تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال سیزدهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۶
Volume 13, No. 3, Fall 2017 (IR-WRR)
۸۹-۱۰۰

تخمین ضرایب درجه‌بندی آبراهه‌های حوضه‌های آبریز بدون GIS جهت مدل‌سازی رواناب به روش GIUH

پویان کشتکاران [۱*] و تورج سبزواری [۲]

چکیده

روش هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی (GIUH) یک روشی است که براساس اطلاعات ضرایب درجه‌بندی آبراهه‌ها و داده‌های ژئومورفولوژیکی حوضه‌های فاقد آمار به پیش‌بینی رواناب حوضه می‌پردازد. بسیاری از حوضه‌های آبریز، فاقد نقشه رقومی DEM هستند و برای تهیه آن نیازمند استفاده از GIS می‌باشد که نیازمند تخصص GIS و صرف وقت زیاد می‌باشد که بسیاری از هیدرولوژیست‌ها به آن علاقه‌مند نیستند و به دنبال مدل‌های بارندگی- رواناب ساده‌تر می‌گردند. در این تحقیق بر اساس داده‌های درجه‌بندی آبراهه نه حوضه آبریز مختلف در دنیا معادلاتی جهت تخمین ضرایب درجه‌بندی ارائه گردید. پنج معادله رگرسیونی برای محاسبه ضرایب درجه‌بندی آبراهه‌ها اعم از ضریب انشعاب (R_B)، ضریب طول آبراهه (R_L)، ضریب مساحت زهکشی (R_A)، ضریب شیب آبراهه (R_S) و ضریب شیب صفحات (R_{SO}) حوضه ارائه گردید. نتایج معادلات برای ضرایب درجه‌بندی آبراهه‌های سه حوضه آبریز دیگر مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس معادلات رگرسیونی ارائه شده به تخمین رواناب سطحی حوضه‌های آبریز Heng-Chi و Kasilian به روش GIUH پرداخته شد. بر اساس نتایج، خطای پیک رواناب محاسبه شده توسط مدل GIUH بر اساس معادلات رگرسیونی ۱۰٪ بیشتر از محاسبات مدل بر اساس داده‌های واقعی بدست آمده از GIS بوده است. مقدار متوسط خطای معادلات رگرسیونی در تخمین ضرایب R_B، R_L، R_A، R_S و R_{SO} در سه حوضه معرف به ترتیب ۴/۷٪، ۲۳/۵٪، ۷/۱٪، ۴۱/۳٪ و ۲۲/۹٪ می‌باشد. ضریب حساسیت نسبی ضرایب R_B، R_L، R_A، R_S و R_{SO} بر روی پیک رواناب به ترتیب ۰/۵۶، ۰/۰۹۲/۰۱، ۰/۰۴۲ و ۱/۳۳ می‌باشد.

کلمات کلیدی: ضرایب درجه‌بندی آبراهه، استراهلر، هیدروگراف واحد لحظه‌ای، کسیلیان.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۱۰/۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۱/۲۶

۱- عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، استهبان، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، استهبان، ایران
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان اسفند ۱۳۹۶ امکانپذیر است.

Estimation of Stream- Order -Ratios of Catchments without GIS for Modeling Catchment's Runoff Using the GIUH Method

P. Keshtkaran[1] and T. Sabzevari[2]*

Abstract

The GIUH method is a method which deals with prediction of the catchment's runoff based on the stream- order- ratios (SOR) data and the geomorphologic data of the catchments lacking statistics. Many of the catchments, lack digital DEM map and need GIS to provide such maps. This requires GIS expertise and spending extra time which for many hydrologists are not favorable compared to simpler runoff-rainfall models. In this study, based on the stream ordering data of nine different stream catchments in the world some equations have been provided to determine stream-order ratios. Five regression equations have been presented to measure the geomorphologic of the streams including bifurcation ratio (R_B), length ratio, area ration (Ra), (R_L), stream slope ratio (R_S), and overland slope ratio (R_{SO}). The results of SOR have been applied and evaluated for three other catchments. Based on the regression equations, the surface runoff of Heng- Chi and Kasilian catchments were estimated using the GIUH method. Based on the results, the peak error of the calculated runoff using GIUH model based on the regression equations was %10 more than the model's measurements based on the real data obtained from GIS. The errors of the model in the estimation of R_B, R_L, R_A, R_S and R_{SO} in the three case study catchments were %4.7, %23.5, %7.1, %41.3, and %22.9, respectively. The relative sensitivities of the ratios R_B, R_L, R_A, R_S and R_{SO} are shown to be 0.56, 0.01, 0.92, 0.042, and 1.33, respectively.

Keywords: Stream- Order- Ratio, Strahler, Instantaneous Unit Hydrograph, Kasilian.

Received: December 27, 2016
Accepted: April 15, 2017

1- Instructor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Estahban Branch, Estahban, Iran. Email: Pouyan_keshtkaran@yahoo.com
2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Estahban Branch, Estahban, Iran
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

تخمین سیلاب طراحی حوضه‌های آبریز جهت طراحی سازه‌های هیدرولیکی کنترل سیلاب حایز اهمیت است. بیشتر حوضه‌های آبریز، فاقد آمار هستند و از روش های آماری نمی‌توان برای تحلیل سیلاب طراحی آنها بهره گرفت، لذا در این حوضه‌ها از مدلهای بارندگی- رواناب جهت تخمین رواناب استفاده می‌گردد.

مطالعات آبراهه‌های حوضه‌های آبریز و درجه‌بندی آنها اولین بار توسط Horton (1932-1945) انجام گرفت. بعد از آن Strahler (1952 ،1957 ،1964) تصحیحاتی روی روش هورتون انجام داد و یک روش جدیدی از مدل درجه‌بندی آبراهه‌ها ارایه نمود. مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی (GIUH) یک مدل بارندگی- رواناب است که بر اساس اطلاعات ژئومورفولوژیکی حوضه‌ها به تخمین رواناب حوضه می‌پردازد. مفهوم GIUH اولین بار توسط Rodriguez-Iturbe and Valdes (1979) ارایه شد. آنها یک مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ارائه نمودند که مقدار زمان پیک و دبی پیک مدل تابعی از مشخصات ژئومورفولوژیکی و بالخصوص ضرایب درجه بندی آبراهه‌های حوضه بود. ضرایب درجه بندی آبراهه حوضه‌های آبریز از طریق نرم افزارهایی مانند ARCGIS و الحاقیه های هیدرولوژیکی مانند ArcHydro محاسبه می‌شوند. برای این منظور DEM حوضه مورد نیاز است. ابتدا شبکه آبراهه‌های حوضه تشکیل می‌گردد و بر اساس درجه‌بندی آبراهه‌ها به روش هورتن – استراهلر به تخمین مشخصاتی مانند تعداد آبراهه‌ها، طول آبراهه‌ها، شیب و مساحت زهکشی در هر درجه از آبراهه پرداخته می‌شود. به این اطلاعات ، اطلاعات ژئومورفولوژیکی گفته می‌شوند. بر اساس این اطلاعات ضرایب درجه‌بندی آبراهه محاسبه می‌گردند. مدل GIUH توسط دانشمندان دیگر گسترش پیدا کرده و در حوضه‌های مختلف به کار گرفته شد (Gupta et al., 1980; Rodriguez-Iturbe, 1982; Lee and Yen, 1997; Kumar and Kumar, 2008).

