

استفاده از مدل آنالوگ مایع در آموزش هیدرولوژی مهندسی

(مدل سازی بارش - رواناب)

وحید نورانی^۱، پرویز منجمی^۲ و محمدجعفر رفیع زاده^۳

چکیده

آموزش صحیح متخصصین هیدرولوژی در زمینه مدل سازی بارش-رواناب می تواند نقشی بسزا در فایق آمدن بر مشکلات وافر سیلاب داشته باشد. در این مقاله بعد از معرفی مدل آنالوگ مایع به عنوان یک مدل آنالوگ جدید در زمینه هیدرولوژی و براساس مدل مخزن خطی پایه ریزی شده است. نحوه مقیاس و ساخت آزمایشگاهی آن ارائه و سپس چگونگی استفاده از آن برای شبیه سازی مدل بارش-رواناب ناش (Nash) برای یک حوضه واقعی مورد بررسی قرار گرفته است. اثر شکل حوضه در هیدروگراف خروجی و همچنین تأثیر جهت حرکت بارش بر پاسخ حوضه بطور جداگانه کند و کاوش شده است. نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده با مدل، حاکی از مناسب بودن مدل در این زمینه است. با توجه به ساختار ساده، استفاده آسان و خاصیت دیداری مدل، این مدل می تواند یک ابزار کمک آموزشی مناسب در زمینه آموزش مدل سازی بارش-رواناب باشد.

کلمات کلیدی: آموزش مهندسی، ابزار کمک آموزشی، مدل های فیزیکی، مدل آنالوگ، مدل سازی بارش-رواناب، مخزن خطی.

۱- مقدمه

شاید بتوان مدل های فیزیکی را که به سادگی ساخته و به آسانی مورد استفاده قرار می گیرند بهترین ابزار کمک آموزشی دانست که امکان تجربه های متعدد را نیز مقدور می سازد، در زمینه مهندسی هیدرولوژی نیز مدل های فیزیکی به دو صورت مدل ها تمثیلی (Iconic) و آنالوگ (Analog) کاربرد فراوانی در جهت آموزش و پژوهش دارند [۳].

با توجه به پیچیدگی فرآیند بارش-رواناب، معمولاً برای مدل سازی این فرآیند از مدل های تفهیمی (Conceptual) استفاده می شود که براساس نحوه کار سیستم مطالعاتی ساخته می شود و دارای پارامترهایی هستند که باید تخمین زده شوند. یکی از مهمترین زیر شاخه مدل های تفهیمی، مدل مخزن خطی است که بیانگر وجود یک رابطه خطی بین جریان خروجی و ذخیره مخزن به صورت زیر می باشد [۴]:

$$S = KO \quad (1)$$

که O ، S و K به ترتیب دبی خروجی، حجم مخزن و ضریب ذخیره مخزن می باشند. در این روش یک حوضه آبریز و یا یک کانال توسط چند مخزن خطی به صورت سری، موازی و یا مختلط جایگزین شده و عمل روندیابی جریان صورت می پذیرد. با استفاده از این مفهوم، مدل های

از آنجا که جوامع بشری را همواره از نظر جانی و مالی سیلاب مورد تهدید قرار داده است، مدل سازی بارش-رواناب از دیرباز مورد توجه متخصصین علم هیدرولوژی بوده و بی شک آموزش صحیح افرادی که عهده دار رویارویی با سیلاب باشند می تواند کمک شایانی در راستای پیش بینی، پیشگیری و کاهش ضرر در مواجهه با این خطر طبیعی داشته باشد. روش های متداول و سنتی تدریس که معمولاً بر مبنای گفتگوی یک طرفه استاد صورت می گیرد، در رسیدن به اهداف عمده آموزشی درک کردن، ضعیف و از ایجاد توانایی به کارگیری، عاجز هستند، بنابراین باید در رشته های مختلف تحصیلی ابزار و روشهایی به کار گرفته شود که اهداف یادگیری را برآورده سازند [۱].

از آنجایی که در حالت کلی یادگیری را به تغییر رفتار از راه تجربه معنی می کنند [۲]، لازم است شرایطی مهیا گردد که امکان تجربه کردن برای یادگیرنده در جهت نیل به اهداف آموزشی ذکر شده امکان پذیر باشد.

مقاله: دریافت ۸۶/۱۰/۲۳، دریافت اصلاح نهایی ۸۶/۱۲/۲۰

۱- استادیار، دانشکده عمران- دانشگاه تبریز

۲- استادیار، دانشکده عمران- دانشگاه شیراز

۳- کارشناس، دانشکده عمران- دانشگاه تبریز

لوله‌های کوتاه و قطور که رژیم جریان در آن‌ها آرام باشد به‌همدیگر وصل می‌شوند و عنصر مخزن بایستی مدرج باشد تا بتوان ارتفاع آب (مایع) را در زمان‌های مختلف قرائت کرد. هرچند که هر نوع مایعی می‌تواند در این مدل مورد استفاده قرار گیرد ولی بهتر است از آب که در دسترس و ارزان بوده و کار با آن آسان است استفاده شود.

در شکل ۱- الف و ۱- ب یک مدار آنالوگ الکتریکی و یک مدار آنالوگ مایع که با همدیگر متشابهند نشان داده شده‌اند، به طوری که عضو مخزنی و اصطکاکی در مدل آنالوگ مایع به ترتیب دارای همان نقش خازن و مقاومت در مدل آنالوگ الکتریکی هستند [۱۱]. شکل (۱- ج) یک عضو اصطکاکی مدل آنالوگ مایع را نشان می‌دهد، این عنصر براساس قانون حرکت آب در محیط متخلخل (قانون دارسی) طراحی می‌شود، بدین ترتیب که یک توده ماسه با ضریب هدایت هیدرولیکی معلوم c داخل یک محفظه به طول l و سطح مقطع a قرار گرفته سپس دو انتهای آن توسط توده شن‌های درشت دانه مسدود می‌شود، البته برای جلوگیری از نفوذ ماسه در شن بایستی از توری مناسب بین دو توده خاک استفاده شود. با توجه به سرعت پایین جریان در لوله‌ها و مخازن و همین‌طور کوتاهی لوله‌ها، افت طولی و موضعی در مدار قابل نظر اغماض کردن خواهد بود. با استفاده از قانون دارسی، دبی آب عبوری از عنصر اصطکاکی که دارای اختلاف هد باشد، به صورت زیر قابل محاسبه است:

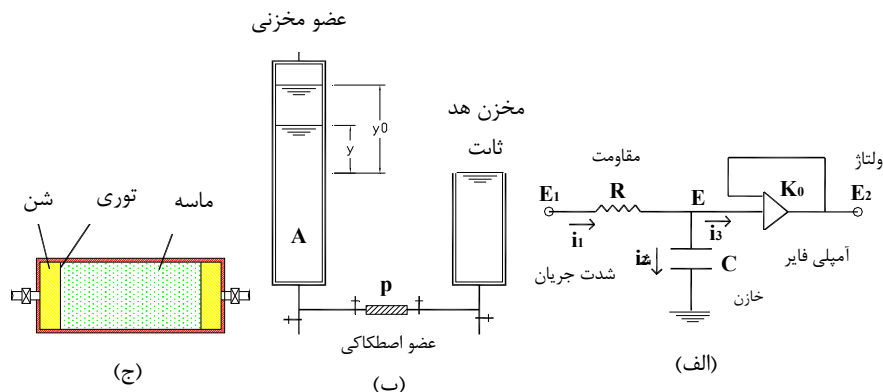
$$Q = V.a = c \frac{y}{l} a = p.y \quad (2)$$

آنالوگ متعددی برای شبیه‌سازی فرآیند بارش- رواناب ساخته شده‌اند که می‌توان به کارهای تئوریک جکسون [۵] و کوئیک [۶] در استفاده از مدل‌های آنالوگ الکتریکی و مکانیکی و کار آزمایشگاهی جامع شن [۷] با استفاده از مدل آنالوگ الکتریکی اشاره نمود. علی‌رغم پیشرفت مدل‌های کامپیوتری متعدد که هرکدام دارای معایب و مزایایی هستند [۸]، استفاده از مدل آنالوگ به تنهایی و یا همراه با روش‌های مدرن نه تنها می‌تواند در فهم و درک بهتر فرایندهای هیدرولوژی متمر ثمر واقع گردد [۹]، بلکه برای آموزش بهتر سایر مسائل ریاضیات کاربردی نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد [۱۰].

در این مقاله بعد از معرفی مدل آنالوگ مایع و معادلات حاکم، چگونگی ساخت و مقیاس مدل در آزمایشگاه برای اولین بار تشریح و سپس نحوه استفاده از این مدل به عنوان یک ابزار کمک آموزشی برای بررسی چند مسئله مدل‌سازی بارش- رواناب توضیح داده می‌شود.

۲- مدل آنالوگ مایع و معادلات حاکم

مدل آنالوگ مایع (Model Liquid Analog) که توسط یکی از مؤلفین اختراع و به ثبت رسیده است [۱۱] براساس چند قانون ساده هیدرولیکی از جمله مخزن خطی و معادله پیوستگی بنا شده و آن را می‌توان مشابه مدل‌های آنالوگ الکتریکی و مکانیکی دانست که به ترتیب براساس قوانین کیرشهوف و نیوتن ساخته شده‌اند، دو سیستم آنالوگ هستند هرگاه معادلات حاکم بر آن‌ها مشابه به هم باشند. عناصر تشکیل دهنده هر مدار آنالوگ مایع عبارتند از یک مخزن، یک عضو اصطکاکی و یک مخزن هد ثابت که توسط



شکل ۱ (الف) مدار آنالوگ الکتریکی، (ب) مدار آنالوگ مایع، (ج) عنصر اصطکاکی مدار آنالوگ مایع

که در این رابطه E ، R ، C و t_0 به ترتیب ولتاژ، مقاومت الکتریکی، ظرفیت خازن و زمان در مدل الکتریکی هستند. همچنان که در یک مدار الکتریکی، آمپلی فایر با ضریب بهره واحد اجازه انتقال شدت جریان (i) را، برخلاف ولتاژ، به مدار مجاور نمی‌دهد، در یک مدار آنالوگ مایع نیز مخزن هد ثابت با ثابت نگه داشتن هد در خروجی اجازه نمی‌دهد هد آب به مدار دیگر تأثیر بگذارد ولی جریان آب می‌تواند به مدار بعدی انتقال یابد؛ در نهایت با ترکیب معادله (۱) و معادله پیوستگی، معادله دیفرانسیل مدل تفهیمی مخزن خطی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$K \frac{dO}{dT} + O = I_L \quad (7)$$

که T زمان در پروتوتیپ و I_L دبی جریان ورودی به مخزن خطی است. با مقایسه معادلات دیفرانسیل ۵، ۶ و ۷ برای یک شرط اولیه یکسان وضوح تشابه بین سیستم‌های یاد شده قابل رویت بوده و کمیت‌های $R.C, K$ و $\frac{A}{p}$ هم ارز یکدیگرند. اگر در مدل آنالوگ الکتریکی به جای قانون کیرشهوف گره‌ایی از قانون کیرشهوف حلقه‌ای استفاده شود، معادله دیفرانسیل (۶) را می‌توان به جای ولتاژ براساس شدت جریان نوشت [۷]، بطور مشابه در مدل آنالوگ مایع نیز معادله دیفرانسیل می‌تواند براساس هر دو کمیت دبی جریان و هد آب نوشته شود معادلات ۴ و ۵.

مشابه مدل آنالوگ الکتریکی، مدارات مختلف آنالوگ مایع می‌توانند با همدیگر ترکیب شده و تشکیل یک سیستم با معادله دیفرانسیل معین را بدهند. ترکیب آبشاری دو مدار آنالوگ مایع و مشابه الکتریکی آن در شکل ۲ نشان داده شده‌است، همچنان که در مدل الکتریکی در صورت استفاده نکردن از آمپلی فایر، شدت جریان می‌تواند به مدار بعدی انتقال یابد شکل ۳-ب، در سیستم مایع هم عدم وجود مخزن هد ثابت و اتصال مستقیم مخازن به یکدیگر باعث می‌شود که هد آب در هر مخزن بر مخزن دیگر تأثیرگذار باشد شکل ۳-الف.

