Prediction of Event Mean Concentration (EMC) of Pollutants from Urban Catchments

Boroumand - Nasab, S.

Department of Irrigation and Development, College of Agriculture, Shahid Chamran University.

ABSTRACT

Event Mean Concentration may be used for estimating the effects of urbanisation on pollutant washoff. This parameter can be obtained by more simpler and cheaper means than discrete sampling. Estimation of EMC of pollutant washoff may be one of the major research areas in urban storm water quality modelling. In the present study a deterministic equation for EMC estimation is derived. In this paper five urban catchments located in USA, are used for evaluating the perfomance of the developed EMC washoff algorithm.

From the results of verification, it is deduced that the model can reproduce TP EMC washoff in a acceptable range of error. The mean value for weighted average of 0.54 was obtained.

پیش‌بینی غلظت متوسط آلاینده‌های هر واقعه در حوضه‌های شهری

سعید برومند نسب *

چکیده:

غلظت متوسط آلاینده‌ها در هر واقعه بارندگی برای ارزیابی اثرات شهری شدن روی مقدار آلودگی شسته شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. اندازه گیری غلظت متوسط هر واقعه ساده‌تر و ارزانتر از نمونه‌برداری انفرادی در طول یک دوره بارندگی است. تخمین غلظت متوسط یک آلاینده در هر واقعه (EMC) یکی از شاخه‌های اصلی مدل‌سازی کیفیت رواناب در حوضه‌های شهری است. در این تحقیق یک معادله معین برای تخمین EMC ارائه شده است. جهت ارزیابی مدل ارائه شده، پنج حوضه شهری واقع در آمریکا به کار گرفته شده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که مدل ارائه شده می‌تواند غلظت متوسط هر واقعه را برای مقدارکل فسفر موجود در رواناب به طور متوسط با ۵۴٪ تقریب تخمین بزند.

مقدمه

غلظت متوسط یک پارامتر آلودگی در هر واقعه[1] (EMC)[2] عبارت است از میزان آلودگی مورد نظر تقسیم بر حجم رواناب آن واقعه. EMC برای ارزیابی اثر شهری شدن[3] حوضه‌های روستایی روی میزان آلودگی شسته شده از حوضه به‌کارگرفته می‌شود. با توجه به اینکه نمونه‌برداری منفرد در هر واقعه وقت‌گیر و پرهزینه است، بنابراین نمونه‌برداری از متوسط غلظت هر پارامتر آلودگی در طول یک بارندگی منطقی به نظر می‌رسد. جهت تعیین EMC برای یک بارندگی، نمونه‌های رواناب در طول زمان نسبت به جریان لحظه‌ای رواناب جمع‌آوری می‌شوند. این نمونه‌ها با هم مخلوط شده و یک

* استادیار بخش آبیاری دانشگاه شهید چمران

1- Event
2- Event Mean Concentration
3- Urbanization

نمونه به عنوان شاخصی از غلظت پارامتر مورد نظر در آن واقعه در نظر گرفته می‌شود. بنابراین با داشتن غلظت متوسط آلودگی در هر واقعه می‌توان مقدار کل آلودگی شسته شده از حوضه را محاسبه نمود.

تعدادی از محققین متخصص در آلودگی رواناب‌های شهری یک توزیع احتمالی برای تخمین EMC پیشنهاد کرده‌اند [۳]. امّا در اکثر موارد توزیع لوگ نرمال برای برآورد EMC به کار گرفته می‌شود. اطلاعات به دست آمده برای تعدادی از پارامترهای آلودگی در چندین حوضه‌شهری در فرانسه نشان داد که توزیع لوگ‌نرمال برای تخمین EMC مناسب می‌باشد [۴]، اگرچه صحت این توزیع بستگی به طول مدت زمانی که اطلاعات به دست آمده دارد. با توجه به اینکه نمونه گیری آلودگی رواناب پرهزینه است، اطلاعات از دوره‌های زمانی کوتاه به دست آمده‌اند و مشکل عمده در مدل‌سازی EMC، کمبود اطلاعات کافی برای ایجاد مدلهای احتمالاتی است.

در مقاله حاضر یک معادله با زیربنای فیزیکی (معین)[1] از معادلات میزان آلودگی شسته شده استخراج شده است [۷]. این معادله ساده و کاربردی می‌باشد. برای تخمین EMC فقط از میزان رواناب تجمعی و تعداد روزهای خشک بین دو بارندگی در مدل استفاده می‌شود.

