

## مقایسه مدل‌های مخزنی GUHR، هیبرید و نش در استخراج هیدروگراف واحد حوضه

### (مطالعه موردی: حوضه کمانج علیا)

نسیم فاضل مدرس<sup>1\*</sup>، فائقه نیازی<sup>1</sup>، حامد مفید<sup>2</sup> و احمد فخری فرد<sup>3</sup>

تاریخ دریافت: 89/10/11 تاریخ پذیرش: 90/04/08

<sup>1</sup> دانشجوی دکتری منابع آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

<sup>2</sup> دانشجوی سابق کارشناسی ارشد دانشکده عمران-آب دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران

<sup>3</sup> دانشیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

\*مسئول مکاتبه: E-Mail: [fazel.nasim@gmail.com](mailto:fazel.nasim@gmail.com)

### چکیده

برآورد رواناب یکی از موضوعات اصلی هیدرولوژیست‌ها در طراحی‌های هیدرولوژیکی و برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آبی می‌باشد. در بین روش‌های متعدد ارائه شده برای پیش‌بینی سیلاب ناشی از یک رگبار، هیدروگراف‌های واحد بطور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این میان استفاده از روش‌های ژئومورفولوژی برای محاسبه رواناب که خصوصیات بارش و حوضه را در برآورد سیلاب در نظر می‌گیرند، دید واقع بینانه‌تری از رفتار حوضه بدست می‌دهد. ارتباط بین پارامترهای هیدروگراف‌های واحد مصنوعی و خصوصیات ژئومورفولوژی حوضه امکان گسترش استفاده از این مدل‌ها را در حوضه‌های فاقد آمار نیز فراهم می‌کند. در این مطالعه هیدروگراف‌های واحد حوضه با به کار بردن مدل هیدروگراف واحد ژئومورفولوژی مخزن (GUHR)، مدل نش (NASH) و مدل هیبرید برای چهار رویداد بارش - رواناب در حوضه کمانج علیا در استان آذربایجان شرقی به دست آمد. مقایسه نتایج حاصل با هیدروگراف‌های واحد مشاهداتی با استفاده از پنج معیار خطا (ضریب تعیین، معیار نش - ساتکیف، خطای حجم، خطای دبی اوج و زمان رسیدن به اوج) نشان می‌دهد هر سه مدل هیدروگراف‌های واحد را با دقت قابل قبولی برآورد می‌کنند. طبق نتایج بدست آمده هر سه روش مقدار دبی اوج کمتری را نسبت به مقادیر متناظر مشاهده‌ای شبیه‌سازی می‌کنند. اما در کل مدل GUHR مقدار دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج را بهتر شبیه‌سازی می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: بارش - رواناب، حوضه کمانج علیا، مدل هیبرید، مدل نش، هیدروگراف واحد ژئومورفولوژی مخزن (GUHR)، هیدروگراف واحد لحظه‌ای.

## Comparison of reservoir-based GUHR, NASH and Hybrid models in derivation of unit hydrograph (case study: Kamanaj Olia watershed)

N Fazelmodarres<sup>\*1</sup>, F Niazi<sup>1</sup>, H Mofid<sup>2</sup>, A Fakherifard<sup>3</sup>

Recived: 1 January 2011 Accepted: 29 June 2011

<sup>1</sup>- PHD Students of Water Resources Eng., Faculty of Agric. Univ. of Tabriz, Iran.

<sup>2</sup>-Former MSc. Student, Faculty of Civil Eng. Univ. of Azad - Tehran, Iran.

<sup>3</sup>- Assoc. Prof., Dept. of Water Eng., Faculty of Agric. Univ. of Tabriz, Iran.

\*Corresponding author E-mail: [fazel.nasim@gmail.com](mailto:fazel.nasim@gmail.com)

### Abstract

Runoff estimation is almost one of the main concerns of hydrologists, water resources managers and planners. Unit hydrograph models are the most popular and widely used tools to model the rainfall-runoff process. Relating Synthetic Unit Hydrograph models to watershed geomorphologic properties can provide a reasonable representation of runoff estimation by considering both rainfall and watershed characteristics and extend the usage of SUH models in ungauged catchments. This study evaluates three conceptual reservoir based rainfall-runoff models including Geomorphologic unit hydrograph reservoir (GUHR), NASH and HYBRID models for four rainfall-runoff events in Kamanaj Olia watershed located in eastern Azerbaijan province. Comparison of resulted and observed unit hydrographs using five error criteria; (coefficient of determination, Nash- Sutcliffe, error in volume of hydrograph, error in peak flow and time to peak) indicated desirable accuracy estimation through all three models. All three models computed peak flows smaller than those of observed, but generally GUHR model simulated peak flows and time to peaks better than others.

**Keywords:** GUHR, HYBRID model, Kamanaj Olia basin, Nash model, Rainfall-Runoff

### مقدمه

رواناب، بدست می‌آورند. برای اینکار می‌توان از روش‌های مستقیم (ماتریس معکوس، کمترین مربعات خطا و غیره) استفاده کرد. برای حوضه‌های فاقد آمار هیدروگراف واحد مصنوعی (اشنایدر 1938؛ بی نام 1957؛ کلارک 1945) ارائه شده‌است. نیاز به محاسبه رواناب در حوضه‌های فاقد آمار زمینه مطالعات فراوانی را فراهم کرده است. مدل هیدروگراف واحد ژئومورفولوژی اولین بار توسط رودریگز-ایتورب و والدز (1979) به عنوان واکنش

بارش- رواناب یکی از پیچیده‌ترین فرآیندهای هیدرولوژی است که عوامل و فاکتورهای زیادی مانند رطوبت خاک، کاربری زمین، ژئومورفولوژی، تبخیر و نفوذ حوضه آبریز در آن نقش دارند و استفاده از روش‌های مناسب برای مدل‌سازی بارش- رواناب می‌تواند بر این پیچیدگی فائق آید. هیدروگراف واحد اولین بار توسط شرمن (1932) ارائه شد. هیدروگراف واحد را معمولاً با استفاده از داده‌های مشاهداتی بارش و

خطی بین دو مخزن مدل هیبرید عامل انتقال را نیز در آن بررسی کردند.

