

مروری بر مراحل مختلف مدل سازی شبکه های عصبی برای کاربرد در پیش بینی پارامترهای منابع آب با تأکید بر آبهای زیرزمینی

عزیزا... ایزدی، دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد*

کامران داوری، استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

امین علیزاده، استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

بیژن قهرمان، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

(۰۹۱۵۱۸۷۱۲۱۹) ، E-mail: az.izady@gmail.com

چکیده:

شبکه های عصبی مصنوعی به طور فزاینده ای برای پیش بینی و پیشگویی پارامترهای منابع آب در حال استفاده هستند. در این مقاله سعی شده تا مراحل کلی که در توسعه چنین مدل هایی باید در نظر گرفته شود توضیح داده شود. این مراحل شامل انتخاب معیارهای عملکرد، تقسیم بندی و پیش پردازش داده های موجود، تعیین ورودی های مناسب به مدل و معماری شبکه، بهینه سازی وزن های ارتباطی و تأیید مدل می باشد. در تمام مقالات بررسی شده، از شبکه های عصبی پیشخور استفاده شده است که اکثر آنها با الگوریتم پس انتشار خطا آموزش دیده اند. همچنین در بیشتر موارد پیش پردازش اولیه داده ها و انتخاب ورودی های مناسب به طور کامل انجام نشده است. ضمناً بهینه سازی هندسه شبکه و نحوه بدست آوردن پارامترهای داخلی شبکه به طور کامل مورد بحث قرار نگرفته است. عوامل بالا منتج به عملکرد غیر بهینه مدل های مورد بحث و ناکارآمد نشان دادن مدل های عصبی مصنوعی شده است.

واژگان کلیدی: شبکه های عصبی مصنوعی، پیش بینی، پیشگویی، فرآیند، مدل سازی.

مروری بر مراحل مختلف مدل سازی شبکه های عصبی برای کاربرد در پیش بینی پارامترهای منابع آب با تأکید بر آبهای زیرزمینی

عزیزا... ایزدی^۱، کامران داوری^۲، امین علیزاده^۳، بیژن قهرمان^۴
^۱دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد
^۲استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد
^۳استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد
^۴دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد
E-mail: az.izady@gmail.com, (۰۹۱۵۱۸۷۱۲۱۹)

چکیده

شبکه های عصبی مصنوعی به طور فزاینده ای برای پیش بینی و پیشگویی پارامترهای منابع آب در حال استفاده هستند. در این مقاله سعی شده تا مراحلی که در توسعه چنین مدل هایی باید در نظر گرفته شوند توضیح داده شود. این مراحل شامل انتخاب معیارهای عملکرد، تقسیم بندی و پیش پردازش داده های موجود، تعیین ورودی های مناسب به مدل و معماری شبکه، بهینه سازی وزن های ارتباطی و تأیید مدل می باشد. در تمام مقالات بررسی شده، از شبکه های عصبی پیشخور استفاده شده است که اکثر آنها با الگوریتم پس انتشار خطا آموزش دیده اند. همچنین در بیشتر موارد پیش پردازش اولیه داده ها و انتخاب ورودی های مناسب به طور کامل انجام نشده است. ضمناً بهینه سازی هندسه شبکه و نحوه بدست آوردن پارامترهای داخلی شبکه به طور کامل مورد بحث قرار نگرفته است. عوامل بالا منتج به عملکرد غیر بهینه مدل های مورد بحث و ناکارآمدی نشان دادن مدل های عصبی مصنوعی شده است.

کرمان - بهمن ۸۶
واژگان کلیدی: شبکه های عصبی مصنوعی، پیش بینی، پیشگویی، فرآیند، مدل سازی.

۱- مقدمه

در سال های اخیر، شبکه های عصبی مصنوعی به طور گسترده ای برای پیش بینی و پیشگویی در زمینه های مختلف شامل امور مالی، تولید برق، دازوسازی، منابع آب و محیط زیست استفاده شده است. اگرچه مفهوم نرون های عصبی برای اولین بار در سال ۱۹۴۳ توسط مک کولاک و پیترس معرفی شد ولی کاربرد شبکه های عصبی مصنوعی با ظهور الگوریتم آموزش پس انتشار برای شبکه های پیشخور در سال ۱۹۸۶ توسط راملهارت و همکاران وارد مرحله تازه ای شد [۱]. با کاربرد مدل های عصبی برای پیش بینی و پیشگویی در حوزه های مختلف، پتانسیل این گونه مدل ها برای کاربرد های مختلف با گذشت زمان مشخص شده است. مطالعات نشان داده است که در نظر گرفتن مفاهیم آماری در فرآیند ساخت مدل های عصبی ممکن است عملکرد مدل را

بهبود ببخشد. بنابراین اتخاذ یک روش سیستماتیک در توسعه مدل های عصبی با در نظر گرفتن فاکتورهای مانند پیش پردازش داده ها، تعیین ورودی های مدل و معماری مناسب شبکه، بهینه سازی پارامترهای داخلی شبکه و تأیید مدل ضروری به نظر می رسد.