پایه‌های نظری معادله ارائه شده برای تخمین EMC

بر اساس این فرضیه که " مقدار آلودگی شسته شده از حوضه بستگی به مقدار این مواد و توزیع آنها در سطح حوضه دارد، معادله‌ای برای تخمین میزان آلودگی شسته شده از حوضه به صورت زیر ارائه شده است [۷]:

$$P_o - P = P_o (1-e^{-Kv^a}) \qquad (۱)$$

که :

$P_o - P$ = آلودگی شسته شده، Kg

P_o = بار آلودگی اولیه در حوضه، Kg

v = عمق تجمعی رواناب، mm

K = ضریب معادله

a = نمای معادله

غلظت متوسط آلودگی برای هر واقعه به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$EMC = \frac{\int_o^{V_o} C \, dV_o}{V_o} \qquad (۲)$$

که EMC غلظت متوسط آلودگی برای هر واقعه بر حسب mg/L، C غلظت آلودگی در هر فاصله زمانی بر حسب mg/L و V_o حجم رواناب بر حسب لیتر می‌باشد. عبارت ($\int_o^{V_o} C \, dV_o$) معادل کل بار آلودگی شسته شده است یا:

$$\int_o^{V_o} C \, dV_o = \frac{P_o - P}{10^{-6}} \qquad (۳)$$

که در اینجا " $P_o - P$ " کل آلودگی شسته شده بر حسب کیلوگرم و

$$V_o = 10^4 \, v \times A \qquad (۴)$$

که v عمق تجمعی رواناب بر حسب میلیمتر و A سطح حوضه بر حسب هکتار می‌باشد.

با جایگذاری $\int_o^{V_o} C \, dV_o$ و V_o از معادلات (۳) و (۴) در معادله (۲) معادله زیر نتیجه می‌شود:

$$EMC = \frac{100 (P_o - P)}{v \times A} \qquad (۵)$$

با جایگذاری $P_o - P$ از معادله (۱) در معادله (۵)، EMC از معادله زیر تخمین زده می‌شود:

$$EMC = \frac{100 \, P_o \, (1-e^{-Kv^a})}{v \times A} \qquad (۶)$$

برای تخمین بار آلودگی اولیه در سطح حوضه می‌توان از یک تابع نمایی استفاده کرد [۱]:

$$P_o = P_m (1-e^{-xt}) \qquad (۷)$$

که P_m حداکثر آلودگی تجمع یافته در سطح حوضه بر حسب Kg، x شدت ثابت آلودگی حرکت کرده از سطح حوضه بر حسب $\frac{1}{\text{روز}}$ و t تعداد روزهای خشک بین دو بارندگی است.

1- Deterministic

جدول (۱) مشخصات حوضه‌های مورد ارزیابی

نام حوضه آبریز	محل	مساحت (ha)	درصد شهری حوضه %	نفوذناپذیری (%)	کاربری حوضه	تعداد وقایع	دامنه رواناب (mm)
بلزکانیون‌کاندیت سندی[1]	یوتا	۲۵/۹	۵۲	۱۰۰	مسکونی نیمه‌متراکم	۱۳	۰/۶-۳
ناحیه‌هانی‌گریک، وست‌آلیس[2]	ویسکانسین	۱۰/۵	۷۷	۱۰۰	تجاری	۹	۳/۵-۲۳/۲
ناحیه‌لینکولن، خیابان ۰۴۰۸۶۹۴۳ میلواکی[3]	ویسکانسین	۵/۳	۹۹	۱۰۰	تجاری	۹	۳-۱۸
ناحیه‌لینکولن CK، خیابان ۰۴۰۸۶۹۴۵، میلواکی[4]	ویسکانسین	۵/۳	۹۸	۱۰۰	تجاری	۹	۳/۴-۱۸/۵
ناحیه رودخانه منومونی وست‌آلیس[5]	ویسکانسین	۱۸/۲	۸۱	۱۰۰	تجاری	۹	۲/۸-۲۱/۴

با جایگذاری P_o از معادله (۷) در معادله (۶)، معادله نهایی تخمین EMC به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$EMC = \frac{100 \, P_m}{v} (1-e^{-Kv^a}) (1-e^{-xt}) \qquad (۸)$$

در رابطه (۸)، EMC تابعی از P_m، ضرایب K، a و x، v عمق تجمعی رواناب و t تعداد روزهای خشک (t) می‌باشد.

