استفاده از روش برنامه‌ریزی غیرخطی در روندیابی سیلاب و مقایسه با نتایج روش‌های هیدرولیکی موج دینامیک و هیدرولوژی ماسکینگام

رسول قبادیان[۱*]، محمد زارع[۱] و سید محمود کاشفی‌پور[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۱/۲۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۹/۲۳)

چکیده

توسعه روش‌های ساده و دقیق شبیه‌سازی سیلاب باعث کاهش خسارات مالی و تلفات جانی برجای مانده از سیلاب شده است. بدین منظور مدل‌ها و روش‌های گوناگون شبیه‌سازی سیلاب ارائه شده که اساس و پایه اکثر آنها حل معادلات جریان غیرماندگار در حالت تک‌بعدی(معادلات سنت- ونانت) است. با توجه به ساده‌سازی‌های صورت گرفته در حل آنها انواع روش‌های تقریبی، تحلیلی و عددی ارائه شده است. در این تحقیق برای روندیابی سیلاب روشی جدید که بر مبنای مفهوم بهینه‌سازی و استفاده از روش برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP) است، ارائه شده است. بدین منظور از روش تابع جریمه که ایده اساسی آن تبدیل مسایل برنامه‌ریزی غیرخطی مقید به یک رشته از مسایل بهینه‌سازی نامقید می‌باشد، استفاده شد. جهت تعیین و به تبع آن صحت‌سنجی مقادیر متغیرهای تصمیم‌گیری تابع هدف NLP از هیدروگراف سیلاب ۲۵ ساله و ۶۰ مقطع رودخانه قره سو استفاده شد. بعد از صحت‌سنجی مدل، هیدروگراف‌های ۵۰ و ۱۰۰ ساله در بازه مورد مطالعه به طول ۱۸ کیلومتر روندیابی شد و با هیدروگراف‌های به دست آمده از روش روندیابی هیدرولیکی و روش هیدرولوژی ماسکینگام مقایسه آماری شدند. نتایج نشان داد که روش NLP به خوبی هیدروگراف روندیابی شده به طریق هیدرولیکی را شبیه‌سازی می‌نماید، به گونه‌ای که ضریب نکویی برازش دبی‌های محاسبه شده به روش هیدرولیکی و NLP برای سیلاب ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله به ترتیب ۰/۹۸۴ ، ۰/۹۹ و۰/۹۸۹ می‌باشد. هم‌چنین دقت روش NLP از روش ماسکینگام به خصوص در پیش‌بینی دبی اوج لحظه‌ای سیلاب بالاتر است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی غیرخطی، روندیابی سیلاب، معادلات سنت- ونانت

۱. به ترتیب استادیار و دانشجوی سابق کارشناسی‌ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی کرمانشاه

۲. استاد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه چمران اهواز

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: r_ghobadian@razi.ac.ir

مقدمه

امروزه با توجه به سیلاب‌های به وقوع پیوسته در دنیا و خسارات مالی و تلفات جانی بر جای گذاشته، پیش‌بینی چگونگی طغیان و فروکش سیل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به منظور پیش‌بینی چنین پدیده هیدرولیکی پیچیده‌ای لازم است از روش‌های شبیه‌سازی استفاده شود. معادلات حاکم بر جریان تک‌بعدی رودخانه در شرایط غیرماندگار همان معادلات سنت- ونانت هستند که برای حل آنها با توجه به ساده‌سازی‌های صورت گرفته انواع روش‌های تقریبی، تحلیلی و عددی ارائه شده است. از جمله روش‌های تقریبی که در گذشته به فراوانی استفاده شده است روش موج سینماتیک و روش موج پخشیدگی است. تئوری روندیابی سیلاب با استفاده از روش موج سینماتیک توسط لایت هیل و ویتهام(۷) ارائه شد، در حالی که تئوری موج پخشیدگی به وسیله هیامی(۵) پیشنهاد شده است. هیامی با ساده‌سازی معادله اندازه حرکت و استخراج معادله موج پخشیدگی خطی روشی تحلیلی برای حل آن و روندیابی سیلاب ارائه نمود.

