مجله هیدرولیک
دوره ۳، شماره ۱، بهار ۱۳۸۷

شبیه‌سازی، تحلیل حساسیت و عدم قطعیت تغییرات تراز آب دریاچه ارومیه نسبت به مؤلفه‌های بیلان آبی آن

مجید دلاور[۱]، سعید مرید[۲*]، مهدی شفیعی‌فر[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس
۲- دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
۳- دانشیار بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

*** تهران، صندوق پستی ۳۳۶-۱۴۱۱۵**
morid_sa@modares.ac.ir

چکیده- دریاچه ارومیه به‌عنوان یکی از بزرگترین دریاچه‌های ایران، تخلیه‌گاه و مقصد نهایی مجموعه‌ای از رودخانه‌های شمال غرب کشور است. با توجه به تغییرات زیاد بارندگی و همچنین وقوع خشکسالی‌ها و سالهای پر آبی در حوضه این دریاچه، تراز آن نوسانات و تغییرات زیادی دارد. آگاهی از این نوسانات در بررسی مسائل مرتبط، از جمله ریسک‌پذیری تأسیسات و سازه‌های وابسته، تغییرات ذخیره آبی دریاچه، ساخت و سازهای ساحلی و محیط زیست اهمیت دارد و با توجه به تصادفی بودن فرایند حاکم، بررسی عدم قطعیت، بر دقت تحلیلها خواهد افزود.

هدف اصلی این تحقیق، شبیه‌سازی نوسانات و تراز ماهیانه دریاچه ارومیه است. لذا سعی شده است با استفاده از روشهای مختلفی مانند معادله بیلان آبی دریاچه، معادله همبستگی چندگانه و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs)، شبیه‌سازی نوسانات دریاچه بررسی شود. بدین منظور از داده‌های ماهیانه مؤلفه‌های مؤثر بر بیلان دریاچه از قبیل دبی ورودی، بارندگی متوسط و تبخیر متوسط از سطح آزاد آب استفاده شده است. به‌منظور بررسی قابلیت روشهای به‌کاررفته در شبیه‌سازی نوسانات تراز آب از تحلیل‌های عدم‌قطعیت و حساسیت استفاده شد. نتایج مطالعات حاکی از آن است که مدل شبکه عصبی با کاربرد همزمان دبی تجمعی ورودی، بارندگی ماهیانه و تبخیر ماهیانه، بهترین دقت و کمترین حساسیت را در شبیه سازی نوسانات و تراز آب دریاچه دارد و عدم قطعیت نتایج حاصل از آن دارای دامنه بیشتری است.

کلید واژگان: شبیه‌سازی، دریاچه ارومیه، بیلان آبی، شبکه عصبی، عدم قطعیت، حساسیت.

۱- مقدمه

مطالعه نوسانات تراز آب دریاچه‌ها از گذشته‌ای دور مورد توجه متخصصان و دانشمندان علوم مختلف بوده است. تحقیقات و مطالعاتی مانند تعیین خط ساخت و ساز ساحلی، پیش‌بینی حمل رسوب، پتانسیل فرسایش سواحل و تعیین حجم آب موجود در دریاچه‌ها به شکلی متأثر از آن است. این عامل نسبت به اقلیم و عاملهای مرتبط با آن یا برخورد لایه‌های تکتونیکی واکنش معنا داری نشان می‌دهد (Harrison, 1989). اما بیشتر مطالعات انجام شده در زمینه بررسی و مدل‌سازی نوسانات دریاچه‌ها به تفسیر تغییرات تراز آب آنها با توجه به پارامترهای اقلیمی منطقه معطوف بوده است.

در تحقیقی که با هدف بررسی علل کاهش تراز آب دریاچه های بسته کیلاملبت[1] و گنترک[2] در غرب استرالیا انجام شد، نحوه تغییرات تراز نسبت به بارندگی، تبخیر و دبی ورودی بررسی شد. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که مهمترین علت پایین افتادگی تراز آب دریاچه‌ها، کاهش نسبت بارندگی به تبخیر از سال ۱۸۴۰ بوده است. بررسی زمان رسیدن به تعادل دوباره تراز دریاچه‌ها در این تحقیق نیز دلالت بر تأثیرپذیری بیشتر زمان و میزان تغییرات تراز نسبت به بارندگی بر سطح حوضه دارد (Jose, 1999). به همین ترتیب نتایج مطالعه انجام شده بر روی دریاچه بیکال[3] در سیبری جنوبی حاکی از آن است که در دورانهای گرم منطقه، تراز آب دریاچه بالا بوده و در دوران سرد افت قابل ملاحظه ای داشته و این امر ناشی از ورود حجم بیشتری از آب در دوران گرم بوده است (Astush et al., 2004). Kebede نیز بودجه آبی دریاچه تانا[4] در اتیوپی را بر اثر تغییرات بارندگی و تبخیر از سطح دریاچه و همچنین میزان جریان خروجی و ورودی به دریاچه تعیین و بر اساس معادله بیلان آبی دریاچه، میزان تغییر تراز آب را شبیه‌سازی کردند. در این مطالعه حساسیت[5] تراز آب نسبت به عاملهایی مانند بارندگی، حجم جریان ورودی و خروجی و جریان زیر زمینی بررسی شد که حاکی از حساسیت بسیار زیاد تغییرات تراز آب نسبت به حجم جریان ورودی و خروجی و اثر اندک سایر عوامل بود. در ادامه نیز این محققان، بررسی دیگری را بر روی منحنی تعادلی دریاچه با توجه به کاهش متغیرهایی مانند دبی ورودی وخروجی و بارندگی انجام دادند. در این کار با استفاده از روشی موسوم به روش گرافیکی[6] رفتار تراز دریاچه با توجه به نرخهای متفاوت کاهش متغیرهای ذکرشده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (Jones et al., 2001).

به علت ماهیت تصادفی پدیده‌های طبیعی و نیز گستردگی عوامل تأثیرگذار و نامعلوم، نتایج حاصل از مطالعات تراز آب دریاچه ها همواره با نوعی شک و تردید همراه بوده و آنها را باید همراه با مقداری تغییر تصادفی در نظر گرفت که به آن عدم قطعیت نتایج گفته می‌شود (Eckhardt et al., 2003). بنابراین آگاهی از میزان عدم قطعیت می‌تواند در کاربرد نتایج تحقیقات مربوط سودمند باشد.

