

استفاده از تخمین‌های طیفی برای تعیین هیدروگراف واحد هموار شده*

علی قیامی باجگیرانی^(۱) محمد باقر شریفی^(۲) محمود فغفور مغربی^(۳) علی اکبر عارفی جمال^(۴)

چکیده مطالعات قبلی در مورد محاسبه هیدروگراف واحد حوضه‌های آبریز نشان می‌دهد که این هیدروگراف به دلیل وجود خطا در اندازه‌گیری داده‌ها و فرض خطی بودن رابطه بارش - رواناب دارای اغتشاش بوده و هیدروگراف واحد استخراج شده از رگبارهای مختلف، با هم متفاوت هستند. در این مطالعه، ابتدا بر اساس روش حداقل مربعات، هیدروگراف واحد برای ۱۶ حادثه رگبار در یک حوضه ۴۴۹ هکتاری در حومه شهر ریسل آمریکا محاسبه می‌شود. برای شناخت دوره‌ی تناوب اغتشاش، طیف فرکانس هر هیدروگراف واحد توسط تبدیل فوریه محاسبه می‌شود. نتایج حاصل از طیف فرکانس برای کاهش اغتشاش هیدروگراف واحد از روش میانگین متحرک وزنی با توزیع نرمال وزن‌ها استفاده خواهد شد. از میان ۱۶ هیدروگراف واحد هموار شده، تنها یکی به عنوان هیدروگراف واحد نماینده حوضه توسط روش اعتبارسنجی متقابل انتخاب می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که روش‌های میانگین متحرک وزنی و اعتبارسنجی متقابل در رسیدن به یک هیدروگراف واحد بدون نوسان و یگانه مناسب می‌باشند.

واژه‌های کلیدی هیدروگراف واحد، اغتشاش، اعتبارسنجی متقابل، تخمین طیفی.

Using of Spectral Estimations for Determination of Smoothed Unit Hydrograph

A. Ghiami Bajgirani M.B. Sharifi M.F. Maghrebi A. Arefijamaal

Abstract Historical researches concerning unit hydrograph (UH) demonstrate significant variation and presence of noise due to error in measurements and the assumption of linearity in rainfall-runoff relation. In this study, first, the UH is calculated for 16 storm events based on The least square method in a 449 hectare basin located in the vicinity of Riesel city, USA. In order to recognize noise frequencies, spectrums of the UHs are calculated for each UH by Fourier transformation. The results obtained from the spectral analysis are used for the noise reduction of the UH via a normal - weighted moving average method. From 16 smoothed UHs, one UH is selected as the representative UH of the basin by cross-validation method. The results showed that the methods of the weighted moving average and cross-validation are suitable for obtaining a non - oscillatory and unique UH.

Key Words Unit Hydrograph, Noise, Cross - Validation, Spectral Estimation.

* تاریخ تصویب مقاله ۸۸/۱۱/۱۲ و تاریخ دریافت نسخه‌ی نهایی اصلاح شده ۸۸/۱۱/۲۰
 (۱) نویسنده‌ی مسئول، دانشجوی دکترای عمران- آب و هیدرولیک، دانشگاه فردوسی مشهد
 (۲) استادیار، گروه عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
 (۳) دانشیار، گروه عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
 (۴) استادیار، گروه ریاضی، دانشگاه تربیت معلم سبزوار

مقدمه

هیدروگراف واحد (Unit Hydrograph, UH) به عنوان هیدروگراف رواناب مستقیم حاصل از یک واحد بارندگی مؤثر که به طور یکنواخت و در تداوم مشخص در حوضه توزیع شده باشد، تعریف می شود [1]. در این تئوری، حوضه آبریز به صورت یک سیستم خطی عمل کرده که در آن هیتوگراف بارش مؤثر و هیدروگراف رواناب مستقیم به ترتیب ورودی و خروجی سیستم بوده و هیدروگراف واحد، کرنل فیلتر (Kernel Filter) یا تابع انتقال سیستم است. رابطه‌ی بین ورودی، خروجی و کرنل فیلتر در این سیستم به صورت معادله‌ی پیچش (Convolution) زیر بیان می شود [2]:

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \leq M} P_m U_{n-m+1} \quad (1)$$

که در آن P_m بارش m ام از هیتوگراف بارندگی مؤثر $(m = 1, 2, \dots, M)$ ، Q_n مختصه n ام از هیدروگراف رواناب مستقیم $(n = 1, 2, \dots, N)$ و U_{n-m+1} مختصه $(n - m + 1)$ ام از UH است. تعداد کل عناصر UH برابر $N - M + 1$ است. چنانچه در یک حادثه‌ی رگبار، بارندگی مؤثر و رواناب مستقیم معلوم باشد، معادله‌ی (1) می تواند برای تعیین UH به کار رود (شناسایی سیستم System identification). بالعکس، با معلوم بودن بارندگی مؤثر و UH می توان رواناب مستقیم را تعیین نمود (شبیه سازی سیلاب). روش های متعددی برای استخراج UH توسعه یافته که از آن جمله می توان به تقریبات متوالی [3]، تبدیلات سیستم [4]، حداقل مربعات [5] و برنامه ریزی خطی [6] اشاره نمود. در کلیه‌ی روش های مذکور، UH دارای اغتشاش (Noise) و در حوادث رگبار مختلف، غیر یگانه است که علل آن وجود خطا در داده های اندازه گیری شده بارندگی و رواناب و انحراف حوضه از رفتار یک سیستم خطی است. Blank و همکاران [7] پخش خطا به علت