خصوصیات و کاربرد دو روش موج سینماتیک و پخشیدگی توسط محققین مختلفی از جمله پونسه (۹). وانگ وچن(۱۲) حل نیمه تحلیلی معادلات سنت- ونانت را برای روندیابی سیلاب در کانال‌ها ارائه کردند. پروما و رانگا راجو(۸) با فرض ثابت بودن شیب سطح آب در طول یک بازه کوچک از کانال، روش ماسکینگام با پارامترهای متغیر را برای روندیابی سیل در کانال‌های منشوری با مقطع ثابت و جریان‌های که معادلات مقاومت بر آنها حاکم است مستقیماً از معادلات سنت- ونانت به دست آوردند. شرمن و همکاران(۱۰) از معادله خطی شده سنت- ونانت برای تحلیل جریان در کانال باز با در نظر گرفتن اثرات پس‌زدگی آب استفاده کردند. تسای(۱۱) به صورت تئوری روندیابی سیل در حالت غیرماندگار را با در نظر گرفتن اثرات پس‌زدگی آب در یک رودخانه با شیب ملایم براساس معادلات خطی شده سنت- ونانت مورد بررسی قرار داد و پخشیدگی هیدروگراف سیل در این حالت را به شیب کم رودخانه ربط داد. مفهوم بهینه‌سازی همواره به عنوان یک اصل زیربنایی در تحلیل بسیاری از مسایل پیچیده تصمیم‌گیری پذیرفته شده است(۴). یکی از روش‌های بهینه‌سازی، بهینه‌سازی به روش NLP است. هدف مسایل NLP در شکل کلی آن پیدا کردن مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری با در نظر گرفتن محدودیت‌هاست(۶). همان‌گونه که اشاره شد حل معادلات سنت- ونانت به روش تحلیلی تنها در حالات خاص و بسیار محدودی از مسایل که بتوان معادلات مذکور را با فرضیاتی ساده نمود امکان‌پذیر است. از اینرو در این تحقیق از روش NLP به عنوان یک روش جدید در روندیابی سیلاب استفاده شده است و با نتایج حاصل از روندیابی توسط روش موج دینامیک و روش ماسکینگام مقایسه گردید. به منظور روندیابی به روش موج دینامیک یک مدل کامپیوتری تهیه شده است که درآن بازه مورد مطالعه به روش زیگزاگی(Stagger) منفصل شده است (بر خلاف مدل‌هایی که از روش تفاضل محدود چهار نقطه‌ای(Box scheme) پریزمن استفاده می‌کنند که نیازمند حل دستگاه معادلات و حافظه جانبی زیاد است). در این روش دستگاه معادلات سه قطری است و نیاز به حافظه جانبی زیادی ندارد.

مواد و روش‌ها

مدل ریاضی روندیابی سیلاب به روش موج دینامیک

روندیابی هیدرولیکی سیل در یک بازه از رودخانه با حل همزمان معادلات پیوستگی و اندازه حرکت که به معادلات سنت- ونانت معروف می‌باشند انجام می‌شود. در این تحقیق معادلات مذکور به صورت زیر استفاده شده‌اند:

معادله اندازه حرکت

$$\frac{\partial Q}{\partial t}-\frac{2\beta Q T_W}{A}\frac{\partial Z}{\partial t}+\frac{2\beta Q Q_L}{A\partial x}-\beta\frac{Q^2}{A^2}\frac{\partial A}{\partial x}=-gA\frac{\partial A}{\partial x}-g\frac{n_m^2 Q|Q|}{AR^{(4/3)}} \quad [۱]$$

معادله پیوستگی

$$\frac{\partial Q}{\partial x}+T_W\frac{\partial Z}{\partial t}=Q_L$$

[۲]

که در آنها: Q: دبی جریان، A: سطح مقطع جریان، Z: رقوم سطح آب، T_W: عرض سطح آب، β: ضریب اندازه حرکت، n_m: ضریب زبری مانینگ، R: شعاع هیدرولیکی مقطع، Q_L: دبی جریان ورودی یا خروجی (ورودی مثبت و خروجی منفی) است. با استفاده از روش تفاضل‌های محدود(Finite difference) معادلات بالا منفصل شده‌اند. بازه رودخانه به صورت شبکه زیگزاکی (Staggered grid) گره‌بندی شده است بدین صورت که اگر شرط مرزی بالادست هیدروگراف دبی و شرط مرزی پایین دست رابطه دبی اشل باشد معادله پیوستگی روی مقاطع با شماره زوج و معادله اندازه حرکت روی مقاطع با شماره فرد منفصل شده‌اند. پس از منفصل کردن معادله پیوستگی روی هریک ازگره‌های مورد نظر رابطه خطی زیر حاصل می‌شود:

$$a_{pi}\times Q^{n+1}{}_{i-1}+b_{pi}\times Z^{n+1}{}_{i}+c_{pi}\times Q^{n+1}{}_{i+1}=d_{pi}$$

[۳]

که در آن:

$$a_{pi}=-\frac{\theta}{x_{i+1}-x_{i-1}}=-c_{pi}\qquad b_{pi}=\frac{T^{n}{}_{w_i}}{\Delta t}$$

$$d_{pi}=-\frac{(1-\theta)(Q^{n}{}_{i+1}-Q^{n}{}_{i-1})}{x_{i+1}-x_{i-1}}+\frac{T^{n}{}_{W_i}\times Z^{n}{}_{i}}{\Delta t}+\frac{Q_L^{n+1}{}_{i}}{x_{i+1}-x_{i-1}}$$

