

برآورد رواناب در حوزه‌های آبخیز شهری با استفاده از مدل‌های تحلیلی (مطالعه موردی: بخشی از منطقه ۲۲ شهر تهران)

علی سلاجقه^۱ الهام فروتن^۲ محمد مهدوی^۳
حسن احمدی^۴ فرود شریفی^۵ بهرام ملک محمدی^۵

(دریافت ۸۸/۱۱/۵ پذیرش ۸۹/۱۰/۱۵)

چکیده

در حوزه‌های آبخیز شهری افزایش سطوح نفوذ ناپذیر که به دلیل توسعه صورت می‌پذیرد منجر به افزایش حجم رواناب، دبی اوج و کاهش مقدار نفوذپذیری می‌شود. بیشتر حوزه‌های آبخیز شهری فاقد ایستگاه هیدرومتری و آمار رواناب هستند، از این رو تعیین پاسخ هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز شهری با توجه به پیچیدگی سیستم زهکشی امری ضروری است. برای این منظور مدل‌های مدیریت رواناب شهری به عنوان ابزاری مفید در برنامه‌ریزی و توسعه مکان‌های شهری مدنظر قرار گرفته‌اند. یکی از انواع این مدل‌ها، مدل‌های تحلیلی هستند که فرایند فیزیکی تبدیل بارش به رواناب را فرموله می‌نمایند. در این تحقیق از دو مدل تحلیلی برای برآورد رواناب استفاده گردید. یکی از مدل‌ها بر اساس ضریب رواناب بود و مدل دیگر با در نظر گرفتن پارامتر نفوذپذیری فرموله شد. برای اجرای این مدل‌ها یک حوزه آبخیز واقع در شهر تهران انتخاب گردید و برای مقایسه دو مدل، داده‌های بارش و رواناب در حوزه آبخیز ثبت گردیدند. شاخصهای ارزیابی اعم از ضریب کارایی مدل Nash-Sutcliffe، مقادیر جذر میانگین مربعات خطاها و ضریب مقدار باقیمانده، قدر مطلق خطای نسبی و ضریب همبستگی بیانگر دقت هر دو مدل در برآورد رواناب شهری بودند.

واژه‌های کلیدی: رواناب شهری، مدل تحلیلی، تابع چگالی احتمال، ضریب رواناب، نفوذپذیری

Runoff Estimation in Urban Watersheds by Analytical Models (Case Study: The Part of District No.22 of Tehran City)

Ali Salajegheh¹
Hassan Ahmadi³

Elham Foroootan²
Forood Sharifi¹

Mohammad Mahdavi³
Bahram Malek Mohammadi⁵

(Received Jan. 25, 2010 Accepted Jan. 5, 2011)

Abstract

In urban catchment because of developed conditions, the amount of impervious area increases which tends to increase runoff volume, peak discharge rate and decrease of infiltration volume. Most of urban catchments are ungauged and runoff data does not exist, as a result; determining the hydrological response of urban catchments in consideration of complex drainage system is a necessity. For this purpose, storm water management models are considered as useful tools for planning and developing in urban areas. Analytical model is one of the stormwater management tools which formulate the physical rainfall-runoff transformation. In this study, two analytical models are used to predict urban runoff volume. One of models predicts runoff volume on the basis of runoff coefficient and another is formulated in consideration of infiltration parameter. A test catchment located in Tehran city is selected for performing these models. Observed rainfall and runoff data are recorded in this catchment for comparing two approaches. Performance indicators such as Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient, root mean square error (RMSE), coefficient of residual mass (CRM), absolute relative error and regression coefficient reveal the precision of two models for urban runoff prediction.

Keywords: Urban Runoff, Analytical Model, Probability Density Function, Runoff Coefficient, Infiltration.

1. Prof. of Watershed Management, College of Agriculture, Sciences and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran
2. Ph.D. Student of Watershed Management, College of Agriculture and Natural Resources, Sciences and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran (Corresponding Author) (+98 21) 4443040 eliforoootan@yahoo.com
3. Prof., Faculty of Natural Resources, Tehran University, Tehran
4. Assist. Prof., Center of Soil and Water Protection Research, Tehran
5. Assist. Prof. of Civil and Environmental Eng., Dept. of Eng., Tehran University, Tehran

۱- استاد مدعو گروه آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران
۲- دانشجوی دکتری گروه آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران (نویسنده مسئول) ۰۲۱ ۴۴۴۳۰۱۱۰ eliforoootan@yahoo.com
۳- استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران
۴- استادیار پژوهشی مرکز تحقیقات حفاظت آب و خاک، تهران
۵- استادیار گروه مهندسی عمران- محیط زیست، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

پس از آن تابع توزیع حداکثر رواناب با روشی که ترکیبی از آنالیز فراوانی مقدار بارش با مفاهیم سنتی ضریب رواناب و هیدروگراف واحد است به دست آورده شد [۷]. ریورا^۷ تابع توزیع احتمال رواناب را با استفاده از تابع توزیع احتمال شدت بارش و مدت آن به دست آورده است [۸]. در کشور کانادا نیز مدل‌های تحلیلی احتمالاتی در یک حوزه آبخیز شهری اجرا و نتایج حاصل از این تحقیق بیانگر قابل قبولی مدل‌ها است [۹]. در زمینه رواناب شهری در ایران نیز در شهر شیراز برآورد رواناب شهری با استفاده از مدل SWMM صورت پذیرفته است و همچنین بررسی کیفیت و احیای رواناب شهری نیز در مناطق مختلف شیراز مورد بررسی قرار گرفته است [۱۰-۱۲].

در این پژوهش دو مدل تحلیلی که یکی بر اساس ضریب رواناب و دیگری بر اساس پارامتر نفوذپذیری بود، توسعه یافت و نتایج آن با مقادیر مشاهداتی در منطقه مورد مقایسه قرار گرفت.

