

تحلیل عدم قطعیت مدل سیستم استنتاج فازی در پیش بینی ضریب هدایت هیدرولیکی خاک اشباع

عباس خاشعی سیوکی¹ و محسن پوررضا بیلندی

استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه بیرجند؛ abbaskhashei@birjand.ac.ir

استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه بیرجند؛ mohsen.pourreza@birjand.ac.ir

دریافت: 94/8/12 و پذیرش: 95/6/8

چکیده

تعیین و پیش‌بینی میزان هدایت هیدرولیکی خاک در شرایط اشباع اهمیت ویژه‌ای در مسایل و طراحی‌های مرتبط با فیزیک خاک دارد. در این میان برآورد و تخمین آن با استفاده از داده‌های موجود آسان توسعه زیادی پیدا کرده که از آن جمله استفاده از سیستم‌های خبره پیش از پیش کاربرد داشته است. شاید مدل ROSETTA قدیمی‌ترین مدل مذکور باشد در این میان سیستم استنتاج فازی نیز بدلیل پیچیدگی‌ها و صرف هزینه و وقت کمتر کاربرد زیادی پیدا کرده است اما وضعیت قطعیت نتایج آن مسئله‌ای چالشی می‌باشد که تاکنون کمتر بدان پرداخته شده است. در این تحقیق تعداد 151 نمونه از خاکهای زراعی شهرستان بجنورد در خراسان شمالی انتخاب و متغیرهای مؤثر جرم مخصوص ظاهری و واقعی خاک با کمک رگرسیون مرحله‌ای جهت برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع به کار گرفته شد. نتایج تحلیل عدم قطعیت مونت کارلو بر مبنای 1000 نمونه‌گیری بدون جایگذاری، بر اساس سه معیار ارزیابی نیز نشان داد که علیرغم محدودیت در تعداد داده‌های موجود، مدل سیستم استنتاج فازی از پهنای باند اطمینان مطلوبی برخوردار است. در نتیجه الگوهای عمومی و کلی تغییرات هدایت هیدرولیکی به خوبی پیش‌بینی شده و به طور خاص نیز تابع عضویت Gaussmf، دارای قطعیت بیشتری در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ANFIS، تابع عضویت، قطعیت خروجی مدل

¹نویسنده مسئول، آدرس: بیرجند - دانشگاه بیرجند - دانشکده کشاورزی - گروه علوم و مهندسی آب

مقدمه

یکی از مشکلات مهمی که کاربرد یافته‌های مربوط به ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را در مورد پیش‌بینی و ارزیابی فرآیندهای موجود در محیط متخلخل خاک متأثر می‌سازد، تغییرپذیری مکانی¹ توابع هیدرولیکی خاک است (بیگر و نیلسن، 1976). از آنجایی که دانش‌هایی همچون فیزیک خاک و هیدرولوژی محیط‌های متخلخل، همواره با پدیده‌هایی که تغییرپذیری مکانی و زمانی بالایی دارند مواجه می‌باشند. بنابراین برون‌یابی خطی نتایج حاصل از نمونه‌گیری نقطه‌ای و پراکنده آزمایشگاهی و یا کرتهای مزرعه‌ای، هنگامی که به مقیاس‌های بزرگتری تعمیم یابند، دچار عدم قطعیت زیادی می‌شوند.

راه‌حلهایی متفاوت برای حل این مشکل توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به همبستگی تجربی (correlation) بین متغیرهای خاکی مانند توابع انتقالی (بوما 1989)، استفاده از نظریه مقیاس محیط‌های مشابه (similar media scaling theory) (میلر و میلر 1956) استفاده از تئوری متغیرهای ناحیه‌ای و روش‌های زمین‌آماري (Geostatistical techniques) اشاره کرد (جانگ و همکاران 2006). با این وجود، هر یک از این تحقیقات بسیاری در زمینه تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN²) و سیستم استنتاج فازی (ANFIS)³ در مناطق مختلف ارائه شده است. یائو و همکاران (2015) به تخمین مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با کمک شبکه عصبی مصنوعی در زمین‌های کشاورزی ساحلی و شور جیانگ‌سوی شمالی در کشور چین پرداختند و به عنوان نتیجه‌گیری مهم، شوری خاک را یکی از تأثیرگذارترین فاکتورها در مقدار این پارامتر برشمردند. تیغور و همکاران (2014) تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را با کمک چندین روش هوش مصنوعی مانند شبکه عصبی، سیستم فازی و نروفازی نیز به صورت یکجا انجام دادند و نتیجه گرفتند خروجی ناشی از ترکیب نتایج همه مدل‌ها به نسبت خروجی هر یک از مدل‌های مذکور به صورت منفرد کارا تر می‌باشد.

یک نوع از شبکه‌های عصبی مصنوعی، سامانه استنتاج تطبیقی عصبی - فازی می‌باشد که در بین روش‌های نوین مدلسازی، سامانه‌های فازی از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. به دلیل اینکه شبکه عصبی مصنوعی

پرسپترون چند لایه ANN-MLP مقادیر وزن خود را به صورت تصادفی در نظر می‌گیرد. ممکن است در طی فرایند آموزش در حداقل محلی (local minima) گرفتار شود، که در نهایت باعث می‌شود شبکه خوب آموزش ندیده و کارایی لازم را نداشته باشد ANFIS با محدودیت‌های کمتری نسبت به شبکه‌های عصبی مصنوعی، کاربردهای متنوعی در زمینه‌هایی چون مدلسازی، تصمیم‌گیری، پردازش سیگنال و کنترل دارد.

در اغلب مطالعات مدلسازی، نا اطمینانی در جواب‌های بهینه مدل‌های پیش‌گو وجود دارد. در واقع، در فرآیند مدلسازی همواره عدم اطمینان به نتایج به طور ذاتی و اجتناب ناپذیری وجود دارد که به سبب وجود عدم قطعیت و خطا در داده‌های ورودی مدل، پارامترها و ساختار مدل است (ریاحی و همکاران، 2011). بنابراین، به کمیت درآوردن میزان عدم قطعیت در خروجی مدل‌ها برای رسیدن به پیش‌بینی‌های مطمئن در مدلسازی امری اجتناب ناپذیر است. عدم قطعیت به صورت بازه‌های محتمل از احتمالات وقوع یک پدیده تعریف می‌شود. یکی از روش‌هایی که به طور گسترده برای واسنجی و تحلیل عدم قطعیت پارامترهای مدل‌های شبیه‌سازی (علی‌الخصوص هیدرولوژی) استفاده می‌شود، روش عمومی عدم قطعیت تشابهات (GLUE) است در این روش، با فرض عدم وجود پارامترهای بهینه منحصر به فرد با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو چندین سری پارامترهای مختلف ایجاد شده، نتایج حاصل از سری‌های مختلف براساس نسبت اعتمادشان وزن گرفته و سپس از این وزنها برای تعیین توزیع احتمالاتی پیش‌بینی استفاده می‌شود. تحلیل عدم قطعیت در مشخص نمودن، ارزیابی و گزارش دهی منابع اصلی خطاها در مطالعات مدلسازی و اثرات آنها بر پیش‌بینی‌های مدل اهمیت ویژه‌ای دارد. اگرچه در دو دهه گذشته تحلیل‌های عدم قطعیت در مدل‌سازی‌های مرتبط با علوم و منابع آب به وفور مورد استفاده قرار گرفته است ولی در زمینه پارامترهای فیزیکی خاک موضوع کاملاً جدید و مورد نیاز به حساب می‌آید.