هدف از این تحقیق مقایسه مدل هیدروگراف واحد ژئومورفولوژی مخزن (GUHR) که فقط دارای یک پارامتر قابل تخمین می‌باشد (K) و هیدروگراف واحد لحظه‌ای مدل نش (NASH) و همچنین هیدروگراف واحد حاصل از مدل هیبرید دو واحدی با ضرایب ذخیره متفاوت ( $K_1$  و  $K_2$ ) با هیدروگراف واحد مشاهداتی و تعیین دقت آنها در برآورد هیدروگراف واحد حوضه کمانج علیا می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

#### مدل GUHR

این مدل دارای دو خاصیت مهم می‌باشد: الف- مورفولوژی و شکل حوضه (نحوه قرار گیری زیر حوضه ها) را در مدل سازی دخیل می‌نماید. ب- تنها به یک پارامتر نامعلوم بستگی دارد که از روی داده‌های مشاهداتی بارش و رواناب قابل تخمین است. اساس فرمول بندی مدل، بر سطوح شبکه زهکشی حوضه بصورت مخازن آبشاری استوار است و هیدروگراف واحد حاصل GUHR نامیده می‌شود. مخازن خطی، بر اساس درجات آبراهه‌ای، در نظر گرفته می‌شوند که بر طبق نظر چاو و همکاران (چاو 1988) ذخیره آن با خروجی، به صورت خطی با ضریب K به هم مرتبط می‌شوند، یعنی:

$$S(t) = K \cdot Q(t) \quad [1]$$

که در آن S(t) ذخیره در مخزن، K ضریب ذخیره و Q(t) خروجی از مخزن می‌باشد. با کاربرد معادلات پیوستگی و ذخیره در هر مخزن خطی خواهیم داشت:

$$K \frac{dQ(t)}{dt} + Q(t) = I(t) \quad [2]$$

که در آن I(t)، ورودی به مخزن می‌باشد. با استفاده از عملگر D ( $D = \frac{d}{dt}$ ) معادله دیفرانسیل فوق به صورت زیر بیان می‌شود:

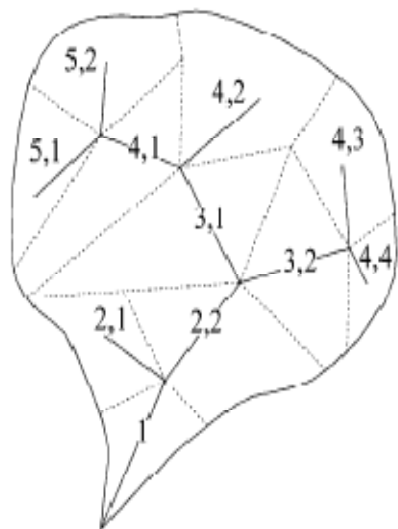
حوضه آبخیز نسبت به ورود یک واحد بارش مازاد لحظه‌ای ارائه گردیده است. از مهمترین بررسی‌های صورت گرفته در این زمینه می‌توان به تحقیقات والدز و همکاران (1979)، گوپتا و همکاران (1980)، روسو (1984) و پرستاپووا (1982) اشاره کرد. رحیمیان و زارع (1374) در حوضه پس کوهک شیراز روش هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژی را مورد آزمایش قرار داد؛ نتایج در مقایسه با روش‌های SCS<sup>1</sup> و اشنایدر مثلثی با هیدروگراف مشاهده‌ای مطابقت بیشتری داشتند.

غیاثی (1375) در مطالعه‌ای در حوضه آبخیز امامه، 6 مورد هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژی استخراج کرده و با هیدروگراف‌های SCS و اشنایدر مثلثی و هیدروگراف مشاهده‌ای مقایسه کرد و نتیجه گرفت که این روش با هیدروگراف تهیه شده به روش SCS مشابه بود و کارایی آن از هیدروگراف تهیه شده به روش اشنایدر برای حوضه مذکور کمتر بود. قهرمان (1374) هیدروگراف واحد ژئومورفولوژی آب و هوایی را برای حوضه‌های آبخیز معرف کسلیان و امامه بررسی کرد که نتایج حاصله موید کارایی خوب آنها در برآورد هیدروگراف حوضه است.

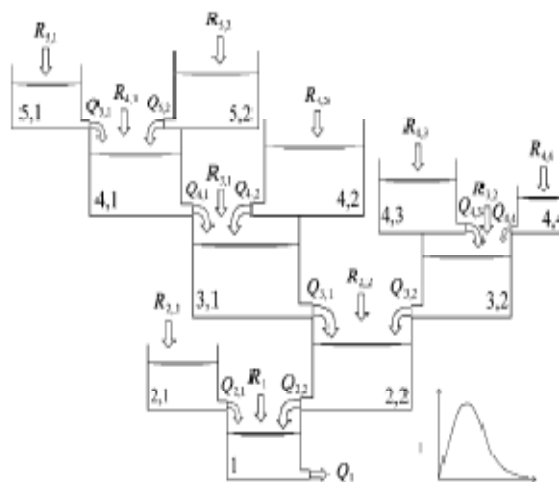
بونیا و همکاران (2005) با تأکید بر روی نواقص مدل نش، مدل هیبرید را معرفی کردند، در مدل هیبرید یک مخزن خطی نش به صورت دو مخزن با ضرایب ذخیره متفاوت که به صورت سری متصل شده‌اند (یک واحد هیبرید) در نظر گرفته می‌شود. با ارائه فرمول کلی برای این حالت بر اساس ضرایب ذخیره مشخص شد مدل نش حالت خاصی از مدل هیبرید می‌باشد. بونیا و همکاران (2005) یک رابطه ریاضی برای مدل هیبرید بسط دادند و نشان دادند هرچه اندازه حوضه بزرگتر باشد، قدرت محاسبه‌ای این مدل بهتر و دقیق تر از مدل نش می‌باشد. سینگ و همکاران (2007) با افزودن کانال

