استفاده از مدل آنالوگ مايع در آموزش هيدرولوژي مهندسي
الف: مدلسازي بارش – رواناب

وحيد نوراني استاديار دانشكده مهندسی عمران، دانشگاه تبريز
يوسف حسنزاده استاد دانشكده مهندسی عمران، دانشگاه تبريز
پرويز منجمي استاديار بخش مهندسي راه و ساختمان، دانشكده مهندسي، دانشگاه شيراز

چكيده

آموزش صحيح متخصصين هيدرولوژي در زمينه مدلسازي بارش- رواناب مي‌تواند نقش بسزايي در فايق آمدن بر مشكلات وافر سيلاب داشته باشد. در اين مقاله بعد از معرفي مدل آنالوگ مايع به عنوان يك مدل آنالوگ جديد در زمينه هيدرولوژي كه براساس مدل مخزن خطی پايهريزی شده است، نحوه مقياس و ساخت آزمايشگاهي آن ارائه و سپس چگونگي استفاده از آن براي شبيهسازي مدل بارش- رواناب ناش (Nash) براي يك حوضة واقعي، بررسي اثر شكل حوضه در هيدروگراف خروجي و همينطور تأثير جهت حركت بارش بر پاسخ حوضه به طور جداگانه مورد بررسي واقع مي‌شوند. با توجه به ساختار ساده، استفاده آسان و خاصيت ديداري مدل، اين مدل ميتواند يك ابزار كمك آموزشي مناسب در زمينه آموزش مدلسازي بارش - رواناب باشد.

كلمات كليدی: آموزش مهندسي، ابزار كمك آموزشي، مدلهاي فيزيكي، مدل آنالوگ، مدلسازي بارش - رواناب، مخزن خطي.

Application of Liquid Analog Model for Hydrology Education
1: Rainfall- Runoff Modeling

V. Nourani and Y. Hassanzadeh
Faculty of Civil Eng., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran
P. Monadjemi Dept. of Civil Eng., Faculty of Eng., Shiraz Univ., Shiraz, Iran

Abstract

The deep and correct education of rainfall-runoff modeling can be a reliable way to overcome on huge risk of flood disaster. In this paper after introducing liquid analog model as a new hydrological analog model in which is established on the basis of linear reservoir model, the circumstances of its scaling and construction in the laboratory are originally described, then its applications for laboratory simulation of Nash's rainfall-runoff model, the effect of the watershed shape on the output hydrograph and the response of a watershed to the storm movement direction are extensively discussed. Consequently, due to simple structure, visible property and convenient operation of liquid model, it can be considered as an educational instrument in hydrology.

Key words: Engineering education, Teaching aid tools, Physical models, Analog models, Rainfall-runoff modeling, Linear reservoir.

۱- مقدمه

به سبب اينكه جوامع بشري همواره از نظر جاني و مالي توسط سيلاب مورد تهديد قرار گرفته‌اند، مدلسازي بارش- رواناب از دير باز مورد توجه متخصصين علم هيدرولوژي بوده و بيشك آموزش صحيح افرادي كه عهده‌دار رويارويي با سيلاب خواهند بود مي‌تواند كمك شاياني در راستاي پيشبيني، پيشگيري و كاهش ضرر در مواجه با اين خطر طبيعي داشته باشد. روشهاي متداول و سنتي تدريس كه معمولاً بر مبناي گفتگوي يك طرفه استاد قرار دارند، در رسيدن به اهداف عمده آموزشي درك كردن، ضعيف و به كار بردن، عاجز هستند، بنابراين بايد در رشته‌هاي مختلف تحصيلي ابزار و روشهايي بكار گرفته شوند كه اهداف يادگيري را برآورده سازند [۱]. از آنجاييكه در حالت كلي يادگيري را به تغيير رفتار از راه تجربه معني ميكنند [۲]، لازم است شرايطي مهيا گردد كه امكان تجربه كردن براي يادگيرنده در جهت نيل به اهداف آموزشي ذكر شده امكانپذير باشد. شايد بتوان مدلهاي فيزيكي كه به سادگي ساخته و به آساني مورد استفاده قرار مي‌گيرند را بهترين ابزار كمك آموزشي دانست كه امكان تجربه‌هاي متعدد را نيز مقدور مي‌سازند؛ در زمينه مهندسي هيدرولوژي نيز مدلهاي فيزيكي به دو صورت مدلهاي تمثيلي (Iconic) و آنالوگ (Analog) كاربرد فراواني در جهت آموزش و پژوهش دارند [۳].

با توجه به پيچيدگي فرايند بارش – رواناب، معمولاً براي مدلسازي اين فرايند از مدلهاي تفهيمي (Conceptual) استفاده مي‌شود كه براساس نحوه كار سيستم مطالعاتي ساخته و شامل پارامترهايي هستند كه بايستي تخمين زده شوند. يكي از مهمترين زير شاخه‌هاي مدلهاي تفهيمي، مدل مخزن خطي است كه بيانگر وجود يك رابطه خطي بين جريان خروجي و ذخيره مخزن به صورت زير مي‌باشد [۴]:

$$S=KO \qquad (۱)$$

كه O، S و K به ترتيب دبي خروجي، حجم مخزن و ضريب ذخيره مخزن ميباشند. در اين روش يك حوضة آبريز و يا يك كانال توسط چند مخزن خطي به صورت سري، موازي و يا مختلط جايگزين شده و عمل روند يابي جريان صورت مي‌پذيرد. با استفاده از اين مفهوم، مدلهاي آنالوگ متعددي براي شبيه‌سازي فرايند بارش-رواناب ساخته شده‌اند كه مي‌توان به كارهاي تئوريك جكسون [۵] و كوئيك [۶] در استفاده از مدلهاي آنالوگ الكتريكي و مكانيكي و كار آزمايشگاهي جامع *شن* [۷] با استفاده از مدل آنالوگ الكتريكي اشاره نمود. عليرغم پيشرفت مدلهاي كامپيوتري متعدد كه هر كدام داراي معايب و مزاياي خاص خودش مي‌باشد [۸]، استفاده از مدل آنالوگ به تنهايي و يا همراه با روشهاي مدرن نه تنها مي‌تواند در فهم و درك بهتر فرايندهاي هيدرولوژيكي مثمر ثمر واقع گردد [۹]، بلكه براي آموزش بهتر ساير مسائل رياضيات كاربردي نيز مورد استفاده قرارگيرد [۱۰].

در اين مقاله بعد از معرفي مدل آنالوگ مايع و معادلات حاكم، چگونگي ساخت و مقياس مدل در آزمايشگاه براي اولين بار تشريح و سپس نحوه استفاده از اين مدل به عنوان يك ابزار كمك آموزشي براي بررسي چند مسئله مدلسازي بارش-رواناب توضيح داده مي‌شود.