نمای " a " بر اساس درصد نفوذناپذیری حوضه (Imp)[6] برای TP (کل فسفر) به دست آمده است [۱]:

$$a = -0/006 \, Imp + 1/286 \qquad (۹)$$

مقدار حداکثر آلودگی تجمع یافته بستگی به کاربری اراضی دارد. در معادله به دست آمده، EMC مستقیماً بستگی به روزهای خشک بین دو واقعه بارندگی دارد. مطالعات انجام شده توسط چویی [۲] نیز نشان داد که وقایع بارندگی با تعداد روزهای خشک رابطه مستقیم دارد، یعنی روزهای خشک بیشتر عموماً EMC بزرگتری نسبت به روزهای خشک کمتر دارد.

کاربرد مدل EMC

اطلاعات کمی و کیفی به دست آمده از ۵ حوضه در آمریکا شامل میزان رواناب و غلظت فسفر برای ارزیابی کارآئی مدل EMC به کار گرفته شده است. آمار مورد نیاز از بانک اطلاعاتی USGS[7] استخراج شده است [۵]. کاربری اراضی در حوضه‌های مورد استفاده بیشتر تجاری بوده است. در این ارزیابی فقط حوضه‌هایی انتخاب شده‌اند که نمونه‌های برداشت شده شاخصی از متوسط غلظت رواناب کل واقعه بوده است. مشخصات حوضه‌های مورد ارزیابی در جدول (۱) آمده است.

واسنجی و تأیید مدل

واسنجی[8] و تأیید مدل[9] EMC انجام شده است. در

1- Bells Canyon Conduit, Sandy
2- Honey Creek Tributary, West Allis
3- Lincoln Creek Tributary, St.04086943,Milwaukee
4- Lincoln Creek Tributary,St.04086945,Milwaukee
5- Menomonee River Tributary, West Allis
6- Impermeability
7- United States Geological Survey
8- Calibration
9- Verification

جدول (۲) پارامترهای واسنجی شده

نام حوضهٔ آبریز	تعداد وقایع	P_m(Kg/ha)	x(day^{-1})	K	a
بلزکانیون کاندیت، سندی	۷	۴/۲۶	۰/۰۷۰	۰/۰۰۱	۰/۹۷۲
ناحیه هانی گریک، وست آلیس	۵	۳۴/۳۶۶	۰/۳۳۹	۰/۰۰۰۱۹	۰/۸۳
ناحیه لینکولن، خیابان ۰۴۰۸۶۹۴۳، میلواکی	۵	۶۲/۰۵	۰/۱۲۸	۰/۰۰۰۰۸۹	۰/۶۹۸
ناحیه لینکولن CK، خیابان ۰۴۰۸۶۹۴۵، میلواکی	۵	۷۱/۹۲	۰/۲۷۹	۰/۰۰۰۰۶	۰/۷۰۴
ناحیه رودخانه منومونی، وست آلیس	۵	۷۷/۶۸	۰/۳۹	۰/۰۰۰۱	۰/۸۰۶

واسنجی مدل از ۵ پارامتر زیر استفاده شده است:

۱- کل رواناب واقعه (V)

۲- تعداد روزهای خشک (t)

۳- درصد نفوذناپذیری حوضه (Imp)

۴- نمای "a"

۵- مقادیر اولیه P_m و ضرائب x و K در مدل EMC

واسنجی مدل با پارامترها و اطلاعات ذکر شده در بالا انجام شد. اطلاعات مورد نیاز برای تخمین EMC به سادگی قابل دسترسی است. پارامترهای استفاده شده در مدل پیشنهادی در مقایسه با پارامترهای مورد نیاز روشهای شبیه‌سازی آلوده‌نگار[1] قابل اندازه گیری و ساده‌تر است.

پارامترهای واسنجی

واسنجی مدل توسط بخش غیر خطی نرم‌افزار SAS[2] [۶] انجام شد. بخش غیرخطی نرم‌افزار SAS شامل روش حداقل مجذورات در تخمین پارامترهای مجهول با استفاده از روش تکرار محاسبات می‌باشد.

پارامترهای استفاده شده در معادله پیشنهادی (معادله ۸) P_m، x، K و a هستند. نمای "a" با استفاده از معادله (۹) به دست می‌آید. سه پارامتر دیگر به وسیله واسنجی مدل تعیین می‌شوند. پارامترهای واسنجی شده برای حوضه‌های مورد ارزیابی در جدول (۲) نشان داده‌شده‌اند.

