Archive of SID

نشریه دانش آب و خاک / جلد ۲۸ شماره ۴ صفحه‌های ۱تا ۱۶ / سال ۱۳۹۷

توسعه مدل‌های تحلیلی- احتمالاتی به‌منظور برآورد رواناب شهری

میلاد مرادی[۱]، صمد دربندی[۲]، صابره دربندی[۳]*

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۷/۰۱ تاریخ پذیرش:۹۷/۹/۲۵

۱- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه شهید باهنر، کرمان

۲- استادیار گروه علوم مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: sdarbandi.tabrizu@yahoo.com

چکیده

هدف از این تحقیق، ارزیابی چند روش توسعه مدل‌های تحلیلی- احتمالاتی برای برآورد حجم رواناب می‌باشد و نشان داده می‌شود که مدل‌های تحلیلی می‌توانند با درجه پیچیدگی متفاوت بر اساس تبدیل‌های مختلف بارش- رواناب به‌دست آیند. در این مطالعه واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های تحلیلی با پیروی از یک روش ترکیبی انجام گردید. کارآیی انواع مختلف تبدیل‌های بارش- رواناب در بخش غربی شهر کرمان مورد سنجش قرار گرفت. نتایج مدل تحلیلی برای رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده با مدل مدیریت توفان (SWMM) مورد مقایسه قرار گرفت. با مشاهده خروجی‌ها می‌توان دریافت که اگر برای ضریب رواناب یک مقدار در محدوده ۰/۷- ۰/۶ درنظر گرفته شود، مدل تحلیلی- احتمالاتی نوع اول می‌تواند نتایجی نزدیک به نتایج شبیه‌سازی پیوسته مدل مدیریت توفان با اختلاف نسبی کم‌تر ارائه دهد. به‌منظور ارزیابی اطمینان‌پذیری عملکرد مدل تحلیلی، با ثابت در نظر گرفتن ضریب رواناب منطقه نفوذپذیر، مساحت بخش نفوذناپذیر حوضه به‌تدریج افزایش داده شد. نتایج به‌دست آمده بیان‌گر آن است که با افزایش تدریجی نفوذپذیری حوضه، اثر ضریب رواناب منطقه نفوذپذیر بر حجم رواناب سالانه از حساسیت کم‌تری برخوردار خواهد بود. با استفاده از این مدل، تطابق مناسبی بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی به‌دست آمد. مدل‌های تحلیلی- احتمالاتی به‌دلیل محاسبات کم‌تر نسبت به مدل‌های شبیه‌سازی پیوسته، می‌توانند به‌عنوان یک مدل شبیه‌سازی پیوسته در تحلیل سیستم‌های رواناب شهری مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: بارش- رواناب، رواناب شهری، مدل مدیریت توفان، مدل‌های تحلیلی- احتمالاتی

www.SID.ir

Archive of SID

Development of Analytical-Probabilistic Models for Estimating Urban Storm Water Runoff

M Moradi[1], S Darbandi[*2]

Received: 15 September 2015 Accepted: 21 May 2016
[1-]M.Sc. Student, Graduate of Water Resources Eng., Dept. of Water Engineering, ShahidBahonar Univ., Kerman
[2-]Associ. Prof., Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., University of Tabriz, Tabriz
[*]Corresponding Author, Email: sdarbandi.tabrizu@yahoo.com

Abstract
The aim of this research is to evaluate some methods of developing analytical-probabilistic models in runoff volume estimation and it is shown that analytical models can be obtained with varying degrees of complexity based on different rainfall-runoff conversions.In this research, calibration and validation of analytical models were evaluated following a hybrid method. The efficiency of different types of rainfall-runoff transformations was measured in the western part of Kerman.The results of the analytical model were compared with the observed and simulated runoff with the storm management model (SWMM). According to outputs if for a runoff coefficient a value is considered in the range of 0.6-0.7, The first-order analytic-probabilistic model yields close results to the simulation ones that obtained from the storm management model with less relative difference. In order to evaluate the reliability of the analytical model performance, with the constant considering the permeability zone runoff coefficient, was gradually increased the Impervious component of the basin.The results indicate that with the gradual increase of the permeability of the basin, is less sensitivity the effect of the permeable area runoff coefficient on the annual runoff volume. Using this model, was obtained a good accommodation between observational and computational data. Analytical-probabilistic models due to less computations than continuous simulation models can be used as a continuous simulation model for analyzing urban runoff systems.

Keywords: Rainfall-runoff,Urban runoff, Storm Water management model (SWMM), nalyticalprobabilistic models

مقدمه

حوضه‌های شهری به‌عنوان مبدلی برای تبدیل زهکش‌های سطحی به شبکه‌های فاضلاب به‌شمار می‌روند که طراحی سیستم‌های زهکشی شهری بسیار پیچیده می‌باشد. در نتیجه شبیه‌سازی پاسخ سیستم زهکشی تحت رژیم هیدرولوژیکی آشفته، با در نظر گرفتن شرایط مختلف موجود و محدوده وسیع طراحی سناریو و برنامه‌ریزی آینده، با چالش‌های بیش‌تری مواجه خواهد شد .هنگامی‌که یک استراتژی مدیریت توفان کلی فرموله می‌شود یا یک اندازه‌گیری مقرون به‌صرفه برای کنترل کمیت و کیفیت رواناب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، مدل مدیریت توفان شهری به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان ابزاری مفید در برنامه‌ریزی، طراحی و توسعه شهریشناخته شده‌اند (اوربوناس و پیتر ۱۹۹۳).

با وجود این‌که روش‌ها و تکنیک‌های مدل‌سازی رواناب توفان شهری دائما در حال توسعه هستندو روش‌های قدیمی مورد ارزیابی و بروز رسانی قرار می‌گیرند، اما ماهیت ذاتا پیچیده فرآیندهای فیزیکی درگیر در ساز و کار تبدیل بارش- رواناب هنوز به‌خوبی درک نشده و بسیاری از مشکلات حل نشده باقی مانده است. بنابراین، به‌دنبال ابزار مدل‌سازی نوآورانه و بررسی رویکردهای جایگزین جدید برای مدل‌سازی مدیریت توفان، هنوز هم به‌عنوان یک اولویت در پژوهش‌ها در نظر گرفته می‌شوند (چن و آدامز ۲۰۰۷).

www.SID.ir

Archive of SID

در زمینه مدل‌های تحلیلی- احتمالاتی، اولین تئوری احتمال به‌وسیله کرنل و بنجامین در سال ۱۹۷۰ شرح داده شد. پژوهش پیشگام کاربرد روش توزیع احتمال در علوم منابع آب نیزتوسط ایگلسن در سال ۱۹۷۲ صورت پذیرفت. هاوارد (۱۹۷۶) مدل‌های تحلیلی- احتمالاتی را به‌منظور محاسبه جریان سطحی رواناب و با استفاده از تابع توزیع احتمال مقدار بارش و زمان بین رخدادهای بارش به‌کار گرفت. با بهره‌گیری از رویکردی احتمالاتی، ریورا و همکاران (۲۰۰۵) توانستند حجم رواناب و آبدهی بیشینه سیلاب در مکان‌هایی که وابستگی بین حجم و مدت زمان اهمیت دارد را به‌دست آورند.گائو و مارکوس (۲۰۱۱) با توسعه مدل تحلیلی- احتمالاتی توانستند دبی سیلاب طرح را در یک حوضه آبریز شهری برآورد کنند. نتایج پژوهش این محققین نشان می‌دهد که رویکرد تحلیلی- احتمالاتی می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین مناسب در برآورد دبی اوج سیلاب طرح در حوضه‌های آبریز شهری کوچک مورد استفاده قرار گیرد. لی و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از مدل تحلیلی- احتمالاتی، میزان کاهش رواناب را بر اساس معادلات تعادل آب، تابع چگالی احتمال و توابع بارش- رواناب برآورد کردند. در پژوهش دیگری، دانو همکاران (۲۰۱۳) موفق شدند با اطمینان‌پذیری بسیار بالایی پارامترهای مدل تحلیلی- احتمالاتی را به‌منظور مدیریت توفان شهری در مالزی توسعه دهند. رایموندی و بیجیو (۲۰۱۴) مدل‌سازی مخازن آب باران را با رویکرد احتمالاتی و با استفاده از داده‌های طولانی‌مدت در ایتالیا انجام دادند. باسو و همکاران (۲۰۱۶) با رویکردی احتمالاتی مبتنی بر فیزیک، دوره بازگشت جریان‌های بیشینه فصلی را در چهار رودخانه با رژیم‌های مختلف در امریکا مورد بررسی قرار دادند. دربندی و همکاران (۱۳۸۷) شبیه‌سازی هیدرولیکی رواناب حاصل از بارش را با کاربرد مدل موج پخشیدگی در حوضه کمانج علیا انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که این مدل می‌تواند با دقت قابل قبولی رواناب را به‌ازای بارش‌های لحظه‌ای و با در نظر گرفتن تغییرات زمانی و مکانی نفوذ تخمین بزند. سلطانی و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ژنتیک فرآیند بارش- رواناب را در حوضه آبریز لیقوان با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ژنتیک انجام دادند و مدل حاصل از مجموعه عملگر ریاضی را به‌عنوان مدل بارش-رواناب حوضه آبریز لیقوان پیشنهاد کردند. رنجبران (۱۳۸۹) مدل‌سازی کیفی بار آلودگی رواناب سطحی را با استفاده از مدل تحلیلی- احتمالاتی و با هدف کمک به مدیران شهرها در اتخاذ تصمیم‌گیری‌های لازم جهت مدیریترواناب‌های آلوده به آلاینده‌های شهریدر شهر تهران انجام داد. سلاجقه و همکاران (۱۳۹۱) با درنظر گرفتن بخشی از سطوح نفوذناپذیر که رواناب خود را به‌صورت مستقیم به سیستم زهکشی تخلیه می‌کنند، توانستند مدل تحلیلی- احتمالاتی را به‌منظور برآورد ارتفاع و دبی اوج رواناب توسعه دهند.