۲- مواد و روشها

۲-۱- معرفی مدل‌های تحلیلی احتمالاتی

در مدل‌های تحلیلی احتمالاتی مورد بحث در این پژوهش، دو متغیر مقدار بارش و مدت آن از نظر آماری مستقل از هم فرض گردید و توابع چگالی احتمال مدت، مقدار و مدت زمان بین وقایع بارش برای تعیین پارامترهای مدل مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۱). در ساختار مدل تحلیلی که بر اساس ضریب رواناب است، پارامتر ضریب رواناب سطوح نفوذپذیر در نظر گرفته می‌شود. در این مدل سطح حوزه آبخیز شهری به سطوح نفوذپذیر و نفوذناپذیر تقسیم می‌گردد و از رابطه زیر برای برآورد رواناب استفاده می‌شود [۹]

$$(1) \quad v_r = \begin{cases} 0 & v \leq s_{di} \\ h(v - s_{di}) & s_{di} \leq v \leq s_{dp} \\ [h + \phi_{dp}(1-h)]v - hs_{di} - \phi_{dp}s_{dp}(1-h) & v > s_{dp} \end{cases}$$

که در این رابطه

h نسبت سطح نفوذناپذیر حوزه آبخیز به کل مساحت حوزه، s_{di} ذخیره چالابی در مناطق نفوذ ناپذیر حسب میلی‌متر، v مقدار بارش حسب میلی‌متر، s_{dp} ذخیره چالابی در مناطق نفوذ پذیر حسب میلی‌متر، ϕ_{dp} ضریب رواناب سطوح نفوذ پذیر است. در نتیجه تابع چگالی احتمال مقدار رواناب به صورت زیر بیان می‌گردد [۹]

در یک حوزه آبخیز طبیعی با توجه به پوشش گیاهی موجود در آن و نفوذپذیری سطح زمین مقدار زیادی از بارش از راه گیرش گیاهی، نفوذ در خاک و تبخیر و تعرق از دست می‌رود اما در یک حوزه آبخیز شهری به دلیل توسعه شهرسازی، سطح نفوذ ناپذیر حوزه افزایش می‌یابد که افزایش حجم رواناب، دبی اوج، کاهش مقدار نفوذپذیری و تخریب کیفیت آب را به دنبال دارد که برای کاهش خسارات و تأثیرات زیست محیطی فوق‌الذکر، انجام مدیریت و کنترل رواناب شهری بسیار ضروری است. حوزه‌های آبخیز شهری شامل شبکه پیچیده‌ای از سطوح نفوذپذیر و نفوذناپذیر، لوله‌های زهکشی، ناودان‌ها و مخازن ذخیره هستند که از زهکش‌های روباز تا شبکه‌های زهکشی پیچیده را شامل می‌گردد و بدیهی است که هر گونه اقدامی در این زمینه نیازمند برآورد دقیق مقدار رواناب است. بیشتر حوزه‌های آبخیز شهری فاقد ایستگاه هیدرومتری و آمار رواناب هستند، از این رو تعیین پاسخ هیدرولوژیکی حوزه آبخیز شهری با توجه به پیچیدگی سیستم زهکشی امری ضروری است. در این راستا مدل‌های مدیریت رواناب شهری مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل‌های مدیریت رواناب شهری به عنوان ابزاری مفید در برنامه‌ریزی، طراحی و توسعه شهری به شمار می‌روند که از جمله آنها مدل‌های تحلیلی احتمالاتی هستند که سعی در فرموله نمودن فرایند فیزیکی تبدیل بارش به رواناب نموده‌اند. در این مقاله مدل‌های تحلیلی احتمالاتی که با برازش توزیع‌های احتمالاتی به دست آورده شده است برای برآورد رواناب شهری در بخشی از منطقه ۲۲ تهران مورد استفاده قرار گرفت.

در زمینه مدل‌های تحلیلی احتمالاتی، اولین تئوری احتمال به وسیله کرنل^۱ و بنجامین^۲ در سال ۱۹۷۰ شرح داده شد [۱]. تحقیق پیش‌گام در کاربرد روش توزیع احتمال در زمینه منابع آب نیز به وسیله ایگلسن^۳ در سالهای ۱۹۷۲ و ۱۹۷۸ انجام گردید [۲ و ۳]. استفاده از مدل‌های تحلیلی احتمالاتی با روش توزیع احتمال توسط هوارد^۴ در سال ۱۹۷۶ انجام پذیرفت که در این تحقیق تابع توزیع احتمال جریان سطحی با استفاده از تابع توزیع احتمال مقدار واقعه بارش و زمان بین وقایع بارش به دست آمد [۴]. لگانانان^۵ و دلور^۶ در سال ۱۹۸۴ و لگانانان و همکاران در سال ۱۹۸۵ توزیع احتمال حجم جریان سطحی یک مخزن کنترل رواناب شهری را بر اساس تابع چگالی احتمال خصوصیات رواناب به دست آوردند [۵ و ۶].

¹ Cornell

² Benjamin

³ Eagleson

⁴ Howard

⁵ Loganathan

⁶ Dellur

⁷ Rivera

(۵)

$$f_{vr}(v_r) = \begin{cases} 1 - e^{-\tau s_{di}} & v_r = 0 \\ \frac{\tau}{h} e^{-\tau(\frac{v_r}{h} + s_{di})} & 0 < v_r \leq h(s_{dp} + s_{iw} + s_{di} + \frac{f_c}{\lambda}) \\ \tau e^{-\tau(v_r + s_m)} & v_r > h(s_{dp} + s_{iw} - s_{di} + \frac{f_c}{\lambda}) \end{cases}$$

متغیر s_m به صورت زیر تعریف می‌شود

$$s_m = h s_{di} + (1-h)(s_{dp} + s_{iw}) + (1-h) \frac{f_c}{\lambda} \quad (۶)$$

جدول ۱- خصوصیات بارش و تابع توزیع آنها [۹]

خصوصیات بارش	تابع چگالی احتمالی	پارامتر	دامنه مورد استفاده
v مقدار بارش (میلی متر)	$f_v(v) = \tau e^{-\tau v}$	$\tau = \frac{1}{v}$	$0 \leq v \leq \infty$
t مدت (ساعت)	$f_T(t) = \lambda e^{-\lambda t}$	$\lambda = \frac{1}{t}$	$0 \leq t \leq \infty$
b زمان بین وقایع بارش (ساعت)	$f_B = \psi e^{-\psi b}$	$\psi = \frac{1}{b}$	$0 \leq b \leq \infty$