از میان مطالعات انجام شده در این زمینه می توان به تحقیق Vrijling et al. (1999) اشاره کرد که به بررسی تأثیر عدم قطعیت تراز آب بر طراحی آب‌بندهای محافظ سیل بر روی دریاچه ایجسل[7] در هلند پرداختند. در این مطالعه، میزان عدم قطعیت مربوط به تغییرات تراز آب با توجه به عوامل تأثیرگذار مانند سرعت باد و ارتفاع امواج برآورد شد (Vrijling et al., 1999).

تحقیق حاضر تلاشی است برای شبیه‌سازی نوسانات تراز آب دریاچه ارومیه با توجه به عوامل مؤثر در بیلان آبی که در آن قابلیت روشهای معادله بیلان آبی، همبستگی چندگانه و شبکه عصبی مصنوعی ارزیابی شده است. همچنین در این مطالعه عدم قطعیت نتایج روشهای فوق وحساسیت تغییرات تراز محاسباتی نسبت به پارامترهای مؤثر بررسی و در نهایت حساسیت زمانی دریاچه برای رسیدن به یک تراز پایدار با توجه به سناریوهای مختلف کاهش دبی ورودی به دریاچه ارزیابی شد.

۲- مواد و روشها

۲-۱- منطقه مطالعه

دریاچه ارومیه با وسعتی در حدود ۵۷۵۰ کیلومتر مربع در شمال غربی ایران در استان آذربایجان غربی و در نزدیکی شهر ارومیه واقع شده است. تراز کف دریاچه ۱۲۶۸ متر و تراز متوسط سطح آب دریاچه ۱۲۷۶/۲ بوده و دامنه نوسان از ۱۲۷۴/۱۳ تا ۱۲۷۸/۴ متر از سطح دریا در ۳۰

1. Keilamlbete
2. Gnetuk
3. Bikal
4. Tana
5. Sensitivity
6. Graphical Approach
7. Ijssel

سال اخیر متغیر بوده است. زمینهای اطراف دریاچه بسیار کم شیب بوده و بخشهایی از آن در فصل بهار به زیر آب می‌روند. این دریاچه سیستم بسته‌ای است که مجموعه‌ای از رودخانه‌ها که بزرگترین آنها زرینه رود است به آن تخلیه می‌شوند (صدرا، ۱۳۸۲). در شکل ۱ موقعیت دریاچه همراه حوضه‌های آبریز تغذیه کننده آن نشان داده شده است.

با توجه به اهداف تحقیق، آمار و اطلاعات مورد نیاز شامل دبی رودخانه‌های ورودی، بارندگی و تبخیر در دوره آماری ۵۱-۱۳۵۰ تا ۱۳۷۹-۱۳۷۸ از ایستگاههای منطقه جمع‌آوری شد. در انتخاب ایستگاهها سعی شد حتی‌الامکان از تمامی ایستگاههای هیدرومتری منطقه که ورودی‌های دریاچه را شامل می‌شوند و همچنین ایستگاههای بارانسنجی و تبخیرسنجی که مبین شرایط اقلیمی دریاچه هستند، استفاده شود.

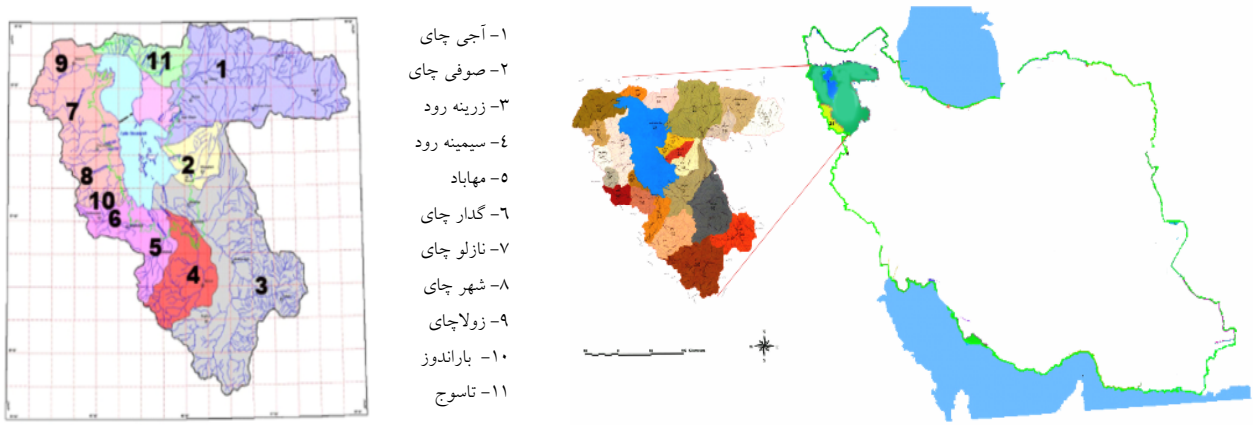
نواقص آماری موجود در داده‌های مربوط، با استفاده از روشهای همبستگی تکمیل شد. همچنین به منظور برآورد تبخیر از سطح با استفاده از داده‌های تشتک تبخیر، از عدد ۰/۷ به‌عنوان ضریب اصلاح کننده داده‌ها استفاده شد. اطلاعات مربوط به تغییرات ماهیانه تراز دریاچه از ایستگاه بندر گلمانخانه متعلق به سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی (مطمئن‌ترین و مجهزترین ایستگاه برای مطالعه تغییرات تراز آب دریاچه) برای سالهای ۱۳۴۵ تا ۱۳۸۳ تهیه و استفاده شد.