برخی از مهم‌ترین چالش‌ها در این زمینه استنتاج منابع اصلی خطای مؤثر بر پیش‌بینی‌های مدل و استنتاج روش‌های محاسباتی مناسب برای کمی‌سازی این عدم قطعیتها است (کامپو و همکاران 2014). یکی از موارد مهمی که بر خلاف مدل‌های آماری در مدل‌های شبکه‌های عصبی فازی پیش‌بینی پارامترهای فیزیکی خاک به آنها کمتر پرداخته شده است، تحلیل عدم قطعیت در هنگام ارائه نتایج می‌باشد. بدیهی است که پیش‌بینی‌های مدل‌های مبتنی بر سیستم‌های استنتاج فازی قطعی نیستند

¹ spatial variability

² Artificial Neural Network (ANN)

³ Artificial Neural Fuzzy Inference System

مواد و روش‌ها

داده‌ها و منطقه مور مطالعه

منطقه مورد مطالعه، دشت دامنه‌ای قره‌میدان واقع در 70 کیلومتری شمال‌غرب بجنورد می‌باشد که دارای وسعت بیش از 300 هکتار بوده و شیب عمومی آن نیز حدود 15 درصد می‌باشد. در آغاز پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و دستگاه GPS، کل منطقه به شبکه‌هایی با طول مساوی 150 متر تقسیم‌بندی گردید. در آذر سال 1388 از بخش‌های مذکور نیز از عمق 0-25 سانتی‌متری نمونه‌برداری خاک انجام شد و تعداد 151 نمونه خاک با شرایط متنوع انتخاب گردید (جلالی و همکاران، 2013). در این تحقیق ابتدا داده‌ها به صورت تصادفی تبدیل و به سه قسمت تقسیم شدند. 50 درصد از آنها برای آموزش، 25 درصد برای اعتبار سنجی و 25 درصد باقیمانده برای آزمایش مدل‌ها استفاده شد. در این تحقیق برای اجرای مدل‌های سیستم استنتاج فازی از جعبه ابزار استاندارد FIS در نرم‌افزار MATLAB استفاده شد.

به منظور افزایش کارایی مدل‌های عصبی فازی، همه داده‌ها ابتدا به شکل نرمال بین دو عدد 0/1 و 0/9 استاندارد شدند سپس آنها به مقادیر اولیه بعد از استفاده در شبیه‌سازی برگشتند (خاشعی سیوکی و سربازی، 1394)

در این بررسی انتخاب ورودی‌های مؤثر در شبکه بر اساس روش رگرسیون مرحله‌ای¹ صورت گرفت بدین ترتیب مؤثرترین ورودی‌ها از بین متغیرهای موجود در جدول (1) جرم ویژه ظاهری و حقیقی می‌باشند و مورد استفاده قرار گرفت.

در محیط شبکه عصبی -فازی دو روش منقطع سازی شبکه‌ای و خوشه بندی جزئی وجود دارد که تفاوت عمده آنها در انتخاب تابع عضویت ورودی می‌باشد. در این مطالعه از روش خوشه‌بندی فازی استفاده نشده است در طراحی شبکه‌های فازی نتایج حاصل از توابع عضویت مختلف مانند: مثلثی، گوسی و زنگوله‌ای و نیز تعداد دو تا پنج تابع عضویت برای هر پارامتر بررسی شد. بعد از تعیین ساختار نهایی و بهینه شبکه عصبی - فازی، با تولید نمونه‌های مختلفی که از روش مونت کارلو از میان داده‌های دوره‌های آموزش و اعتبار یابی بدست می‌آیند، اقدام به آموزش مدل این نمونه‌ها گردید. سپس از مدل‌های نهایی آموزش یافته برای شبیه‌سازی پیش‌بینی‌ها در دوره آزمون استفاده شده و در نهایت بازه اطمینان خروجی‌های شبیه‌سازی شده تعیین گردید.

و تجزیه و تحلیل عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها می‌تواند استفاده از نتایج این مدل‌ها را کارآمدتر سازد (ریاحی و همکاران 2011).

در مطالعه‌ای ریاحی و همکاران (2016) به بررسی تحلیل دقت و عدم قطعیت مدل شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی عملکرد زعفران در خراسان جنوبی مبتنی بر داده‌های اقلیمی پرداختند. نتایج تحلیل عدم قطعیت مونت کارلو بر مبنای 1000 نمونه‌گیری بدون جایگذاری، بر اساس فاکتورهای d -factor, 95% PPU, R2 نیز نشان داد که علیرغم محدودیت در تعداد داده‌های موجود، مدل از پهنای باند اطمینان مطلوبی برخوردار است. پوررضا و خاشعی سیوکی (1394) نیز عدم قطعیت مدل شبکه عصبی را در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع مورد بررسی قرار دادند. آنها در بررسی‌شان به طور کلی نتیجه گرفتند که مقادیر هدایت هیدرولیکی بیشینه و محدوده‌های اطمینان متناظر آنها در تابع انتقال لگاریتم بهتر از تابع انتقال خطی بوده و قطعیت بیش-تری دارد. برعکس، نقاط با مقادیر کم‌تر هدایت هیدرولیکی با تابع انتقال خطی بهتر برآورد شده و بنابراین قطعیت بیش‌تری دارند.

بررسی تحقیقات پیشین مرتبط با تحلیل عدم قطعیت مدل‌های هوش مصنوعی بیانگر این است که روش‌های محدودی برای تعیین عدم قطعیت در این مدل‌ها توسعه یافته که از جمله می‌توان روش‌های Bootstrap و تخمین‌زننده ساندویچ¹² (نیبشیریان، 1995)، حداکثر درست‌نمایی¹³ و استنتاج بیزین¹⁴ (دیوسکی، 1997) و روش مونت کارلو پیشنهاد شده توسط مارک و همکاران (2004) را نام برد. در تحقیق حاضر از روش مارک و همکاران (2004) به دلیل جدید بودن و عملکرد مناسب گزارش شده آن استفاده شده است. این تحقیق تأثیر عدم قطعیت مدل‌های سیستم استنتاج فازی و دوره‌های مختلف ورودی بکار رفته برای آموزش و آزمون مدل جهت پیش-بینی هدایت هیدرولیکی خاک با رویکرد شبیه سازی مونت کارلو بررسی می‌نماید. با توجه به اهمیت هدایت هیدرولیکی خاک و این‌که تاکنون تحلیل عدم قطعیت مدل سیستم‌های استنتاج فازی عصبی در پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در هیچ یک از تحقیقات مشابه در دنیا انجام نشده است این تحقیق با هدف تحلیل عدم قطعیت سیستم‌های هوشمند فازی در پیش‌بینی هدایت هیدرولیک اشباع خاک مبتنی بر داده‌های زودیافت در شهرستان بجنورد بر اساس داده‌های آزمایشگاهی انجام گرفت.

¹ Stepwise regression

جدول 1- خلاصه‌ای از آماره‌های توصیفی پارامترهای خاکی به کار رفته جهت تخمین هدایت هیدرولیکی (جلالی و همکاران 1392)

ویژگی	واحد	دامنه	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
جرم ویژه ظاهری	$g.cm^{-3}$	0/49	1/26	1/75	1/53	0/086	5/62
جرم ویژه حقیقی	$g.cm^{-3}$	0/59	2/19	2/78	2/56	0/088	3/43
شن	%	71	4	75	21/07	0/08382	39/77
سیلت	%	49	13	62	48/70	0/05408	11/10
رس	%	32	12	44	30/23	0/04482	15
کربن آلی	%	1/70	0/21	1/91	0/88	0/22	24/9
مواد خنثی شونده	%	42	5/75	47/75	21/99	5/36	24/38
شوری	$dS.m^{-1}$	3/54	0/27	3/81	1/74	0/48	28
رطوبت اشباع (θ_s)	$m.m^{-3}$	0/09	0/38	0/46	0/407	0/0126	3/1
هدایت هیدرولیکی اشباع خاک	$cm.d^{-1}$	193/22	1/39	194/62	17/12	19/85	1/16

برآورد عدم قطعیت در پیش‌بینی‌ها

به منظور تخمین عدم قطعیت در خروجی سیستم های استنتاج عصبی فازی از روش پیشنهادی مارک و همکاران (2004) استفاده شد. در این روش سیستم استنتاج عصبی فازی در قالب یک نمونه‌گیری مونت کارلو به کار گرفته می‌شوند. اساس کار روش شبیه-سازی مونت کارلو بر پایه استفاده از اعداد تصادفی و حصول تابع توزیع احتمالاتی خروجی یک مدل می‌باشد. بدین صورت که متغیرها (ورودی به مدل) با استفاده از تابع توزیع احتمالاتی مربوط بطور تصادفی تولید شده، و سپس خروجی معادل آن‌ها از مدل مورد نظر به دست می‌آید و این عمل بارها تکرار می‌شود. سپس عدم قطعیت خروجی (تابع) از طریق محاسبه شاخص‌های آماری و یا تعیین تابع توزیع احتمالاتی برآورد می‌شود (ایچهارد و همکاران، 2003). تفاوت روش مورد بحث در این تحقیق با تعریف بالا، استفاده از نمونه‌های تصادفی گرفته شده به جای اعداد تصادفی ساخته شده می‌باشد.

