

## کاربرد مدل‌های رگرسیونی در برآورد بار آلودگی رواناب شهری<sup>۱</sup>

نعمت‌آ... خراسانی<sup>۲</sup> افسانه شهبازی<sup>۳</sup> مجید سرتاج<sup>۴</sup> کاظم نصرتی<sup>۵</sup>

### چکیده

در نواحی شهری، در نتیجه افزایش سطوح نفوذناپذیر، حجم زیادی از بارندگی به صورت رواناب به منابع پذیرنده (شامل آب‌های سطحی و زیرزمینی) انتقال می‌یابد. به طور کلی منظور از رواناب‌های شهری آب‌هایی است که در سطوح شهری در اثر بارش باران و یا آب حاصل از ذوب برف تولید و با توجه به حمل زیاد بار رسوبی از مهم‌ترین منابع آلوده‌کننده آب‌ها محسوب می‌گردد. در این تحقیق با نمونه‌گیری لحظه‌ای از رواناب خروجی یکی از حوضه‌های شهر اصفهان در ۱۳ رخداده بارندگی در فصل‌های پاییز و زمستان ۱۳۸۱ و اندازه‌گیری ۱۰ پارامتر کیفی و کمی رواناب به بررسی کیفیت رواناب پرداخته شد. به منظور مدل‌سازی بار آلودگی رواناب با استفاده از تکنیک‌های آماری چند متغیره چهار فاکتور اکسیژن خواهی شیمیایی، کل جامدات معلق، نیترات و دی‌متوسط جریان به عنوان عامل‌های اصلی برای ورود به مدل رگرسیونی شناخته و مدل رگرسیونی مناسب با کمترین خطا (۰/۰۰۹) و بیشترین ضریب همبستگی (۰/۹۹۸) برای برآورد بار آلودگی رواناب خروجی ارائه شد. پارامترهای ورودی به مدل پارامترهای کل جامدات معلق و اکسیژن خواهی شیمیایی بود. در مرحله بعد به منظور صحت مدل با استفاده از داده‌های دو رخداد که در مدل شرکت داده نشدند، معیارهای خطا برآورد شدند که همگی دال بر کفایت و صحت مدل به دست آمده بود. با کمک این مدل می‌توان با اندازه‌گیری دو پارامتر ورودی مدل کل بار آلودگی رواناب خروجی را در رخداد‌های آتی برآورد نمود. همچنین مدل رگرسیونی دیگری بر اساس ویژگی‌های بارش ارائه شد که استفاده از آن بسیار راحت‌تر و ساده می‌باشد ولی از دقت کمتری برخوردار است.

نتایج این مطالعه می‌تواند برای مدیران منابع آب، برنامه‌ریزان شهری و مسئولین محیط زیست در برای کنترل آلودگی رودخانه زاینده رود و حفظ شرایط زیست محیطی آن و همچنین مدیریت صحیح رواناب‌های شهری مفید واقع گردد.

**واژه‌های کلیدی:** رواناب شهری، نمونه‌گیری لحظه‌ای، تکنیک‌های آماری چند متغیره، بار آلودگی، مدل رگرسیونی.

<sup>۱</sup> - تاریخ دریافت: ۸۷/۶/۲۲، تاریخ پذیرش: ۸۷/۱۰/۲۹

<sup>۲</sup> - استاد دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران (Email: Khorasani@ut.ac.ir)

<sup>۳</sup> - فارغ‌التحصیل کارشناس ارشد محیط زیست دانشگاه تهران

<sup>۴</sup> - عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی اصفهان

<sup>۵</sup> - عضو هیات علمی دانشکده کشاورزی داراب، دانشگاه شیراز

## مقدمه

به طور کلی منظور از رواناب‌های شهری آب‌هایی است که در سطوح شهری در اثر بارش باران و یا آب حاصل از ذوب برف تولید و به سمت منابع آب پذیرنده سرازیر می‌گردند. توسعه شهری به دو دلیل عمده زیر باعث افزایش مقدار آلاینده‌های موجود در رواناب‌های شهری می‌گردد:

۱- در نواحی شهری به دلیل تبدیل زمین‌های آزاد به خیابان، ساختمان، پارکینگ‌های بزرگ و مراکز تجاری و در نتیجه افزایش سطوح نفوذناپذیر، باعث می‌گردد که حجم زیادی از بارندگی، امکان و فرصت نفوذ در خاک را نیابد و ابتدا بر روی سطوح نفوذناپذیر شهری انباشته و سپس به سمت نواحی گود و پست شهر هجوم آورد (۸).

۲- دلیل دوم شدت کاربری اراضی در نواحی شهری و رهاسازی مقدار زیادی از مواد آلاینده گوناگون در محیط‌زیست می‌باشد (۱۰).

بر اساس نظر گرام<sup>۱</sup> و هانس<sup>۲</sup> (۱۹۹۷) هر گونه تغییر در ویژگی‌های طبیعی آب که اثر نامطلوبی بر سلامت محیط زیست، فعالیت‌های بشر و سایر جانداران داشته باشد آلودگی آب نامیده می‌شود. آلودگی رودخانه‌ها را بر مبنای منبع تولید کننده آنها به دو گروه تقسیم بندی می‌کنند که عبارتند از:

۱- آلودگی با منبع مشخص<sup>۳</sup> (آلودگی نقطه ای)،

۲- آلودگی با منبع نامشخص<sup>۴</sup> (آلودگی غیرنقطه‌ای).