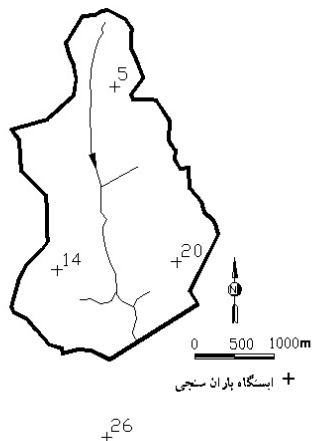
اغتشاشات در UH را مطالعه نمودند. آنها دریافتند که خطای UH ناشی از اغتشاش با فاکتور $\frac{1}{6}$ تا $\frac{1}{25}$ در هیدروگراف خروجی حوضه، کاهش می یابد. روش های متفاوتی برای کاهش اغتشاش و رسیدن به یک یگانه (Unique) ارائه شده است. در زمینه‌ی کاهش اغتشاش، Rao & Delleur [8] برای حذف اغتشاش در UH، استفاده از فیلتر میانگین متحرک (Moving average, MA) را پیشنهاد دادند؛ لیکن معیاری جهت انتخاب طول فیلتر ارائه نکردند. Chou & Wang [9] با استفاده از تئوری موجک ها و تجزیه UH به باندهای فرکانس بالا و پایین، اغتشاش را با حذف اطلاعات فرکانس بالا در UH کنترل کردند. همچنین آنها با میانگین گیری از چند UH، یک UH نماینده برای حوضه محاسبه نمودند. در عین حال، روش MA علاوه بر سادگی و سرعت بالا در اجرای آن، روشی مؤثر در کاهش اغتشاش تصادفی محسوب می شود [10].

هدف این مقاله، شناخت دوره تناوب اغتشاشات UH توسط ظرفیت های تخمین طیف فوری و حذف آنها توسط روش میانگین متحرک وزنی است. برای این منظور ابتدا توسط تخمین طیف، سیکل اغتشاشات در UH شناسایی می شود. سپس با استفاده از روش میانگین گیری متحرک وزنی، یک مقدار متوسط برای مجموعه نقاطی که در یک سیکل اغتشاش قرار می گیرند، جایگزین می شود تا به این طریق UH همواری به دست آید. UH های هموار شده که به این صورت برای چندین حادثه بارش - رواناب محاسبه می شوند، برای انتخاب شدن به عنوان UH نماینده حوضه با هم رقابت می کنند. معیار انتخاب آنها داشتن حداقل خطای متوسط بین هیدروگراف مشاهده شده و محاسبه شده است وقتی که تک تک UH ها برای همه حوادث بارش - رواناب مورد استفاده قرار می گیرند.

مواد و روش‌ها

رویکرد این مقاله نسبت به کارهای قبل در جهت حل مسئله اغتشاش و غیر یگانه بودن UH، به شرح زیر است:

- ۱- تخمین طیف فرکانس، اطلاعات مفیدی را در رابطه با سیکل اغتشاشات نهفته در UH ارائه می‌دهد که آگاهی از آنها در انتخاب طول فیلتر MA مؤثر می‌باشد.
- ۲- از روش MA وزنی با توزیع وزن‌ها به شکل نرمال برای هموارسازی UH استفاده می‌شود.
- ۳- فرض اساسی برای رسیدن به یک UH یگانه این است که از بین حوادث مختلف وقوع رگبار در حوضه، یک حادثه دارای کمترین خطای اندازه‌گیری در داده‌های بارش - رواناب است و UH هموار شده آن می‌تواند بیانگر UH واقعی حوضه باشد. این UH توسط معیارهای خطا بین رواناب مشاهده شده و محاسبه شده و استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل (Cross - validation) تعیین می‌شود.



شکل ۱ حوضه مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌های باران سنجی در آن [11]

برای هر رگبار یا هیدروگراف رواناب، فاصله‌ی زمانی بین داده‌های اولیه متغیر بوده؛ به طوری که فواصل زمانی کمتر از ۵ دقیقه برای ثبت تغییرات سریع بارش و رواناب مشاهده می‌شود. بنابراین داده‌های بارندگی با فرض شدت ثابت در بازه‌های زمانی اولیه و داده‌های رواناب توسط درون‌یابی خطی، در فاصله‌ی زمانی یک دقیقه به دست آمدند. از آنجا که فواصل زمانی بین داده‌های بارش - رواناب کوتاه بوده و برابر یک دقیقه است، بنابراین شکل هیدروگراف واحد یک دقیقه‌ای محاسبه شده با استفاده از این داده‌ها به شکل هیدروگراف واحد لحظه‌ای بسیار نزدیک می‌باشد.

