

بازنگری شبکه زهکشی رواناب سطحی با استفاده از شبیه‌سازی و کاربرد حوضچه‌های تأخیری

(مطالعه موردی: حوضه آبریز اقبال شرقی، مشهد)

محمد تاج بخش^{1*} و سعیدرضا خداشناس²

تاریخ دریافت: 88/11/11 تاریخ پذیرش: 90/8/28

1- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

2- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

* مسئول مکاتبه: E-mail: Tajbakhsh_md@yahoo.com

چکیده

امروزه همراه با پیشرفت جوامع و توسعه حریم شهرها، سطوح غیرقابل نفوذ آنها افزایش یافته و موجب افزایش ارتفاع و حجم رواناب شده است. لذا کنترل سیلاب در مناطق شهری همواره دغدغه طراحان و مدیران بوده است. در این تحقیق، عملکرد سیستم زهکشی رواناب سطحی حوضه آبریز اقبال شرقی واقع در جنوب و جنوب شرق شهر مشهد با مساحتی حدود 71 کیلومتر مربع ارزیابی گردید. برای تخمین مؤلفه‌های فیزیکی زیرحوضه‌ها، هیدرولیکی مجاری و انجام محاسباتی مانند میانگین وزنی، تهیه نقشه‌های کاربری و زیرحوضه‌بندی از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده شد. به دلیل پیچیدگی‌های موجود در زمینه شبیه‌سازی رواناب شهری، جهت انجام محاسبات بارش-رواناب و ارزیابی عملکرد شبکه، مدل MIKE SWMM مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه با توجه به وضعیت توپوگرافی، کانال‌های سیلابی و بازدیدهای میدانی، سه مکان مناسب جهت احداث حوضچه‌های کنترل سیلاب شناسایی گردید. ارزیابی عملکرد شبکه نشان داد 6 مجرا دچار اشکال بوده و دبی شبیه‌سازی بیشتر از دبی طراحی است. با توجه به حضور حوضچه‌های کنترل سیلاب، شبیه‌سازی مجدد نشان داد که این حوضچه‌ها قادرند دبی اوج سیلاب را بین 8 تا 100% کاهش داده و 12/35 مترمکعب در ساعت آب را نفوذ دهند.

واژه‌های کلیدی: حوضچه‌های کنترل سیلاب، سیلاب شهری، شبکه زهکشی رواناب شهری، مدل هیدرولیکی MIKE SWMM

Revision of Surface- Runoff Drainage System by Simulation and Application of Retention Basins (Case Study: East Eghbal Catchment, Mashhad) M Tajbakhsh^{1*} and SR Khodashenas²

Received: 19 November 2011 Accepted: 31 January 2010

¹Former Graduate Student, Dept. of Water Engin., Ferdowsi University of Mashhad, Iran

²Assoc. Prof., Dept. of Water Engin., Ferdowsi University of Mashhad, Iran

* Corresponding Author: Email: tajbakhsh_md@yahoo.com

Abstract

Nowadays along with development of societies and border extension of cities, their impervious areas increase and therefore higher amount and volume of runoff accrue. Thus control of flood in urban areas has always been a major concern of designers and managers. In this research the performance of East Eghbal urban drainage system located in the south and southeast of Mashhad city was analyzed in a region with area of 71 Km². To estimate the physical parameters of subcatchments and hydraulic parameters of conduits, and some other computations like calculation of weighted average, subdivision of catchments into sub-catchments and providing land use map, the GIS was used. Because of the complicacy in simulation of urban drainage system, MIKE SWMM was applied for rainfall - runoff simulation and hydraulic response evaluation of the urban drainage system. Finally, 3 suitable places were recognized for retention basins based on topographic maps, flood conduits position and land surveying. Results showed that 6 conduits had difficulty and computed flow was more than the designed flow. Urban drainage system was simulated again by the presence of retention basins and results showed that these basins could reduce the flood peak from 8 to 100% and also infiltrate 12.35 m³/h and also infiltrate of water.

Keywords: MIKE SWMM model, Retention basins, Urban drainage system, Urban flood

مقدمه

دهند (بوتلر و دیویس 2000). اما عدم طراحی صحیح، اشباع شدن سریع شبکه به علت توسعه شهری، عدم بهره برداری و نگهداری مناسب باعث می شود که شبکه در اکثر موارد قادر به ایفای صحیح وظایف خود نبوده و با کوچکترین بارندگی خیابان ها و کوچه ها دچار آبگرفتگی شوند.

ایده های نوین در زمینه کنترل رواناب در مناطق شهری در قرون 19 و 20 متداول شد که مبتنی بر تخلیه و دفع سریع سیلاب و به فاصله های هر چه دورتر می باشد. سامانه های زهکشی و شبکه های آب سطحی با پوشش سخت با این هدف احداث می شوند تا سرعت جریان را زیاده تر نموده و توان تخلیه سیلاب را افزایش

سیل‌خیزی بالا برای کنترل سیلاب از گزینه حوضچه‌های آبشاری استفاده شد. در این حوضچه‌ها شیوه موجود برای کنترل سیلاب، چرخش آب در یک سری حوضچه‌های طراحی شده در رقوم مختلف و در نتیجه نفوذ و ذخیره آن می‌باشد. نتایج نشان داد که حوضچه‌های فوق مشکل سیلاب را در منطقه مورد مطالعه کاملاً حل می‌نمایند (فریر 2001). همچنین تحقیقات صورت گرفته توسط خداشناس (1387) در زمینه استفاده از مدل‌های نفوذ رودخانه‌ای جهت برآورد نفوذ در طراحی حوضچه‌های نفوذ سیلاب شهری، نشان داد که هیدروگراف‌های نفوذ بدست آمده از این مدل‌ها مشابه هیدروگراف‌های واقعی بوده و مدل‌های فوق در شبیه‌سازی رفتار حوضچه نفوذ نتایج قابل قبولی می‌دهند. هدف از این تحقیق شبیه‌سازی نحوه عملکرد سیستم زهکشی رواناب سطحی حوضه اقبال شرقی واقع در جنوب و جنوب شرق شهر مشهد و تعیین آبراه‌های سیلابی، جانمایی تعدادی حوضچه کنترل سیلاب با توجه به آبراه‌های سیلابی شناسایی شده، پتانسیل اراضی جهت نگهداشت سیلاب و در نهایت بررسی تأثیر این حوضچه‌ها بر کاهش دبی اوج سیلاب می‌باشد.

مواد و روش‌ها

حوضه مورد مطالعه

این تحقیق شامل بررسی حوضه آبریز اقبال شرقی واقع در جنوب و جنوب شرق شهر مشهد می‌باشد. حوضه مذکور در دامنه‌های شمالی رشته کوه بینالود واقع شده است. ارتفاعات بینالود با روندی تقریباً شرقی - غربی و تحدبی به سمت شمال از جمله مهمترین ناهمواری‌های خراسان می‌باشند (حسین‌زاده 1380). این حوضه مساحتی حدود 71 کیلومتر مربع داشته و تراز آن بین 970 متر در غرب و 1500 متر در شمال شرقی متغیر است. با بررسی بارش در یک دوره 15 ساله (1363-1378)، مشخص شد که مقدار بارش بین 1 و 48 میلیمتر با متوسط 6 میلیمتر و شدت آن بین 0/12 و 17/71 میلیمتر در ساعت با متوسط 1/53