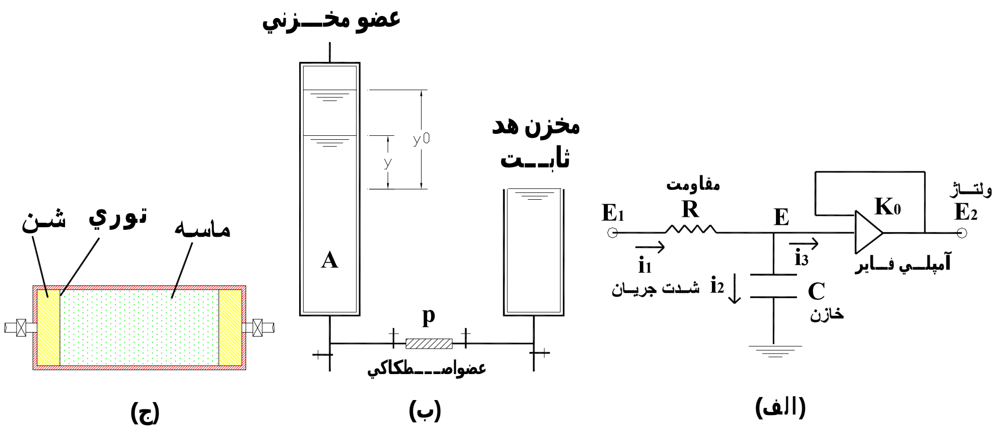
۲- مدل آنالوگ مايع و معادلات حاكم

مدل آنالوگ مايع (Liquid Analog Model) كه توسط يكي از مولفين اختراع و به ثبت رسيده است [۱۱] براساس چند قانون ساده هيدروليكي از جمله مخزن خطي و معادله پيوستگي بنا شده و آنرا مي‌توان مشابه مدلهاي آنالوگ الكتريكي و مكانيكي دانست كه به ترتيب براساس قوانين كيرشهوف و نيوتن ساخته شده‌اند. دو سيستم آنالوگ هستند هرگاه معادلات حاكم بر آنها مشابه هم باشند. عناصر تشكيل‌دهنده هر مدار آنالوگ مايع عبارتند از يك مخزن، يك عضو اصطكاكي و يك مخزن هد ثابت كه توسط لوله‌هاي كوتاه و قطور كه رژيم جريان در آنها آرام باشد به همديگر وصل مي‌شوند و عنصر مخزن بايستي مدرج باشد تا بتوان ارتفاع آب (مايع) را در زمانهاي مختلف قرائت كرد. هر چند كه هر نوع مايعي مي‌تواند در اين مدل مورد استفاده قرار گيرد ولي بهتر است از آب به دليل در دسترس و ارزان بودن و آساني كاركردن با آن، استفاده شود.

در شكل (۱-الف) و (۱- ب) يك مدار آنالوگ الكتريكي و يك مدار آنالوگ مايع كه با همديگر متشابهند نشان داده شده‌اند، به طوريكه عضو مخزني و اصطكاكي در مدل آنالوگ مايع به ترتيب داراي همان نقش خازن و مقاومت در مدل آنالوگ الكتريكي هستند [۱۱]. شكل (۱- ج) يك عضو اصطكاكي مدل آنالوگ مايع را نشان مي‌دهد، اين عنصر براساس قانون حركت

آب در محیط متخلخل (قانون‌دارسي) طراحـي مـي‌شـود، بـدين ترتيب كه يك توده ماسه با ضريب هدايت هيـدروليكي معلـوم c داخل يك محفظه به طول l و سطح مقطع a قرار گرفته سـپس دو انتهاي آن توسط توده شنهاي درشت دانه مسدود مـي‌شـوند، البته بـراي جلـوگيري از نفـوذ ماسـه در شـن بايـستي از تـوري مناسب بين دو توده خاك استفاده شود. با توجه به سرعت پايين جريان در لـوله‌ها و مخازن و همينطور كوتاهي لوله‌ها، افتهاي طولي و موضعي در مدار قابل صـرفنظـر كـردن خواهـد بـود. بـا استفاده از قانون دارسي، دبي آب عبوري از عنصر اصطكاكي كـه داراي اختلاف هد y مي‌باشد، به صورت زير قابل محاسبه است:

$$Q=V.a=c\frac{y}{l}a=p.y \qquad (۲)$$



شکل ۱- (الف) مدار آنالوگ الكتريكي (ب) مدار آنالوگ مايع (ج) عنصر اصطكاكي مدار آنالوگ مايع

كه V سرعت جريان در عـضو اصـطكاكي و $\frac{c.a}{l}$ مقـداري ثابـت است كه مساوي با p در نظر گرفته مي‌شود و داراي بعد $\left[\frac{L^2}{T}\right]$ مي‌باشد. از آنجاييكه سطح مقطع مخزن (A) ثابت است، معادلـه (۲) بيانگر يك رابطه مستقيم خطي بين خروجي و حجم مخـزن بوده و متضمن مفهوم مخزن خطي مـي‌باشـد. مخـزن هـد ثابـت بـراي ثـابت نگه‌داشتن سطح آب در انتهاي هر مدار يـا سيـستم به كار رفته و مانع از پر و خالي شدنهاي متناوب عضو اصـطكاكي شده و باعث مي‌شود عضو اصطكاكي همواره در حالت اشباع باقي بماند، اين عضو از لحاظ رياضي مشابه با آمپلـي فـاير بـا ضـريب بهره واحد در مدل آنـالوگ الكتريكـي اسـت (شـكل ۱-الـف). بـا استفاده از رابطه مخزن خطي (۲) و معادله پيوستگي بـه صـورت زير:

$$I-Q=\frac{dS_A}{dt} \qquad (۳)$$

كه t، Q، I و S_A به ترتيب زمان، دبي خروجي، دبي ورودي و حجم آب در مخزن مدل آنالوگ مايع مي‌باشند، معادله ديفرانسيل حاكم بر يك مدار آنالوگ مايع استخراج مي‌شود:

$$I-Q=\frac{dS_A}{dt}\rightarrow A\frac{dy}{dt}+py=I\rightarrow \frac{A}{p}\frac{dy}{dt}+y=\frac{I}{p} \qquad (۴)$$

يا

$$\frac{A}{p}\frac{dQ}{dt}+Q=I \qquad (۵)$$

به طور مشابه مي‌توان معادله ديفرانسيل حاكم بر يك مدار آنـالوگ الكتريكي را با استفاده از قانون كيرشهوف به دست آورد [۱۲]:

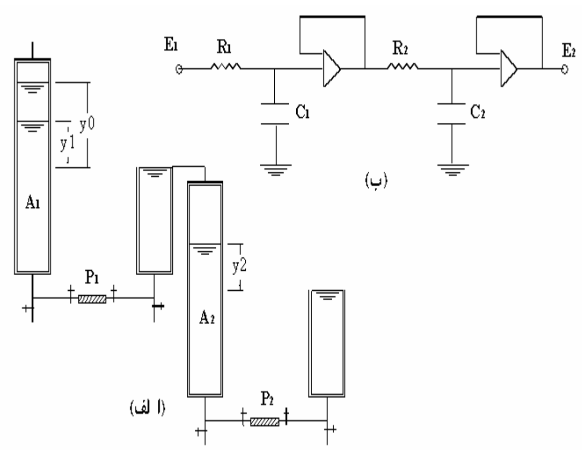
$$R.C\frac{dE_2}{dt_0}+E_2=E_1 \qquad (۶)$$