در این پژوهش، رویکردی به‌عنوان جایگزین مدل‌سازی شبیه‌سازی برای توسعه مدل‌های تحلیلی- احتمالاتی (APM) ارائه می‌شود که می‌تواند به‌عنوان ابزاری مفید و اقتصادی در ارزیابی سیستم‌های کنترل زهکشی شهری در مرحله برنامه‌ریزی به‌کار گرفته شود.

مواد و روش‌ها

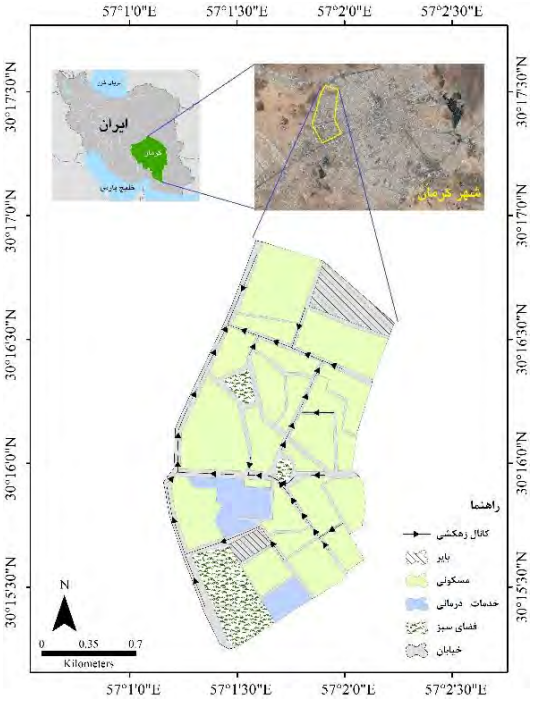
منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

حوضه مورد مطالعه با مساحت ۲۵۳ هکتار در شمال‌غربی شهر کرمان و بین طول شرقی "۰ ′۵۷ °۱۰ تا "۳۰ ′۲ °۵۷ و عرض شمالی "۰ ′۱۵ °۳۰ تا "۰ ′۵۷ °۱۷ واقع شده است (شکل ۱). برای انجام این پژوهش از داده‌های طولانی‌مدت بارش (۱۳۹۲- ۱۳۶۰) ایستگاه سینوپتیک کرمان، استفاده شده است. داده‌های بارش و رواناب به‌صورت هم‌زمان ثبت شده و فاصله زمانی بین اندازه‌گیری ۶ ساعت می‌باشد.

[1]Analytical probabilistic model

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱- نقشه کاربری اراضی و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.

تبدیل بارش- رواناب

تغییرات بارش- رواناب به‌کار گرفته شده در توسعه مدل‌های بارش- رواناب، ساز و کارهای عمومی رواناب را در فرآیندهای فیزیکی بارش- رواناب به تصویر می‌کشد. به‌همین منظور بایستی بتواند به اندازه کافی ویژگی‌های سیستم فیزیکی را بیان کند. همانند دیگر مدل‌های مدیریت توفان شهری، مدل‌های آماری- احتمالاتی ممکن است با سطوح مختلفی از پیچیدگی با توجه به انواع مختلف تحولات بارش- رواناب توسعه داده شود. ساده‌ترین تحول بارش- رواناب، فرموله کردن بر اساس مفهوم ضریب رواناب و ذخیره چالابی است، در حالی‌که ممکن است برخی محققین پارامتر ضریب رواناب را با فرآیندهای هیدرولوژیکی واقعی‌تر همانند نفوذ جایگزین کنند.

تبدیل بارش- رواناب نوع اول (I)

عنصر کلیدی در توسعه مدل‌های تحلیلی- احتمالاتی با تئوری توزیع احتمالاتی مشتق شده، این است که برقراری تبدیل بارش- رواناب بر اساس این‌که ورودی سیستم (به‌عنوان مثال، بارش) به‌صورت ریاضیاتی به خروجی سیستم (به‌عنوان مثال، رواناب) تبدیل یابد. نسخه قبلی مدل‌های تحلیلی- احتمالاتی شامل فرم فشرده‌ای از رابطه بارش- رواناب برای تبدیل حجم رویداد بارش حوضه (v) به حجم رویداد رواناب (v_r) که از رابطه زیر پیروی می‌کند (آدامز و پاپا ۲۰۰۰):

$$v_r = \begin{cases} 0; & v \le S_d \\ \phi(v - S_d); & v > S_d \end{cases} \quad [۱]$$

در این‌جا ϕ ضریب بدون بعد رواناب و S_d ذخیره (میلی‌متر) است. در معادله ۱ فرض بر این است که میزان ذخیره باید قبل از هر رخداد رواناب تعیین گردد. زمانی‌که حجم بارش از میزان ذخیره بیش‌تر شد، حجم رواناب تولیدی با استفاده از تولید ضریب رواناب و بارش مازاد بر ظرفیت ذخیره به‌دست می‌آید.

برای غلبه بر کاستی‌های موجود در تحول بارش- رواناب، نوع اول این تبدیل رواناب، مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر حوضه را به‌صورت جداگانه در نظر می‌گیرد. جزء نفوذناپذیر حوضه شهری به‌عنوان h، ذخیره منطقه نفوذناپذیر به‌عنوان S_{di}، ذخیره منطقه نفوذپذیر به‌عنوان S_{dp} و ضریب رواناب منطقه نفوذپذیر با نماد ϕ_{dp} تعریف می‌شود. در منطقه نفوذناپذیر زمانی‌که حجم باران (v_r)، کم‌تر یا مساوی S_{di} باشد، رواناب اتفاق نمی‌افتد و زمانی‌که حجم بارش بیش‌تر از S_{di} باشد، رواناب تولیدی v_{ri} برابر است با حجم بارش مازاد بر نفوذ در منطقه نفوذناپذیر حوضه. پس می‌توان نوشت:

$$v_{ri} = \begin{cases} 0; & v \le S_{di} \\ (v - S_{di}); & v > S_{di} \end{cases} \quad [۲]$$

در منطقه نفوذپذیر، زمانی‌که حجم بارش بزرگ‌تر از S_{dp} باشد، منطقه نفوذپذیر حوضه در ایجاد رواناب کمک می‌کند و این جزء رواناب (v_{ri}) از طریق زیر قابل برآورد است (آدامز و پاپا ۲۰۰۰):

$$v_{rp} = \begin{cases} 0; & v \le S_{dp} \\ \phi_{dp}(v - S_{dp}); & v > S_{dp} \end{cases} \quad [۳]$$

در این‌جا ϕ_{dp} ضریب رواناب منطقه نفوذپذیر است. هم‌چنین، رواناب کلی تولید شده به‌وسیله حوضه شهری یک ترکیب سطح- وزن رواناب از بخش

www.SID.ir

Archive of SID

نفوذپذیر و نفوذناپذیر حوضه است (آدامز و پاپا ۲۰۰۰):

$$v_r = hv_{ri} + (1-h)v_{rp} \quad [۴]$$

$$\begin{matrix} v \le S_{di} \\ S_{di} < v \le S_{dp} \\ v > S_{dp} \end{matrix} \quad [۵]$$

نوع اول تبدیل بارش- رواناب، در واقع تعمیم فرموله کردن روابط اصلی با تقسیم‌بندی حوضه به مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر است.

تبدیل بارش- رواناب نوع دوم (II)

در حالی‌که تبدیل بارش- رواناب نوع اول گسترش پیدا می‌کند، تحول اصلی را برای درنظر گرفتن تغییرات مکانی در ضریب رواناب و مقدار ذخیره قادر می‌سازد. مفاهیم اساسی هیدرولوژیکی شامل فیزیک بارش- رواناب و فرآیندهای فیزیکی اساسا غیرقابل تغییر هستند.