رواناب‌های شهری جزء منابع آلاینده غیر نقطه‌ای رودخانه‌ها می‌باشند. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است رواناب‌های شهری<sup>۵</sup> ۲۰ درصد آلودگی رودخانه‌ها را شامل می‌گردند و بعد از رواناب‌های

کشاورزی به عنوان مهم‌ترین منابع غیر نقطه‌ای آلوده‌سازی منابع آب‌های پذیرنده (شامل آب‌های سطحی و زیرزمینی) مطرح می‌باشند. به منظور مقایسه بار آلودگی رواناب نواحی شهری، روستایی، تالابی و... اداره حفاظت محیط زیست آمریکا (U.S. EPA) در سال ۱۹۷۳ با یک پروژه تحقیقاتی به این نتیجه رسید که مقدار مواد معلق جامد<sup>۶</sup> (SS)، نیتروژن کل<sup>۷</sup> (TN)، خواست اکسیژن زیست شیمیایی (BOD<sub>5</sub>) و فلزات سنگین در رواناب‌های شهری بیشتر از نواحی کشتزار و مرغزارها می‌باشد.

آدامز<sup>۸</sup> و پاپا<sup>۹</sup> (۲۰۰۰) با نمونه‌گیری از رواناب خروجی یک حوضه شهری طی ۵۲ رخداد بارندگی و رسم منحنی‌های آبنگار و آلودگی‌نگار نشان داد که همواره منحنی آلودگی‌نگار سیر نزولی و منحنی آبنگار ابتدا سیر صعودی و سپس سیر نزولی داشته و منحنی آلودگی‌نگار زودتر از آبنگار به مقدار اوج خود رسیده است؛ به عبارت دیگر بار آلودگی بخش ابتدایی رواناب بیشتری می‌باشد و به تدریج کاهش می‌یابد در نتیجه در برآورد بار آلودگی رواناب خروجی بهتر است به جای غلظت لحظه‌ای آلاینده‌ها از غلظت متوسط هر آلاینده (EMC)<sup>۱۰</sup> استفاده گردد. متوسط غلظت هر آلاینده در هر رخداد (EMC) عبارت است از جرم کل آلاینده به کل حجم رواناب خروجی از حوضه. مسلماً EMC در میانگین زمانی خروج رواناب از حوضه اتفاق نمی‌افتد. تغییرات غلظت هر آلاینده در رواناب خروجی هر رخداد به ویژگی‌های مکانی و زمانی بارندگی بستگی دارد.

<sup>۱</sup>- Suspended Solids

<sup>۲</sup>- Total Nitrogen

<sup>۳</sup>- Adams

<sup>۴</sup>- Papa

<sup>۵</sup>- Event Mean Concentration

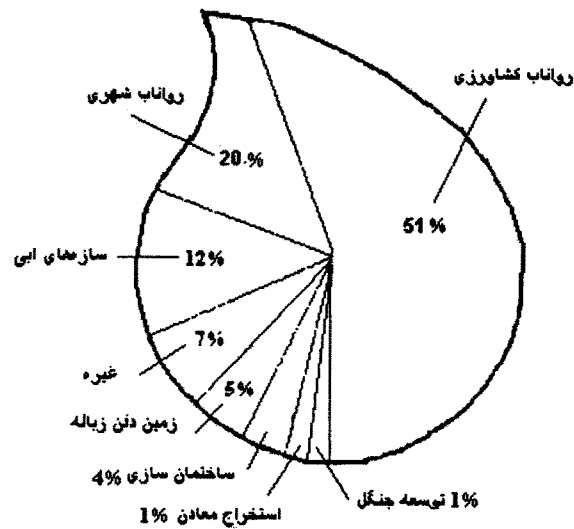
<sup>۱</sup>- Grum

<sup>۲</sup>- Hans

<sup>۳</sup>- Point Source Pollution

<sup>۴</sup>- Non-Point Source Pollution

<sup>۵</sup>- Urban Runoff



شکل ۱- منابع آلودگی رودخانه‌ها

انجام داد. او با استفاده از داده‌های کیفی و کمی مربوط به رواناب ۶۸ حوضه شامل شش پارامتر کیفی رواناب (خواست اکسیژن شیمیایی<sup>۴</sup> (COD)، کل جامدات معلق<sup>۵</sup> (TSS)، نیتروژن کل (TN)، کل نیتروژن آلی<sup>۶</sup> (TKN)، فسفر کل<sup>۷</sup> (TP)، فسفر محلول<sup>۸</sup> (DP)) و پارامترهای مدت بارش، شدت بارش و کل مساحت هر حوضه و با محاسبه ضرایب همبستگی بین هر پارامتر و بار آلودگی رواناب خروجی که به‌طور پیوسته از سال ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۸ اندازه‌گیری شده بودند به ارایه مدل رگرسیونی جهت برآورد بار آلودگی در هر رخداد بارندگی پرداخت. در این تحقیق به منظور رسیدن به مدیریت زیست محیطی مناسب در حوزه رودخانه زاینده رود اهداف زیر دنبال شده است:

الی<sup>۱</sup> (۱۹۸۱) مدل‌های رگرسیونی منطقه‌ای را بر اساس میانگین غلظت هر آلاینده در هر رخداد بارندگی، ویژگی‌های حوضه، کاربری اراضی و ویژگی‌های اقلیمی به منظور تخمین بار آلودگی رواناب خروجی ارایه داد. او به این نتیجه رسید که ساخت و به‌کارگیری مدل‌های رگرسیونی جهت تجزیه و تحلیل کیفیت و کمیت رواناب‌های شهری بسیار مفید و کارآمد می‌باشند. از جنبه علمی، مدل عبارت است از نماینده و نمایشگر ارتباط بین برخی از کمیت‌ها و کیفیت‌های معلوم و به عبارت دیگر مدل تجلی ارتباط بین کمیت‌ها و کیفیت‌های بخشی از جهان هستی به صورت فیزیکی یا ریاضی است؛ از این قرار، مدل‌ها روابط بین داده‌ها را به منظور پیش‌بینی چگونگی رویدادها در جهان واقعی تشریح می‌کنند (۹).

آندرل<sup>۲</sup> (۱۹۹۱) مطالعات گسترده‌ای روی آثار شهرنشینی بر کیفیت رواناب شهری در شهر توئین<sup>۳</sup> در ایالات آمریکا

<sup>۴</sup>- Chemical Oxygen Demand

<sup>۵</sup>- Total Suspended Solid

<sup>۶</sup>- Total Kjeldahl Nitrogen

<sup>۷</sup>- Total Phosphor

<sup>۸</sup>- Dissolved Phosphor

<sup>۱</sup>- Alley

<sup>۲</sup>- Anderel

<sup>۳</sup>- Twin

اصفهان جهت اندازه‌گیری پارامترهای کیفی شامل: COD, BOD<sub>5</sub>, pH, Cu, Zn, Pb, NO<sub>3</sub>, TP, TSS, EC و انتقال داده شدند. به منظور تعیین مهم‌ترین فلز سنگین در رواناب سطحی شهر اصفهان در اولین رخداد بارندگی عناصر روی، مس و سرب اندازه‌گیری شدند و با توجه به اینکه غلظت فلز سنگین سرب با اختلاف قابل توجهی نسبت به دو فلز دیگر غلظت بالاتری داشت عنصر سرب به عنوان مهم‌ترین فلز سنگین در رواناب سطحی شهر اصفهان تشخیص و در بقیه رخدادهای تنها فلز سرب اندازه‌گیری شد. در این مطالعه با در نظر گرفتن دبی جریان و ارتفاع رواناب حجم لحظه‌ای رواناب و از مجموع حجم لحظه‌ای رواناب و جرم‌های لحظه‌ای آلاینده‌ها به ترتیب کل حجم رواناب خروجی و جرم تجمعی برای هر آلاینده در هر رخداد محاسبه و از تقسیم این دو مقدار طبق رابطه (۱) غلظت متوسط آلاینده‌ها (EMC) در هر رخداد بر آورد گشت.

$$EMC \equiv \bar{C} = \frac{M}{V} = \frac{\int C(t)Q(t).dt}{\int Q(t).dt} \quad (1)$$

که در آن:

$C(t)$  = غلظت در فاصله زمانی  $t$  (mg/l),  $Q(t)$  = دبی در زمان  $t$  (m<sup>3</sup>/s),  $M$  = جرم آلاینده (mg),  $V$  = حجم رواناب (m<sup>3</sup>)

همچنین داده‌های مربوط به ارتفاع بارش و تعداد روزهای خشک قبل از هر بارندگی از اداره کل هواشناسی استان دریافت شد. به منظور برآورد کل بار آلودگی خروجی در هر رخداد از مجموع جرم تجمعی آلاینده‌ها، جرم کل آلاینده‌ها محاسبه و از تقسیم آن به حجم کل رواناب خروجی، کل بار آلودگی بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد.

تحلیل رگرسیون روشی آماری برای مدل‌سازی رابطه بین متغیرها است. در این تحقیق از رگرسیون خطی چندگانه گام به گام<sup>۱</sup> استفاده شد. در بسیاری از موارد،

بررسی کیفیت و تعیین نوع و غلظت آلاینده‌های موجود در رواناب یکی از حوزه‌های شهر اصفهان در هر بارش طی فصل‌های پاییز و زمستان ۱۳۸۱. همچنین آرایه مدل رگرسیون مناسب برای تخمین کل بار آلودگی رواناب خروجی حوزه به طوری که در هر بارندگی با اندازه‌گیری چند پارامتر مهم و به کارگیری آن‌ها در مدل به دست آمده بتوان بار آلودگی خروجی حوزه را برآورد نمود.

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق به طور موردی رواناب خروجی یکی از حوزه‌های شهر اصفهان به نام حوزه شیخ صدوق که به رودخانه زاینده‌رود تخلیه می‌گردد مورد بررسی قرار گرفت. این حوزه شهری به شش زیر حوزه تقسیم و مساحتی معادل ۶۰۰ هکتار دارد. در شکل (۲) موقعیت حوزه و محل تخلیه رواناب به رودخانه زاینده‌رود تصویر شده است.