هم‌چنین منفصل‌کردن معادله اندازه حرکت رابطه خطی زیر را نتیجه می‌دهد:

$$a_{mi}\times Z^{n+1}{}_{i-1}+b_{mi}\times Q^{n+1}{}_{i}+c_{mi}\times Z^{n+1}{}_{i+1}=d_{mi}$$

[۴]

که در آن:

$$a_{mi}=-\frac{\beta Q^{n}{}_{i}T^{n}_{W_i}}{A_i^n\times\Delta t}-\frac{gA_i^n\theta}{x_{i+1}-x_{i-1}}$$

$$b_{mi}=\frac{1}{\Delta t}+\frac{2\beta\theta Q_L^{n+1}{}_{i}}{(x_{i+1}-x_{i-1})A_i^n}-\frac{\beta Q_i^n}{(A_i^n)^2}\times\frac{A_{i+1}^n-A_{i-1}^n}{x_{i+1}-x_{i-1}}+\frac{gQ_i^n n_{m_i}{}^2}{A_i^n R_i^{4/3}}$$

$$c_{mi}=-\frac{\beta Q^{n}{}_{i}T^{n}_{W_i}}{A_i^n\times\Delta t}+\frac{gA_i^n\theta}{x_{i+1}-x_{i-1}}$$

$$d_{mi}=\frac{Q_i}{\Delta t}+\frac{2\beta(1-\theta)Q_L^{n+1}{}_{i}}{(x_{i+1}-x_{i-1})A_i^n}-\frac{\beta Q_i^n T^n_{W_i}(Z^{n}{}_{i+1}+Z^{n}{}_{i-1})}{A_i^n\Delta t}$$
$$-gA_i^n(1-\theta)\frac{Z_{i+1}^n-Z_{i-1}^n}{x_{i+1}-x_{i-1}}$$

در روابط فوق n و n+1 نشان‌دهنده گام‌های زمانی و θ پارامتر وزنی مربوط به زمان است که اگر برابر با صفر در نظر گرفته شود روش کاملاً صریح و اگر یک باشد روش کاملاً ضمنی برای منفصل‌کردن استفاده شده است $\theta=0/5$ همان روش کرنک- نیکلسون است. برای حل معادلات ۳ و ۴ و به‌دست‌آوردن دبی و عمق جریان در مقاطع مورد نظر در هر زمان مطلوب یک مدل کامپیوتری در محیط ویژوال بیسیک نوشته شده است که در آن دستگاه معادلات سه قطری حاصل شده با الگوریتم ماتریس سه قطری(TDMA) حل می‌شود.

روندیابی سیلاب با استفاده از NLP

هدف اصلی NLP در شکل کلی آن پیدا کردن مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری با در نظر گرفتن محدودیت‌هاست. در فرمول‌بندی این مسایل هدف پیدا کردن یک نقطه تکین مطلق است ولی واقعیت چه از نظر محاسباتی و چه از لحاظ نظری، در بسیاری مواقع رضایت دادن به نقطه تکین نسبی است. به عنوان مثال هنگام جستجوی نقطه کمینه با استفاده از یک روش مرحله‌ای همگرا شونده، مقایسه مقادیر نقاط همجوار تنها راه حل ممکن است(۴). شکل کلی مسایل NLP به صورت زیر است:

$$\min f(x)$$
$$s.t: h_1(x)=0, h_2(x)=0,\ldots,h_n(x)=0 \qquad [۵]$$
$$x\in\Omega\subset E^n$$

که در آن $h_i(x)$ مجموعه محدودیت‌ها، f(x) تابع هدف و x متغیرهای تصمیم هستند. توابع f و h_i پیوسته هستند. برای به دست آوردن جواب‌های بهینه مسایل غیرخطی مقید، تکنیک‌های مختلف جبر ماتریسی و جبر عددی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله این روش‌ها روش تابع جریمه است که با استفاده از این روش به حل مسایل NLP پرداخته می‌شود. ایده اساسی روش تابع جریمه تبدیل مسایلNLP مقید به یک

