مجله علمی - پژوهشی
علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management Science & Engineering
Vol. 1, No. 1, Spring 2007
سال اول-شماره ۱-بهار ۱۳۸۶

تحلیل حساسیت پارامترهای روندیابی سیلاب و تلفات انتقال در رودخانه‌های مناطق خشک

محمود فتوحی[۱] و سیدمحمود حسینی[۲]

چکیده

جریان آب سطحی در رودخانه‌های مناطق خشک در یک دوره زمانی کوتاه اتفاق می‌افتد و به شدت متغیر است. وقتی یک سیلاب در رودخانه‌های این مناطق اتفاق می‌افتد، حجم آن در پایین‌دست به دلیل نفوذ آب در بستر، سواحل و دشتهای سیلابی کاهش می‌یابد. این تلفات نفوذ که تلفات انتقال نامیده می‌شوند، نه تنها باعث کاهش حجم سیلاب می‌شوند، بلکه باعث تنزل دبی اوج سیلاب نیز می‌گردند. چنین تلفاتی به عنوان یک منبع بزرگ تغذیه آب زیرزمینی و قنات‌ها در مناطق خشک نیز محسوب می‌شوند. در این پژوهش، روش روندیابی دینامیکی برای رودخانه‌های مناطق خشک توسعه داده شده است. بدین منظور روشهای مختلف برآورد دبی نشت از رودخانه‌ها مورد بررسی قرار گرفته و بعد معادله‌های حاکم بر حرکت موج سیلاب (معادله‌های سنت- ونان) با وارد کردن عبارت مربوط به تلفات انتقال اصلاح شده و با استفاده از نرم افزار Matlab یک برنامه کامپیوتری (مدل روندیابی دینامیکی) برای حل این معادله‌ها نوشته شده است. ارزیابی مدل روندیابی دینامیکی در شرایط میدانی با استفاده از آبنمود Lane و مشخصات رودخانه Hughes Wash دلالت بر تطابق نسبی نتایج مدل و مشاهدات میدانی دارد. به منظور شناسایی رفتار جریان و پیش‌بینی تلفات انتقال، مدل برای بازه‌ای از رودخانه زشک در خراسان رضوی اجرا شده است. انجام تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای ورودی این مدل نشان می‌دهد که نتایج خروجی این مدل یعنی دبی اوج آبنمود خروجی، حجم سیلاب و حجم نشت حساسیت بیشتری نسبت به پارامترهای ورودی نظیر طول و هدایت هیدرولیکی بازه تحت مطالعه و دبی اوج آبنمود ورودی به بازه دارند.

واژه‌های کلیدی: تلفات انتقال، رودخانه‌های خشک، روندیابی سیلاب، معادله‌های سنت- ونان.

مقدمه

سیلاب ممکن است به دنبال بارش‌های کوتاه مدت با شدت زیاد و یا بارش‌های بلندمدت با شدت کم شکل بگیرد. تاکنون روش‌های متعددی شامل روندیابی دینامیکی و روندیابی متمرکز به کار برده شده‌اند تا بتوان مشخصات موج سیلاب نظیر عمق، دبی و سرعت جریان در محل‌های مورد نظر را با گذشت زمان پیش‌بینی نمود که به این محاسبات روندیابی سیلاب گفته می‌شود. چنین پیش‌بینی‌هایی در برنامه‌ریزیهای لازم برای توسعه سامانه‌های منابع آب به کار می‌آیند. هدف این پژوهش، روندیابی جریان در رودخانه‌های مناطق خشک می‌باشد. دبی پایه در رودخانه‌های مناطق خشک صفر است و بنابراین وقتی که یک سیلاب در این رودخانه‌ها اتفاق می‌افتد، حجم آن در پایین‌دست به دلیل نفوذ آب در بستر، سواحل و دشتهای سیلابی کاهش می‌یابد که این تلفات ناشی از نشت، تلفات انتقال نامیده می‌شود. به همین دلیل روشهایی که تاکنون برای روندیابی سیلاب در رودخانه‌ها ابداع شده‌اند، برای رودخانه‌های مناطق خشک

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران آب، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲- دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، صندوق پستی ۱۱۱۱-۹۱۷۷۵
shossein@ferdowsi.um.ac.ir

مناسب نبوده و لازم است که این روشها برای مناطق خشک توسعه داده شوند، که بتوانند برآوردی از تلفات انتقال در مسیر جریان، که به عنوان منبع تغذیه آب‌های زیرزمینی در مناطقی خشک عمل می‌کند، به دست دهند. Lange (2005) اذعان می‌دارد که گرچه اهمیت تلفات انتقال در مناطق خشک از سالیان دور معلوم بوده است، ولی در مورد فرآیند حاکم بر شکل‌گیری این تلفات اطلاعات چندانی در دست نیست [۹]. وجود این رودخانه‌ها در مناطق خشک، نقاط محروم و فاقد ایستگاه‌های اندازه‌گیری بر مبهم ماندن موضوع می‌افزاید. در هر حال، دیدگاه‌های مختلفی در تحلیل جریان و برآورد تلفات انتقال در رودخانه‌های مناطقی خشک به کار گرفته شده‌اند. Vivarelli و Perera جمع‌بندی مناسبی از این روش‌ها ارایه می‌دهند و این روش‌ها را تحت عناوین ایجاد روابط برازشی ساده بین احجام ورودی و خروجی یک بازه، معادله‌های دیفرانسیلی ساده، روابط ترکیبی متشکل از معادله‌های دیفرانسیلی ساده و روابط برازشی، اندازه‌گیری میدانی، مدل‌های روندیابی جریان و بیلان هیدرولوژیکی طبقه‌بندی می‌کنند [۱۱]. قطعاً محدودیت‌هایی از جمله مقیاس مسئله تحت مطالعه بر انتخاب هر یک از روشهای یاد شده حاکم است. مدل‌های روندیابی دینامیکی به همراه تلفات انتقال می‌توانند در تحلیل جریان و برآورد تلفات انتقال در بازه‌های کوتاه و فاقد جریان‌های میانی کمک نمایند، گرچه فرآیندی که بر پدیده نشت در هنگام بروز سیلاب حاکم است، به عنوان یک موضوع پیچیده مطرح بوده و می‌باشد.

در این پژوهش، یک مدل روندیابی ساده با اعمال تلفات انتقال به معادله‌های یک‌بعدی سنت–ونان توسعه داده شده است. به منظور برآورد تلفات انتقال از یک تحلیل شبه‌دائمی بر روی تابع نشت موسکات استفاده شده است [۷]. در نهایت، این مدل در حساسیت‌سنجی پارامترهای روندیابی جریان و برآورد تلفات انتقال در بازه‌ای در رودخانه زشک در استان خراسان رضوی به کار گرفته شده است که نتایج آن تصویر روشنی از جریان در اینگونه رودخانه‌ها ارایه می‌دهد.