كه در اين رابطه E، R، C و t_0 به ترتيب ولتاژ، مقاومت الكتريكي، ظرفيت خازن و زمان در مدل الكتريكی مي‌باشند. همچنانكه در يك مدار الكتريكي، آمپلي فاير با ضريب بهره واحد اجازه انتقال شدت جريان (i) را، برخلاف ولتاژ، به مدار مجاور نمي‌دهد، در يك مدار آنالوگ مايع نيز مخزن هد ثابت با ثابت نگه داشتن هد در خروجي اجازه نمي‌دهد هد آب به مدار ديگر تأثير بگذارد ولي جريان آب مي‌تواند به مدار بعدي انتقال يابد؛ در نهايت با تركيب معادله (۱) و معادله پيوستگي، معادله

ديفرانسيل مدل تفهيمي مخزن خطي به صورت زير به دست مي‌آيد:

$$K\frac{dO}{dT}+O=I_L \qquad (۷)$$

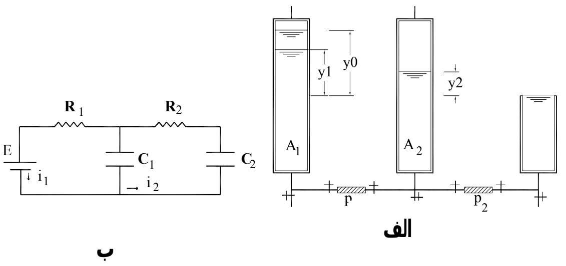
كه T زمان در پروتوتيپ و I_L دبي جريان ورودي به مخزن خطي می‌باشند. با مقايسه معادلات ديفرانسيل (۵)، (۶) و (۷) براي يك شرط اوليه يكسان به وضوح تشابه بين سيستمهاي يادشده قابل رويت بوده و كميتهاي K ،$R.C$ و $\frac{A}{p}$ هم ارز همديگرند. اگر در مدل آنالوگ الكتريكي به جاي قانون كيرشهوف گره‌ايي از قانون كيرشوف حلقه‌ايي استفاده شود، معادله ديفرانسيل (۶) را مي‌توان به جاي ولتاژ براساس شدت جريان نوشت [۷]، به طور مشابه در مدل آنالوگ مايع نيز معادله ديفرانسيل مي‌تواند براساس هر دو كميت دبي جريان و هد آب نوشته شود (معادلات۴و۵). مشابه مدل آنالوگ الكتريكي، مدارات مختلف آنالوگ مايع مي‌توانند با همديگر تركيب و تشكيل يك سيستم با معادله ديفرانسيل معين بدهند. تركيب آبشاري دو مدار آنالوگ مايع و مشابه الكتريكي آن در شكل (۲) نشان داده شده‌اند، همچنانكه در مدل الكتريكي در صورت استفاده نكردن از آمپلي فاير، شدت جريان مي‌تواند به مدار بعدي انتقال يابد (شكل ۳-ب)، در سيستم مايع هم عدم وجود مخزن هد ثابت و اتصال مستقيم مخازن به يكديگر باعث مي‌شود كه هد آب در هر مخزن بر مخزن ديگر تأثير گذار باشد (شكل ۳-الف).



شکل ۲- سیستم آبشاری مدل آنالوگ (الف) مایع(ب) الکتریکی

براي سيستم نشان داده شده در شكل (۳-الف) معادله ديفرانسيل حاكم به صورت زير است [۱۱]:

$$\frac{d^2Q_2}{dt^2}+\left(\frac{p_1}{A_1}+\frac{p_2}{A_2}+\frac{p_1}{A_2}\right)\frac{dQ_2}{dt}+\frac{p_1p_2}{A_1A_2}Q_2=0 \qquad (۸)$$



شکل ۳- سیستم متصل مدل آنالوگ (الف) مایع (ب) الکتریکی

كه t زمان و انديسها بيانگر شماره مخزنها مي‌باشند. معادله حاكم بر سيستم مخازن آبشاري شكل (۲-الف) مشابه معادله (۸) خواهد بود البته بدون وجود مقدار $\frac{p_1}{A_2}$ در جمله دوم كه اين موضوع بيانگر عدم تأثيرگذاري دو مدار بر همديگر مي‌باشد. معادلـه ديفرانسيـل حـاكم بـرسيـستم n عـدد مخـازن متصل به صورت زير است [۱۱]:

$$[D^n+(\frac{\alpha_1}{\beta_1}+\frac{\alpha_2}{\beta_2}+...+\frac{\alpha_{2n-1}}{\beta_{2n-1}})D^{n-1}$$
$$+(\sum_{\substack{i=1\\ \alpha_i\neq\alpha_j\\ \beta_i\neq\beta_j}}^{2n-1}\sum_{j=i+1}^{2n-1}\frac{\alpha_i\alpha_j}{\beta_i\beta_j})D^{n-2}+$$
$$(\sum_{i=1}^{2n-1}\sum_{j=i+1}^{2n-1}\sum_{\substack{k=j+1\\ \alpha_i\neq\alpha_j\neq\alpha_k\\ \beta_i\neq\beta_j\neq\beta_k}}^{2n-1}\frac{\alpha_i\alpha_j\alpha_k}{\beta_i\beta_j\beta_k})D^{n-3}+...+(\prod_{i=1}^{n}\frac{\alpha_i}{\beta_i})D^0]Q_n=0 \qquad (۹)$$

كه براي

$$i=0\ to\ n:\begin{cases}\alpha_i=p_i\\ \beta_i=A_i\end{cases}$$

و براي

$$i=n+1\ to\ 2n-1:\begin{cases}\alpha_i=p_{i-n}\\ \beta_i=A_{i-n+1}\end{cases}$$

و

$$D=\frac{d}{dt}$$

اين معادله يك معادله ديفرانسيل خطي مرتبه n با ضرايب ثابت است كه تمام ريشه‌هاي معادله مشخصه آن كه مي‌توانند توسط روش Graeff Root Squaring [۱۲] محاسبه شوند، غير صفر و حقيقي غير مثبت بوده و در نتيجه سيستم مطلقاً پايدار خواهد بود و براي يك ورودي دلخواه $I(t)$ بر مخزن اول، در طرف دوم معادله ديفرانسيل عبارت زير ظاهر خواهد شد:

$$\prod_{i=1}^{n}\frac{p_i}{A_i}I(t) \qquad (۱۰)$$

مي‌توان معادله‌ايي مشابه براي حالت مخازن آبشاري نيز به دست آورد كه اين معادله براي n مخزن آبشاري با سطح مقطع يكسان A و ضريب اصطكاك p به صورت زير خواهد بود [۱۱]:

$$\left(1+\frac{A}{p}D\right)^{n} Q_n(t)=I(t) \qquad (۱۱)$$

براي حالات مختلف از تركيبات اين مخازن در حالات سري، موازي، مختلط، آبشاري و يا متصل مي‌توان به صورت مشابه به معادله ديفرانسيل حاكم بر سيستم دست يافت.