در این مطالعه در فصل‌های پاییز و زمستان ۱۳۸۱ از ۱۳ رخداد بارندگی به صورت لحظه‌ای نمونه‌برداری شد. به طوری که در مواقع بارندگی در محل خروجی حوزه مستقر شده و در طول بارندگی و از زمان شروع خروج رواناب از حوزه، هر ۱۵ دقیقه نمونه‌گیری صورت گرفت. لازم به ذکر است برای نمونه‌برداری از ظروف دو لیتری پلاستیکی دهانه گشاد استفاده شد. در هر مرتبه نمونه‌برداری عمق رواناب خروجی نیز به وسیله خط‌کش بزرگی اندازه‌گیری و از آن در برآورد دبی لحظه‌ای با کاربرد روش مانینگ استفاده شد. چون در این روش تعداد نمونه‌ها در هر رخداد بارندگی زیاد است، بنابراین برای جلوگیری از هر گونه اشتباه بر روی هر ظرف نمونه، تاریخ نمونه‌برداری، شماره نمونه و عمق رواناب با مایک ضد آب نوشته شد. پس از اتمام خروج رواناب از حوضه و نمونه‌گیری، نمونه‌های جمع‌آوری شده در هر بارش در کوتاه‌ترین زمان به آزمایشگاه اداره کل محیط زیست

<sup>۱</sup>- Multiple Stepwise Linear Regression

بارش) و مقادیر اندازه‌گیری شده برای رخدادهایی که در مدل شرکت نکردند طبق رابطه زیر به دست آمد.

$$\text{درصد خطای نسبی} = \frac{|Load - \hat{Load}|}{Load} \times 100 \quad (2)$$

که در آن  $Load$ ، کل بار آلودگی اندازه‌گیری شده و  $\hat{Load}$  کل بار آلودگی برآوردی از طریق مدل می‌باشد. از میانگین مقادیر خطای نسبی می‌توان به عنوان یکی از راه‌های مقایسه کارایی مدل استفاده کرد. ب- میانگین خطای اریبی<sup>۲</sup> (MBE)

میانگین خطای اریبی از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Load - \hat{Load}) \quad (3)$$

از MBE می‌توان به عنوان معیار اریبی در ارزیابی مدل پیشنهادی استفاده کرد.

ج- جذر میانگین مربعات خطا<sup>۳</sup> (RMSE)

مقدار جذر میانگین مربعات خطا از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Load - \hat{Load})^2}{N}} \quad (4)$$

همچنین مقادیر درصد میانگین خطای اریبی نسبی و درصد جذر میانگین مربعات خطای نسبی که نسبت به میانگین مقادیر واقعی محاسبه می‌شوند، به منظور ارزیابی مدل‌های پیشنهادی در نظر گرفته شد.

## نتایج

در این مطالعه به منظور مقایسه صحیح متغیرها با همدیگر، کلیه آنها به نمرات استاندارد تبدیل شدند و

مجموعه متغیرهایی که می‌بایست در مدل رگرسیونی گنجانده شوند از پیش تعیین شده نیستند و غالباً بخش اولیه تجزیه و تحلیل، شامل انتخاب این متغیرها است. یکی از روش‌های مورد استفاده، تحلیل عاملی<sup>۱</sup> می‌باشد (۳). تحلیل عاملی (تجزیه به عامل‌ها) که برای اولین بار توسط اسپیرمن (۱۹۰۴) ابداع گردید تکنیک آماری چند متغیره است که بین مجموعه‌ای فراوان از متغیرهایی که به ظاهر بی‌ارتباط هستند، رابطه خاصی را با یک مدل فرضی برقرار می‌کند. یکی از اهداف اصلی تکنیک تجزیه عاملی، کاهش تعداد داده‌هاست و از این طریق می‌توان خلاصه‌ای از داده‌های اصلی را تهیه نمود. این روش دارای چندین مرحله است (۱) استاندارد کردن داده‌ها، (۲) تعیین ماتریس وزنی عاملی، (۳) انتخاب تعداد عامل‌ها، (۴) دوران عامل‌ها و (۵) امتیازات عاملی (سریواستواکارت، ۱۳۷۰). در این مطالعه برای انجام مراحل بالا از برنامه SPSS10.0 استفاده شد. همچنین داده‌های ۱۱ رخداد بارندگی در تجزیه و تحلیل مورد استفاده قرار گرفتند و بر دو اساس مدل‌های رگرسیونی تعیین شدند، یکی بر اساس پارامترهای حاصل از نتایج تحلیل عاملی و دیگری بر اساس ویژگی‌های بارش. داده‌های دو رخداد دیگر به منظور بررسی صحت و کفایت مدل‌ها از طریق محاسبه انواع خطا استفاده شدند. به منظور بررسی صحت مدل‌های ارایه شده مقادیر خطاهای برآوردی از طریق روش‌های مختلف به صورت زیر محاسبه شد (زهتابیان و همکاران، ۱۳۸۳).

الف- برآورد درصد خطای نسبی

مقدار درصد خطای نسبی برای کل بار آلودگی برآوردی از طریق مدل‌های پیشنهادی (مدل رگرسیونی بر اساس پارامترهای آلاینده و مدل رگرسیونی بر اساس ویژگی‌های

<sup>۱</sup> - Mean Bias Error

<sup>۲</sup> - Root Mean Square Error

<sup>۱</sup> - Factor Analysis

روزهای خشک قبل از هر بارندگی نشان داد که براساس ۴ عامل می‌توان مجموعاً ۹۲/۴ درصد از واریانس داده‌ها را توجیه کرد و بدین ترتیب اطلاعات حول ۴ عامل خلاصه می‌گردند. جدول (۱) مقادیر ویژه و واریانس توجیه شده را نشان می‌دهد.