دبی نشت از کانال‌ها و رودخانه‌ها و معرفی روش انتخابی در برآورد تلفات انتقال

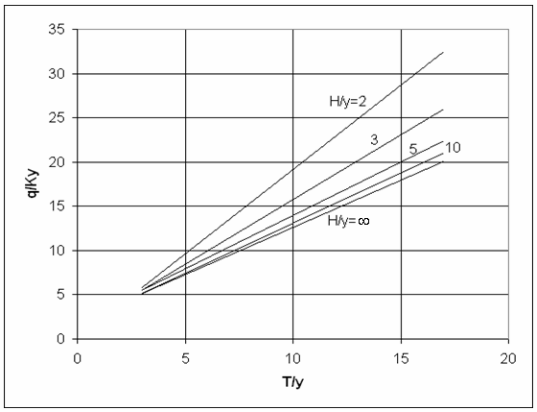
رودخانه‌ها را از نظر ساختار بستر و نشت از کف آنها می‌توان به دو دسته رودخانه‌های فاقد لایه با نفوذپذیری کم[1] و رودخانه‌های دارای لایه با نفوذپذیری کم در بستر خود طبقه‌بندی نمود [۵ و۱۰]. گرچه، این طبقه‌بندی می‌تواند در مورد رودخانه‌هایی که تحت یک رژیم سیلابی نمی‌باشند، تا حدودی در تبیین فرآیند نشت از این رودخانه‌ها به کار گرفته شود، ولی در مورد رودخانه‌های مناطقی خشک رفتار و عملکرد جریان بسیار پیچیده‌تر است. در این رودخانه‌ها تخریب لایه با نفوذپذیری کم می‌تواند سریع اتفاق افتد و مجموعه‌ای از عملیات فرسایش و آب‌بندی در شکل‌گیری حجم نشت دخالت دارند. صرفنظر از این پیچیدگی‌ها که به سادگی توسط مدل‌های ریاضی قابل برآورد نمی‌باشند، در این پژوهش روش‌های محاسبه دبی نشت از کانال‌ها برای رودخانه‌ها مورد بررسی و استفاده قرار گرفته‌اند. این روش‌ها به طور عمده تجربی بوده و یا بر اساس روش‌های متکی بر تئوری جریان پتانسیل در شرایط ایده‌آل توسعه داده شده‌اند. روش‌های مورد بررسی، روشهای موسکات و ودرنیکف، سوبرامانیا، اچه‌وری و کاستیاکف [۷، ٦ و ۱] می‌باشند.

از بین این روش‌ها، تنها روشهای موسکات، ودرنیکف و سوبرامانیا مقدار نشت را برحسب عمق آب در رودخانه تعیین می‌کنند. روش سوبرامانیا برای دو حالت یکی پوشش در کف و دیگری پوشش در دیوارهای جانبی نوشته شده است که مجموع این دو حالت برای محاسبه نشت در حالت بدون پوشش دچار خطا می‌شود. روش ودرنیکف برای سطح آب زیرزمینی عمیق نوشته شده، ولی در روش موسکات تغییرات سطح ایستابی در نظر گرفته شده است. علاوه براین، با توجه به اینکه نمودارهای محاسباتی روش موسکات خطی بوده و استفاده از آن ساده‌تر است، در این مقاله از این روش به عنوان روش محاسبه نشت استفاده شد.

نمودار موسکات برای محاسبه دبی نشت در شکل ۱ نشان داده شده است. در این نمودار q دبی نشت یا دبی عرضی در واحد طول کانال، K هدایت هیدرولیکی، y عمق آب در

1- Clogging Layer

رودخانه، T عرض سطح آب و H عمق سطح ایستابی نسبت به سطح آزاد آب است. نمودار موسکات برای یک کانال ذوزنقه‌ای با شیب جانبی (افقی) ۱/۵:(قائم) ۱ یعنی مقدار $m_0 = 1.5$ نوشته شده است و برای نسبت شیب جانبی m، مقدار q در نسبت $\frac{m}{m_0}$ ضرب می‌شود.



شکل(۱)- نمودار موسکات جهت محاسبه دبی نشت در کانال‌های ذوزنقه‌ای با نسبت شیب جانبی $m_0 = 1.5$

نظر به اینکه در رودخانه‌های مناطق خشک، سطح ایستابی در عمق زیادی قرار دارد، لذا از تابع نشت موسکات در حالت سطح ایستابی عمیق $(H/y = \infty)$ استفاده شد که معادله آن برای محاسبه دبی نشت از رودخانه (q_l) به صورت زیر است.

$$q_l = Ky\left(1.071(T/y)+1.786\right)*(m/1.5) \qquad (۱)$$

در تابع نشت موسکات که به عنوان تابع محاسبه دبی نشت در روندیابی دینامیکی استفاده شد، نیاز به تعیین هدایت هیدرولیکی است. [۳] مقادیر عددی هدایت هیدرولیکی را در محدوده ۱×۱۰^{-۷}تا ۱×۱۰^{-۳} متر در ثانیه برآورد نموده است.

ساختار کلی مدل روندیابی دینامیکی در رودخانه‌های مناطق خشک

حرکت موج سیلاب در رودخانه‌ها از نوع جریان غیردائمی متغیر تدریجی می‌باشد. در جریانهای متغیر تدریجی شتاب قائم ناچیز و قابل صرفنظر کردن بوده، ولی اثر اصطکاک کانال قابل ملاحظه و می‌بایست تا در محاسبات مدنظر قرار گیرد. معادله‌های حاکم بر جریانهای غیردائمی متغیر تدریجی، شامل معادله‌های پیوستگی و اندازه حرکت هستند که به معادله‌های سنت- ونان معروف می‌باشند. در به دست آوردن این معادله‌ها از فرضیات زیر استفاده شده است [٤].

۱- جریان یک بعدی است، بدین معنی که سرعت فقط در راستای طولی کانال تغییر می‌کند.

۲- تغییرات فشار به صورت هیدرواستاتیکی است و از شتاب قائم ذرات آب صرفنظر می‌شود.

۳- شیب کف کانال به طور نسبی کم بوده و بستر کانال ثابت در نظر گرفته می‌شود.

٤- از معادله مانینگ به عنوان معادله مقاومت جریان استفاده می‌شود.

۵- سیال غیر قابل تراکم بوده و چگالی سیال ثابت می‌باشد.