۲- مراحل توسعه مدل های مبتنی بر شبکه های عصبی

مراحل توسعه مدل های عصبی برای افزایش کارایی چنین مدل هایی به صورت گام به گام در بخش های زیر توضیح داده شده است.

۱-۲- انتخاب معیار عملکرد

در شروع فرآیندهای ساخت هر نوع مدل، تعریف معیارهایی که عملکرد مدل با آنها سنجیده شود خیلی مهم است. بطوری که این معیارها می توانند اثر معنی داری در معماری مدل و انتخاب تکنیک های وزن بهینه شبکه داشته باشند. در اکثر کاربردها، معیارهای عملکرد شامل یک یا چندین پارامتر زیر می باشد:

- دقت پیش بینی

- سرعت آموزش

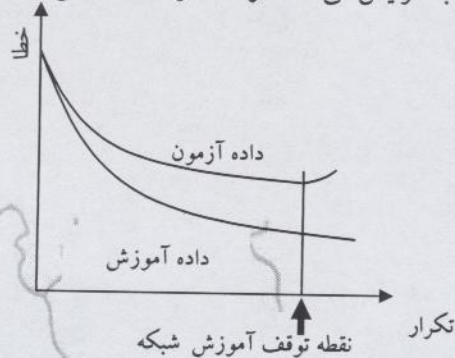
- زمان تأخیر بین نمایش ورودی ها و دریافت خروجی های متناظر با آن برای یک شبکه آموزش دیده.

دقت پیش بینی تابعی از الگوریتم بهینه سازی بوده و معمولاً دقت پیش بینی را به وسیله ارائه داده هایی که شبکه قبلاً با آن مواجه نشده است، مورد ارزیابی قرار می دهند که به توانایی تعمیم شبکه معروف می باشد. زمان لازم برای آموزش یک شبکه به نوع مسأله بستگی داشته بطوری که شبکه های بزرگتر معمولاً به وزنهای تصحیح شده کمتری برای یافتن یک راه حل قابل قبول نسبت به شبکه های کوچکتر دارند، هر چند زمان صرف شده برای انجام تصحیح یک وزن در این نوع شبکه ها افزایش می یابد. زمان تأخیر بین نمایش ورودی ها دریافت خروجی های متناظر با آن تابعی از سرعت پردازش است.

۲-۲- تقسیم بندی داده ها

در عمل معمولاً داده های موجود را به دو قسمت مجموعه آموزشی و مجموعه تأیید مستقل تقسیم می کنند. بطوری که مجموعه های آموزش و تأیید باید معرف جمعیت یکسان باشند. در طی آموزش شبکه، خطای بین مقادیر خروجی مطلوب و خروجی واقعی اندازه گیری می شود و هدف نیز کاهش این خطا با تنظیم وزنهاست. ولی با آموزش زیادی شبکه امکان اینکه شبکه دچار بیش برآش شود افزایش می یابد برای رفع این مشکل معمولاً داده های موجود را به سه قسمت آموزش، آزمون و تأیید تقسیم می کنند. همانطور که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است با آموزش شبکه، خطای مجموعه آموزش و آزمون نیز کاهش می یابد ولی در مرحله ای از آموزش خطای داده آزمون شروع به افزایش می کند و شبکه شروع به برآش زیادی می کند. حال اگر آموزش

در نقطه‌ای که خطای داده آزمون شروع به افزایش می‌کند متوقف شود آن گاه می‌توان از آموزش زیادی شبکه اجتناب کرد.