<sup>1</sup>Soil Conservation Service

شاخص اول از عدد 1 در خروجی حوضه شروع شده و به سمت بالا دست افزایش می‌یابد و درجه زیر حوضه (مخازن) یا آبراهه را نشان می‌دهد. شاخص دوم تعداد آبراهه‌های هم درجه را نشان می‌دهد و از چپ به راست زیاد می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل 1- الف - نمونه ای از معیار درجه بندی بیان شده برای آبراهه ها ب - نمایش مدل مخازن مفهومی حوضه

$$(KD+1)Q_5 = R_5$$

$$-Q_5 + (KD+1)Q_4 = R_4$$

$$-Q_4 + (KD+1)Q_3 = R_3$$

$$-Q_3 + (KD+1)Q_2 = R_2$$

$$-Q_2 + (KD+1)Q_1 = R_1$$

[4]

هر ردیف از سیستم معادله 4 معادله دیفرانسیل یک مخزن را نشان می‌دهد. با جمع کردن معادلات مخازن هم درجه و تعمیم آن برای یک حوضه با درجه n، مدل به صورت معادله 5 تعریف می‌شود که ارتباط یک سری از مخازن با ظرفیت‌های مختلف را نشان می‌دهد.

$$(KD+1)Q_n(t) = R_n(t)$$

$$-Q_n(t) + (KD+1)Q_{n-1}(t) = R_{n-1}(t)$$

$$-Q_{n-1}(t) + (KD+1)Q_{n-2}(t) = R_{n-2}(t)$$

$$-Q_3(t) + (KD+1)Q_2(t) = R_2(t)$$

$$-Q_2(t) + (KD+1)Q_1(t) = R_1(t)$$

[5]

$$(KD+1).Q(t) = I(t) \quad [3]$$

لوپز و همکاران (2005) سیستم درجه بندی جدیدی را که عکس درجه بندی هورتون می‌باشد، با دو شاخص بیان کرده است (شکل 1- الف):

حداکثر درجه آبراهه‌های حوضه که معرف درجه حوضه می‌باشد، به جزئیات شبکه زهکشی بستگی دارد. معادله دیفرانسیل 3 بایستی برای مجموع مخازن هم درجه حل بشود. سمت راست معادله،  $I(t)$ ، برای زیر حوضه‌های بالا دست که ورودی آنها صرفاً بارش موثر می‌باشد بر حسب درجه آنها (i) برابر  $R_i(t)$  بوده و برای زیر حوضه‌های پایین دست که علاوه بر دریافت بارش موثر، خروجی مخازن بالا دست را نیز دریافت می‌کنند برابر مجموع  $R_i(t)$  و خروجی مخازن بالا دست خواهد بود. در نتیجه برای هر مخزن (شکل 1- ب) معادله دیفرانسیلی با ورودی معین بدست می‌آید و با فرض توزیع مکانی یکنواخت برای بارش در حوضه، ضریب ذخیره K برای کل مخازن ثابت در نظر گرفته می‌شود که حاصل آن مجموعه روابط دیفرانسیلی 4 خواهد بود.

$$K = \frac{A_T [t_{DRH} - t_{ERH}]}{\sum_{i=1}^n i A_i} \quad [9]$$

#### مدل NASH

نش (1957) برای بدست آوردن هیدروگراف واحد لحظه‌ای<sup>3</sup> (IUH) معادله‌ای را با کاربرد معادله پیوستگی و فرض اینکه عمل حوضه در برابر بارش لحظه‌ای معادل جریان از n مخزن خطی که خروجی از یک مخزن ورودی به مخزن دیگر می‌باشد به صورت زیر ارائه نمود.

$$u(t) = \frac{1}{K \cdot \Gamma(n)} e^{-\frac{t}{K}} \left(\frac{t}{K}\right)^{n-1} \quad [10]$$

که در آن u(t) دبی هیدروگراف واحد لحظه‌ای در زمان t از مخزن n ام بوده که n تعداد مخازن خطی با ضریب ذخیره یکسان، و K ضریب ذخیره مخازن می‌باشد (ردی 1988).

به منظور تعیین پارامترهای مدل NASH گشتاور اول و دوم برای هیدروگراف‌ها و هیتوگراف‌های متناظر محاسبه شده و ضرایب مربوطه از روابط زیر محاسبه می‌گردند (چاو همکاران 1988).

$$K = \frac{M_{c,DRH}^2 - M_{c,ERH}^2}{t_{DRH} - t_{ERH}} \quad [11]$$

$$n = \frac{[t_{DRH} - t_{ERH}]^2}{M_{c,DRH}^2 - M_{c,ERH}^2} \quad [12]$$

که در آنها:

$$M_{c,DRH}^2 = \text{گشتاور دوم نسبت به مرکز DRH}$$

$$M_{c,ERH}^2 = \text{گشتاور دوم نسبت به مرکز ERH}$$

$$t_{DRH} - t_{ERH} = \text{تفاوت بین مراکز DRH و ERH}$$

#### مدل هیبرید

بونیا و همکاران (2005) برای از بین بردن محدودیت‌های مدل نش با استفاده از مفهوم مخازن

که در آن:  $Q_i(t) = \sum_{j=1}^p Q_{i,j}(t)$ ،  $R_i(t) = \sum_{j=1}^p R_{i,j}(t)$  و p تعداد

زیر حوضه‌های درجه i است.  $R_{i,j}$  و  $Q_{i,j}$  به ترتیب برابر با ورودی به مخزن زام درجه i و خروجی از مخزن زام درجه i می‌باشند. جهت کاربرد این مدل برای استخراج هیدروگراف واحد فرض شدت و توزیع یکنواخت و حجم بارش موثر واحد،  $R_T(t)$ ، در نظر گرفته می‌شود (لوپز 2005). عمق بارش موثر سطح هر زیر حوضه،  $R_i(t)$ ، به دو عامل نسبت مساحت زیر حوضه،  $A_i$ ، به کل مساحت حوضه،  $A_T$  و  $R_T(t)$  بستگی دارد:

$$R_i(t) = \frac{A_i}{A_T} R_T(t) \quad [6]$$

که در آن:

$$R_T(t) = \frac{1}{\Delta t}, \quad 0 \leq t \leq \Delta t$$

$$R_T(t) = 0, \quad t > \Delta t$$

با در نظر گرفتن این شرایط در معادله 5 دبی در خروجی حوضه از معادلات زیر بدست می‌آید (لوپز 2005).