معادله پیوستگی در حالت وجود نشت به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial t}+q_l = 0.0 \qquad (۲)$$

معادله اندازه حرکت، با استفاده از قانون دوم نیوتن و بر اساس تغییرات اندازه حرکت بین دو مقطع جریان به دست می‌آید. این معادله با رابطه زیر بیان می‌شود.

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial\left(\beta Q^2/A\right)}{\partial x}+gA\frac{\partial y}{\partial x}-gA\left(S_0-S_f\right)=0.0 \qquad (۳)$$

که در روابط (۲) و (۳)، x راستای طولی جریان، t زمان، Q دبی جریان، A سطح مقطع جریان، q_l دبی عرضی در واحد طول، S_f شیب خط انرژی، S_0 شیب طولی مسیر جریان، y عمق جریان، g شتاب ثقل و β ضریب تصحیح اندازه حرکت می‌باشند.

روش روندیابی دینامیکی سیلاب بر پایه حل همزمان معادله‌های سنت- ونان بنا نهاده شده‌اند که درآن بجای q_l در رابطه پیوستگی معادل آن از رابطه (۱) قرار داده می‌شود که این رابطه بر حسب عمق آب در رودخانه مقدار دبی نشت را تنظیم می‌کند. اما از آنجا که جریان در رودخانه غیردائمی است و عمق آب در هر لحظه و در هر مکان متغیر است، لذا دبی نشت نیز در هر لحظه و در هر مکانی متغیر خواهد بود. به همین منظور برای اعمال کردن تغییرات مکانی و زمانی دبی

نشت، در معادله (۱)، عمق آب مربوط به زمانها و مکانهای مختلف قرار داده می‌شود. با چنین محاسباتی یک تحلیل شبه‌دائمی از پدیده نشت اشباع، فرض و اعمال شده‌است.

روشهای مختلفی برای حل عددی معادله های سنت–ونان مانند روش مشخصه‌ها، روش اجزاء محدود و روش تفاضل محدود به کار گرفته شده‌اند. ازجمله روش‌های متداول روش تفاضل محدود چهار نقطه‌ای ضمنی می‌باشد. روش تفاضل محدود ضمنی شامل حل معادله‌های سنت–ونان از یک گام زمانی به گام زمانی دیگر می‌باشد که این عمل به طور همزمان برای تک‌تک گامهای زمانی انجام می‌شود. در این روش، هر تابع f و مشتقات زمانی و مکانی آن در فضای گسسته زمانی و مکانی تفاضل‌های محدود توسط روابط زیر برآورد می‌شوند.

$$f = \theta\left(\frac{f_{i+1}^{j+1} + f_i^{j+1}}{2}\right) + (1-\theta)\left(\frac{f_{i+1}^{j} + f_i^{j}}{2}\right) \qquad (٤)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{f_i^{j+1} - f_i^{j} + f_{i+1}^{j+1} - f_{i+1}^{j}}{2\Delta t} \qquad (٥)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\theta\left(f_{i+1}^{j+1} - f_i^{j+1}\right)}{\Delta x} + \frac{(1-\theta)\left(f_{i+1}^{j} - f_i^{j}\right)}{\Delta x} \qquad (٦)$$

دراین روابط، i و j به ترتیب اشاره به گام‌های مکانی و زمانی دارند و θ پارامتر وزن است که بین صفر و یک می‌تواند متغیر باشد.

از مسائل مهم در استفاده از مدل‌های تفاضل محدود، پایداری و دقت مدل می‌باشد که برای پایداری مدل لازم است که θ در محدوده $0.5 \le \theta \le 1$ باشد. با افزایش مقدار θ از ۰/۵ به سمت یک، موج محاسبه شده پخش‌تر می‌شود و به ازاء مقادیر نزدیک به ۰/۵ ضمن حفظ پایداری، شکل موج نیز حفظ می‌شود. بنابراین به عنوان بهترین مقدار برای این پارامتر عدد ۰/۶–۰/۵۵ پیشنهاد شده است [٤]. در این پژوهش مقدار ۰/٦ برای θ در نظر گرفته شده است.

نظیر هر معادله حاکم بر جریان غیردائمی، برای حل معادله های سنت– ونان نیاز به شرایط اولیه وشرایط مرزی می‌باشد. شرایط اولیه وضعیت جریان قبل از ورود موج سیلاب می‌باشند و شرایط مرزی، ارتباط فیزیکی جریان را با مرزهای اطراف خود درنظر می‌گیرند. از آنجا که موضوع این پژوهش، روندیابی جریان در رودخانه‌های مناطق خشک می‌باشد، لذا قبل از وقوع سیل هیچ آبی در رودخانه وجود ندارد و بنابراین به عنوان شرایط اولیه می‌توان مقدار دبی رودخانه و عمق آب را برابر صفر در نظر گرفت، البته جهت پایداری مدل عددی بهتر است این مقدار نزدیک به صفر باشد.

در جریانهای زیر بحرانی یک شرط مرزی در بالادست و یک شرط مرزی در پایین‌دست تعریف می‌شوند. شرط مرزی بالادست آبنمود ورودی به بازه تحت مطالعه دریک رودخانه است. برای تعیین شرط مرزی پایین‌دست، فرض شده‌است که در انتهای بازه تحت مطالعه، جریان از یک منحنی دبی– اشل یک به یک تبعیت می کند. در این مقطع عمق و دبی با زمان تغییر می کنند و ارتباط آنها از طریق این منحنی بر قرار می شود. بهترین تقریب برای منحنی دبی– اشل در شرایط عدم وجود اطلاعات، استفاده از معادله های مقاومت جریان یکنواخت(نظیر معادله مانینگ) می باشد که به مفهوم برابری تقریبی شیب اصطکاکی با شیب طولی کانال است. اما برای اینکه تأثیر شرط مرزی مقطع انتهایی بر روی رفتار جریان در درون بازه تحت مطالعه کمتر گردد، مقطع انتهایی محاسباتی در فاصله یک کیلومتری پس از مقطع انتهایی بازه اعمال شده است و در این فاصله نشت نیز اعمال گردیده است.