این روش بسیار به روش نمونه‌گیری دودویی Bootstrap تیشیریان و افرون (1993) شباهت داشته و تنها فرق آن در عدم تکرار یک الگو در یک نمونه می‌باشد. در این روش، ابتدا از اطلاعاتی که برای آموزش مدل در نظر گرفته شده‌اند به دفعات زیاد (معمولاً 1000 بار) (عقیل و همکاران، 2007) بدون تکرار نمونه‌گیری می‌شود به نحوی که تعداد داده‌های آموزش و نظارت بر آموزش در هر نمونه یکسان باشد و برای هر نمونه عملیات آموزش مدل انجام می‌شود. در نتیجه پارامترهای مدل به دفعات زیاد و هر بار بر اساس نمونه‌ای از وقایع اتفاق افتاده در گذشته به دست می‌آیند. انجام این مراحل به تخمین عدم قطعیت در پارامترهای مدل و نتیجتاً خروجی مدل، عدم اریب بودن میانگین خروجی مدل و تعیین حدود اطمینان مقادیر پیش‌بینی شده می‌انجامد

(مارک و همکاران 2004) در نتیجه با استفاده از این تکنیک محاسباتی حجیم به جای پیش‌بینی یک عدد مطلق با آنچه در تحقیقات مشابه انجام گرفته، محدوده‌ای از خروجی که نتیجه عدم قطعیت مدل ساخته شده می‌باشد حاصل خواهد شد. این روش بر مبنای قرارگیری مدل‌ها در قالب یک پروسه نمونه‌گیری تصادفی مونت کارلو می‌باشد که اولین بار برای برآورد میزان خروج سالانه مواد معدنی مغذی محلول در رودخانه از حوضه با استفاده از مدل نروفازی به کار گرفته شده است. بنابراین داده‌هایی با اندازه 50 درصد حجم کل داده‌ها (81 سری نمونه) و به تعداد بالا (1000 تکرار) به روش مونت کارلو از مجموع سری داده‌های دو دوره آموزش و تست (81+35 سری) جهت انتخاب برای دوره آموزش نمونه‌گیری شد و بر آن اساس باقیمانده داده‌های اندازه‌گیری شده (35 سری) جهت دوره تست در نظر گرفته می‌شود. همچنین در این حالت نمونه‌های دوره صحت سنجی (25 درصد نهایی داده‌های اندازه‌گیری شده موجود معادل 35 سری نمونه) نیز ثابت فرض گردیده و نتایج ناشی از وزن‌های آموزش شبکه و توابع انتقال و آموزش مختلف بر روی این سری داده‌های صحت سنجی ارزیابی و نمودارهای آنها در بخش نتایج نمایش داده شده است.

در این تحقیق نتایج حاصل از اجرای 1000 بار اجرای مدل FIS با 81 سری داده مختلف دوره آموزش که توسط نمونه‌گیری مونت کارلو بدست آمده است، برای هر یک از چهارده سناریو (ترکیب دو وضعیت خطی و ثابت و 6 تابع عضویت و یک حالت در نظر گرفتن تمام توابع عضویت‌ها (در مجموع 7 حالت)) ارائه می‌شود.

توان دو مقدار فاکتور p (عددی بین صفر و یک) استفاده شده است:

$$NUE_{CI} = \frac{P_{CI}^2}{ARIL_{CI}} \quad (3)$$

نتایج و بحث

اشکال 1 تا 7 نمایش محدوده اطمینان 95 درصد خروجی مدل به ازاء چهارده سناریو موجود را نمایش می‌دهد، در نگاه اول ملاحظه می‌شود که مدل ثابت بهتر از خطی بود و مقادیر مشاهده شده بهتر در محدوده مورد نظر قرار گرفته است البته این امر در تمامی اشکال 1 تا 7 مشاهده می‌شود نتایج جدول 2 نیز این مهم را تصدیق می‌نماید بطوری که مقادیر فاکتور NUE به عنوان عاملی که تأثیر دو معیار دیگر را در خود نهفته دارد، به طور نسبی در 7 ردیف اول که مربوط به تابع خروجی ثابت می‌باشد از همه بزرگتر بوده و پس از آن در ردیف-های 8 تا 14 (نوع تابع عضویت خروجی مدل خطی) با مقادیر کمتر در رتبه دوم قرار می‌گیرد.

به طور خاص شکل 1 نمایش تابع عضویت سیگموئید برای دو حالت خطی و ثابت می‌باشد که نکته بالا در باب بهتر بودن تابع عضویت ثابت در آن مشهود است. شکل 2 بازه 95% اطمینان خروجی با ترکیب استفاده از تابع عضویت gauss2mf (تابع گوسین با دو بار اعمال تابع گوسین بر ورودی) با دو نوع تابع عضویت خروجی خطی و ثابت را که در نرم افزار MATLAB اجرا شده است را نشان می‌دهد، همانطور که در شکل مذکور ملاحظه می‌شود در داده‌های شماره 25 و 27 بر اساس نوع تابع خروجی ثابت مقادیر مشاهده شده از محدوده باند خارج شده و نشان می‌دهد که نوع تابع عضویت خروجی مدل سیستم استنتاج فازی بر اساس ترتیب انتخاب داده‌ها برای بخش آموزش و آزمون مدل دارای عدم قطعیت می‌باشد. این موضع برای تابع عضویت خروجی خطی وجود ندارد و مدل با قطعیت بالاتری این دو مقدار خاص را برآورد کند. ولی در مجموع فاکتور NUE با مقدار بالاتر و بهتر در تابع ثابت نسبت به خطی توانسته است هدایت هیدرولیکی خاک را دقیق تر پیش‌بینی و برآورد نماید.

معیارهای ارزیابی مدل‌ها

از آنجا که در تحقیقات مرتبط با تحلیل عدم قطعیت تنها معیارهای خطا مانند ریشه میانگین مربعات خطا¹ به کار نرفته و نیاز به معیارهایی به منظور ارزیابی محدوده های اطمینان تولید شده می باشد، لذا معیارهای زیر برای این منظور تعریف و به کار برده می‌شوند. هر چند انتخاب شبیه سازی‌های مناسب (که در این تحقیق 5 درصد کل اجرا می‌باشد) با کمک معیار RMSE انجام شده و در نهایت بازه اطمینان 95 درصد با کمک آن برآورد شده است.

معیار P_{CI} : درصد فرارگیری داده‌های اندازه‌گیری شده در محدوده اطمینان 95 درصد (CI^2) (لی و همکاران، 2009):

$$P_{Obs\%} = \frac{nk_{Observed}^{CI}}{N} \times 10 \quad (1)$$

که $nk_{Observed}^{CI}$ تعداد مشاهدات (در این تحقیق هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده بر حسب متر بر روز) قرار گرفته در محدوده اطمینان و N تعداد کل اندازه-گیری‌ها است.

معیار $ARIL_{CI}$: پهنای نرمال شده محصور بین حد بالا و حد پایین هدایت هیدرولیکی شبیه سازی شده در سطح اطمینان CI (جین و همکاران، 2010) که بصورت معادله (2) تعریف می‌گردد:

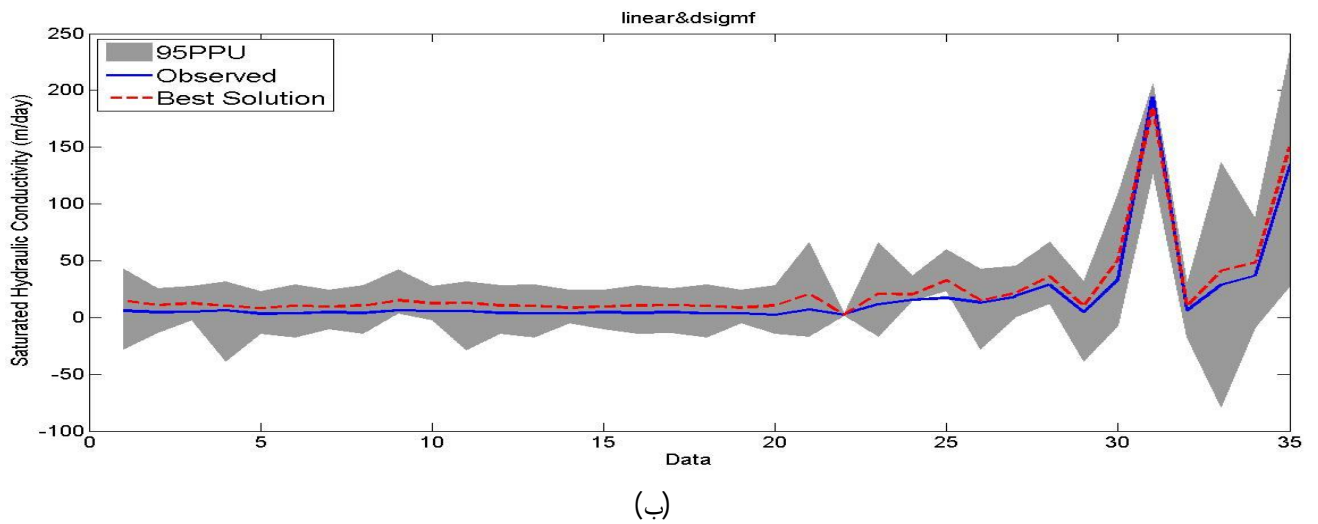
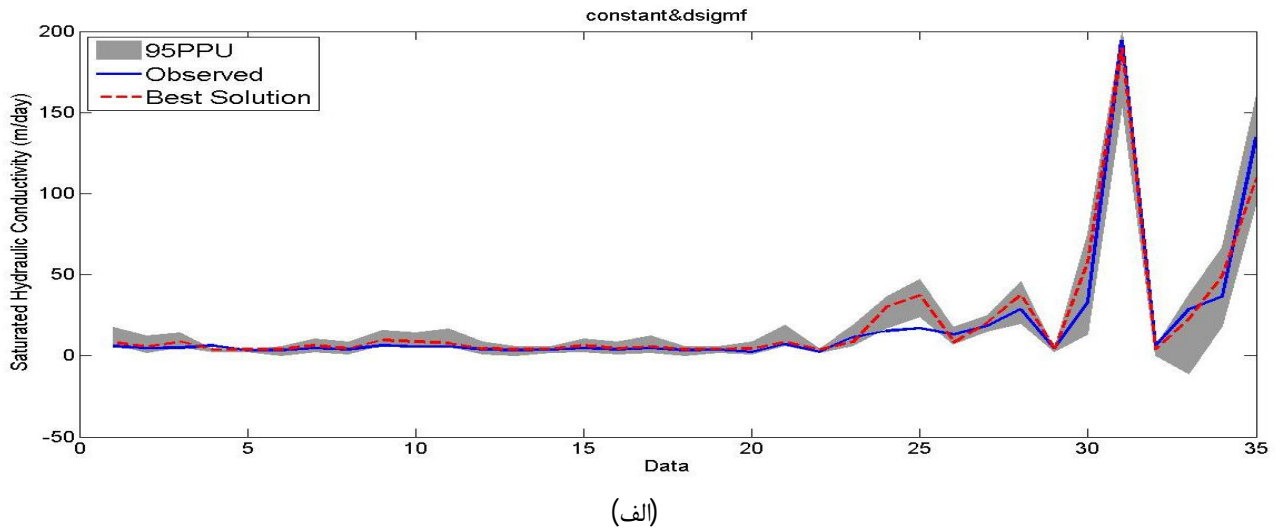
$$ARIL_{CI} = \frac{1}{n} \sum \frac{Limit_{upper,t} - Limit_{lower,t}}{K_{Obs,t}} \quad (2)$$

در این رابطه، $Limit_{upper,t}$ و $Limit_{lower,t}$ حد بالا و پایین محدوده اطمینان 95 درصد برای t امین مقدار شبیه‌سازی هدایت هیدرولیکی است و n تعداد کل اندازه گیری‌ها، و $K_{Obs,t}$ هدایت هیدرولیکی مشاهده شده است. هر چه فاکتور p به 100 درصد و فاکتور $ARIL$ به صفر نزدیک‌تر باشد شبیه‌سازی‌ها مناسب‌تر خواهند بود.

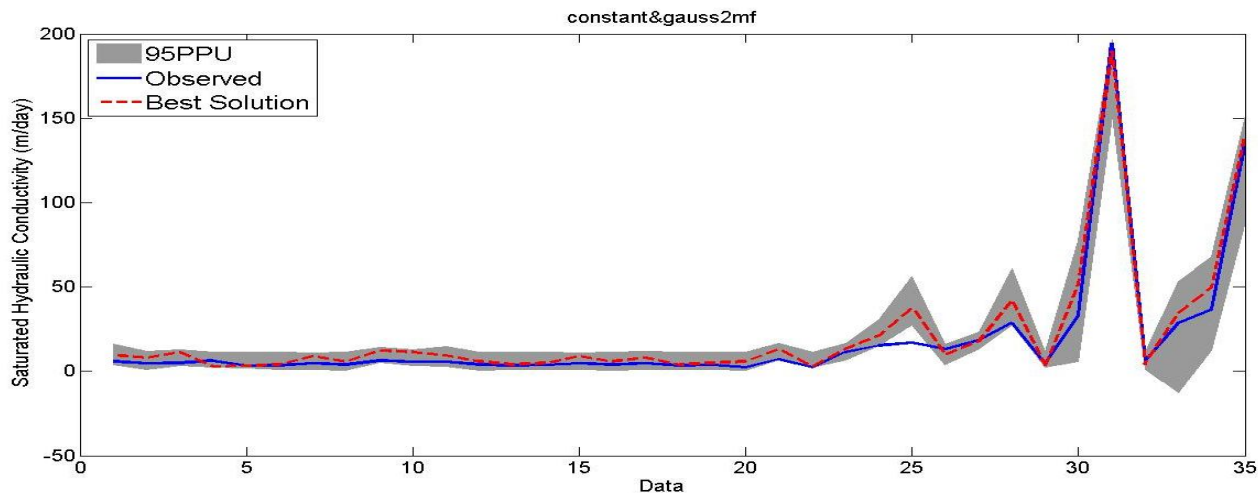
معیار NUE_{CI} : با توجه به رفتار متفاوت این دو شاخص و لزوم جمع‌بندی نتایج، از شاخصی جدیدی به عنوان شاخص کل عدم قطعیت (رهنما و همکاران، 2014) استفاده گردید. این شاخص تجمیع دو شاخص قبلی می‌باشد و هرچه که مقدار بیشتری را نمایش دهد، روند مطلوب‌تری را نمایندگی می‌کند. با توجه به تأثیر بالاتر فاکتور $ARIL$ در این تحقیق مطابق رابطه زیر از

¹ Root Mean Square Error

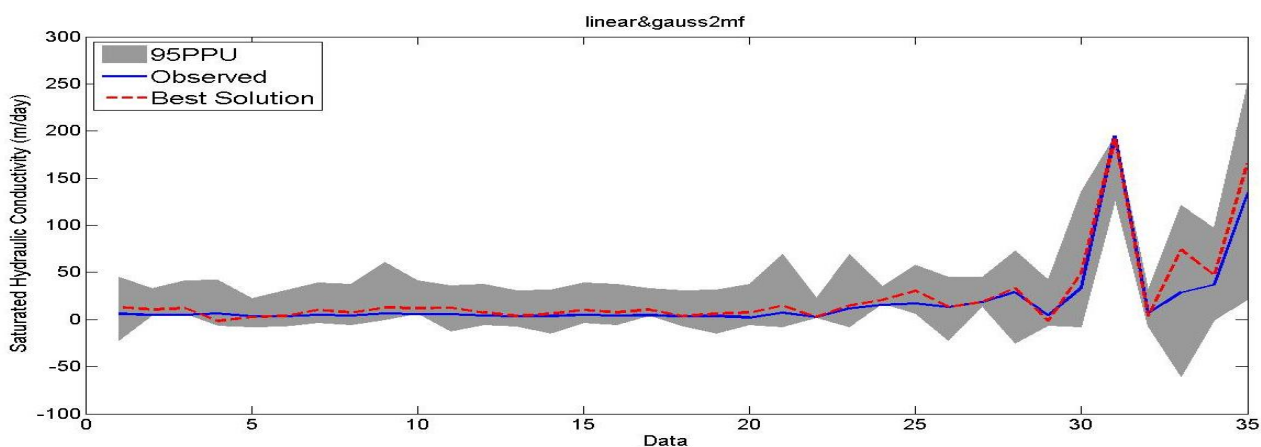
² Confidence Interval



شکل 1- بازه 95% اطمینان خروجی با ترکیب استفاده از تابع عضویت dsigmf با دو نوع ثابت (الف) و خطی (ب) محور عمودی هدایت هیدرولیکی اشباع (متر بر روز) و محور افقی شماره داده آزمون