رشته از مسایل بهینه‌سازی نامقید است. اساس این روش افزودن یک یا چند تابع قیدی به تابع هدف به منظور حذف قیود می‌باشد(۴). بدین صورت رابطه ۵ به شکل زیر تبدیل می‌شود:

$$\min f(x)+\mu(k)[E(k)]^{\rho}\ k=1,2,\ldots,N \qquad [۶]$$

که در آن: μ(k): پارامتر جریمه در مرحله k، E(k) : میزان انحراف از محدودیت‌ها در مرحله k و ρ: توان میزان انحراف از محدودیت‌هاست (همواره بزرگ‌تر یا مساوی ۲ می‌باشد). اگر میزان انحراف از محدودیت‌ها در این مرحله کمتر از میزان خطای قابل قبول مدل(δ) باشد، x(k) جواب بهینه در مرحله k است در غیر این‌صورت:

$$\mu(k+1)=\beta\mu(k) \qquad [۷]$$

که در آن: β : مقدار ثابت است. این کار تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که میزان انحراف از محدودیت‌ها به توان عدد مثبت ρ کمتر از میزان خطای قابل قبول مدل(δ) شود. برای شروع مقادیر ρ، β، δ، μ(۱) و X(۱) به مدل داده می‌شود سپس برای تابع هدف نامقید (رابطه ۶) مقادیر بهینه برآورد می‌شود.

لازم به ذکر است که روش تابع جریمه یک روش عددی همگراشونده به سمت جواب می‌باشد به عبارت دیگر تا قبل از رسیدن به جواب بهینه، جواب‌های هر مرحله نسبت به مرحله قبل از خود به جواب بهینه نزدیک‌تر می‌شوند، جواب‌های نهایی نسبت به مقادیر اولیه داده شده به مدل حساس نیستند و در صورتی که مقادیر اولیه داده شده به مدل بسیار دور از واقعیت باشند ولی شرایط بالا را داشته باشند، فقط تعداد مراحل رسیدن به جواب بهینه بیشتر می‌شود، در این تحقیق نیز با توجه به سهمی شکل بودن هیدروگراف (معادله درجه ۲) مقدار ρ برابر ۲ در نظر گرفته شده است. با توجه به این‌که متغییرهای تصمیم‌گیری ضرایب C_1، C_2 و C_3 هستند و این اعداد همواره بین ۱ و ۱- می‌باشند جواب‌های اولیه x(1) را برای هر ۳ ضریب صفر در نظر گرفته شده است. پس با توجه به ماهیت مسأله می‌توان مقادیر اولیه را نزدیک به جواب‌های بهینه انتخاب نمود تا تعداد مراحل رسیدن به جواب‌های بهینه نهایی کمتر شود. به منظور استفاده از روش NLP در روندیابی سیلاب بدون در نظر گرفتن تلفات نفوذ و جریان‌های جانبی تابع هدف به صورت زیر تعریف شده است:

$$\min f(x)=\left|\hat{V}-V\right| \qquad [۸]$$

که در آن: $\hat{V}$ حجم مربوط به هیدروگراف ورودی به بازه و V حجم زیر هیدروگراف خروجی روندیابی شده است. با الهام گرفتن از روندیابی سیلاب به روش‌های موج پخشیدگی و ماسکینگام قیود برنامه که تعداد آنها برابر با تعداد نقاط هیدروگراف خروجی یا ورودی(m=۴۲) هستند و شامل رابطه بین هیدروگراف سیل ورودی و هیدروگراف سیل خروجی می‌باشند، به صورت رابطه ۹ تعریف می‌شوند:

$$Q_{j+1}=C_1I_{j+1}+C_2I_j+C_3Q_j\ j=1,2,\ldots,mm=42 \qquad [۹]$$

در معادله بالا j اندیس زمانی، I دبی جریان ورودی به بازه و Q دبی خروجی از آن می‌باشد. C_1، C_2 و C_3 ضرایب روندیابی هستند. حجم رواناب حاصل از هیدروگراف خروجی از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود:

$$V=0.5\sum_{i=1}^{n}(Q_i+Q_{i+1})\Delta t \qquad [۱۰]$$

که در آن Δt بازه زمانی از j تا j+1 می‌باشد. با جایگزینی رابطه ۱۰ در رابطه ۸ تابع هدف بر حسب متغیرهای تصمیم‌گیری یا ضرایب روندیابی C_1، C_2 و C_3 که هدف اصلی پیدا کردن مقادیر بهینه آنها توسط NLP می‌باشد، به‌دست می‌آید. در این تحقیق برای به دست آوردن مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری، تابع هدف و ۴۲ قید مربوط (به صورت رابطه ۹) به آن در محیط نرم‌افزار WINQSB نوشته شده است. برای ارزیابی دقت مدل از شاخص‌های آماری ضریب نکویی برازش (رابطه ۱۱) و متوسط خطای نسبی (رابطه ۱۲) استفاده گردید:

$$R^2=\left(\frac{(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{(x_i-\bar{x})^2(y_i-\bar{y})^2}}\right)^2 \qquad [۱۱]$$

$$AAE=\frac{1}{N}\left(\sum_{i=1}^{N}\frac{\left|y_i-x_i\right|}{x_i}\right) \qquad [۱۲]$$

شکل ۱. پلان مسیر رودخانه قره سو

که در آن: x_i دبی روش هیدرولیکی، $\bar{x}$ میانگین مقادیر دبی روش هیدرولیکی، y_i مقدار دبی محاسبه شده به روش NLP یا روش ماسکینگام، $\bar{y}$ میانگین مقادیر محاسبه شده به روش NLP یا روش ماسکینگام و N تعداد داده‌ها می‌باشد. هر اندازه R^2 به یک نزدیک‌تر و AAE به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده دقت بالاتر روش برآورد دقیق هیدروگراف سیل است.