Najafi et al. (2009) در تحقیقی از سه مدل بارندگی- رواناب شامل مدل جعبه سیاه مبتنی بر مشخصات ژئومورفولوژی (GANN) و مدل مفهومی دو پارامتری ناش و مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی (GIUH) که برای حوضه‌های فاقد آمار پشنهاد گردیده است برای یک حوضه متوسط استفاده گردید. از این مدل‌ها برای مطالعه ده واقعه بارش- رواناب در حوضه معرف کسیلیان واقع در ناحیه شمالی ایران استفاده شد. نتایج حاصل از مدل ژئومورفولوژی با داده‌های مشاهده‌ای و دو مدل دیگر مقایسه گردیده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مدل شبکه عصبی مصنوعی بر پایه ژئومورفولوژی (GANN) از مدل کاملاً تجربی شبکه عصبی مصنوعی برتر است. علاوه بر این می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که لحاظ مشخصات ژئومورفولوژی در مدل ANN بر توانایی این مدل برای شبیه‌سازی رابطه بارندگی- رواناب می‌افزاید. Lee and Chang (2005) مدل GIUH را برای تخمین جریان سطحی و زیر سطحی حوضه‌های آبریز به کار گرفتند. جداسازی هیدروگراف جریان سطحی از جریان زیر سطحی حوضه در تحقیق آنها از اهمیت خاصی برخوردار بود. Sabzevari et al. (2013) مدل ارایه شده توسط Lee and Chang (2005) را تصحیح نموده و از این مدل برای تخمین جریان سطحی و زیر سطحی حوضه کسیلیان استفاده گردید. در این تحقیق یک مدل اشباع‌پذیری برای جداسازی منطقه اشباع و غیراشباع صفحات حوضه ارایه گردید. تاثیر میزان اشباع‌پذیری صفحات حوضه در محاسبه زمان پیمایش جریان سطحی و زیر سطحی به صورت جداگانه در نظر گرفته شد. Sabzevari and Norouzpoor (2014) یک مدل GIUH ارایه نمود که قادر بود شکل و انحنای دامنه‌های مرکب حوضه را در محاسبات زمان پیمایش سطحی و زیر سطحی دامنه‌ها در نظر بگیرد. تاثیر شکل و هندسه دامنه‌های مرکب بر روی رواناب زیر حوضه شماره ۱۲۵ حوضه بزرگ Walnut Gulch مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه در بسیاری از حوضه‌های آبریز دنیا نقشه‌های توپوگرافی مناسب و DEM حوضه موجود نیست، البته سایت‌های اینترنتی هستند که نقشه توپوگرافی کل دنیا را در اختیار مهندسان قرار می‌دهند ولی دقت بعضی از نقشه ها بالا نبوده و تهیه DEM از آنها و سپس تهیه اطلاعات ژئومورفولوژیکی نیازمند تخصص GIS دارد که بسیاری از هیدرولوژیست‌ها این تخصص را ندارند و به دنبال روش‌های ساده‌تری برای تخمین رواناب حوضه‌های فاقد آمار هستند. یکی از اهداف این تحقیق ارایه تکنیکی است که بتوان اطلاعات ضرایب درجه‌بندی آبراهه‌های حوضه را بدون استفاده از GIS محاسبه نمود و با استفاده از مدل های بارندگی- رواناب به تخمین رواناب حوضه‌های فاقد آمار بپردازیم.

الحاقیه‌های GIS مانند ArcHydro اطلاعاتی مانند تعداد، طول و شیب آبراهه‌ها در هر درجه از آبراهه‌ها را محاسبه می‌نمایند ولی اطلاعات مربوط به مساحت زهکشی در هردرجه و شیب صفحات حوضه باید به صورت جداگانه به صورت دستی محاسبه گردند که نیازمند وقت زیادی است. برای این منظور به جمع‌آوری داده‌های ژئومورفولوژیکی حوضه‌های آبریز مختلف با اندازه‌های مختلف و شبکه آبراهه های متفاوت پرداخته شد. مقادیر ضرایب درجه‌بندی استراهلر و اطلاعات واقعی ژئومورفولوژیکی حوضه‌ها که از طریق GIS محاسبه

شده بود جمع‌آوری گردید. این اطلاعات مربوط به دوازده حوضه مختلف در دنیا می‌باشد. برای بررسی رابطه بین داده‌ها از رگرسیون خطی و غیرخطی توسط نرم افزار SPSS استفاده گردید. به طورکلی طول آبراهه اصلی حوضه، مساحت حوضه و شیب آبراهه اصلی جز پارامترهایی هستند که به راحتی برای تمام حوضه قابل محاسبه هستند. ارائه معادلات تجربی که بتواند بر اساس اطلاعات حوضه کلیه ضرایب درجه بندی استراهلر را پیش‌بینی کند حایز اهمیت است. به طور کلی مهمترین اهداف این تحقیق عبارتند از:

۱) ارایه معادلاتی که بتواند ضرایب درجه‌بندی استراهلر را بدون استفاده از GIS و DEM حوضه بر اساس اطلاعاتی مانند طول رودخانه اصلی، مساحت و شیب رودخانه محاسبه نماید.

۲) تحلیل حساسیت ضرایب آبراهه‌ها و تاثیر آن بر روی هیدروگراف رواناب مستقیم حوضه‌ها.

۳) تخمین رواناب حوضه‌های فاقد آمار با استفاده از مدل GIUH.

۲- مدل بارندگی- رواناب GIUH

رواناب سطحی صفحات حوضه از طریق شبکه آبراهه‌ها به خروجی حوضه منتقل می‌گردد. اگر یک حوضه را توسط روش درجه‌بندی استرهلر درجه‌بندی نماییم مسیرهای حرکت آب از صفحه‌ها به سمت خروجی مشخص می‌گردند. هر مسیر جریان از مکان‌های مختلف (state) تشکیل شده است که اولین مکان دامنه و بقیه مکانها آبـــراهه‌ها هستند. احتمال حـــرکت آب در یک مسیر $w: x_{o_i} \to x_i \to x_j \to \ldots \to x_\Omega$ به صورت زیر بیان میشود:

$$P(w) = P_{OA_i} P_{x_{oi}x_i} P_{x_i x_j} \ldots P_{x_k x_\Omega} \qquad (۱)$$

که درآن P_{OA_i} برابر مقدار مساحت i امین صفحات به مساحت کل حوضه می‌باشد. $P_{x_{oi}x_i}$ احتمال جریان آب از i امین صفحه (x_{o_i}) به i امین آبراهه، $P_{x_i x_j}$ احتمال جریان از i امین آبراهه (x_i) به j امین آبراهه (x_j) دیگر می‌باشد. تعداد آبراهه‌ها در هر درجه و نحوه اتصال آنها مقادیر احتمال‌ها در معادله ۱ را مشخص می‌کنند. در قسمت‌های بعدی مقاله نحوه محاسبه احتمالها در حوضه های فاقد DEM را توضیح خواهیم داد. مقدار هیدروگراف واحد لحظه‌ای یک حوضه آبریز که از مسیرهای حرکت رواناب مختلف تشکیل شده، توسط معادله ۲ مشخص می‌شود (Rodriguez-Iturbe and Valdes, 1979):

$$u(t) = \sum_{w \in W} [f_{x_{o_i}}(t) * f_{x_i}(t) * f_{x_j}(t) * \ldots * f_{x_W}(t)]_W \times P(w) \qquad (۲)$$

که در آن $f_{x_j}(t)$ تابع احتمالی چگالی زمان پیمایش برای x_j با مقدار زمان پیمایش T_x، * نشان‌دهنده انتگرال کانولوشن می‌باشد، t زمان و $W = \langle x_{o_i}, x_i, x_j, \ldots, x_\Omega \rangle$، 1, 2, 3, . . . , Ω= i و $w \in W$ می‌باشند. برای حل معادله ۲ می‌توان از تبدیل‌های لاپلاس استفاده نمود. تابع احتمالی زمان پیمایش تابعی از زمان پیمایش هر مکان در دامنه ها و آبراهه‌ها می باشد. تابع f عملا هیدروگراف واحد لحظه‌ای یا پاسخ حرکت واحد هر مکان می‌باشد که از معادله $f(t) = (1/T_x)\exp(-t/T_x)$ محاسبه می‌گردد. محاسبه زمان پیمایش دامنه و آبراهه‌ها مشکل‌ترین قسمت محاسبات است؛ زیرا مقدار زمان پیمایش به اطلاعات ژئومورفولوژیکی دامنه‌ها و آبراهه‌ها بستگی دارد. برای محاسبه رواناب کل حوضه باید هایتوگراف بارش مازاد در هیدروگراف واحد لحظه‌ای کل حوضه کانولوشن گردد. معادله کانولوشن برای تخمین رواناب سطحی کل حوضه به صورت زیر است:

$$Q(t) = \int_0^t u(t-\tau) I_e(\tau)\, d\tau \qquad (۳)$$

که در آن I_e بارش مازاد است.