در مدل‌های تحلیلی احتمالاتی مذکور، فرض گردیده است که تمامی رواناب ایجاد شده به شبکه زهکشی تخلیه گردند و از این رو نسبت سطح نفوذناپذیر حوزه آبخیز در محاسبات در نظر گرفته شده است. با توجه به آن که رواناب ایجاد شده از تمامی سطوح نفوذپذیر و نفوذناپذیر به شبکه زهکشی تخلیه نمی‌گردند، در این تحقیق نسبت سطح نفوذپذیر و نسبت سطح نفوذناپذیری که در تولید رواناب شهری مشارکت می‌نمایند در محاسبات مورد توجه قرار گرفت که با در نظر گرفتن این پارامتر، مدل تحلیلی بر اساس نفوذپذیری به صورت زیر تعریف می‌گردد

(۷)

$$v_r = \begin{cases} 0 & v \leq s_{di} \\ \beta(v - s_{di}) & s_{di} \leq v \leq s_{dp} + s_{iw} + \frac{f_c}{\lambda} \\ \beta(v - s_{di}) + \omega(v - s_{dp} - s_{iw} - \frac{f_c}{\lambda}) & v > s_{dp} + s_{iw} + \frac{f_c}{\lambda} \end{cases}$$

که در آن

β نسبتی از مناطق نفوذناپذیر حوزه است که در تولید رواناب مشارکت می‌نمایند و ω نسبتی از مناطق نفوذپذیر حوزه است که در تولید رواناب مشارکت می‌نمایند.

$$f_{vr}(v_r) = \begin{cases} 1 - e^{-\tau s_{di}} & v_r = 0 \\ \frac{\tau}{h} e^{-\tau(\frac{v_r}{h} + s_{di})} & 0 < v_r \leq h(s_{dp} - s_{di}) \\ \frac{\tau}{\phi_h} e^{-\tau(\frac{v_r}{\phi_h} + s_{di})} & v_r > h(s_{dp} - s_{di}) \end{cases} \quad (۲)$$

که در این رابطه

τ معکوس متوسط مقدار وقایع بارش، ϕ_h ضریب رواناب وزنی سطوح نفوذپذیر و سطوح نفوذناپذیر است که به صورت زیر محاسبه می‌گردد

$$\phi_h = \frac{h s_{di} + \phi_{dp} s_{dp} (1-h)}{h + \phi_{dp} (1-h)} \quad (۳)$$

در ساختار مدل تحلیلی احتمالاتی بر اساس نفوذپذیری، معادله نفوذپذیری هورتون^۱ در فرایند تبدیل بارش به رواناب استفاده شده است. برای فرموله کردن تبدیل بارش به رواناب در مدل تحلیلی که بر اساس نفوذپذیری است، سطح حوزه آبخیز شهری به سطوح نفوذپذیر و نفوذناپذیر تقسیم گردیده است و رواناب تولید شده از کل سطوح نفوذپذیر و نفوذناپذیر به صورت رابطه زیر است [۹]

(۴)

$$v_r = \begin{cases} 0 & v \leq s_{di} \\ h(v - s_{di}) & s_{di} \leq v \leq s_{dp} + s_{iw} + \frac{f_c}{\lambda} \\ v - h s_{di} - (1-h)(s_{dp} + s_{iw}) - (1-h) \frac{f_c}{\lambda} & v > s_{dp} + s_{iw} + \frac{f_c}{\lambda} \end{cases}$$

که در این روابط

f_c ظرفیت نفوذ نهایی در معادله هورتون حسب میلی‌متر بر ساعت، λ معکوس متوسط مدت وقایع بارش، s_{iw} هدر رفت نفوذ ناشی از خیس شدن اولیه خاک حسب میلی‌متر است.

رابطه بالا بیان می‌دارد که اگر مقدار بارش از ذخیره چالابی سطوح نفوذناپذیر بیشتر نباشد رواناب تولید نمی‌شود و هنگامی که مقدار بارش بیشتر از ذخیره چالابی سطوح نفوذناپذیر و کمتر یا مساوی با $(s_{dp} + s_{iw} + \frac{f_c}{\lambda})$ باشد، رواناب تنها در سطوح نفوذناپذیر تولید خواهد شد و سطوح نفوذپذیر در تولید رواناب مشارکت نمی‌کنند و در حالت سوم هم سطوح نفوذپذیر و هم سطوح نفوذناپذیر در تولید رواناب مشارکت می‌کنند. در نتیجه تابع چگالی احتمال مقدار رواناب به صورت زیر بیان می‌گردد [۹]

¹ Horton Infiltration Equation

هر مدلی که حداکثر قدر مطلق اختلاف نسبی کمتری داشته باشد برآورد دقیق تر و بهتری دارد. (۸)

همچنین ضریب کارایی مدل Nash-Sutcliffe نیز به صورت زیر تعریف می‌گردد

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2} \quad (14)$$

که در این رابطه

\bar{o} میانگین مقدار رواناب اندازه‌گیری شده و n تعداد وقایع است. این ضریب از $-\infty$ تا 1 تغییر می‌کند که ضریب 1 بیانگر بهترین مدل هیدرولوژیکی است و هر چه قدر این ضریب کوچک تر باشد انطباق مدل با مقادیر مشاهداتی کمتر است. ضریب بالاتر از 0.8 نمایانگر نزدیک بودن مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده و کارایی خوب مدل است. جذر میانگین مربعات خطاها^۱ به صورت زیر تعریف می‌گردد

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (o_i - p_i)^2} \quad (15)$$

به طور کلی هر چه قدر مقدار جذر میانگین خطاها به صفر نزدیک تر باشد مدل مطلوب تر خواهد بود. برای یک مدل ایده‌آل، این مقدار صفر است. ضریب مقدار باقیمانده^۲ نیز به صورت زیر تعریف می‌گردد

$$CRM = \frac{\left| \sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i \right|}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (16)$$

مقدار مثبت این ضریب بیانگر تمایل مدل برای برآورد مقادیر کمتر از مقدار مشاهداتی است و مقدار منفی این ضریب بیانگر آن است که مقادیر برآورد شده از مدل، بزرگ تر از مقادیر مشاهده شده هستند. در یک مدل ایده‌آل این ضریب صفر است.