(الف)



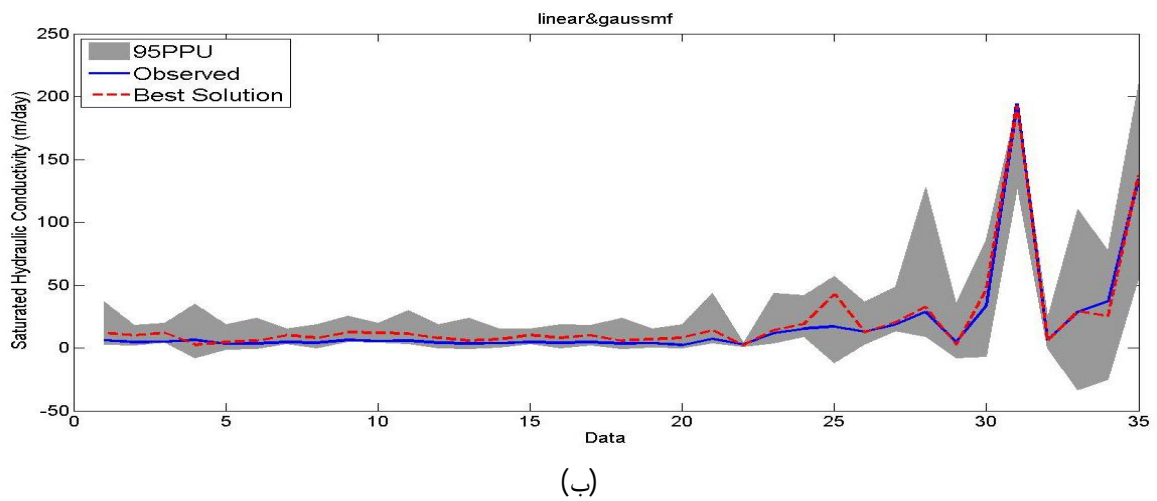
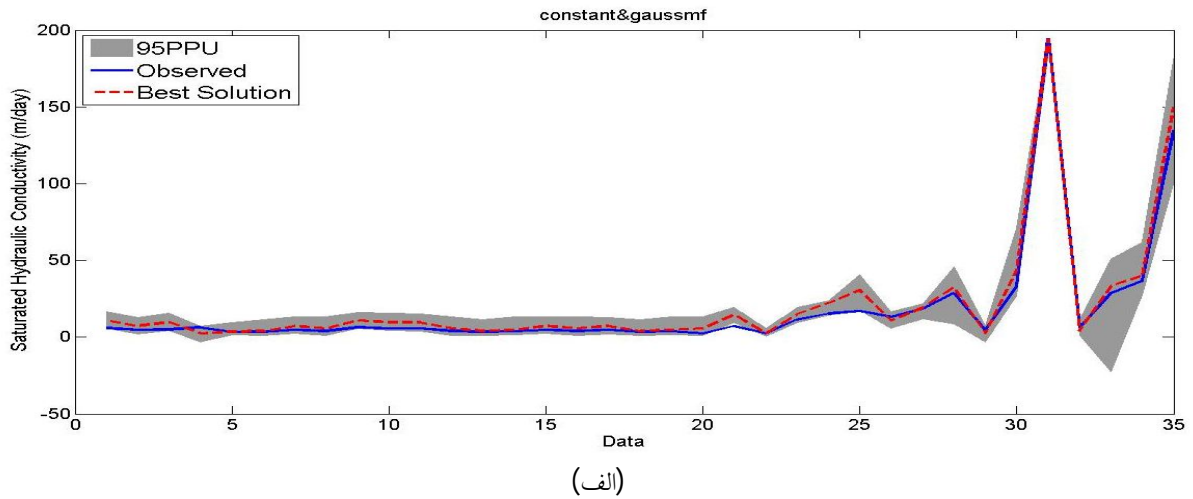
(ب)

شکل 2- بازه 95% اطمینان خروجی با ترکیب استفاده از تابع عضویت gauss2mf با دو نوع ثابت (الف) و خطی (ب) محور عمودی هدایت هیدرولیکی اشباع (متر بر روز) و محور افقی شماره داده آزمون

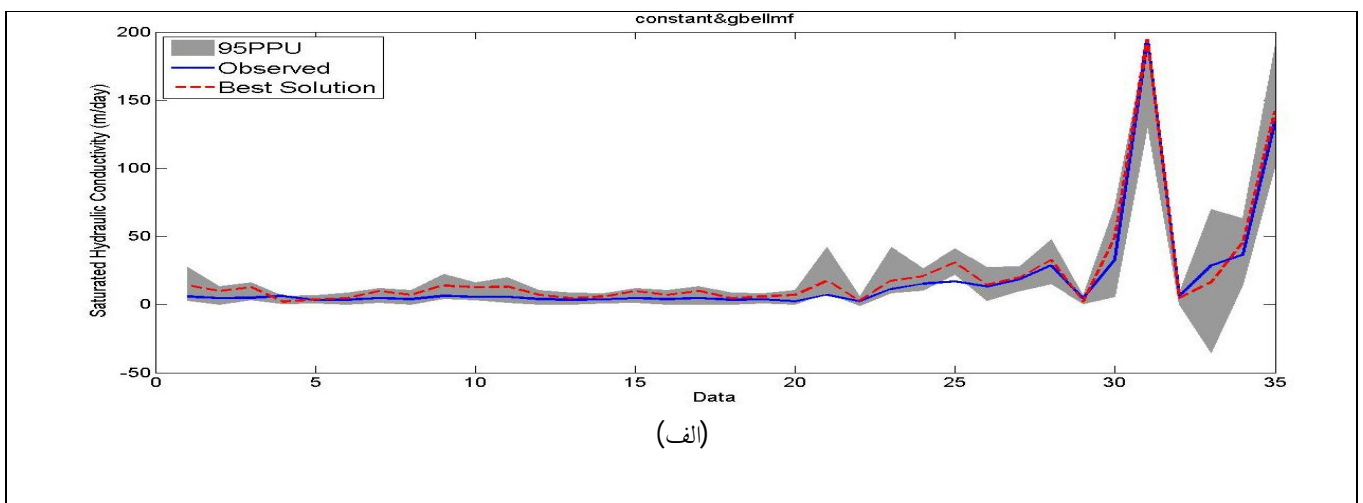
هدایت هیدرولیکی بیشینه و محدوده‌های اطمینان متناظر آن‌ها در تابع انتقال لگاریتم بهتر از تابع انتقال خطی بوده و قطعیت بیشتری دارد. برعکس، نقاط با مقادیر کمتر هدایت هیدرولیکی با تابع انتقال خطی بهتر برآورد شده و بنابراین قطعیت بیشتری دارند.