۲-۲- شبیه‌سازی نوسانات ماهیانه دریاچه با استفاده از معادله بیلان آبی

ساده‌ترین روش برای شبیه‌سازی تغییرات تراز آب، استفاده از معادله بیلان آبی دریاچه است. معادله مربوط به تغییرات تراز آب دریاچه به روش بیلان آبی با توجه به پارامترهای مؤثر بر چرخه آبی به‌صورت زیر بیان می‌شود (لازم است ذکر شود که به علت بالا بودن تراز آب سفره های آب زیرزمینی اطراف دریاچه امکان نفوذ آن به این سفره‌ها درعمل ناچیز و قابل صرف‌نظر است (صدرا، ۱۳۸۲ و آب نیرو، ۱۳۷۱):

$$\Delta H = P(t) - E(t) + 0.001.(\frac{R_{in}(t)}{A(H)}) \qquad (۱)$$

که درآن ΔH تغییرات تراز آب دریاچه نسبت به ماه قبل (mm)، $P(t)$ ارتفاع معادل بارش بر روی سطح دریاچه در ماه t (mm)، $E(t)$ ارتفاع معادل تبخیر از سطح دریاچه در ماه t (mm)، $R_{in}(t)$ حجم جریان ورودی دریاچه در ماه t (m^3) و $A(H)$ مساحت دریاچه در تراز متوسط ماهیانه (میانگین تراز دریاچه در ابتدا و انتهای ماه مورد نظر) (km^2) است.



شکل ۱ موقعیت دریاچه ارومیه و زیر حوضه های تغذیه کننده آن

در این روش با استفاده از آمار ماهیانه پارامترهای ذکر شده در دوره آماری ۱۳۷۹-۱۳۵۰ تغییرات تراز در هر ماه برآورد شده و سپس با در نظر گرفتن تراز متوسط آب دریاچه در ماه اول دوره شبیه‌سازی (مهرماه سال ۱۳۵۰) به عنوان مبنا ،تراز در ماههای بعدی محاسبه می‌شود.

۲-۳- شبیه‌سازی نوسانات ماهیانه دریاچه با استفاده از معادله همبستگی چندگانه

در این بخش، تغییرات تراز آب دریاچه بر اساس روش همبستگی چندگانه و با فرض اینکه تغییرات تراز دریاچه به طور مستقل با ترکیب خطی مؤلفه‌های سه‌گانه اصلی بیلان مرتبط است، شبیه‌سازی می‌شود. در این روش ضرایب مؤلفه‌های مؤثر لزوما مانند معادله ساده بیلان برابر یک نیستند. بدین ترتیب معادله تغییرات تراز آب به صورت زیر خواهد بود:

$$\Delta H = 1.242Q_t + 2.136P_t - 0.824E_t - 32.14 \quad (۲)$$

که در آن Q_t ارتفاع معادل حجم جریان ورودی به دریاچه در ماه t (mm)، می‌باشد.

۲-۴- شبیه‌سازی نوسانات ماهیانه دریاچه با استفاده از شبکهٔ عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مدل‌هایی محاسباتی هستند که می‌توانند رابطه ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم فیزیکی را توسط شبکه‌ای از گره‌ها (نرونها) که همگی متصل هستند، تعیین کنند. میزان فعالیت هر یک از این اتصالات در فرایند یادگیری تنظیم می‌شود و پس از آن، مدل می‌تواند قوانین و روابط میان خروجی‌ها- ورودیها را کشف کند، حتی اگر این قوانین غیرخطی و پیچیده باشند (Hykin, 1994). برای این منظور روشهای مختلفی وجود دارد که در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی تراز آب دریاچه ارومیه از شبکه عصبی پیشرو[1] و الگوی آموزش انتشار برگشتی[2] استفاده شده است. برای این مطالعه، شبکه‌های عصبی به دو شکل به کار برده شده: الف) شبیه‌سازی مستقیم تراز آب (L_t)، ب) شبیه‌سازی تغییرات تراز هر ماه نسبت به ماه قبل (ΔL_t) و محاسبه تراز آب ماهیانه با در نظر گرفتن تراز متوسط ماه قبل از دوره شبیه‌سازی به عنوان مبنای محاسبات. برای رسیدن به بهترین نتایج، مدل‌های ورودی متنوعی از شبکه‌های عصبی تعریف شد که تعدادی از آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

در این روابط L_t تراز دریاچه در ماه t بر حسب متر، ΔL_t تغییرات تراز دریاچه ماه t نسبت به ماه قبل بر حسب میلیمتر است.

در ادامه، ۷۰ درصد دوره آماری موجود برای آموزش و ۳۰ درصد باقی‌مانده برای مرحله صحت‌یابی استفاده شده است. در جدول ۲ نتایج مدل‌های ورودی (جدول ۱) را برای معماری‌های برگزیده و بر اساس معیارهای ضریب همبستگی (R^2)، ریشه میانگین مجذور خطا (RMSE)، متوسط قدر مطلق خطا (MAE) و مجموع مربعات خطا (SSE) نشان می‌دهد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود مدل‌های شبیه‌سازی تغییرات تراز آب (ΔL_t) عملکرد بسیار بهتری نسبت به مدلهای شبیه‌سازی تراز آب (L_t) دارند. در این مدل‌ها با اضافه شدن همزمان دبی، تبخیر و بارندگی هر ماه به‌عنوان ورودی، عملکرد شبکه بهبود می‌یابد. در مرحله محاسبه تراز آب دریاچه ،مدل‌های ۱۰، ۶ و ۴ با ضریب همبستگی کلی ۹۰٪ ، ۸۶٪ و ۸۱٪ مناسب‌ترین مدل‌ها برای شبیه‌سازی تراز آب است.

۲-۵- تحلیل عدم قطعیت مدل‌ها

پارامترهای به‌کار رفته در مدلهای شبیه‌سازی تراز آب، ناشی از وجود عواملی مانند خطاهای اندازه‌گیری، ماهیت تصادفی پارامترهای آنها، خطاهای تخمین داده‌ها و مدلسازی می‌باشند و همواره با نوعی عدم قطعیت همراه هستند و لذا کاربرد

1. Feed-forward neural networks
2. Back prorogation

مدل‌های مذکور مستلزم داشتن اطلاعاتی در بارهٔ عدم قعطیت آنها با توجه به عدم قطعیت پارامترهای ورودی بوده و تنها بدین وسیله است که اطمینان و اعتماد بیشتری در خصوص تصمیم‌گیری‌های ناشی از کاربرد این معادلات حاصل می‌شود (Hope et al., 2004). یکی از مهمترین روشهای تحلیل عدم قطعیت، شبیه‌سازی مونت کارلو است. اساس تحلیل عدم قطعیت در این روش، تولید اعداد تصادفی است؛ هر متغیر با استفاده از اعداد تصادفی تولید شده و تابع توزیع احتمال مربوط به آن، شبیه‌سازی و سپس متناظر با آنها، خروجی هر مدل یا معادله محاسبه می‌شود. این کار بارها تکرار شده وسپس با استفاده از داده‌های خروجی تولید شده به تجزیه و تحلیل عدم قطعیت مدل انجام می‌شود.