برای  $0 \leq t \leq \Delta t$ :

$$Q_1(t) = \frac{1}{\Delta t} \left[ 1 - \frac{e^{-\frac{t}{K}}}{A_T} \left[ \sum_{i=1}^n \frac{1}{(i-1)!} \left[ \frac{t}{K} \right]^{i-1} \sum_{j=i}^n A_j \right] \right] \quad [7]$$

برای  $t > \Delta t$ :

$$Q_1(t) = \frac{1}{\Delta t} \left[ \frac{e^{-\frac{t-\Delta t}{K}}}{A_T} \left[ \sum_{i=1}^n \frac{1}{(i-1)!} \left[ \frac{t-\Delta t}{K} \right]^{i-1} \sum_{j=i}^n A_j \right] + \frac{e^{-\frac{t}{K}}}{A_T} \left[ \sum_{i=1}^n \frac{1}{(i-1)!} \left[ \frac{t}{K} \right]^{i-1} \sum_{j=i}^n A_j \right] \right] \quad [8]$$

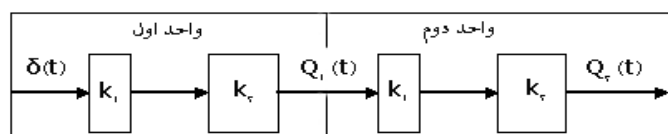
در این مدل، مقدار K با استفاده از تفاوت گشتاورهای اول هیدروگراف رواناب مستقیم<sup>1</sup> (DRH) و هیتوگراف بارش موثر<sup>2</sup> (ERH) به صورت زیر بدست می‌آید (لوپز و همکاران 2005):

<sup>1</sup> Direct Runoff Hydrograph

<sup>2</sup> Effective Rainfall Hyetograph

<sup>3</sup> Instantaneous Unit Hydrograph

ورودی (بارش) را تشکیل می‌دهد. خروجی واحد اول به عنوان ورودی متغیر برای واحد هیبرید دوم که دارای ویژگی‌های واحد اول با ضرایب ذخیره  $k_1$  و  $k_2$  که به ترتیب ضریب ذخیره مخزن اول و ضریب ذخیره مخزن دوم می‌باشند، محسوب می‌شود. همان طور که شکل 2 نشان می‌دهد،  $\delta(t)$  ورودی لحظه‌ای بارش به مخزن اول می‌باشد که خروجی  $Q_1(t)$  را در انتهای واحد اول تشکیل می‌دهد. با در نظر داشتن اینکه خروجی از مخزن اول ورودی متغیر مخزن بعدی است بیان جرم در هر مخزن برای یک زمان بی‌نهایت کوچک به شکل رابطه 13 نوشته می‌شود.



شکل 2- ترتیب قرار گیری مخازن در یک واحد هیبرید (بونیا و همکاران 2005)

اگر در این معادله  $k_2 = 0$  و  $k_1 = k$  باشد، معادله (15) به مدل مخزن خطی منفرد نش ( $n = 1$ ) تبدیل می‌شود (سینگ 1988).

برای  $k_1$  و  $k_2$  معلوم، معادله 15، می‌تواند زمان رسیدن به اوج و مقدار دبی اوج را که اساس توصیف یک IUH هستند، بدست دهد. بنابراین می‌توان معادله 15 را نسخه اصلاح شده مدل نش فرض کرد. زمان رسیدن دبی به مقدار اوج در این مدل از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$t_p = \left( \frac{k_1 k_2}{k_2 - k_1} \right) \ln \left( \frac{k_2}{k_1} \right) \quad [16]$$

در معادلات 15 و 16 برای جلوگیری از منفی شدن مقادیر  $t_p$  و  $Q_p$ ، باید شرط  $k_2 > k_1$  در این معادلات برقرار باشد. که با توجه به ویژگی‌های روندیابی قابل توجه است: گردش جریان به سمت پایین دست منجر به کاهش دبی اوج و سرعت موج می‌شود. بنابراین در

خطی مدل هیبرید را ارائه دادند، در این مدل او و همکارانش مخزن خطی نش را به دو مخزن خطی با ضرایب ذخیره متفاوت تقسیم کردند. مدل هیبرید بررسی شده در این مطالعه هیبرید دو واحدی است. یک واحد هیبرید از دو مخزن که به صورت سری به هم متصلاند و دارای ضرایب ذخیره  $k_1$  و  $k_2$  هستند، تشکیل می‌گردد. ورودی (مانند بارش) وارد مخزن اول شده و بعد از عبور از مخزن دوم تا انتهای واحد هیبرید اول پیش می‌رود تا در خروجی واحد اول بصورت هیدروگراف از آن خارج شود. این هیدروگراف، خروجی واحد اول هیبرید یا همان پاسخ سیستم به

$$k_1 \frac{dQ(t)}{dt} + Q(t) = \delta(t) \quad [13]$$

که  $Q(t)$  خروجی متغیر از مخزن اول و  $\delta(t)$  ورودی لحظه‌ای به مخزن اول است. با استفاده از تبدیل لاپلاس حل معادله دیفرانسیل 13 به صورت زیر است:

$$Q(s) = \frac{1}{(1+k_1 s)} \quad [14]$$

که در آن  $S$  ضریب تبدیل لاپلاس و  $Q(s)$  نیز تبدیل لاپلاس  $Q(t)$  می‌باشد. با توجه به اینکه خروجی، ورودی مخزن دوم با ضریب ذخیره  $k_2$  را بدست می‌دهد مقدار خروجی از واحد اول هیبرید به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_1(t) = \left( \frac{1}{k_1 - k_2} \right) \left[ \exp \left( -\frac{t}{k_1} \right) - \exp \left( -\frac{t}{k_2} \right) \right] \quad [15]$$

$$t_p = \left( \frac{k_1 + k_2}{k_2 - k_1} \right) \sqrt{k_1 k_2} \quad [19]$$

در مدل‌سازی‌ها می‌توان از یک واحد هیبرید و یا تعداد بیشتری از آنها بسته به نوع داده‌های موجود و اندازه حوضه استفاده کرد، در این تحقیق نیز از ترکیب دو واحدی استفاده شده است.