۲-۱- زمان پیمایش دامنه و آبراهه‌ها

بر اساس تئوری موج سینماتیک، زمان پیمایش یک صفحه از حوضه به طول، شیب، ضریب مانینگ و شدت بارش متوسط مازاد بارندگی ارتباط دارد. مقدار زمان پیمایش i امین صفحه از حوضه براساس ضرایب درجه‌بندی آبراهه حوضه برابر است با (Yen and Lee, 1997):

$$T_{X_{oi}} = \left(\frac{n_0 A P_{OA_i} \sum_{i=1}^{\Omega} R_L^{i-\Omega}}{2a^{1/2} S_{c_\Omega}^{b/2} L q_L^{m-1} R_B^{\Omega-i} R_L^{i-\Omega} R_S^{b(i-\Omega)/2}} \right)^{1/m} \qquad (۴)$$

که در آن R_B, R_L, R_A و R_S به ترتیب ضریب انشعاب، ضریب طول آبراهه، ضریب مساحت آبراهه و ضریب شیب آبراهه‌ها می‌باشند. A مساحت حوضه و مقادیر a و b به ترتیب ۵/۴۶۳ و ۱/۰۸۳می‌باشند. q_L جریان جانبی است که در اینجا شدت بارندگی مازاد است. n_0 ضریب مانینگ برای صفحات و S_{c_Ω} شیب رودخانه اصلی در ماکزیمم درجه حوضه است. مقدار برابر ۳/۵ و L مجموع طول کل آبراهه‌ها در درجه‌های مختلف است. زمان پیمایش i امین درجه کانال در هر مسیر بر اساس ضرایب درجه بندی آبراهه آن از معادله ۵ محاسبه می‌گردد (Yen and Lee, 1997):

$$T_{X_i} = \frac{B_\Omega L R_L^{i-\Omega} R_B^{\Omega-i} \sum_{k=1}^{i} R_L^{i-\Omega}}{q_L A P_{OA_i} (\sum_{k=1}^{\Omega} R_L^{i-\Omega})^2} \left[\left(h_{co_i}^m + \frac{q_L A P_{OA_i} n_c \sum_{k=1}^{\Omega} R_L^{i-\Omega}}{B_\Omega S_{c_\Omega}^{1/2} R_S^{(i-\Omega)/2} R_B^{\Omega-i} \sum_{k=1}^{i} R_L^{i-\Omega}} \right)^{1/m} - h_{co_i} \right] \qquad (۵)$$

که در آن h_{co_i} عمق آب در i امین درجه آبراهه برابر است با:

$$h_{co_i}=\left(\frac{q_L n_c A(R_B^{\Omega-i}R_A^{i-\Omega}-P_{OA_i})\sum_{k=1}^{\Omega}R_L^{i-\Omega}}{S_{c_\Omega}^{1/2}B_\Omega R_S^{(i-\Omega)/2}R_B^{\Omega-i}\sum_{k=1}^{i}R_L^{i-\Omega}}\right)^{1/m} \qquad (۶)$$

که در آن n_c ضریب مانینگ آبراهه‌ها، B_Ω عرض آبراهه و مقدار h_{coi} برای i=1 برابر صفر است.

۳- ضرایب درجه‌بندی آبراهه‌ها

همانطور که در معادلات زمان پیمایش صفحات و آبراهه‌های حوضه (معادلات ۵ تا۶) مشاهده گردید، ضرایب درجه‌بندی آبراهه‌های حوضه بالخصوص R_B, R_L, R_A, R_S از اهمیت خاصی برخوردار است. این پارامترها بر روی زمان پیمایش و به دنبال آن هیدرروگراف واحد لحظه‌ای و رواناب مستقیم حوضه تاثیر خواهد گذاشت. مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی (GIUH) یک مدل بارندگی- رواناب است که بر اساس اطلاعات ژئومورفولوژیکی حوضه‌ها به تخمین رواناب حوضه می‌پردازد. برای این منظور براساس (حوضه با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS شبکه آبراهه‌های حوضه ترسیم و مشخص می‌گردند.

در محیط GIS، آبراهه‌ها براساس روش هورتن- استراهلر درجه‌بندی می‌گردند و تعداد آبراهه‌ها، طول آبراهه‌ها و شیب آنها در هر درجه محاسبه می‌گردند. مقدار R_B براساس تعداد آبراهه‌ها در هر درجه از معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$R_B=N_{i-1}/N_i \qquad i=2,3,...,\Omega \qquad (۷)$$

که در آن N_i تعداد i امین آبراهه است. مقدار ضریب طول آبراهه‌ها R_Lبرابر است با:

$$R_L=\overline{L_{c_i}}/\overline{L_{c_{i-1}}} \qquad (۸)$$

که در آن $\overline{L_{c_i}}$ متوسط طول i امین آبراهه است.

پارامتر R_A نیز براساس معادله ۹ مشخص می‌گردد:

$$R_A=\overline{A_i}/\overline{A_{i-1}} \qquad (۹)$$

که در آن $\overline{A_i}$ متوسط سطح زهکشی در i امین آبراهه حوضه می‌باشد. برای محاسبه $\overline{A_i}$ باید مساحت زهکشی آبراهه‌ها با درجه iام و کوچکتر محاسبه شوند و بر تعداد آبراهه‌ها در درجه i تقسیم گردند. محاسبه R_A توسط کاربران GIS کار ساده‌ای نیست و الحاقیه‌های GIS این اطلاعات را به صورت عددی و راحت در اختیار کاربران قرار نمی‌دهد.

مقدار R_S به شیب آبراهه‌ها بستگی دارد که از معادله ۱۰ محاسبه می‌گردد:

$$R_S=\overline{S_{c_i}}/\overline{S_{c_{i-1}}} \qquad (۱۰)$$

که در آن S_{c_i} شیب متوسط i امین آبراهه است. براساس تجربه عملی در محاسبه ضرایب مزبور در حوضه‌های طبیعی مقدار $3\le R_B\le 5$ و $1.5\le R_L\le 3$ (Smart, 1972) و $3\le R_A\le 6$ مشاهده گردیده است. مقدار شیب آبراهه‌ها و شیب صفحات حوضه در هر درجه در حوضه های مختلف متفاوت است. در این تحقیق یک ضریب جدید به نام ضریب شیب صفحات حوضه (R_{SO}) ارایه شده است که براساس شیب متوسط صفحات حوضه در هر درجه از معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$R_{SO}=\overline{S_{0_{i-1}}}/\overline{S_{0_i}} \qquad (۱۱)$$

یکی از اهداف این تحقیق بررسی ارتباط بین پارامتر R_{SO} و بقیه ضرایب می‌باشد. همانطور که می‌دانید روش GIUH یک مدل بارندگی- رواناب است که برای حوضه‌های فاقد آمار سیلاب مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای استفاده از این روش باید ابتدا اطلاعات درجه بندی آبراهه‌های حوضه براساس DEM و GIS مشخص گردد و به عنوان ورودی مدل معرفی گردند. در بسیاری از حوضه های آبریز به علت عدم وجود اطلاعات مربوط به نقشه های توپوگرافی و DEM تخمین اطلاعات درجه بندی آبراهه ها مقدور نمی‌باشد.

در این تحقیق روشی ارائه شده است که اطلاعات درجه بندی آبراهه‌ها حوضه‌ها را براساس معادلات تجربی رگرسیونی محاسبه می‌نماید. این معادلات رگرسیونی با تحلیل آماری اطلاعات حوضه‌های دارای داده ژئومورفولوژیکی انجام می‌گیرد. استفاده از روش‌های رگرسیونی منجر به این معادلات می‌گردد. در قسمت‌های بعدی نحوه محاسبه این معادلات توضیح داده می‌شود.