جدول ۱ مدل‌های به‌کاررفته در شبیه‌سازی تراز آب دریاچه ارومیه با استفاده از شبکه عصبی

مدل ۱	$L_t = f(Q_t)$	مدل ۷	$\Delta L_t = f(Q_t, E_t)$	مدل ۱۳	$L_t = f(Q_{t-2}, P_{t-2}, E_{t-2})$
مدل ۲	$\Delta L_t = f(Q_t)$	مدل ۸	$\Delta L_t = f(P_t, E_t)$	مدل ۱۴	$\Delta L_t = f(Q_{t-2}, P_{t-2}, E_{t-2})$
مدل ۳	$L_t = f(Q_t, P_t)$	مدل ۹	$L_t = f(Q_t, P_t, E_t)$	مدل ۱۵	$L_t = f(Q_{t-3}, P_{t-3}, E_{t-3})$
مدل ۴	$\Delta L_t = f(Q_t, P_t)$	مدل ۱۰	$\Delta L_t = f(Q_t, P_t, E_t)$	مدل ۱۶	$\Delta L_t = f(Q_{t-3}, P_{t-3}, E_{t-3})$
مدل ۵	$L_t = f(Q_t, E_t)$	مدل ۱۱	$L_t = f(Q_{t-1}, P_{t-1}, E_{t-1})$	مدل ۱۷	$L_t = f(Q_{t-12}, Q_t, P_{t-3}, E_{t-3})$
مدل ۶	$\Delta L_t = f(Q_t, E_t)$	مدل ۱۲	$\Delta L_t = f(Q_{t-1}, P_{t-1}, E_{t-1})$	مدل ۱۸	$L_t = f(Q_{t-12}, Q_{t-24}, Q_t, P_{t-3}, E_{t-3})$

جدول ۲ نتایج مدلهای ورودی برای شبیه‌سازی تراز و تغییرات تراز دریاچه ارومیه

شماره مدل ورودی	معماری	خروجی	آموزش			صحت یابی		
			R^2	RMSE	MAE	R^2	RMSE	MAE
۱	۱-۲-۱	L_t	۰/۱۸	۰/۳۹	۰/۳	۰/۰۷	۱/۷	۱/۰
۳	۲-۲-۱	L_t	۰/۳۸	۰/۳٤	۰/۳	۰/۱	۱/۸	۱/۰
۵	۲-۴-۱	L_t	۰/٤	۰/۳۹۳	۰/۳	۰/۱۲	۱/۸	۱/۱
۷	۲-۴-۱	L_t	۰/۳۸	۰/۳٤	۰/۳	۰/۰٤	۱/۸	۱/۱
۹	۳-۲-۱	L_t	۰/۳۷	۰/۳٤	۰/۳	۰/۱۵	۱/۸	۱/۱
۱۱	۳-۴-۱	L_t	۰/٤۵	۰/۳٦	۰/۳	۰/۱۱	۱/۸	۱/۰
۱۳	۳-۳-۱	L_t	۰/٤٦	۰/۳٤	۰/۳	۰/۰۵	۱/۷	۱/۰
۱۵	۳-۴-۱	L_t	۰/٤۵	۰/۳٦	۰/۳	۰/۲	۱/٦	۰/۹
۱۷	۳-۸-۸-۱	L_t	۰/٤٤	۰/۳۸	۰/٤	۰/۳۲	۲	۱/۳
۱۸	۳-۳-۱	L_t	۰/۳٤	7۸۷8	۵۹	۰/۱۹	۱۲۰	۹۲/۰
۲	۱-۲-۱	ΔL_t	۰/٦۵	۸٦/۸٦	۷۳/۸	۰/۷٦	۷۹/۳	٦۸/۰
۴	۲-۳-۱	ΔL_t	۰/۸۲	٦۲/٤٤	٤٦/۹	۰/۸۲	۷۹/۵	۵۸/۹
۶	۲-۳-۱	ΔL_t	۰/۸۳	٦۰/٦۳	٤۵/۱	۰/۸۳	۷۸/۷	۵۹/٤
۸	۲-۲-۲-۱	ΔL_t	۰/٦۵	۸٦/۹۱	٦۳/۳	۰/۵۹	۱۰۲/۵	۷۵/۱
۱۰	۳-۵-۳-۱	ΔL_t	۰/۹	٤٦/۳۱	۳٤	۰/۷۹	۸۲/۳	۵۷/۱
۱۲	۳-۴-۱	ΔL_t	۰/۸۷	۵۸/۷	٤۱/۷	۰/۸٤	٦۳/۱	٤۲/۸
۱۴	۳-۲-۲-۱	ΔL_t	۰/۷۲	۷٦/۱	۵۲/۲	۰/۷۹	۷۲/۵	٤۷/٦
۱۶	۳-۲-۱	ΔL_t	۰/٦۸	۸۲/۹۱	۵۷/۱	۰/۵٦	۱۰۹/۲	۷۸/۳

میزان عدم قطعیت پارامتر خروجی از طریق محاسبه شاخص‌های آماری (انحراف معیار، دامنه، ضریب تغییرات) یا تعیین تابع توزیع آن نمایش داده می‌شود (Skebede et al., 2005).

در این قسمت سعی می‌شود که عدم قعطیت هر مدل در تعیین متوسط تغییرات تراز آب در طی دوره شبیه‌سازی (۱۳۷۹-۱۳۵۰) به روش مونت کارلو محاسبه و مطالعه شود. به‌منظور بررسی عدم قعطیت مرتبط با هر مدل ابتدا لازم است مشخصات آماری مربوط به متغیرهای هر مدل محاسبه شود. بدین منظور برای هر پارامتر بهترین توزیع آماری به وسیله آزمون RSS[1] و با استفاده از آمار ماهیانه آنها تعیین شد که مناسبترین توزیع برای دبی و ارتفاع ورودیهای سطحی، توزیع گامای دو پارامتری و برای داده‌های تبخیر و بارندگی ماهیانه، توزیع لگ نرمال تشخیص داده شد. سپس به روش مونت کارلو و با استفاده از روشهای نمونه‌گیری تصادفی ساده[2] و مربع لاتین (LHS) به ترتیب ۱۰۰۰۰ و ۱۰۰۰ نمونه از هر متغیر تولید و تحلیل عدم قطعیت مدل‌های مربوطه انجام شد.