شکل (۱-۱) خطا در مجموعه های آموزش و آزمون در حین آموزش

۳-۲- پیش پردازش داده‌ها

در فرآیندهای توسعه هر مدل، آگاهی از وضعیت داده‌های موجود مهمترین گزینه می‌باشد. این شرایط در مدل‌های ANN بیشتر مشهود بوده، بطوری که پیش پردازش داده‌ها می‌تواند اثر مهمی در عملکرد مدل داشته باشد. به منظور اطمینان از اینکه همه متغیرها در طی فرآیند آموزش دقت مساوی دریافت کرده باشند باید داده‌های موجود نرمال سازی شوند. همچنین متغیرها باید طوری مقیاس بندی شوند که متناسب با محدوده تابع فعالیت به کار رفته در لایه خروجی باشند [۲].

۴-۲- تعیین ورودی‌های مدل

در هر نوع از مدل‌های پیش بینی / پیشگویی، انتخاب ورودی‌های مناسب مدل خیلی مهم می‌باشد. هرچند در اکثر کاربردهای ANN توجه کمی به این گزینه شده است. دلیل اصلی برای این امر این است که شبکه‌های عصبی مصنوعی متعلق به گروهی از روشهای Data Driven هستند در صورتی که روش‌های آماری معمول متعلق به گروه Model Driven هستند. در روش Model Driven قبل از اینکه پارامترهای نامعلوم مدل را بتوان تخمین زد باید ساختار مدل اول تعیین شده باشد که این کار به کمک روشهای تحلیلی یا تجربی انجام می‌شود. در حالیکه روشهای Data Driven توانایی تعیین بحرانی بودن داده‌های ورودی را دارند، بنابراین نیازی به "استدلال از قبل درباره روابط بین متغیرها" نمی‌باشد.

برای تعیین ورودی‌های مناسب در مدل‌های ANN چند متغیره، اولین گام انتخاب متغیرهای ورودی مناسب است. انتخاب متغیرهای ورودی مناسب معمولاً بر مبنای دانش قبلی از متغیرها صورت می‌گیرد اگر از رابطه به دست آمده بین متغیرها بر مبنای دانش قبل درک کمی حاصل شود می‌توان از روشهای تحلیلی نظیر آنالیزهای Cross-Correlation برای به دست آوردن روابط بین متغیرها استفاده نمود. روش دیگر برای مدل‌های ANN چند متغیره این است که برای هر متغیر ورودی، شبکه جداگانه آموزش داده شده، سپس بهترین عملکرد شبکه را در نظر گرفته و اثر افزایش هر یک از متغیرهای باقیمانده بر روی عملکرد شبکه بررسی شود فرآیند فوق برای سه، چهار، پنج و ... از متغیرهای ورودی تکرار می‌شود تا زمانی که افزایش متغیرهای اضافی بهبود معنی داری

در عملکرد مدل نداشته باشد. بعد از انتخاب متغیرهای ورودی مناسب مدل، گام بعدی تعیین تأخیرهای مناسب برای هر یک از ورودیها می باشد [۲].

۲-۵- تعیین معماری شبکه

معماری شبکه تعداد وزنه‌های ارتباطی (پارامترهای آزاد) و جهت اطلاعات در داخل شبکه را تعیین می کند. تعیین معماری شبکه مناسب یکی از مهمترین - هر چند یکی از سخت ترین - مرحله در فرآیندهای ساخت مدل‌های عصبی می باشد. تعیین معماری شبکه شامل تعیین نوع ارتباط و درجه ارتباطی شبکه و توپولوژی شبکه می باشد. از نظر نوع ارتباط شبکه‌ها شامل دو نوع پیشخور و پسخور تقسیم بوده که شبکه‌های پیشخور نیازمند سیستم‌های پویا هستند تا به طور صریح رفتار آنها نمایان شود که این امر بوسیله در نظر گرفتن ورودی‌های تأخیردار به دست می آید برخلاف، شبکه‌های پسخور می توانند خصوصیات پویا را به طور ضمنی مدل کنند که این امر با استفاده از ذخیره رویدادهای ورودی قبل در رابطه‌های بازخورد بدست می آید [۲]. تعیین توپولوژی شبکه بوسیله تعیین تعداد لایه‌های پنهان و انتخاب تعداد گره‌ها در هر یک از لایه‌ها انجام می شود و برای تعیین آن بهتر است برخی از خصوصیات شبکه‌های بزرگ و کوچک در نظر گرفته شود. توپولوژی شبکه بشدت به نوع مسأله بستگی داشته همچنان به روش سنتی آزمون و خطا تعیین می شود.