پارامترهای واسنجی شده در حوضه‌های مورد ارزیابی متغیر هستند. مقادیر P_m از ۴۲/۶ تا ۷۷/۶۸، x از ۰/۷ تا ۰/۳۹ و K از ۰/۰۰۰۰۹ تا ۰/۰۰۱ می‌باشند. کمترین و بیشترین مقادیر پارامترهای تجمع آلودگی (P_m و x) به ترتیب مربوط به حوضه‌های بلزکانیون و رودخانه منومونی می‌باشد. بیشترین مقدار K مربوط به حوضه بلزکانیون است. ارزیابی جدول (۲) نشان می‌دهد که پارامترهای مدل روی همدیگر اثر متقابل دارند. برای مثال اگر پارامترهای P_m و x افزایش پیداکنند، K کاهش پیدا می‌کند تا مقدار مناسب EMC به دست آید.

تغییرات نمای "x" نشان می‌دهد که روزهای خشک مختلفی در واسنجی مدل مورد نیاز است تا برای هر حوضه مقدار حداکثر آلودگی تجمع یافته (P_m) تعیین شود. برای مثال مقدار "x" معادل ۰/۰۷ برای حوضه بلزکانیون نشان می‌دهد که ۹۰٪ مقدار P_m در مدت ۳۲/۵ روز تجمع پیدا می‌کند. در حالی که برای حوضه رودخانه منومونی ۹۰٪ مقدار P_m فقط در مدت ۶ روز تجمع پیدا می‌کند.

نتایج واسنجی مدل

اطلاعات به دست آمده برای هر حوضه به دو قسمت تفکیک شده‌اند. اولین قسمت از اطلاعات برای واسنجی و بقیه برای تأیید مدل پیشنهادی EMC در نظر گرفته شده‌اند. برای هر کدام از بخش‌های واسنجی و تأیید مدل تعدادی از وقایع به

1- Pollutograph Simulation

2- Statistical Analysis System

صورت تصادفی انتخاب شده و سعی شده که در هرکدام از این بخش‌ها رواناب‌هایی با عمق کم و زیاد وجود داشته باشد.

هدف از واسنجی به دست آوردن نتایج نزدیک بین مقادیر EMC اندازه گیری شده و پیش‌بینی شده به طور متوسط در تمامی وقایعی است که برای واسنجی استفاده می‌شوند. واسنجی نسبت به شرایط متوسط باعث کاهش خطاهای محاسباتی و افزایش اعتماد به نتایج می‌شود. دو پارامتر خطای نسبی و خطای مطلق برای ارزیابی نتایج در نظرگرفته شده است. این دو پارامتر به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$RE = \frac{\text{مقدار پیش‌بینی شده} - \text{مقدار اندازه‌گیری شده}}{\text{مقدار اندازه‌گیری شده}} \quad (۱۰)$$

$$AE = \left| \frac{\text{مقدار پیش‌بینی شده} - \text{مقدار اندازه‌گیری شده}}{\text{مقدار اندازه‌گیری شده}} \right| \quad (۱۱)$$

برای مجموعه‌ای از اطلاعات در هر واقعه، مقدار محاسبه شده "AE" نزدیک به صفر نشان‌دهنده دقت بیشتر در پیش‌بینی است. پارامتر "RE" نشان‌دهنده تفاوت بین مقادیر اندازه گیری شده و پیش‌بینی شده با منظورکردن علامت تفاوت است. نتایج کاربرد مدل پیشنهادی EMC با پارامترهای "AE" و "RE" به صورت متوسط مقدار "AE" و همچنین پارامتر "RE" به صورت دامنه تغییرات "RE" و میانگین وزنی پارامتر "AE" برای تمام حوضه‌ها نشان داده شده است.

اطلاعات به دست آمده از EMC شامل جمع‌آوری نمونه‌های آب در طول واقعه بارندگی و مخلوط کردن آنها به نسبت میزان دبی رواناب می‌باشد. بنابراین برای هر واقعه بارندگی فقط یک نمونه آب برای تعیین پارامترهای مختلف آلودگی به‌کارگرفته شده است. این روش دارای خطای بیشتری در مقایسه با روش استفاده از تعداد زیادی نمونه آب در طول بارندگی است. بنابراین در واسنجی EMC مقدار "AE" معادل یا کمتر از ۴۰٪ می‌تواند قابل قبول باشد [۱].