نتایج تجزیه و تحلیل عاملی برای ۹ متغیر اندازه‌گیری شده در حوزه شهری مورد مطالعه شامل ویژگی‌های کیفی و کمی رواناب خروجی حوضه در هر بارش مانند خواست اکسیژن زیست شیمیایی، خواست اکسیژن شیمیایی، فسفر کل، نیترات، سرب، کل مواد جامد معلق، دبی متوسط و ویژگی‌های هر بارش از نظر ارتفاع و تعداد

جدول ۱- مقادیر ویژه و واریانس توجیه شده<sup>۱</sup>

مقادیر ویژه عوامل اصلی			مقادیر ویژه اولیه			عامل
درصد تجمعی	درصد واریانس	کل	درصد تجمعی	درصد واریانس	کل	
۴۳/۹۱۸	۴۳/۹۱۸	۳/۵۱۳	۴۳/۹۱۸	۴۳/۹۱۸	۳/۵۱۳	۱
۶۷/۱۰۳	۲۳/۱۸۵	۱/۸۵۵	۶۷/۱۰۳	۲۳/۱۸۵	۱/۸۵۵	۲
۸۵/۲۸۲	۱۸/۱۷۹	۱/۴۵۴	۸۵/۲۸۲	۱۸/۱۷۹	۱/۴۵۴	۳
۹۲/۴۲۲	۷/۱۴۰	۰/۵۷۱	۹۲/۴۲۲	۷/۱۴۰	۰/۵۷۱	۴
			۹۷/۹۵۹	۵/۵۳۷	۰/۴۴۳	۵
			۹۹/۸۷۱	۱/۹۱۳	۰/۱۵۳	۶
			۹۹/۹۷۰	۰/۰۹۸	۰/۰۰۷۸	۷
			۱۰۰/۰۰	۰/۰۳۰۲	۰/۰۰۲۴	۸

<sup>۱</sup> - Extraction Method: Principal Component Analysis

COD داده شد. به این ترتیب دو عامل دیگر یعنی  $NO_3$  و دبی متوسط جریان به ترتیب با توجیه ۱۸/۱ و ۷/۱ در صد از کل واریانس با بارهای وزنی ۰/۸۸۶ و ۰/۹۵۱ به عنوان عامل‌های سوم و چهارم انتخاب شدند.

با توجه به جدول (۲) ماتریس دورانی واریماکس TSS با بیشترین بار وزنی (۰/۹۷۰) روی عامل اول و توجیه بیشترین درصد از کل واریانس یعنی مقدار ۴۳/۹ به عنوان فاکتور اول انتخاب شد. همچنین عامل دوم با توجه به بار وزنی ۰/۸۸۰ و درصد از واریانس کل ۲۳/۱ به

جدول ۲- ماتریس دورانی واریماکس

عامل				متغیر
۴	۳	۲	۱	
۰/۰۸۷۴	۰/۵۲۴	۰/۵۹۹	۰/۵۳۷	خواست اکسیژن زیست شیمیایی
-۰/۰۰۹۶۷	-۰/۵۱۰	-۰/۶۶۱	۰/۴۳۷	سرب
۰/۷۸۵	-۰/۰۸۵۴	۰/۱۶۶	۰/۵۲۹	فسفر کل
۰/۰۶۱۱	۰/۲۱۱	۰/۰۶۸۱	۰/۹۷۰	کل جامدات معلق
-۰/۲۸۶	۰/۰۴۷۶	۰/۸۸۰	-۰/۰۱۵۶	خواست اکسیژن شیمیایی
۰/۹۵۱	۰/۲۴۴	۰/۱۹۱	-۰/۲۱۶	دبی رواناب خروجی
-۰/۰۳۱۱	-۰/۲۲۰	۰/۱۲۲	۰/۹۲۳	تعداد روز خشک
-۰/۱۶۰	۰/۸۸۶	-۰/۰۴۸۷	۰/۰۷۶۱	نیترات

ضریب همبستگی و خطای استاندارد معنی‌دار بوده و نتیجه بهتری ارائه کرد انتخاب شد. در جدول (۳) برخی از بهترین ترکیب‌های ورودی به مدل آورده شده است.

سپس با کاربرد تکنیک رگرسیون خطی چندگانه به روش گام به گام ترکیب‌های مختلفی از داده‌ها برای ورود به مدل بررسی و در نهایت ترکیبی که از نظر

جدول ۳- برخی از بهترین ترکیب‌های نهایی ورودی مدل در سطح معنی‌دار ۵ درصد

خطای استاندارد	ضریب همبستگی	متغیرهای مستقل وارد شده به مدل	متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده	متغیر وابسته
۰/۱۷۴	۰/۹۷۸	TSS, COD	TSS, COD, $NO_3$ , Q	Load
۰/۵۸۳	۰/۹۰۴	logCOD	logTSS, logCOD, log $NO_3$ , logQ	
۰/۰۹۴	۰/۹۲۶	TSS, COD	TSS, COD, $NO_3$ , Q	logLoad
۰/۰۰۹	۰/۹۹۸	logTSS, logCOD	logTSS, logCOD, log $NO_3$ , logQ	