۲-۶- بهینه سازی (آموزش)

فرآیند بهینه سازی وزنه‌های ارتباطی به عنوان آموزش شبکه شناخته می شود. فرآیند بهینه سازی معادل با فاز تخمین در مدل‌های آماری مرسوم است. هدف از بهینه سازی یک شبکه پیدا کردن یک راه حل برای مسائل بشدت غیر خطی می باشد بنابراین تئوری بهینه سازی غیرخطی را می توان برای آموزش شبکه‌های پیشخور استفاده کرد. بهینه سازی شبکه‌های عصبی را می توان به دو روش محلی و جهانی انجام داد. روشهای محلی خود شامل روشهای مرتبه اول و مرتبه دوم می باشند. روشهای مرتبه اول بر مبنای یک مدل خطی (کاهش گرادیان) بوده، در صورتی که روشهای مرتبه دوم بر مبنای مدل‌های درجه دوم (روش نیوتن) هستند. هر چند تکنیک‌های به کار رفته برای حداقل سازی مینیمم محلی در هر دو روش یکسان می باشد [۳].

الگوریتم پس انتشار خطا که بطور گسترده‌ای برای بهینه سازی شبکه‌های پیشخور استفاده می شود بر مبنای روش کاهش گرادیان می باشد. به منظور بهینه کردن عملکرد شبکه‌های پیشخور آموزش دیده با الگوریتم پس انتشار داشتن یک درک خوب از تاثیر اندازه گام در آموزش شبکه ضروری به نظر می رسد. اگر اندازه گامهای در نظر گرفته شده در فاصله وزن خیلی کوچک باشد آموزش به کندی صورت می گیرد همچنین احتمال اینکه شبکه در دام حداقل محلی در خطای سطح بیفتد نیز افزایش می یابد. حال اگر اندازه گام بزرگ در نظر گرفته شود ممکن است باعث ایجاد نوسان می گردد. بنابراین پیدا کردن یک اندازه گام مناسب که بتوان بین سرعت آموزش بالای شبکه و خطر واگرایی آن تعادل برقرار کرد سخت بوده و عمدتاً به نوع مسأله بستگی خواهد داشت.

۲-۷- تأیید

بعد از اتمام فاز آموزش شبکه، باید عملکرد شبکه آموزش دیده شده با یک مجموعه اطلاعات مستقل با استفاده از معیار انتخاب شده تأیید گردد. اگر تفاوت محسوسی در خطای بدست آمده از طریق آزمون شبکه با خطای بدست آمده از آموزش شبکه وجود داشته باشد احتمال اینکه اطلاعات مورد استفاده برای دو مجموعه معرف یک نمونه یکسان نبوده و یا اینکه مدل دچار بیش برازش شده باشد امکان پذیر است.

۳- مواد و روشها

در این قسمت ۵ مقاله برای بررسی مراحل مدل سازی گفته شده در صفحات قبل انتخاب شده است. مراحل مدل سازی مقالات بررسی شده شامل انتخاب معیار عملکرد، پیش پردازش و تقسیم داده‌ها، تعیین ورودی های مدل، انتخاب معماری شبکه، بهینه سازی وزنها و ارتباطی و تأیید شبکه می باشد. گزینه های اصلی انتخاب شده از مدل های بررسی شده بطور خلاصه در جداول (۱) و (۲) آورده شده است. بعضی از اطلاعات به دست آمده از بررسی مقالات، بطور واضح در مقالات وجود داشته و بعضی دیگر نیز از اطلاعات داده شده در مقاله استنباط شده است.