برای واسنجی مدل EMC از بیست و هفت واقعه در ۵ حوضه استفاده شده است. پارامتر آلودگی مورد ارزیابی کل فسفر موجود در رواناب سطحی بوده است. دامنه تغییرات "RE" و متوسط مقادیر "AE" برای حوضه‌های مورد ارزیابی در جدول (۳) نشان داده شده است. بازبینی دامنه تغییرات "RE" نشان می‌دهد که مدل مقدار EMC را در پاره‌ای از موارد بیشتر از مقادیر اندازه گیری شده و برای تعدادی از وقایع کمتر از مقادیر اندازه گیری شده، پیش‌بینی کرده است. دامنه تغییرات "AE" بین ۰/۳۶ تا ۰/۵۸ با میانگین وزنی ۰/۳۴ در حوضه‌های مورد ارزیابی است که نشان‌دهنده واسنجی رضایتبخش مدل است.

نتایج تأیید مدل

نتایج تأیید مدل نشان‌دهنده پیش‌بینی مقادیر EMC با استفاده از پارامترهای واسنجی شده بدون استفاده از اطلاعات اندازه گیری شده آلودگی می‌باشد. تأیید مدل EMC برای وقایعی غیر از آنهایی که برای واسنجی به‌کارگرفته شده بود، انجام شده است. بیش از ۵۰٪ وقایع برای واسنجی و بقیه برای تأیید مدل استفاده شده است.

جدول ۳ - نتایج واسنجی مدل

نام حوضهٔ آبریز	تعداد وقایع	RE	AE
بلزکانیون کاندیت، سندی	۷	۰/۵۹- تا ۰/۴۶	۰/۲۶
ناحیه هانی گریک، وست آلیس	۵	۱/۰۵- تا ۰/۴۶	۰/۴۵
ناحیه لینکولن، خیابان ۰۴۰۸۶۹۴۳، میلواکی	۵	۰/۵۰- تا ۰/۱۰	۰/۱۴
ناحیه لینکولن Ck، خیابان ۰۴۰۸۶۹۴۵، میلواکی	۵	۰/۵۰- تا ۰/۳۳	۰/۳۱
ناحیه رودخانه منومونی، وست آلیس	۵	۱/۲۸- تا ۰/۴۸	۰/۵۸
میانگین وزنی			۰/۳۴

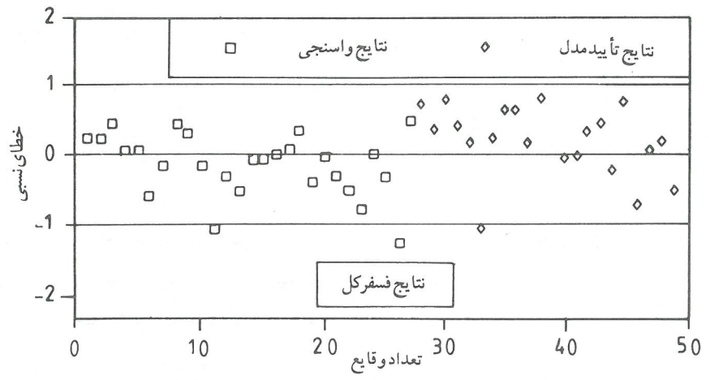
جدول (۴) نتایج تأیید مدل EMC

نام حوضهٔ آبریز	تعداد وقایع	RE	AE
بلزکانیون کاندیت، سندی	۶	۰/۸۱ تا ۱/۰۶-	۰/۶۰
ناحیه هانی گریک، وست آلیس	۴	۰/۶۵ تا ۰/۱۷	۰/۴۳
ناحیه لینکولن، خیابان ۰۴۰۸۶۹۴۳، میلواکی	۴	۰/۸۲ تا ۲/۳۲-	۰/۸۱
ناحیه لینکولن Ck، خیابان ۰۴۰۸۶۹۴۵، میلواکی	۴	۰/۷۳ تا ۰/۲۵-	۰/۴۴
ناحیه رودخانه منومونی، وست آلیس	۴	۰/۱۹ تا ۰/۷۲-	۰/۳۹
میانگین وزنی			۰/۵۴

تأیید مدل با استفاده از بیست و دو واقعه در ۵ حوضه شهری انجام شد. خطای نسبی " RE " و خطای مطلق " AE " برای ارزیابی مدل پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است. خطای نمونه‌برداری منفرد کیفیت آب در بهترین شرایط حدود ۳۰٪± برآورد شده است. همان‌طوری که قبلاً اشاره شد خطای نمونه‌برداری ترکیبی بیش از نمونه‌برداری منفرد است. بنابراین برای تأیید مدل مقدار " AE " ۸۰٪ یا کمتر مورد قبول است [۱].