۳- مقياس و ساخت آزمايشگاهي مدل

به دليل سادگي ساختار مدل آنالوگ مايع، اين مدل مي‌تواند در هر آزمايشگاهي به آساني ساخته و مورد استفاده قرار گيرد و چون سيستم حاكم بر مدل خطي مي‌باشد، لذا از آن مي‌توان براي آزمايشات مختلف با دبي و زمان مقياس شده مورد نظر استفاده كرد.

با توجه به وجود دو متغير مستقل در يك سيستم آنالوگ مايع (دبي يا هد آب و زمان)، براي هر نوع شبيه‌سازي آزمايشگاهي در ابتدا نياز به تعيين مقياس دبي و مقياس زمان وجود دارد، مقياس زمان را مي‌توان از رابطه زير محاسبه كرد:

$$\tau=\frac{K}{\frac{A}{p}}=\frac{T}{t} \qquad (۱۲)$$

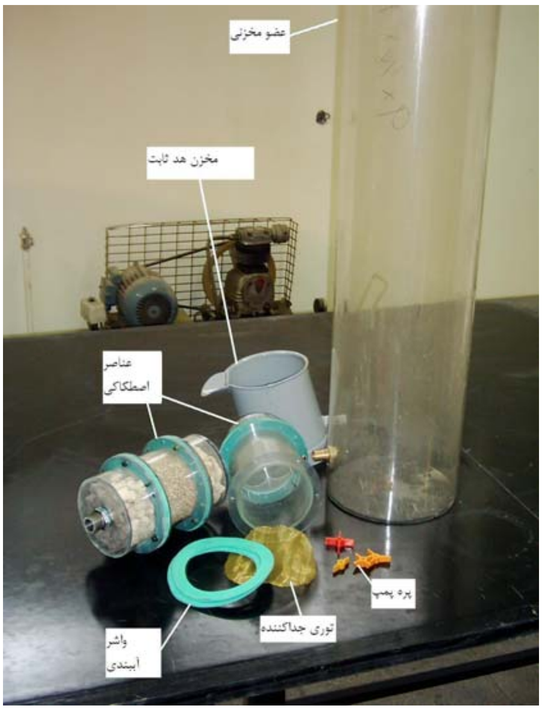
با معلوم بودن مقدار K براي يك حوضه و در نظر گرفتن مقدار دلخواه و معقول براي τ، مقدار $\frac{A}{p}$ به دست آمده و سپس با اختصاص دادن مقادير مناسب براي A ، a و l مقدار p و در نتيجه c با استفاده از رابطه (۲) قابل محاسبه خواهد بود. براي تهيه توده ماسه موردنظر مي‌توان از آزمايش نفوذپذيري مكانيك خاك استفاده كرد. در صورتيكه دبي قابل اعمال در آزمايشگاه با توجه به امكانات موجود $Q_{\max}$ و ماكزيمم دبي در سيستم حقيقي (پروتوتيپ) $O_{\max}$ باشند، مقياس دبي را مي‌توان به صورت زير محاسبه كرد :

$$\gamma=\frac{O_{\max}}{Q_{\max}}=\frac{O}{Q} \qquad (۱۳)$$

و ماكزيمم ارتفاع آب درآخرين مخزن ($y_{\max}$) را نيز مي‌توان به طور تقريبي از رابطه زير به دست آورد:

$$Q_{\max}=py_{\max} \qquad (۱۴)$$

در طراحي مدل آزمايشگاهي بايستي ارتفاع مخازن، ابعاد عناصر اصطكاكي و نوع ماسه كاربردي طوري انتخاب شوند تا آب از مخازن سرريز نشود. در شكل (۴) عناصر تشكيل‌دهنده مدل آنالوگ مايع همراه با چند پره مختلف پمپ كه با آنها مي توان دبيهاي مختلف را به سيستم اعمال كرد نشان داده شده‌اند و در شكل (۵) نيز يك مدار مدل آنالوگ مايع ارائه شده است.



شكل ۴- عناصر مدل آنالوگ مايع

شكل ۵- يك مدار مدل آنالوگ مايع

قبل از هرگونه تركيب مدارات آنالوگ مايع براي شبيه‌سازي فرايند بارش-رواناب، بايستي تك به تك مدارات به دقت صحت سنجی گردند؛ بار ورودي به مخازن را مي‌توان به صورت پالس به پالس و با استفاده از پمپهايي با ظرفيتهاي انتقال جريان مختلف، به سيستم اعمال كرد. عضو مخزني مدرج شده است تا بتوان در هر زمان ارتفاع آب (هد آب نسبت به عضو مخزني هد ثابت، شكل (۱-ب)) را خوانده سپس با توجه به رابطه (۲) و با معلوم بودن هد آب (y) مي‌توان دبي خروجي از عضو مخزني را به دست آورد، لذا به اين ترتيب براي تعيين دبي خروجي كافي است فقط هد آب قرائت شود.

۴- كاربرد مدل آنالوگ مايع در آموزش فرايند بارش-رواناب

براي بررسي قابليتهاي مدل آنالوگ مايع در زمينه آموزش بهتر فرايند بارش- رواناب، اين مدل براي شبيه‌سازي سه موضوع اساسي در زمينه مدلسازي بارش-رواناب مورد استفاده قرار گرفت كه به تفصيل به تشريح آنها پرداخته مي‌شود.

۴-۱- شبيه‌سازي آزمايشگاهي مدل ناش

با استفاده از مفهوم مخزن خطي، ناش [۱۳] با جايگزين كردن يك حوضه آبريز با يك سري مخازن خطي يكسان آبشاري يك مدل تفهيمي براي استخراج هيدروگراف واحد لحظه‌اي ارائه كرد. اين مدل به طور گسترده توسط مهندسين هيدرولوژي براي رونديابي جريان مورد استفاده قرار گرفته است كه به عنوان مثال مي‌توان به مراجع [۱۴] و [۱۵] اشاره كرد؛ همچنين سوكولوفسكي و شكلومانوف [۱۶] و لوين [۱۷] با استفاده از مدل آنالوگ الكتريكي اقدام به شبيه‌سازي آزمايشگاهي مدل ناش كردند. با مقايسه معادله ديفرانسيل مدل تئوريكي ناش به شكل زير [۳]:

$$(1+KD)^n O_n(T) = I_L(T) \qquad (۱۵)$$

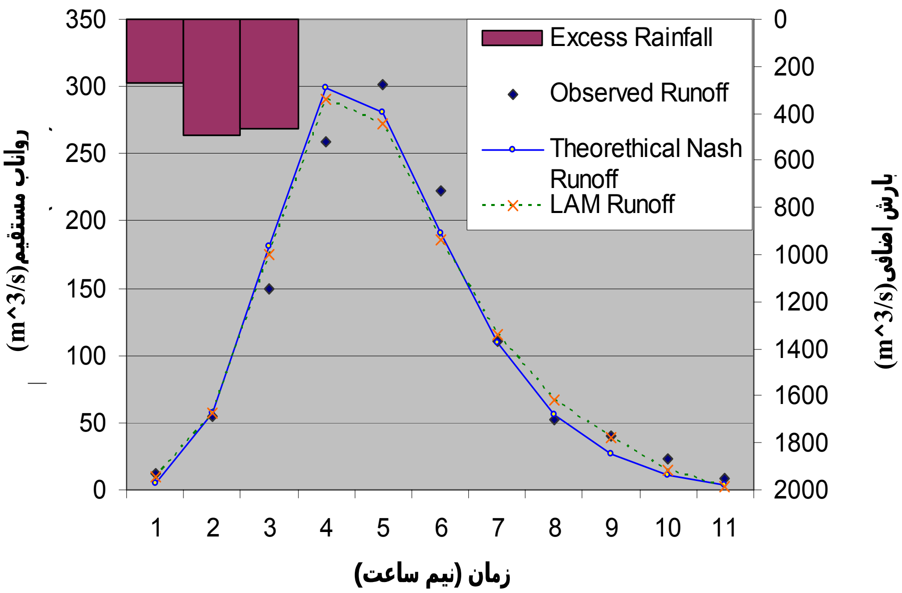
و معادله (۱۱)، تشابه بين اين دو سيستم به وضوح ملاحظه مي‌شود به طوريكه K و $\frac{A}{p}$ هم با يكديگر هم ارزند. براساس اين تشابه مي‌توان از مدل آنالوگ مايع براي شبيه‌سازي آزمايشگاهي مدل ناش استفاده نمود. براي اين منظور حوضه شول كريك (Shoal Creek) به مساحت ۱۸ km^2 واقع در تكزاس انتخاب و از داده‌هاي نيم ساعته بارش ۲۵-۲۴ مي ۱۹۸۱ براي مدلسازي بارش اضافي- رواناب مستقيم اين حوضه استفاده گرديد. اين مثال از كتاب چاو [۴] كه مشهورترين و پركاربردترين كتاب درسي در زمينه هيدرولوژي است انتخاب گرديد كه با توجه به اهداف آموزشي تحقيق حاضر، مدلسازي آزمايشگاهي مثال مذكور مي‌تواند كمك شاياني در درك بهتر مسائل رونديابي جريان داشته باشد. در جدول (۱) مشخصات كلي سيستم و عناصر مدل آنالوگ مايع و در شكل (۶) يك شماي كلي از ساختار مدل ساخته شده در آزمايشگاه براي شبيه‌سازي مدل ناش حوضه شول كريك آورده شده است. براي مقايسه نتايج، در شكل (۷) هيدروگراف‌هاي رواناب مستقيم مشاهداتي، محاسباتي توسط مدل تئوريكي ناش و اندازه‌گيري شده با استفاده از مدل آنالوگ مايع به همراه هيتوگراف بارش اضافي نشان داده شده‌اند.

جدول ۱- مشخصات سیستمها و عناصر مدلهای آنالوگ مایع استفاده شده در آزمایشگاه

کمیت	مقداربرای مدل قسمت			توضیحات برای مدل قسمت		
	(۴-۱)	(۴-۲)	(۴-۳)	(۴-۱)	(۴-۲)	(۴-۳)
تعداد مخازن (n)	۳	۳	۳	محاسبه شده با روش مومنتوم [۴]	دلخواه، جدا شده با خطو ط ایزوکرون	دلخواه، جدا شده با خطوط ایزوکرون
ضریب ذخیره مخزن در پروتوتیپ (K) (ساعت)	۰/۴۷	ــــ	ــــ	محاسبه شده با روش مومنتوم [۴]	با توجه به فرضی بودن حوضه فقط مدل آزمایشگاهی وجود داشت	با توجه به فرضی بودن حوضه فقط مدل آزمایشگاهی وجودداشت
طول عناصر اصطكاكي (l)* (m)	۰/۱	۰/۱۶۵و ۰/۱۲۵و ۰/۰۸۵	۰/۱	مفروض	مفروض و با توجه به معادله (۱۶)	مفروض
سطح مقطع عناصر اصطكاكي (a) (m^2)	۰/۰۰۷۸۵	۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۷۸۵	مفروض، دایره به قطر ۱۰ Cm	مفروض، دایره به قطر ۱۱ Cm	مفروض، دایره به قطر ۱۰ Cm
ضریب هدایت هیدرولیکي ماسه بكار رفته در عناصر اصطكاكي (c) (m/s)	۰/۰۰۵۰۱	۰/۰۰۵۴	۰/۰۰۵۴	ماسه درشت، تمیز، تیزگوشه، مانده بین الکهای شماره ۸ و ۱۶	ماسه درشت، تمیز، تیزگوشه، مانده بین الکهای شماره ۸ و ۱۶	ماسه درشت، تمیز، تیزگوشه، مانده بین الکهای شماره ۸ و ۱۶
سطح مقطع مخازن (A) (m^2)	۰/۰۳۸	۰/۰۳۸	۰/۰۳۸	مقطع دایرهایی به قطر ۲۲ Cm	مقطع دایرهایی به قطر ۲۲ Cm	مقطع دایرهایی به قطر ۲۲ Cm
ارتفاع مخازن (m)	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲	طوریکه آب از مخازن سرریز نشود (بزرگتر از $y_{\max}$)	طوریکه آب از مخازن سرریزنشود (بزرگتر از $y_{\max}$)	طوریکه آب از مخازن سرریز نشود (بزرگتر از $y_{\max}$)
مقیاس دبي (γ)	۵۹۴۰۰۰۰	ــــ	ــــ	با معادله (۱۳)، $Q_{\max}$ =۴۹۵(m^3/s) در پروتوتیپ و $Q_{\max}$ =۵(lit/min) در آزمایشگاه	فقط مدل آزمایشگاهی وجودداشت	فقط مدل آزمایشگاهی وجودداشت
مقیاس زمان (τ)	۱۸/۵۲	ــــ	ــــ	با معادله (۱۲) پس $\Delta t=\frac{0.5\times 3600}{18.52}=98\ s$	فقط مدل آزمایشگاهی وجودداشت	فقط مدل آزمایشگاهی وجودداشت

*برای مدل قسمت (۴-۲) از سه عنصر اصطكاكي با طولهای مختلف استفاده شد.