۴- بحث و نتایج

۴-۱- بررسی مقالات انتخاب شده

در تمام مقالات معیار عملکرد اصلی در نظر گرفته شده دقت پیش بینی شبکه بوده است. همچنین برای تمام مقالات از اطلاعات واقعی استفاده شده است. تقسیم بندی داده ها بطور کامل در اکثر مقالات انجام نشده است هر چند در تمام مقالات دو مجموعه آموزش و تأیید در نظر گرفته شده است. تقسیم بندی داده ها معمولاً به صورت اختیاری انجام شده و خصوصیات آماری مجموعه های اطلاعاتی مربوطه به ندرت در نظر گرفته شده است. پیش پردازش داده ها به طور خیلی ضعیفی در اکثر مقالات ارائه شده است. مقیاس بندی اطلاعات با توجه به محدوده تابع فعالیت استفاده شده در لایه خروجی تنها در ۱ مقاله از ۵ مقاله انجام شده است. در اکثر مقالات مورد بررسی متغیر های ورودی با استفاده از روش آزمون و خطا انتخاب شده است و در دو مقاله Nayak و همکاران (۲۰۰۴) [۴] و Thirumalajah و Deo (۱۹۹۸) [۵] به ترتیب از روش های دانش قبلی به همراه Cross-Correlation و دانش قبلی استفاده شده است. در تمام مقالات از شبکه های پیشخور استفاده شده است. نحوه ارتباط شبکه ها در اکثر مقالات بوضوح بیان نشده است اگر چه احتمالاً فرض بر این بوده است که اکثر شبکه ها کاملاً متصل به همدیگر هستند. در تمام مقالات از شبکه های با یک پنهان استفاده شده است و هیچ دلیلی برای تعیین تعداد لایه های پنهان مورد استفاده ارائه نشده است. همچنین تعداد بهینه گره های لایه پنهان بوسیله آزمون و خطا بدست آمده است. روابط بین تعداد نمونه های آموزشی و تعداد وزن های ارتباطی برای جلوگیری از بیش برازش شبکه در هیچ کدام از مقالات بررسی نشده است و در تمام مقالات بجز مقاله Daliakopoulos و همکاران (۲۰۰۴) [۶] از الگوریتم آموزش پس انتشار خطا استفاده شده است و در مقاله

مذکور نیز از الگوریتم Levenberg Marquardt استفاده شده است. در مقالاتی که از الگوریتم پس انتشار برای آموزش شبکه استفاده شده است دلیلی برای این انتخاب معمولاً ارائه نشده است. هر چند بدلیل اینکه دقت پیش بینی در اکثر مقالات به عنوان معیار عملکرد در نظر گرفته شده است استفاده از الگوریتم پس انتشار منطقی به نظر می رسد.

جدول (۱) جزئیات مقالات بررسی شده

آمار		اطلاعات پیش زمینه						
تعداد نمونه های آزمون	تعداد نمونه های آموزشی	محدوده نرمال سازی	روش داده ها	دوره زمان	مکان (ها)	متغیر	مؤلفان	ردیف
۲۹۵	۸۰۰	-۰/۵-+۰/۵	واقعی	+۱ و +۲ روزانه	رودخانه Godavari (هند)	سطح آب	Thirumalaiah and Deo,1998	۱
۱۸۰ و ۱۸۰ و ۲۵۲	۱۲۶۰ و ۴۲۰ و ۵۸۸	۴	واقعی	+۳ ماهانه	Gondo دشت (پورکینافاسو)	سطح آب زیرزمینی	Culibaly et al.,2001	۲
دوره ۷۱ روزه	۱۵۰۰	۴	واقعی	۰ ماهانه	Tampa خلیج (فلوریدای امریکا)	سطح آب زیرزمینی	Coppolu et al.,2002	۳
۲۴۰ و ۱۹۲	۷۲۰ و ۵۷۶	۴	واقعی	+۶ ماهانه	Godavari Delta System (هند)	سطح آب زیرزمینی	Nayak et al.,2004	۴
۴۸۰	۱۹۲۰	۴	واقعی	+۱۸ ماهانه	دشت Mesara Crete (یونان)	سطح آب زیرزمینی	Daliakopoulos et al.,2004	۵

جدول (۲) جزئیات مقالات بررسی شده

مجموعه توقف	الگوریتم بهینه سازی						معماری شبکه			ردیف	
	وزن های اولیه	اندازه اپاک (Epoch)	موتیم	سرعت یادگیری	تابع ضابط	روش بدست آوردن پارامتر های داخلی	روش بهینه سازی	ساختار شبکه I-H1-H2-O	روش تعیین هندسه شبکه		نوع ارتباط
نکته آموزش	-۰/۵، +۰/۵	مجموعه آموزش	۰/۲	۰/۱	مکلی	آموزش و تست	BP	۱-۲-۱-۱	آموزش و تست	FF	۱
نکته آموزش	۰	۰	۰	۰	۰	آموزش و تست	BP	۵-۳-۱-۱	آموزش و تست	FF	۲
نکته آموزش	۰	۰	۰	۰	میگرید	آموزش و تست	BP	۲۵-۱-۲-۱-۱	آموزش و تست	FF	۳
نکته آموزش	۰	۰	متغیر	متغیر	میگرید	آموزش و تست و Cross-Validation	BP	۲-۳-۱-۱ ۱-۲-۱-۱	آموزش و تست	FF	۴
نکته آموزش	۰	۰	۰	۰	۰	آموزش و تست	LM	۲۰-۳-۱-۱	آموزش و تست	FF	۵