۲-۳- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه به وسعت $67/8$ هکتار و بخشی از منطقه 22 شهرداری تهران است. منطقه 22 بین طول شرقی $51^{\circ}51'$ تا $40^{\circ}51'20''$ و عرض شمالی $35^{\circ}32'16''$ تا $35^{\circ}57'19''$ در شمال غربی شهر تهران و در پایین دست حوزه آبخیز رودخانه کن و

¹ Root Mean Square Error (RMSE)

² Coefficient of Residual Mass (CRM)

$$f_{vr}(v_r) = \begin{cases} 1 - e^{-\tau s_{di}} & v_r = 0 \\ \frac{\tau}{\beta} e^{-\tau(\frac{v_r}{\beta} + s_{di})} & 0 < v_r \leq h(s_{dp} + s_{iw} + s_{di} + \frac{f_c}{\lambda}) \\ \tau e^{-\tau(v_r + s_m)} & v_r > h(s_{dp} + s_{iw} - s_{di} + \frac{f_c}{\lambda}) \end{cases}$$

متغیر s_m به صورت زیر تعریف می‌گردد

$$s_m = \frac{\left[\beta s_{di} + \omega(s_{dp} + s_{iw} + \frac{f_c}{\lambda}) \right]}{(\beta + \omega)} \quad (9)$$

مدل تحلیلی بر اساس ضریب رواناب نیز به صورت زیر تعریف می‌شود

$$v_r = \begin{cases} 0 & v \leq s_{di} \\ \beta(v - s_{di}) & s_{di} \leq v \leq s_{dp} \\ \left[\beta + \phi_{dp} \omega \right] v - \beta s_{di} - \omega \phi_{dp} s_{dp} & v > s_{dp} \end{cases} \quad (10)$$

$$f_{vr}(v_r) = \begin{cases} 1 - e^{-\tau s_{di}} & v_r = 0 \\ \frac{\tau}{\beta} e^{-\tau(\frac{v_r}{\beta} + s_{di})} & 0 < v_r \leq h(s_{dp} - s_{di}) \\ \frac{\tau}{\phi_h} e^{-\tau(\frac{v_r}{\phi_h} + s_{di})} & v_r > h(s_{dp} - s_{di}) \end{cases} \quad (11)$$

$$\phi_h = \frac{\beta s_{di} + \phi_{dp} s_{dp} \omega}{\beta + \phi_{dp} \omega} \quad (12)$$

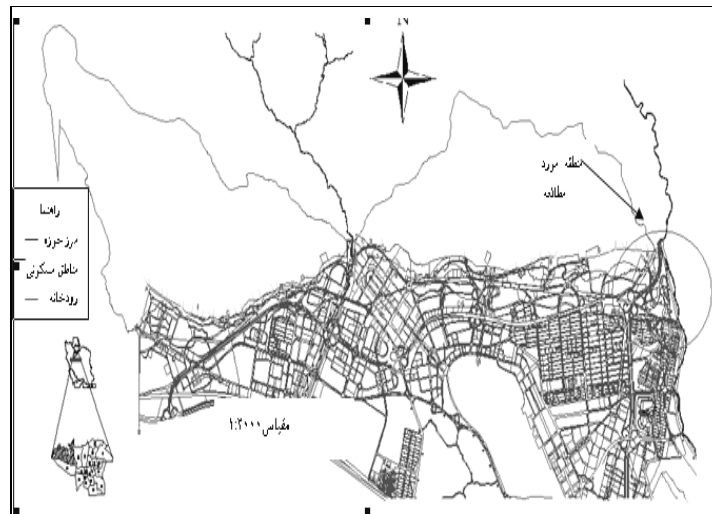
۲-۲- شاخصهای ارزیابی مدل‌ها

به منظور مقایسه نتایج مشاهداتی با مقادیر به دست آمده از مدل‌های تحلیلی قدر مطلق خطای نسبی، ضریب کارایی مدل Nash-Sutcliffe، جذر میانگین مربعات خطا و ضریب مقدار باقیمانده برآورد می‌گردد. خطای نسبی مدل از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$Re = \left(\frac{p_i - o_i}{o_i} \right) \quad (13)$$

که در این رابطه

Re خطای نسبی مدل برای هر واقعه، p_i مقدار رواناب برآورد شده از مدل برای هر واقعه و o_i مقدار رواناب اندازه‌گیری شده برای هر واقعه است.

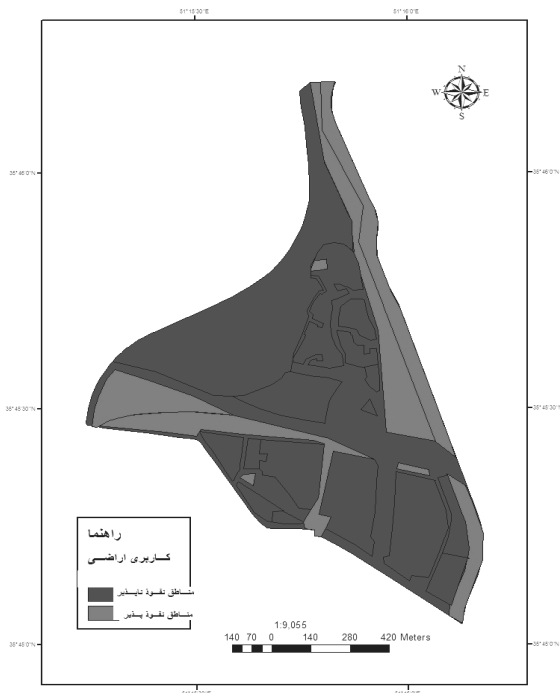


شکل ۱- نقشه منطقه ۲۲ تهران [۱۳]

وردیج واقع شده است [۱۳]. این منطقه در شمال با کوهستان البرز مرکزی، در شرق با حریم رودخانه کن، در جنوب با آزاد راه تهران- کرج و در غرب با محدوده جنگلهای دست کاشت وردآورد محدود می‌گردد (شکل ۲، ۱ و ۳).