۳-۱- تخمین ضرایب درجه‌بندی آبراهه

در این قسمت از تحقیق به ارایه معادلات و روش‌هایی پرداخته می‌شود که بتوان اطلاعات درجه‌بندی آبراهه‌ها حوضه را بدون استفاده از GIS محاسبه گردد. مساحت کل حوضه، طول آبراهه اصلی، شیب آبراهه اصلی حوضه را می‌توان از روی نقشه‌های اولیه حوضه مشخص نمود. امروز نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰ برای کل کشور ایران در دسترس است. اگر یک حوضه دارای حداکثر درجه آبراهه Ω باشد، می‌توان گفت آبراهه با درجه Ω در انتهای حوضه قرار دارد و شیب متوسط این آبراهه $(\overline{S_{c_\Omega}})$ و شیب صفحات اطراف این آبراهه $(\overline{S_{0_\Omega}})$

نیز در کلیه حوضه‌ها قابل محاسبه می‌باشد. به طور مثال شکل۱ یک حوضه با حداکثر درجه آبراهه دو را نشان می‌دهد. این آبراهه II از دو صفحه جانبی تشکیل شده است. این ابراهه در انتهای حوضه قرار دارد و شیب متوسط آبراهه و شیب متوسط دو صفحه اطراف آن قابل محاسبه است. این اطلاعات، داده‌های اولیه مورد نیاز برای تخمین داده‌های ژئومورفولوژیکی توسط معادلات رگرسیونی می‌باشد. طبق معادله ۱۰ و۱۱ با معلوم بودن مقادیر $\overline{S_{c_\Omega}}$، $\overline{S_{o_\Omega}}$، R_S و R_{SO} می‌توان مقادیر $\overline{S_{c_i}}$ و $\overline{S_{o_i}}$ در درجه‌های مختلف را محاسبه نمود.

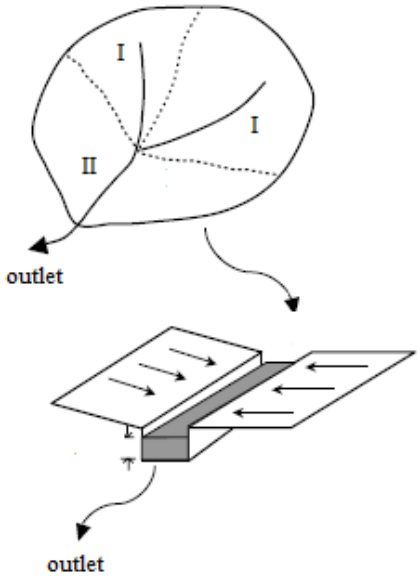

Fig 1. Catchment with maximum stream order of 2
شکل۱- حوضه آبریز با حداکثر آبراهه درجه دو

برای بررسی ارتباط بین اطلاعات درجه‌بندی آبراهه‌ها حوضه‌ها نیازمند این اطلاعات در بین تعدادی حوضه می‌باشد. برای این منظور باید اطلاعات مزبور از طریق GIS محاسبه گردند. در این تحقیق از اطلاعات مربوط به دوازده حوضه آبریز در کشورهای مختلف استفاده گردید. جدول ۱ اطلاعات ژئومورفولوژیکی و ضرایب درجه آبراهه حوضه‌های انتخابی را نشان می‌دهد. حوضه های San-Hsia، Al-Badan، Al-Faria ، Al-Malaqi، Debarwa، Gherghera، Long men و Chaukhutia برای آموزش و تخمین معادلات رگرسیونی و حوضه‌های Gagas، Heng-Chi و Kasilian برای صحت‌سنجی معادلات پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفت.

ستون ۱ تا ستون ۱۲ جدول شماره ۱ به ترتیب نام حوضه، شماره درجه آبراهه، تعداد در هر درجه، طول متوسط در هر درجه، مساحت زهکشی متوسط، شیب متوسط آبراهه‌ها، شیب متوسط صفحات حوضه R_B، R_L، R_A، R_S و R_{SO} را نشان می‌دهند. حوضه آبریز Heng-Chi در شمال تایوان با مساحت ۵۳ کیلومتر مربع (Lee, 1998) و حوضه Gagas درکشور هند با مساحت ۵۰۶ کیلومتر مربع می‌باشد. حوضه Kasilian در شمال ایران با مساحت ۶۷/۸ کیلومتر مربع قرار دارد.

۳-۱-۱- تخمین ضریب انشعاب حوضه (R_B)

برای تخمین ضریب انشعاب یک حوضه از اطلاعات مربوط به ۳۷ حوضه آبریز با مساحت بین ۱ کیلومتر مربع تا ۶۰۰ کیلومتر مربع که مقادیر R_B و مساحت حوضه در آنها مشخص بود استفاده گردید. فرض گردید که مقدار R_B تابعی از دو متغیر مساحت A و طول آبراهه اصلی L باشد. با استفاده از نرم‌افزار SPSS18 براساس اطلاعات ۳۷ حوضه بهترین رابطه به صورت زیر محاسبه گردید:

$$R_B = 0.0027A + 3.47 \qquad (۱۲)$$

عملا مقدار R_B به پارامتر طول آبراهه اصلی (L) وابسته نبود. ضریب همبستگی معادله برازش شده ۰/۸ می‌باشد. متوسط ضریب انشعاب حوضه‌ها ۴ می‌باشد. معادله ۱۲ نشان دهنده این است که در حوضه‌های کوچک زیر ۲۰۰ کیلومتر مربع مقدار ضریب انشعاب بین ۳/۴۷ تا ۴ می‌باشد. پیشنهاد می‌گردد این معادله برای حوضه‌های کوچکتر از ۶۰۰ کیلومتر مربع استفاده گردد.

۳-۱-۲- محاسبه ضریب طول آبراهه‌ها (R_L)

برای محاسبه ضریب طول، مقدار R_L را تابعی از طول آبراهه اصلی و مساحت کل حوضه در نظر گرفته شد. معادله رگرسیونی برازش شده برای نه حوضه معرف مطابق با جدول ۱ به صورت زیر می‌باشد:

$$R_L = 2.59L^{0.41}\ A^{-0.2} \qquad (۱۳)$$

ضریب همبستگی معادله ۰/۹۱ می‌باشد.

۳-۱-۳- محاسبه ضریب مساحت (R_A)

مقدار ضریب مساحت تابعی از ضریب انشعاب و ضریب طول در نظر گرفته شد. معادله برازش شده برای این منظور به صورت زیر است:

$$R_A = 0.597R_B^{1.553}R_L^{-0.177} \qquad (۱۴)$$

ضریب همبستگی معادله ۰/۹۹ می‌باشد.

Table 1. Geomorphologic data of twelve case study catchments

جدول۱- اطلاعات ژئومورفولوژیکی دوازده حوضه آبریز مختلف در طرح مطالعاتی

Catchment Name	Morphological Data										
	Order	N_i	$\overline{L_i}$	$\overline{A_i}$	$\overline{S_c}$	$\overline{S_o}$	R_B	R_L	R_A	R_S	R_{SO}
1. Gagas	1	121	1.74	3.02	0.172	0.810	4.8	2.4	5.4	0.4	2.6
(Kumar and Kumar, 2008)	2	23	3.04	18.58	0.141	0.655					
	3	6	7.63	79.22	0.041	0.172					
	4	1	23.4	506	0.017	0.065					
2. Heng-Chi	1	30	0.66	1.043	0.087	0.450	3.3	2.6	4	0.6	1.1
	2	6	2.74	6.919	0.050	0.419					
(Lee and Chang, 2005)	3	2	1.6	19.9	0.012	0.349					
	4	1	4.97	53.23	0.012	0.347					
3. Kasilian	1	42	1.6	0.915	0.241	0.345	3.5	1.5	4.3	0.4	1.1
	2	11	1.79	4.813	0.070	0.297					
(Sabzevari et al., 2013)	3	3	2.45	20.75	0.047	0.263					
	4	1	4.65	67.8	0.008	0.261					
4. San-Hsia	1	69	0.92	1.15	0.161	0.314	4.2	2.9	5	0.4	1.1
	2	16	2.08	4.99	0.092	0.203					
(Chang and Lee, 2008)	3	3	3.88	18.15	0.037	0.364					
	4	1	17.8	125.9	0.013	0.293					
5. Al-Badan	1	41	1.38	1.37	0.170	0.140	4	1.5	4.5	1	1.7
	2	6	3.2	10.12	0.092	0.062					
(Shadeed et al., 2007)	3	2	5.03	40.73	0.140	0.051					
	4	1	3.17	85	0.135	0.029					
6. Al-Faria	1	49	1.03	0.937	0.154	0.117	4	1.5	4.3	1.1	1.6
	2	8	2.12	6	0.085	0.058					
(Shadeed et al., 2007)	3	3	3.5	19.4	0.161	0.033					
	4	1	2.62	64	0.125	0.031					
7. Al-Malaqi	1	62	1.92	1.81	0.146	0.140	9	1.3	17	0.8	4.3
	2	16	2.61	5.83	0.122	0.063					
(Shadeed et al., 2007)	3	1	3.21	185	0.081	0.010					
8. Debarwa	1	23	2.26	5.6	0.032	0.135	4.9	3	6	0.6	1.2
	2	6	4.2	27.8	0.018	0.091					
(Alemngus and Mathur, 2014)	3	1	17.7	195	0.010	0.098					
9. Gherghera	1	58	2.45	5.9	0.027	0.136	2.9	1.4	3.3	0.9	1.4
	2	14	4.19	30.6	0.018	0.087					
(Alemngus and Mathur, 2014)	3	5	10.2	101.0	0.010	0.064					
	4	2	4.47	259.9	0.016	0.025					
	5	1	4.19	525.7	0.011	0.117					
10. Long Chi	1	46	1.13	2.5	0.210	0.444	3.7	2.4	4	0.6	1.1
	2	10	3.45	11.8	0.124	0.487					