محدوده مورد مطالعه

به منظور رسیدن به اهداف این تحقیق بازه‌ای از رودخانه قره‌سو که بین دو ایستگاه دوآب قزانچی و پل امام حسین به طول۱۸٫۳ کیلومتر قرار گرفته است انتخاب شد(شکل ۱). در این بازه تعداد ۶۰ مقطع برداشت شده است که مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث

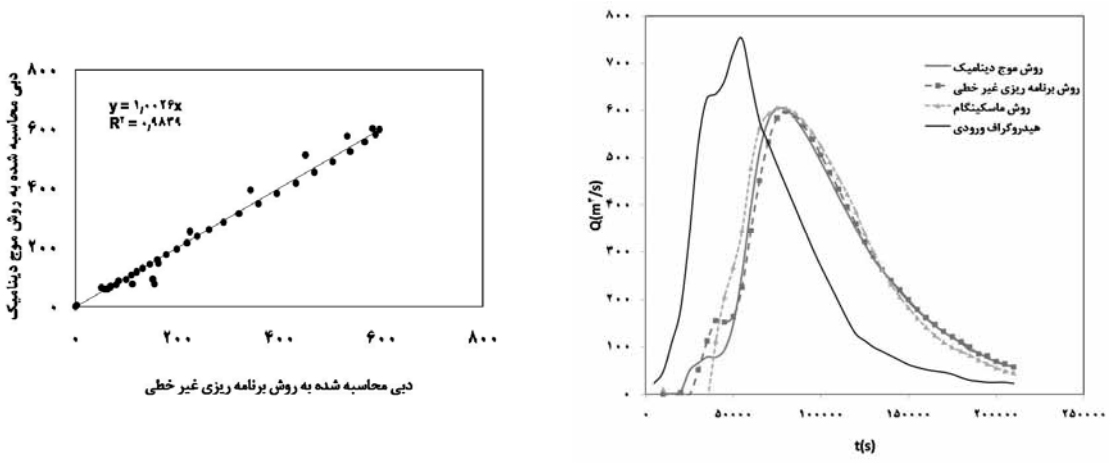
صحت‌سنجی دقیق مدل موج دینامیک و اطمینان از توانایی بالای آن در شبیه‌سازی جریان ماندگار و غیرماندگار در بازه مورد نظر این تحقیق، در منبع ۳ ارائه شده است. در ادامه به بررسی و مقایسه نتایج حاصل از روش موج دینامیک و NLP پرداخته می‌شود. با توجه به این‌که در ورودی و خروجی بازه مورد مطالعه هیدرگراف سیل اندازه‌گیری شده وجود ندارد از هیدروگراف سیل ۲۵ ساله در ابتدای بازه که از مطالعات هیدرولوژی به دست آمده استفاده شد(۱) و هیدروگراف خروجی از بازه توسط روش موج دینامیک محاسبه شد. سپس با استفاده از هیدروگراف سیل ۲۵ ساله ورودی و خروجی به کمک NLP متغیرهای تصمیم‌گیری C_1، C_2 و C_3 محاسبه شد. برای محاسبه متغیرهای تصمیم‌گیری مذکور، ضرایب ثابت و پارامترهای اولیه روش تابع جریمه NLP مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شد. سپس مقادیر بهینه ضرایب C توسط NLP مطابق جدول ۲ به دست آمد. با توجه به ضرایب C به‌دست‌آمده از NLP هیدروگراف سیل خروجی از بازه با دوره برگشت ۲۵ ساله که توسط روش NLP محاسبه شده است به همراه هیدروگراف روندیابی شده با روش هیدرولیکی و روش هیدرولوژی ماسکینگام در شکل ۲- الف نشان داده شده است. لازم به ذکر است که داده‌های هیدروگراف روندیابی شده به