#### منطقه مورد مطالعه

حوضه کمانج بالا به ترتیب با طول و عرض جغرافیایی "19' 23° 46" و "26' 25° 38" در فاصله 33 کیلومتری تبریز واقع شده است. هیدروگراف‌های سیلاب این منطقه در ایستگاهی که در خروجی حوضه واقع شده اندازه‌گیری می‌شوند. ارتفاع بالاترین و پایین‌ترین نقطه حوضه به ترتیب 2800 و 1952 متر می‌باشد. شکل 3 موقعیت جغرافیایی این حوضه را در سطح استان آذربایجان شرقی نشان می‌دهد. برخی از مشخصات فیزیوگرافی حوضه مورد مطالعه در جدول 1 آورده شده است. به منظور استخراج هیدروگراف واحد از مدل‌های مورد بررسی، ابتدا زیر حوضه‌های آبراهه‌ها در نقشه  $\frac{1}{50000}$  محدود گردیده و مساحت مربوط به هر زیر حوضه با استفاده از نرم افزار Arcview محاسبه شد. سپس بر اساس تئوری پیشنهادی لویز و همکاران (2005)، آبراهه‌های حوضه کمانج علیا درجه بندی شدند.

یک فاصله مکانی معلوم  $k_2 > k_1$  است (میشرا و سینگ 1999). با جایگذاری زمان اوج در معادله می‌توانیم میزان دبی اوج را به دست آوریم:

$$Q(t_p) = \left( \frac{1}{k_1 - k_2} \right) \left\{ \exp \left[ -k_2 \frac{\ln \frac{k_1}{k_2}}{k_1 - k_2} \right] - \exp \left[ -k_1 \frac{\ln \frac{k_1}{k_2}}{k_1 - k_2} \right] \right\} \quad [17]$$

برای تعمیم این مدل، دو واحد هیبرید که به صورت سری به هم وصل شده‌اند و دارای ویژگی‌های ذخیره یکسان معادل  $k_1$  و  $k_2$  مطابق شکل 2 می‌باشند در نظر گرفته شد، در این قسمت نیز خروجی از واحد اول، ورودی متغیر واحد دوم را تشکیل می‌دهد.  $Q_2(t)$  خروجی از واحد دوم است که با استفاده از انتگرال پیچشی تابع پاسخ ضربه‌ای واحد به شرح زیر به دست می‌آید:

$$Q_2(t) = \frac{1}{(k_1 - k_2)^2} \left\{ t \left[ \exp \left( -\frac{t}{k_1} \right) + \exp \left( -\frac{t}{k_2} \right) \right] - 2 \left( \frac{k_1 k_2}{k_1 - k_2} \right) \times \left[ \exp \left( -\frac{t}{k_1} \right) - \exp \left( -\frac{t}{k_2} \right) \right] \right\} \quad [18]$$

معادله 18 تابع پاسخ خروجی در واحد دوم است که در نتیجه ورودی ضربه‌ای واحد، در واحد اول حاصل شده است. مقدار  $t_p$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

جدول 1- برخی مشخصات فیزیوگرافی حوضه کمانج بالا

ارتفاع متوسط	طول بزرگ‌ترین آبراهه	محیط حوضه	مساحت حوضه
(m)	(m)	(m)	(m <sup>2</sup> )
2270/03	7980	25217	32028628/7832



شکل 3 - موقعیت حوضه کمانج بالا در سطح استان آذربایجان شرقی

برسد. با جایگذاری مقادیر بهینه شده در معادله هیبرید، هیدروگراف های واحد خروجی محاسبه شدند (فاضل مدرس 1389).

#### ارزیابی کارایی مدلها

به منظور بررسی کارایی مدلها از معیارهایی به شرح زیر استفاده شد.

#### ضریب تعیین

$$R^2 = \left( \frac{\left( \sum_{t=1}^m (Q_{t,Obs} - \bar{Q}_{Obs}) (Q_{t,Sim} - \bar{Q}_{Sim}) \right)^2}{\sum_{t=1}^m (Q_{t,Obs} - \bar{Q}_{Obs})^2 \sum_{t=1}^m (Q_{t,Sim} - \bar{Q}_{Sim})^2} \right)^2 \quad [20]$$

بازده مدل با معیار نش- ساتکلیف

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^m [Q_{t,Obs} - Q_{t,Sim}]^2}{\sum_{t=1}^m [Q_{t,Obs} - \bar{Q}_{Obs}]^2} \quad [21]$$

که:  $Q_{t,Obs}$  و  $Q_{t,Sim}$  به ترتیب مقادیر دبی محاسباتی و مشاهداتی دبی در زمان  $t$ ;  $\bar{Q}_{Obs}$  و  $\bar{Q}_{Sim}$  به ترتیب مقادیر دبی متوسط محاسباتی و مشاهداتی برای واقعه مورد نظر؛ و  $m$  تعداد گامهای زمانی هیدروگراف خروجی مورد نظر می باشند (سینگ 1988).

درصد خطای حجم رواناب

#### استخراج پارامترهای مدل

به منظور استخراج هیدروگراف رواناب مستقیم هر واقعه بارش، جریان پایه به روش دبی پایه ثابت<sup>1</sup> از هیدروگراف سیلاب مجزا گردیده (چاو و همکاران 1988)؛ و هیتوگراف بارش های منطقه ای موثر با استفاده از روش SCS یا شماره منحنی از هیتوگراف بارش های منطقه ای کل بدست آمد. در این روش Ia (جذب اولیه) و S (نگهداشت پتانسیل) در هر رگبار متغیر در نظر گرفته شد و لذا برای هر رگبار یک شماره منحنی<sup>2</sup> (CN) بدست آمد (آگیره 2005). مشخصات رگبارها و سیلابهای انتخاب شده در جدول 2 آورده شده است. برای محاسبه پارامترهای مدل GUHR و NASH از روش گشتاورها و همچنین روش سعی و خطا استفاده شد و هیدروگرافهای خروجی حوضه استخراج گردیدند (نیازی 1386). برای محاسبه پارامترهای مدل هیبرید از برنامه بهینه سازی با روش جستجوی مستقیم استفاده شده است. مقادیر  $k_1$  و  $k_2$  با روش سعی و خطا تغییر کردند تا تابع هدف که معیار خطای استاندارد انتخاب شده بود به کمترین مقدار خود