روش حداقل مربعات. اگر داده‌های بارش مؤثر - رواناب مستقیم از زمان ۱ تا N موجود باشند، معادله‌ی (۱) را می‌توان به شکل ماتریسی زیر نوشت:

$$Q = PU + \varepsilon \quad (2)$$

که در آن Q رواناب مستقیم مشاهده شده به ابعاد $N \times 1$ ، P ماتریسی متشکل از عناصر بارندگی به ابعاد

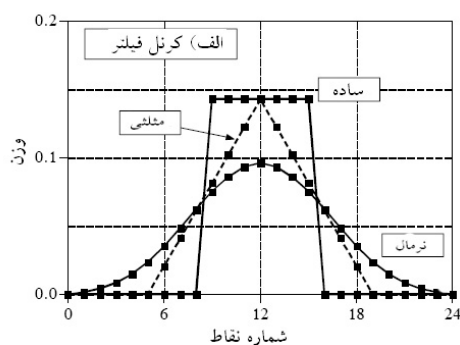
داده‌های مورد استفاده. حوضه مورد استفاده در این تحقیق، حوضه D در آزمایشگاه پژوهشی آب و خاک USDA-ARS در حومه شهر ریسل (Riesel)، در ایالت تگزاس آمریکا قرار دارد [11]. سطح زهکشی حوضه برابر ۴۴۹ هکتار است و چهار ایستگاه باران سنجی داده‌های بارندگی را در حوضه جمع‌آوری می‌کنند شکل (۱). وزن‌های تیسسن برای محاسبه‌ی بارش متوسط به ترتیب برابر: ۳۵/۰۲، ۳۵/۴۴، ۲۸/۷ و ۰/۸۴ درصد برای باران سنج‌های ۵، ۱۴، ۲۰ و ۲۶ می‌باشند. زهکش اصلی حوضه دارای مقطعی منظم و ثابت است. حداکثر ارتفاع حوضه نسبت به سطح متوسط دریا ۵۹۰ متر و حداقل آن ۵۴۰ متر است. همچنین شیب متوسط حوضه ۲/۱ درصد است. تعداد ۱۶ حادثه رگبار طی سال‌های ۱۹۵۸ تا ۱۹۶۶ از این حوضه در دسترس بوده که از روش‌های استاندارد برای محاسبه‌ی رواناب

یک موج تناوبی غالب در فرکانس متناظر با آن است. اغتشاشات به صورت مقادیر اوج در طیف و در فرکانس های بالا ظاهر می شوند.

کاهش اغتشاش به روش میانگین متحرک وزنی.
فیلتر MA ساده با متوسط گیری تعدادی از نقاط بردار ورودی x ، یک نقطه از بردار خروجی y را مطابق معادله ی (۵) تولید می کند:

$$y(i) = \frac{1}{J} \sum_{j=-\frac{(J-1)}{2}}^{\frac{(J-1)}{2}} x(i+j) \quad (5)$$

که در آن J ؛ تعداد نقاط برای میانگین گیری و همچنین وزن داده شده به هر نقطه $x(i)$ در معادله ی (۵)، مساوی و معادل $\frac{1}{J}$ است. از دیدگاهی دیگر، کرنل فیلتر برای رابطه ی MA در معادله ی (۵) یک پالس مستطیلی است و بردار y از پیچش این پالس با بردار x به دست می آید. فیلترهای MA چندعبوری (Multi-pass) از پیچش MA ساده با خودش به دست می آید. با یک بار پیچش، یک کرنل فیلتر مثلی به دست آمده و با دو بار پیچش، کرنل فیلتر مشابه توزیع نرمال شده به نحوی که حداکثر وزن به نقطه مرکزی داده شده و با افزایش فاصله از آن، وزن نقاط کاهش می یابد، شکل (۲-الف).



شکل ۲ کرنل فیلتر (الف) و پاسخ فرکانس (ب) برای سه نوع فیلتر MA ساده، مثلی و نرمال [10]

$N \times L$ و بردار هیدروگراف واحد و به ابعاد $L \times 1$ است. همچنین ترم ε بردار خطای سیستم و دارای ابعاد $N \times 1$ است. برای رسیدن به بردار U از مقادیر معلوم P و Q ، باید مقدار مربعات خطای ε حداقل گردد که بر این اساس، تخمین \hat{U} به صورت زیر داده می شود [10]:

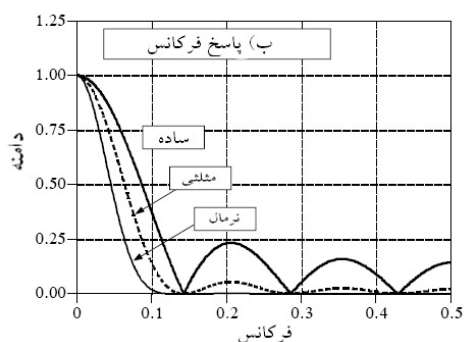
$$\hat{U} = \left(\frac{1}{N} P^T P\right)^{-1} \left(\frac{1}{N} P^T Q\right) \quad (3)$$

که در آن T معرف ترانپوز و -1 نشان دهنده ی وارون ماتریس است.