جدول۱. ضرایب ثابت و پارامترهای اولیه روش تابع جریمه

پارامتر	ρ	δ	β	μ	X(1)
مقدار	۲	۰٫۰۰۰۱	۰٫۱	۱	۰

جدول۲. ضرایب c محاسبه شده برنامه‌ریزی غیرخطی

ضریب	C_3	C_2	C_1
مقدار بهینه	۰٫۸۶۰۴	۰٫۳۴۴۲	-۰٫۲۰۴۶

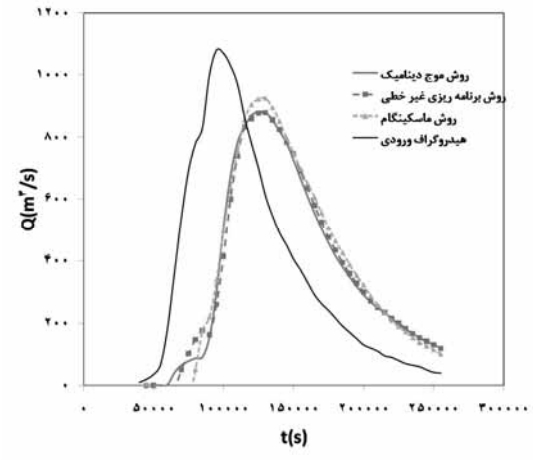


الف ب

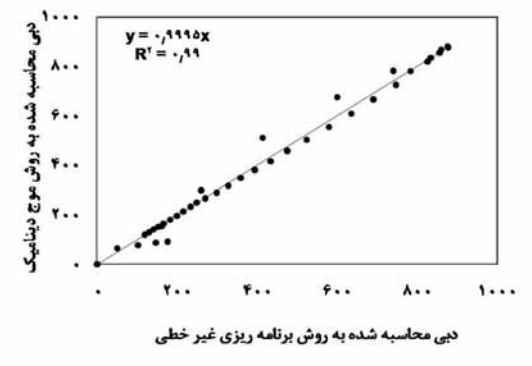
شکل ۲. الف) هیدروگراف‌های روندیابی شده با استفاده از روش‌های هیدرولیکی، NLP و ماسکینگام برای سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ سال و ب) مقادیر دبی سیلابی محاسبه شده به روش هیدرولیکی در مقابل NLP

روش ماسکینگام از منبع (۲) که روی بازه مورد نظر این تحقیق انجام شده بود، برداشت شده است. مقادیر دبی سیلابی محاسبه شده به روش هیدرولیکی و NLP در شکل ۲- ب در مقابل هم ترسیم شده‌اند. هر چند در ادامه مقایسه‌های آماری انجام می‌شود، با این وجود شکل‌های مذکور نشان می‌دهد نتایج NLP با روش روندیابی هیدرولیکی بسیار نزدیک هستند. دبی اوج لحظه‌ای سیلاب و زمان رسیدن به اوج بر هم منطبق هستند که نشان از دقت بسیار بالای روش NLP حتی در مقابل روش ماسکینگام دارد. به منظور صحت‌سنجی مقادیر پارامترهای به دست آمده از هیدروگراف‌های سیلاب با دوره برگشت ۵۰ و ۱۰۰ ساله استفاده شد.

هیدروگراف‌های مذکور با روش‌های هیدرولیکی و NLP روندیابی شده و با هم مقایسه شدند. هم‌چنین هیدروگراف‌های روندیابی شده توسط روش هیدرولوژی نیز که از منبع ۲ استخراج شده‌اند در این مقایسه‌ها مورد استفاده قرار گرفت (شکل‌های ۳ و۴). همان‌طور که در شکل‌های ۳ و ۴ دیده

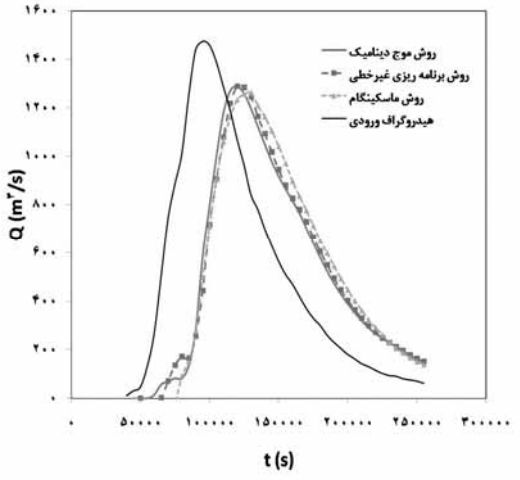


الف

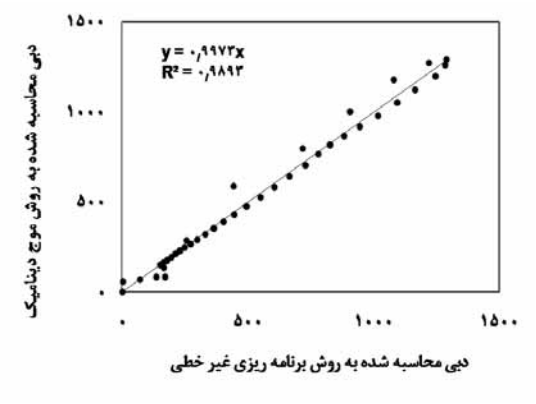


ب

شکل ۳. الف) هیدروگراف‌های روندیابی شده با استفاده از روش‌های هیدرولیکی، NLP و ماسکینگام برای سیلاب با دوره بازگشت ۵۰ سال و ب) مقادیر دبی سیلابی محاسبه شده به روش هیدرولیکی در مقابل NLP