رواناب در هر بارش، آرایه گشت. به این منظور با در نظر گرفتن ویژگی‌های دبی متوسط جریان، ارتفاع بارش و

در مرحله بعد مدل رگرسیونی مناسب بر اساس ویژگی‌های بارش به منظور برآورد کل بار آلودگی خروجی

روزهای خشک قبل از هر بارندگی به عنوان متغیرهای مستقل و کل بار آلودگی اندازه‌گیری شده در هر بارش به عنوان متغیر وابسته، ترکیب‌های مختلفی از داده‌ها برای ورود به مدل بررسی شدند و در نهایت ترکیبی که از لحاظ

ضریب همبستگی و خطای استاندارد معنی‌دار بوده و نتیجه بهتری ارائه کرده است، انتخاب شد. برخی از بهترین ترکیب‌های نهایی ورودی مدل بر اساس پارامترهای بارش در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴- برخی از بهترین ترکیب‌های نهایی ورودی مدل بر اساس پارامترهای بارش

خطای استاندارد	ضریب همبستگی	متغیرهای مستقل وارد شده به مدل	متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده	متغیر وابسته
۰/۴۰۳	۰/۷۷	H	T, H, Q	Load
۱/۱۲	۰/۸۳	logQ	logT, logH, logQ	
۰/۰۴۶	۰/۹۲۶	H	T, H, Q	logLoad
۰/۲۰۶	۰/۹۱۱	logH, logQ	logT, logH, logQ	

همان طور که بیان شد ضریب تعیین و خطای استاندارد برای بررسی و کفایت مدل معرفی شده‌اند. اما همان‌طور که گفته شد مقدار ضریب همبستگی بالا الزاماً به معنی خوب بودن مدل رگرسیون نیست. چرا که افزودن یک متغیر به مدل همیشه ضریب همبستگی را صرف‌نظر از مشارکت این متغیر اضافه شده در مدل، افزایش خواهد داد. پس هنگام گروه‌بندی دامنه تغییرات داده‌ها در هر گروه همگن کمتر شده و همبستگی افزایش می‌یابد. برای ارزیابی روش‌های رگرسیون چند متغیره لازم است تا از داده‌های رخدادهایی که در تحلیل رگرسیونی شرکت نکرده اند استفاده نمود. به این منظور همان‌طور که قبلاً اشاره شد علاوه بر ۱۱ رخداد بارندگی شرکت داده شده در مدل، داده‌های کیفی

و کمی دو رخداد دیگر نیز اندازه‌گیری شدند و برای تعیین صحت مدل رگرسیونی مورد استفاده قرار گرفتند. داده‌های کیفی و کمی دو رخداد شرکت نکرده در مدل‌ها در جدول ۵ آورده شده است. دو ستون آخر این جدول به ترتیب مربوط به مقادیر بار آلودگی اندازه‌گیری شده و بار آلودگی برآورد شده با استفاده از مدل ۱ (مدل ارائه شده براساس پارامترهای آلاینده) و مدل ۲ (مدل براساس ویژگی‌های بارش) می‌باشد. نتایج به‌دست آمده برای درصد خطای نسبی، RMSE، MBE، درصد میانگین خطای آریبی نسبی و درصد جذر میانگین مربعات خطای نسبی (نسبت به میانگین مقادیر واقعی) مدل‌های ارائه شده در جدول (۶) نشان داده شده است.



جدول ۵- داده‌های کیفی و کمی دو رخداد شرکت نکرده در مدل‌ها

بار آلودگی برآورد شده (Kg/m <sup>3</sup> )	بار آلودگی اندازه‌گیری شده (Kg/m <sup>3</sup> )	H (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	EMC(mg/l)						شماره رخداد	
				TSS	COD	BOD <sub>5</sub>	TP	Pb	NO <sub>3</sub>		
مدل ۱	مدل ۲										
۱/۰۱۲	۱/۲۴۷	۱/۷۴۳	۰/۰۱۷	۲۹۹	۷۸۸	۴۱	۱/۲	۰/۲۱	۶۱	۱	
۰/۷۶۳	۱/۳۸۵	۱/۱۰۲	۰/۰۲۲	۲۰۲	۱۹۶	۴/۵۰	۰/۱۹	۰/۱۷	۱۹/۱۸	۲	

جدول ۶- نتایج معیارهای مختلف برآورد خطا برای مدل‌های رگرسیون

مدل	میانگین درصد خطای نسبی	MB E	RMS E	درصد میانگین خطای اریبی نسبی	درصد جذر میانگین مربعات خطای نسبی
بر اساس پارامترهای آلاینده	۲۶/۳۹	۰/۰۹۴	۰/۳۹	۶/۶۶	۲۷/۳۸
بر اساس ویژگی‌های بارش	۳۶/۳۴	۰/۵۳۵	۰/۵۶۰	۳۷/۶۱	۴۰/۰۵

### بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس جدول (۱) درصد هر یک از عامل‌ها به ترتیب عبارتند از: ۷/۱، ۱۸/۱، ۲۳/۱، ۴۳/۹ می‌باشد. این به آن معناست که حدود ۷/۶ درصد از کل واریانس، بیان نشده است که می‌توانست با بررسی متغیرهای اضافی در زمینه سایر ویژگی‌های کیفی و کمی رواناب افزایش یابد. با توجه به نتایج تحلیل عاملی چهار فاکتور، COD، NO<sub>3</sub>، Q، TSS برای ایجاد رابطه با بار آلودگی خروجی انتخاب شدند.