که V سرعت جریان در عضو اصطکاکی و $\frac{c.a}{l}$ مقداری ثابت است که مساوی با p در نظر گرفته می‌شود و دارای بعد $\left[\frac{L^2}{T} \right]$ می‌باشد. از آنجایی که سطح مقطع مخزن (A) ثابت است، معادله (۲) بیانگر یک رابطه مستقیم خطی بین خروجی و حجم مخزن بوده و متضمن مفهوم مخزن خطی می‌باشد. مخزن هد ثابت برای ثابت نگه داشتن سطح آب در انتهای هر مدار یا سیستم به کار رفته و مانع از پر و خالی شدن‌های متناوب عضو اصطکاکی شده و باعث می‌شود عضو اصطکاکی همواره در حالت اشباع باقی بماند، این عضو از لحاظ ریاضی مشابه با آمپلی فایر با ضریب بهره واحد در مدل آنالوگ الکتریکی است (شکل ۱-الف). با استفاده از رابطه مخزن خطی (۲) و معادله پیوستگی به صورت زیر:

$$I - Q = \frac{ds_A}{dt} \quad (3)$$

که t, Q, I و s_A به ترتیب زمان، دبی خروجی، دبی ورودی و حجم آب در مخزن مدل آنالوگ مایع می‌باشند، معادله دیفرانسیل حاکم بر یک مدار آنالوگ مایع استخراج می‌شود:

$$I - Q = \frac{ds_A}{dt} \rightarrow A \frac{dy}{dt} + py = I \rightarrow \frac{A dy}{P dt} + y = \frac{I}{P} \quad (4)$$

با

$$\frac{A dQ}{p dt} + Q = I \quad (5)$$

بطور مشابه می‌توان معادله دیفرانسیل حاکم بر یک مدار آنالوگ الکتریکی را با استفاده از قانون کیرشهوف به دست آورد [۱۲]:

$$R.C \frac{dE_2}{dt_0} + E_2 = E_1 \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 & [D^n + (\frac{\alpha_1}{\beta_1} + \frac{\alpha_2}{\beta_2} + \dots + \frac{\alpha_{2n-1}}{\beta_{2n-1}})D^{n-1} \\
 & + (\sum_{i=1}^{2n-1} \sum_{j=i+1}^{2n-1} \frac{\alpha_i \alpha_j}{\beta_i \beta_j})D^{n-2} + \\
 & (\sum_{i=1}^{2n-1} \sum_{j=i+1}^{2n-1} \sum_{k=j+1}^{2n-1} \frac{\alpha_i \alpha_j \alpha_k}{\beta_i \beta_j \beta_k})D^{n-3} + \dots + (\prod_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\beta_i})D^0] Q_n = 0
 \end{aligned}$$

$\alpha_i \neq \alpha_j$
 $\beta_i \neq \beta_j$
 $\alpha_i \neq \alpha_j \neq \alpha_k$
 $\beta_i \neq \beta_j \neq \beta_k$

(۹)

که

برای

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

و برای

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

و

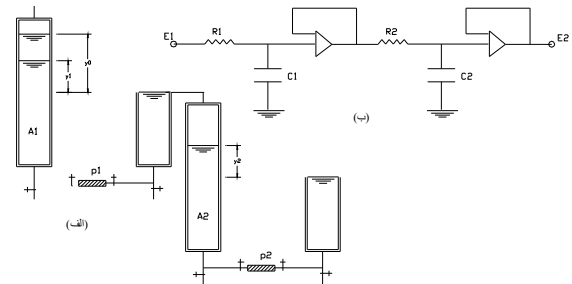
$$D = \frac{d}{dt}$$

این معادله یک معادله دیفرانسیل خطی مرتبه n با ضرایب ثابت است که تمام ریشه‌های معادله مشخصه آن که می‌توانند توسط روش Graeff Root Squaring [۱۲] محاسبه شوند، غیر صفر و حقیقی غیر مثبت بوده و در نتیجه سیستم مطلقاً پایدار خواهد بود و برای یک ورودی دلخواه $I(t)$ بر مخزن اول، در طرف دوم معادله دیفرانسیل عبارت زیر ظاهر خواهد شد:

$$\prod_{i=1}^n \frac{p_i}{A_i} I(t) \quad (10)$$

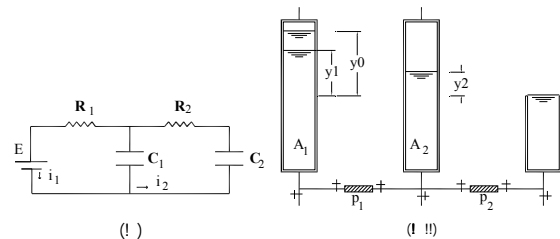
می‌توان معادله‌ای مشابه برای حالت مخزن آبخاری نیز به دست آورد که این معادله برای n مخزن آبخاری با سطح مقطع یکسان A و ضریب اصطکاک p به صورت زیر خواهد بود [۱۱]:

$$\left(1 + \frac{A}{p} D\right)^n Q_n(t) = I(t) \quad (11)$$



شکل ۲ سیستم آبخاری مدل آنالوگ

(الف) مایع (ب) الکتریکی



شکل ۳ سیستم متصل مدل آنالوگ

(الف) مایع (ب) الکتریکی

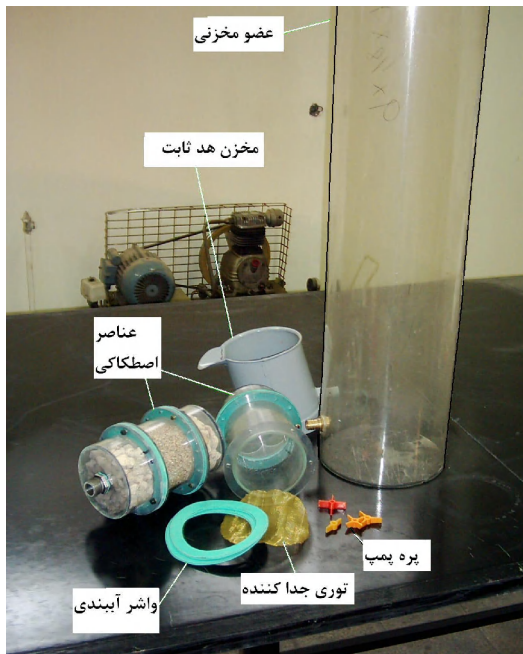
برای سیستم نشان داده شده در شکل ۳- الف معادله دیفرانسیل حاکم به صورت زیر است [۱۱]:

$$\frac{d^2 Q_2}{dt^2} + \left(\frac{P_1}{A_1} + \frac{P_2}{A_2} + \frac{P_1}{A_2} \right) \frac{dQ_2}{dt} + \frac{P_1 P_2}{A_1 A_2} Q_2 = 0 \quad (8)$$

که t زمان و اندیس‌ها بیانگر شماره مخزن‌ها است. معادله حاکم بر سیستم مخازن آبخاری شکل ۲- الف مشابه معادله (۸) خواهد بود البته بدون وجود مقدار $\frac{p_1}{A_2}$ در جمله دوم

که این موضوع بیانگر عدم تأثیرگذاری دو مدار بر همدیگر است. معادله دیفرانسیل حاکم بر سیستم n عدد مخزن متصل به صورت زیر است [۱۱]:

در طراحی مدل آزمایشگاهی بایستی ارتفاع مخازن، ابعاد عناصر اصطکاکی و نوع ماسه کاربردی، طوری انتخاب شوند که آب از مخازن سرریز نشود. در شکل ۴ عناصر تشکیل دهنده مدل آنالوگ مایع همراه با چند پره مختلف پمپ که با آنها می‌توان دبی‌های مختلف را به سیستم اعمال کرد نشان داده شده‌اند و در شکل ۵ نیز یک مدار مدل آنالوگ مایع ارائه شده است.



شکل ۴ عناصر مدل آنالوگ مایع

قبل از هرگونه ترکیب مدارات آنالوگ مایع برای شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب، بایستی تک به تک مدارات به دقت صحت‌سنجی شوند، بار ورودی به مخازن را می‌توان به صورت پالس به پالس و با استفاده از پمپ‌هایی با ظرفیت‌های انتقال جریان مختلف، به سیستم اعمال کرد.



شکل ۵ یک مدار مدل آنالوگ مایع

برای حالات مختلف از ترکیبات این مخازن در حالت سری، موازی، مختلط، آبشاری و یا متصل می‌توان به صورت مشابه به معادله دیفرانسیل حاکم بر سیستم دست یافت.

۳- مقیاس و ساخت آزمایشگاهی مدل

به دلیل سادگی ساختار مدل آنالوگ مایع، این مدل می‌تواند در هر آزمایشگاهی به آسانی ساخته و استفاده شود و چون سیستم حاکم بر مدل خطی است، لذا از آن می‌توان برای آزمایشات مختلف با دبی و زمان مقیاس شده مورد نظر استفاده کرد.

با توجه به وجود دو متغیر مستقل در یک سیستم آنالوگ مایع (دبی یا هد آب و زمان)، برای هر نوع شبیه‌سازی آزمایشگاهی در ابتدا نیاز به تعیین مقیاس دبی و مقیاس زمان وجود دارد، مقیاس زمان را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\tau = \frac{K}{\frac{A}{P}} = \frac{T}{t} \quad (12)$$

با معلوم بودن مقدار K برای یک حوضه و در نظر گرفتن مقدار دلخواه و معقول برای τ ، مقدار $\frac{A}{P}$ به دست می‌آید و سپس با اختصاص دادن مقادیر مناسب برای A ، α و مقدار l مقدار p و در نتیجه c با استفاده از رابطه (۲) قابل محاسبه خواهد بود. برای تهیه توده ماسه موردنظر می‌توان از آزمایش نفوذپذیری مکانیک خاک استفاده کرد. در صورتی که دبی قابل اعمال در آزمایشگاه با توجه به امکانات موجود Q_{\max} و ماکزیمم دبی در سیستم حقیقی (پروتوتیپ) O_{\max} باشد، مقیاس دبی را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\gamma = \frac{O_{\max}}{Q_{\max}} = \frac{O}{Q} \quad (13)$$

و ماکزیمم ارتفاع آب در آخرین مخزن (y_{\max}) را نیز می‌توان به طور تقریبی از رابطه زیر به دست آورد:

$$Q_{\max} = p y_{\max} \quad (14)$$

رواناب مستقیم این حوضه استفاده گردید. این مثال از کتاب چاو [۴] که مشهورترین و پرکاربردترین کتاب درسی در زمینه هیدرولوژی است انتخاب شده که با توجه به اهداف آموزشی تحقیق حاضر، مدلسازی آزمایشگاهی مثال مذکور می‌تواند کمک شایانی در درک بهتر مسائل روندیابی جریان داشته باشد. در جدول ۱ مشخصات کلی سیستم و عناصر مدل آنالوگ مایع و در شکل ۶ یک شمای کلی از ساختار مدل ساخته شده در آزمایشگاه برای شبیه‌سازی مدل ناش حوضه شول کریک آورده شده است. برای مقایسه نتایج، در شکل ۷ هیدروگراف‌های رواناب مستقیم مشاهداتی، محاسباتی توسط مدل تئوریک ناش و اندازه‌گیری شده با استفاده از مدل آنالوگ مایع به همراه هیتوگراف بارش اضافی نشان داده شده است. معیارهای برازش محاسبه شده برای تعیین کفایت مدل‌ها در جدول ۲ ارائه شده است که با وجود عالی بودن این معیارها باید به این نکته اذعان داشت که با توجه به اهداف آموزشی این تحقیق فقط از یک سری داده بارش- رواناب برای کالیبره و صحت‌سنجی مدل‌ها استفاده شده و به همین دلیل معیارهای برازش برای صحت‌سنجی مدل‌ها مقادیر عالی را نشان می‌دهد، بدیهی است در کارهای عملی (غیرآموزشی) برای کالیبره و صحت‌سنجی مدل‌ها به تعداد داده‌های مختلفی نیاز بوده و نتیجتاً مقادیر معیارهای برازش مدل‌ها کمتر خواهد بود.