Catchment Name	Morphological Data										
	Order	N_i	$\overline{L_i}$	$\overline{A_i}$	$\overline{S_c}$	$\overline{S_o}$	**R_B**	**R_L**	**R_A**	**R_S**	**R_{SO}**
(Shuyou et al., 2010)	3	4	3.19	32	0.073	0.514					
	4	1	9.94	141.8	0.054	0.364					
11. Long Men	1	58	1.31	2.74	0.560	0.256	4	2.2	4.7	0.9	1.8
	2	13	2.48	12.3	0.560	0.123					
(Shuyou et al., 2010)	3	3	9.33	77.11	0.560	0.056					
	4	1	8.18	246.8	0.385	0.056					
12. Chaukhutia	1	134	1.41	2.27	0.191	0.910	5.3	2.5	5.7	0.5	2.4
	2	31	2.65	12.28	0.123	0.567					
(Kumar, 2014)	3	7	7.21	60.18	0.041	0.174					
	4	1	20.7	452.3	0.019	0.074					

۳-۳-۴- محاسبه ضریب شیب آبراهه ها (R_S)

ضریب شیب دامنه‌ها تابعی از R_B، R_L و R_A در نظر گرفته شد. معادله ۱۵ رابطه رگرسیونی برازش شده برای داده‌ها را نشان می‌دهد.

(۱۵)
$$R_S = 1.198 R_B^{1.26} R_L^{-0.97} R_A^{-1.04}$$

ضریب همبستگی معادله ۱۳، ۰/۷۹ می‌باشد.

۳-۳-۵- محاسبه ضریب شیب صفحات (RSO)

برای محاسبه ضریب شیب صفحات حوضه از معادله رگرسیون غیر خطی بین پارامترهای R_B، R_L، R_A و R_S استفاده گردید. رابطه برازش شده به صورت زیر است:

$$R_{SO} = 0.366 R_B^{2} R_L^{-0.58} R_A^{-0.66} \quad (۱۶)$$

ضریب همبستگی معادله ۱۶، ۰/۹۳ می‌باشد و پارامتر R_{SO} به پارامتر R_S همبسته نبوده است. براساس معادله ۱۱ و ۱۶ می‌توان شیب دامنه‌های حوضه را محاسبه نمود. معادلات ۱۲ تا ۱۶ بر اساس اطلاعات نه حوضه به دست آمده‌اند و می‌توان با افزودن داده‌های بیشتر این معادلات را کالیبره کرد.

۴- تاثیر ضرایب R_B، R_L، R_A، R_S و R_{SO} بر روی رواناب حوضه‌های آبریز

با توجه به اینکه در قسمت قبلی مقاله معادلاتی برای تخمین ضرایب درجه‌بندی آبراهه‌ها ارایه گردید و این معادلات دارای خطا می‌باشند. در این قسمت از تحقیق با استفاده از مدل GIUH به تحلیل حساسیت این ضرایب و تأثیر آنها بر روی هیدروگراف رواناب مستقیم و پیک سیلاب حوضه های آبریز پرداخته می‌شود. برای این منظور از اطلاعات حوضه آبریز کسیلیان استفاده گردید. شکل ۲- الف تاثیر ضریب انشعاب را بر روی شکل هیدروگراف رواناب مستقیم (DRH) حوضه آبریز کسیلیان تاریخ 4MAY1993 را نشان می‌دهد.

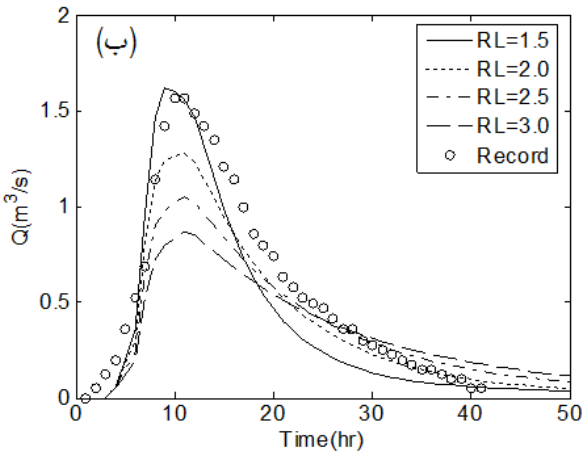

Fig 2. Effect of R_B and R_L on DRH of the Kasilian catchment

شکل ۲- تأثیر ضریب R_B و R_L برروی DRH حوضه آبریز کسیلیان

مقادیر ضریب انشعاب ۳، ۳/۵، ۴ و ۴,۵ با افزایش ۰/۵ واحد برای حوضه کسیلیان در نظر گرفته شد و مقادیر تعداد آبراهه و پارامترهای ورودی به مدل GIUH محاسبه گردید و به مدل وارد گردید. تاثیر چهار ضریب مختلف برروی شکل و پیک رواناب حوضه مطابق شکل ۲- الف می‌باشد. نتایج مدل با هیدروگراف رواناب مستقیم مقایسه گردیده است. برای محاسبه مقدار حساسیت و تأثیر مقادیر مختلف R_B بر روی پیک رواناب از معادله حساسیت نسبی به صورت زیر استفاده گردید:

$$S_r = \frac{O_2 - O_1}{P_2 - P_1}(\overline{P}/\overline{O}) \quad (۱۷)$$

که در آن O و P به ترتیب خروجی مدل و پارامتر مدل که قصد تحلیل حساسیت آن می‌باشد است. S تغییرات مطلق خروجی O برای تغییرات واحد P در حالی که S_r درصد تغییرات خروجی O برای تغییر یک درصد مقدار P می‌باشد. P در معادلات مقدار برابر $(P_1+P_2)/2$ و مقدار O برابر $(O_1+O_2)/2$ در نظر گرفته می‌شود. براساس نتایج کمترین خطای پیک محاسباتی نسبت به پیک رواناب مشاهداتی را R_B=3.5 با مقدار ۳/۵ درصد مشاهده گردید. ضریب انشعاب واقعی حوضه کسیلیان نیز برابر ۳/۵ می‌باشد (جدول ۱). مقدار متوسط حساسیت نسبی پارامتر ضریب انشعاب بر اساس معادله ۱۷ برابر ۰/۵۶ می‌باشد. شکل ۲- ب تاثیر ضریب طول را برروی DRH حوضه آبریز کسیلیان را نشان می‌دهد. مقادیر ضریب طول ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ با افزایش ۰/۵ واحد در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج R_L=1.5 کمترین خطای پیک با مقدار ۳/۶ درصد را نشان داده است. مقدار ضریب طول واقعی حوضه نیز ۱/۴۶ می‌باشد. مقدار متوسط حساسیت نسبی ضریب طول ۰/۹۲ می باشد. هر چه مقدار ضریب R_L افزایش یابد مقدار خطای پیک افزایش می‌یابد. تاثیر ضریب طول بر روی رواناب بیشتر از ضریب انشعاب می‌باشد که در شکل ۲- ب نیز قابل مشاهده است. در قسمت بعدی تحقیق تاثیر ضریب مساحت حوضه بر روی شکل و پیک رواناب مورد بررسی قرار گرفت. مقدار ضریب مساحت بین ۳ تا ۶ با مقادیر افزایشی ۱ واحد در نظر گرفته شد. شکل ۳ تاثیر ضریب مساحت برروی DRH حوضه کسیلیان را نشان می‌دهد.