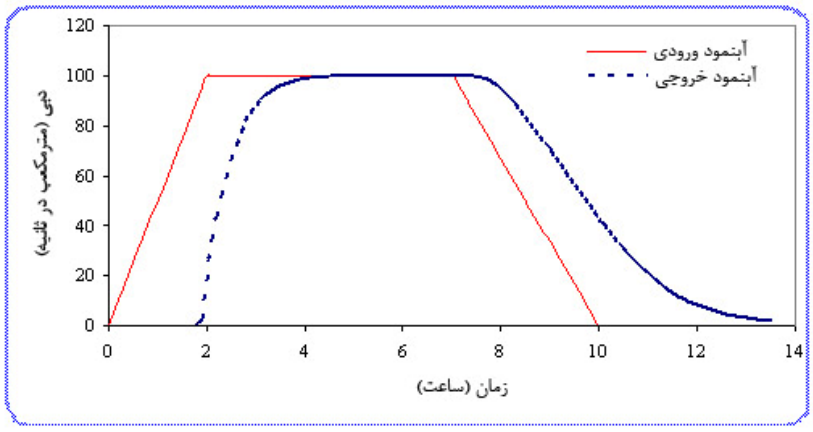
توضیحات کامل درمورد چگونگی اعمال معادله‌های (٤) الی (٦) به معادله‌های (۲) و (۳) به همراه دخالت شرایط مرزی و اولیه در [٤] آمده است. بر اساس موارد یاد شده، برنامه‌ای جهت روندیابی دینامیکی در فضای نرم‌افزار Matlab نوشته شده است که از این به بعد به آن مدل روندیابی دینامیکی گفته می‌شود.

ارزیابی مدل روندیابی دینامیکی از نظر دقت و صحت برنامه‌نویسی

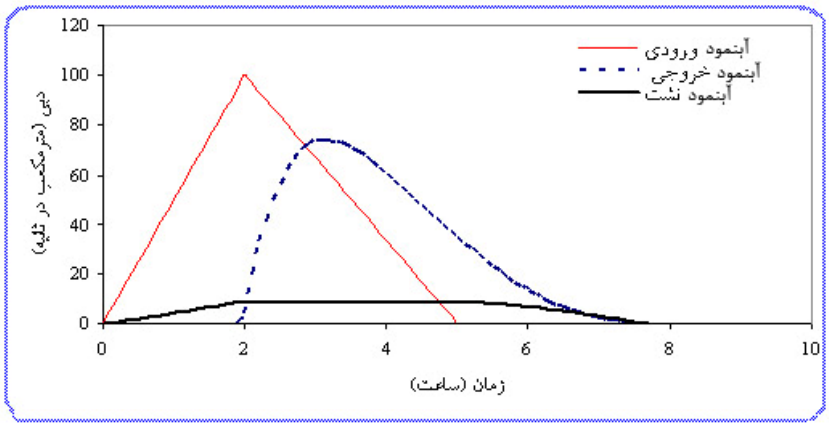
برای ارزیابی مدل روندیابی دینامیکی از نظر دقت و صحت برنامه‌نویسی، با آن دو آبنمود یکی در حالت دبی نشت صفر و دیگری با وجود نشت ثابت، روندیابی شدند. در

آبنمود اولی جریان پس از رسیدن به اوج خود تا یک مدت زمانی ثابت و یکنواخت شده و سپس نزول می‌کند که از آن به منظور بررسی قابلیت مدل در پیش‌بینی جریان یکنواخت استفاده شد. این آبنمود در یک رودخانه فرضی به شکل ذوزنقه‌ای با عرض کف ۱۰ متر، شیب جانبی ۱:۱، طول ۱۰ کیلومتر، ضریب زبری ۰/۰۳۵ و شیب بستر ۰/۰۰۱ با میزان نشت صفر روندیابی شده است. پس از بررسی مشخص گردید که مقادیر Δx برابر ۱۰۰ متر و Δt برابر ۰/۱ ساعت به همراه θ برابر ۰/٦ مقادیر مناسب و بهینه پارامترهای مدلسازی هستند. در شکل ۲ مشخصات این آبنمود و آبنمود روندیابی شده آن آمده است. حجم آبنمود ورودی برابر ۲۷۰۲۳٤۰ مترمکعب است و آبنمود خروجی دارای حجم ۲٦۹٤۰۰٤ مترمکعب می‌باشد که تطابق خوبی دارند. همانگونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، مدل قابلیت پیش‌بینی جریان یکنواخت را دارد، زیرا اولاً آبنمود خروجی در زمان یکنواخت شدن آبنمود ورودی به صورت افقی ایجاد شده است و ثانیاً عمق جریان یکنواخت با استفاده از فرمول مانینگ به ازاء مشخصات رودخانه فرضی برابر ٤/۰۸ متر به دست می‌آید که همان عمق آب ایجاد شده در سرتاسر بازه رودخانه است.

در مثال دوم آبنمودی که به شکل مثلثی در نظر گرفته شده است، با همان مشخصات رودخانه فرضی حالت اول و با میزان نشت ثابت ۰/۰۰۱ متر مکعب در هر متر طولی رودخانه در ثانیه روندیابی شد. نتایج روندیابی شامل آبنمود ورودی، خروجی و نشت در شکل ۳ ارایه شده است. حجم آبنمود ورودی، خروجی و نشت به ترتیب برابر ۹۰۵۹٤۰، ۷۲۱۵۲۳ و ۱۸۲۳٤۰ مترمکعب می‌باشند که توازن جرم نشان دهنده دقت مدل در ارضاء رابطه پیوستگی است.



شکل(۲)- مشخصات آبنمود جریان یکنواخت و آبنمود خروجی روندیابی شده بوسیله مدل روندیابی دینامیکی



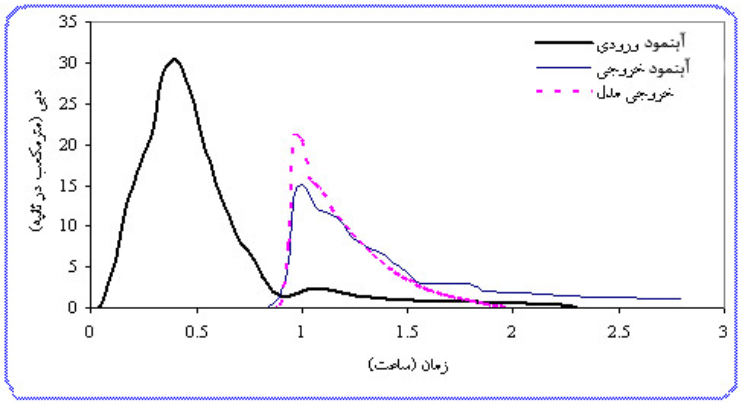
شکل(۳)- مشخصات آبنمود ورودی مثلثی، آبنمود خروجی و تلفات انتقال روندیابی شده بوسیله مدل روندیابی دینامیکی