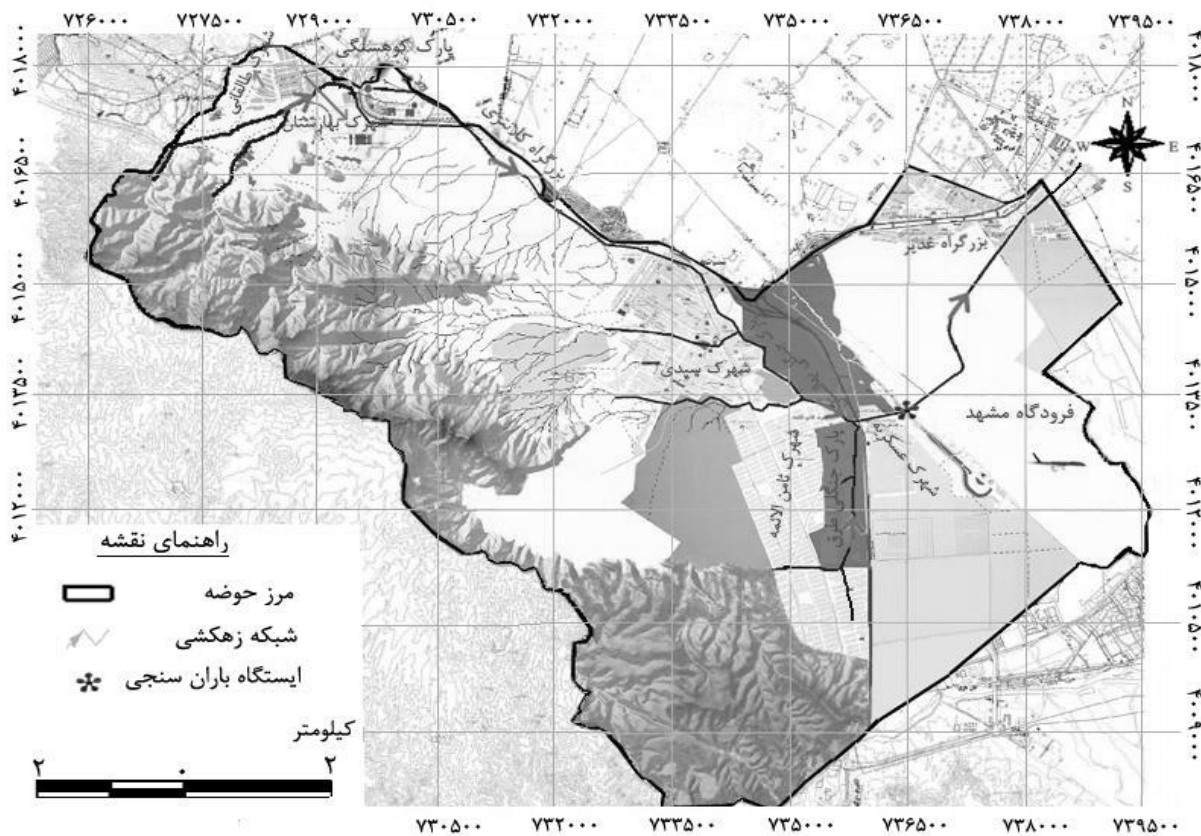
امروزه سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) فرصت‌های تازه‌ای در زمینه مدل‌سازی هیدرولوژیک حوضه‌ها ارائه می‌کند. این سامانه در زمینه تهیه مدل‌های سه بعدی توسعه یافته حوضه کاربرد دارد (شومان و همکاران 2000). در مورد سابقه مطالعات تلفیقی انجام شده روی سامانه GIS و مدل‌های رواناب سطحی می‌توان به تحقیق چو و بال (2002) اشاره کرد. مطالعات ایشان روی سیستم رواناب پارک مرکزی سیدنی استرالیا انجام شد. آنها جهت واسنجی¹ مؤلفه‌های ورودی به مدل SWMM به صورت همزمان از سیستم GIS و برنامه‌نویسی سود جستند. اعتبارسنجی² مقادیر پیشنهادی نشان‌دهنده نزدیکی نتایج شبیه‌سازی به داده‌های مشاهداتی بود. همچنین در کشور آمریکا بناویدز و همکاران (2003) با تلفیق مدل HEC-HMS و HEC-RAS در GIS به تجزیه و تحلیل گزینه‌های مختلف کنترل سیلاب در حوضه کریک پرداختند و گزینه برتر را انتخاب نمودند. کنبل و همکاران (2005) نیز با تلفیق مدل‌های مذکور در حوضه سن‌آنتونیو مدل منطقه‌ای برای سیلاب ارائه نمودند و کارایی مدل را در پیش‌بینی وقوع سیلاب بررسی کردند. یک نمونه دیگر از این تحقیقات در منطقه شهری در کشور فرانسه صورت گرفت. در این مطالعه از مدل رقومی - ارتفاعی برای تحلیل حوضه و زیرحوضه‌ها استفاده گردید و میزان دقت تحلیل‌های انجام گرفته بر اساس کیفیت مدل رقومی - ارتفاعی و شیب اراضی دسته‌بندی شد. در این مقاله استفاده از ابزار GIS امکان تخمین مؤلفه‌های هیدرولوژیک را به وسیله مدل رقومی - ارتفاعی و تهیه نقشه کاربری از عکس‌های هوایی را فراهم‌آورد (چاموکس و گربسویل 2002). تحقیقات جامعی نیز در زمینه استفاده از حوضچه‌های کنترل سیلاب در مناطق شهری صورت گرفته است. این حوضچه‌ها علاوه بر کنترل سیلاب کاربردهای دیگری شامل کاربردهای تفریحی، تغذیه منابع آب زیرزمینی و آتش‌نشانی دارند (میشل برگ و روپرد 2000). در تحقیق صورت گرفته در کشور استرالیا در دو منطقه با شیب زیاد و پتانسیل

¹ Calibration

² Validation

شبکه انواع سازه‌های کنترل جریان مانند پل، زیرگذر جاده، پایین افتادگی و دهانه ریزش وجود دارد که در تحلیل مدنظر قرار گرفته‌اند (شکل 1). لازم به ذکر است که سیلاب سالانه در نقاط مختلفی از حوضه شهری مشهد اتفاق می‌افتد. به عنوان مثال طبق گزارش‌های موجود، داغ آب سیل در سال 1371 تا 1/5 متری روی دیوارهای منازل مسکونی مشاهده شده که لزوم انجام این تحقیق را نشان می‌دهد (اسحاقیان 1371).

میلیمتر در ساعت متغیر بوده که مبین شرایط آب و هوایی خشک و نیمه خشک در منطقه می‌باشد. مسیل حوضه اقبال شرقی از سمت غرب با زهکشی شهرک-های بهارستان و طالقانی شروع و در امتداد بزرگراه شهید کلانتری به سمت شرق امتداد می‌یابد. در ادامه با پیوستن شاخه‌هایی که شهرک‌های عسکریه، ثامن‌الائمه و سیدی را زهکشی می‌نمایند با عبور از فرودگاه مشهد به سمت شمال در کشف‌رود تخلیه می‌شود. در این



شکل 1- شمای کلی مناطق شهری و محل زهکش‌های اصلی حوضه اقبال شرقی

توسط سازمان نقشه‌برداری) و بازدیدهای میدانی، نقشه رقومی - ارتفاعی (DEM) منطقه که دارای ساختار رستری (سلولی) است تهیه و اصلاح شد (شکل 2). در ادامه با کمک این نقشه، نقشه‌های جهت¹ و تجمع