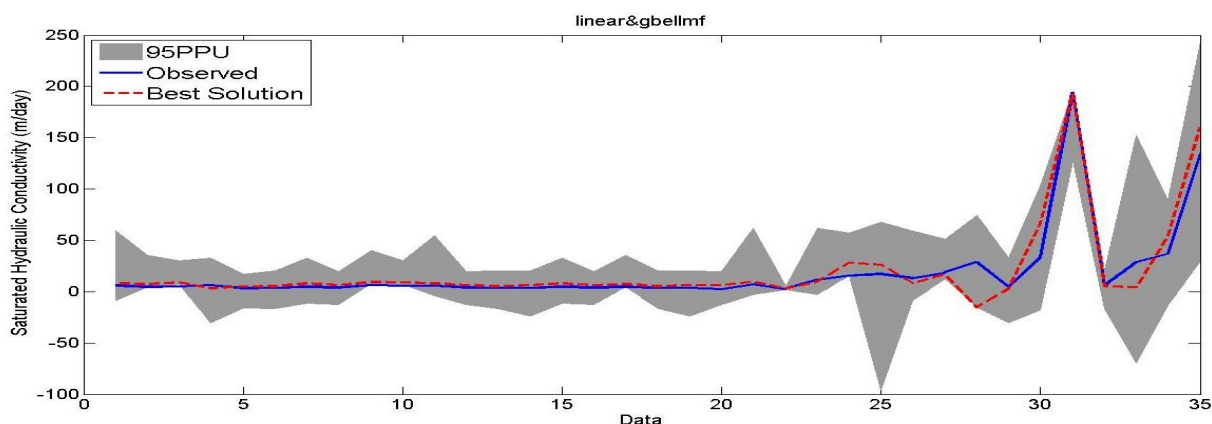
بر اساس شکل 3 (تابع عضویت گوسین تنها یک بار بر ورودی‌ها اعمال شده است) نیز باند عدم قطعیت تابع عضویت خروجی خطی بیشتر از ثابت بوده ولی بر خلاف تابع عضویت gauss2mf، در این تابع عضویت میزان مقادیر مشاهده شده از محدوده باند عدم قطعیت خارج نشده است. در این تابع عضویت نیز تابع عضویت خروجی‌ها با توابع ثابت قطعیت بیشتری از توابع خطی دارد.

همچنین با توجه به نمودارهای قرار گرفته در اشکال 1 تا 2، می‌توان به طور کلی نتیجه گرفت تمامی محدوده‌های بالا و پایین هدایت هیدرولیکی علی‌الخصوص مقادیر بیشینه در تابع عضویت خروجی ثابت بهتر از تابع عضویت خروجی خطی بوده و قطعیت بیشتری دارد. این رفتار تا حدودی در مورد نقاط با مقادیر کمتر هدایت هیدرولیکی (از داده 1 تا 22) با تابع عضویت ثابت نیز برقرار بوده و بنابراین قطعیت بیشتری دارند. اما در نمونه شماره 25 توابع ثابت از عدم قطعیت بیشتری نسبت به تابع خطی برخوردارند. نتایج فوق با نتایج تحقیق پوررضا و خاشعی (1394) که عدم قطعیت مدل شبکه عصبی را مورد بررسی قرار دادند نیز مطابقت دارد. آنها در بررسی‌شان به طور کلی نتیجه گرفتند مقادیر



شکل 3- بازه 95% اطمینان خروجی با ترکیب استفاده از تابع عضویت gaussmf با دو نوع ثابت (الف) و خطی (ب) محور عمودی هدایت هیدرولیکی اشباع (متر بر روز) و محور افقی شماره داده آزمون





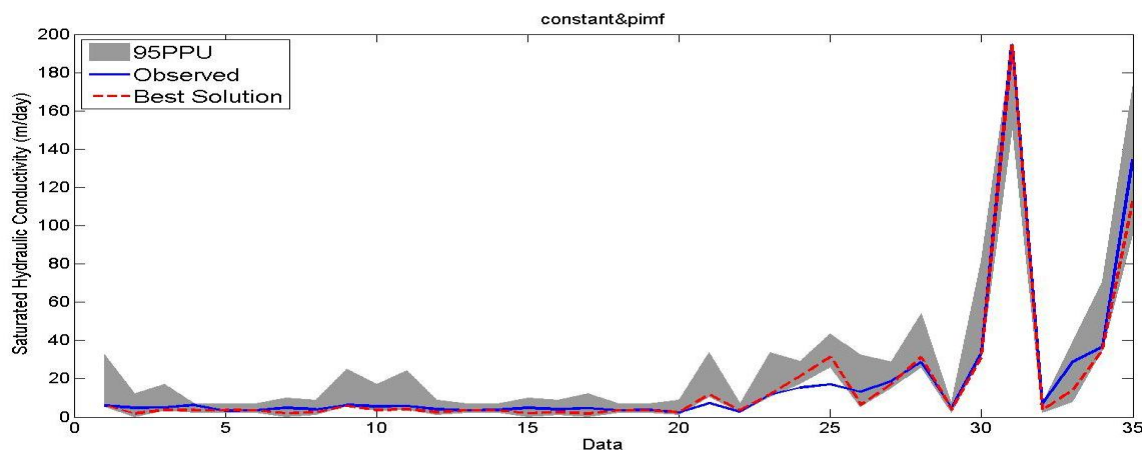
(ب)

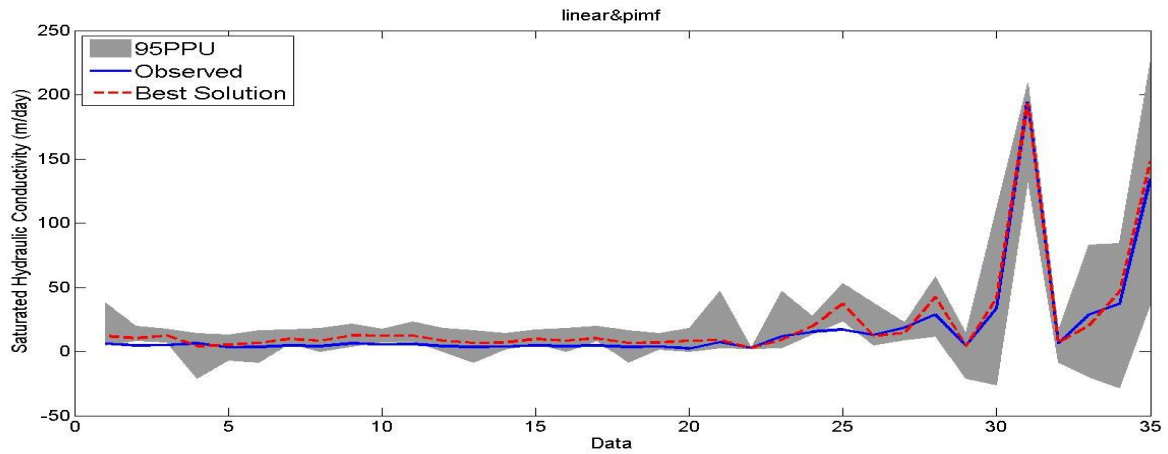
شکل 4- بازه 95% اطمینان خروجی با ترکیب استفاده از تابع عضویت gbelmf با دو نوع ثابت (الف) و خطی (ب) محور عمودی هدایت هیدرولیکی اشباع (متر بر روز) و محور افقی شماره داده آزمون

دو نوع تابع عضویت خروجی ثابت و خطی به نسبت باقی توابع عضویت از دقت کمتری برخوردار بوده ولی در اینجا هم پهنای باند قطعیت تابع عضویت خطی بیشتر از ثابت می‌باشد. البته میزان پیش‌بینی مقادیر مشاهداتی در تنها تابع عضویت ورودی که از محدوده باند در مقادیر شمار 24 تا 25 خارج شده است همین تابع می‌باشد که برای هر دو حالت تابع عضویت خروجی به همین ترتیب است.