همانطور که از جدول (۳) مشخص است هنگامی که داده‌ها به صورت لگاریتمی وارد مدل شده‌اند، خطای استاندارد کمترین (۰/۰۰۹) می‌باشد ضمن آنکه ضریب همبستگی (۰/۹۹۸) نیز حداکثر است که این مدل به عنوان مدل مناسب پذیرفته و در رابطه (۵) آورده شده است.

$$\log \text{Load} = 0.1507 \log \text{COD} + 0.1663 \log \text{TSS} \quad (5)$$

در مدل‌های رگرسیونی ارایه شده توسط تاسکر (۱۹۸۸) و آندرل (۱۹۹۱) پارامترهای ورودی به مدل COD، TSS بود که با نتایج این تحقیق هم‌خوانی دارد. به عبارت بهتر شاید در اکثر نواحی شهری این دو پارامتر آلاینده از مهم‌ترین پارامترهای آلاینده در رواناب باشند.

به منظور استفاده از مدل رگرسیون بر اساس پارامترهای آلاینده جهت برآورد کل بار آلودگی رواناب خروجی در هر رخداد بارندگی می‌بایست غلظت آلاینده‌های مواد جامد معلق کل و اکسیژن خواهی زیستی را به طور لحظه‌ای اندازه‌گیری کرد که تقریباً مشکل می‌باشد. لذا مدل رگرسیونی مناسبی بر اساس ویژگی‌های بارش به منظور برآورد کل بار آلودگی خروجی رواناب در هر بارش ارایه گشت.

بنابراین مدل انتخابی و برگزیده برای برآورد بار آلودگی خروجی مدل بر اساس پارامترهای آلاینده است. البته استفاده از این مدل کمی مشکل است زیرا باید غلظت دو پارامتر آلاینده (COD و TSS) به صورت لحظه‌ای اندازه‌گیری شود. مدل دوم از نظر کارایی بسیار راحت خواهد بود، زیرا اندازه‌گیری ارتفاع بارش کار ساده‌ای است ولی از دقت کمتری برخوردار است.

نتایج این مطالعه می‌تواند برای مدیران منابع آب، برنامه‌ریزان شهری و مسئولین محیط زیست در کنترل آلودگی رودخانه زاینده رود و حفظ شرایط زیست محیطی آن و همچنین مدیریت صحیح رواناب‌های شهری مفید واقع گردد.

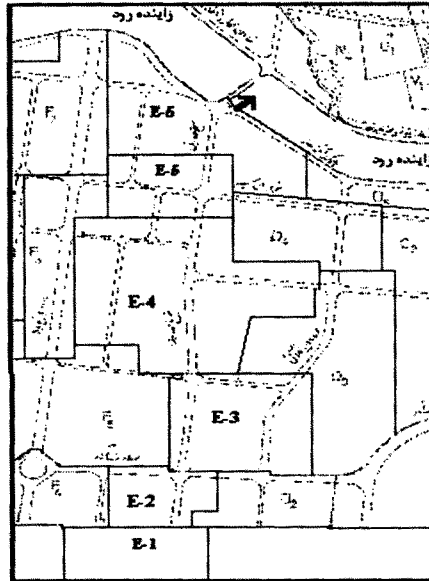
در راستای پیشبرد مطالعات آینده موارد زیر توصیه می‌گردد:

- ۱- ارایه مدل منطقه‌ای با استفاده از داده‌های حوضه‌های مختلف شهر اصفهان و ترسیم نقشه‌های پهنه‌بندی بار آلودگی از طریق روش‌های مناسب دورن‌یابی مانند کریجینگ، ۲- ارزیابی مدیریت شهری از لحاظ آلودگی رواناب‌ها با استفاده از سیستم‌های خبره مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی که در برگزیده پایش و پیش‌بینی آلودگی می‌باشد، ۳- کاهش آلودگی در سطح شهر بخصوص جایگاه‌های تعویض روغن و سوختگیری، ۴- بررسی کیفیت رواناب‌های کشاورزی در شرق شهر اصفهان و مقایسه آن با رواناب شهری.

همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌گردد زمانی که متغیر مستقل ارتفاع بارش وارد مدل شده است ضریب همبستگی بیشترین (۰/۹۲۶) و مقدار خطای استاندارد کمترین (۰/۰۴۶) می‌باشد. بنابراین رابطه ۶ به عنوان مدل مناسب بر اساس ویژگی‌های بارش انتخاب شد.