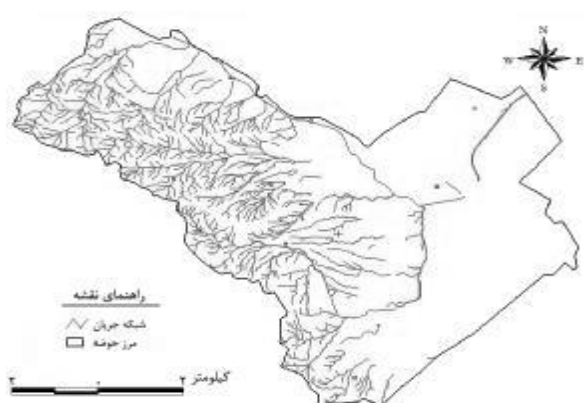
شبیه‌سازی حوضه در محیط GIS

برای تعیین میزان رواناب در محل‌های ورودی به شبکه زهکشی رواناب شهری، این محل‌ها به عنوان خروجی زیرحوضه‌ها در نظر گرفته شده و مؤلفه‌های مختلف فیزیکی و هیدرولوژیک زیرحوضه‌های بالادست تخمین زده می‌شوند. در این راستا توسط سیستم GIS بر اساس نقشه‌های توپوگرافی 1:2000 (تهیه شده

¹ Digital elevation model

² Flow direction

بالادست برای تشکیل آبراهه درجه اول است. از اتصال نقاط مختلف روی آبراهه با درجه یک و بالاتر به هم از سمت بالادست حوضه به سمت پایین‌دست، رودها ایجاد می‌شوند (مخدوم و درویش‌صفت 1380). اما به علت خطاهای موجود در نقشه‌های توپوگرافی و خصوصاً در حوضه‌های شهری به علت وجود مناطق تحت تأثیر دخالت انسان، جریان همیشه در جهت حداکثر شیب نبوده و رواناب سطحی به جای حرکت در مسیرهای طبیعی از طریق کانال‌ها و لوله‌ها به سمت رودخانه هدایت می‌شود. برای تصحیح نقشه شبکه جمع‌آوری ذکر شده، از طریق بازدیدهای میدانی مسیر واقعی حرکت رواناب از طریق مسیر طبیعی، مصنوعی و جوی‌های حاشیه خیابان‌ها شناسایی و نقشه آبراهه-های منطقه اصلاح شد (شکل 5).



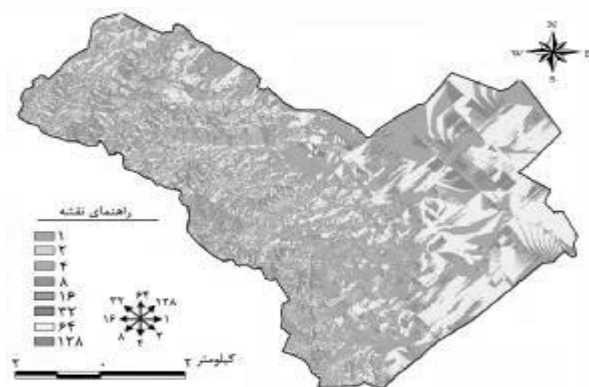
شکل 4- نقشه آبراهه‌های حوضه اقبال شرقی بدون توجه به عوارض مصنوعی در GIS.

برای تعیین مرز زیرحوضه‌های بالادست گره‌هایی که در آنها رواناب وارد شبکه می‌شود از ترکیب انواع نقشه‌های توپوگرافی 1:2000، نقشه‌های شهری، بازدیدهای میدانی و نقشه‌های شیب و تجمع جریان در سیستم GIS استفاده و بر این اساس حوضه اقبال شرقی به 34 زیرحوضه تقسیم گردید. نقشه زیرحوضه‌های بالادست گره‌های ورودی سیستم انتقال رواناب در شکل 5 نشان داده شده است.

جریان¹ تهیه گردید. GIS برای تهیه نقشه جهت جریان از الگوریتم D8 استفاده می‌کند. در این الگوریتم ارتفاع هر سلول از DEM با 8 سلول اطراف آن مقایسه شده و پرشیب‌ترین نزول بین 8 سلول مجاور به‌عنوان مسیر جریان انتخاب می‌گردد (مانوج و همکاران 2005) (شکل 3). همچنین در تهیه نقشه جهت جریان، تعداد سلول‌هایی که به سمت یک نقطه زهکشی می‌شوند محاسبه شده و پس از ضرب تعداد سلول‌ها در مساحت یک سلول، مساحت بالادست زهکشی شونده توسط هر سلول به دست می‌آید (مخدوم و درویش‌صفت 1380).



شکل 2- نقشه رقمی - ارتفاعی حوضه اقبال شرقی در GIS.



شکل 3- نقشه جهت جریان حوضه اقبال شرقی در GIS.

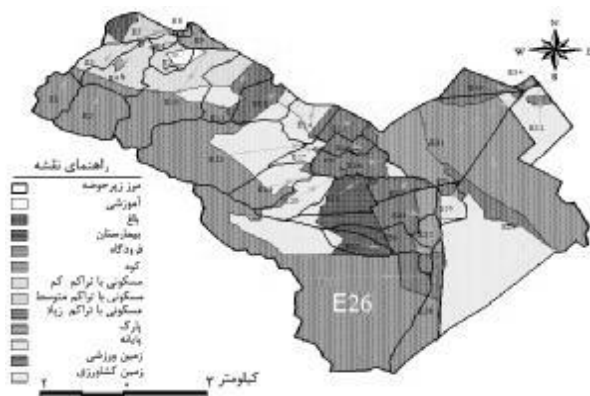
در نهایت نقشه آبراهه‌ها بدون توجه به عوارض مصنوعی توسط سیستم GIS تهیه شد (شکل 4). برای تهیه این نوع نقشه، یک حد آستانه تعریف می‌شود که بیانگر مساحت زهکشی یا تعداد سلول‌های زهکش شده

¹ Flow accumulation

مقدار هر یک از این مؤلفه‌ها برای هر کاربری تعریف گردید و به وسیله سیستم GIS، متوسط وزنی مؤلفه‌ها در هر زیرحوضه جهت واسنجی محاسبه شد. براساس اطلاعات میدانی و نقشه‌های شهری، نقشه کاربری اراضی منطقه اقبال شرقی تهیه و در شکل 6 نشان داده شده است.

روندبایی جریان و تولید آبنمود در خروجی زیرحوضه‌ها توسط مدل *MIKE SWMM*

جهت تخمین رواناب در زیرحوضه‌ها، هر زیرحوضه به 3 زیر ناحیه سطوح نفوذناپذیر با ذخیره



شکل 6- نقشه تلفیقی زیرحوضه‌ها و کاربری اراضی حوضه اقبال شرقی در GIS

سطحی، سطوح نفوذناپذیر بدون ذخیره سطحی و در نهایت سطوح نفوذپذیر با ذخیره سطحی تقسیم می‌شود. جریان از یک زیرناحیه روی زیرناحیه دیگر روند نمی‌شود و از هر زیرناحیه مستقیماً به گره، لوله یا جوی کنار خیابان می‌ریزد. جریان سطحی از هر یک از زیرناحیه‌ها با تقریب زدن آن با مدل مخزن غیرخطی¹ برآورد می‌شود، در این مدل نسبت حجم آب ذخیره شده به دبی خروجی از مخزن تابعی از ورودی یا خروجی آن بوده و مقدار ثابتی نیست (چو و همکاران 1988). این مدل از ترکیب معادله پیوستگی و معادله مانینگ به وجود می‌آید. معادله پیوستگی در هر زیرحوضه به صورت زیر است:

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = A \cdot i^* - Q \quad [1]$$

¹Non-linear reservoirs



شکل 5- نقشه تلفیقی زیرحوضه‌ها و سیستم انتقال رواناب سطحی حوضه اقبال شرقی در GIS.

در نهایت، نقاط ورودی جریان به داخل سیستم انتقال رواناب سطحی و محل تقاطع انواع مجاری مختلف به یکدیگر شناسایی، نام‌گذاری و به مدل *MIKE SWMM* (نسخه 2003) منتقل گردید. این شبکه شامل 161 گره (متشکل از 32 گره ورودی و 129 گره شبکه) و 180 مجرا (11 کانال دایره‌ای، 2 کانال تخم مرغی، 9 کانال نعل اسبی، 15 کانال مستطیلی یا کالورت، 113 کانال نوزقه‌ای، 17 کانال طبیعی و نامنظم و 13 پل) است.