دبی زیاد اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه متناظر با ارتفاع زیاد در آخرین مخزن بوده و چون طبق قانون داریسی، سرعت، رابطه‌ای مستقیم با ارتفاع آب در مخزن دارد، در نتیجه دبی‌های بالا بیانگر وجود سرعت نسبتاً بالا در مدار آنالوگ مایع بوده و از آنجایی که افت‌های طولی و موضعی متناسب با مجذور سرعت است پس در دبی‌های اندازه‌گیری شده بالا مقادیر افت‌ها نسبت به دبی‌های پایین بیشتر است، از این رو این واقعیت می‌تواند دلیلی برای وجود اختلاف جزئی بین نتایج مدل آنالوگ مایع و مدل تئوریک ناش در دبی‌های بالا باشد شکل ۷.

۴-۲ اثر شکل حوضه در هیدروگراف خروجی

بی‌شک ملاحظه آزمایشگاهی تأثیر شکل ظاهری حوضه در هیدروگراف خروجی می‌تواند جالب توجه باشد. برای این

عضو مخزنی مدرج شده است تا بتوان در هر زمان ارتفاع آب (هد آب) نسبت به عضو مخزنی هد ثابت، شکل ۱-ب را خواند سپس با توجه به رابطه ۲ و با معلوم بودن هد آب (y) می‌توان دبی خروجی از عضو مخزنی را به دست آورد، لذا به این ترتیب برای تعیین دبی خروجی کافی است هد آب قرائت شود.

۴- کاربرد مدل آنالوگ مایع در آموزش فرآیند بارش- رواناب

برای بررسی قابلیت‌های مدل آنالوگ مایع در زمینه آموزش بهتر فرآیند بارش- رواناب، این مدل برای شبیه‌سازی سه موضوع اساسی در زمینه مدلسازی بارش- رواناب مورد استفاده قرار گرفت که به تفصیل به تشریح آنها پرداخته می‌شود.

۴-۱ شبیه‌سازی آزمایشگاهی مدل ناش

با استفاده از مفهوم مخزن خطی، ناش [۱۳] با جایگزین کردن یک حوضه آبریز با یک سری مخازن خطی یکسان آبشاری یک مدل تفهیمی برای استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای ارائه کرد. این مدل به شکل گسترده‌ای توسط مهندسی هیدرولوژی برای روندیابی جریان مورد استفاده قرار گرفته است که به‌عنوان مثال می‌توان به مراجع [۱۴] و [۱۵] اشاره کرد؛ همچنین سوکولوفسکی و شکلومانوف [۱۶] و لوین [۱۷] با استفاده از مدل آنالوگ الکتریکی اقدام به شبیه‌سازی آزمایشگاهی مدل ناش کردند. با مقایسه معادله دیفرانسیل مدل تئوریک ناش به شکل زیر [۳]:

$$(1 + KD)^n O_n(T) = I_L(T) \quad (15)$$

و معادله (۱۱)، تشابه بین این دو سیستم به وضوح ملاحظه می‌شود به طوری که K و $\frac{A}{p}$ هم با یکدیگر هم ارزند.

براساس این تشابه می‌توان از مدل آنالوگ مایع برای شبیه‌سازی آزمایشگاهی مدل ناش استفاده نمود. برای این منظور حوضه شول کریک (Shoal Creek) به مساحت 18 km^2 واقع در تگزاس انتخاب شد و از داده‌های نیم‌ساعته بارش ۲۵-۲۴ می ۱۹۸۱ برای مدل‌سازی بارش اضافی-

آنالوگ مایع، عضو اصطکاکی با طول زیاد دلالت بر قسمت وسیع تر خواهد داشت. مشخصات سیستم و عناصر مدل آنالوگ مایع مربوطه در جدول (۱) آورده شده است. بعد از راه اندازی مدل با اعمال یک پالس بارش مقیاس شده به طور همزمان بر هر سه مخزن، هیدروگراف مقیاس شده خروجی مدل برای حالت اول به دست آمد و سپس با تعویض ترتیب مدارات و اعمال مجدد بارش مشابه حالت قبل هیدروگراف خروجی برای حالت دوم نیز حاصل شد که نتایج در شکل ۹ نشان داده شده‌اند؛ بدیهی است در مورد حوضه واقعی با ضرب مقادیر دبی و زمان در مقیاس‌های مربوطه هیدروگراف خروجی از حوضه به دست می‌آید. با توجه به آن هیدروگراف‌های رسم شده در شکل ۹ زمان رسیدن به آن کمتر است و این برای هر دو حالت، مشاهده می‌شود که برای حالت (ب) در مقایسه با حالت (الف) مقدار دبی ماکزیمم بیشتر ولی موارد همخوانی مناسبی با نتایجی که شن [۷] توسط مدل آنالوگ الکتریکی به دست آورد، دارند.

در هر دو حالت، مشاهده می‌شود که برای حالت (ب) در مقایسه با حالت (الف) مقدار دبی ماکزیمم بیشتر ولی موارد همخوانی مناسبی با نتایجی که شن [۷] توسط مدل آنالوگ الکتریکی بدست آورد، دارند.