<sup>1</sup> Fixed Base Flow



رسیدن به دبی اوج می‌باشد؛ کفایت این مولفه‌ها به خوبی برآورد شوند، حتی می‌توان شکل هیدروگراف را نیز مثلثی فرض کرد. بر این اساس دو معیار درصد خطای پیش بینی دبی اوج (Qp) و درصد خطای پیش بینی زمان رسیدن به دبی اوج (Tp) به شرح زیر مورد استفاده قرار گرفت.

$$E_V = \frac{V_{Sim} - V_{Obs}}{V_{Obs}} \times 100 \quad [22]$$

که:  $V_{Obs}$  و  $V_{Sim}$  به ترتیب مقادیر حجم محاسباتی و مشاهداتی هیدروگراف سیلاب برای واقعه مورد نظر می‌باشند. هندرسون (1963) پیشنهاد می‌کند که مهمترین مولفه های یک هیدروگراف، دبی اوج و زمان

جدول 2- مشخصات وقایع بارش- رواناب

رواناب مستقیم			بارش موثر			تاریخ واقعه
مدت (hr)	زمان اوج (hr)	دبی اوج (m3/s)	CN	مدت (min)	عمق (mm)	
12	5	17/5	85/23	120	11/7	1382/3/8
11	4	24/074	78/63	75	11/2	1382/3/21
22	10	7/149	87/98	90	6/75	1384/2/6
18	9	10/261	88/73	120	8/43	1384/2/29

از مقایسه هیدروگراف‌های استخراج شده با هیدروگراف‌های مشاهداتی متناظر و با توجه به جداول 4 و 5 ملاحظه می‌شود که هر سه روش در شبیه سازی بازوهای هیدروگراف اختلاف کمی را با مقادیر مشاهده‌ای نشان می‌دهند. اما روش GUHR نسبت به دو روش دیگر، بازوهای هیدروگراف را بهتر شبیه‌سازی می‌کند.

در مورد پیش بینی مقادیر دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج می‌توان نتیجه گرفت که هر سه روش مقدار دبی اوج کمتری را نسبت به مقادیر متناظر مشاهده‌ای شبیه‌سازی می‌کنند؛ اما روش GUHR مقدار دبی اوج را نسبت به روش NASH و روش HYBRID بهتر شبیه‌سازی می‌نماید.

به طور کلی مدل HYBRID و NASH زمان رسیدن به دبی اوج را زودتر و روش GUHR این زمان را دیرتر از زمان مشاهده شده پیش‌بینی می‌کنند. میانگین درصد خطای حجم در مدل GUHR، HYBRID و NASH به ترتیب برابر 12/79%، 12/81% و 20/76% می‌باشد. به طور کلی در مدل GUHR درصد خطای

درصد خطای دبی اوج

$$E_P = \frac{Q_{P,Sim} - Q_{P,Obs}}{Q_{P,Obs}} \times 100 \quad [23]$$

درصد خطای زمان رسیدن به دبی اوج

$$E_{T_p} = \frac{T_{P,Sim} - T_{P,Obs}}{T_{P,Obs}} \times 100 \quad [24]$$

که در آنها  $Q_{p,Obs}$  و  $Q_{p,Sim}$  به ترتیب مقادیر دبی‌های اوج محاسباتی و مشاهداتی،  $T_{p,Obs}$  و  $T_{p,Sim}$  به ترتیب زمان‌های رسیدن به این دبی‌ها می‌باشند. هر چه مقدار درصد این خطاها کمتر باشد نشان دهنده کارایی بیشتر مدل‌ها می‌باشد.

## نتایج و بحث

پس از تعیین پارامترهای مورد نیاز، هیدروگراف‌های مربوط به هر مدل استخراج گردید. جدول 3 پارامترهای مدل‌ها را نشان می‌دهد. شکل 4 مقایسه هیدروگراف‌های حاصل از مدل‌ها را با هیدروگراف‌های مشاهداتی نشان می‌دهد. نتایج ارزیابی مدل‌ها نیز در جداول 4 و 5 آمده است.

حجم کمتری نسبت به مدل NASH و HYBRID مشاهده می شود.

جدول 3- پارامترهای مدل های مورد استفاده در این مطالعه

NASH		HYBRID		GUHR		تاریخ واقعه		
n	K (hr)	n	K (hr)	K <sub>2</sub> (hr)	K <sub>1</sub> (hr)		K (min)	
سعی و خطا	روش ممانها	سعی و خطا	روش ممانها	سعی و خطا	روش ممانها			
3/8	1/4	3/31	1/29	2/02	1/1	20	23/81	1382/3/8
4	1	2/42	1/58	1/8	0/92	17/78	17/78	1382/3/21
3/6	3/22	3/55	2/54	3/54	2/0	50	57/69	1384/2/6
3/8	2/6	3/36	2/31	2/56	1/61	40	49/81	1384/2/29