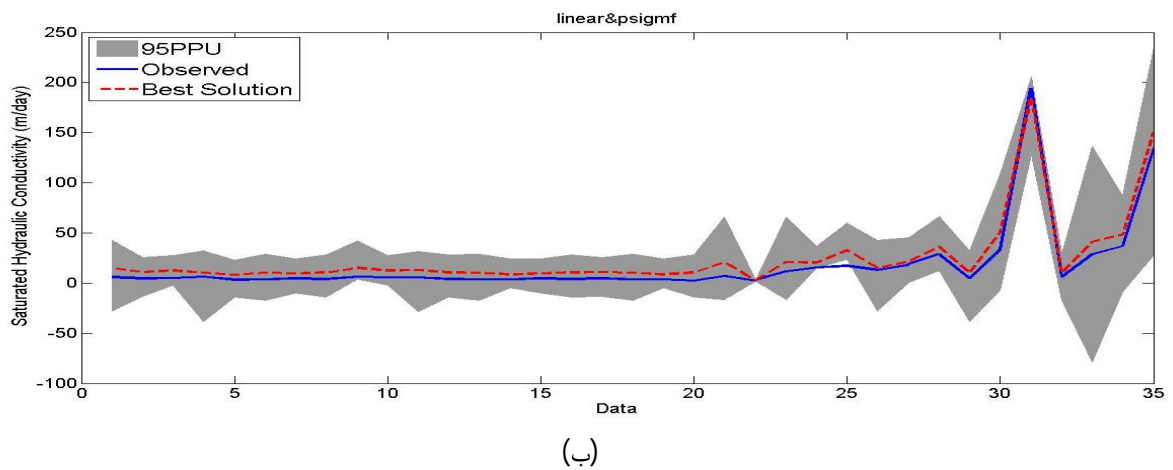
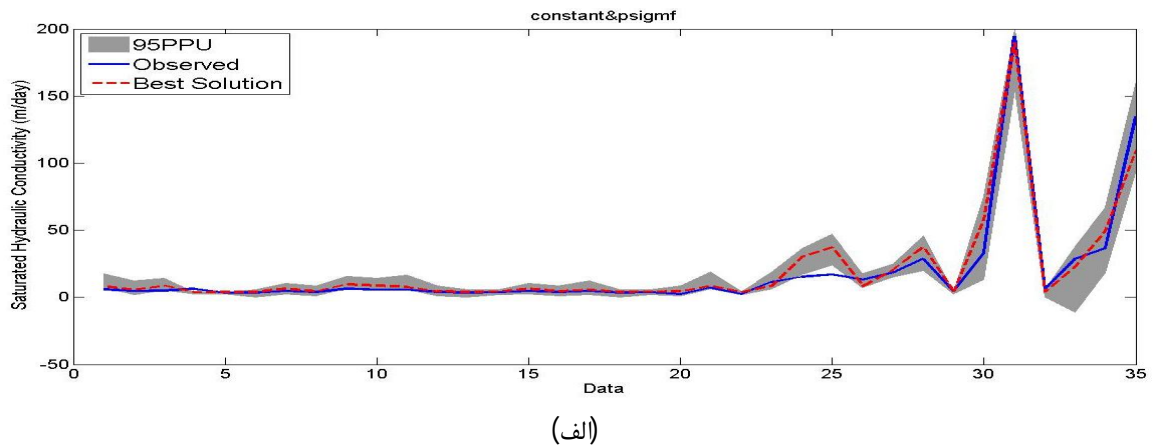
همانطور که از نتایج شکل 4 ملاحظه می‌شود به طور کلی تابع عضویت gbelmf نیز رفتاری مانند بقیه از خود نشان داده و دارای برتری محسوسی در توابع پایت به نسبت خطی می‌باشد. تنها بایستی این نکته اشاره گردد که ضعیف‌ترین نتیجه مربوط به توابع خطی در این تابع عضویت gbelmf با مقدار شاخص 0.49 NUE مشاهده می‌گردد.

بر اساس نتایج شکل 5 تابع عضویت پی شکل در هر





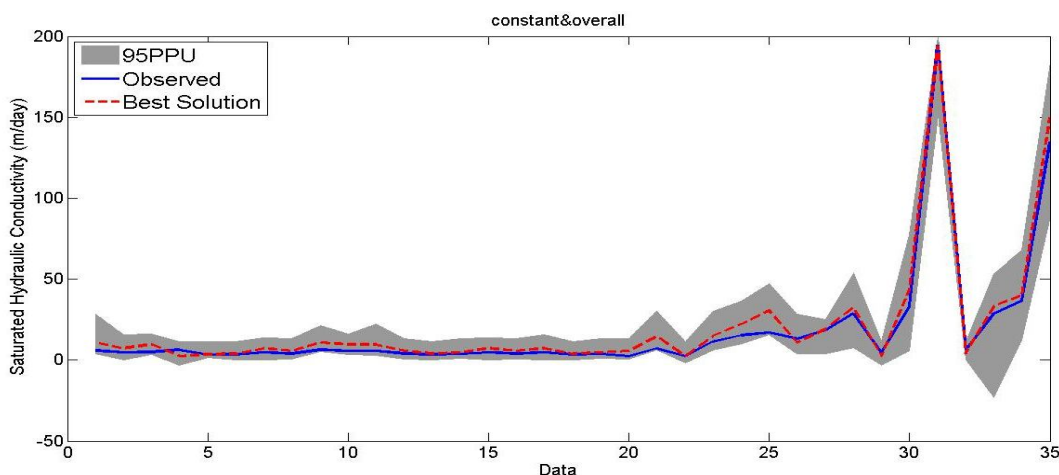
شکل 5- بازه 95% اطمینان خروجی با ترکیب استفاده از تابع عضویت pimf با دو نوع ثابت (الف) و خطی (ب) محور عمودی هدایت هیدرولیکی اشباع (متر بر روز) و محور افقی شماره داده آزمون



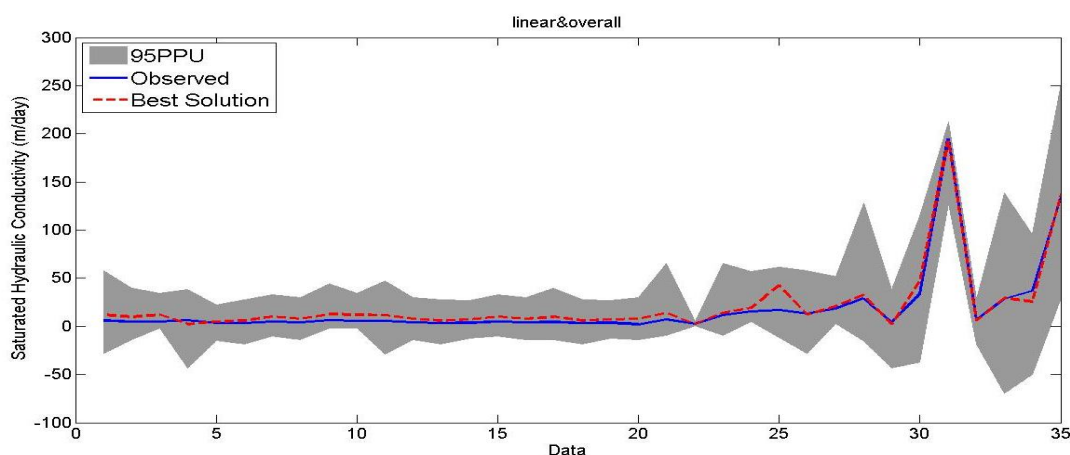
شکل 6- بازه 95% اطمینان خروجی با ترکیب استفاده از تابع عضویت psigmf با دو نوع ثابت (الف) و خطی (ب) محور عمودی هدایت هیدرولیکی اشباع (متر بر روز) و محور افقی شماره داده آزمون بازه 95% اطمینان خروجی با ترکیب استفاده از تابع عضویت psigmf با دو نوع خطی و ثابت

توابع عضویت مانند قبل استخراج و در شکل 7 قرار گرفت. نتایج شکل 7 نشان می‌دهد که در این حالت نیز توابع ثابت عدم قطعیت کمتری نسبت به توابع خطی در مدل‌های سیستم استنتاج فازی دارند.

پس از اخذ نتایج 12 سناریو مذکور، نتایج آنها به صورت ترکیبی نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. به طوری که نتایج اجراهای همه توابع آموزش (6 تابع آموزش) با هم یکجا تجمیع و سپس با 6000 اجرای موجود محدوده 95 درصد اطمینان به تفکیک هر یک از



(الف)



(ب)

شکل 7- شکل 6- بازه 95% اطمینان با ترکیب استفاده از ترکیبی از توابع عضویت با دو نوع ثابت (الف) و خطی (ب) محور عمودی هدایت هیدرولیکی اشباع (متر بر روز) و محور افقی شماره داده آزمون

قطعیت و gaussmf با مقدار 0.9 بیشترین قطعیت را دارد. در صورتی که از توابع عضویت ثابت برای خروجی مدل‌های سیستم استنتاج فازی استفاده شود بهترین نتایج مربوط به دو تابع گوسی با بیشترین NUE بوده و برعکس ضعیف ترین نتایج از سه تابع عضویت psigmf, dsigmf و gbellmf، نتیجه گیری می‌شود.