تخمین طیف. هدف از تخمین طیف (Spectral Estimation)، توصیف چگونگی توزیع توان سیگنال بر اساس فرکانس های موجود در آن است. تخمین طیف اطلاعاتی را در خصوص محدوده کلی فرکانس ها و همچنین فرکانس های غالب در سیگنال ارائه می کند. روش های متعددی برای تخمین طیف توسعه یافته است که روش دوره نما (Periodogram) از آن جمله است. در این روش اگر $X(f)$ تبدیل فوریه دنباله اعداد $X(n)$ باشد؛ به طوری که در این دنباله، یک داده در هر واحد زمان ثبت شده باشد، آنگاه چگالی طیف توان به صورت زیر محاسبه می شود [12]:

$$\hat{S}(f) = \frac{|X(f)|^2}{I} \quad (4)$$

دوره نما از ترسیم $\hat{S}(f)$ در مقابل فرکانس k/I حاصل می شود که I طول دنباله و $k = 0, 1, 2, \dots, I-1$ می باشد. تغییرات سریع و حداکثری $\hat{S}(f)$ بیانگر وجود



محاسبه UH، یک زوج داده بارش مؤثر - رواناب مستقیم وجود دارد که دارای حداقل خطای اندازه‌گیری در داده‌هاست. برای شناخت UH بهینه از میان حوادث رگبار موجود، از روش اعتبارسنجی متقابل استفاده می‌شود. این روش برای شناخت بهترین روش تعیین UH از میان چهار روش برنامه‌ریزی خطی توسط *Zhoa & Tung* [13] استفاده شده که در این‌جا برای انتخاب بهترین UH از میان یک سری حادثه رگبار استفاده می‌شود. روند کار به صورت زیر است:

۱- R رگبار s_1, s_2, \dots, s_R را در نظر بگیرید و در شروع کار $z=1$ را قرار دهید که $z \leq R$.

۲- UH_z را توسط روش حداقل مربعات به دست آورده و پس از هموارسازی با روش MA، آن را با رگبارهای $R-1$ برای تعیین رواناب مستقیم، مطابق معادله (۱) تلفیق کنید.

۳- معیار خطای E را بر اساس تفاوت بین مقادیر مشاهده و محاسبه شده رواناب در هر رگبار $R-1$ محاسبه کرده و سپس مقدار متوسط \bar{E} را برای همه رگبارهای $R-1$ محاسبه کنید.

۴- گام‌های ۲ و ۳ را برای سایر UH_z ها تکرار کنید. هر یک از UH_z ها که دارای کمترین خطای \bar{E} است، به عنوان هیدروگراف واحد نماینده‌ی حوضه انتخاب می‌شود.

در این‌جا، معیارهای خطا به صورت معادلات (۶) تا (۹) مورد استفاده قرار می‌گیرند:

$$E_1 = \left| \frac{\hat{q}_p - q_p}{q_p} \right| \quad (6)$$

$$E_2 = \frac{\hat{q}_p - q_p}{q_p} \quad (7)$$

$$E_3 = \sqrt{\frac{\sum_{b=1}^B (\hat{q}_b - q_b)^2}{B}} \quad (8)$$

همانطور که در قبل ملاحظه شد، تبدیل فوریه برای تخمین طیف فرکانس یک سیگنال به کار می‌رود. همچنین این تبدیل می‌تواند برای تعیین پاسخ فرکانس (Frequency response) یک کرنل فیلتر به کار رود. هر دو مورد کرنل فیلتر و پاسخ فرکانس عملکرد مشابهی را به لحاظ حذف اغتشاش در سیگنال انجام می‌دهند؛ ولیکن از کرنل فیلتر در قلمرو زمان و از پاسخ فرکانس در قلمرو فرکانس استفاده می‌شود. پاسخ فرکانس برای کرنل‌های فیلتر MA ساده، مثلثی و نرمال در شکل (۲-ب) ارائه شده است که از تبدیل فوریه سریع داده‌های شکل (۲-الف) به دست می‌آید. دیده می‌شود که فیلتر MA نرمال در فرکانس‌های بالا بدون نوسان بوده و به شکل یک فیلتر ایده‌آل پایین‌گذر نزدیک می‌شود. به عبارت دیگر، فرکانس‌های بالا در سیگنال اغتشاشی قادر به عبور از این فیلتر نیستند. از طرفی، در یک سیگنال مانند هیدروگراف واحد، فرض کاهش وزن نقاط با دور شدن از نقطه‌ی مرکز میانگین‌گیری، فرض درستی بوده که در جهت حفظ شکل اولیه کمک می‌کند. با در نظر گرفتن خصوصیات مناسب فیلتر MA با ضرایب نرمال، استفاده از این فیلتر در ادامه محاسبات در نظر گرفته می‌شود. با شناخت فرکانس اغتشاش f از تخمین طیف UH، می‌توان دوره‌ی تناوب اغتشاش $J = \frac{1}{f}$ را به دست آورد. چون UH‌های مورد محاسبه در این مقاله یک دقیقه‌ای هستند، بنابراین دوره‌ی تناوب J دقیقه در یک اغتشاش به معنی J نقطه داده خواهد بود. با استفاده از فیلتر MA نرمال (با طول فیلتر برابر J) این نقاط میانگین‌گیری شده و در نتیجه موج اغتشاشی مستهلک شده و UH هموار می‌گردد. در انتها، باید ابعاد UH هموار شده در یک ضریب تصحیح ضرب شده تا ارتفاع رواناب مستقیم برابر واحد شود.