ارزیابی عملکرد مدل روندیابی دینامیکی تحت شرایط میدانی

به منظور ارزیابی مدل در شرایط میدانی از مشخصات آبنمود سیل رخ داده در سی‌ام ژولای سال ۱۹٦٦ مربوط به رودخانه Hughes Wash، که در قسمت بالایی حوزه Walnut Gulch واقع در جنوب شرقی Arizona قرار دارد، استفاده شد که از این به بعد به آن آبنمود Lane گفته می‌شود [۸]. رودخانه Hughes Wash به طول ٤ مایل (حدود ٦/٤ کیلومتر) دارای عمق کم و با شیب تند است که بیشتر طول آن دارای بستر شنی و سنگریزه می‌باشد که ضخامت آنها از صفر تا ۱۱ فوت (حدود صفر تا ۳/٤ متر) متغیر است. در شکل ٤ تصویری از این رودخانه در زمان مطالعه نشان داده شده است. عرض رودخانه از ۱۵ تا ٤۵ فوت (٤/٦ تا ۱۳/۷ متر) متغیر بوده و دارای مقدار متوسط ۳٦ فوت (حدود ۱۱ متر) است. شیب کلی بستر رودخانه تقریباً ۱/۲ درصد است و عمق جریان در رودخانه در بیشتر سیلابهای اتفاق افتاده تا آن زمان در آن کمتر از یک تا ۱/۵ فوت (۰/۳ تا ۰/٤٦ متر) برآورد شده است. سرعت متوسط آب در رودخانه نیز بین ٤ تا ۷ فوت در ثانیه (۱/۲ تا ۲/۱ متر در ثانیه) برآورد شده است. همه سیلابهای اتفاق افتاده، تولید رواناب نمی‌کرده‌اند و تجربیات قبلی نشان داده است که برای تولید رواناب در رودخانه حداقل ۰/۲ اینچ (حدود ۵ میلی‌متر) بارندگی نیاز بوده است. حداقل ۸ تا ۱۰ جریان سیلاب در هر سال رخ داده است که هر جریانی ۲ تا ۵ ساعت با زمان اوج ۱۵ تا ۳۰ دقیقه تداوم داشته است.

به منظور مقایسه مشاهده‌های میدانی و نتایج مدل‌سازی، آبنمود ورودی Lane با مشخصات رودخانه Hughes Wash توسط مدل روندیابی شدند. با توجه به مشخصات رودخانه، ضریب زبری برابر ۰/۰۳۵ و هدایت هیدرولیکی برابر ۰/۰۰۰۱ متر در ثانیه در نظر گرفته شدند. در ضمن پارامترهای مناسب مدل‌سازی روش‌های تفاضل محدود یعنی Δx و Δt به ترتیب برابر ۱۰۰ متر و ۱۲۰ ثانیه انتخاب شدند. در شکل ۵ مشخصات آبنمودهای ورودی و خروجی Lane و آبنمود خروجی تولیدی به وسیله مدل روندیابی دینامیکی نشان داده شده‌اند.

شکل(٤)- تصویری از رودخانه Hughes Wash در زمان مطالعه مربوطه



شکل(۵)- مشخصات آبنمودهای ورودی و خروجی Lane و آبنمود خروجی تولید شده به وسیله مدل روندیابی دینامیکی

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، زمان شروع سیل و زمان اوج در آبنمود خروجی Lane و مدل یکسان است. آبنمود خروجی مشاهده‌ای Lane نسبت به آبنمود خروجی مدل پخش‌تر بوده و دارای دبی اوج کمتر است. دبی اوج آبنمود خروجی Lane و مدل به ترتیب برابر ۱۵/۲ و ۲۳/۲ مترمکعب در ثانیه می‌باشند که نشان می‌دهد مدل مقدار دبی اوج را بیشتر پیش‌بینی کرده است. حجم آبنمود خروجی Lane و آبنمود خروجی تولید شده به وسیله مدل روندیابی دینامیکی به ترتیب ۳۱۷۲۶ و ۲۷۲۵۷ مترمکعب می‌باشند و بنابراین حجم آبنمود خروجی برآورد شده با مدل به اندازه ۱٤ درصد بیشتر است. تلفات انتقال (حجم نشت) در آبنمود Lane برابر ۲۱۵۸۰ و در مدل برابر ۲٦۰٤۹ مترمکعب است و لذا حجم نشت پیش‌بینی شده توسط مدل به اندازه ۱۷ درصد بیشتر از شرایط واقعی است. دلایل زیر اشاره به تفاوت‌های یادشده دارند.

۱- همانطور که در بخش ۳ اشاره گردید، برای تولید آبنمود نشت از جریان شبه دائمی اشباع استفاده شده است و همین امر می‌تواند باعث محاسبه زیاد نشت بوسیله مدل شود.

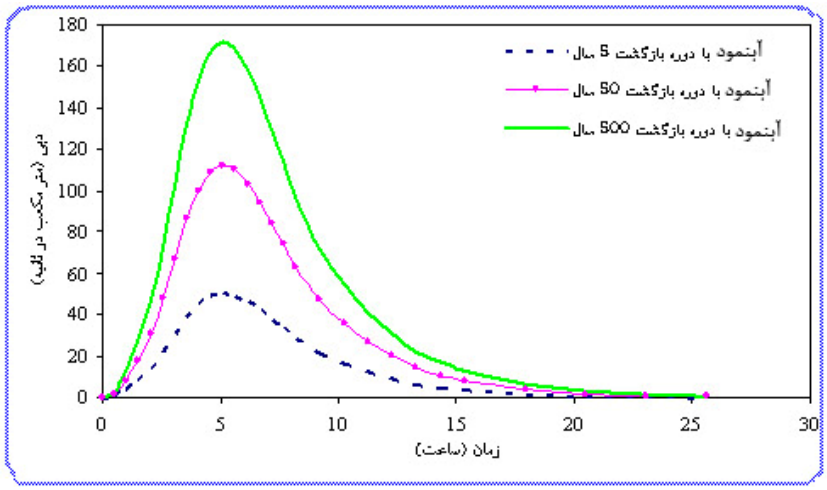
۲- اصولاً معادله‌های سنت-ونان به دلیل فرضیات اعمالی، ساختار مدل و عدم قطعیت موجود در برآورد برخی پارامترها مانند ضریب زبری و پارامترهای مربوط به نشت به هیچ عنوان قادر نیستند شرایط طبیعی را با دقت بالا پیش‌بینی کنند. به هرحال این پیش‌بینی در محدوده مسائل عملی برای چنین پدیده پیچیده‌ای قابل توجه است.