منظور مطابق شکل ۸ دو حوضه مجازی که به صورت اغراق‌آمیزی کاملاً مثلثی فرض شده‌اند در نظر گرفته شد، این دو حوضه از هر لحاظ جز مخرج حوضه با همدیگر مشابه هستند. دو حوضه توسط خطوط ایزوکرون به سه قسمت تقسیم و هر قسمت توسط یک مخزن خطی مدل گردید، در این حالت با توجه به اینکه بجز مساحت، سایر خصوصیات فیزیکی هر قسمت با هم برابر است، با استفاده از تئوری روندیابی ژئومورفولوژیکی حوضه، مقدار ضریب ذخیره مخزن خطی (K) با ضریب تناسب θ متناسب با مساحت هر قسمت در نظر گرفته شد:

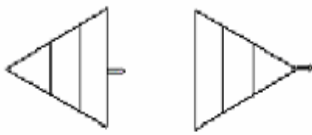
$$K_i = \theta \eta_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (16)$$

که در این رابطه η_i مساحت هر قسمت بوده در نتیجه نسبت K به η برای تمامی قسمت‌ها مساوی ولی مقدار K مختلف است [۷] و مقدار $\frac{A}{p}$ مخازن خطی در مدل آنالوگ مایع نیز یکسان نخواهد بود. برای سادگی مدلسازی، مقادیر A ، c و a در رابطه (۲) ثابت ولی طول هر عضو اصطکاکی (l_i) متغیر در نظر گرفته شد که با توجه به روابطه (۱۶) و (۲) و هم ارزی K با مقدار $\frac{A}{p}$ در مدل

جدول ۱ مشخصات سیستم ها و عناصر مدل های آنالوگ مایع استفاده شده در آزمایشگاه

کمیت	مقدار برای مدل قسمت			توضیحات برای مدل قسمت		
	(۱-۴)	(۲-۴)	(۳-۴)	(۱-۴)	(۳-۴)	(۳-۴)
تعداد مخازن (n)	۳	۳	۳	محاسبه شده با روش مومنتوم [۴]	دلخواه، جدا شده با خطوط ایزوکرون	دلخواه، جدا شده با خطوط ایزوکرون
ضریب ذخیره مخزن در پروتوتیپ (K) (ساعت)	۰/۴۷	—	—	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 وجود داشت
طول عناصر اصطکاکی (l) (m)	۰/۱	۰/۱۶۵ و ۰/۱۲۵ و ۰/۰۸۵	۰/۱	مفروض	مفروض و با توجه به معادله (۱۶)	مفروض
سطح مقطع عناصر اصطکاکی (m ²) (a)	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 هیدرولیکی ماسه بکار رفته در عناصر اصطکاکی (c) (m/s)	۰/۰۰۵۰۱	۰/۰۰۵۴	-۰/۰۰۵۴	ماسه درشت، تمیز، تیز گوشه، مانده بین الک های شماره ۱۶ و ۸	ماسه درشت، تمیز، تیز گوشه، مانده بین الک های شماره ۱۶ و ۸	ماسه درشت تمیز، تیز گوشه، مانده بین الک های شماره ۱۶ و ۸
سطح مقطع مخازن (A) (m ²)	۰/۰۳۸	۰/۰۳۸	۰/۰۳۸	مقطع دایره ای به قطر ۲۲ Cm	مقطع دایره ای به قطر ۲۲ Cm	مقطع دایره ای به قطر ۲۲ Cm
ارتفاع مخازن (m)	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲	طوری که آب از مخازن سرریز نشود (بزرگتر از Y _{max})	نشود (بزرگتر از Y _{max})	طوری که آب از مخازن سرریز نشود (بزرگتر از Y _{max})
مقیاس دبی (γ)	۰۰/۵۹۴۰۰	—	—	با معادله $O_{max} = 495(m^3/s)$ (۱۳) در پروتوتیپ و $Q_{max} = 5(lit/min)$ در آزمایشگاه	فقط مدل آزمایشگاهی وجود داشت	فقط مدل آزمایشگاهی وجود داشت
مقیاس زمان (τ)	۱۸/۵۲	—	—	با معادله (۱۲) پس $\Delta t' = \frac{0/5 \times 3600}{1852} 98s$	فقط مدل آزمایشگاهی وجود داشت	فقط مدل آزمایشگاهی وجود داشت

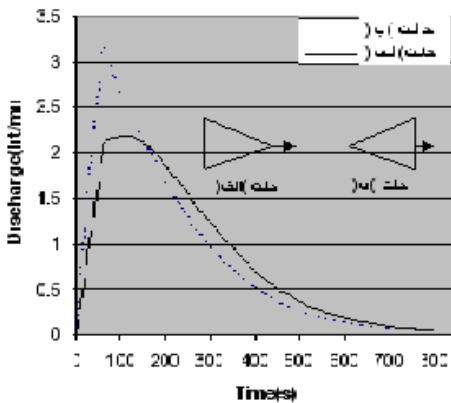
* برای مدل قسمت (۲-۴) از سه عنصر اصطکاکی با طول های مختلف استفاده شد.



شکل ۸ دو حوضه فرضی برای بررسی اثر شکل حوضه در هیدروگراف خروجی



شکل ۶ شبیه سازی آزمایشگاهی مدل ناش توسط مدل آنالوگ مایع برای حوضه شول کریک

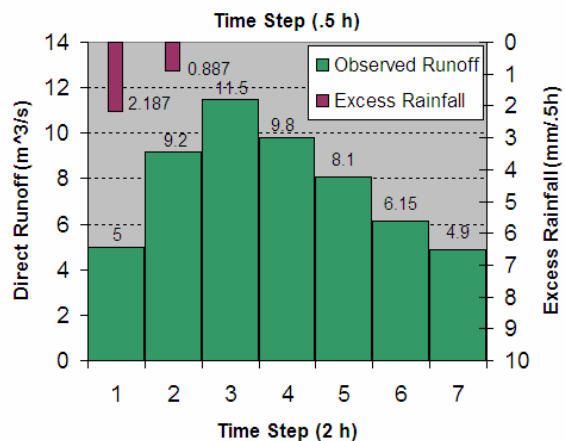


شکل ۹ هیدروگراف های خروجی در دو حالت (الف) و (ب) برای پالس بارش اعمالی به مقدار ۳/۸۷ lit/min و به مدت ۶۰ ثانیه

۳-۴ بررسی پاسخ حوضه به جهت حرکت بارش

جهت حرکت بارش روی حوضه، مخصوصاً در حوضه های بزرگ، تأثیر محسوسی بر هیدروگراف خروجی می گذارد که بررسی و آنالیز آزمایشگاهی این موضوع می تواند برای نوآموزان هیدرولوژی جالب و آموزنده باشد. در این راستا حوضه ای فرضی که توسط خطوط ایزوکرون به سه قسمت مساوی از نظر مساحت تقسیم و توسط مخازن خطی مشابه جایگزین شده اند در نظر گرفته شد. مشخصات سیستم استفاده شده در جدول ۱ آورده شده است.