معادله هورتون به‌منظور تبدیل بارش- رواناب برای افزایش فیزیک مدل‌های تحلیلی به‌کار برده می‌شود. برای صحیح درنظر گرفتن فرآیند نفوذ، تلفات بارش بایستی به‌صورت واقعی‌تر برآورد گردد که در این حالت ضریب رواناب در رابطه تبدیل بارش- رواناب حذف می‌گردد.

$$\begin{matrix} v \le S_{di} \\ S_{di} < v \le S_{dp} + S_{iw} + f_c/\lambda \\ v > S_{dp} + S_{iw} + f_c/\lambda \end{matrix} \quad [۸]$$

در مقایسه با تبدیل نوع اول، تبدیل بارش- رواناب نوع دوم دو پارامتر ذخیره چالابی در مناطق نفوذناپذیر و نفوذپذیر را حفظ می‌کند، اما جایگزینی ضریب رواناب منطقه نفوذپذیر با پارامترهای معادله هورتون واقع بینانه‌تر است. فرمول مخصوص به‌دست آمده برای برآورد تلفات خیس‌شدگی اولیه خاک، براساس متغیر مدت بارندگی است (گائو و آدامز۱۹۹۸).

استخراج تابع توزیع احتمالاتی حجم رواناب

با جایگزینی معادله‌های ۲ و ۳ در معادله ۴ خواهیم داشت (آدامز و پاپا ۲۰۰۰):

$$v_r = \begin{cases} 0; \\ h(v - S_{di}); \\ v[h + \phi_{dp}(1-h)] - hS_{di} - \phi_{dp}S_{dp}(1-h); \end{cases}$$

برای فرموله کردن نوع دوم تبدیل بارش- رواناب، تمام سطح حوضه به مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر تبدیل می‌شود. در منطقه نفوذناپذیر، حجم رواناب (v_{ri}) به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد (آدامز و پاپا ۲۰۰۰):

$$v_{ri} = \begin{cases} 0; & v \le S_{di} \\ (v - S_{di}); & S_{di} < v \le (S_{dp} + S_{dp} + f_c/\lambda) \end{cases} \quad [۶]$$

در حالی‌که در منطقه نفوذپذیر، حجم رواناب تولیدی (v_{rp}) به‌صورت زیر بیان می‌شود (آدامز و پاپا ۲۰۰۰):

$$v_{rp} = \begin{cases} 0; & v \le S_{dp} - S_{iw} - f_c/\lambda \\ v - S_{dp} - S_{iw} - f_c/\lambda; & v > S_{dp} - S_{iw} - f_c/\lambda \end{cases} \quad [۷]$$

در اینجا f_c سرعت نفوذ نهایی در معادله هورتون، S_{iw} خیس‌شدگی اولیه خاک در منطقه نفوذپذیر و λ برابر است با معکوس میانگین مدت زمان رخداد بارش ($\lambda = 1/\bar{t}$). بنابراین، رواناب کل تولید شده از حوضه با توجه به رواناب تولیدی به نسبت وزنی مساحت منطقه نفوذپذیر و نفوذناپذیر محاسبه می‌گردد(آدامز و پاپا ۲۰۰۰).

$$v_r = \begin{cases} 0; \\ h(v - S_{di}); \\ v[h + \phi_{dp}(1-h)] - hS_{di} - \phi_{dp}S_{dp}(1-h); \end{cases}$$

در توسعه مدل‌های تحلیلی، ورودی‌های عمده برای سیستم زهکشی شهری با استفاده از توزیع‌های احتمالاتی مشخصه‌های هر رخداد بارش، یعنی، حجم رخداد بارش (v)، مدت زمان بارش (t) و زمان بین دو رخداد بارش (b) توصیف می‌شوند. این مشخصه‌های آماری بارش با تحلیل داده‌های بارش طولانی‌مدت تعیین می‌گردند. با فرض این‌که توابع چگالی احتمال مشخصه‌های بارش به‌صورت توزیع نمایی باشند (جدول ۱)، این توزیع‌های احتمالاتی ریاضیاتی هستند

www.SID.ir

Archive of SID

که به‌وسیله تفاوت نوع تبدیل بارش- رواناب منجر به ایجاد توزیع احتمالاتی حجم رواناب می‌گردد(ایگلسون ۱۹۷۲و ۱۹۷۸).

جدول ۱- توابع چگالی احتمال مشخصه‌های بارش.

مشخصه بارش	تابع چگالی احتمال نمایی	پارامتر	فضای ممکن
حجم(mm)	$f_V(v) = \zeta \exp(-\zeta v)$	$\zeta = 1/\bar{v}$	$0 \le v < \infty$
مدت زمان(h)	$f_T(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$	$\lambda = 1/\bar{t}$	$0 \le t < \infty$
زمان بین دو رخداد(h)	$f_B(b) = \psi \exp(-\psi b)$	$\psi = 1/\bar{b}$	$0 \le b < \infty$

با توجه به تبدیل اصلی بارش- رواناب تابع توزیع تجمعی و تابع چگالی احتمال حجم رواناب، به‌ترتیب به‌صورت ($F_{v_r}(v_r)$) و ($f_{v_r}(v_r)$) نشان داده می‌شود. هم‌چنین مقادیر مورد انتظار حجم رخداد رواناب $E(v_r)$ و میانگین سالانه حجم رواناب R با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌گردند (پاپا ۱۹۹۷ و آدامز و پاپا ۲۰۰۰):

$$F_{v_r}(v_r) = 1 - e^{-\zeta\left(\frac{v_r}{\phi} + S_{di}\right)} \quad [۹]$$

$$f_{v_r}(V_r) = \frac{d}{dv_r} F_{v_r}(v_r) = \frac{d}{dv_r}\left(1 - e^{-\zeta\left(\frac{v_r}{\phi} + S_{di}\right)}\right) = \frac{\zeta}{\phi} e^{-\zeta\left(\frac{v_r}{\phi} + S_{di}\right)} \quad [۱۰]$$

$$E(v_r) = \frac{\phi}{\zeta} e^{-\zeta S_{di}} \quad [۱۱]$$

$$R = \theta . E(v_r) = \theta . \frac{\phi}{\zeta} e^{-\zeta S_{di}} \quad [۱۲]$$

محاسبات برای تبدیل بارش- رواناب نوع اول

با توجه به تبدیل نوع اول بارش- رواناب، زمانی‌که حجم بارش به اندازه‌ای نباشد که بتواند مناطق ذخیره در ناحیه نفوذناپذیر را پر کند، روانابی رخ نخواهد داد، چراکه $S_{di} \le S_{dp}$ فرض می‌شود. در نتیجه، احتمال عدم رخداد رواناب برابر است با احتمالی که حجم رخداد بارش کم‌تر از میزان ذخیره در منطقه نفوذناپذیر باشد ($v \le S_{di}$) (آدامز و پاپا ۲۰۰۰):

$$Pr_{(v_r)}(0) = \Pr(V_r = 0) + \Pr(V \le S_{di}) = \int_{v=0}^{v=S_{di}} f_v(v)\,dv = \int_{v=0}^{v=S_{di}} \zeta e^{-\zeta v} dv = 1 - e^{-\zeta S_{di}} \quad [۱۳]$$

زمانی‌که حجم باران بیش‌تر از میزان ذخیره در ناحیه نفوذناپذیر، اما کم‌تر از میزان ذخیره در ناحیه نفوذپذیر ($S_{di} < v \le S_{dp}$) باشد، تنها ناحیه نفوذناپذیر در تولید رواناب ناحیه شهری شرکت می‌کند و تابع توزیع تجمعی حجم رواناب از روابط زیر تبعیت می‌کند (آدامز و پاپا ۲۰۰۰):

$$F_{v_r}(V_r) = \Pr(V_r = 0) + \Pr\left(S_{di} < V \le \frac{V_r}{h} + S_{di}\right)$$

$$= \Pr(V_r = 0) + \int_{v=S_{di}}^{\frac{V_r}{h}+S_{di}} f_v(v)\,dv = 1 - e^{-\zeta S_{di}} + \int_{v=S_{di}}^{\frac{V_r}{h}+S_{di}} \zeta e^{-\zeta v} dv = 1 - e^{-\zeta\left(\frac{v_r}{h} + S_{di}\right)} \quad [۱۴]$$

در این‌جا $v_r \le h(S_{dp} - S_{di})$ می‌باشد. تابع چگالی حجم رواناب با مشتق‌گیری از معادله ۱۴ به‌دست می آید:

دراین‌جا $0 < v_r \le h(S_{dp} - S_{di})$ می‌باشد.

$$F_{v_r}(V_r) = \frac{d}{dv_r} F_{v_r}(v_r) = \frac{d}{dv_r}\left(1 - e^{-\zeta\left(\frac{v_r}{h} + S_{di}\right)}\right) = \frac{\zeta}{h} e^{-\zeta\left(\frac{v_r}{h} + S_{di}\right)} \quad [۱۵]$$