۲-۶- تحلیل حساسیت مدلها

به‌منظور بررسی سهم هر یک از پارامترها در عدم قطعیت تغییرات تراز سطح آب محاسبه شده توسط مدلها، از تحلیل حساسیت استفاده می‌شود. برای تحلیل حساسیت هر مدل نسبت به پارامترهای مؤثر در آن، از ضرایب حساسیت نرمال (β) استفاده می‌شود. برای استخراج این ضرایب، فرض می‌شود که همه پارامترها بر طبق تابع احتمال مربوط و در محدوده مجاز خود تغییر می‌کنند و سپس با استفاده از یکی از روشهای شبیه‌سازی پارامترها مانند روش مونت کارلو متغیرهای مربوطه به تعداد دفعات زیاد (حدود ۵۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰ بار) تولید و با استفاده از آنها در هر مرحله، خروجی مدل محاسبه می‌شود. پس از شبیه‌سازی سیستم، برازش چندگانه پارامتر خروجی بر حسب متغیرهای ورودی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$O = b_0 + b_1 p_1 + b_2 p_2 + \cdots + b_n p_n \qquad (۳)$$

که در آن b_i ضریب برازش، O متغیر خروجی مدل و p_i پارامتر ورودی i ام است. ضرایب b_i نشان‌دهنده شاخصهای غیر نرمال هر پارامتر است. برای محاسبه ضرایب حساسیت نرمال هر پارامتر از معادله زیر استفاده می‌شود:

$$\beta_i = b_i \frac{S_{pi}}{S_0} \qquad (۴)$$

که در آن S_0 انحراف معیار پارامترهای خروجی شبیه‌سازی شده، S_{P_i} انحراف معیار پارامتر ورودی i ام و β_i ضریب حساسیت نرمال پارامتر ورودی i ام است (Charles, 2002).

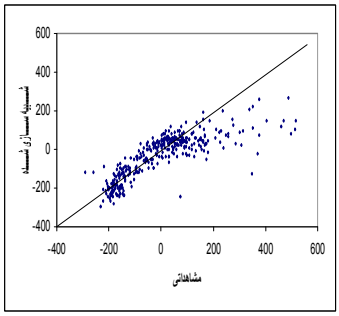
۳- نتایج

۳-۱- شبیه‌سازی تراز دریاچه

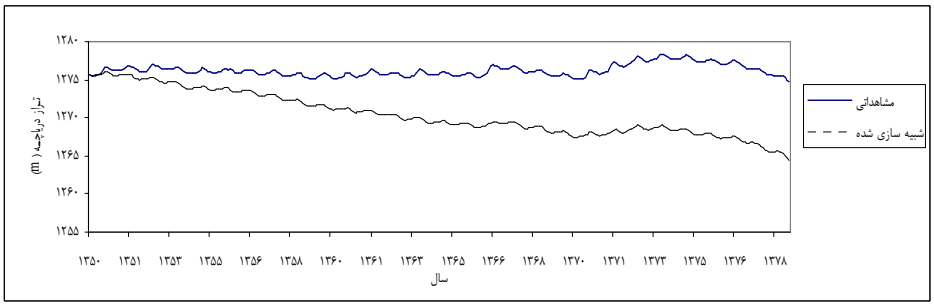
در شکل ۲ نتایج حاصل از شبیه‌سازی تراز ماهیانه دریاچه با استفاده از معادله بیلان آبی همراه با تراز واقعی آن نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تقریباً در تمامی دوره‌های شبیه‌سازی تراز محاسباتی کمتر از حالت واقعی آن است. بنابراین با وجود اینکه همبستگی مناسبی ($R^2 = 0.65$) بین تغییرات تراز واقعی و محاسباتی در روش مذکور وجود دارد، اما به علت ماهیت تجمعی خطاها برای تعیین تراز آب در طول دوره شبیه‌سازی -که به ناشی از عدم وجود اطلاعات کامل و جامع از اجزای معادله است- روش بیلان آبی با توجه به داده‌های موجود روش مناسبی ارزیابی نمی‌شود. لذا لازم است تصحیحاتی در آن به‌منظور تعدیل خطاها صورت گیرد که در بحث شبیه‌سازی تراز توسط روش برازش چندگانه و شبکه عصبی به این مهم پرداخته شده است.

شکل ۳ نتایج شبیه‌سازی شده تراز آب توسط معادله برازش چندگانه (معادله(۲)) و مقایسه آن با داده‌های واقعی را نشان می‌دهد. درشکل ۴ نیز تراز شبیه‌سازی شده دریاچه توسط مدل ۱۰ شبکه عصبی به‌عنوان برترین مدل با داده‌های مشاهده شده مقایسه شده است.

1. Residual Sum of Squares
2. Random

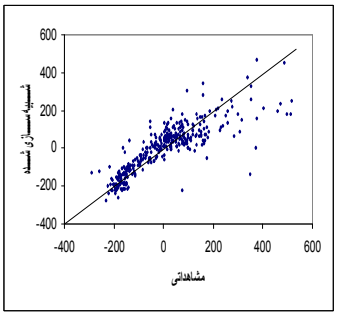


(الف)

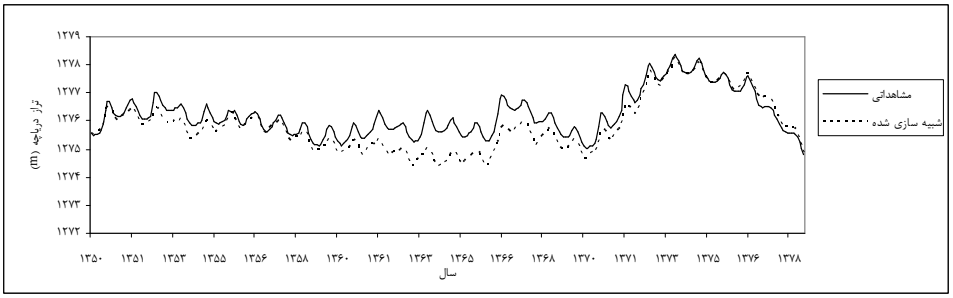


(ب)