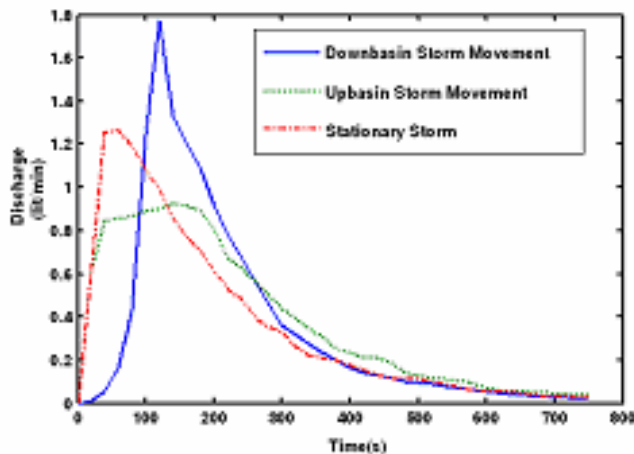
برای مدل سازی حرکت بارش از بالادست به پایین دست حوضه به ترتیب پالس های I, II و III از بارش شکل ۱۰ (بارش مقیاس شده در گام زمانی معلوم مقیاس شده) بر مخازن بالادست، میانی و پایین دست به عنوان بار ورودی به سیستم اعمال و هیدروگراف خروجی از مدل به دست آمد. برای حالت بعدی، حرکت بارش از پایین دست به بالادست، عکس عملکرد ذکر شده اعمال گردید. برای مقایسه، هیدروگراف خروجی حوضه برای بارش ایستا



شکل ۷ هیدروگراف های مستقیم مشاهداتی و محاسباتی برای مدل ناش

جدول ۲ معیارهای کفایت مدل ها برای مسئله ناش

۰/۹۶۲	معیار ناش و ساتکلیف [۱۸] برای مدل تئوریک ناش
۰/۹۵	معیار ناش و ساتکلیف برای مدل آنالوگ مایع ناش
۰/۹۸	معیار R^2 بین مدل تئوریک و مدل آنالوگ مایع ناش



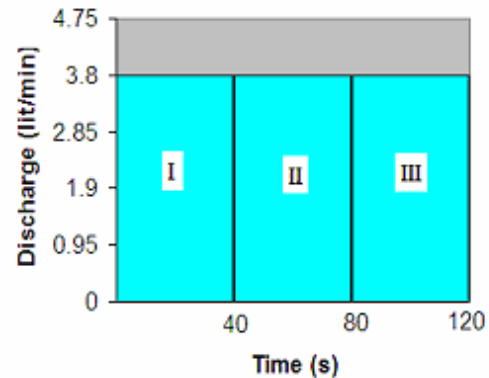
شکل ۱۱ هیدروگرافهای خروجی از مدل برای مسئله بررسی اثر جهت حرکت بارش بر هیدروگراف خروجی

با توجه به پیچیدگی مدل‌های تفهیمی از یک طرف و پایین بودن قوه تجسم دانشجویان مبتدی از طرف دیگر، درک عمیق مدل‌های تفهیمی که کاربرد وسیعی در شبیه سازی فرایندهای هیدرولوژیکی دارند برای نوآموزان دشوار می‌باشد که نظر به موارد مطرح شده و اظهار عقیده دانشجویان، استفاده از مدل‌های فیزیکی آنالوگ بطور اعم و مدل آنالوگ مایع بطور اخص که دارای ویژگی‌هایی خاص است، می‌تواند در این زمینه مثر و ثمر واقع گردد. استفاده از این مدل در جهت تحقق بخشیدن به این ضرب‌المثل چینی است که می‌گوید: "به من بگو، فراموش می‌کنم؛ نشانم بده، ممکن است یادم بماند؛ بگذار انجام دهم، می‌فهمم" [۲۲].

بطور خلاصه می‌توان مزایای زیر را برای مدل آنالوگ مایع متصور شد:

- الف) این مدل می‌تواند با استفاده از ابزار ساده ساخته شده و به آسانی در هر آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گیرد.
- ب) با توجه به خاصیت دیداری مدل، مدل مذکور می‌تواند به عنوان یک ابزار کمک آموزشی مفید در زمینه روندیابی جریان در هیدرولوژی مهندسی مورد استفاده قرار گیرد.
- ج) مدل آنالوگ مایع بر مبنای چند قانون ساده هیدرولیکی بنا شده و در نتیجه از مدل آنالوگ الکتریکی مخصوصاً برای دانشجویان مهندسی عمران قابل فهم تر است.

(Stationary rainfall) (بارش با حجم و مدت زمان یکسان با بارش‌های متحرک که به طور ثابت برکل حوضه می‌بارد) نیز توسط مدل آنالوگ مایع به دست آمد، نتایج حاصل برای بارش اعمال شکل ۱۰ برای هر سه حالت در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۰ بارش اعمالی برای بررسی اثر جهت حرکت بارش بر هیدروگراف خروجی

با توجه به هیدروگراف‌های رسم شده ملاحظه می‌شود که در حرکت بارش به طرف پایین دست در مقایسه با حالت حرکت بارش به طرف بالادست، هیدروگراف از زمان دیرتری شروع و شیب قسمت بالارونده و فروکش کننده آن زیاد بوده و دبی ماکزیمم زیاد ولی زمان رسیدن به این دبی کمتر است، در بارش ایستا مقدار دبی ماکزیمم بین دو حالت فوق‌الذکر قرار گرفته ولی زمان رسیدن به این دبی از هر دو حالت زودتر است. این نتایج همسو با مشاهدات گزارش شده توسط فروید و همکاران [۱۹] و اگدن و همکاران [۲۰] در مورد حوضه‌های واقعی و همین‌طور روبرتز و کلینگمن [۲۱] در مورد یک حوضه کوچک مقیاس آزمایشگاهی بوده و در مرجع اخیر دلایل این موارد به تفصیل تشریح گردیده‌اند. لازم به ذکر است که در حرکت بارش بر روی حوضه، علاوه بر جهت حرکت، اندازه سرعت حرکت بارش نیز می‌تواند بر هیدروگراف خروجی تأثیرگذار باشد ولی این اثر بر کلیت موضوع بیان شده در مورد تأثیر جهت حرکت خللی وارد نمی‌سازد.