تهیه اطلاعات مورد نیاز شبیه‌سازی از طریق سیستم GIS: اطلاعات مورد نیاز مدل *MIKE SWMM* به اطلاعات هیدرولیکی مجاری (شامل نوع، ابعاد، طول، ضرایب زبری و افت جریان اولیه) و هیدرولوژیک زیرحوضه‌ها تقسیم می‌شود. اطلاعات مربوط به مجاری از طریق بازدیدهای میدانی به دست آمد. بخشی از اطلاعات مورد نیاز زیرحوضه‌ها مانند مساحت، شیب متوسط و طول آبراهه اصلی و عرض (نسبت مساحت به طول آبراهه اصلی) مستقیماً از طریق سیستم GIS و قسمتی از اطلاعات وابسته به کاربری (مانند درصد غیر قابل نفوذ، ضرایب زبری و ذخیره سطحی مناطق نفوذپذیر و غیر قابل و مولفه‌های نفوذ در زیرحوضه‌ها) به وسیله تلفیق داده‌های میدانی با این سیستم به دست آمده است. برای تخمین دقیق مؤلفه‌های گروه دوم، ابتدا نقشه کاربری اراضی منطقه تهیه و

معادله پنج روش شامل روش‌های حل صریح، صریح ارتقاء یافته، صریح تکراری با گام زمانی متغیر، صریح با صرفنظر کردن از محاسبات هنگامی که سیستم به سمت حالت دائمی پیش می‌رود و صریح ارتقاء یافته با صرفنظر کردن از محاسبات هنگامی که سیستم به سمت حالت دائمی پیش می‌رود ارائه می‌شود. در این تحقیق از روش حل صریح ارتقاء یافته استفاده گردید. بر این اساس معادله پیوستگی در جریان غیردائمی با متغیرهای مساحت و دبی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad [5]$$

در معادله فوق، A مساحت مقطع عرضی، Q دبی، x فاصله در جهت لوله/کانال و t زمان می‌باشد.

همچنین اگر دبی و بار آبی (ارتفاع کف به علاوه عمق آب) به عنوان متغیر در نظر گرفته شوند، معادله گشتاور به صورت معادله 6 نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad [6]$$

در معادله فوق g شتاب ثقلی، H بار آبی، Z ارتفاع کف، h عمق آب، S_f شیب خط انرژی (فرض می‌شود با شیب کف برابر است) می‌باشد. با بسط رابطه $\partial(Q^2/A)/\partial x$ با کمک جملات Q و Q/A خواهیم داشت:

$$\frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} = Q^2 \frac{\partial(1/A)}{\partial x} + \frac{2Q \partial Q}{A \partial x} = Q^2 \frac{\partial(1/A)}{\partial x} + 2V \frac{\partial Q}{\partial x} \quad [7]$$

با جایگذاری رابطه $\partial Q/\partial x$ از معادله پیوستگی (رابطه 5) در رابطه 7 نتیجه می‌شود:

$$\frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} = Q^2 \times \frac{\partial(1/A)}{\partial x} - 2V \times \frac{\partial A}{\partial t} \quad [8]$$

حال با جایگذاری معادله فوق در معادله گشتاور (رابطه 5)، معادله 9 که معادله پایه در روش حل صریح ارتقاء یافته است به دست می‌آید:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f - 2V \frac{\partial A}{\partial t} + Q^2 \frac{\partial(1/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad [9]$$

در این معادله، Q دبی، V سرعت جریان، A مساحت مقطع عرضی جریان، H بار آبی، Z ارتفاع کف و S_f شیب خط انرژی است که از رابطه مانینگ به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد:

که $V = A \cdot d$ حجم آب در زیرحوضه (m^3) ، d عمق آب (m) ، t زمان (s) ، A سطح زیرحوضه (m^2) ، i^* شدت بارش مازاد که برابر است با شدت بارندگی منهای میزان نفوذ و تبخیر (m/s) و Q جریان خروجی (m^3/s) است. جریان خروجی با استفاده از معادله مانینگ از رابطه 2 به دست می‌آید:

$$Q = W \cdot \frac{1}{n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \quad [2]$$

در رابطه 2، W عرض زیرحوضه (m) ، n ضریب زبری مانینگ، d_p عمق ذخیره سطحی (m) ، S شیب زیرحوضه است.

از ترکیب معادلات 1 و 2 یک معادله دیفرانسیل غیرخطی به وجود می‌آید که از حل آن می‌توان مجهول d را به دست آورد. این معادله به معادله مخزن غیرخطی معروف است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{dd}{dt} = i^* - \frac{W}{A \cdot n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \quad [3]$$

معادله 3 در هر بازه زمانی به وسیله روش ساده‌ای از تفاضل محدود به صورت زیر تقریب زده می‌شود:

$$\frac{d_2 - d_1}{\Delta t} = i^* - \frac{WS^{1/2}}{A \cdot n} \left[d_1 + \frac{1}{2}(d_2 - d_1) - d_p \right]^{5/3} \quad [4]$$

Δt : گام زمانی بر حسب ثانیه

مدل *MIKE SWMM* معادله 4 را به منظور تعیین d_2 حل کرده و با استفاده از معادله 2 مقدار جریان ورودی به گره‌ها، لوله‌ها و یا جوی‌های کنار خیابان محاسبه می‌شود (ویلیام و وین 2003).

حل معادلات جریان غیردائمی متغیر تدریجی¹ در زهکش-های شهری توسط مدل *MIKE SWMM*

جریان غیردائمی عبارت است از جریانی که در یک مقطع، عمق یا دبی یا هر دو در اثر تغییرات زمانی تغییر نماید. اساس معادلات دیفرانسیل برای آب‌های سطحی معادلات سنت و نانت² می‌باشد (حسینی و ابریشمی 1377). در مدل *MIKE SWMM* جهت حل این

¹ Gradually varied flow

² Saint venant equations

بررسی و مقایسه بارش‌های تاریخی: برای بررسی بارش‌های تاریخی رخ داده در منطقه از آمار بارش ایستگاه باران‌سنج ثبات سازمان آب مشهد وابسته به وزارت نیرو استفاده شده است. به این منظور حدود 450 بارش بین سال‌های 1370 تا 1385 مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به تحلیل تمام مؤلفه‌های شدت، مدت و مقدار بارش، تعداد 20 واقعه به عنوان بارش‌های مورد نظر برای شبیه‌سازی انتخاب شدند، سپس باران-نمود مربوط به هر یک از این بارش‌ها در مدل MIKE SWMM وارد و نتایج با هم مقایسه گردید. بررسی نتایج نشان داد که در منطقه مورد مطالعه بارش‌های با مقدار کم و زمان کوتاه مدت ولی با شدت‌های لحظه‌ای زیاد از بارش‌های با مقدار بیشتر و زمان طولانی‌تر ولی با شدت‌های لحظه‌ای کمتر، دبی اوج آبنمود بزرگتری تولید می‌نمایند. در نهایت باران مورخ 1377/03/09 با مقدار 14/1 میلیمتر و شدت متوسط 4/10 میلیمتر در ساعت و مدت 22 دقیقه به خاطر ایجاد دبی اوج بزرگتر در تمام زیرحوضه‌ها، برای تحلیل‌های بعدی برگزیده شد. دوره بازگشت این بارش بر اساس مقایسه مقدار آن با مقدار بارش حاصل از باران‌نمود با دوره‌های بازگشت مختلف در مشهد مبتنی بر نتایج تحقیقات قهرمان و آبخضر (1383)، تقریباً 8 سال تخمین زده شد. در شکل 7 باران‌نمود مربوط به این واقعه نشان داده شده است. لازم به ذکر است 3 بارش جهت واسنجی مؤلفه‌های ورودی مدل (شامل ضریب زبری مانینگ، ذخیره چالابی، مؤلفه‌های نفوذ) و 3 بارش نیز جهت اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی به کار رفت (جدول 1). برای این منظور از معیار عملکرد خطای نسبی استفاده شد:

$$\% RE = \frac{x_o - x_s}{x_o} \times 100 \quad [14]$$

در رابطه فوق RE خطای نسبی، x_o و x_s به ترتیب مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده دبی اوج یا عمق سیلاب می‌باشند.