شکل۲ الف- مقایسه تراز آب مشاهده شده و محاسبه شده توسط معادله بیلان آبی،
ب- نمودار همبستگی تغییرات تراز واقعی و مشاهده شده توسط معادله بیلان آبی



(الف)



(ب)

شکل۳ الف- مقایسه تراز آب مشاهده شده و محاسبه شده توسط معادله همبستگی چندگانه
ب- نمودار همبستگی بین تغییرات تراز واقعی ومحاسباتی توسط معادله (۲)

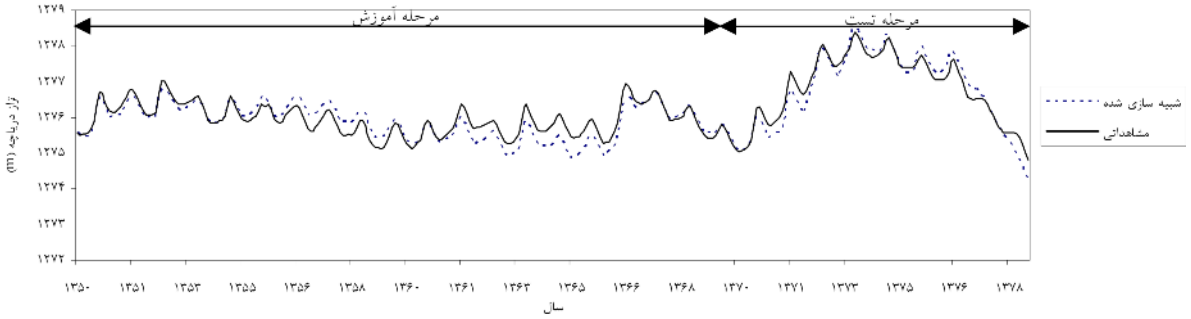
۳-۲- مقایسه دقت مدلها

برای ارزیابی قابلیت مدلهای مذکور در شبیه سازی تراز آب، میزان دقت آنها با استفاده از شاخصهای ضریب همبستگی (R^2)، ریشه میانگین مجذور خطا ($RMSE$) و متوسط قدر مطلق خطا (MAE) مقایسه شد (جدول ۳).

همان‌طور که ملاحظه می‌شود مدل شبکه عصبی و بیلان آبی به‌ترتیب بهترین و بدترین عملکرد را در زمینه شبیه‌سازی تراز و نوسانات ماهیانه دریاچه ارومیه داشته و مدل برازش چندگانه نیز در حد واسط مدلهای یاد شده قرار دارد.

۳-۳- تحلیل عدم قطعیت مدلها

به‌منظور تحلیل عدم‌قطعیت مدلهای شبیه‌سازی، مشخصات آماری نتایج خروجی هر مدل با استفاده از کاربرد نمونه‌های تولید شده به روش مونت‌کارلو بررسی شد که شرح مختصری از آنها در جدول ۴ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که با پیچیده شدن مدلها، انحراف معیار و عدم قطعیت نتایج حاصل از آنها نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۴ مقایسه نتایج حاصل از مدل ۱۰ در شبیه‌سازی تراز هرماه با داده‌های مشاهده شده در ایستگاه گلمانخانه

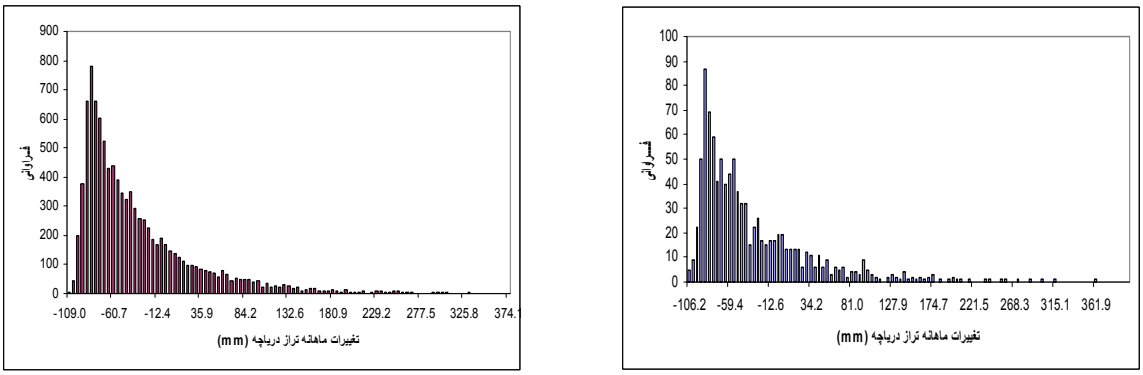
جدول ۳ مقایسه دقت مدلهای شبیه‌سازی نوسانات و تراز ماهیانه آب دریاچه ارومیه

متغیر محاسباتی	تغییرات تراز ماهیانه دریاچه (mm)			تراز ماهیانه دریاچه (m)		
شاخص	R^2	$RMSE$	MAE	R^2	$RMSE$	MAE
مدل بیلان آبی	۰/۶۵	۹۱/۵۵	۶۱/۲۵	۰/۰۱	۶/۵۲	۵/۷۷
مدل رگرسیون چندگانه	۰/۷۱	۷۷/۲۴	۵۳/۶	۰/۸۴	۰/۵۱	۰/۳۹
مدل شبکه عصبی (با مدل ورودی ۱۰)	۰/۸۴	۶۰/۹۴	۴۱/۸۱	۰/۹	۰/۲۶	۰/۲۲

جدول ۴ مقایسه مشخصات آماری نتایج مدلهای به‌کار رفته در برآورد تغییرات ماهیانه تراز آب پس از اعمال تحلیل مونت کارلو به روش تصادفی و مربع لاتین