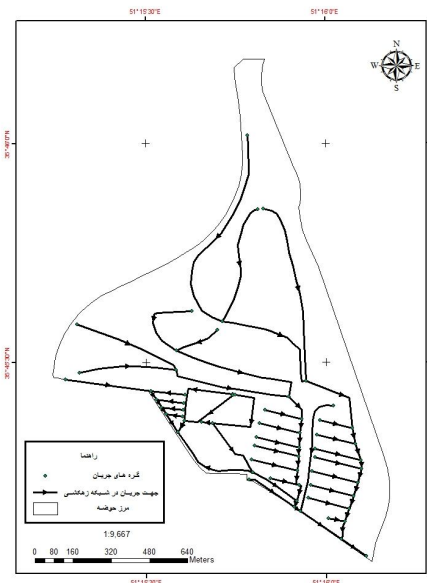
۲-۴- روش تحقیق

برای انجام این تحقیق داده‌های بارش ایستگاه سینوپتیک مهرآباد تهران از سال ۱۳۳۷ تا ۱۳۷۶ جمع‌آوری و در راستای اجرای مدل تحلیلی احتمالاتی که بر اساس خصوصیات بارش است.

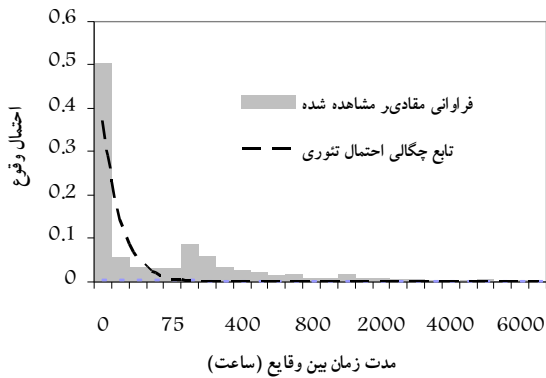


شکل ۳- نقشه مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر در منطقه مورد مطالعه

داده‌های پیوسته بارش به وقایع بارش مجزا تفکیک گردید که معیار این تفکیک، حداقل دوره زمانی بدون بارندگی بین دو بارش بود. حداقل دوره زمانی بدون بارندگی انتخابی باید از زمان تمرکز حوزه بزرگ‌تر باشد که در این تحقیق یک ساعت به‌عنوان حداقل دوره زمانی بدون بارندگی لحاظ و در آمار بارش ایستگاه مورد بررسی، بارندگی‌های با وقفه زمانی بیش از یک ساعت به‌عنوان وقایع بارش مجزا در نظر گرفته شدند. همچنین زمان‌های بدون بارندگی بیش از



شکل ۲- نقشه شبکه زهکشی در منطقه مورد مطالعه [۱۳]



شکل ۶- تابع چگالی احتمال مدت زمان بین وقایع بارش

جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده در مدل‌های تحلیلی

پارامتر	λ	ψ	τ
مقدار	۰/۲۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۹۲

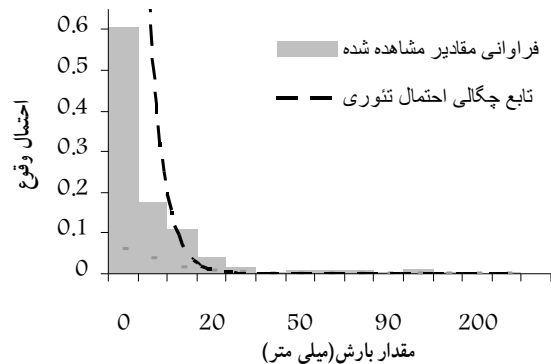
Arc-GIS نقشه شیب منطقه تهیه گردید (شکل ۷). مساحت مکان‌های نفوذناپذیری که در مجاورت سطوح نفوذپذیر بودند و شیب آنها به سمت مکان‌های نفوذپذیر بود از کل سطح نفوذناپذیر کسر گردید و مقدار باقیمانده به عنوان سطوح نفوذناپذیری که در تولید رواناب مشارکت می‌نمایند در نظر گرفته شد و نسبت آن به کل حوزه محاسبه شد (β). لازم به توضیح است که رواناب به سمت مکان‌های نفوذپذیر هدایت می‌گردد اما شیب این مکان‌های نفوذپذیر به سمت شبکه زهکشی نیست و به آن تخلیه نمی‌گردد. مساحت مکان‌های نفوذپذیری که رواناب آنها به سیستم زهکشی تخلیه نمی‌شوند نیز از سطح کل مناطق نفوذپذیر کسر گردید و نسبت آن به کل حوزه محاسبه شد (ω). همچنین ضریب رواناب برای هر واقعه بارش محاسبه و میانگین ضرایب رواناب در مدل استفاده شد. نفوذپذیری نیز با استفاده از دستگاه دابل رینگ^۱ در چندین مکان اندازه‌گیری گردید و مقدار میانگین آن در مدل تحلیلی بر اساس نفوذپذیری مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۴).

مقادیر بارش اندازه‌گیری شده در منطقه در هر دو مدل تحلیلی وارد و مقدار رواناب برآورد گردید و با مقدار رواناب مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت و ضرایب همبستگی مقادیر به دست آمده از هر دو مدل با مقادیر مشاهداتی به دست آمد (شکل ۸). همچنین به منظور مقایسه نتایج دو مدل، خطای نسبی مقادیر برآورد شده از دو مدل نسبت به مقدار مشاهداتی و مقادیر ضریب کارایی مدل Nash-Sutcliffe، جذر میانگین مربعات خطا و ضریب مقدار باقیمانده نیز برآورد گردید (جدولهای ۵ و ۶).

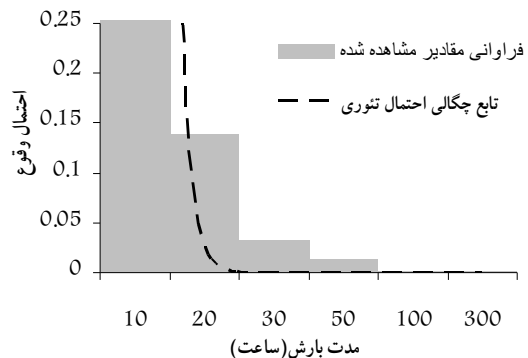
یک ساعت که مدت زمان بین وقایع بارش نامیده می‌شوند نیز مورد محاسبه قرار گرفتند. سپس توابع چگالی احتمال مدت، مقدار و مدت زمان بین وقایع بارش با استفاده از آمار طولانی مدت ایستگاه مهرآباد تهیه و با مقادیر مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت و پارامترهای λ, ψ, τ برآورد گردید (شکل‌های ۴، ۵، ۶ و جدول ۲).