$$S_f = \frac{k}{gAR^3} Q|V| \quad [10]$$

در رابطه 10، k برابر gn^2 در سیستم متریک، n ضریب زبری مانینگ، g شتاب جاذبه و R شعاع هیدرولیکی است. علامت قدرمطلق در رابطه بیانگر آن است که S_f کمیت برداری بوده و رفتار آن همواره خلاف Q است. با جایگذاری رابطه S_f در رابطه 9 و بسط فرم تفاضل محدود داریم:

$$Q_{t+\Delta t} = Q_t - \frac{k\Delta t}{R^{4/3}} |V_t| Q_{t+\Delta t} + 2V(\Delta A/\Delta t)_t \Delta t - \quad [11]$$

$Q_{t+\Delta t} Q_t [(1/A_2 - 1/A_1)/L] \Delta t - gA[(H_2 - H_1)/L] \Delta t$ در رابطه فوق Δt گام زمانی و L طول آبراهه می‌باشد. از حل رابطه 11 برای $Q_{t+\Delta t}$ ، فرم نهایی تفاضل محدود معادله دینامیک جریان در روش حل صریح ارتقاء یافته به دست می‌آید:

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{[Q_t + 2\bar{V}(\Delta A/\Delta t)_t \Delta t - g\bar{A}[(H_2 - H_1)/L] \Delta t]}{\left[1 + \frac{k\Delta t}{R^{4/3}} |V_t| + [Q_t [(1/A_2 - 1/A_1)/L] \Delta t]\right]} \quad [12]$$

در رابطه فوق V و A متوسط وزنی مقادیر بالادست، وسط و پایین دست آبراهه در زمان t و $(\Delta A/\Delta t)_t$ مربوط به گام زمانی قبل است. مجهولات اصلی در رابطه فوق $Q_{t+\Delta t}$ و H_1 و H_2 می‌باشند زیرا متغیرهای V ، R و A با Q و H رابطه دارند. لذا از شکل تفاضل محدود رابطه پیوستگی در گره‌ها نیز باید استفاده کرد:

$$H_{t+\Delta t} = H_t + \sum Q_t \Delta t / A_s \quad [13]$$

که A_s مساحت سطح گره است. معادلات 12 و 13 به طور همزمان توسط مدل MIKE SWMM به روش اولر اصلاح شده حل می‌شوند تا برای گام زمانی Δt ، دبی در هر آبراهه و بار آبی در هر گره محاسبه شود. در صورت رعایت حدود مجاز بررسی نتایج به دست آمده از این روش مبین دقت نسبی بالا و پایداری نتایج می‌باشد (ویلیام و وین 2003).

بالا آورده شده و کانالی با خصوصیات خیابانی که قرار است سیلاب در آن حرکت کند تعریف و جریان دوباره شبیه سازی انجام می‌شود (تاج‌بخش 1387).

حوضچه‌های کنترل سیلاب

جمع‌آوری رواناب در محل مناسب نه تنها باعث کاهش دبی اوج هیدروگراف سیل می‌شود بلکه استفاده مجدد از سیلاب را نیز ممکن می‌سازد. طراحی و ساخت حوضچه‌های کنترل سیلاب، تلفیقی از روندیابی جریان و استفاده از مدل‌های نفوذ می‌باشد (خداشناس 1387). تحقیقات خداشناسی (1387) نشان داد که مدل‌های نفوذ رودخانه‌ای جهت برآورد نفوذ در طراحی حوضچه‌های نفوذ سیلاب شهری کارا هستند. بر این اساس جهت تخمین نرخ تقریبی نفوذ در حوضچه‌های کنترل سیلاب از رابطه 15 استفاده شد (لارک 2004).

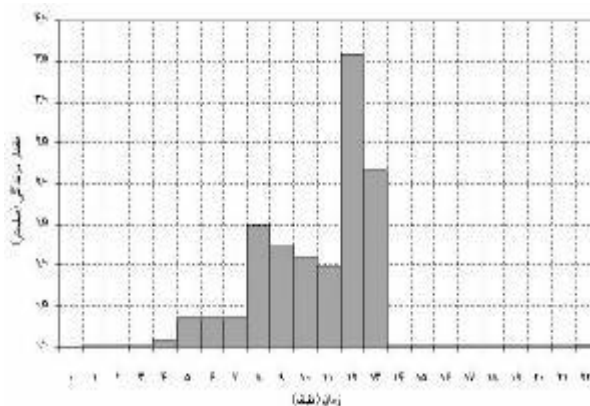
$$S = 0.2C\sqrt{Q/V} = 0.2C\sqrt{A} \quad [15]$$

در این رابطه S نفوذ بر حسب $ft^3/s/mile$ ، Q دبی بر حسب ft^3/s ، V سرعت جریان بر حسب ft/s ، c ضریب جنس خاک و A سطح خیس شده بر حسب ft^2 می‌باشد. با توجه به بازدیدهای میدانی، محل‌های پس‌زدگی و پتانسیل طبیعی اراضی جهت نگهداشت سیلاب، مکان مناسب جهت احداث تعدادی از حوضچه‌های ذخیره شناسایی گردید. اطلاعات این حوضچه‌ها در جدول‌های 2 و 3 و شکل 11 آورده شده است.

جدول 2- اطلاعات حوضچه‌های کنترل سیلاب شناسایی شده

در حوضه اقبال شرقی

نرخ تقریبی نفوذ (m^3/h)	مختصات	نام حوضچه (شکل 11)
1/53	طول 728201 عرض 4017622	B ₁
8/10	طول 735986 عرض 4012688	B ₂
2/72	طول 735311 عرض 4012418	B ₃



شکل 7- باران نمود بارش شبیه‌سازی مورخ 1377/03/09

ایستگاه باران سنج ثابت سازمان آب مشهد

جدول 1- خصوصیات بارش‌های استفاده شده جهت واسنجی و

اعتبارسنجی مدل *MIKE SWMM*

تاریخ وقوع بارش	مدت (دقیقه) واسنجی	مقدار (میلیمتر)
1374/12/21	65	12
1376/11/19	2712	48
1376/11/22	2178	38
اعتبارسنجی		
1377/03/09	22	14
1377/12/11	1615	41
1377/12/26	300	14

کنترل حالت بحرانی و سیلاب در مدل *MIKE SWMM*

حالت بحرانی وقتی ایجاد می‌شود که ظرفیت گره‌ها و مجاری کمتر از جریان ورودی به آنها باشد، در این وضعیت نسبت دبی حداکثر محاسبه شده به دبی طراحی بیشتر از یک می‌باشد. دبی حداکثر از نتایج شبیه‌سازی توسط مدل و دبی طراحی از معادله مانینگ به دست می‌آید. همچنین توسط مشاهده شبیه سازی حرکت آب در کانال‌ها در نرم‌افزار *MIKE VIEW* نیز می‌توان نقاط پس‌زدگی را مشاهده نمود. در حالت عادی مدل *MIKE SWMM* قادر به پیگیری حرکت جریان روی سطح زمین نمی‌باشد و این حالت بایستی توسط کاربر معرفی و شبیه‌سازی شود. برای این منظور پس از شبیه‌سازی در نقاطی که سیلاب رخ داده است سطح زمین در آن گره و گره قبل و بعد به صورت مجازی

