانگین	روش عکس فاصله	مدل فازی				تعداد ایستگاه‌های مورد استفاده برای تخمین و بازسازی داده‌ها	شاخص‌های عملکرد
		روش ترکیب عملگرهای فازی					
		C ₄	C ₃	C ₂	C ₁		
4.0808	-5.36612	-1.47616	-1.49475	-1.46135	-1.47173	۵ ایستگاه	MBE
11.98	13.92	7.014	7.00	7.024	7.014		MAE
4.6688	-3.8881	-0.65586	-0.64137	-0.64329	-0.62631	۴ ایستگاه	MBE
12.74	14.53	7.40	7.39	7.41	7.41		MAE
5.2898	-4.0091	-0.86815	-0.86815	-0.87097	-0.84469	۳ ایستگاه	MBE
10.73	13.97	7.35	7.35	7.36	7.37		MAE
5.0389	-6.7477	-6.9735	-6.9735	-6.96011	-6.9592	۲ ایستگاه	MBE
10.27	12.52	10.042	10.042	10.041	10.043		MAE

جدول ۵- مقایسه نتایج مدل فازی با روش عکس فاصله و روش میانگین در ایستگاه بجنورد

میانگین	روش عکس فاصله	مدل فازی				تعداد ایستگاههای مورد استفاده برای تخمین و بازسازی دادهها	شاخصهای عملکرد
		روش ترکیب عملگرهای فازی					
		C ₄	C ₃	C ₂	C ₁		
6.3235	-5.0925	-0.89145	-0.89814	-0.90043	-0.90100	۴ ایستگاه	MBE
15.25	16.42	7.30	7.29	7.32	7.32		MAE

7- Fuzzy Implication

8- Aggregation

9- Degree of Fulfillment

10- Mamdani

11- Algebraic Sum (also known as the Probabilistic)

12- Defuzzification

13- Crisp

14- Centroid

15- Bisector

نتایج بدست آمده در این تحقیق بطور کلی نشان داند که:

با توجه به خصوصیات مجموعه‌های فازی در مقابل مجموعه‌های کلاسیک از جمله: اولاً مرز مشخصی برای اعداد وجود ندارند و میزان تعلق هر عدد به یک مجموعه با تابع عضویت تعیین می‌شود، ثانیاً تطابق بیشتر با طبیعت واقعی حوادث دارند، و ثالثاً امکان توصیف کامل علوم نادقیق و بطور کلی عدم قطعیت‌ها وجود دارد، یک مدل فازی دقت بسیار خوبی از برآورد پارامترهای طبیعی که دارای رفتارهای پیچیده هستند را به شرح ذیل به دست می‌دهد.

۶- مراجع

- Bankert, R., Hadjimichael, M. and Hansen, B. (2001), "Fuzzy Logic in Environmental Sciences". http://www.chebucto.ns.ca/Science/AIMET/fuzzy_environment/.
- Bardossy, A., and Duckstein, L. (1995), *Fuzzy Rule-Based Modeling with Applications to Geophysical, Biological and Engineering Systems*. CRC press Inc, Boca Raton, Florida, USA.
- Bardossy, A., Bogardi, I., and Duckstein, L. (1990a), "Fuzzy regression in hydrology". *Water Resources Research*, 26(7), pp. 1497-1508.
- Bardossy, A., Bronstert, A., and Merz, B. (1995), "1, 2 and 3Dimensional Modeling of Water Movement in the Unsaturated Soil Matrix Using a Fuzzy Approach". *Adv. Wat. Resour.*, 18, pp. 237-251.
- Casti, J., (1990), "Search for Certainty". <http://www.fuzzy-logic.com>
- Casti, J., (1993), *Reality Rules I, II*. New York: John Wiley and Sons Inc., USA.
- Casti, J., Kempf, J., Duckstein, L., and Fogel, M. (1979), "Lake Ecosystems: A Polyhedral Dynamics Representation". *Journal Ecological Modeling*, 7, pp. 223 - 237.
- Coa, Z., and Kandel, A. (1989), "Applicability of Some Fuzzy Implication Operators". *FSS*, 3, pp.42-52.
- Duckstein, L., and Parent, E. (1994), "Systems Engineering of Natural Resources under Changing Physical Conditions: a Framework for Reliability and Risk". In: *Proc. Natural Resources*

- ۱- تأثیر پارامتر طبیعی اختلاف ارتفاع بین دو ایستگاه بر داده‌های بارندگی زیاد بوده و لذا با وارد کردن آن در تخمین و بازسازی داده‌ها می‌توان از میزان خطا در برآورد داده‌های مفقود کاست.
- ۲- می‌توان برای تخمین و بازسازی داده‌هایی که تحت تأثیر چند پارامتر می‌باشد، از مدل فازی استفاده کرد.

۵- پیشنهادات

- پیشنهاد می‌شود با توجه به نتایج این تحقیق، در تحقیقات آینده موارد ذیل مد نظر قرار گیرد:
- این روش برای بازسازی داده‌های بارندگی در دیگر مناطق کشور هم مورد بررسی قرار گیرد.
 - این روش برای بازسازی دیگر پارامترهای هواشناسی هم مورد ارزیابی قرار گیرد.
 - این روش برای بازسازی داده‌های هواشناسی روزانه هم مورد استفاده قرار گیرد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Train
- 2- Ruher
- 3- Cross Validation
- 4- Mean Bias Error
- 5- Mean Absolute Error
- 6- Fuzzy Inference

Pongracz, R., Bogardi, L., and Duckstein, L. (1999), "Application of Fuzzy Rule-Based Modeling to Regional Drought". *Journal of Hydrology*, 224, pp.100-114.

Salaski, A. (2002), "Ecological Applications of Fuzzy Logic". In: F. Recknagel (ed): *Ecological Informatics*. Springer, 2002, pp. 3-14.

Zimmermann, H.J., (1985), *Fuzzy Set Theory and its Application*. Dordrecht: Kluwer Nijhoff Publishing, Publishing, Hingham, Mass.

Management, Duckstein and Parrent(eds), Dordrecht: Kluwer Nijhoff Publishing, The Netherlands.

Fontane, D.G., Timothy, K.G., and Moncado, E. (1997), "Planning Reservoir Operations with Imprecise Objectives". *Journal of Wat. Resour. Planning and Management, ASCE*, 123, pp.154-162.

Lee, C.C. (1990), "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller – Part I & II". *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics* March | April.