باقی‌مانده تابع توزیع تجمعی حجم رواناب در سراسر محدوده، حجم رخداد بارش بزرگ‌تر از ذخیره چالابی

www.SID.ir

Archive of SID

در منطقه نفوذپذیر است ($v > S_{dp}$). تحت این شرایط، هر دو منطقه نفوذناپذیر و نفوذپذیر در تولید رواناب شرکت می‌کنند. با تعریف ضریب رواناب وزنی منطقه (ϕ_h) و ذخیره چالابی (S_{dh}) خواهیم داشت که:

$$\phi_h = h + \phi_{dp}(1-h) \quad [۱۶]$$

تابع توزیع تجمعی را نیز می‌توان به‌صورت زیر نوشت (آدامز و پاپا ۲۰۰۰):

$$\Pr(S_{di} < V \le S_{dp}) = \int_{v=S_{di}}^{S_{dp}} f_v(v)\,dv = \int_{v=S_{di}}^{S_{dp}} \zeta e^{-\zeta v} dv = e^{-\zeta S_{di}} - e^{-\zeta S_{dp}} \quad [۱۸]$$

$$\Pr\left(S_{dp} < V \le \frac{v_r}{\phi_h} + S_{dh}\right) = \int_{v=S_{dp}}^{\frac{v_r}{\phi_h}+S_{dh}} f_v(v)\,dv = \int_{v=S_{dp}}^{\frac{v_r}{\phi_h}+S_{dh}} \zeta e^{-\zeta v} dv = e^{-\zeta S_{dp}} - e^{-\zeta\left(\frac{v_r}{\phi_h}+S_{dp}\right)} \quad [۱۹]$$

با ترکیب معادله‌های ۱۳، ۱۸ و ۱۹ داریم (آدامز و پاپا ۲۰۰۰):

$$F_{v_r}(V_r) = \Pr(V_r = 0) + \Pr(S_{di} < V \le S_{dp}) + Pr\left(S_{dp} < V \le \frac{V_r}{\phi_h} + S_{dh}\right) + Pr(S_{di} < V \le S_{dp}) + \int_{v=S_{dp}}^{\frac{v_r}{\phi_h}+S_{dh}} f_v(v)\,dv$$
$$= 1 - e^{-\zeta\left(\frac{v_r}{\phi_h}+S_{dh}\right)} \quad [۲۰]$$

دراین‌جا $0 < v_r \le h(S_{dp} - S_{di})$ می‌باشد. تابع چگالی احتمال حجم رواناب با مشتق‌گیری ازمعادله ۲۰ به‌دستمی‌آید:

$$F_{v_r}(V_r) = \frac{d}{dv_r} F_{v_r}(v_r) = \frac{d}{dv_r}\left(1 - e^{-\zeta\left(\frac{v_r}{\phi_h}+S_{dh}\right)}\right) = \frac{\zeta}{\phi_h} e^{-\zeta\left(\frac{v_r}{\phi_h}+S_{dh}\right)} \quad [۲۱]$$

در این‌جا $v_r > h(S_{dp} - S_{di})$ می‌باشد.در نتیجه، تابعچگالی احتمال حجم رواناب به‌صورت زیربیان می‌شود:

$$f_{v_r}(V_r) = \begin{cases} 1 - e^{-\zeta S_{di}} & ; \quad V_r = 0 \\ \frac{\zeta}{h} e^{-\zeta\left(\frac{v_r}{h}+S_{di}\right)} & ; \quad 0 < V_r \le h(S_{dp} - S_{di}) \\ \frac{\zeta}{\phi_h} e^{-\zeta\left(\frac{v_r}{\phi_h}+S_{dh}\right)} & ; \quad v_r > h(S_{dp} - S_{di}) \end{cases} \quad [۲۲]$$

با توجه به این معادله، امید ریاضی حجم رواناب رخداد بارش، $E(v_r)$، این‌چنین محاسبه می‌گردد(آدامز و پاپا ۲۰۰۰):

$$E(v_r) = \Pr(V_r = 0) + \int_{v_r=0}^{h(S_{dp}-S_{di})} v_r \,.\, f_{v_r}(v_r)\,dv_r = \frac{h}{\zeta}\left(e^{-\zeta S_{di}} - e^{-\zeta S_{dp}}\right) - h(S_{dp} - S_{di}).\, e^{-\zeta S_{dp}} \quad [۲۳]$$

در نهایت میانگین سالانه حجم رواناب، R، به‌دست می‌آید (آدامز و پاپا ۲۰۰۰):

$$R = \theta \frac{h}{\zeta} e^{-\zeta S_{di}} + (1-h)\theta \frac{\phi_{dp}}{\zeta} \,.\, e^{-\zeta S_{dp}} \quad [۲۴]$$

که θ میانگین سالانه تعداد رخدادهای بارش است.

محاسبات برای تبدیل بارش- رواناب نوع دوم

مانند تبدیل نوع اول، برای تبدیل نوع دوم بارش-رواناب، اگر حجم بارش بزرگ‌تر از ذخیره منطقه نفوذناپذیر نباشد (S_{di})، روانابی ایجاد نمی‌شود. بنابراین، احتمال این‌که هیچ روانابی رخ ندهد برابر است با احتمال این‌که حجم معین رخداد بارش از ذخیره چالابی منطقه نفوذناپذیر تجاوز نکند (معادله ۱۳).

www.SID.ir

Archive of SID

زمانی‌که حجم رواناب بزرگتر از ذخیره چالابی در منطقه نفوذناپذیر و کوچکتر یا مساوی ($S_{dp}+S_{iw}+{}^{fc}/_{\lambda}$) باشد، رواناب فقط در منطقه نفوذناپذیر اتفاق می‌افتد و در منطقه نفوذپذیر حوضه روانابی رخ نمی‌دهد. در این شرایط،تابع توزیع تجمعی و حجم رواناب در تمام محدوده ($S_{di}<v\leq S_{dp}+S_{iw}+{}^{fc}/_{\lambda}$) همانند معادله ۱۴ بیان می‌شود:

$$F_{v_r}(V_r)=\Pr(V_r\leq V_r)=1-e^{-\zeta\left(\frac{v_r}{h}+S_{di}\right)} \quad [۲۵]$$

در تمام محدوده $0<V_r\leq S_{dp}+S_{iw}+{}^{fc}/_{\lambda}$ می‌باشد. تابع چگالی احتمال حجم رواناب با مشتق‌گیری از معادله ۲۵ و همانند معادله ۱۵ به‌دست می‌آید(آدامز و پاپا ۲۰۰۰):

$$F_{v_r}(V_r)=\frac{\zeta}{h}e^{-\zeta(\frac{v_r}{h}+S_{di})} \quad [۲۶]$$

با این حال، اگر حجم باران برای پر کردن ذخیره چالابی در هر دو منطقه نفوذناپذیر و نفوذپذیر کافی باشد، کل حوضه در ایجاد رواناب شرکت می‌کنند.

در مورد $v>S_{dp}+S_{iw}+{}^{fc}/_{\lambda}$ ، پارامترهای S_m و S^* به‌صورت زیر تعریف می‌شوند(آدامز و پاپا ۲۰۰۰):

$$S_m=hS_{di}+(1-h)(S_{dp}+S_{iw})+(1-h){}^{fc}/_{\lambda} \quad [۲۷]$$

$$S^*=S_{dp}+S_{iw}+{}^{fc}/_{\lambda} \quad [۲۸]$$

احتمال حجم رواناب نیز از طریق معادله‌های ۲۹ و ۳۰ قابل محاسبه است (آدامز و پاپا ۲۰۰۰):

$$\Pr(S_{di}<V\leq S^*)=\int_{v=S_{di}}^{S^*}f_v(v)\,dv=\int_{v=S_{di}}^{S^*}\zeta e^{-\zeta v}dv=e^{-\zeta S_{di}}-e^{-\zeta S^*} \quad [۲۹]$$

$$\Pr(S^*<V\leq v_r+S_m)=\int_{v=S^*}^{v_r+S_m}f_v(v)\,dv=\int_{v=S^*}^{v_r+S_m}\zeta e^{-\zeta v}dv=e^{-\zeta S^*}-e^{-\zeta(v_r+S_m)} \quad [۳۰]$$

تابع توزیع تجمعی حجم رواناب با ترکیب های معادله های۱۳، ۲۹ و ۳۰ به‌دست می‌آید (آدامز و پاپا ۲۰۰۰):

$$\begin{aligned}F_{v_r}(v_r)&=\Pr(V_r=0)+\Pr(S_{di}<V\leq S^*)+Pr(S^*<V\leq V_r+S_m)\\&=\Pr(V_r=0)+Pr(S_{di}<V\leq S_{dp})+\int_{v=S^*}^{V_r+S_m}f_v(v)\,dv=1-e^{-\zeta(V_r+S_m)}\end{aligned} \quad [۳۱]$$

[

تابع چگالی احتمال حجم رواناب با مشتق‌گیری ازمعادله ۳۱ به‌دست می‌آید(آدامز و پاپا ۲۰۰۰):

$$F_{v_r}(v_r)=\frac{d}{dv_r}F_{v_r}(v_r)=\frac{d}{dv_r}\left(1-e^{-\zeta(V_r+S_m)}\right)=\zeta e^{-\zeta(V_r+S_m)} \quad [۳۲]$$