جدول 4- مقادیر زمان و دبی اوج بدست آمده از دو مدل برای وقایع مورد بررسی

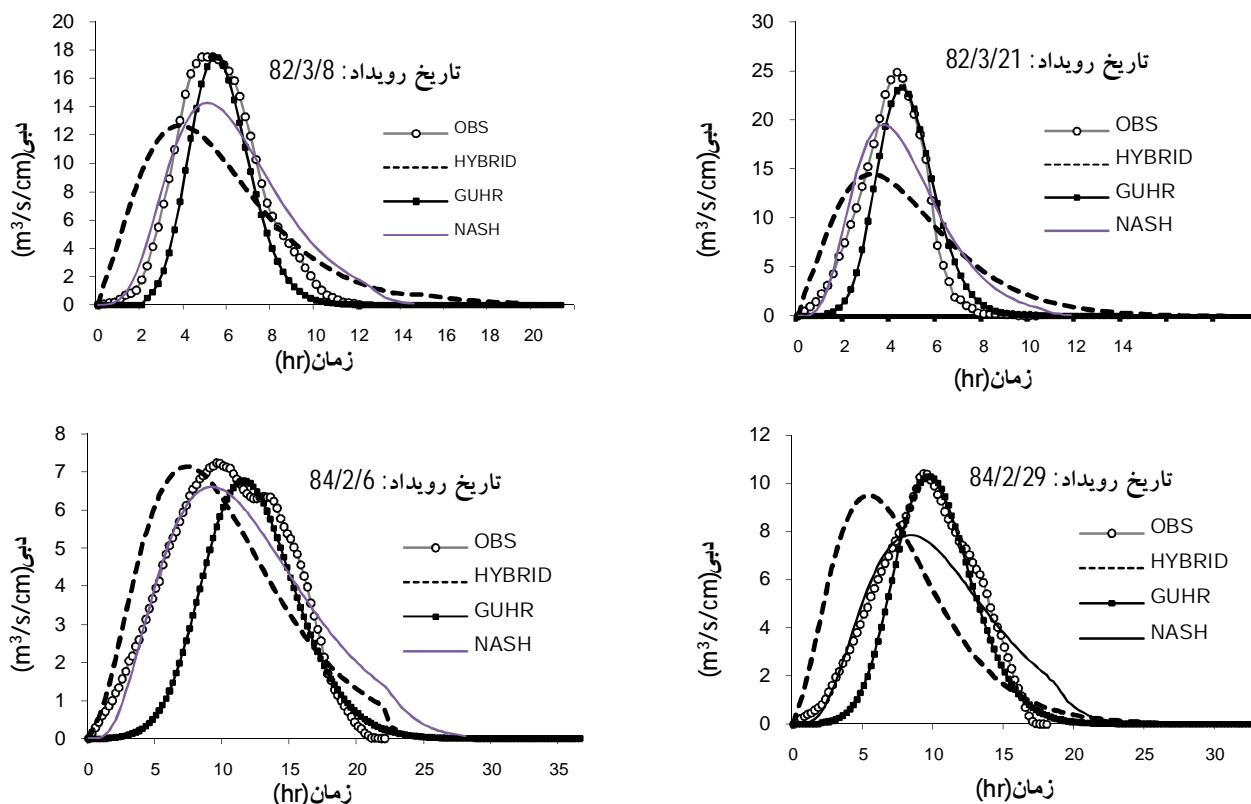
دبی اوج (m <sup>3</sup> /s)				زمان اوج (hr)				تاریخ واقعه
مشاهده‌ای	NASH	HYBRID	GUHR	مشاهده‌ای	NASH	HYBRID	GUHR	
17/5	14/26	12/64	17/46	5	5	4/5	5/5	1382/3/8
24/074	19/46	14/47	23/27	4	3/75	3/25	4/5	1382/3/21
7/149	6/6	7/13	6/76	10	9/25	8	11/5	1384/2/6
10/261	7/84	9/43	10/25	9	8/25	6	9/5	1384/2/29

جدول 5- نتایج ارزیابی مدل‌های شبیه سازی مورد بررسی

معیارهای ارزیابی					روش	تاریخ واقعه
<sup>2</sup> %Tp	<sup>1</sup> %Qp	%V	E	R <sup>2</sup>		
10	-0/21	9/53	0/90	0/97	GUHR	1382/3/8
-20	-27/7	9/43	0/71	0/77	HYBRID	
0	-18/50	15/16	0/91	0/97	NASH	
12/5	-3/23	14/06	0/90	0/94	GUHR	1382/3/21
-25	-41/67	10/53	0/70	0/86	HYBRID	
-6/25	-18/60	25/99	0/86	0/94	NASH	
15	-5/44	12/85	0/80	0/85	GUHR	1384/2/6
-20	-0/26	12/81	0/84	0/95	HYBRID	
-7/5	-7/74	20/66	0/92	0/95	NASH	
5/40	-0/01	14/73	0/94	0/96	GUHR	1384/2/29
-35/13	-8/85	18/47	0/62	0/47	HYBRID	
-8/11	-23/5	21/25	0/89	0/94	NASH	
10/72	-2/22	12/79	0/89	0/93	GUHR	میانگین
-25/03	-24/57	12/81	0/71	0/76	HYBRID	
-3/96	-17/08	20/76	0/87	0/95	NASH	

<sup>1</sup> مقادیر منفی %Qp نشان می دهند که مقادیر محاسباتی کمتر از مشاهداتی است.

<sup>2</sup> مقادیر منفی و مثبت %Tp نشان می دهند که مدل زمان رسیدن به دبی اوج را به ترتیب زودتر و دیرتر از زمان مشاهداتی پیش بینی کرده است.



شکل 3 - مقایسه هیدروگراف‌های حاصل از مدل‌های مورد بررسی با هیدروگراف‌های مناظر مشاهداتی

### نتیجه گیری کلی

مدل NASH مقادیر دبی اوج و زمان رسیدن به اوج را کمتر از مقادیر مشاهداتی پیش بینی می‌کند. این نتیجه با تحقیقات سینگ (1976) نیز همخوانی دارد. مدل NASH و HYBRID زمان رسیدن به دبی اوج را زودتر و روش GUHR این زمان را دیرتر از زمان مشاهده شده پیش بینی می‌کند. در مدل GUHR به دلیل نحوه مدل بندی خاص مدل که متفاوت از سایر مدل‌ها است، دارای تعداد مخازن بیشتری نسبت به دو مدل دیگر می‌باشد، در نتیجه زمان بیشتری طول می‌کشد تا آب به خروجی حوضه برسد و لذا هیدروگراف حاصل از این مدل دیرتر به اوج می‌رسد.