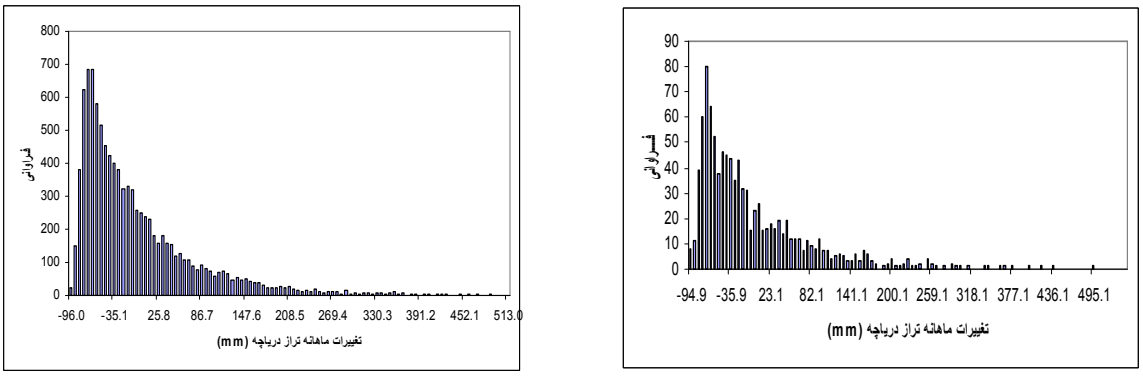
	مدل بیلان آبی		مدل رگرسیون خطی چند گانه		مدل شبکه عصبی(مدل ۱۰)	
روش نمونه‌گیری	مربع لاتین	تصادفی	مربع	تصادفی	مربع لاتین	تصادفی
میانگین (mm)	-۳۰/۷	-۳۱/۴	-۰/۷۰۳	-۱/۵۲	-۵/۹۱	-۱۳/۶
انحراف معیار (mm)	۶۶/۴	۶۵/۳	۸۴/۴	۸۳	۱۲۵	۱۲۴
واریانس (mm)	۴۴۲۰	۴۲۶۴/۰۹	۷۱۲۰	۶۸۸۹	۱۵۶۲۵	۱۵۳۷۶
حد بالای تغییرات (mm)	۳۶۱/۹	۳۷۸/۰۹۸	۴۹۵/۰۸۴	۵۱۳/۰۰۱۸	۶۱۶/۱۰۳۱	۶۱۶/۱۳۳
حد پایین تغییرات (mm)	-۱۰۶/۱۹۸	-۱۰۸/۹۸	-۹۴/۸۵	-۹۶/۰۴۱	-۱۷۶/۰۰۱	-۱۷۶/۰۳۱
محدوده تغییرات (mm)	۴۶۸/۰۹۸	۴۸۷/۰۷۸	۵۸۹/۹۳۴	۶۰۹/۰۴۲۸	۷۹۲/۱۰۴۱	۷۹۲/۱۶۴

بدین ترتیب مدل شبکه عصبی با انحراف معیاری در حدود ۱۲۵ میلیمتر، بیشترین عدم قطعیت و مدل بیلان آبی با انحراف معیار حدود ۶۶ میلیمتر کمترین عدم قطعیت را دارد. در این میان با استفاده از مدلهای بیلان آبی و برازش چندگانه، بیشترین فراوانی خروجی‌ها در محدوده تغییرات منفی بوده و نحوه پراکندگی تغییرات مثبت و منفی تراز دریاچه به صورت یک تابع توزیع واحد با چولگی مثبت قابل توصیف است (شکلهای ۵ و ۶).



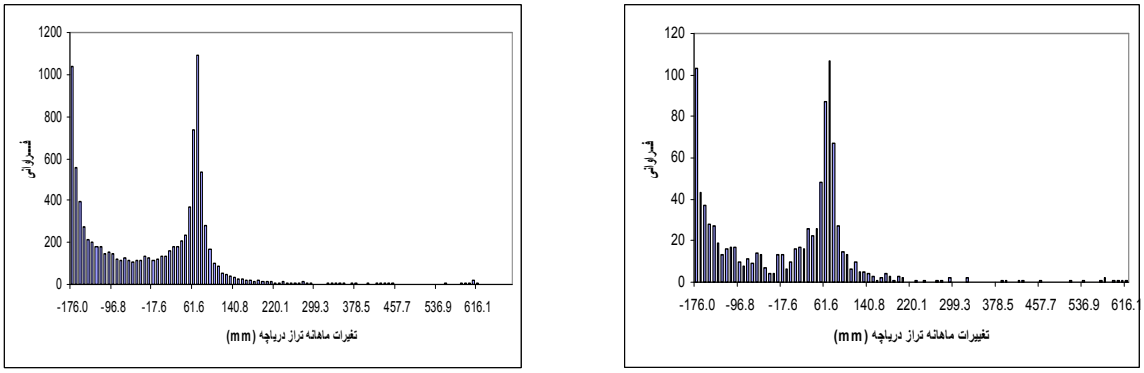
(الف) (ب)

شکل ۵ هیستوگرام خروجی مدل بیلان آبی با استفاده از نمونه‌های **الف**- مربع لاتین و **ب**- کاملاً تصادفی



(الف) (ب)

شکل ۶ هیستوگرام خروجی مدل برازش چندگانه با استفاده از نمونه‌های **الف**- مربع لاتین و **ب**- کاملاً تصادفی



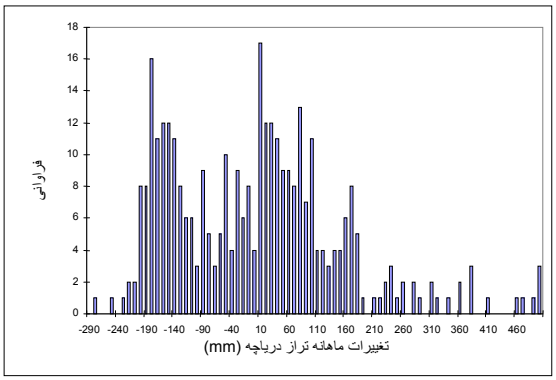
(الف) (ب)

شکل ۷ هیستوگرام خروجی مدل شبکه عصبی با استفاده از نمونه‌های **الف**- مربع لاتین و **ب**- کاملاً تصادفی

اما خروجیهای مدل شبکه عصبی حاکی از حاکمیت یک تابع توزیع چندقطعه‌ای بر تغییرات تراز دریاچه است که برای تغییرات مثبت و منفی تراز متفاوت بوده و با واقعیت طبیعی داده‌های مشاهداتی نیز تطابق بیشتری دارد (شکلهای ۷ و ۸).