تحلیل حساسیت پارامترهای مدل روندیابی دینامیکی

تحلیل حساسیت به منظور بررسی حساسیت نتایج خروجی مدل به تغییرات پارامترهای ورودی مدل انجام می‌شود. همچنین تحلیل حساسیت برای معرفی سطح عدم قطعیت در پیش‌بینی مدل در مقایسه با عدم قطعیت موجود در برآورد پارامترها می‌باشد. تحلیل حساسیت پارامترها بر روی بازه‌ای از رودخانه زشک انجام شده‌است. بنابراین، در ابتدا توضیح مختصری از حوزه آبخیز رودخانه زشک و آبنمودهای تولیدی با دوره بازگشتهای مختلف در آن ارایه می‌گردد.

۱- حوزه آبخیز رودخانه زشک و تولید آبنمودهای با دوره بازگشت مختلف در آن

رودخانه زشک از ارتفاعات نزدیک به قله بینالود در خراسان رضوی سرچشمه می‌گیرد و حوزه آبخیز آن به شکل مستطیل طویل و کشیده‌ای است که طولش به حدود ۷ برابر عرض آن بالغ گردیده و هر چه از سرچشمه منطقه به سمت دشت پیش می‌رویم، از عرض آن کاسته می‌شود. رودخانه زشک پس از پیوستن دو رودخانه بزرگ و کوچک به آن شکل گرفته و در نهایت به کشف رود می‌ریزد. میزان آب آن در فصل سیلابی حدود ۷۱ درصد کل آب در طول سال است که تا حدودی وضعیت خشک بودن منطقه را مشخص می‌کند. در محل خروجی حوزه، یک ایستگاه آب‌سنجی با نام ایستگاه سرآسیاب شاندیز وجود دارد که آمار آبدهی حداکثر لحظه‌ای آن برای ۲۸ سال آبی از سال ۵۱-۱۳۵۰ تا سال ۷۸-۱۳۷۷ موجود است. بر اساس آمار موجود، مقادیر حداکثر دبی



شکل(٦)- مشخصات آبنمودهای ورودی ۵، ۵۰ و ۵۰۰ ساله رودخانه زشک در محل ایستگاه سرآسیاب شاندیز

لحظه‌ای با دوره بازگشت‌های ۵، ۵۰ و ۵۰۰ سال با استفاده از نرم افزار Smada و به کار بردن توزیع گامبل به ترتیب برابر ۵۰/٤، ۱۱۲/٤ و ۱۷۲ مترمکعب در ثانیه محاسبه شده‌اند. همچنین، ابعاد هر آبنمود متناظر با دوره‌های بازگشت از روش آبنمود بدون بعد SCS تعیین گردیده‌اند [۲]. از این آبنمودها، که مشخصات آنها در شکل ٦ آمده است، به عنوان آبنمود ورودی جهت روندیابی در بازه‌ای از این رودخانه استفاده می‌شود. آبنمودهای با دوره بازگشت ۵، ۵۰ و ۵۰۰ سال به ترتیب به عنوان آبنمودهای با دبی اوج کم، متوسط و زیاد مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۲- مشخصات رودخانه زشک

به منظور انجام محاسبات روندیابی دینامیکی نیاز به تعیین یک مجموعه مشخصات هندسی و فیزیکی پایه از رودخانه در بازه تحت مطالعه می‌باشد. بازه تحت مطالعه دارای طولی برابر ۲۵ کیلومتر با مقطع به شکل ذوزنقه با شیب جانبی ۱:۱ می‌باشد. شیب طولی رودخانه نیز در این فاصله از روی نقشه ۰/۰۰۵۵ برآورد شده‌است. به منظور یک برآورد تقریبی از ضریب زبری بستر و هدایت هیدرولیکی مصالح کف رودخانه از محل مورد نظر بازدید انجام گردید. با توجه به اینکه بستر رودخانه زشک اکثراً از قلوه‌سنگ و شن درشت تشکیل شده است و نیز در بعضی قسمت‌های رودخانه درخت وجود دارد و در هنگام سیلاب، جریان درختان را در بر می‌گیرد، مقدار ضریب زبری برابر ۰/۰۳۵ برآورد شد. برای تعیین هدایت هیدرولیکی یک نمونه از خاک تا عمق ۳۰ سانتیمتر از بستر رودخانه برداشته شد و بر روی آن آزمایش نفوذپذیری با بار ثابت انجام گرفت. بدین ترتیب مقدار هدایت هیدرولیکی برابر $۱/۰۳\times۱۰^{-٤}$ متر در ثانیه برآورد زده شد. لازم به توضیح است که گرچه مصالح ریز موجود در کف رودخانه نقش مهم‌تری در مقدار هدایت هیدرولیکی دارند، ولی در اعماق پایین‌تر نیز تغییر ماهوی در ساختار خاک مشاهده نگردید.

۳- نمایه حساسیت

برای انجام تحلیل حساسیت لازم است تا مقادیر پایه پارامترها را مشخص نمود و سپس پارامترها را در یک محدوده مشخصی بزرگ و کوچک نمود و مدل روندیابی دینامیکی را به ازاء این پارامترها اجرا کرد. مقادیر پایه پارامترهای ورودی که در این پژوهش از آنها استفاده شده است، همان مقادیر مشخص شده در بخش ۲ (قبل) می‌باشند. لازم به ذکر است که آبنمود ورودی پایه، آبنمود با دوره بازگشت ۵۰ سال رودخانه زشک با دبی اوج ۱۱۲ مترمکعب در ثانیه می‌باشد. نمایه حساسیت زیر نیز برای تعیین میزان حساسیت نتایج خروجی مدل نسبت به تغییر در پارامترهای ورودی مورد استفاده قرار گرفت.

$$S = \left(\frac{O_2 - O_1}{O_{ave}}\right) \Big/ \left(\frac{I_2 - I_1}{I_{ave}}\right) \qquad (۷)$$