الف



ب

شکل ۴. الف) هیدروگراف‌های روندیابی شده با استفاده از روش‌های هیدرولیکی، NLP و ماسکینگام برای سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ سال و ب) مقادیر دبی سیلابی محاسبه شده به روش هیدرولیکی در مقابل NLP

می‌شود روش NLP هیدروگراف خروجی و به‌خصوص دبی اوج لحظه‌ای آن را (جدول ۳) که در طراحی سازه‌های هیدرولیکی و حریم بستر رودخانه اهمیت دارد، با دقت بسیار بالا پیش‌بینی می‌نماید. همان‌طور که در جدول ۴ دیده می‌شود، دقت این روش از روش ماسکینگام نیز بهتر است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود مقادیر ضریب نکویی برازش در روش NLP بسیار به یک نزدیک است. هم‌چنین متوسط خطای نسبی در مقایسه با روش ماسکینگام کمتر می‌باشد.

جدول۳. دبی‌های اوج لحظه‌ای محاسبه شده در هریک از روش‌های روندیابی

دبی اوج هیدروگراف (m^3/sec)	موج دینامیک	ماسکینگام	درصد خطای روش ماسکینگام	NLP	درصد خطای روش NLP
سیلاب۲۵ ساله	۶۰۲	۶۰۵	۰٫۵	۵۹۷	۰٫۸
سیلاب۵۰ ساله	۸۸۱	۹۲۵	۴٫۷	۸۷۷	۰٫۴
سیلاب۱۰۰ ساله	۱۲۸۸	۱۲۶۳	۲	۱۲۸۸	۰

جدول۴. پارامترهای آماری محاسبه شده از مقایسه دبی برآورد شده به روش NLP نسبت به دبی روش موج دینامیک

دوره برگشت	۲۵ سال		۵۰ سال		۱۰۰ سال	
پارامتر	NLP	ماسکینگام	NLP	ماسکینگام	NLP	ماسکینگام
R^2	۰٫۹۸	۰٫۹۶	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۹	۰٫۹۶
AAE	۰٫۲	۱	۰٫۳	۱٫۲	۰٫۱	۱٫۵

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور مقایسه نتایج حاصل از روندیابی سیلاب به روش NLP با روش هیدرولیکی موج دینامیک، مدلی کامپیوتری بر مبنای حل کامل معادلات سنت- ونانت نوشته شد که درآن معادلات مذکور به روش عددی تفاضل‌های محدود بر روی شبکه زیگزاگی، منفصل و ماتریس حاصل با الگوریتم توماس حل شد. مدل مذکور با روش‌های مختلف مورد صحت سنجی و ارزیابی دقیق قرار گرفت. پس از صحت سنجی مدل هیدرولیکی سه سیلاب ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله در بازه‌ای از رودخانه قره‌سو کرمانشاه به طول حدود ۱۸ کیلومتر با۶۰ مقطع عرضی برداشت شده به روش هیدرولیکی روندیابی شد و هیدروگراف خروجی انتهای بازه محاسبه گردید. با استفاده از روش NLP برای دبی ۲۵ ساله متغیرهای تصمیم‌گیری بهینه محاسبه گردید. سپس با متغیرهای تصمیم‌گیری بهینه به‌دست‌آمده هیدروگراف‌های سیلاب ۵۰ و ۱۰۰ ساله در بازه مذکور روندیابی شد و با نتایج روش هیدرولیکی موج دینامیک مقایسه شدند. هم‌چنین از تحقیقات قبلی نتایج روش هیدرولوژی ماسکینگام که در بازه مذکور انجام شده بود استخراج گردید وبا روش NLP نیز مقایسه شد.

مقایسه‌های آماری نشان داد که می‌توان از روش NLP به عنوان یک روش مطمئن برای روندیابی سیلاب در رودخانه‌ها استفاده نمود، بدین صورت که با اندازه‌گیری دبی جریان در یک سیل به وقوع پیوسته در ورودی و خروجی بازه می‌توان مقادیر ضرایب C_1، C_2 و C_3 را با استفاده از روش NLP به دست آورد و از این ضرایب برای روندیابی سیلاب‌های آینده که فاقد اندازه‌گیری همزمان در ورودی و خروجی هستند و فقط مقدار سیلاب ورودی معلوم است، استفاده نمود. علاوه بر این با مقایسه نتایج به دست آمده از روش NLP و روش هیدرولوژی ماسکینگام می‌توان به دقت

روش NLP در مقایسه با روش ماسکینگام به ویژه در برآورد دبی اوج لحظه‌ای پی برد. در ضمن دیگر نیازی به روش‌های آزمون و خطا برای به دست آوردن ضرایب k و x ماسکینگام نیست و مستقیماً مقادیر ضرایب C با روش NLP به دست می‌آیند.