جدول (۴) نتایج تأیید مدل را نشان می‌دهد. میانگین وزنی در خطای نسبی بین مقادیر اندازه گیری شده غلظت کل فسفر در رواناب بین ۰/۳۹ تا ۰/۸۱ متغیر است. از نتایج تأیید مدل چنین نتیجه گیری می‌شود که مدل EMC برای تخمین TP در دامنه خطای قابل قبولی قرار دارد.

برای ارائه ارزیابی بهتر از توانایی مدل نتایج در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱) ارزیابی نتایج پیش‌بینی شده مدل EMC

نتیجه گیری

چهل و نه واقعه از ۵ حوضه شهری برای ارزیابی مدل پیشنهادی EMC به‌کارگرفته شد. پارامتر آلودگی، فسفرکل بود. واسنجی مدل شامل ۲۷ واقعه در این حوضه‌ها بود. مقادیر " AE " به دست آمده نشان‌دهنده واسنجی موفقیت‌آمیز مدل است.

تأیید مدل با ۲۲ واقعه از ۵ حوضه یاد شده انجام شد. توانایی مدل در تخمین EMC نسبتاً خوب بود. بر اساس پارامترهای مجهول در مدل حداقل تعداد وقایع برای مدل ۵ واقعه پیشنهاد می‌شود. پس از واسنجی، مدل می‌تواند مقدار آلودگی شسته شده با دوره‌های برگشت مختلف را تخمین بزند که باعث می‌شود تا هزینه‌های تهیه اطلاعات کاهش یابد.

نتایج نشان می‌دهد که باید پارامترهای P_m ،x و K با اطلاعات منطقه‌ای واسنجی شوند. دقت در پیش‌بینی توسط مدل می‌تواند با افزایش دورهٔ زمانی جمع‌آوری اطلاعات و آمار افزایش یابد.

مراجع و منابع

1- Boroumand - Nasab, S. (1994). " *Stormwater Quality Modelling of Urban Catchments* ", Ph. D Thesis, University of Wollongong, Wollongong, Australia, Vol. 1, 270 P.

2- Chui, P.C. (1993). " *Urban Runoff Characteristics of a Tropical Watershed* ", Proc. 6th Int. Conf. on Urban Storm Drainage, Ontario, Canada, Marsalek, J. and Torno, H.C. (eds), Vol. I, Sep. 12-17, pp. 694-699.

3- Driscoll, E.D. (1986). " *Lognormality of Point and Nonpoint Source Pollutant Concentrations* ", Proc. Stormwater and Water Quality Model, Users Group Meeting, Orlando, Florida, pp. 157-176.

4- Hemain, J.C. (1985). " *Statistically Based Modelling of Urban Runoff Quality: State of the Art*", NATO Workshop on Urban Runoff Pollution, Torno, H.C., Marsalek, J. and Desbordes, M. (eds), Montpellier, France, Aug. 26-30, pp. 277-303.

5- Mustard, M.H., Driver, N.E. Chyr, J. and Hansen B.G. (1987). " *US Geological Survey Urban - Stomwater Data Base of Constituent Storm Loads, Characteristics of Rainfall, Runoff, and Antecedent Conditions, and Basin Characteristics* ", US Geological Survey, Water Resources Investingations Report 87-4036, 328p.

6- SAS Institute Inc. (1988) " *SAS User's Guide. Statistics, Version 5 Edition* ", Cary, North Carolina, SAS Institute Inc.

7- Sivakumar, M., and Boroumand- Nasab, S. (1993). " *Urban Storm Water Quality Modelling of NOx and TP Pollutant Loads* ", Proc Int. Conf. of Environmental Management: Geo-Water and Engineering Aspects, Wollongong Universtiy, Wollongong, N.S.W. Australia, R.N. Chowdhury and M. Sivakumar (eds), Balkema, pp. 207-212.