نتایج و بحث

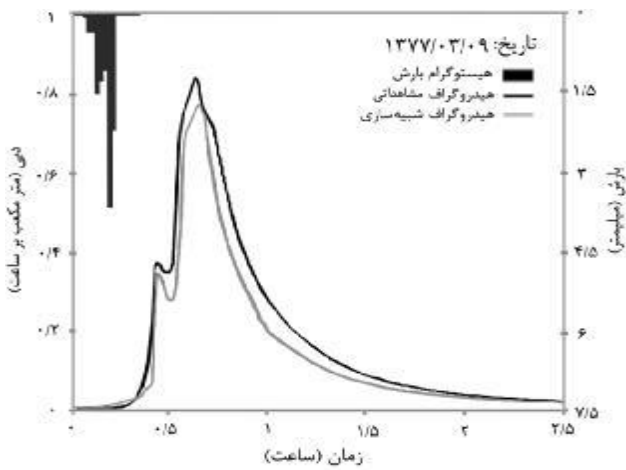
هیدرولیک حوضه اقبال شرقی دارد. تحقیقات انجام شده توسط فلاح تفتی و شریفی (1384) که در جنوب غربی شهر مشهد انجام شد نیز بر کارائی مدل مذکور همانطور که از این جدول مشخص است احتمال پس-زدگی قبل از مقاطع دایره‌ای و پل‌ها با طول کوتاه از انواع مجاری دیگر بیشتر می‌باشد. تأکید می‌کند. همچنین صنعی و احمدی جزی (1385) مقایسه‌ای بین روش منطقی و مدل *SWMM* در برآورد سیلاب در قسمت‌های وسیعی از شهر مشهد انجام دادند، نتایج نشان داد مقادیر دبی‌های بدست آمده از مدل *SWMM* به مقادیر ثبت شده نزدیک‌تر بوده و این در حالیست که روش منطقی دبی‌ها را بین 10 الی 130% بیشتر بدست آورد.

جدول 3- مقادیر (حجم - ارتفاع) حوضچه‌های کنترل سیلاب شناسایی شده در حوضه اقبال شرقی

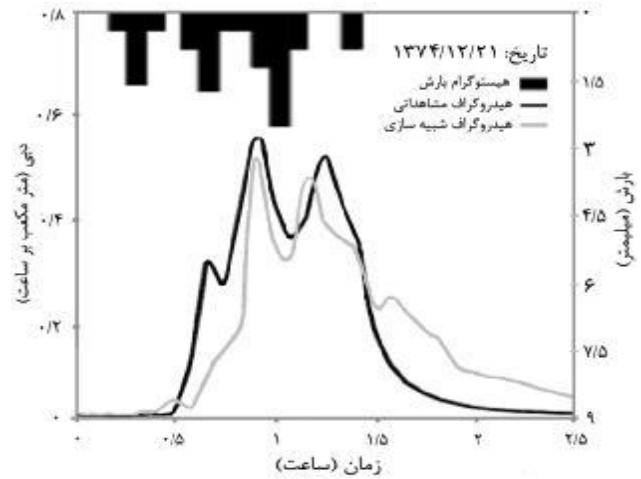
حجم تجمعی (m ³)			ارتفاع از کف (متر)
B ₃	B ₂	B ₁	
14/7	1047/2	20/5	0/5
34/6	1947/1	42/6	1
64/6	3221/4	65/2	1/5
96/1	4376/3	89/9	2
155/3	5664/5	118/2	2/5
217/8	7145/0	140/7	3
303/5	-	173/3	3/5
396/0	-	195/5	4
460/3	-	237/4	4/6
534/6	-	-	4/8

آنالیز حساسیت نشان داد که مؤلفه ضریب زبری در مناطق نفوذناپذیر به عنوان حساس‌ترین مؤلفه‌ی ورودی مدل *MIKE SWMM* بوده که بایستی در برآورد آن دقت کافی به عمل آید. همچنین واسنجی و اعتبارسنجی در شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیک حوضه اقبال شرقی دلالت بر متوسط خطای نسبی 9/64% در دبی اوج و 8/43% در عمق سیلاب برای اعتبارسنجی و مقادیر متناظر 11/09% و 8/94% برای واسنجی دارد، مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی برای یک نمونه واسنجی و اعتبارسنجی در شکل‌های 8 و 9 آورده شده است. شکل 10 هیدروگراف رواناب تولید شده توسط مدل *MIKE SWMM* در خروجی زیرحوضه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل زیرحوضه E_{26} با مساحت 13/25 کیلومتر مربع، عرض 1631/5 متر، طول 8120/3 متر، شیب متوسط 0/12، پوشش غالب کوه، مسکونی با تراکم زیاد و زراعی بیشترین رواناب را بین تمام زیرحوضه‌ها با مقدار 16/9 مترمکعب در ثانیه ایجاد می‌کند (شکل 6). بررسی پنج روش مختلف حل عددی معادله سنت و نانت در برآورد دبی و عمق نشان داد که تفاوت چندانی در نتایج آنها وجود نداشته و تنها در بعضی مواقع نوساناتی مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه این نوسانات در روش صریح ارتقاء یافته کمتر به نظر می‌رسند، این روش جهت حل معادلات جریان در زهکش‌های منطقه انتخاب و آبراهه‌های سیلابی شناسایی شدند. در جدول 4 و شکل 11 اطلاعات این آبراهه‌ها ذکر گردیده است.

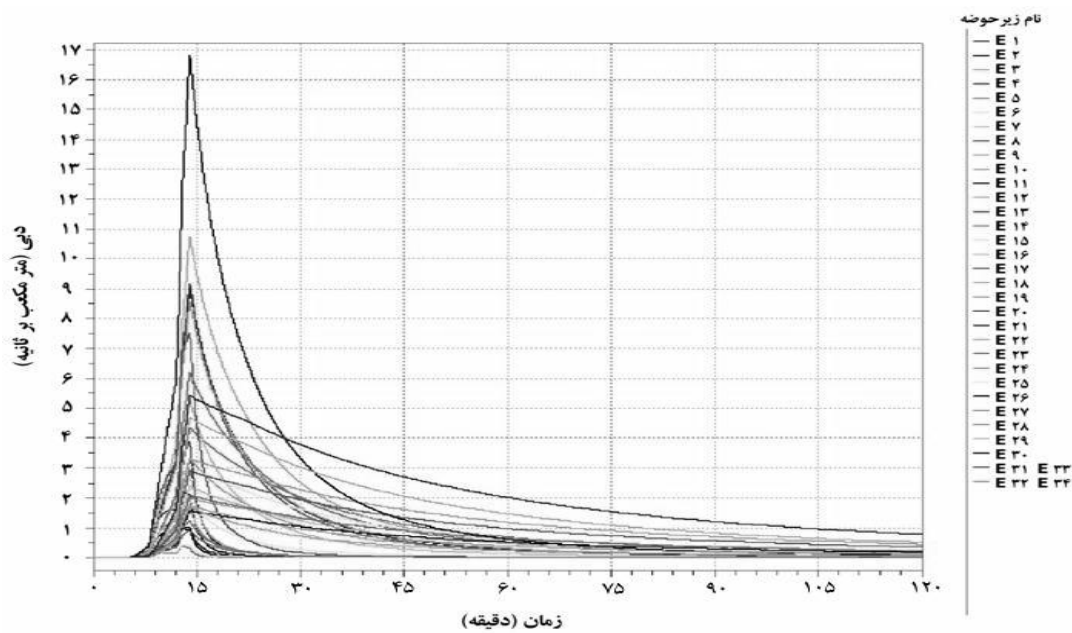
نتایج تحقیق حاضر دلالت بر توانایی مدل *MIKE SWMM* در شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیک و