با توجه به درصد خطای دبی اوج و زمان رسیدن به این دبی می‌توان گفت به طور کلی مدل GUHR پیش‌بینی کننده بهتری برای دبی اوج و مدل NASH پیش‌بینی

کننده بهتری برای زمان دبی اوج می‌باشد این نتیجه با تحقیقات عرفانیان (1377) همخوانی دارد. مدل GUHR از طریق سطوح تغذیه آبراهه‌ها مورفولوژی حوضه را در ایجاد هیدروگراف دخالت می‌دهد و تابع پارامتر ثابت K می‌باشد که بیانگر رفتار مخزنی حوضه است و مقدار آن به زمان پاسخ حوضه به بارندگی بستگی دارد. تلفیق مورفولوژی و رفتار مخزنی حوضه، این مدل را از نظر ایجاد هیدروگراف واحد اطمینان بخش می‌سازد. این مدل برای حوضه‌های کوچک که از نظر ژئومورفولوژی دارای ناهمگونی کمی می‌باشند دارای قابلیت کاربرد بهتری می‌باشد. مدل هیبرید دو واحدی با دو مخزن با ضرایب ذخیره متفاوت، باعث کاهش دبی اوج و هموار تر شدن هیدروگراف خروجی می‌شود و به این دلیل مدل هیبرید عملکرد بهتری در حوضه‌های بزرگ دارد و کاهش

هر سه مدل دقت خوبی در ایجاد هیدروگراف داشتند و میانگین بازده برای مدل‌های مورد بررسی به ترتیب برای مدل‌های NASH، GUHR و HYBRID برابر 89%، 87% و 71% می‌باشد؛ بنابراین نتایج آنها می‌تواند به عنوان نتایج خوب و قابل اعتمادی در نظر گرفته شود که با نتایج آگیره و همکاران (2005) همخوانی دارد.

سرعت و بزرگی جریان در جهت شیب حوضه بهتر شبیه‌سازی می‌کند. می‌توان برای حوضه‌های خیلی بزرگتر تعداد واحدهای هیبرید را افزایش داد. در مورد حوضه‌های کوچکتر مانند کمانج این مدل دقت مناسبی نداشته و می‌توان از هیبرید تک واحدی برای شبیه‌سازی جریان در این حوضه‌ها استفاده کرد. در مدل GUHR درصد خطای حجم کمتری نسبت به مدل NASH و HYBRID مشاهده شد.

#### منابع مورد استفاده

- رحیمیان ر و زارع م، 1374. کاربرد مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی جهت سنتز هیدروگراف در حوضه‌های فاقد آمار. صفحه‌های 203 الی 227. مجموعه مقالات سومین سمینار هیدرولوژی وزارت نیرو، تهران
- عرفانیان م، 1377. بررسی هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی و ژئومورفوکلیماتولوژی در حوضه آبخیز در جزین سمنان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- غیاثی ن، 1375. واسنجی هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژی و ژئومورفوکلیماتولوژی در حوضه آبخیز امامه، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- فاضل مدرس ن، 1389. برآورد پارامترهای مدل هیبرید بر اساس خصوصیات ژئومورفولوژی حوضه، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
- قهرمان ب، 1374. هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفو- آب و هوایی، نشریه دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، سال 7، شماره 1.
- نیازی ف، 1386. استخراج و مقایسه هیدروگراف واحد ژئومورفولوژی مخزن و هیدروگراف واحد بر مبنای مدل نش (مطالعه موردی. حوضه کمانج علیا)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
- Anonymous, 1957. Use of Storm and Watershed Characteristics in Synthetic Hydrograph Analysis and Application. US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, DC.
- Agirre U, Goni M, Lopez JJ and Gimena FN, 2005. Application of a unit hydrograph based on subwatershed division and comparison with Nash's instantaneous unit hydrograph. *Catena* 64: 321-332.
- Bhunya PK, Ghosh NC, Mishra SK, Ojha CSP and Berndtsson R, 2005. Hybrid model for derivation of synthetic unit hydrograph. *J Hydrol Eng* 10 (6): 458-467.
- Chow VT, Maidment DR and Mays LW, 1988. Applied hydrology. McGraw-Hill, New York, USA.
- Clark CO, 1945. Storage and the unit hydrograph, *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 110: 1419-1446.
- Gupta VK, Waymire ED and CT Wang, 1980. A representation of the instantaneous unit hydrograph from geomorphology. *Water Resour Res* 16: 5:855-862.
- Henderson FM, 1963. Some properties of the unit hydrograph. *J Geophys Res* 68 (10): 4785-4793.
- Horton RE, 1945. Erosional development of streams and their drainage basin: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol Soc Am Bull* 56: 281-283.

- Lopez JJ, Gimena FN, Goni M and Agirre U, 2005. Analysis of a unit hydrograph model based on watershed geomorphology represented as a cascade of reservoirs. *Agric Water Manag* 77: 128-143.
- Mishra, SK and Singh, VP 1999. Hysteresis-based flood wave analysis. *J Hydrologic Eng* 4(4): 358-365.
- Nash JE and Sutcliffe JV, 1970. River flow forecasting through conceptual models. I: a discussion of principles. *J Hydrol* 10: 282-290.
- Nash JE, 1957. The form of the instantaneous unit hydrograph. *IASH Publ* 42: 114-118.
- Pristachova H, 1982. *Hydrology of Mountainous Area*. IAHS Pub No1990.
- Reddy PJ, 1988. *A text book of hydrology*. Printed by Deepak Printing Service. Delhi, India
- Rodriguez-Iturbe I and Valdes JB, 1979. The geomorphologic structure of the hydrologic response. *Water Resour Res* 15(6): 1409-1420.
- Rodriguez-Iturbe I and Valdes JB, 1979. The geomorphologic structure of the hydrologic response. *Water Resour Res* 15(6): 1409-1420.
- Rosso R, 1984. Nash model relation to Horton order ratios. *Water Resour Res* 20: 914- 920.
- Sherman, LK, 1932. Stream flow from Rainfall by the Unit- Graph Method *Engineering News Record* 108: 501-505.
- Singh VP, 1976. Comparison of two mathematical models of surface runoff. *Hydrological Sciences Bulletin* 21 (2): 285-299.
- Singh VP, 1988. *Hydrologic Systems: Rainfall- Runoff Modeling*. Prentice Hall, NJ.
- Singh PK, Bhunya PK, Mishra SK, Chaube UC, 2007. An extended hybrid model for synthetic unit hydrograph derivation. *J of Hydrol* 336: 347- 360.
- Snyder FF, 1938. Synthetic unit graphs. *Trans Am Geophys Union* 19: 447-454.
- Strahler AN, 1964. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. Pp. In : Chow (Ed). *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw- Hill, New York.
- Valdes JB, Fiallo Y and Rodriguez-Iturbe I, 1979. A rainfall-runoff analysis of the geomorphologic IUH. *Water Resour Res*. 15(6): 1421-1434.