در اینجا $v_r>h(S_{dp}+S_{iw}-S_{di}+{}^{fc}/_{\lambda})$ می‌باشد. علاوه بر آن، تابع چگالی احتمال حجم رواناب به‌صورت زیر بیان می‌شود (آدامز و پاپا ۲۰۰۰):

$$f_{v_r}(V_r)=\begin{cases}1-e^{-\zeta S_{di}} & ; \quad V_r=0\\ \frac{\zeta}{h}e^{-\zeta(\frac{v_r}{h}+S_{di})} & ; \quad 0<V_r\leq h(S_{dp}+S_{iw}-S_{di}+{}^{fc}/_{\lambda})\\ \zeta e^{-\zeta(V_r+S_m)} & ; \quad v_r>h(S_{dp}+S_{iw}-S_{di}+{}^{fc}/_{\lambda})\end{cases} \quad [۳۳]$$

مقدار S_n را به‌صورت $S_n=h\left(S_{dp}+S_{iw}-S_{di}+{}^{fc}/_{\lambda}\right)$ تعریف می‌کنیم و امید ریاضی حجم رواناب هر رخداد رخداد بارش، $E(v_r)$، این‌چنین محاسبه می‌گردد(آدامز و پاپا ۲۰۰۰):

$$E(v_r)=\Pr(V_r=0)+\int_{v_r=0}^{S_n}v_r\,.\,f_{v_r}(v_r)dv_r+\int_{v_r=S_n}^{\infty}v_r\,.\,f_{v_r}(v_r)dv_r \quad [۳۴]$$

در اینجا انتگرال‌ها به‌صورت زیر تعیین می‌شوند(آدامز و پاپا ۲۰۰۰):

www.SID.ir

Archive of SID

$$\int_{v_r=0}^{S_n} v_r \cdot f_{v_r}(v_r)dv_r = \frac{h}{\zeta}e^{-\zeta S_{di}} - \left(S_n + \frac{h}{\zeta}\right).e^{-\zeta\left(\frac{S_n}{h}+S_{di}\right)} \quad [۳۵]$$

$$\int_{v_r=S_n}^{\infty} v_r \cdot f_{v_r}(v_r)dv_r = \left(S_n + \frac{1}{\zeta}\right).e^{-\zeta(S_m+S_n)} \quad [۳۶]$$

با جایگزینی معادله‌های ۳۵ و ۳۶ در معادله ۳۴، میانگین رواناب (R) به‌دست می‌آید (آدامز وپاپا ۲۰۰۰):

$$R = \theta\frac{h}{\zeta}e^{-\zeta S_{di}} - \theta\left(S_n + \frac{h}{\zeta}\right).e^{-\zeta\left(\frac{S_n}{h}+S_{di}\right)} + \theta\left(S_n + \frac{1}{\zeta}\right).e^{-\zeta(S_m+S_n)} \quad [۳۷]$$

به‌منظور صحت‌سنجی فرضیات حاصل از مدل‌های تحلیلی- احتمالاتی، از مدل مدیریت توفان (SWMM) آژانس حفاظت محیط‌زیست امریکا برای شبیه‌سازی پیوسته سیلاب طولانی‌مدت استفاده گردید (هابر و دیکینسن ۱۹۸۸).

مدل مدیریت توفان (SWMM)

این مدل یک مدل شبیه‌سازی بارش- رواناب دینامیکی است که بر اساس قوانین معادله حرکت و جرم است (برگر و همکاران ۲۰۱۴). این مدل برای طراحی،تحلیل و برنامه‌ریزی سیستم‌های زهکشی و هم‌چنین شبیه‌سازی کمیت و کیفیت رواناب در مناطق شهریمورد استفاده قرار می‌گیرد (روسمان۲۰۱۰). در مقایسه با سایر مدل‌ها، نتایج مدل SWMM نشان دهنده آن است که جریان رواناب در مدت زمان کوتاه‌تری به نقطه اوج می‌رسد، و مقادیر محاسبه شده به مقادیر اندازه‌گیری شده بسیار نزدیک است. بنابراین، SWMM به‌عنوان یکی از بهترین مدل‌های هیدرولوژیکی مطرح شده است (لووی۲۰۱۰).

نتایج و بحث

واسنجیSWMM بر اساس حجم رواناب مشاهده شده برای ۹ رخداد بارش مجزا اندازه‌گیری شد. بر اساس تعریف مدت زمان بین دو رخداد برابر ۶ ساعت، داده طولانی‌مدت ثبت شده بارش ایستگاه سینوپتیک کرمان به‌منظور به‌دست آوردن مشخصه‌های رخداد بارش مورد ارزیابی قرار گرفت و حجم متوسط رخداد بارش، مدت بارش، مدت زمان بین دو رخداد بارش به‌صورت تابع چگالی احتمال نمایی محاسبه گردیدند (جدول ۲) (آدامز و پاپا ۲۰۰۰).

در جدول ۳، با توجه به اندازه‌گیری‌های میدانی بارش و حجم رخداد بارش، ضریب رواناب برای هر رخداد بارش برآورد شده است.

ضرایب رواناب برآورد شده برای ۹ رخداد بارش در محدوده بین ۰/۶۲- ۰/۳۴ نشان می‌دهد که ضریب رواناب بین رخدادهای بارش با مقدار متوسط ۰/۴۸ در حال تغییر هستند که در اصل برای بخش برآورد شده نفوذناپذیری حوضه آبریز بسیار مهم و ضروری است.

رخدادهای بارش آورده شده در جدول ۳ نشان می‌دهند که اگر دو رخداد بارش متفاوت در میزان حجم بارش تقریبا یکسان باشند، حجم رواناب تولیدی و ضریب‌های رواناب متناظر با آن‌ها به یک‌دیگر نزدیک‌تر هستند. هم‌چنین این مورد در مطالعات برانهام و بهرا (۲۰۱۰) و سالیسودان و همکاران (۲۰۱۳) نیز تایید شده است. باید به این نکته توجه داشت که ضریب رواناب مشاهده شده، همان پارامتر استفاده شده در مدل تحلیلی نیست (مانند ϕ در تبدیل بارش- رواناب اصلی)، چراکه ضریب رواناب مشاهده شده شامل ذخیره چالابی اولیه نمی‌باشد و علت تنوع ضریب رواناب از یک رخداد به رخدادی دیگر نیز همین مساله می‌باشد.بر اساس پژوهش گائو و همکاران (۲۰۱۴) و حجم رواناب مشاهده شده، واسنجی مدل SWMM با استفاده از تنظیم پارامترهای مدل برای کمینه کردن اختلاف بین حجم رواناب مشاهده شده و شبیه‌سازی شده انجام شد. در میان این پارامترها، پارامترهای حساس در رواناب مدل مدیریت توفان به‌منظور شبیه‌سازی رواناب

[1] Storm Water Management Model

www.SID.ir

Archive of SID

مشخص شدند که از جمله آن‌ها می‌توان به عرض حوضه، ظرفیت نفوذ و ضریب مانینگ برای مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر اشاره کرد. پارامترهای مدل کالیبره شده و مشخصه‌های فیزیکی حوضه در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۲- مشخصه‌های بارش و توابع چگالی احتمال بارش برای ایستگاه سینوپتیک کرمان (مدت زمان بین دو رخداد ۶ ساعت).

مشخصه بارش	مشخصه‌های باران	پارامتر	تابع چگالی احتمال نمایی
حجم (mm)	$\bar{v} = 3.21$	ζ=0.31	$f_V(v) = 0.31\exp(-0.31v)$
مدت زمان (h)	$\bar{t} = 2.03$	$\lambda = 0.49$	$f_T(t) = 0.49\exp(-0.49t)$
زمان بین دو رخداد (h)	$\bar{b} = 30.63$	$\psi = 0.033$	$f_B(b) = 0.033exp(-0.033b)$
متوسط تعداد سالانه رخدادهای بارش		$\theta = 40.53$	
متوسط حجم بارش سالانه		P=139.18	

جدول ۳- حجم بارش و رواناب مشاهداتی و ضریب رواناب برآورد شده برای ۹ رخداد بارش مشاهداتی.

تاریخ وقوع رویداد	بارش مشاهداتی (mm)	رواناب مشاهداتی (mm)	ضریب رواناب (بی بعد)
۱۳۹۲/۲/۲۳	۸/۳	۴/۱	۰/۴۹
۱۳۹۲/۱/۱۹	۱۷	۵/۷۸	۰/۳۴
۱۳۹۱/۱۰/۱۲	۱۰/۶	۵/۱۲	۰/۴۸
۱۳۹۱/۱۰/۴	۴/۷	۲/۹۲	۰/۶۲
۱۳۹۱/۸/۱۹	۲۶/۱	۱۹/۲۶	۰/۵۵
۱۳۹۱/۷/۲۹	۱۱/۲	۵/۵	۰/۴۹
۱۳۹۱/۲/۴	۴/۹	۱/۹۱	۰/۳۹
۱۳۹۱/۱/۱۴	۲۳/۵	۱۳/۶۳	۰/۵۸
۱۳۹۰/۱۲/۱۷	۱۵/۹	۷/۳۱	۰/۴۶

جدول ۴- مشخصه‌های فیزیکی حوضه و پارامترهای واسنجی شده برای مدل مدیریت توفان.