شكل ۶- شبيه‌سازي آزمايشگاهي مدل ناش توسط مدل آنالوگ مايع براي حوضه شول كريك



شكل۷- هيدروگرافهاي مستقيم مشاهداتي و محاسباتي براي مدل ناش

معيارهاي برازش محاسبه شده براي تعيين كفايت مدلها در جدول (۲) ارائه شدهاند كه با وجود عالي بودن اين معيارها بايد به اين نكته اذعان داشت كه با توجه به اهداف آموزشي اين تحقيق فقط از يك سري داده بارش-رواناب براي كاليبره و صحت سنجی مدلها استفاده شده و بدين دليل معيارهاي برازش براي صحت سنجی مدلها مقادير عالي را نشان مي‌دهند؛ بديهي است در كارهاى عملي (غيرآموزشي) براي كاليبره و صحت سنجی مدلها به تعداد داده‌هاي مختلفي نياز بوده و نتيجتاً مقادير معيارهاي برازش مدلها كمتر خواهند بود.

جدول ۲- معيارهای كفايت مدلها برای مسئله ناش

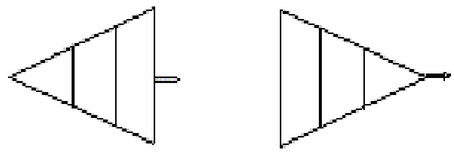
معيار ناش و ساتكليف [۱۸] برای مدل تئوريكی ناش	۰/۹۶۲
معيار ناش و ساتكليف برای مدل آنالوگ مايع ناش	۰/۹۵
معيار R^2 بين مدل تئوريكی و مدل آنالوگ مايع ناش	۰/۹۸

دبي زياد اندازه‌گيري شده در آزمايشگاه متناظر با ارتفاع زياد در آخرين مخزن بوده و چون طبق قانون دارسي، سرعت رابطه

مستقيم با ارتفاع آب در مخزن دارد، در نتيجه دبي‌هاي بالا بيانگر وجود سرعت نسبتاً بالا در مدار آنالوگ مايع بوده و از آنجايي كه افتهاي طولي و موضعي متناسب با مجذور سرعت مي‌باشند پس در دبي‌هاي اندازه‌گيري شده بالا مقادير افت‌ها نسبت به دبي‌هاي پايين بيشتر مي‌باشند، از اين رو اين واقعيت مي‌تواند دليلي براي وجود اختلاف جزئی بين نتايج مدل آنالوگ مايع و مدل تئوريكي ناش در دبي‌هاي بالا باشد (شكل ۷).

۴-۲- اثر شكل حوضه در هيدروگراف خروجي

بي‌شك ملاحظه آزمايشگاهي تأثير شكل ظاهري حوضه در هيدروگراف خروجي مي‌تواند جالب توجه باشد. براي اين منظور مطابق شكل (۸) دو حوضه مجازي كه به طور اغراق‌آميز كاملاً مثلثي فرض شده‌اند در نظر گرفته شد، اين دو حوضه از هر لحاظ جز مخرج حوضه با همديگرمشابه هستند.



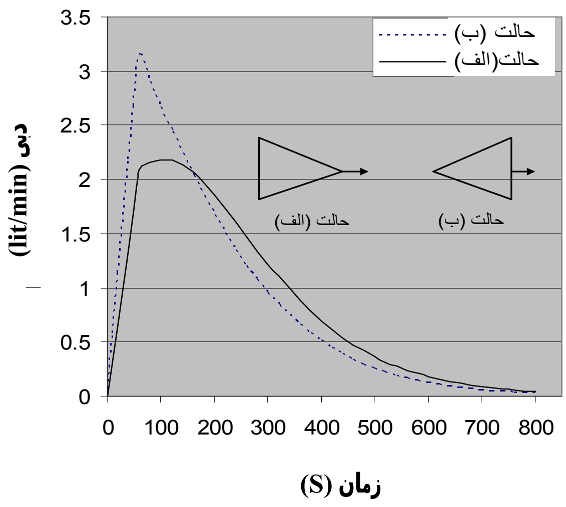
(ب)   (الف)

شكل ۸ - دو حوضه فرضی برای بررسی اثر شكل حوضه در هيدروگراف خروجی

دو حوضه توسط خطوط ايزوكرون به سه قسمت تقسيم و هر قسمت توسط يك مخزن خطي مدل گرديد، در اين حالت با توجه به اينكه به جز مساحت ساير خصوصيات فيزيكي هر قسمت باهم برابر مي‌باشند، با استفاده از تئوري رونديابي ژئومورفولوژيكي حوضه، مقدارضريب ذخيره مخزن خطي (K) باضريب تناسب θ متناسب با مساحت هر قسمت در نظر گرفته شد :

$$K_i = \theta\eta_i \qquad i = 1,2,3 \qquad (۱۶)$$

كه در اين رابطه η_i مساحت هر قسمت بوده در نتيجه نسبت K به η براي تمامي قسمتها مساوي ولي مقدار K مختلف بوده[۷] و مقدار $\frac{A}{p}$ مخازن خطي در مدل آنالوگ مايع نيز يكسان نخواهد بود. براي سادگي مدلسازي، مقادير A، c و a در رابطه (۲) ثابت ولي طول هر عضو اصطكاكي (l_i) متغير در نظر گرفته شدكه با توجه به روابط (۱۶) و (۲) و هم‌ارزي K با مقدار $\frac{A}{p}$ در مدل آنالوگ مايع، عضو اصطكاكی با طول زياد دلالت بر قسمت وسيعتر خواهد داشت. مشخصات سيستم و عناصر مدل آنالوگ مايع مربوطه در جدول (۱) آورده شده است. بعد از راه‌اندازي مدل با اعمال يك پالس بارش مقياس شده به طور همزمان بر هر سه مخزن، هيدروگراف مقياس شده خروجي مدل براي حالت اول به دست آمد و سپس با تعويض ترتيب مدارات و اعمال مجدد بارش مشابه حالت قبل هيدروگراف خروجي براي حالت دوم نيز حاصل شد كه نتايج در شكل (۹) نشان داده شده اند؛ بديهي است در مورد حوضه واقعي با ضرب مقادير دبي و زمان در مقياسهاي مربوطه هيدروگراف خروجي از حوضه به دست مي‌آيد. با توجه به هيدروگرافهاي رسم شده در شكل (۹) براي هر دو حالت، مشاهده مي‌شود كه براي حالت (ب) در مقايسه با حالت (الف) مقدار دبي ماكزيمم بيشتر ولي زمان رسيدن به آن كمتر است كه اين موارد همخواني مناسبي با نتايجي كه شن [۷] توسط مدل آنالوگ الكتريكي به دست آورد، دارند.