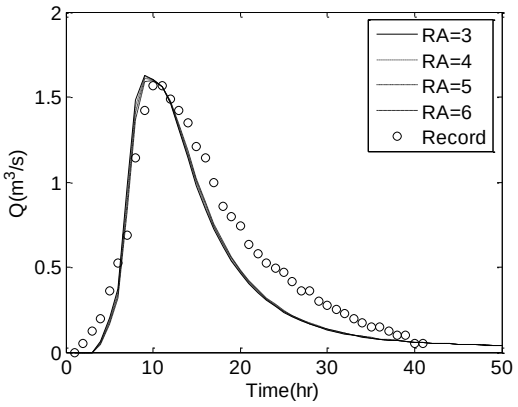

Fig 3. Effect of area ratio on DRH of the Kasilian catchment

شکل ۳- تاثیر ضریب مساحت برروی DRH حوضه آبریز کسیلیان

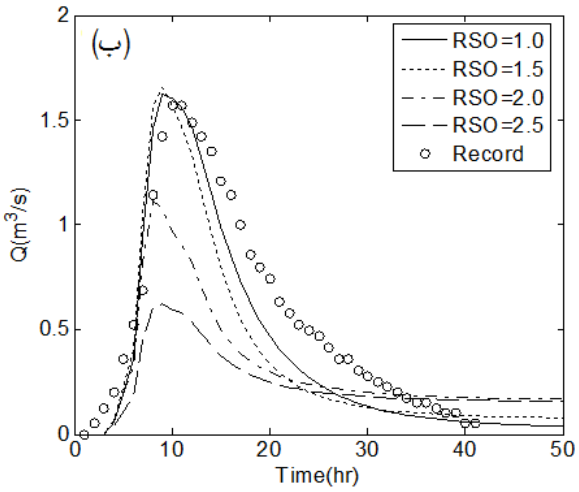

Fig 4. Effect of R_S and R_{SO} on DRH of the Kasilian catchment

شکل ۴- تاثیر ضریب R_S و R_{SO} برروی DRH حوضه کسیلیان

براساس نتایج کل، ضریب حساسیت نسبی ضرایب R_B، R_L، R_A، R_S و R_{SO} به ترتیب ۰/۵۶، ۰/۰،۰۱/۹۲، ۰/۰۴۲ و ۱/۳۳ می‌باشد. بیشترین تاثیر به ترتیب مربوط به ضریب شیب صفحات، ضریب طول، ضریب انشعاب، ضریب مساحت و شیب آبراهه‌ها می‌باشد.

برای محاسبه مقدار $P_{x_i x_j}$ در معادله ۱ از معادله زیر استفاده می‌شود:

$$P_{x_i x_j} = N_{i,j} / N_i \quad (۱۸)$$

که در آن $N_{i,j}$ تعداد آبراهه i امین که به آبراهه j امین می ریزد. N_i تعداد i امین است. مقدار N_i که بر اساس ضریب انشعاب قابل محاسبه می‌باشد ولی برای محاسبه پارامتر $N_{i,j}$ معادله زیر پیشنهاد می‌گردد:

$$N_{i,j} = 2N_i \exp(-0.64j) \quad (۱۹)$$

کمترین خطا مربوط به ضریب شیب ۰/۷ با خطای ۰/۴۷درصد می‌باشد. ضریب شیب واقعی حوضه کسیلیان ۰/۳۸می‌باشد. ضریب حساسیت نسبی متوسط ۰/۰۴۲ می‌باشد. نتایج نشان دهنده این است که این پارامتر نیز تاثیر بسیار کمی برروی پیک رواناب می‌گذارد.

شکل ۴- ب تاثیر ضریب شیب صفحات حوضه برای مقادیر ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ با مقدار افزایشی ۰/۵ را برروی DRH نشان می‌دهد. کمترین خطا مربوط به ضریب شیب صفحات ۱ با خطای ۳/۵۴ درصد می‌باشد. ضریب شیب صفحات واقعی حوضه کسیلیان ۱/۱ می‌باشد. ضریب حساسیت نسبی متوسط ۱/۳۳ می‌باشد. نتایج نشان دهنده این است که این پارامتر تاثیر بسیار زیادی برروی پیک رواناب می‌گذارد.

معادله ۱۹ بر اساس اطلاعات ژئومورفولوژیکی حوضه Kasilian و Gagas از طریق رگرسون غیر خطی بین داده‌های شبکه آبراهه‌ها بدست آمده است. در حوضه‌های دارای DEM نیازمند ترسیم شبکه آبراهه‌ها و درجه بندی آن با نرم افزاری GIS می‌باشد ولی باید توجه کنید برای محاسبه پارامتر $N_{i,j}$ باید این کار به صورت دستی و توسط اپراتورGIS انجام گیرد که کار وقت‌گیر و سخت می‌باشد.

۵- صحت سنجی

۵-۱- صحت‌سنجی ضرایب آبراهه‌ها

در قسمت‌های قبلی تحقیق معادلاتی برای محاسبه ضرایب درجه‌بندی آبراهه‌ها حوضه های آبریز براساس اطلاعات نه حوضه آبریز مختلف در دنیا ارایه گردید. برای صحت سنجی نتایج معادلات رگرسیونی از اطلاعات ۳ حوضه آبریز Gagas، Heng-Chi و Kasilian استفاده می‌گردد. براساس معادلات ۱۲ تا ۱۶ مقادیر داده‌های ژئومورفولوژیکی و ضرایب درجه‌بندی آبراهه‌ها سه حوضه معرف مطابق جدول ۲ است. درصد خطای محاسباتی برای هر ضریب مطابق جدول ۲ می‌باشد.

در جدول ۲ مقادیر ضرایب بدست آمده از GIS مقدار واقعی برای حوضه هستند که با مقادیر محاسباتی مقایسه گردید. مقدار متوسط خطای معادلات رگرسیونی در تخمین ضرایب R_B، R_L، R_A، R_S و R_{SO} در سه حوضه معرف به ترتیب ۴/۷٪، ۲۳/۵٪، ۷/۱٪، ۳/۴۱٪ و ۲۲/۹٪ می‌باشد. بیشترین خطای مدل به ترتیب در تخمین ضریب شیب آبراهه‌ها، ضریب طول، ضریب شیب صفحات، ضریب مساحت و ضریب انشعاب می‌باشد. همانطور که در شکل ۴- الف مشاهده گردید، مقدار ضریب شیب آبراهه‌ها بر روی رواناب تاثیر کمی می‌گذارد و خطای آن قابل صرف نظر کردن می‌باشد. با توجه به حساسیت بالای ضریب طول و شیب صفحات میزان خطای آنها بین ۲۳ تا ۲۴ درصد می‌باشد که پیشنهاد می‌شود تاثیر همزمان همه ضرایب بر روی میزان رواناب مستقیم حوضه های معرف مورد بررسی قرار گیرد.