روش اعتبارسنجی متقابل. یکی از مهم‌ترین عوامل در ایجاد اغتشاش و غیریکانه بودن UH ناشی از خطا در اندازه‌گیری داده‌ها است [8]. در این مطالعه فرض می‌شود که از بین مجموعه داده‌های موجود برای

نتایج و بحث

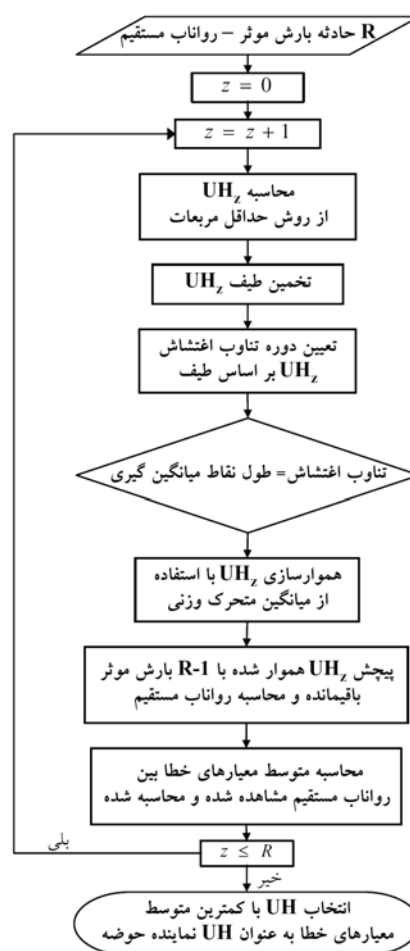
شکل (۴- الف) رواناب مستقیم و بارش مؤثر برای رگبار شماره ۵، از ۱۶ حادثه‌ی انتخابی حوضه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با استفاده از روش حداقل مربعات، UH این رگبار تعیین شده که در شکل (۴-ب) به صورت نقاط، نمایش داده شده است. ملاحظه می‌گردد که فرض خطی بودن رابطه‌ی بارش- رواناب و همچنین خطای داده‌ها باعث گردیده که UH محاسبه شده، نوسانی باشد. شکل (۴- ب) همچنین شامل UH هموارشده به روش MA وزنی بوده که به خوبی توانسته شکل عمومی یک هیدروگراف واحد را نشان دهد. برای اجرای روش MA وزنی به این صورت عمل شد که ابتدا طیف توان این UH اغتشاشی در مقابل فرکانس به دست آمد. با معکوس کردن فرکانس، دوره تناوب اغتشاشات در UH به دست می‌آید که در شکل (۵) نمایش داده شده است. در این شکل، چهار مقدار اوج مشخص برای تناوب‌های: ۲/۷، ۶/۸، ۷/۸ و ۱۳/۹ دقیقه دیده می‌شود که حاکی از وجود موج‌های اغتشاشی با همین تناوب‌ها در UH است. بزرگترین موج اغتشاشی مربوط به تناوب ۱۳/۹ دقیقه است که با در نظر گرفتن این عدد برای تعداد نقاط میانگین‌گیری، عملاً سایر اغتشاش‌ها با دوره‌ی تناوب کوچکتر نیز حذف می‌گردند. از آنجایی که تعداد نقاط میانگین‌گیری باید فرد انتخاب شود، بنابراین تعداد نقاط برابر ۱۳ در نظر گرفته می‌شود.