که در این رابطه S نمایه حساسیت، I_1 و I_2 به ترتیب کوچکترین و بزرگترین مقدار پارامتر ورودی، I_{ave} متوسط I_1 و I_2، O_1 و O_2 مقادیر خروجی متناظر با I_1 و I_2 و بالاخره O_{ave} متوسط O_1 و O_2 می‌باشند. نتایج خروجی مدل در قالب حجم آبنمود خروجی، دبی اوج آبنمود خروجی و حجم آبنمود نشت در نظر گرفته شده‌اند. بر این اساس، مدل به ازاء مقادیر پایه پارامترها، طول ٤٠ و ١٠ کیلومتر، عرض ١٥ و ٥ متر، ضریب زبری ٠/٠٤ و ٠/٠٣، هدایت هیدرولیکی ٠/٠٠٠١٣٧٥ و ٠/٠٠٠٠٦٢٥ متر در ثانیه، شیب ٠/٠١ و ٠/٠٠١، دبی اوج ١٧٢ (آبنمود ٥٠٠ ساله) و ٥٠/٤ (آبنمود ٥ ساله) مترمکعب در ثانیه اجرا شد. برای کلیه محاسبات روندیابی مقادیر Δx و Δt به ترتیب برابر ١٠٠ متر و ٠/٢ ساعت در نظر گرفته شدند. نتایج روندیابی مدل شامل حجم و دبی اوج آبنمود خروجی و نیز حجم نشت به ازاء موارد ذکر شده در جدول ١ آمده است. همچنین، به عنوان نمونه مشخصات آبنمودهای ورودی، خروجی و نشت به ازاء مقادیر پایه پارامترهای ورودی در شکل ٧ ارایه شده است. همانگونه که در شکل ٧ دیده می‌شود، آبنمود نشت تا زمان شروع آبنمود خروجی روند افزایشی دارد و سپس تا زمان انتهای آبنمود خروجی روند تقریباً ثابتی دارد و از آنجا به بعد دچار شکستگی شده و روند کاهشی پیدا می‌کند. موارد زیر اشاره به دلایل اصلی این مشاهده‌ها دارد.

١- از همان ابتدای شروع سیل نشت به مدل اعمال می‌شود و این دلیل افزایش میزان نشت در هنگام شروع سیلاب می‌باشد.

٢- دلیل شکستگی آبنمود نشت در انتهای آبنمود خروجی امری طبیعی است، چون که تابع نشت اعمال شده به مدل تابعی از عمق آب در رودخانه بوده و لذا هنگامی که آبنمود خروجی به انتها می‌رسد، عمق آب در رودخانه نیز کم شده (به صفر نزدیک شده) و همین امر باعث کاهش مقدار نشت می‌شود.

نتایجی که از جدول ١ می‌توان برداشت کرد، عبارتند از :

١- با افزایش هر یک از پارامترهای ورودی بجز شیب، میزان نشت نیز زیاد می‌شود و با کاهش آنها از میزان نشت کاسته می‌شود. تنها در مورد پارامتر شیب این قضیه برعکس است، بدین معنی که افزایش شیب باعث کاهش میزان نشت و کاهش آن باعث افزایش نشت می‌شود.

٢- هرچه دبی اوج آبنمود ورودی بیشتر باشد، مدل درصد نشت کمتری را برای آن محاسبه می‌کند. درصد نشت تولیدی برای آبنمود با دوره بازگشت ٥ سال ٧١/٣ درصد، برای آبنمود با دوره بازگشت ٥٠ سال ٤٧/٦ درصد و برای آبنمود با دوره بازگشت ٥٠٠ سال ٣٧/٥ درصد می‌باشد.

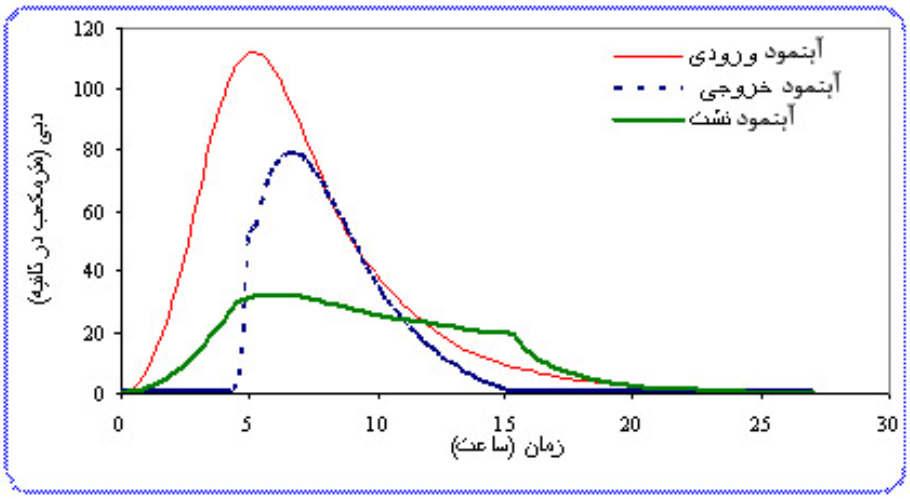
٣- اگر پارامتر دبی اوج آبنمود ورودی کنار گذاشته شود، بیشترین مقدار دبی اوج و حجم آبنمود خروجی و معادل آن کمترین مقدار حجم نشت به ازاء طول ١٠ کیلومتر به دست می‌آید.

٤- به غیر از پارامتر دبی اوج آبنمود ورودی، کمترین مقدار دبی اوج و حجم آبنمود خروجی و معادل آن بیشترین مقدار حجم آبنمود نشت به ازاء روندیابی با طول ٤٠ کیلومتر به دست آمده است.

جدول(۱)- نتایج اجرای مدل روندیابی دینامیکی به ازاء پارامترهای ورودی مختلف

مقادیر پارامترها	حجم (مترمکعب)		دبی اوج (مترمکعب در ثانیه)
	آبنمود خروجی	آبنمود نشت	آبنمود خروجی
مقادیر پایه	۱٤٦۱۸٦٥	۱۳۳۱٥۹۹	۷۹/۰٤
طول زیاد*	۹۲۲٤۲٤	۱۸٦۷۰٤۷	٥۹/۷٥
طول کم*	۲۱۸٥۱۷۹	٦۱۲۱۲٥	۹۹/۳٥
عرض زیاد*	۱۲٦۲۸٦۷	۱٥۲۹۱٥۱	۷۳/۷٦
عرض کم*	۱٦۲۲٥۰۹	۱۱۷۳۲۲۰	۸۱/۳۳
زبری زیاد*	۱٤۲۹۷٤۸	۱۳٦۳۳٤۷	۷۷/۷٦
زبری کم*	۱٥۰۹٦۱۹	۱۲۸٥۱۸۳	۸۰/۳٦
هدایت هیدرولیکی زیاد*	۱۱٥۷۰۳۸	۱٦۳٥۹۱۹	٦۷/٦۲
هدایت هیدرولیکی کم*	۱۸٤۹۲۲۰	۹٤٦۰۱۰	۹۰/۸٥
شیب زیاد*	۱٥۳۹۲٦٥	۱۲٥٥٦٥۹	۸۱/٦۰
شیب کم*	۱۲۰۸٥٦۹	۱٥۸۲٦۷٥	٦٤/٦۹
دبی اوج زیاد*	۲٦٦۹٥٦۸	۱٦۰۸۲۱۲	۱۳۳/٤۳
دبی اوج کم*	۳٥٥۰٥۱	۸۹۷۰۲٤	۲٤/۱۲

* در کلیه این موارد، مقادیر سایر پارامترها همان مقادیر پایه می‌باشند.