Table 2. Calculated GP of the Gagas, Heng-Chi, and Kasilian catchments

جدول۲- اطلاعات ژئومورفولوژیکی محاسبه شده حوضه معرف Gagas، Heng- Chi و Kasilian

Catchment	Order	N_i	L_i	A_i	S_c	S_o	R_B	R_L	R_A	R_S	R_{SO}
1.Gagas	1	113	1.38	2.6	0.146	0.222	4.84	2.72	5.78	0.53	1.5
	2	23	3.54	15.1	0.101	0.147					
	3	5	9.10	87.5	0.065	0.098					
	4	1	23.40	506.0	0.017	0.065					
GIS							4.80	2.40	5.40	0.40	2.60
%Error							0.40	13.7	7.6	21.0	41.4
2.Heng-Chi	1	47	0.32	1.0	0.104	0.654	3.61	2.26	3.80	0.68	1.2
	2	13	1.34	3.7	0.060	0.530					
	3	4	2.43	14.0	0.031	0.429					
	4	1	4.97	53.2	0.012	0.347					
GIS							3.30	2.60	4	0.60	1.10
%Error							9.4	13.7	5.0	13.3	9.1
3.Kasilian	1	49	0.49	1.1	0.109	0.563	3.65	2.09	3.92	0.72	1.3
	2	13	1.03	4.4	0.073	0.436					
	3	4	2.19	17.3	0.038	0.337					
	4	1	4.65	67.8	0.008	0.261					
GIS							3.5	1.5	4.3	0.4	1.1
%Error							4.3	43.2	8.8	89.5	18.2

۵-۲- صحت سنجی رواناب کل حوضه

در قسمت‌های قبلی تاثیر تک تک ضرایب بر روی میزان رواناب حوضه مورد بررسی قرار گرفت و همچنین بر اساس معادلات رگرسیونی به تخمین پارامترهای ژئومورفولوژیکی برای سه حوضه پرداخته شد. برای بررسی دقیق‌تر صحت تخمین پارامترهای محاسبه شده بهتر است با استفاده از مدل GIUH به تخمین هیدروگراف رواناب مستقیم حوضه‌های مزبور پرداخته شود. برای این منظور با توجه به معلوم بودن اطلاعات مربوط به هایتوگراف بارش مازاد و هیدروگراف رواناب مستقیم حوضه Kasilian و Heng-Chi به صحت سنجی رواناب پیش‌بینی شده در این دو حوضه پرداخته شود.

مدل GIUH برای دو حالتی که اطلاعات ژئومورفولوژیکی از طریق GIS محاسبه گردد و حالت دوم معادلات تجربی رگرسیونی و تجربی ارایه شده در این تحقیق برای دو حوضه آبریز معرف Kasilian و Heng-Chi به کار گرفته شد. نتایج مدل برای دو حالت مزبور با نتایج مربوط به رواناب مشاهداتی ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری مقایسه گردید. اطلاعات رواناب و بارندگی حوضه Gagas به صورت دقیق در دسترس نبود لذا در صحت سنجی از این حوضه صرف‌نظر گردید. شکل ۵ نتایج مدل GIUH را برای تخمین DRH حوضه Kasilian را برای دو رویداد تاریخ 10May1992 و 4May1993 را نشان می‌دهد. شکل ۶ نتایج مدل GIUH را برای تخمین DRH حوضه Heng-Chi را برای دو رویداد تاریخ July1996 و October2000 را نشان می‌دهد.

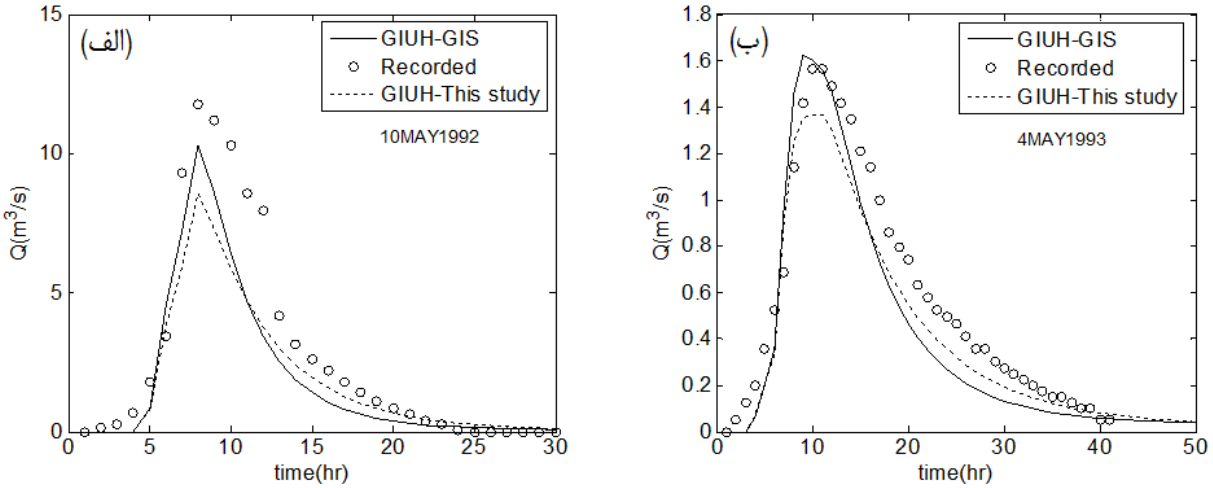

Fig 5. Estimation of Kasilian DRH by GIUH model

شکل ۵- تخمین DRH حوضه Kasilian با مدل GIUH

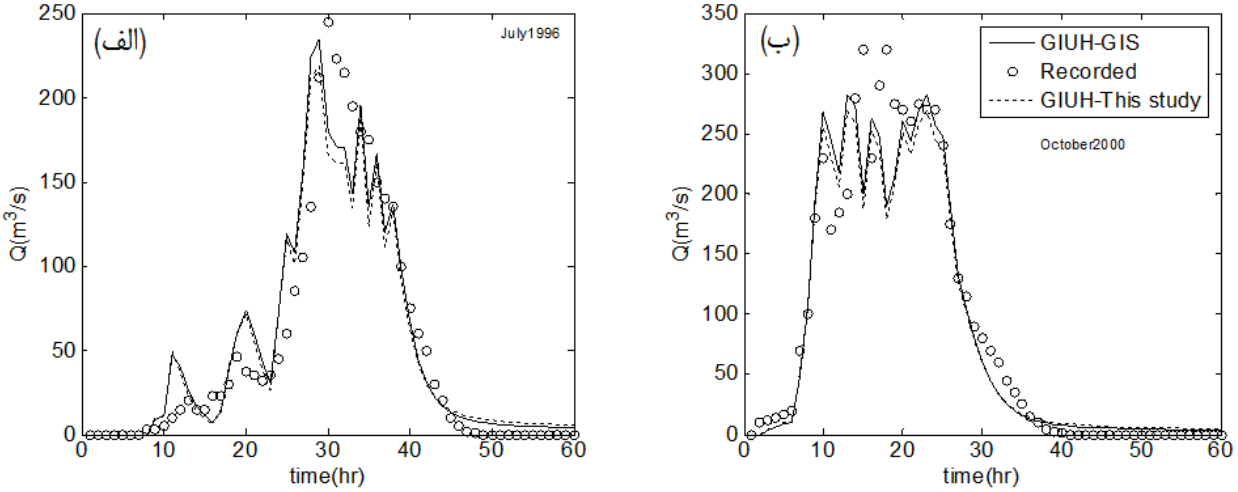

Fig 6. Estimation of Heng-Chi DRH by GIUH model

شکل ۶- تخمین DRH حوضه Heng-Chi با مدل GIUH

برای ارزیابی مدل برای حوضه‌های Kasilian وHeng- Chi سه مقدار آماری ضریب کارایی(CE)، خطای مربع میانگین (RMSE) و خطای نسبی در پیک (REP) استفاده گردید.
تخمین این سه پارامتر از طریق معادلات زیر انجام می‌گردد:

$$CE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{n}[Q_r - Q_s]^2}{\sum_{t=1}^{n}[Q_r - \overline{Q_o}]^2} \quad (۲۰)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Q_r - Q_s)^2\right]^{0.5} \quad (۲۱)$$

$$REP = 100 \times [Q_{p_s} - Q_{p_r}] / Q_{p_r} \quad (۲۲)$$

که در آن Q_r دبی رکورد یا مشاهداتی در زمان t و Q_s دبی محاسبه شده در زمان t، $\overline{Q_r}$ متوسط دبی رکورد شده، n تعداد رکوردهای در طول یک رویداد، Q_{p_s} مقدار دبی پیک محاسباتی و Q_{p_r} دبی پیک داده‌های رکورد می‌باشد. جدول ۳ مقادیرREP و CE و RMSE محاسبه شده برای دو حوضه معرف را برای دو حالت GIS و بدون GIS (This study) را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج جدول ۳ می‌توان گفت که مقادیر خطای پیک رواناب محاسباتی (REP%) (نتایج این تحقیق) به طور متوسط برای چهار رویداد بارندگی- رواناب ۱۰٪ بیشتر از خطای پیک نتایج مربوط به اطلاعات واقعی (GIS) حوضه می‌باشد. همانطور که در شکل های ۵ و ۶ مشاهده می‌گردد، نتایج مدل GIUH برای دو حالت GIS و معادلات تجربی بسیار به هم نزدیک است. مقادیر CE و RMSE در دو حالت تقریبا یکی می‌باشد. ضریب کارایی متوسط مدل برای چهار رویداد ۰/۸۷ محاسبه گردید که مقداری قابل قبول است.