مشابه روش فوق، در سایر حوادث رگبار عمل شد که نتایج در جدول (۱) ارائه شده است. در این جدول، ستون‌های ۱ و ۲ شماره UH و تاریخ وقوع رگبار آن و ستون ۳ مقادیر دبی اوج برای هر UH را نشان می‌دهد. یکسان نبودن مقادیر دبی اوج، بیانگر این است که UH محاسبه شده از حوادث مختلف رگبار با هم متفاوت هستند و بنابراین لازم است که یک UH نماینده برای حوضه معرفی گردد. ستون ۴ تعداد نقاط

$$E_4 = \left| \frac{\hat{V} - V}{V} \right| \quad (9)$$

در این روابط، E_1 ؛ خطای مطلق نسبی برای دبی اوج، E_2 ؛ مقدار اریب (Bias) نسبی دبی اوج، E_3 ؛ جذر متوسط مربعات خطا (Root-mean-squared error, RMSE) در ابعاد هیدروگراف محاسبه شده و مشاهده شده و E_4 ؛ خطای مطلق نسبی در حجم رواناب است. q_p و \hat{q}_p مقادیر دبی اوج مشاهده و محاسبه شده، V و \hat{V} ؛ به ترتیب، حجم رواناب مشاهده شده و محاسبه شده و B ؛ تعداد کل ابعاد هیدروگراف است.

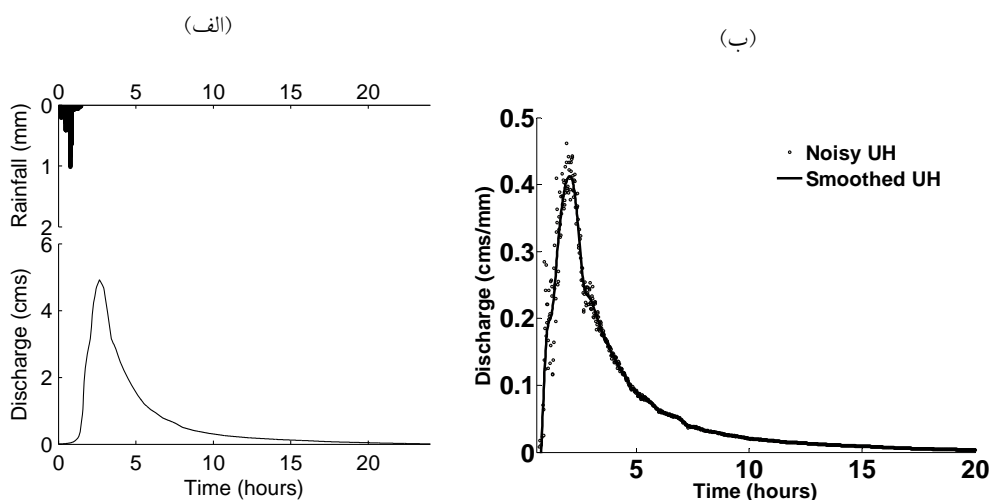
با توجه به آنچه بیان شد، مراحل کار در این مقاله را می‌توان در شکل (۳) خلاصه نمود:



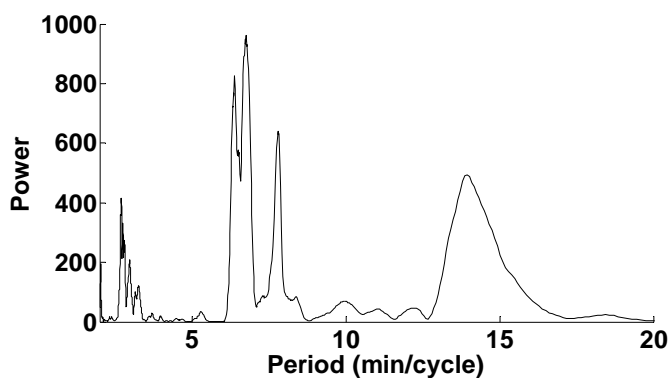
شکل ۳ شیوه‌ی استخراج هیدروگراف واحد نماینده حوضه

و روش MA توانسته است منحنی مناسبی را بین نقاط UH برازش دهد. ضرایب کوچکتر از یک، عموماً مربوط به آن دسته از UH هایی است که تعداد نقاط برای میانگین گیری آنها بزرگتر از ۴۰ بوده و شکل هیدروگراف در زمان بیشتر گسترده می شود. با گسترده شدن بیشتر UH، عمق رواناب مستقیم بیش از واحد شده و بنابراین ضریبی کمتر از یک برای اصلاح ابعاد لازم است.

(J) برای اجرای روش MA وزنی را ارائه کرده که معادل بزرگترین دوره تناوب اغتشاش در UH است. بر اساس مقادیر این ستون، همه ی UH ها به روش MA هموار گردیدند. UH های هموار شده برای برقراری عمق واحد امتحان شدند و بر این اساس، یک ضریب تصحیح برای ابعاد هر یک از UH ها به دست آمد که در ستون ۵ آمده است. این ستون نشان می دهد که در اکثر موارد، ضریب تصحیح نزدیک به یک بوده



شکل ۴ الف) هیدروگراف رواناب مستقیم و هیتوگراف بارش مؤثر در تاریخ ۱۳/۱/۱۹۶۰. ب) هیدروگراف واحد محاسبه شده به روش حداقل مربعات برای تاریخ مذکور به همراه هیدروگراف هموار شده توسط روش MA با وزن های نرمال