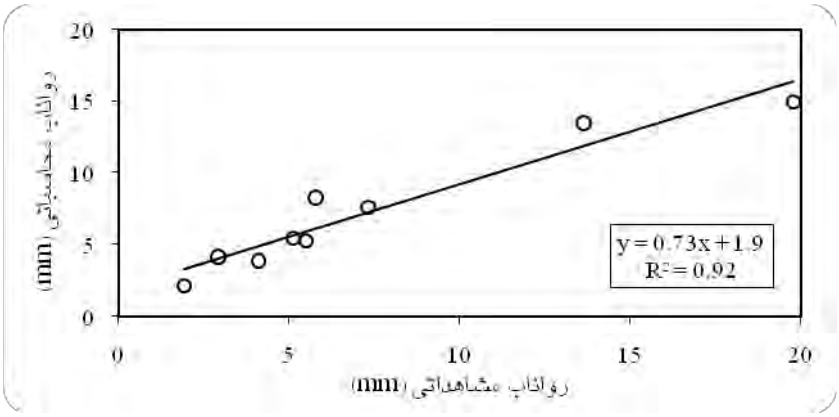
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
مساحت حوضه (ha)	۲۵۳	ذخیره چالابی منطقه نفوذناپذیر (mm)	۱/۲۷
شیب (٪)	۱/۷۵	ذخیره چالابی منطقه نفوذپذیر (mm)	۲/۵۴
عرض حوضه (m)	۴۲۰	ظرفیت نفوذ اولیه خاک ($mm.h^{-1}$)	۳۴/۳
ضریب مانینگ منطقه نفوذناپذیر	۰/۰۱۲	ظرفیت نفوذ نهایی خاک ($mm.h^{-1}$)	۷/۲
ضریب مانینگ منطقه نفوذپذیر	۰/۲۰	ضریب نفوذ	۳/۹۴

با توجه به نتایج شبیه‌سازی، حجم کل رواناب برآورد شده برای ۹رخداد بارش ۳۶/۹۷ میلی‌متر است، در حالی‌که حجم رواناب کل مشاهده شده شده ۳۵/۸۵ میلی‌متر می‌باشد که اختلاف نسبی این دو برابر با ۳/۰۲ درصد است. گائو و همکاران (۲۰۱۴) نیز با استفاده از مدل‌های احتمالاتی حجم کل رواناب را شبیه‌سازی کردند که با یافته‌های مطالعه حاضر هم‌خوانی دارد. حجم رواناب مشاهده شده و شبیه‌سازی شده با مدل مدیریت توفان در شکل ۲ رسم شده است، هم‌چنین مقدار ضریب تبیین (R^2) به‌دست آمده از برازش

www.SID.ir

Archive of SID

رگرسیونی برابر ۰/۹۳ می‌باشد. با توجه به شرایط موجود حوضه آبریز، میانگین سالانه حجم رواناب ناشی از شبیه‌سازی پیوسته ۳۴/۱۶ میلی‌متر برآورد شده است.



شکل ۲- مقایسه رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل مدیریت توفان.

برای مدل APM که بر اساس ضریب رواناب توسعه داده شده باشد، برآورد مناسب ضریب رواناب برای تبدیل اصلی بارش- رواناب ممکن است با استفاده از ضرایب رواناب مشاهده شده تعیین شده باشد. با اشاره به نتایج شبیه‌سازی SWMM، تفاوت نسبی نتایج مدل APM که بر اساس ضریب رواناب توسعه داده شده است نیز در جدول ۵ آورده شده است. با مشاهده جدول ۵ می‌توان دریافت که اگر برای ضریب رواناب یک مقدار در محدوده۰/۷- ۰/۶ درنظر گرفته شود، مدل تحلیلی- احتمالاتی نوع اول می‌تواند نتایجی نزدیک به نتایج شبیه‌سازی SWMM با اختلاف نسبی کم‌تر از ارائه دهد. دی‌پائولا و دی‌مارتینو (۲۰۱۳) نیز در پژوهش خود مدل تحلیلی- احتمالاتی را با مدل SWMM مورد مقایسه قرار دادند که نتایج به‌دست آمده از تحقیقات آن‌ها حاکی از دقت بالای مدل مذکور می‌باشد.

جدول ۵- مشخصات بارش و متوسط حجم رواناب سالانه بر اساس مدل تحلیلی نوع اول.

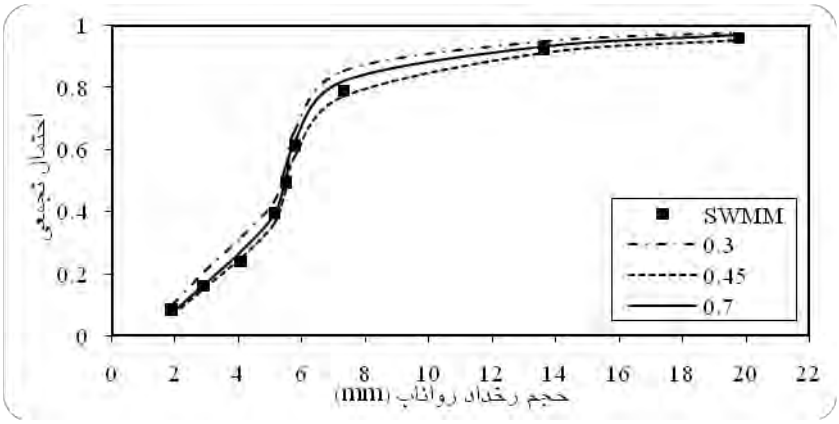
میزان ذخیره (mm)	ζ	θ	ϕ	$E(v_r)$	رواناب سالانه (mm)	رواناب محاسبه شده توسط SWMM	اختلاف نسبت به مدل SWMM (٪)
۲/۷۶	۰/۳۱	۴۰/۵۳	۰/۳	۰/۴۱	۱۶/۶۷	۲۵/۹۳	-۳۵/۷۱
۲/۷۶	۰/۳۱	۴۰/۵۳	۰/۵	۰/۶۹	۲۷/۷۸	۳۱/۱۹	-۱۰/۹۲
۲/۷۶	۰/۳۱	۴۰/۵۳	۰/۶	۰/۸۲	۳۳/۳۴	۳۲/۹۷	۱/۱۳
۲/۷۶	۰/۳۱	۴۰/۵۳	۰/۷	۰/۹۶	۳۸/۸۹	۳۸/۰۶	۲/۲
۲/۷۶	۰/۳۱	۴۰/۵۳	۰/۸	۱/۰۹	۴۴/۴۶	۴۲/۶۴	۴/۲۶

برای مدل تحلیلی نوع اول، پارامترها شامل ذخیره چالابی منطقه نفوذناپذیر و نفوذپذیر می‌باشد و ضریب رواناب منطقه نفوذپذیر بر اساس روش تجربی تعیین می‌شود.در این مطالعه، می‌توان دریافت که تابع توزیع تجمعی حجم رواناب برآورد شده از مدل تحلیلی نوع اول می‌تواند با رواناب مشاهداتی تناسب بالایی داشته باشد (R^2=۰/۹۲)، البته شرط چنین تناسبی این است که ضریب رواناب منطقه نفوذپذیر برابر با ۰/۴۵ باشد و ذخیره چالابی مناطق نفوذناپذیر و نفوذپذیر به‌ترتیب برابر با ۱/۲۷ و ۲/۵۴ میلی‌متر باشند (ASCE,1992). بر اساس پارامترهای واسنجی شده، حجم رواناب سالانه به‌وسیله مدل نوع اول برابر با ۳۲/۴۳ میلی‌متر برآورد شده است که به نتیجه شبیه‌سازی SWMM بسیار نزدیک است.

www.SID.ir

Archive of SID

برای ارزیابی اطمینان‌پذیری پارامترهای مدل، از مقادیر مختلف برای ضریب رواناب استفاده گردید (۰/۳، ۰/۴۵ و ۰/۷). توابع توزیع تجمعی حجم رواناب به‌دست آمده از مدل تحلیلی نوع اول در برابر توابع توزیع تجمعی برآورد شده از رونا‌ب مشاهده شده در شکل ۳ آورده شده است. با توجه به شکل ۳، مشاهده می‌شود هنگامی‌که مقدار ضریب رواناب برابر با ۰/۳ باشد، میزان تابع توزیع تجمعی حجم رواناب ناچیز در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که برای ضریب رواناب برابر با ۰/۴۵، نمودار تابع توزیع تجمعی حاصل‌شده از مدل تحلیلی نوع اول تناسب بسیار خوبی با رواناب مشاهداتی دارد. در آنالیز حساسیت ضریب رواناب منطقه نفوذپذیر استفاده شده در مدل نوع اول، پارامتر ϕ_{dp} با استفاده از مقادیر حد بالا و پایین تعیین شدند (به‌ترتیب ۰/۷ و ۰/۳)، و حجم رواناب برآورد شده با نتایج به‌دست آمده در برابر با زمانی‌که ضریب رواناب برابر با ۰/۴۵ مقایسه شد. علاوه براین، به‌منظور ارزیابی بیش‌تر اطمینان‌پذیری و عملکرد مدل تحلیلی نوع اول، الگوهای مختلف کاربری اراضی (مانند تغییر در جزء منطقه نفوذپذیر حوضه آبریز) در نظر گرفته شدند و نتایج به‌دست آمده با نتایج شبیه‌سازی پیوسته SWMM مقایسه گردید (جدول ۶).