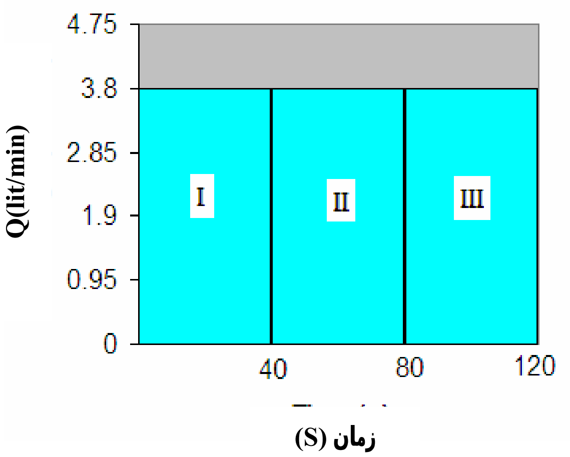


شكل ۹ – هيدروگرافهای خروجی در دو حالت (الف) و (ب) برای پالس بارش اعمالی به مقدار lit/min ۳/۸۷ و به مدت۶۰ ثانيه

۴-۳- بررسي پاسخ حوضه به جهت حركت بارش

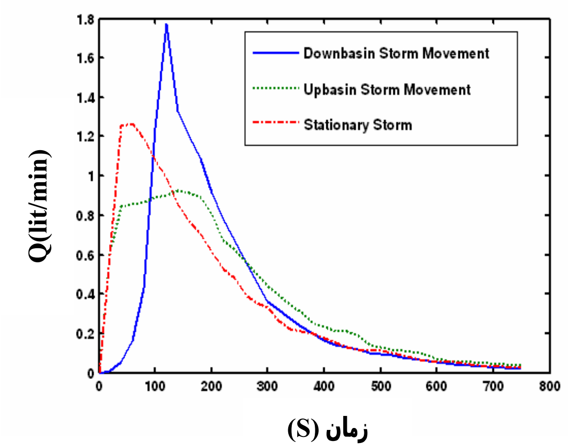
جهت حركت بارش روي حوضه، مخصوصاً در حوضه‌هاي بزرگ، تأثير محسوسي روي هيدروگراف خروجي مي‌گذارد كه بررسي و آناليز آزمايشگاهي اين موضوع مي‌تواند براي نوآموزان هيدرولوژي جالب و آموزنده باشد. در اين راستا حوضه‌ايي فرضي

که توسط خطوط ایزوکرون به سه قسمت مساوي از نظر مساحت تقسیم و توسط مخازن خطي مشابه جايگزين شده‌اند در نظر گرفته شد. مشخصات سیستم استفاده شده درجدول (۱) آورده شده است. براي مدلسازي حرکت بارش از بالادست به پايين دست حوضه به ترتیب پالسهای I ، II و III از بارش (شکل ۱۰) (بارش مقياس شده در گام زماني معلوم مقياس شده) بر مخازن بالا دست، مياني و پايين دست به عنوان بار ورودی به سیستم اعمال و هيدروگراف خروجي از مدل به دست آمد. براي حالت بعدي، حرکت بارش از پايين دست به بالادست، عکس عملکرد ذکر شده اعمال گرديد. براي مقايسه، هيدروگراف خروجي حوضه براي بارش ايستا (Stationary rainfall) (بارش با حجم و مدت زمان يکسان با بارشهاي متحرك که به طور ثابت بر کل حوضه مي‌بارد) نيز توسط مدل آنالوگ مايع به دست آمد. نتايج حاصل برای بارش اعمالی شکل (۱۰) براي هر سه حالت در شکل (۱۱) نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۰ –بارش اعمالی برای بررسی اثر جهت حرکت بارش بر هيدروگراف خروجی

با توجه به هيدروگرافهاي رسم شده ملاحظه مي‌شود که در حرکت بارش به طرف پايين دست در مقايسه با حالت حرکت بارش به طرف بالادست، هيدروگراف از زمان ديرتري شروع و شيب قسمت بالارونده و فروکش‌کننده آن زياد بوده و دبي ماکزيمم زياد ولي زمان رسيدن به اين دبي کمتر مي‌باشد؛ در بارش ايستا مقدار دبي ماکزيمم بين دو حالت فوق‌الذکر قرار گرفته ولي زمان رسيدن به اين دبي از هر دو حالت زودتر مي‌باشد. اين نتايج همسو با مشاهدات گزارش شده توسط فرويد و همکاران [۱۹] و اگدن و همکاران [۲۰] در مورد حوضه‌هاي واقعي و همينطور روبرتز و کلينگمن [۲۱] در مورد يک حوضه کوچك مقياس آزمايشگاهي بوده و در مرجع اخير دلايل اين موارد به تفصيل تشريح گرديده‌اند. لازم به ذکر است که در حرکت بارش بر روي حوضه، علاوه بر جهت حرکت، اندازه سرعت حرکت بارش نيز مي‌تواند بر هيدروگراف خروجي تأثيرگذار باشد ولي اين اثر بر کليت موضوع بيان‌شده در مورد تأثير جهت حرکت خللي وارد نمي‌سازد.



شکل ۱۱ - هيدروگرافهای خروجی از مدل برای مسئله بررسی اثر جهت حرکت بارش بر هيدروگراف خروجی

با توجه به پيچيدگي مدلهاي تفهيمي از يك طرف و پايين بودن قوه تجسم دانشجويان مبتدي از طرف ديگر، درك عميق مدلهاي تفهيمي که کاربرد وسيعي در شبيه‌سازي فرايندهاي هيدرولوژيکي دارند براي نوآموزان دشوار مي‌باشد که نظر به موارد مطرح شده و اظهار عقيده دانشجويان، استفاده از مدلهاي فيزيکي آنالوگ به طور اعم و مدل آنالوگ مايع به طور اخص که داراي ويژگيهاي خاص خودش مي‌باشد، مي‌تواند در اين زمينه مثمر ثمر واقع گردد. استفاده از اين مدل در جهت تحقق بخشيدن به اين ضرب‌المثل چيني است که ميگويد: "به من بگو، فراموش مي‌کنم؛ نشانم بده، ممکن است يادم بماند؛ بگذار انجام دهم، مي‌فهمم" [۲۲].

به طور خلاصه مي‌توان مزاياي زير را براي مدل آنالوگ مايع متصور شد:

الف) اين مدل مي‌تواند با استفاده از ابزار ساده ساخته و به آساني در هر آزمايشگاهي مورد استفاده قرار گيرد.

ب) با توجه به خاصيت ديداري مدل، مدل مذكور مي‌تواند به عنوان يك ابزار كمك‌آموزشي مفيد در زمينه رونديابي جريان در هيدرولوژي مهندسي مورد استفاده قرار گيرد.

ج) مدل آنالوگ مايع بر مبناي چند قانون ساده هيدروليكي بنا شده و در نتيجه از مدل آنالوگ الكتريكي مخصوصاً براي دانشجويان مهندسي عمران قابل فهم‌تر است.

د) زمان آزمايش در اين مدل برخلاف مدل آنالوگ الكتريكي بسيار سريع نبوده و سيستم به آهستگي و آساني قابل رويت و آناليز مي‌باشد.

ه) در اين مدل در هر لحظه دلخواه مي‌توان آزمايش را متوقف و سپس در زماني ديگر آنرا ادامه داد.

و) با توجه به خطي‌بودن مدل امكان استفاده از اين مدل براي تمام حالات ممكن است حال آنكه مدل فيزيكي كوچك مقياس فقط براي يك حوضه خاص قابل استفاده مي‌باشد.