شکل ۵ دوره تناوب اغتشاشات در هیدروگراف واحد محاسبه شده در تاریخ ۱۳/۱/۱۹۶۰

جدول ۱ مشخصات ۱۶ هیدروگراف واحد محاسبه شده و ارزیابی صحت هر یک به روش اعتبارسنجی متقابل

شماره UH	تاریخ	دبی اوج UH (cms/mm)	J	C	\bar{E}_1	\bar{E}_2	\bar{E}_3 (cms)	\bar{E}_4
۱	۱۹۵۸/۹/۲۲	۰/۳۵	۲۷	۱/۰۰	۰/۲۵	-۰/۲۴	۰/۶۰	۰/۰۰۶
۲	۱۹۵۸/۱۰/۲۱	۰/۵۰	۱۷	۱/۰۰	۰/۲۵	۰/۱۵	۰/۶۲	۰/۰۰۵
۳	۱۹۵۹/۶/۲۳	۰/۶۱	۲۳	۱/۰۰	۰/۳۵	۰/۳۲	۰/۶۵	۰/۰۰۵
۴	۱۹۵۹/۱۲/۳۱	۰/۳۴	۲۷	۱/۰۳	۰/۲۹	-۰/۲۹	۰/۷۱	۰/۰۰۵
۵	۱۹۶۰/۱/۱۳	۰/۴۶	۱۳	۱/۰۰	۰/۲۲	۰/۰۰	۰/۵۹	۰/۰۰۵
۶	۱۹۶۱/۷/۱۶	۰/۴۸	۴۹	۰/۹۹	۰/۲۱	-۰/۱۶	۰/۵۷	۰/۰۰۸
۷	۱۹۶۱/۷/۲۳	۰/۷۰	۱۵	۱/۰۰	۰/۲۴	۰/۱۲	۰/۶۲	۰/۰۰۸
۸	۱۹۶۲/۶/۴	۰/۵۵	۵۹	۰/۹۸	۰/۲۰	-۰/۰۱	۰/۵۷	۰/۰۰۸
۹	۱۹۶۲/۶/۹	۰/۳۶	۳۱	۱/۰۰	۰/۳۰	-۰/۳۰	۰/۶۳	۰/۰۰۷
۱۰	۱۹۶۴/۸/۲۳	۰/۸۴	۶۵	۰/۹۳	۰/۱۹	-۰/۰۳	۰/۶۵	۰/۰۰۷
۱۱	۱۹۶۵/۶/۲۱	۰/۶۱	۳۳	۱/۱۴	۰/۲۲	۰/۱۲	۰/۵۵	۰/۰۰۷
۱۲	۱۹۶۵/۲/۹	۰/۳۱	۳۱	۱/۰۱	۰/۲۹	-۰/۳۰	۱/۰۳	۰/۰۰۷
۱۳	۱۹۶۵/۵/۱۶	۰/۵۹	۱۱	۰/۷۸	۰/۳۲	-۰/۳۰	۰/۶۴	۰/۰۰۸
۱۴	۱۹۶۵/۵/۲۸	۰/۵۷	۳۱	۱/۰۰	۰/۳۲	-۰/۲۹	۰/۶۶	۰/۰۰۸
۱۵	۱۹۶۵/۱۱/۳	۰/۲۹	۴۱	۰/۹۳	۰/۲۸	-۰/۲۸	۰/۹۲	۰/۰۰۷
۱۶	۱۹۶۶/۹/۱۸	۰/۵۱	۲۳	۱/۰۳	۰/۲۲	-۰/۱۵	۰/۶۵	۰/۰۰۸

طور متوسط، دبی اوج محاسبه شده چقدر بیشتر و یا کمتر از مقدار مشاهده شده می باشد. بر این اساس، دیده می شود که با انتخاب UH شماره ۱۰، به طور نسبی و متوسط به میزان ۰/۰۳- مقدار دبی اوج محاسبه شده کمتر از مقدار مشاهده شده تخمین زده می شود. این مقدار، می تواند در نتایج پیش بینی هیدروگراف های آینده مد نظر قرار گیرد.

از نگاهی دیگر، اگر هدف، پیش بینی رسیدن به یک انطباق کلی بین هیدروگراف های محاسبه شده و مشاهده شده باشد، در نظر گرفتن معیار خطای RMSE مفید خواهد بود. ستون ۸ مقادیر خطای RMSE را نشان داده و دیده می شود که UH شماره ۱۱ دارای کمترین خطا و برابر ۰/۵۵ متر مکعب بر ثانیه می باشد. بنابراین می توان چنین اظهار نظر نمود که اگر UH شماره ۱۱ در پیش بینی هیدروگراف های آینده به کار رود، هیدروگراف محاسبه شده، روند کلی تغییرات هیدروگراف مشاهده شده را بهتر دنبال خواهد کرد.