شکل ۳- **مقایسه احتمال تجمعی رواناب مشاهداتی و تابع احتمال تجمعی رواناب برآورد شده از مدل تحلیلی نوع اول.**

جدول ۶- متوسط حجم رواناب سالانه برآورد شده بر اساس تبدیل بارش- رواناب نوع اول.

جزء منطقه نفوذناپذیر	متوسط حجم رواناب سالانه (mm)			
	مدل تحلیلی نوع اول			SWMM ($mm.year^{-1}$)
	$\phi_{dp}=0.3$	$\phi_{dp}=0.45$	$\phi_{dp}=0.7$	
۰/۱	۲۴/۸۸	۳۲/۹۱	۴۶/۳۰	۳۰/۰۴
۰/۳	۳۸/۹۵	۴۵/۲۰	۵۵/۶۱	۴۲/۹۶
۰/۵	۵۳/۰۲	۵۷/۴۸	۶۴/۹۲	۵۶/۱۱
۰/۷	۶۷/۰۹	۶۹/۷۷	۷۴/۲۳	۶۸/۷۹
۰/۹	۸۱/۱۶	۸۲/۰۵	۸۳/۵۴	۸۱/۲۴
۱	۸۸/۱۹	۸۸/۱۹	۸۸/۱۹	۸۶/۹۷

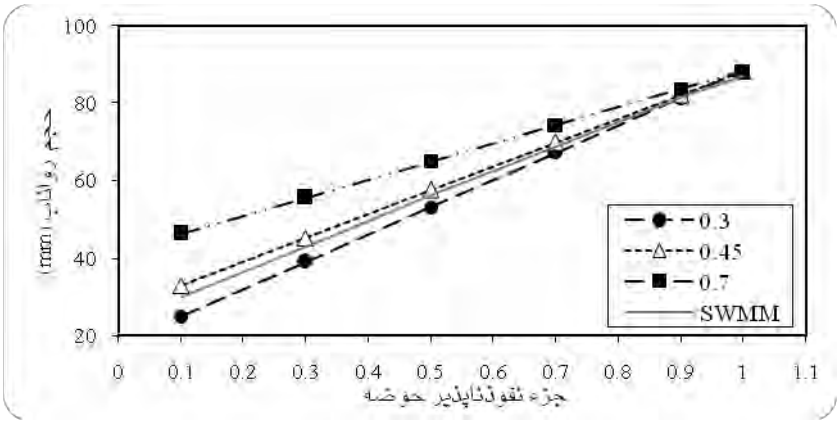
در جدول۶، ضریب رواناب منطقه نفوذپذیر ثابت در نظر گرفته شد و جزء نفوذناپذیر حوضه آبریز به‌تدریج افزایش داده شد. مدل تحلیلی نوع اول برای زمانی‌که ، ϕ_{dp} برابر با ۰/۳ باشد، حجم رواناب را کم‌تر از مقدار واقعی نشان می‌دهد و با انتخاب، ϕ_{dp} برابر با ۰/۷، حجم رواناب را بیش از مقدار واقعی برآورد می‌کند. با این‌حال اگر مقدار ϕ_{dp} برابر با ۰/۴۵ باشد، نتایج به‌دست آمده از مدل تحلیلی نوع اول تناسب مناسبی با نتایج شبیه‌سازی SWMM دارد. به‌طور کلی، با افزایش تدریجی نفوذپذیری حوضه آبخیز، اثر ضریب رواناب

www.SID.ir

Archive of SID

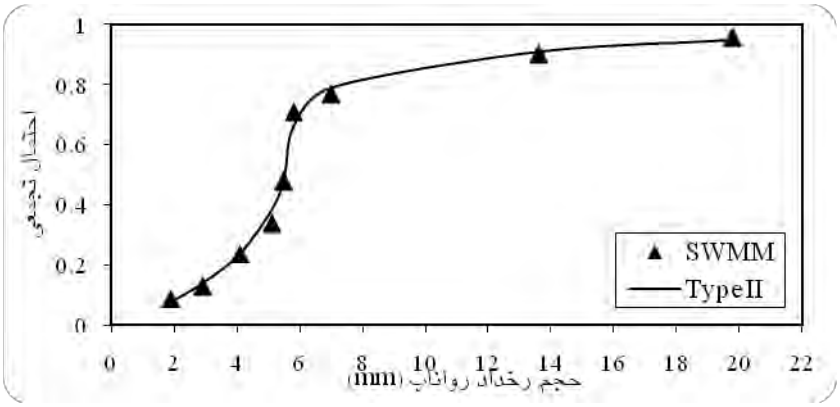
منطقه نفوذپذیر بر رواناب کلی حوضه از اهمیت و حساسیت کم‌تری برخوردار خواهد بود. پاپا (۱۹۹۷) و ریورا و همکاران (۲۰۰۵) نیز در مطالعات خود اثر ضریب رواناب در منطقه نفوذپذیر بر رواناب حوضه را با افزایش میزان نفوذپذیری کم‌اثر خواندند.

همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، مقادیر برآورد شده از مدل تحلیلی نوع اول، بر اساس مقادیر مختلف ϕ_{dp}، به یک‌دیگر نزدیک هستند که این امر نشان دهنده کاهش تدریجی تاثیر ضریب رواناب در منطقه نفوذپذیر بر رواناب کل تولیدی است. علت این کاهش، افزایش منطقه نفوذناپذیر می‌باشد. از این‌رو، بخش بزرگ‌تر رواناب کل عمدتا از منطقه نفوذپذیر حوضه آبخیز تولید می‌شود. به‌عبارت دیگر، اگر نفوذناپذیری حوضه آبخیز به‌طور قابل توجهی زیاد شود، رواناب ایجاد شده حساسیت کم‌تری به تغییرات ضریب رواناب در منطقه نفوذپذیر از خود نشان می‌دهد.



شکل ۴- تاثیر ضریب رواناب بر میانگین سالانه حجم رواناب در تبدیل نوع اول مدل تحلیلی.

بر خلاف مدل تحلیلی نوع اول که بر اساس رویکرد ضریب رواناب فرموله شده است، پارامترهای عمده در مدل تحلیلی نوع دوم (مانند ظرفیت نفوذ اولیه، ظرفیت نفوذ نهایی و ذخیره چالابی در مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر) بر اساس نفوذپذیری فرموله شده‌اند. این پارامترها را می‌توان با یک روش مشابه با واسنجی مدل تحلیلی نوع اول که قبلا بحث شده است، تعیین کرد. مقادیر پارامترهای واسنجی شده مدل تحلیلی نوع دوم برای مدل مدیریت توفان در جدول ۴ آورده شده است. مقایسه نتایج رواناب مشاهداتی و رواناب به‌دست آمده از مدل تحلیلی نوع دوم نیز در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- مقایسه احتمال تجمعی رواناب مشاهداتی و تابع احتمال تجمعی رواناب برآورد شده با استفاده از مدل تحلیلی نوع دوم.

به‌منظور تحلیل حساسیت نفوذناپذیری حوضه آبخیز، جزءمنطقه نفوذپذیر حوضه بین ۱- ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود. مقایسه حجم رواناب پیش‌بینی شده توسط مدل‌های تحلیلی نوع اول و دوم با نتایج شبیه‌سازی پیوسته SWMM در جدول ۷ آورده شده است. ضریب رواناب منطقه نفوذپذیر در مدل تحلیلی

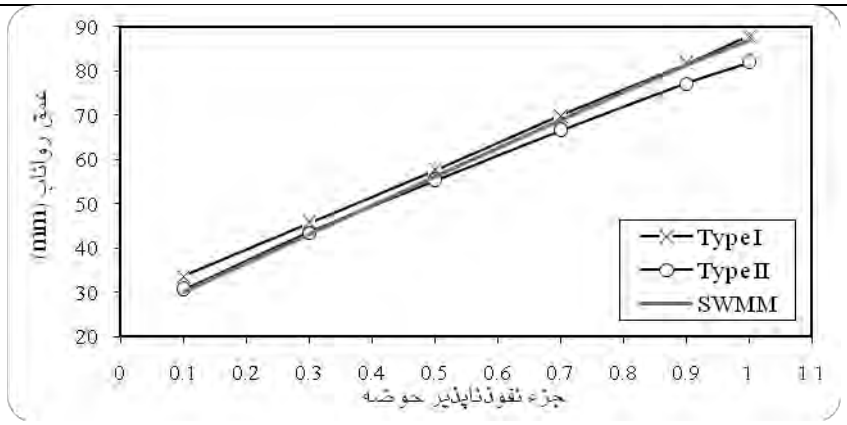
www.SID.ir

Archive of SID

نوع اول برابر با مقدار ۰/۴۵ تنظیم شده است، و نتایج پارامترهای مدل تحلیلی نوع دوم و SWMM نیز در جدول ۴ قابل مشاهده است. در حالی‌که نتایج تحلیل حساسیت نشان دهنده حساسیت هر دو مدل تحلیلی نوع اول و دوم به تغییرات نفوذناپذیری حوضه آبخیز است، اما میزان نفوذناپذیری حوضه بایستی ایده مناسبی را در انتخاب نوع مدل تحلیلی به ما بدهد. نتایج آورده شده در جدول ۷ نشان می‌دهد، زمانی‌که جزء نفوذناپذیر حوضه کوچک‌تر از ۰/۵ باشد، مدل تحلیلی نوع دوم با بیشینه خطای نسبی ۵/۸۶ درصد عملکرد بهتری در مقایسه با مدل نوع اول با بیشینه خطای نسبی ۳۵/۷۱ درصد داشته است. با این‌حال، اگر جزء نفوذناپذیری بزرگ‌تر از ۰/۵ باشد، مدل تحلیلی نوع اول ممکن است عملکرد بهتری نسبت به مدل نوع دوم داشته باشد (شکل ۶).