اما ساخت مدل هزينه بروجا گير بوده و نياز به فضاي زيادي دارد و با توجه به وجود افت هدها و ساير خطاها اين مدل دقت كمتري نسبت به مدل آنالوگ الكتريكي داشته و از طرفي چون هنوز بعضي از اعضاء مدل آنالوگ الكتريكي براي مدل آنالوگ مايع شبيه‌سازي نشده‌اند، اين مدل انعطاف‌پذيري كمتري نسبت به مدل آنالوگ الكتريكي دارد؛ موارد اخير را مي‌توان در زمره عيوب مدل آنالوگ مايع به حساب آورد. شمه‌ايي از خطاهاي تأثيرگذار بر مدل را كه در حالت كلي مي توان به دو دسته تصادفي و سيستماتيك طبقه‌بندي كرد، به صورت زير مي‌باشد:

الف) خطاهاي قرائت هد آب.

ب) خطاهاي مربوط به شرايط محيطي مثل تغييرات دما كه مي‌تواند بر ويسكوزيته و به تبع آن در مقدار c اثر بگذارد.

ج) خطاهاي مربوط به پمپهاي اعمال كننده بار.

د) خطاهاي مربوط به آببندي اعضاء مدل كه با توجه به غير كارخانه‌ايي بودن اعضا ساخته شده اين خطاها وجود دارند.

۵- نتيجه‌گيري

مدل آنالوگ مايع ارائه شده براساس چند قانون ساده هيدروليكي بنا شده و مي‌تواند براي شبيه‌سازي آزمايشگاهي مسائل روندیابي هيدرولوژيكي استفاده شود. اين مدل در بردارنده مفهوم مخزن خطي بوده و هر مدار آن داراي سه قسمت اصلي است: يك مخزن، يك عنصر اصطكاكي به صورت يك محيط متخلخل و يك مخزن هد ثابت. براي تعيين قابليتهاي مدل آنالوگ مايع، از آن براي شبيه‌سازي مدل ناش، آناليز اثر جهت حركت بارش روي حوضه و بررسي تأثير شكل حوضه روي هيدروگراف خروجي حوضه استفاده شد. علیرغم خطاهای معمول آزمایشگاهی، با توجه به معیار R^2 (ضریب همبستگی) و منطقی بودن نتایج حاصل، موفق‌بودن مدل در مدلسازي اين مسائل قابل حصول می باشد.

با توجه به خصوصيات و قابليت‌هاي ذكر شده مدل، اين مدل پتانسيل خوبي در جهت تبديل‌شدن به يك ابزار كمك آموزشي نه تنها در زمينه مهندسي هيدرولوژي بلكه در ساير مسائل مهندسي مشابه دارد. براي درك بهتر و بيشتر خواص و ظرفيت‌هاي مدل آنالوگ مايع پيشنهاد مي‌شود كه از آن براي مدلسازي تعداد ديگري از مسائل هيدرولوژيكي استفاده شود كه ارائه نحوه انجام اين مورد به مقاله‌هاي بعدي موكول مي‌شود.

سپاسگزاريها

قسمت آزمایشگاهی تحقیق در آزمایشگاه پروژه آب بخش راه و ساختمان دانشگاه شيراز انجام گرفت؛ بدينوسيله مولفين سپاس خود را نسبت به مساعدتهای رسیده اشعار می‌دارند.

مراجع

[۱] فاخر، علي، "كاربرد مدلهاي فيزيكي در آموزش دروس مهندسي"، مجله آموزش مهندسي ايران، جلد ۲، شماره ۱، صفحات ۳۹ تا ۷۲، ۱۳۷۹.

[۲] شريعتمداري، علي، "نكته‌هاي اساسي در آموزش مهندسي"، مجله آموزش مهندسي ايران، جلد ۱، شماره ۲، صفحات ۱۲۱ تا ۱۲۵، ۱۳۷۸.

[3] Singh, V. P., “Hydrological Systems, Vol. 1: Rainfall-Runoff Modeling”, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ ,1988.

[4] Chow, V. T., Maidment, D. R. and Mays, L. W., “Applied Hydrology”, McGraw-Hill, 1988.

[5] Jackson, D. R. ,“A dissipative river flow model”, J. of Hydrology, 6, pp. 33-44 ,1968.

[6] Quick, M. C., “River flood flows: forecasts and probabilities”, J. of Hydraulics Div., ASCE, 91 (HY3), pp. 1-17, 1965.

[7] Shen, J., “Use of analog models in the analysis of flood runoff”, Geological survey professional paper 506-A, U. S. Department of Interior, Washington, D. C. ,1965.

[8] Nourani, V. and Mano, A., "Semi-distributed flood runoff model in sub-continental scale for south-western Iran", First Int. Conf. on Water Res. in the 21st. Century, Alexandria, Egypt ,2005 (Accepted).

[9] Abedini, M. J., "On depression storage, its modeling and scale", Ph.D. Thesis, Univ. of Guelph, Canada, 1998

[10] Betchov, R. and Kovach, L. D., "Teaching mathematics with analog computers", Analog Techniques, pp. 6-12, Nov.,1964.

[11] Monadjemi, P., "Multipurpose fluid analog computer", United States Patent office, No. 6223140,2001.

[12] Wylie, C. R., "Advanced Engineering Mathematics", 3 th edition, McGraw-Hill, 1966.

[13] Nash, J. E. , "The form of the instantaneous unit hydrograph", IASH publication, 45(3-4), pp. 114-121, 1957.

[14] Park, J., Kang, I. S. and Singh, V. P., "Comparison of simple runoff models used in Korea for small watersheds", Hydrological Processes, 13 (10), pp. 1527-1540,1999.

[15] Cheng, S. J. and Wang, R. Y., "An approach for evaluating the hydrological effects of urbanization and its application", Hydrological Processes, 16 (7), pp. 1453-1418 ,2002.

[16] Sokolovsky, D. L. and Shiklomanov, I. A. ,"Estimation of floods with the aid of analogue computers", The use of analog and digital computers in hydrology, Proc. of the Tucson Symposium, USA, 1969.

[17] Levin, A. G., "Specialized analog computers for hydrological calculations and forecasts", The use of analog and digital computers in hydrology, Proc. of the Tucson Symposium, USA, 1969.

[18] Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V., "River flow forecasting through conceptual model", J. of Hydrology, 10 (3), pp. 282-290 ,1970.

[19] Foroud, N., Broughton, R. S. and Austin, G. L., "The effects of a moving rainstorm on direct runoff properties", Water Resources Bull. , 20(1) ,pp. 87-91, 1984.

[20] Ogden, F. L., Richardson, J. R. and Julien, P. Y., "Similarity in catchment response: 2. Moving rainstorms", Water Resources Res., 31(6), pp. 1543-1547,1995.

[21] Roberts, M. C., Kingeman P. C., "The influence of land form and precipitation parameters on flood hydrographs", J. of hydrology, 11 ,pp. 393-411,1970.

[۲۲] کتاب علوم تجربي، سال سوم دوره راهنمايي تحصيلي، وزرات آموزش و پرورش، ۱۳۸۳.