Levenberg Marquardt LM ، (Backpropagation algorithm) BP ، (Feed Forward network) FF

۴- نتیجه گیری

شبکه های عصبی مصنوعی به طور فزاینده ای برای پیش بینی و پیشگویی پارامترهای منابع آب در حال استفاده می باشد. در مقالات در نظر گرفته شده توصیف خوبی از تئوری ANN و منطقه مورد مطالعه و نتایج حاصل از کاربرد ANNs ارائه شده است ولی با این وجود در اکثر آنها به طور ضعیفی درباره فرآیند مدل سازی بحث شده است البته این بدین معنی نیست که فرآیند مدل سازی به طور صحیحی انجام نشده است بلکه می توان گفت که چنین اطلاعاتی به صورت واضح در مقالات ارائه نشده است و

در اکثر آنها به جای تمرکز بر روش مدل سازی، استفاده از ANNs برای کاربرد در پیش بینی و پیشگویی پارامترهای منابع آب مدنظر بوده است. بنابراین در این صورت درباره بهینه بودن نتایج به دست آمده نیز نمی توان ارزیابی دقیقی انجام داد. دلایل فرآیند مدل سازی نادرست می تواند ناشی از (۱) استفاده از اطلاعات مجموعه تأیید در طی فرآیند آموزش و استفاده آنها در بهینه سازی پارامترهای شبکه، (۲) انتخاب اختیاری ورودیهای مدل، معماری شبکه و پارامترهای داخلی مدل، (۳) مقیاس بندی نادرست اطلاعات ورودی با توجه با تابع فعالیت استفاده شده در لایه خروجی باشد. همچنین توجه کامل به اثرات پیش پردازش داده ها، ورودیهای مدل، معماری شبکه، الگوریتم بهینه سازی و معیار توقف در فرآیند مدل سازی ضروری به نظر می رسد. با توجه به مطالب بالا می توان گفت که هیچ گونه بحثی درباره سودمند بودن ANNs به عنوان یک ابزار قوی برای پیش بینی و پیشگویی پارامترهای منابع آب وجود ندارد ولی به منظور دست یافتن به نتایج خوب در حیطه منابع آب لازم است راهکارهایی برای نحوه استفاده از ANNs اندیشیده شود از جمله اینکه متخصصان منابع آب دفترچه های راهنمایی برای نحوه استفاده از هر یک مدل های ANNs ارائه دهند تا کاربران این گونه مدل ها بتوانند با دید بازتری از آنها استفاده کنند.

مراجع

- [1] Hasson, M.H., 1995. "Fundamentals of Artificial Neural Networks". MTT press, Cambridge.
- [2] Maier, H.R. and Dandy, G.C., 1999. "Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modeling issues and applications". Environmental Modeling & Software, 15(2000), 101-124.
- [3] Battiti, R., 1992. "First and Second order methods for learning: Between steepest descent and Newton's method". Neural Computation 4, 141-166.
- [4] Nayak, P., Satyajai Rao, Y. R., and Sudheer, K. P., 2000. "Groundwater level forecasting in a shallow aquifer using artificial neural network approach". Water Resources Management, 2(1), 77-99.
- [5] Thirumalaiah, K., Deo, M.C., 1998b. "River stage forecasting using artificial neural networks". Journal of Hydrologic Engineering 3 (1), 26-32.
- [6] Daliakopoulos, Ioannis N., Coulibaly, P. and Tsanis, Ioannis K., 2004. "Groundwater level forecasting using artificial neural networks". Journal of Hydrology. 309(4), 229-240.
- [7] Bienenstock, E., Geman, S., 1994. "Comment on Neuran networks: A review from a statistical perspective by B. cheng and D.M. Titterton". Statistical Science 9(1), 36-38.
- [8] Coulibaly, P., Ancil, F., Aravena, R. and Bernard B., 2001. "Artificial neural network modeling of water table depth fluctuations". Journal of Hydrology. 307(4), 92-111.
- [9] Coppola Jr, M., Szidarovszky, F., Poulton, M. and Charles, E., 2003. "Artificial neural network approach for predicting transient water levels in a multilayered groundwater system under variable state, pumping, and climate conditions". Journal of Hydrologic Engineering. 8(6), 348-360.