۶- خلاصه و جمع بندی

در این تحقیق معادلات تجربی جهت محاسبه ضرایب درجه‌بندی آبراهه‌های حوضه‌های آبریز کوچکتر از ۶۰۰ کیلومتر مربع ارایه گردید. این معادلات بر اساس روش رگرسیون غیر خطی برازش شده بر اطلاعات ژئومورفولوژیکی نه حوضه آبریز مختلف در دنیا ارایه شده است. معادلات ارایه شده در سه حوضه معرف دیگر مورد صحت‌سنجی قرار گرفت و نتایج آنها با مقادیر اطلاعات ژئومورفولوژیکی واقعی حوضه که از GIS محاسبه شده بودند مورد مقایسه قرار گرفت. در نهایت بر اساس داده‌های ژئومورفولوژیکی محاسبه شده برای سه حوضه به تخمین هیدروگراف رواناب مستقیم حوضه به روش GIUH پرداخته شد و با مقادیر مشاهداتی مقایسه گردید. میزان حساسیت ضرایب انشعاب، ضریب طول، ضریب مساحت، ضریب شیب آبراهه و ضریب شیب صفحات بر روی رواناب حوضه آبریز کسیلیان مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج ضریب حساسیت نسبی ضرایب R_B، R_L ، R_A، R_S و R_{SO} به ترتیب ۰/۵۶، ۰،۹۲/۰۱ /۰، ۰/۰۴۲ و ۱/۳۳ مشاهده شد. بیشترین تاثیر به ترتیب مربوط به ضریب شیب صفحات، ضریب طول و ضریب انشعاب و کمترین تاثیر مربوط به ضریب مساحت و شیب آبراهه‌ها می‌باشد. اطلاعات ژئومورفولوژیکی سه حوضه Gagas، Heng-Chi و Kasilian براساس معادلات تجربی ارایه شده در این تحقیق محاسبه گردید و با نتایج واقعی آنها مقایسه گردید. مقدار متوسط خطای مدل در تخمین ضرایب R_B، R_L ، R_A، R_S و R_{SO} در سه حوضه معرف به ترتیب ۴/۷٪، ۲۳/۵٪، ۷/۱٪، ۴۱/۳٪ و ۲۲/۹٪ می‌باشد.

Table 3. Validation result of the GIUH model

جدول۳- مقادیرREP و CE و RMSE

July1996	REP%	CE	RMSE
GIS	4.18	0.87	24.54
Present Study	10.62	0.86	25.44
October2000			
GIS	11.81	0.93	31.22
Present study	15.99	0.92	32.25
10May92			
GIS	12.68	0.81	1.13
Present Study	27.33	0.76	1.26
4May93			
GIS	3.5	0.87	0.10
Present study	12.6	0.91	0.10

در نهایت اطلاعات تخمین زده شده وارد مدل GIUH گردید و مقادیر هیدروگراف رواناب مستقیم دو حوضه Kasilian و Heng-Chi محاسبه گردید و با مقادیر رواناب مشاهداتی مقایسه گردید. بر اساس نتایج مقادیر خطای پیک رواناب محاسباتی (%REP) (نتایج این تحقیق) به طور متوسط برای چهار رویداد بارندگی- رواناب ۱۰٪ بیشتر از خطای پیک نتایج مربوط به اطلاعات واقعی (GIS) حوضه می‌باشد. نتایج مدل GIUH برای دو حالت GIS و بدون GIS بسیار به هم نزدیک است. مقادیر CE و RMSE در دو حالت تقریبا یکی می باشد. ضریب کارایی متوسط مدل برای چهار رویداد ۰/۸۷ محاسبه گردید.

۷- تشکر و قدردانی

این تحقیق قسمتی از یک طرح پژوهشی در دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان است که بودجه تحقیقاتی آن توسط این دانشگاه تامین شده است.

۸- مراجع

Alemngus A, Mathur B.S (2014) Geomorphologic instantaneous unit hydrograph for rivers in Eritrea (East Africa). Journal of Indian Water Resources Society 34(1):1-14

Chang CH, Lee K.T (2008) Analysis of geomorphologic and hydrological characteristics in watershed saturated areas using topographic-index threshold and geomorphology-based runoff model. Hydrol Process 22:802–812

Gupta V.K, Waymire E, and Wang C.T (1980) A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology. Water Resour Res 16(5):855–862

Horton R. E (1932) Drainage-basin characteristics. Eos Trans, AGU 13:350– 361

Horton R.E (1945) Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. Geol Soc Am Bull 56:275–370

Kumar A, Kumar D (2008) Predicting direct runoff from hilly watershed using geomorphology and stream-order law ratios: case study. J Hydrol Eng 13(7):570–576

Kumar A (2015) Geomorphologic instantaneous unit hydrograph based hydrologic response models for ungauged hilly watersheds in India. Water Resources Management 29(3):863-883

Najafi M, Behbahani M.R, Abdolahi J, Hosseini M (2009) A comparative study of geomorphologic artificial intelligent model and GIUH for direct runoff computations. Iran Water Resources Research 5(2):1-9 (In Persian)

Lee K.T (1998) Generating design hydrographs by DEM assisted geomorphic runoff simulation: a case study. J. Am. Water Resour. Assoc 34 (2):375–384

Lee K.T, Chang C.H (2005) Incorporating subsurface-flow mechanism into geomorphology-based IUH modeling. Journal of Hydrology 311:91–105

Rodriguez-Iturbe I, Valdes J.B (1979) The geomorphologic structure of hydrologic response. Water Resour Res 15 (6):1409–1420

Rodriguez-Iturbe I, Gonzalez-Sanabria M, Bras R.L (1982) A geomorphoclimatic theory of the instantaneous unit hydrograph.Water Resour Res 18(4):877–886

Smart J. S. (1972) Channel networks. Advances in hydroscience 8:305-346

Strahler A.N (1952) Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology. Bull. Geol. Soc. Am. 63:1117–1142

Strahler A.N (1957) Quantative analysis of watershed geomorphology. Trans. AGU 38(6):913– 920

Strahler A.N (1964) Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks. Handbook of applied hydrology

Sabzevari T, Fattahi M.H, Mohammadpour R and Noroozpour Sh (2013) Prediction of surface and subsurface flow in catchments using the GIUH, under publication. Journal of Flood Risk Management 6(2):135–145

Sabzevari T, Noroozpour Sh (2014) Effects of hillslope geometry on surface and subsurface flows. Hydrogeology Journal 22(7):1593-1604

Shadeed S, Shaheen H and Jayyousi A (2007) Gis-based KW-GIUH hydrological model of semiarid catchments: the case of Faria catchment. Palestin, The Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 32, Number 1C

Shuyou C, Lee K.T, Juiyi H, Xingnian,L, Huang E and Yang K (2010) Analysis of runoff in ungauged mountain watersheds in Sichuan China using kinematic-wave-based GIUH Model. Journal of Mountain Science 7(2):157-166

Yen B. C, Lee K. T (1997) Unit hydrograph derivation for ungauged watersheds by stream-order laws. J. Hydrol. Eng 2(1):1–9