از آنجایی که در منطقه، ایستگاه هیدرومتری برای اندازه‌گیری رواناب وجود ندارد، لذا در طی سه ماه (۱۳۸۸/۶/۲۰ تا ۱۳۸۸/۹/۲۰) ۱۱ بار اندازه‌گیری بارش و رواناب در منطقه انجام شد (جدول ۳).

به منظور محاسبه نسبتی از سطوح که در تولید رواناب مشارکت می‌نمایند از فرضیات مورد استفاده در مدل CUHP کمک گرفته شد [۱۴]. در این نرم‌افزار سطح کل حوزه به چهار قسمت تقسیم شده است: ۱- سطوح نفوذناپذیری که مستقیماً به سیستم زهکشی متصل هستند ۲- مکان‌های نفوذناپذیری که به بخش نفوذپذیر تخلیه می‌گردند ۳- مکان‌های نفوذپذیر که رواناب را از سطوح نفوذناپذیر دریافت می‌کنند ۴- مکان‌های نفوذپذیری که به سطح نفوذناپذیر متصل نیستند. در این پژوهش با استفاده از نرم افزار



شکل ۴- تابع چگالی احتمال مقدار بارش



شکل ۵- تابع چگالی احتمال مدت بارش

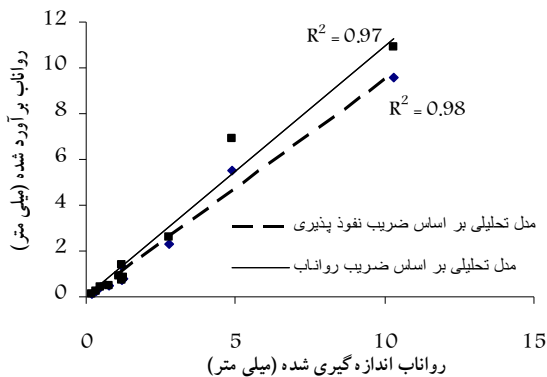
¹ Double Ring

جدول ۳- مقادیر رواناب مشاهداتی و برآورد شده از مدل‌های تحلیلی

شماره واقع	مقدار بارش (میلی‌متر)	مقدار رواناب اندازه‌گیری شده	ضریب رواناب	مقدار رواناب برآورد شده از مدل تحلیلی بر اساس ضریب رواناب
۱	۲/۳۵	۱/۲۵	۰/۵۳	۰/۷۶
۲	۱/۹	۰/۷۸	۰/۴۱	۰/۴۷
۳	۳/۱	۱/۲	۰/۴۲	۱/۴۲
۴	۱۴/۴	۱۰/۳	۰/۷۱	۹/۶
۵	۲/۲	۱/۲	۰/۵۴	۰/۷
۶	۱/۸	۰/۴۸	۰/۲۶	۰/۴
۷	۲/۵	۱/۱	۰/۴۴	۰/۹
۸	۱/۶	۰/۳۴	۰/۲۱	۰/۲۵
۹	۴/۵	۲/۸	۰/۶۲	۲/۳
۱۰	۱/۴	۰/۲	۰/۱۴	۰/۱۱
۱۱	۸/۸	۴/۹	۰/۵۱	۵/۵۱

جدول ۴- مشخصات منطقه مورد مطالعه که در مدل‌ها استفاده گردیده‌اند

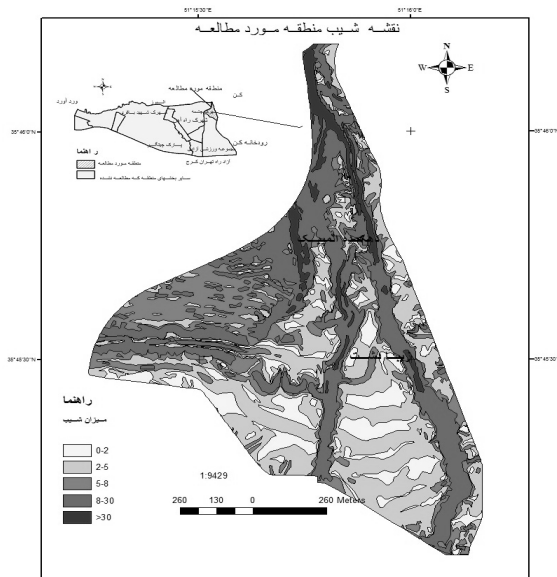
مساحت کل منطقه (هکتار)	نسبتی از سطح نفوذ ناپذیر حوزه آبخیز که در تولید رواناب مشارکت می‌نماید	نسبتی از سطح نفوذپذیر حوزه آبخیز که در تولید رواناب مشارکت می‌نماید	ظرفیت نفوذ نهایی (f_c) (mm/h)	ضریب کاهش ظرفیت نفوذ ($1/h$)	ذخیره چالابی در سطوح نفوذ پذیر (میلی‌متر) [۱۰]	ذخیره چالابی در سطوح نفوذ ناپذیر (میلی‌متر) [۱۰]
۶۷/۸	۰/۷۳	۰/۲۲	۷/۲	۴/۵	۲/۵	۱/۲۵



شکل ۸- ضرایب همبستگی بین مقادیر رواناب مشاهده شده و برآورد شده از دو مدل تحلیلی

پس از آن مقادیر رواناب و همچنین احتمال تجاوز از مقدار رواناب برای کل مقادیر بارش ایستگاه مهرآباد با استفاده از دو مدل تحلیلی مورد محاسبه قرار گرفت که با توجه به عدم وجود آمار ثبت شده طولانی مدت رواناب، تنها از ۱۱ واقعه رواناب اندازه‌گیری شده در منطقه برای مقایسه با احتمالات برآورد شده از مدل‌ها استفاده گردید و در این راستا احتمال تجاوز از مقادیر رواناب مشاهداتی با استفاده از رابطه ویبول^۱ به دست آورده شد و مقدار رواناب و احتمال تجاوز از مقدار رواناب برآورد شده از دو مدل و