۳-۴- تحلیل حساسیت مدلها

در جدول ۵ ضرایب حساسیت نرمال پارامترهای مؤثر در مدلهای به کاربرده شده در این تحقیق نمایش داده شده است. نتایج تحلیل حساسیت مدلها حاکی از آن است که تمامی روشها نسبت به ورودیهای سطحی وارد شده به دریاچه بیشترین حساسیت و نسبت به بارندگی بر سطح دریاچه کمترین حساسیت را دارند. دراین میان مدل شبکه عصبی نسبت به سایر مدلها، به پارامترهای ورودی کمترین حساسیت و مدل بیلان آبی نسبت به جریان سطحی و تبخیر، بیشترین حساسیت را دارد.



شکل ۸ هیستوگرام مشاهداتی تغییرات تراز دریاچه

جدول ۵ مقایسه حساسیت مدلهای شبیه سازی تغیرات تراز آب

	مدل بیلان آبی	مدل برازش خطی چندگانه	مدل شبکه عصبی (مدل ۱۰)
ارتفاع معادل حجم ورودی ماهیانه	۰/۹۸	۰/۹۸	–
دبی تجمعی ورودی ماهیانه	–	–	۰/۸۱
متوسط بارندگی ماهیانه	۰/۴۲	۰/۶۵	۰/۳۴
متوسط تبخیر ماهیانه	-۰/۷۳	-۰/۶۳	-۰/۳۸

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق سه روش در شبیه‌سازی تغییرات تراز آب دریاچه ارومیه به‌کار رفته که در بررسی قابلیتهای آنها، تحلیلی از عدم قطعیت و حساسیت آنها انجام شد. نتایج زیر از این تحقیق ارائه می‌شود:

۱- معادله بیلان آبی روش مناسبی برای شبیه‌سازی تراز و نوسانات آب دریاچه‌ها شناسایی نشد که مهمترین علت آن ممکن است نبود اطلاعات کامل و جامع از اجزای معادله و تغییرات مکانی آن باشد. اما مدل برازش به‌طور مطلوب‌تری توانست این شبیه‌سازی را به انجام رساند.

۲- مدل شبکه عصبی مصنوعی با ورودیهای همزمان دبی تجمعی ماهیانه ورودی دریاچه، متوسط ماهیانه بارندگی و متوسط تبخیر از دریاچه با دقت بالایی می‌تواند تراز و نوسانات آب دریاچه ارومیه را شبیه‌سازی کند.

۳- در موارد فوق تجزیه وتحلیل تغییرات تراز نسبت به استفاده مستقیم از تراز، نتایج بسیار مطلوب‌تری را در پی داشت.

۴- از میان روشهای مورد استفاده، شبیه‌سازی نوسانات دریاچه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی کمترین حساسیت را نسبت به عدم قطعیت پارامترهای ورودی دارد. اما این روش نسبت به معادله بیلان آبی و برازش چندگانه از عدم قطعیت بیشتری در شبیه‌سازی نوسانات دریاچه برخوردار است.

۵- فهرست علائم

$A(H)$	مساحت دریاچه در تراز متوسط ماهیانه
b_i	ضریب برازش مدل
$E(t)$	ارتفاع معادل تبخیر از سطح دریاچه در ماه t
L_t	تراز دریاچه در ماه t
O	متغیر خروجی مدل
$P(t)$	ارتفاع معادل بارش بر روی سطح دریاچه در ماه t
p_i	پارامتر ورودی i ام
Q_t	ارتفاع معادل حجم جریان ورودی به دریاچه درماه t
$R_{in}(t)$	حجم جریان ورودی دریاچه در ماه t
S_{P_i}	انحراف معیار پارامتر ورودی i ام
S_0	انحراف معیار پارامترهای خروجی شبیه‌سازی شده
ΔH	تغییرات تراز آب دریاچه نسبت به ماه قبل
ΔL_t	تغییرات تراز دریاچه ماه t نسبت به ماه قبل
β_i	ضریب حساسیت نرمال پارامتر ورودی i ام

۶- منابع

شرکت صنایع دریایی ایران (صدرا)، (۱۳۸۲)، گزارش مطالعات هیدرولیک و هیدرو دینامیک و بررسیهای زیست محیطی دریاچه ارومیه.

مهندسین مشاور آب نیرو (۱۳۷۱)، مطالعات مرحله دوم مقدماتی بزرگراه شهید کلانتری واقع در دریاچه ارومیه،گزارش مطالعات بیلان دریاچه و تغییرات تراز آب در طول عمر مفید بزرگراه شهید کلانتری.

Astushi U., Masaki T., and Yoshio I., (2004), Lake-level changes during the past 100،000 years at lake Baikal, Southern Siberia, Quaternary research, 62, pp. 214-222.

Charles T. Hann, (2002), Statistical method in hydrology, Iowa state press, Second edition, pp. 390-394.

Eckhardt K., Breuer L. and Frede H.G. (2003), Parameter uncertainty and the significance of simulated land use change effects, Journal of Hydrology, 273, pp. 164 -176.

Harrison S.P., (1989), Lake-levels and climatic changes in eastern north America. Climate dynamics 3, pp. 157– 167

Haykin S., (1994), Neural networks–A comprehensive foundation. Macmillan college publishing company, New York.

Hope A.S., Stein A.K. and Mcmichael C.E., (2004), Uncertainty in monthly river discharge predictions in a semi-arid shurbland catchment, Hydrology: Science and practice for the 21st century, 1, pp. 284-290.

Jones R.N., Mcmahon T.A. and Bowler J.M., (2001), Modelling historical lake levels and recent climate change at three closed lakes, Western Victoria, Journal of Hydrology, 246, pp. 59-180.

Jose D., Salas (1999), Uncertainty analysis of reservoir sedimentation, Journal of hydraulic engineering, April, pp. 339-350

Skebede S., Travi Y., Alemayehu T. and Marc V., (2005), Water balance of lake Tana and its sensitivity to fluctuations in rainfall, Blue Nile Basin, Ethiopia, Journal of hydrology, pp. 1-15.

Vrijling J.K. and Van Gelder P.H.A.J, (1999), Uncertainty analysis of water levels on lake Ijssel in the Netherlands, [On Line]. available on the http:// hydr.ct.tudelft.nl/wbk.