همانطور که از نتایج جدول 2 استنباط می‌شود توابع عضویت خروجی ثابت نیز قطعیت بیشتری نسبت به خطی داشته است این تفاوت تابع عضویت خروجی باعث بهبود 35 درصدی فاکتور NUE شده است. بررسی نشان داد که در بین توابع عضویت مختلف خطی دو تابع gauss2mf و gbellmf با کمترین مقادیر NUE کمترین

جدول 2 - مقادیر معیارهای عدم قطعیت *ARIL* و $P_{95\%}$ و *NUE* در ارزیابی سناریوهای مختلف

روش	نوع تابع عضویت	<i>ARIL</i>	$P_{95\%}$	<i>NUE</i>
<i>constant</i>	<i>pimf</i>	0.44	0.91	1.89
<i>constant</i>	<i>dsigmf</i>	0.4	0.74	1.38
<i>constant</i>	<i>psigmf</i>	0.4	0.74	1.38
<i>constant</i>	<i>gbellmf</i>	0.59	0.91	1.41
<i>constant</i>	<i>gaussmf</i>	0.45	0.94	1.98
<i>constant</i>	<i>gauss2mf</i>	0.49	0.97	1.93
<i>constant</i>	<i>overall</i>	0.64	1	1.56
<i>linear</i>	<i>pimf</i>	0.94	0.77	0.63
<i>linear</i>	<i>dsigmf</i>	1.54	0.97	0.61
<i>linear</i>	<i>psigmf</i>	1.54	0.97	0.61
<i>linear</i>	<i>gbellmf</i>	1.59	0.89	0.49
<i>linear</i>	<i>gaussmf</i>	1.05	0.97	0.90
<i>linear</i>	<i>gauss2mf</i>	1.56	0.89	0.50
<i>linear</i>	<i>overall</i>	1.85	1	0.54

تخمین هدایت هیدرولیکی از عدم قطعیت کمتری برخوردار است و دارای کارایی مناسبی بین توابع عضویت ورودی می‌باشد. با مقایسه محدوده‌های اطمینان بدست آمده برای مقادیر هدایت هیدرولیکی به طور خلاصه می‌توان تابع عضویت خروجی ثابت را برای مقادیر بیشینه و کمینه هدایت هیدرولیکی مناسب تر گزارش داد و قطعیت بیشتری نیز از نتایج آن انتظار داشت. ضمن آنکه تابع عضویت خطی اکثر مقادیر هدایت هیدرولیکی بیشینه را کمتر از مقدار واقعی تخمین زده است. بررسی‌ها نشان داد که با تکیه بر نتایج معیارهای ارزیابی تابع خطی، قابلیت تخمین مناسب هدایت هیدرولیکی سیستم‌های استنتاج فازی با تابع عضویت $gaussmf$ ($NUE = 0/9$) و حساسیت کمتر این تابع نسبت به تغییرات در داده‌های آموزشی در قیاس با سایر سناریوهای مورد استفاده مشاهده گردید. با توجه به اهمیت تعیین میزان قطعیت مدل‌های هوش مصنوعی، بهتر است روش‌های دیگر تعیین عدم قطعیت آزمون شده و با این روش مقایسه گردد و مدل‌های دیگر سیستم های خبره نیز از نظر عدم قطعیت در پیش‌بینی پارامترهای خاک مورد بررسی قرار گیرند.

با مقایسه نمودارهای مربوط به توابع عضویت مختلف برای ورودی و خروجی مدل‌های سیستم استنتاج فازی در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به صورت کلی می‌توان همان نتیجه برتری نسبی دو تابع عضویت ثابت (گوسی) را به نسبت دیگر توابع عضویت مشاهده نمود. این نتیجه با کمک جدول نتایج (جدول 2) نیز قابل استنباط می‌باشد.

نتیجه گیری

در این تحقیق ارزیابی عدم قطعیت مربوط به انتخاب ترتیب داده برای حالت آموزش یا آزمون در شبیه سازی هدایت هیدرولیکی خاک با مدل استنتاج فازی عصبی، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. روش‌شناسی انجام این تحقیق به نحو مطلوبی بحث عدم قطعیت را در مدل‌های خبره در برآورد خصوصیات فیزیکی خاک از داده‌ها زود یافت مبتنی بر ANFIS اعمال کرد و با توجه به نتایج مناسب و منطقی به دست آمده، استفاده از این روش در تحقیقات مشابه نیز توصیه می‌شود. بررسی عملکرد توابع عضویت مختلف با مقایسه بازه‌های اطمینان موجود و معیارهای ارائه شده در این تحقیق نشان داد که توابع عضویت ورودی ترکیبی و خروجی ثابت در برآورد

فهرست منابع:

1. پوررضا بیلندی، م و خاشعی سیوکی، ع 1394. تحلیل عدم قطعیت خروجی مدل شبکه عصبی در شبیه‌سازی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک. نشریه علمی پژوهشی آبیاری و زهکشی ایران. شماره 4 جلد 9 آبان 94 ص 655-664
2. جلالی، و، ع خاشعی سیوکی و م همایی 1392. مقایسه روش های زمین آماری با روش غیرپارامتریک k- نزدیک

ترین همسایه برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک. مجله علمی پژوهشی حفاظت آب و خاک گرگان. 20(5). 162-147.

3. ریاحی مدوار، ح، خاشعی سیوکی، ع و سیفی اکرم. 1395. تحلیل دقت و عدم قطعیت شبکه عصبی مصنوعی در پیش بینی عملکرد زعفران مبتنی بر داده های اقلیمی در استان خراسان جنوبی. مجله علمی پژوهشی فناوری و زراعت زعفران دانشگاه تربت حیدریه. پذیرش

4. Aqil, M., Kita, I., Yano, A., and Nishiyama, S. 2007. A comparative study of artificial neural networks and neuro-fuzzy in continuous modeling of the daily and hourly behavior of runoff. *Journal of Hydrology*, 337, 22-34.
5. Biggar, J. W. and Nielsen D. R. 1976. The spatial variability of the leaching characteristics of the field soil. *Water Resource Research*. 12: 78-84.
6. Bouma, J. 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advanced Soil Science*. 9:177-213.
7. Camacho, J . Martin, J , WilliamMc A , Hugo R, PeterSuscy, S. 2014. Uncertainty analysis of estuarine hydrodynamic models: an evaluation of input data uncertainty in the weeks bay estuary, Alabama. *Applied Ocean Research* 47 138-153
8. Dybowski, R. 1997 . Assigning confidence intervals to neural network predictions." Technical report, Division of Infection (St Thomas' Hospital), King's College London.
9. Eckhardt, K., Breuer, L., and Frede, H. G. (2003). "Parameter uncertainty and the significance of simulated land use change effects." *Journal of Hydrology*, 273, 164-176.
10. Khashei-siuki. A and Sarbazi. M. (2015). Evolution of ANFIS, ANN and geostatistic models to spatial distribution of groundwater quality (case study: Mashhad plain in Iran). *Arabian Journal of Geosciences*. Springer. 8:903-912
11. Jung W. K., Kitchen N. R., Sudduth K. A., and Anderson S. H. 2006. Spatial Characteristics of Claypan Soil Properties in an Agricultural Field. *Soil Science Society of America Journal*. 70:1387-1397.
12. Marce, R., Comerma, M., García, J. C., and Armengol, J. 2004. A neuro-fuzzy modeling tool to estimate fluvial nutrient loads in watersheds under time-varying human impact. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2, 342-355.
13. Miller, E. E., and Miller R. D. 1956. Physical theory for capillary flow phenomena. *Journal of Applied Physics*. 27:324-332.
14. Riahi-Madvar, H., Ayyoubzadeh, S. A. Namin ,M. M. Seifi A. 2011. Uncertainty analysis of quasi-two-dimensional flow simulation in compound channels with overbank flows. *J. Hydrol. Hydromech.*, 59, 2011, 3, 171-183 .
15. Riahi-Madvar, H., Ayyoubzadeh, S.A. 2010. Uncertainty analysis of ANN and ANFIS techniques in comparison with regime equations for determining regime channel geometry. Fifth International Conference on Water Resources and Environment Research 5th - 7th of July 2010 at Quebec City, Canada.
16. Tayfur, G., Nadiri, A. A., and Moghaddam, A. A. 2014 Supervised intelligent committee machine method for hydraulic conductivity estimation. *Water Resources Management*, 28(4), 1173-1184.
17. Tibshirani, R. (1994). A Comparison of Some Error Estimates for Neural Network Models. Technical Working Paper No. 94-10, Department of Statistics, University of Toronto.
18. Yao, R. J., Yang, J. S., Wu, D. H., Li, F. R., Gao, P., and Wang, X. P. 2015 Evaluation of pedotransfer functions for estimating saturated hydraulic conductivity in coastal salt-affected mud farmland. *Journal of Soils and Sediments*, 1-15.