^۱ Weibull



شکل ۷- نقشه شیب حوزه مورد مطالعه

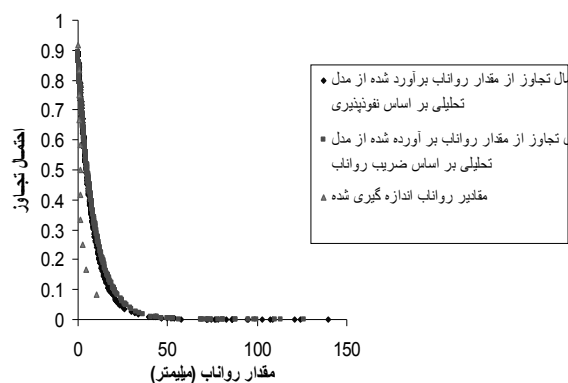
جدول ۵- مقایسه نتایج مدل‌های تحلیلی با نتایج مشاهداتی

پارامترها	مدل تحلیلی بر اساس نفوذ پذیری	مدل تحلیلی بر اساس ضریب رواناب
RMSE	۰/۴	۰/۵
CRM	۰/۰۹	-۰/۰۱
ضریب همبستگی	۰/۹۸	۰/۹۷
ضریب کارایی	۰/۹۸	۰/۹۶

جدول ۶- خطای نسبی برآورد شده از مدل‌ها برای هر واقعه

مقدار رواناب اندازه گیری شده (میلی متر)	مقدار رواناب برآورد شده از مدل تحلیلی بر اساس ضریب رواناب (میلی متر)	اختلاف نسبی از مقادیر مشاهده شده	مقدار رواناب برآورد شده از مدل تحلیلی بر اساس نفوذ پذیری (میلی متر)	اختلاف نسبی از مقادیر مشاهده شده
۱/۲۵	۰/۸۳	-۰/۳۳	۰/۷۶	-۰/۳۹
۰/۷۸	۰/۴۷	-۰/۳۹	۰/۴۷	-۰/۳۹
۱/۳	۱/۴۲	۰/۰۹۲	۱/۳۵	۰/۰۳۸
۱۰/۳	۱۰/۹	۰/۰۵۸	۹/۶	-۰/۰۶۷
۱/۲	۰/۷	-۰/۴۱	۰/۷	-۰/۴۱
۰/۴۸	۰/۴	-۰/۱۶	۰/۴	-۰/۱۶
۱/۱	۰/۹	-۰/۱۸	۰/۹	-۰/۱۸
۰/۳۴	۰/۲۵	-۰/۲۶	۰/۲۵	-۰/۲۶
۲/۸	۲/۶	-۰/۰۷۱	۲/۳	-۰/۱۷
۰/۲	۰/۱۱	-۰/۴۵	۰/۱۱	-۰/۴۵
۴/۹	۶/۲	۰/۲۶	۵/۵۱	۰/۱۲

مقادیر رواناب مشاهداتی و احتمال تجاوز برآورد شده بر روی یک نمودار ترسیم گردیدند (شکل ۹). همچنین از جذر میانگین مربعات خطا و ضریب مقدار باقیمانده برای مقایسه مقادیر احتمالات برآورد شده از دو مدل با احتمالات مقادیر مشاهداتی استفاده گردید.



می‌شود توابع چگالی احتمال تئوری مدت و مقدار و مدت زمان بین وقایع بارش دارای برازش خوبی با مقادیر مشاهداتی است که این موضوع بیانگر مناسب بودن انتخاب متغیرهای مدت و مقدار و مدت زمان بین وقایع بارش در مدل‌های تحلیلی است. در ساختار مدل‌های تحلیلی مشروحه این فرض در نظر گرفته شده بود که در مناطق شهری کل رواناب ایجاد شده به داخل شبکه زهکشی شهری تخلیه می‌شود و تمامی سطوح نفوذپذیر و نفوذ ناپذیر در تولید رواناب مشارکت می‌نمایند در حالی که بخشی از رواناب تولید شده در این سطوح به سیستم زهکشی تخلیه نمی‌گردند. از آن جایی که تعیین دقیق نسبتی از سطوح نفوذپذیر و نفوذ ناپذیر که رواناب خود را به سیستم زهکشی تخلیه می‌نمایند به اندازه‌گیری‌های صحرایی دقیق نیاز داشته و زمان بر است، لذا در این تحقیق مساحت سطوح نفوذ ناپذیری که در پایین دست آنها سطوح نفوذپذیر قرار گرفته و به سمت این سطوح شیب دارند محاسبه شد و از کل سطح نفوذناپذیر منطقه کسر گردید و همچنین مساحت مکان‌های نفوذپذیری که شیب آنها به سمت سیستم زهکشی منطقه نیست نیز از کل سطح نفوذپذیر منطقه کسر گردید و رواناب و احتمال تجاوز از مقدار آن با استفاده از فرمول‌های هر دو مدل برآورد گردید.

در این تحقیق به منظور مقایسه رواناب برآورد شده از دو مدل با مقادیر مشاهداتی ضرایب همبستگی، مقدار جذر میانگین مربعات خطاها و ضریب مقدار باقیمانده و ضریب کارایی مدل‌ها به دست آورده شد که همان گونه که در جدول ۵ دیده می‌شود بالا بودن مقدار ضریب کارایی مدل‌ها (بیشتر از ۰/۸) و کوچک بودن مقادیر RMSE و نزدیک به صفر بودن مقادیر CRM همه تأیید کننده دقت نتایج دو مدل است. همچنین ضرایب همبستگی بین مقادیر مشاهده شده و برآورد شده از دو مدل نیز بیشتر از ۰/۹ است که بالا بودن

۳- نتایج و بحث

با تجزیه و تحلیل مقادیر بارش، توابع چگالی احتمال تئوری و مشاهداتی متغیرهای مدت و مقدار و مدت زمان بین وقایع بارش به دست آورده شد و از آنجایی که انطباق خوبی بین فراوانی مقادیر مشاهده شده و منحنی برآورد شده وجود داشت لذا پارامترهای به دست آمده از منحنی تئوری در مدل‌های تحلیلی مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۲). همان‌طور که در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ دیده