برای شناخت بهترین UH از میان ۱۶ مورد هموار شده به این صورت عمل شد که اولین آنها با ۱۵ رگبار دیگر (به جز رگباری که از آن استخراج گردیده است) مطابق معادله (۱) تلفیق گردید که در نتیجه ۱۵ هیدروگراف رواناب مستقیم به دست آمد. سپس معیارهای خطا برای ۱۵ هیدروگراف رواناب مستقیم محاسبه و مشاهده شده به کار برده شد و مقادیر متوسط خطا در ۱۵ رگبار به دست آمد. همین کار، برای سایر UH های هموار شده انجام گردید که مقادیر متوسط خطا در ستون های ۶ تا ۹ جدول (۱) گزارش شده است. ستون ۶، نشان دهنده میزانی خطای نسبی در محاسبه دبی اوج است که در آن UH شماره ۱۰ دارای کمترین مقدار خطا است. از آن جایی که یکی از علاقمندی ها در پیش بینی سیلاب، تخمین مقدار دبی اوج است، بنابراین استفاده از این UH می تواند در الویت قرار گیرد. ستون ۷ اربیی نسبی در دبی اوج را نشان داده و بیانگر این است که با انتخاب یک UH، به

که می‌تواند گزینه‌ی مناسبی در برازش شکل هموار برای هیدروگراف اغتشاشی باشد. همچنین در نتیجه‌ی هموارسازی، ابعاد هیدروگراف اغتشاشی زیاد دستخوش تغییر نشده؛ به طوری که مقدار تصحیح کمی برای هیدروگراف هموار شده لازم بود تا عمق رواناب برابر واحد گردد. روش اعتبارسنجی متقابل روشی مناسب در تشخیص UH بهینه از میان تعدادی از حوادث بارش - رواناب نشان داد که مستقل از هر روش تعیین هیدروگراف واحد می‌باشد. در مجموع، در حوضه‌های دارای آمار، روش اتخاذ شده در این مقاله می‌تواند در شناخت هویت سیستم خطی بارش - رواناب حوضه و به دنبال آن، پیش‌بینی سیلاب مؤثر باشد.

ستون ۹ مقادیر خطای نسبی در محاسبه‌ی حجم رواناب را نشان داده که در همه‌ی UH ها از مرتبه 10^{-3} و مناسب بوده و تفاوت چندانی بین مقادیر مشاهده نمی‌شود؛ بنابراین همه UH ها توانایی برآورد حجم سیلاب را دارند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل یک UH بهینه از میان ۱۶ حادثه بارش - رواناب در حوضه‌ای در نزدیکی شهر ریسل آمریکا انتخاب گردید. روش حداقل مربعات برای محاسبه‌ی UH ها استفاده شد و UH های اغتشاشی توسط روش میانگین متحرک وزنی هموار گردیدند. روش میانگین متحرک وزنی علاوه بر سادگی روابط و سهولت اجرا، نشان داد

مراجع

1. Sherman, L. K., "Streamflow from rainfall by the Unit-Graph method", *Engng New Rec.*, 108, pp. 501-505, (1932).
2. Chow, V. T., Maidment, D. R., and Mays, L. W., "Applied Hydrology", McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, (1988).
3. Collins, W. T., "Runoff distribution graphs from precipitation occurring in more than one time unit", *Civil Engng., ASCE.*, 9(9), pp. 559-561, (1939).
4. O'Donnel, T. M., "Unit hydrograph derivation by harmonic analysis", *IAHS Publ.*, 51, pp. 546-557, (1960).
5. Bruen, M. and Dooge, J. C. I., "An efficient and robust method for estimating unit hydrograph ordinates", *J. of Hydro.*, 70, pp. 1-24, (1984).
6. Eagleson, P. S., Mejia-R., R., and March, F., "Computation of optimum realizable unit hydrographs", *Water Resour. Res.*, 2(4), pp. 755-764, (1966).
7. Blank, D., Delleur, J. W., and Giorgini, A., "Oscillatory kernel functions in linear hydrologic modeles", *Water Resour. Res.*, 7, pp. 1102-1117, (1971).

8. Rao, R. A., and Delleur, J. W., "Instantaneous unit hydrographs, peak discharges and time lags in urban basins", *Hydro. Sci. Bulletin.*, 6, pp. 185-198, (1974).
9. Chou, C., and Wang, R., "On-line estimation of unit hydrograph using the wavelet-based LMS algorithm", *Hydro. Sci. J.*, 47(5), pp. 721-737, (2002).
10. Smith, S.W., "The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing", www.dspguide.com, (2007).
11. Southwest Watershed Research Center (SWRC)-Agricultural Research Service (ARS)-United States Department of Agriculture (USDA), "Southwest Watershed Research Center & WALNUT GULCH Experimental Watershed", www.ars.usda.gov, (2007).
12. Cartwright, M., "Fourier method for mathematicians, Scientists and Engineers", Ellis Horwood Limited, (1990).
13. Zhoa, B. and Tung, Y., "Determination of optimal unit hydrographs by linear programming", *Water Resour. Manag.*, (8), pp. 101-119, (1994).