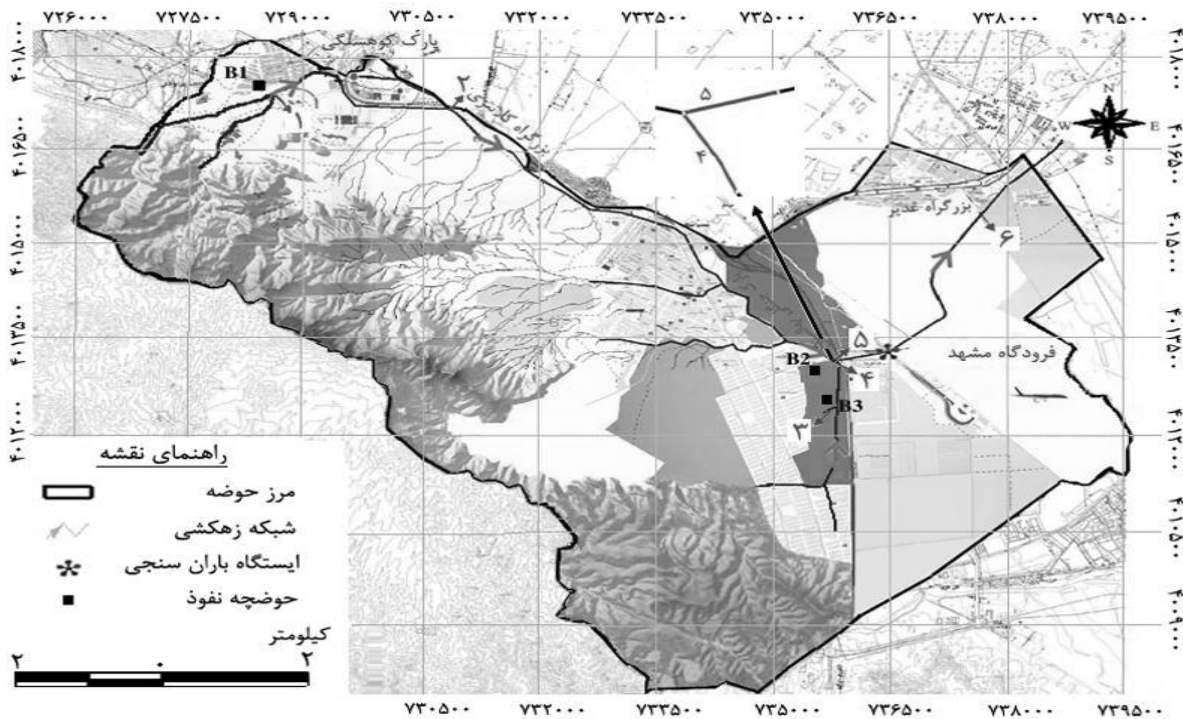
شکل 9- هیدروگراف شبیه‌سازی و مشاهداتی مورخ 1377/03/09 مربوط به مرحله اعتبارسنجی.



شکل 8- هیدروگراف شبیه‌سازی و مشاهداتی مورخ 1374/12/21 مربوط به مرحله واسنجی.



شکل 10- هیدروگراف رواناب تولید شده توسط مدل *MIKE SWMM* در خروجی زیرحوضه‌ها.

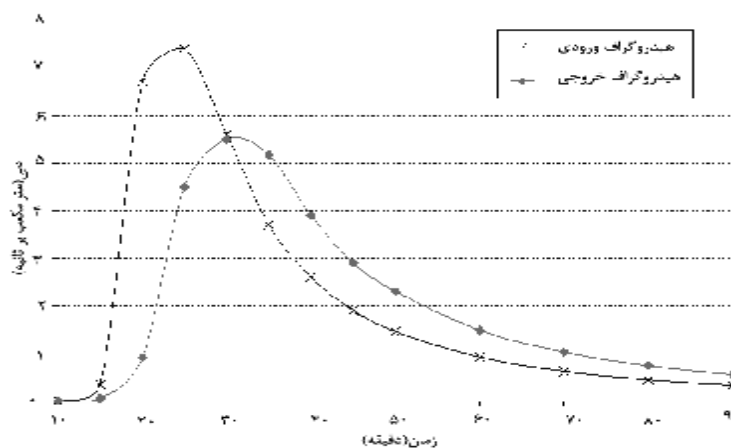


شکل 11- جانمایی آبراهه‌های سیلابی و حوضچه‌های کنترل سیلاب در حوضه اقبال شرقی.

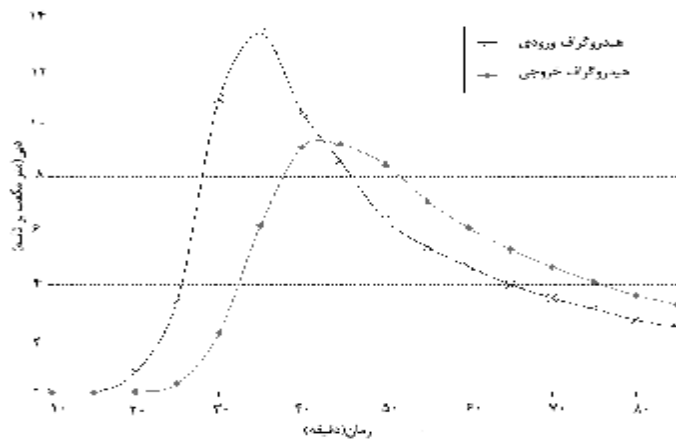
مجرای شماره 2 (جدول 4 و شکل 11) می‌باشد که دبی سیلابی در آن 7/34 مترمکعب در ثانیه بوده و کنترل سیلاب نیز اثر قابل ملاحظه‌ای در کاهش سیلاب در آن ندارد. علت این امر را می‌توان به فاصله نسبتاً دور از حوضچه ذخیره B_1 و ابعاد کوچک این حوضچه نسبت داد. همچنین در مسیله‌های شماره 5 و 6 به علت وضعیت آنها و فاصله نسبتاً دور از حوضچه‌ها، سیلاب به طور کامل کنترل نمی‌شود.

تأثیر حوضچه‌های ذخیره در کاهش سیلاب

با جانمایی حوضچه‌ها در مدل *MIKE SWMM* شبیه‌سازی مجدد صورت گرفت. شکل‌های 12 الی 14 جدول 5 تأثیر حوضچه‌های کنترل سیلاب بر آبراهه‌های سیلابی را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است این حوضچه‌ها دبی سیلاب را بین 8 تا 100% کاهش می‌دهند. بحرانی‌ترین نقطه در سیستم شبیه‌سازی شده



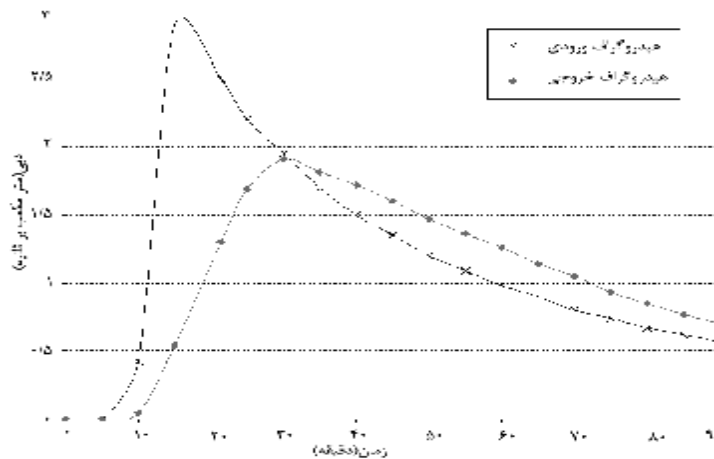
شکل 12- هیدروگراف ورودی و خروجی حوضچه B_1