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق مدل‌های تحلیلی برای برآورد رواناب شهری استفاده گردید. در نظر گرفتن کل سطوح نفوذناپذیر در ساختار مدل‌های تحلیلی منجر به برآورد بیش از حد مقدار رواناب موجود در سیستم زهکشی می‌گردد به این منظور در ساختار مدل‌های تحلیلی به جای نسبت سطوح نفوذناپذیر حوزه، بخشی از سطوح نفوذناپذیر که رواناب خود را به سیستم زهکشی تخلیه می‌نمایند در نظر گرفته شد و همچنین به جای کل سطوح نفوذناپذیر، بخشی از آن که با توجه به شیب به سیستم زهکشی مرتبط هستند در نظر گرفته شد. شاخصهای ارزیابی مورد استفاده در این تحقیق گویای کارآمدی نتایج هر دو مدل تحلیلی در برآورد مقدار رواناب بودند. مقایسه احتمالات برآورد شده از دو مدل با مقادیر مشاهداتی نیز بیانگر آن است که دو مدل دارای دقت نسبتاً خوبی در برآورد احتمالات هستند. در نتیجه مدل‌های تحلیلی مذکور با تعداد پارامترهای محدود و با ساده‌ترین روش، نتایج قابل قبولی را ارائه می‌نمایند.

از آنجایی که در بیشتر مناطق شهری، ایستگاه هیدرومتری برای اندازه‌گیری رواناب وجود ندارد و تعیین دقیق ضریب رواناب در بیشتر حوزه‌های آبخیز شهری امکان‌پذیر نیست، استفاده از مدل تحلیلی بر اساس ضریب رواناب محدود می‌گردد در صورتی که مدل تحلیلی بر اساس نفوذپذیری به آمار ثبت شده رواناب منطقه نیاز ندارد و تنها با داشتن خصوصیات نفوذپذیری خاک منطقه و اطلاعات بارش می‌توان نتایج نسبتاً دقیقی را به دست آورد.

ضرایب همبستگی دو مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده بیانگر دقت خوب هر دو مدل تحلیلی در برآورد رواناب در منطقه مورد نظر است. حداکثر قدر مطلق خطای نسبی دو مدل نسبت به مقادیر مشاهداتی نیز ۰/۴۵ است که نشان می‌دهد با توجه به داده‌های بارش و رواناب اندازه‌گیری شده، دو مدل دارای دقت مشابهی در برآورد رواناب هستند. اما لازم به ذکر است در مدل تحلیلی که بر اساس ضریب رواناب است، تعیین ضریب رواناب بدون اندازه‌گیری‌های مکرر در منطقه، دقیق نیست و از آنجایی که بیشتر مناطق شهری فاقد ایستگاه هیدرومتری هستند، لذا استفاده از این مدل محدود می‌گردد. در صورتی که در مدل تحلیلی بر اساس نفوذپذیری تنها با داشتن خصوصیات بارش منطقه و تعیین پارامترهای نفوذپذیری می‌توان رواناب منطقه را برآورد نمود.

در رابطه با احتمال تجاوز از مقدار رواناب نیز مقدار برآورد شده از هر دو مدل با مقادیر احتمالاتی به دست آمده از ۱۱ واقعه بارش مورد مقایسه قرار گرفت که احتمالات برآورد شده از مدل تحلیلی بر اساس نفوذپذیری دارای مقادیر $CRM = -0/43$ و $RMSE = 0/034$ نسبت به احتمالات مشاهده بود و مدل تحلیلی بر اساس ضریب رواناب دارای مقادیر $CRM = -0/44$ و $RMSE = 0/035$ بود که کوچک بودن این مقادیر بیانگر دقت مدل‌ها در برآورد احتمالات است. اما از آنجایی که در منطقه، ایستگاه هیدرومتری وجود ندارد و آمار طولانی مدت رواناب موجود نیست، نمی‌توان قضاوت قطعی در این باره نمود.

۵- مراجع

- 1-Benjamin, J. R., and Cornell, C. A. (1970). *Probability, statistics and decision for civil engineers*, McGraw-Hill, New York.
- 2-Eagleson, P. S. (1972). "Dynamics of flood frequency." *Water Resources Research*, 8 (4), 878-897.
- 3-Eagleson, P. S. (1978). "The distribution of annual precipitation derived from observed storm sequences." *Water Resources Research*, 14 (5), 713-721.
- 4-Howard, C. D. D. (1976). "Theory of storage and treatment plant overflows." *J. of Environmental Engineering*, 102, 709-722.
- 5-Loganathan, G. V., and Delleur, J. W. (1984). "Effects of urbanization on frequencies of overflows and pollutant loadings from storm sewer overflows: A derived distribution approach." *Water Resources Research*, 20 (7), 857-865.
- 6-Loganathan, G. V., Delleur, J. W., and Segarra, R. (1985). "Planning detention storage for stormwater management." *J. of Water Resources Planning and Management*, 111 (4), 382-398.
- 7-Gottschalk, L., and Weingartner, R. (1998). "Distribution of peak flow derived from a distribution of rainfall volume and runoff coefficient, and a unit hydrograph." *J. Hydrology*, 208, 148-162.
- 8-Rivera, P. (2005). "An analytical model for hydrologic analysis in urban watersheds." *International Conference on Urban Drainage*, Copenhagen, Denmark, 21-26.

- 9-Chen, J., and Adamas, B. (2007). "Development of analytical models for estimation of urban stormwater runoff." *J. of Hydrology*, 336, 458-469.
- 10-Rossmann, L. (2008). *Storm water management model user's manual Version 5.0*, Water Supply and Water Resources Division National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development U.S Environmental Protection Agency, EPA/600/R-05/040, USA.
- 11- Afshin Sharifan, R., Roshan, A., and Oji, M.M. (1387). "The application of SWMM for designing and evaluating of collection and depletion network of urban surface runoff." *7th Conference of Iran Hydraulic*, Shahid Abbaspoor Water and Electricity University, Tehran.
- 12- Parvinnia, M., Rakhshandehroo, Gh., and Monajemi, P. (2008). "Investigation of quality and reclamation of urban storm runoff in city of Shiraz." *J. of Water and Wastewater*, 66, 46-54. (In Persian)
- 13- District No. 22 of Tehran City Municipality. (2002). *The studies of collecting surface runoff in District No. 22 of Tehran City Report*, Jihad Water and Watershed Management Research, Iran
- 14- UDFCD. (2001). *Urban storm drainage criteria manual*, Urban Drainage and Flood Control District Denver, CO. Colorado. USA.