شکل(۷) مشخصات آبنمودهای ورودی و خروجی و نشت به ازاء مقادیر پایه پارامترهای ورودی (رودخانه زشک)

برای بررسی تحلیل حساسیت نسبی هر یک از پارامترهای ورودی بر روی پارامترهای خروجی، نمایه حساسیت تعریف شده در رابطه ۷ نیز محاسبه شد. مقادیر این نمایه برای هر یک از پارامترهای ورودی در جدول ۲ ارایه شده است. علامت منفی در جدول به منزله کوچکتر شدن مقدار خروجی به ازاء بزرگتر نمودن پارامتر ورودی می‌باشد. نتایج حاصل از جدول ۲ را می‌توان به شرح زیر گزارش نمود.

۱- تغییر در دبی اوج آبنمود ورودی می‌تواند بیشترین تأثیر را بر روی نتایج آبنمود خروجی بگذارد.

۲- اگر پارامتر طول کنار گذاشته شود، پس از دبی اوج آبنمود ورودی، به طور عملی هدایت هیدرولیکی، صرفنظر از جهت کاهشی یا افزایشی آن، بیشترین تأثیر را بر روی نتایج آبنمود خروجی دارد.

۳- به غیر از پارامتر طول، تغییر هدایت هیدرولیکی بیشترین تأثیر را بر روی حجم نشت می‌گذارد.

٤- تغییرات شیب، عرض و زبری مسیر از لحاظ مقدار، تأثیرات به طور نسبی یکسانی بر روی دبی اوج آبنمود خروجی دارند.

لازم به توضیح است که نمایه‌های حساسیت محاسبه شده، تنها نمایه‌هایی در فضای ریاضی پارامترها می‌باشند و قطعاً درک صحیحی از میزان عدم قطعیت نتایج خروجی ناشی از عدم قطعیت موجود در پارامترهای ورودی را ارایه نمی‌دهند. بررسی این موضوع نیاز به تجزیه و تحلیل عدم قطعیت و یا در شکل ساده‌تر آن تغییر پارامترها در محدوده قابل وقوعشان دارد، که‌خود پژوهش جامع دیگری را طلب می‌کند. به هر حال، پژوهشگرانی که در زمینه مدلسازی ریاضی چنین پدیده‌هایی فعالیت می‌کنند به این موضوع واقفند که اهمیت نمایه‌های جدول ۲ در این است که می‌بایست در فرآیند واسنجی پارامترهای یک مدل، به پارامترهای با نمایه حساسیت بالا توجه نمود.

جدول(۲) مقادیر نمایه حساسیت پارامترهای ورودی با در نظر گرفتن حجم و دبی اوج آبنمود خروجی و نیز حجم آبنمود نشت (رودخانه زشک)

پارامتر		طول	عرض	زبری	هدایت هیدرولیکی	شیب	دبی اوج آبنمود ورودی
نمایه حساسیت	حجم آبنمود خروجی	-۰/٦٧٧	-۰/۲٤۹	-۰/۱۹۰	-۰/٦۱٤	۰/۱٤۷	۱/٤۱٥
	دبی اوج خروجی	-۰/٤۱٤	-۰/۰۹۸	-۰/۱۱٥	-۰/۳۹۱	۰/۱٤۱	۱/۲۸۳
	حجم آبنمود نشت	۰/۸٤٤	۰/۲٦۳	۰/۲۰۷	۰/۷۱۳	-۰/۱٤۱	۰/٥۲٥

نتایج و بحث

در این مقاله با استفاده از حل عددی معادله‌های یک بعدی سنت-ونان با اعمال تلفات انتقال (تابع نشت موسکات) به آنها، روندیابی سیلاب در رودخانه‌های مناطق خشک انجام گردید. از روش تفاضل محدود ضمنی چهار نقطه‌ای برای حل عددی این معادله‌ها استفاده شد.

مدل روندیابی دینامیکی از نظر برنامه‌نویسی و دقت، موفق ارزیابی شد. مدلسازی فرآیند تلفات انتقال و برآورد نشت در اینگونه مدل‌ها موضوعی پیچیده است. اعمال تابع نشت موسکات و مدلسازی نشت به‌صورت جریان شبه‌دائمی اشباع دلیل اصلی تفاوت بین نتایج خروجی مدل و مشاهده‌های میدانی آبنمود Lane می‌باشد. به هر حال، عملکرد مدل در مدلسازی چنین پدیده پیچیده‌ای خصوصاً در برآورد احجام رضایت‌بخش است. لذا، مدل در مقایسه نسبی میزان اهمیت و تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر روندیابی جریان و تلفات انتقال در رودخانه زشک به عنوان یک مطالعه موردی به کار گرفته شد. نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که نتایج حاصل از مدل روندیابی دینامیکی نسبت به پارامترهای طول و هدایت هیدرولیکی بازه تحت مطالعه و دبی اوج آبنمود ورودی به بازه حساسیت بیشتری دارند.

مراجع

۱- بیرامی، م. ک. ۱۳۷٦. سازه‌های انتقال آب، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۲- علیـزاده، ا. ۱۳۸۱. اصـول هیـدرولوژی کـاربردی، چـاپ چهارم، دانشگاه امام رضا (ع).

3-Calver, A. 2001. Riverbed Permeabilities: Information from Pooled Data, GROUND WATER, Vol. 39, pp. 546-553.

4-Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W. 1988. *Applied Hydrology*, McGraw-Hill International Editions, 572 pp.

5-Fox, G. 2003. Improving MODFLOW's RIVER Package for Unsaturated Stream/Aquifer Flow, Proceedings of Hydrology Days, 56-67.

6-French, R.H. 1985. *Open Channel Hydraulics*, McGraw Hill Book Company, 705.

7-Harr, M.E. 1962. *Groundwater and Seepage*, McGraw Hill Book Company, 315.

8-Lane, L.J., Diskin M.H. and Renard K.G. 1971. Input-Output Relationships for an Ephemeral Stream Channel System, Journal of Hydrology, Vol. 13: 22-40.

9-Lange, J. 2005. Dynamics of transmission losses in a large arid stream channel, Journal of Hydrology, Vol. 306: 112-126.

10-Osman, Y.Z. and Bruen, M.P. 2002. Modeling stream-aquifer seepage in an alluvial aquifer: an improved loosing stream package for MODFLOW, Journal of Hydrology, Vol. 264: 69-86.

11- Vivarelli, R. and Perera, B.J.C. 2002. Transmission Losses in natural rivers and streams- a review, Proceedings of 2002 River Symposium, Brisbane, Australia.