$$\text{Log Load} = 0.299 \times H \quad (6)$$

هر چه مقدار RMSE و قدر مطلق MBE کمتر باشند دقت مدل بالاتر است. مقادیر مثبت MBE نشان‌دهنده آن است که مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل بیشتر از مقادیر واقعی و مقادیر منفی آن نشان‌دهنده آن است که مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل کمتر از مقادیر واقعی می‌باشند. الی در سال ۱۹۸۱ براساس مشاهدات خود اظهار داشت که مدل‌های رگرسیونی که مقدار خطای نسبی آنها تا ۲۵ درصد باشد مدل‌های بسیار مفید و دقیق و مدل‌های رگرسیونی که مقدار خطای نسبی آنها بین ۲۵ تا ۴۰ درصد باشد مدل‌های نسبتاً دقیق و آن‌هایی که بالاتر از ۴۰ درصد هستند جزو مدل‌های نامناسب محسوب می‌شوند. همان‌طور که از جدول (۶) نتیجه می‌شود در این تحقیق مدل رگرسیونی براساس پارامترهای آلاینده تقریباً جزو مدل‌های بسیار دقیق و مدل رگرسیونی براساس ویژگی‌های بارش جزو مدل‌های نسبتاً دقیق می‌باشد. به‌طورکلی درصد انواع خطا برای مدل رگرسیونی براساس پارامترهای آلاینده همواره کمتر از مدل رگرسیونی براساس ویژگی‌های بارش می‌باشد.



شکل ۲- نمایی از حوزه شهری شیخ صدوق و خروجی آن

## منابع

- ۱- زهتابیان، غلامرضا، کاظم نصرتی و افسانه شهبازی، ۱۳۸۳. ارزیابی روشهای تحلیل منطقه‌ای فراوانی جریان کمینه در مناطق خشک و نیمه خشک، مجله بیابان، جلد ۹، شماره ۲.
- ۲- سربو استاوا، کارتر، ۱۳۷۰. آمار چند متغیره کاربردی، ترجمه ناصررضا ارقامی و ابوالقاسم بزرگ نیا، آستان قدس رضوی.
- ۳- نصرتی، کاظم، و همکاران، ۱۳۸۳. تعیین مناطق همگن برای جریان کمینه در مناطق خشک و نیمه خشک. مجله منابع طبیعی ایران، جلد ۵۷، شماره ۱.
- 4- Adams Barry J. and Papa Fabian, 2000. Urban Storm Water Management Planning With Analytical Probabilistic Models. John Wiley & Sons, Inc., 605 Third Avenue, New York.
- 5- Alley William M., 1981. Estimation of Accumulation Parameters for Urban Runoff Quality Modeling, Water Research, 25, 4, pp. 685-690
- 6- Anderle, T., 1991. Analysis of Stormwater Runoff, Lake Waters Quality for the Twin Cities Metropolitan Area, Ms Thesis.
- 7- Grum Morten and Hans K., 1997. A Statistical Approach to Urban Runoff Pollution Modeling. Wat. Sci. Tech., Vol. 36, No. 5, pp. 117-124
- 8- Ichiki, A., et al., 1996. Prediction of Runoff Pollutant Load Considering Characteristics of River Basin. Wat. Sci. Tech., Vol. 33, No. 4-5, pp. 117-126
- 9- Jeffers, J. N. R., 1982. Modeling, Chapman and Hall, London, 80pp.
- 10- Spliid, H., et al., 2000. Stormwater Quality Concerns and Modeling. (Available From <http://cwp.org>)
- 11- Tasker, G. D., and Driver, N., 1988. National Regression Models for Predicting Urban Runoff Water Quality at Unmonitored Sites. Wat. Resour. Bull., 24, 5, pp. 1091-1101
- 12- US. Environmental Protection Agency, 1973. Methods for Identifying and Evaluating the Nature and Extent of Nonpoint Sources of Pollutant, EPA. 430/9-73/014, U. S. EPA, Washington, D. C.

## Application of Regression Models in Estimation of Urban Runoff Pollution Load

N. Khorasani<sup>1</sup>    A. Shahbazi<sup>2</sup>    M. Sartaj<sup>3</sup>    K. Nosrati<sup>4</sup>

### Abstract

A large amount of rain water is transferred to reception mainstreams (e.g. surface and ground water) in urban areas due to the increased impermeable surfaces. Urban catchment's water that is produced by precipitation or snow melting is considered as one of the most important non-point pollutants. In this investigation, having discretely sampled the output drainage in 13 precipitation events in one of Isfahan catchments during autumn/winter, 2002/2003, 10 qualitative/quantitative parameters were measured to assess the general quality. Modulating the drainage pollution amount (using multivariate statistics) nitrates, total suspended solids, chemical oxygen demand and average discharge factors were considered as the main regression factors. Modulating input data through which a regression model of the least error (0.009) and the highest correlation coefficient (0.998) was designated to assess the amount of output drainage pollution. Input parameters of the model were total suspended solids and chemical oxygen demand. To assess the model accuracy, error indices were estimated using two data groups that was not which included in modulating which indicated the qualification of the model for the next stage. Using this model, total pollution amount of output drainage can be calculated for future events through measuring two input parameters. Also, another regression model was presented based on precipitation characteristics, which can be readily used, but of less accuracy. These results can be useful for water resource managers, urban programmers and those responsible for environment to control Zayande Rood River pollution, maintain environmental circumstances and carry out reasonable urban catchment management.

**Keywords:** Urban runoff, Discrete sampled, Multivariate analysis, Pollution load, Regression model.

---

<sup>1</sup>- Professor, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, (Email: khorasani@ut.ac.ir)

<sup>2</sup>- Former Graduate student of Environmental Sciences, University of Tehran

<sup>3</sup>- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Isfahan University of Technology

<sup>4</sup>- Academic Member, Department of Range and Watershed Management, Shiraz University