منابع مورد استفاده

۱. جهاندیده، ک. ۱۳۸۹. شبیه‌سازی فرآیند بارش رواناب در حوضه آبریز با استفاده از WMS. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد آبیاری و زه‌کشی، دانشگاه رازی کرمانشاه.

۲. سبعه، ع.، ر. قبادیان و ک. جهاندیده. ۱۳۸۸. تعیین ضرایب بهینه روش ماسکینگام جهت روندیابی سیلاب رودخانه قره‌سو. هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه اهواز، بهمن ۱۳۸۸، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳. قبادیان، ر. ۱۳۹۰. روندیابی سیلاب وتخمین تلفات نشت در رودخانه‌های فصلی با حل همزمان معادلات جریان غیرماندگار و نشت. مجله آب وخاک دانشگاه فردسی مشهد. ۲۵(۲): ۳۰۴-۲۹۶

۴. لوینبرگ، د. ۱۳۷۹. *برنامه‌ریزی خطی غیرخطی*. ترجمه مهدوی، ن. و م. پورکاظمی. انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، تهران.

5. Hayami,S. 1951. On the propagation of flood wave. Bulletin 1. Disaster prevention Institute, Kyoto Unv. pp. 1-16
6. Karamouz, M., F. Szidarovszky and B. Zahraei. 2003. Water Resources Systems Analysis. Lewis Pub., USA.
7. Light hill, M.J. and G.B. Whitham. 1955. On kinematical wave: flood movement in long river. Proceeding of the Royal Society of London, series A 229, pp. 228-316.
8. Peruma, M. and K.G. Ranga Raju. 1998. Variable- parameter stage hydrograph routing method: 1. Theory. J. Hydrol. Eng. ASCE 3(2): 115-121.
9. Ponce, V. M. 1979. Simplified Muskingum routing equation J. Hydraul. Div. ASCE, 105(HY1): 85-91.
10. Schuurmans, J., O.H. Bosgra and R. Brouwer. 1995. Open channel flow model approximation for controller design. Appl. Math. Model. 19(9): 525-530.
11. Tsai, C.W. 2005. Flood routing in mild-slope rivers-wave characteristics and downstream back water effect. J. Hydrol. 308: 151-157.
12. Wang, G.T. and S. Chen. 2003. A semi analytical solution of the Saint-Venant equation for channel flood routing. Water Resour. Res. 39(7)

Using Nonlinear Programming for Flood Routing and Comparing the Results with those of Dynamic Wave Hydraulic and Muskingum Hydrological Methods

R. Ghobadian[1]*, M. Zare[1] and S. M. Kashefipour[2]

(Received : Feb. 14-2010 ; Accepted : Dec. 14-2011)

Abstract

Development of precise and simple methods in flood simulation has greatly reduced financial damage and life loss. Various methods and procedures have been implemented based on Saint-Venant's one-dimensional equation governing unsteady flows. To simplify the solution for these flows, analytical and numerical methods have been used. In the present study, a new method that provides the optimal outcome is introduced using non-linear programming. Penalty function has also been used to convert nonlinear programming (NLP) constrained problems into unconstrained optimal issues. To verify the accuracy of decision variables, the study covered 60 cross-sections of Gharasu River and 25-year flood hydrographs. After determining the model correctness, the 50 and 100-year flood hydrograph were routed in 18 Kilometers. The results were statistically compared with hydraulic and Muskingum hydrological methods. To sum up; the routed hydrographs introduced by NLP method were very close to the hydrographs produced by dynamic wave method. The R^2 of calculated discharge of routed hydrograph by NLP and dynamic wave method were 0.948, 0.990, and 0.989, respectively, with the return period of 25, 50 and 100-year flood being 0.989. It can be concluded that NLP method is more accurate than Muskingum method, especially when predicting the peak discharge of flood hydrograph.

Keywords: Flood routing, Nonlinear programming, Saint-Venant equations.

1. Assis. Prof. and Former MSc. Student of Water Resour. Eng. Respectively, College of Agric., Razi Univ., Kermanshah, Iran.
2. Assoc. Prof. of Water Struc., College of Water Eng. Sci., Shahid Chamran Univ. of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
*: Corresponding Author, Email: r_ghobadian@razi.ac.ir