شکل 13- هیدروگراف ورودی و خروجی حوضچه B₂

جدول 4- اطلاعات آبراهه‌های سیلابی شناسایی شده در حوضه اقبال شرقی

نام مجرا (شکل 11)	نوع	طول (m)	دبی حداکثر (m ³ /s)	دبی سیلابی (m ³ /s)	ملاحظات
1	مقطع دایره‌ای با قطر 1 متر	9/00	5/73	1/85	مسیل کنار خیابان است و سیلاب سطح خیابان را می‌گیرد
2	پل با سه دهانه با ابعاد 2/5×1/8	5/00	6/81	7/34	آب از روی پل روبسته گذشته و وارد بلوار می‌شود
3	مقطع دایره‌ای با قطر 1 متر	53/31	2/26	0/20	آب به سمت بالادست پس می‌زند
4	مقطع مستطیلی با ابعاد 2×1/8	16/92	6/35	2/55	آب از روی پل روبسته گذشته و وارد بلوار می‌شود
5	دو مقطع دایره‌ای با قطر 1 متر	33/08	4/26	4/60	آب بالادست زیرگذر لوله‌ای برگشت کرده و وارد بلوار می‌شود
6	چهار دهانه نعل اسبی با ابعاد 1/2×0/8	9/50	16/86	0/31	به علت وضعیت قرار گرفتن پل و زیرگذر در فاصله کم از یکدیگر جریان دچار گرفتگی می‌شود



شکل 14- هیدروگراف ورودی و خروجی حوضچه B₃

شود. تحلیل شبکه نشان داد که 6 مجرا دچار اشکال بوده و جریان دچار پس‌زدگی می‌شود. حوضچه‌های کنترل سیلاب با حجم جمعی 8000 مترمکعب و نرخ نفوذ 12/35 مترمکعب در ساعت قادرند مشکل سیلاب را تا حد قابل قبولی مرتفع کنند. با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق می‌توان نقشه محدوده سیل گیر در حوضه اقبال شرقی را جهت تعیین حریم مسیل‌ها و جلوگیری از تجاوز به آن با ساخت و سازهای غیر قانونی تهیه نمود. با توجه به اینکه در سال‌های اخیر از تکنیک‌های شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک در واسنجی مدل‌ها استفاده می‌شود، پیشنهاد می‌گردد خروجی‌های مدل *MIKE SWMM* شامل هیدروگراف خروجی زیرحوضه‌ها و حداکثر دبی شبیه‌سازی شده در آبراهه-ها توسط این الگوریتم‌ها واسنجی شوند. در نهایت با توجه به آنکه تحقیقات مشابه نیازمند تخمین گسترده از مؤلفه‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیک است، پیشنهاد می‌گردد در مورد عدم قطعیت این مؤلفه‌ها تحقیقات بیشتری انجام گیرد.

جدول 5 - تاثیر حوضچه‌های کنترل سیلاب بر آبراهه‌های سیلابی در حوضه اقبال شرقی.

شماره مجرا (شکل 11)	Q_f	Q'_f	درصد کاهش سیلاب
1	1/85	0	100
2	7/34	5/51	25
3	0/20	0	100
4	2/55	0	100
5	4/60	1/33	71
6	0/31	0/28	8

Q_f : دبی سیلابی بدون در نظر گرفتن حوضچه‌های کنترل سیلاب (مترمکعب بر ثانیه)
 Q'_f : دبی سیلابی با در نظر گرفتن حوضچه‌های کنترل سیلاب (مترمکعب بر ثانیه)

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

ترکیب سامانه اطلاعات جغرافیایی و مدل *MIKE SWMM* در صورتی که با داده‌های مناسب هیدرومتری و بارش همراه باشد باعث افزایش دقت مدل‌سازی می‌-

منابع مورد استفاده

- اسحاقیان م، 1371. گزارش سیل سال 1371. سازمان آب منطقه‌ای استان خراسان.
- تاج‌بخش م، 1387. شبیه‌سازی شبکه زهکشی رواناب سطحی با استفاده از مدل هیدرولیکی *MIKE SWMM* و طراحی حوضچه‌های تأخیری (مطالعه موردی حوضه اقبال شرقی، مشهد). پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.
- حسین‌زاده س، 1380. مطالعات آبخیزداری و طرح کنترل سیلاب در حوضه شهری مشهد. مدیریت آبخیزداری سازمان جهاد کشاورزی.
- حسینی م و ابریشمی ج، 1377. هیدرولیک کانال‌های باز. چاپ ششم، انتشارات آستان قدس رضوی.
- خدشناس س ر، 1387. کاربرد مدل‌های نفوذ رودخانه‌ای برای شبیه‌سازی نفوذ آب در حوضچه‌های کنترل سیلاب شهری. فصلنامه آب و فاضلاب، شماره 67، صفحات 66 - 71.
- صنعی ا و احمدی جزی ر، 1385. مقایسه روش‌های منطقی و *SWMM* در تعیین دبی سیلاب مسیل‌ها. صفحه 1-10. اولین همایش ملی مهندسی مسیل‌ها، 9 و 10 اسفندماه 1385، مشهد.

فلاح تفتی ا و شریفی م، 1384. شبیه‌سازی شبکه زهکشی رواناب‌های سطحی منطقه آب و برق مشهد با مدل *MIKE SWMM*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

قهرمان ب و آبخضر ح، 1383. اصلاح روابط شدت - مدت - فراوانی بارندگی در ایران. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، شماره 8(2). صفحه‌های 1 تا 14.

مخدوم م و درویش‌صفت ع، 1380. ارزیابی و برنامه‌ریزی با سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (*GIS*). انتشارات دانشگاه تهران.

Benavides JA, Pietruszewski B, Kirsch B and Bedient PH, 2003. Analyzing flood control alternatives for the Clear Creek watershed in a geographic information system framework. Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress. Orlando, Florida, USA.

Butler D and Davies J, 2000. Urban Drainage. E & FN Spon, London.

Chamoux, C and Gourbesville P, 2002. GIS methodology for hydrological analysis and sewer network design. Pp. 551-558. XXX IAHR Congress Proceedings of the GIS and CFD Applications. Thessaloniki, Greece.

Choi KS and Ball J, 2002. Parameter estimation for urban runoff modeling. Urban Water 4: 31-41.

Chow VT, Maidment DR and Mays LW, 1988. Applied Hydrology. McGraw-Hill, NY.

Fryar R, 2001. Use of cascading detention basins in storm water management. Pp. 537-544. Proceedings of the NOVATECH 2002, 4th International Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management. Lyon, France.

Knebl MR, Yang ZL, Hutchison K and Maidment DR, 2005. Regional scale flood modeling using NEXRAD, Rainfall, GIS, and HEC-HMS\RAS: A case study for the San Antonio river basin summer 2002 storm event. Journal of Environmental Management 75: 325-336.

Larock BE, 2004. Civil Engineering: Hydraulics & Hydrology Review. Kaplan, California, USA.

Manoj K and Vijay P. Singh, 2005. DEM-based modeling of surface runoff using diffusion wave equation. Journal of Hydrology 302: 107-126.

Michel Bergue J and Ruperd Y, 2000. Storm Water Retention Basins. AA Balkema Publishers, Rotterdam, the Netherlands.

Schumanna AH, Funkeb R and Schultza GA, 2000. Application of geographic information system for conceptual rainfall-runoff modeling. Journal of Hydrology 240: 46-61.

William J and Wayne H, 2003. User's guide to SWMM. Published by CHI, Guelph, Ontario, Canada.