جدول ۷- مقایسه نتایج مدل تحلیلی با نتایج شبیه‌سازی پیوسته مدلSWMM.

جزء منطقه نفوذناپذیر	متوسط حجم رواناب سالانه برآورد شده				
	SWMM ($mm.year^{-1}$)	مدل تحلیلی نوع اول ($mm.year^{-1}$)	اختلاف نسبت به مدلSWMM	مدل تحلیلی نوع دوم ($mm.year^{-1}$)	اختلاف نسبت به مدلSWMM
۰/۱	۳۰/۰۴	۳۳/۶۱	۱۱/۸۷	۳۰/۴۹	۱/۴۹
۰/۳	۴۲/۹۶	۴۵/۵۵	۶/۰۳	۴۳/۴۸	۱/۲۱
۰/۵	۵۶/۱۱	۵۷/۴۷	۲/۴۲	۵۵/۲۲	-۱/۵۹
۰/۷	۶۸/۷۹	۶۹/۸۳	۱/۵۱	۶۶/۴۷	-۳/۳۸
۰/۹	۸۱/۲۴	۸۱/۵۴	۰/۳۷	۷۷/۱۵	-۵/۰۷
۱	۸۶/۹۷	۸۷/۷۶	۰/۹۱	۸۱/۸۷	-۵/۸۶



شکل ۶- مقایسه نتایج مدل تحلیلی با نتایج مدل شبیه‌سازی پیوسته SWMM.

نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه، رویکردی برای توسعه مدل‌های APM به‌منظور ارزیابی حجم رواناب توفان شهری نشان داده شد. بر اساس تئوری توزیع احتمالاتی به‌دست آمده، توزیع‌های احتمالاتی مشخصه‌های بارش با استفاده از تبدیل‌های بارش- رواناب برای ساخت توزیع احتمالاتی حجم رواناب مورد استفاده قرار گرفت که می‌تواند برای محاسبه میانگین سالانه حجم رواناب کاربرد فراوانی داشته باشد. از نظر تفسیرهای مختلف هیدرولوژیکی، انواع مختلف تبدیل‌های بارش- رواناب فرموله شدند.بر اساس نظریه توزیع احتمالاتی به‌دست آمده، توزیع‌های احتمالاتی مشخصه‌های باران به‌صورت مبدل‌های ریاضیاتی هستند که با استفاده از تبدیل‌های بارش- رواناب، توزیع‌های احتمالاتی را برای خروجی‌های رواناب ایجاد می‌کند. این مطالعه نشان می‌دهد که مدل‌های تحلیلی را می‌توان با درجات پیچیدگی مختلف و بر اساس مدل‌های تحلیلی نوع اول و دوم توسعه داد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که

www.SID.ir

Archive of SID

مدل‌های تحلیلی قادر به ارائه نتایج قابل مقایسه با نتایج شبیه‌سازیSWMM می‌باشند. مدل‌های تحلیلی با قابلیت انعطاف‌پذیری بالا در فرموله کردن انواع مختلف تبدیل‌های بارش- رواناب، یک رویکرد جایگزین مناسب برای شبیه‌سازی پیوسته در ارزیابی عملکرد سیستم زهکشی شهری فراهم می‌سازد.

منابع مورد استفاده

Adams BJ, Papa F, 2000. Urban Stormwater Management Planning with Analytical Probabilistic Models. Wiley, New York, NY.

ASCE, 1992. Design & Construction of Urban Stormwater Management Systems, New York, NY,

Basso S, Schirmer M, Botter G, 2016. A physically-based analytical model of flood-frequency curves. Geophysical Research Letters. 43(17), 9070-9076.

Benjamin JR, Cornell CA, 1970. Probability, Statistics and Decision for Civil Engineering. McGraw-Hill, New York.

Branham TL, Behera PK, 2010. Development of a rainfall statistical analysis tool for analytical probabilistic models for urban stormwater management analysis. In World Environmental and Water Resources Congress. 3281-3290.

Burger G, Sitzenfrei R, Kleidorfer M, Rauch W, 2014. Parallel flow routing in SWMM 5. Environment Model Software. 53, 27–34.

Chen JY, Adams BJ, 2007. Development of Analytical Models for Estimation of Urban Stormwater Runoff. Journal of Hydrology. 336 (3–4):458–69.

Dan`azumi S, Supiah S, Aris A, 2013. Development of Analytical Probabilistic Model Parameters for Urban Stormwater Management. Sains Malaysian. 42(3), 325-332.

Darbandi S, FakheriFard A, HosseinzadehDalir A, Sadraddini, SA, Farsadyzadeh D, 2009. Rainfall-Runoff Hydraulic Simulation Using Diffusive Wave Model in KamanajOlia Watershed.Journal of Agriculture Science. 18(1), 17-26.

Soltani A, Gorbani MA, FakheriFardA, DarbandiS, FarsadizadehD. Genetic Programming and Its Application in Rainfall-Runoff Modeling. Journal of Agriculture Science.4, 62-71.

Eagleson PS, 1972. Dynamics of flood frequency. Water Resources Research. 8 (4), 878–897.

Eagleson PS, 1978. Climate, Soil, and Vegetation 2, the Distribution of Annual Precipitation Derived from Observed Storm Sequences. Water Resources Research. 14 (5), 713–721.

Guo Y, 1998. Development of Analytical Probabilistic Urban Stormwater Models. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, Ont.

Guo Y, Adams BJ, 1998. Hydrologic Analysis of Urban Catchments with event-based Probabilistic Models I. Runoff volume. Water Resources Research. 34 (12), 3421–3431.

Guo Y, Markus M, 2011. Analytical Probabilistic Approach for Estimating Design Flood Peaks of Small Watersheds. Journal of Hydrologic Engineering. 16(11):847-57.

Howard CD, 1976. Theory of Storage and Treatment-Plant Overflows. Journal of the Environmental Engineering. 102(4):709-22.

Huber WC, Dickinson RE, (1992). Stormwater Management Model User's Manual, Version 4. Environmental Protection Agency, Georgia, 500 pp.

Li K, Kim H, Pak G, Jang S, Kim L, Yoo C, Yun Z, Yoon J, 2010. Cost-Effectiveness Analysis of Storm Water Best Management Practices (BMPs) In Urban Watersheds. Desalination and Water Treatment. 19(1-3), 92–96.

Lowe SA, 2010. Sanitary sewer design using EPA storm water management model (SWMM). Computer Applied Engineering Education. 18 (2), 203–212.

Papa F, 1997. Analytical Probabilistic Models for Urban Stormwater Management Planning, M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering. University of Toronto, Toronto, Ont.

Raimondi A, Becciu G, 2014. Probabilistic Modeling of Rainwater Tanks. Procedia Engineering. 16th Conference on Water Distribution System Analysis, Milan, Italy. 89:1493-9.

Ranjbaran P, 2010. Qualitative Modeling of Pollution Load of Surface Runoff of Tehran Basin with Probabilistic-Analytical Approach, M. Sc. Thesis, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj.

www.SID.ir

Archive of SID

Rivera P, Gironas J, Montt JP, Fernandez B, 2005. An Analytical Model for Hydrologic Analysis in Urban Watersheds. In 10th International Conference on Urban Drainage.

Rossman LA, 2010. Storm Water Management Model User's Manual, Version 5.0. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.

Salajegheh A, Forootan E, Mahdavi M, Ahmadi H, Sharifi F and MalekMohammadi B, 2012. Runoff Estimation in Urban Watersheds by Analytical Models (Case Study: The Part of District No.22 of Tehran City). Journal of Water and Wastewater 23(1): 47-56.

Urbonas B, Stahre P, 1993. Stormwater Best Management Practices and Detention for Water Quality, Drainage and CSO Management. Prentice Hall.

www.SID.ir