حوضه و بررسی تأثیر شکل حوضه روی هیدروگراف خروجی حوضه استفاده شد. علی‌رغم خطاهای معمول آزمایشگاهی، با توجه به معیار R^2 (ضریب همبستگی) و منطقی بودن نتایج حاصل، موفق بودن مدل در مدلسازی این مسائل قابل حصول می‌باشد.

با توجه به خصوصیات و قابلیت‌های ذکر شده مدل، این مدل پتانسیل خوبی در جهت تبدیل شدن به یک ابزار کمک آموزشی نه تنها در زمینه مهندسی هیدرولوژی بلکه در سایر مسائل مهندسی مشابه دارد. برای درک بهتر و بیشتر خواص و ظرفیت‌های مدل آنالوگ مایع پیشنهاد می‌شود که از آن برای مدلسازی تعداد دیگری از مسائل هیدرولوژیکی استفاده شود که ارائه نحوه انجام این مورد به مقاله‌های بعدی موقوف می‌شود.

تشکر و قدردانی

قسمت آزمایشگاهی تحقیق در آزمایشگاه پروژه آب بخش راه و ساختمان دانشگاه شیراز انجام گرفت، بدین وسیله مؤلفین سپاس خود را نسبت به مساعدت‌های رسیده ابراز می‌دارند.

مراجع

- [1] فاخر علی، " کاربرد مدل‌های فیزیکی در آموزش دروس مهندسی"، مجله آموزش مهندسی ایران، جلد ۲، شماره ۱، ۱۳۷۹، صفحه‌های ۳۹ تا ۷۲.
- [2] شریعتمداری علی، " نکته‌های اساسی در آموزش مهندسی"، مجله آموزش مهندسی ایران، جلد ۱، شماره ۲، ۱۳۷۸، صفحه‌های ۱۲۱ تا ۱۲۵.
- [3] Singh, V. P., "Hydrological Systems, Vol. 1: Rainfall-Runoff Modelling", 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 Hydrol., 6, 1968, pp33-44.
- [6] Quick, M. C., "River flood flowd forecasts and probabilities", J. of Hydraulics Div, ASCE, 91 (HY3), 1965, pp1-17.
- [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.

د) زمان آزمایش در این مدل برخلاف مدل آنالوگ الکتریکی بسیار سریع نبوده و سیستم به آهستگی و آسانی قابل رویت و آنالیز می‌باشد.

ه) در این مدل در هر لحظه دلخواه می‌توان آزمایش را متوقف نمود و سپس در زمانی دیگر آن را ادامه داد.

و) با توجه به خطی بودن مدل امکان استفاده از این مدل برای تمام حالات، ممکن است حال آن که مدل فیزیکی کوچک مقیاس فقط برای یک حوضه خاص قابل استفاده می‌باشد.

اما ساخت مدل هزینه بر و جاگیر بوده و نیاز به فضای زیادی دارد و با توجه به وجود افت‌ها و سایر خطاها این مدل دقت کمتری نسبت به مدل آنالوگ الکتریکی داشته و از طرفی چون هنوز بعضی از اعضاء مدل آنالوگ الکتریکی برای مدل آنالوگ مایع شبیه‌سازی نشده‌اند، این مدل انعطاف‌پذیری کمتری نسبت به مدل آنالوگ الکتریکی دارد. موارد اخیر را می‌توان در زمره عیوب مدل آنالوگ مایع به حساب آورد. برخی از خطاهای تأثیرگذار بر مدل را که در حالت کلی می‌توان به دو دسته تصادفی و سیستماتیک طبقه‌بندی کرد، به صورت زیر است:

الف) خطاهای قرائت هد آب.

ب) خطاهای مربوط به شرایط محیطی مثل تغییرات دما که می‌تواند بر ویسکوزیته و به تبع آن در مقدار c اثر بگذارد.

ج) خطاهای مربوط به پمپ‌های اعمال کننده بار.

د) خطاهای مربوط به آب بندی اعضاء مدل که با توجه به غیر کارخانه‌ای بودن اعضا ساخته شده، این خطاها بوجود می‌آیند.

۵- نتیجه گیری

مدل آنالوگ مایع ارائه شده براساس چند قانون ساده هیدرولیکی بنا شده و می‌تواند برای شبیه‌سازی آزمایشگاهی مسائل روندیابی هیدرولوژیکی استفاده شود. این مدل در بردارنده مفهوم مخزن خطی بوده و هر مدار آن دارای سه قسمت اصلی است: یک مخزن، یک عنصر اصطکاکی به صورت یک محیط متخلخل و یک مخزن هد ثابت. از آن برای تعیین قابلیت‌های مدل آنالوگ مایع، شبیه‌سازی مدل ناش، آنالیز اثر جهت حرکت بارش روی

- [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 21 st. 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 Koach, L. D., "Teaching mathematics with analog computers", Analog Techniques, 1964, pp6-12, Nov.
- [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), 1957, pp114-121.
- [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), 1999, pp1527-1540.
- [15] Cheng, S. J. and Wang, R. Y., "An approach for evaluating the hydrological effects of urbanization and its application", Hydrological Process, 16(7), 2002, pp1453-1418.
- [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 Hydrol, 10(3), 1970, pp282-290.
- [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), 1984, pp87-91.
- [20] Ogden, F. L., Richardson, J. R. and Julien, P. Y., "Similarity in catchment response: 2. Moving rainstorms", Water Resources Res., 31(6), 1995, pp1543-1547.
- [21] Robests, M. C., Kingeman P. C., "The influence of land form and precipitation parameters on flood hydrographs", J. of hydrol, 11, 1970, pp393-411.

[۲۲] کتاب علوم تجربی، سال سوم دوره راهنمایی تحصیلی، وزارت آموزش و پرورش، ۱۳۸۳.