مجله سلامت و محیط زیست، فصلنامه‌ی علمی پژوهشی
انجمن علمی بهداشت محیط ایران
دوره دوازدهم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۸، صفحات ۴۸۹ تا ۵۰۰

Available online: http://ijhe.tums.ac.ir
مقاله پژوهشی

وضعیت آینده تولید پسماند جامد شهر تهران به روش تحلیل رگرسیونی مبتنی بر جمعیت

خدیجه فرجی مهیاری، شاهین رفیعی*، علیرضا کیهانی، زهرا فرجی مهیاری
گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۲/۱۸
تاریخ ویرایش: ۹۸/۰۵/۰۹
تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۵/۱۴
تاریخ انتشار: ۹۸/۰۹/۳۰

واژگان کلیدی: پسماند جامد شهری، مدیریت پسماند، پیش‌بینی تولید پسماند جامد، اعتبارسنجی تحلیل رگرسیون، تهران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:
shahinrafiee@ut.ac.ir

چکیده

زمینه و هدف: آگاهی از مقدار تولید پسماند جامد شهری، نقش ویژه‌ای در تدوین سیاست‌های مدیریت پسماند ایفا می‌کند. تاکنون، روش‌های مختلف برای تخمین مقدار تولید پسماند به‌کار گرفته شده‌اند. در این پژوهش هشت فرم خاص از توابع ریاضی با روش تحلیل رگرسیون مبتنی بر جمعیت برای پیش‌بینی تولید پسماند ارزیابی شدند.

روش بررسی: آزمون معنی‌داری هر یک از مدل‌ها با آماره F و آزمون ضرورت وجود پارامترهای پیشگو با آماره t انجام شد. از شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، ضریب تعیین تعدیل شده ($R^2_{Adjusted}$)، ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)، خطای اریبی (MBE) و درصد میانگین خطا (MPE) برای نکویی برازش مدل‌ها استفاده شده است. برای بررسی توانایی پیشگویی مدل‌ها ضریب تعیین پیش‌بینی شده ($R^2_{Predicted}$) با روش اعتبارسنجی متقابل یک‌طرفه محاسبه شد.

یافته‌ها: نتایج تحلیل نشان داد مدل‌های چندجمله‌ای درجه دو و بالاتر علی‌رغم دقت خوب، معنی‌دار نبوده (در سطح ۰/۰۱) و برای پیش‌بینی‌های بلند مدت مناسب نیستند. مدل‌های خطی، توانی و نمایی با R^2 به‌ترتیب ۰/۹۴۲، ۰/۹۳۲ و ۰/۹۳۶ و $R^2_{Predicted}$ به ترتیب ۰/۹۰۴، ۰/۸۹۳ و ۰/۸۹۸ بهترین هستند؛ اما، عدم قطعیت در مدل نمایی بیشتر است.

نتیجه‌گیری: وضعیت تولید پسماند در چهار سناریوی مبتنی بر رشد جمعیت (افزایش، تثبیت و کاهش موالید) برای کلان شهر تهران در سال‌های ۱۴۰۰-۱۴۳۰ بررسی شد. هر چهار سناریو، افزایش تولید سالانه و سرانه پسماند را تا سال ۱۴۳۰ نشان می‌دهند. بنابر نتایج، انتظار می‌رود تولید روزانه پسماند در تهران از ۷۳۶۰ ton به حداکثر ۱۲۳۱۷ ton در سال ۱۴۳۰ برسد.

Please cite this article as: Faraji Mahyari Kh, Rafiee Sh, Keyhani AR, Faraji Mahyari Z. The future status of solid waste generation in Tehran metropolis with regression analysis method based on population. Iranian Journal of Health and Environment. 2019;12(3):489-500.

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2024-11-13]

مقدمه

پسماند، نتیجه استفاده ناکارآمد انسان از منابع طبیعی است. پسماند جامد شهری (Municipal Solid Waste (MSW))، شامل تمام پسماندهای جامد تولید شده در یک منطقه به‌جز پسماند صنعتی، کشاورزی یا خطرناک و نخاله‌های ساختمانی است که البته گاهی اوقات در جریان پسماند جامد شهری وارد می‌شوند، اما پسماند جامد شهری محسوب نمی‌شوند. به دنبال رشد جمعیت شهرنشین و افزایش رفاه فردی در دهه‌های اخیر، تولید پسماند جامد شهری افزایش چشمگیری داشته است. در سال ۲۰۱۲، حدود ۱/۳ Gton (۱ ton = ۱۰۰۰ kg و ۱ Gton = 10^9 ton) پسماند جامد شهری در سطح جهانی تولید شد. در سال ۲۰۱۶ این مقدار به ۲/۰۱ Gton رسیده و پیش‌بینی شده است که تا سال ۲۰۵۰ به حدود ۳/۴۰ Gton برسد (۱).

روند رو به رشد تولید پسماند جامد شهری، مدیریت آن را به یکی از مسائل مهم برای دولت‌ها و کشورها تبدیل کرده است. در صورتی‌که سیستم مدیریتی مناسبی به‌کار گرفته نشود، این مواد آلودگی‌های محیط‌زیستی فراوانی را به‌وجود می‌آورند و سلامت بشر را به خطر می‌اندازند. در حال حاضر اغلب کشورهای جهان برنامه‌های مدیریت پسماند خود را در راستای سیاست 4R اجرا می‌کنند که شامل کاهش تولید، استفاده مجدد، بازیافت، بازیابی و دفن پسماند است (۲). ایجاد یک سیستم مدیریت پسماند کارآمد، به دلیل طبیعت ناهمگن و نوسانات زیاد در کمیت تولید پسماند و عوامل تاثیرگذار متنوع و خارج از کنترل بسیار مشکل است (۳). از این‌رو، اولین قدم برای طراحی صحیح چنین سیستمی، تعیین کمیت پسماند تولیدی و تخمین میزان آن در افق طرح‌های برنامه‌ریزی شده است. پیش‌بینی مقدار پسماند جامد شهری تولیدی در سه مقیاس زمانی کوتاه، میان و بلندمدت و براساس داده‌هایی مانند تعداد و تراکم جمعیت، نوع سکونت، مصرف برق، گروه‌های سنی، اشتغال، درآمد خانوار، عوارض شهری، شاخص قیمت مصرف‌کننده (Consumer Price Index (CPI))، تولید ناخالص داخلی (Gross Domestic Product (GDP))، تحصیل، فرهنگ، جغرافیا و آب و هوا به عنوان متغیر ورودی انجام می‌شود (۴). البته، روشن است که در نظر گرفتن همه این پارامترها در فرایند پیش‌بینی کمیت پسماند جامد شهری امکان‌پذیر نیست؛ چون در هر شهر و منطقه‌ای مجموعه‌ای متفاوت از این عوامل بر ترکیب و حجم پسماند تولیدی اثرگذار است؛ در ضمن، کمی کردن و ارزیابی اثرات آنها (به علت عدم ثبت و ضبط این داده‌ها در دوره‌های متوالی) کاری دشوار و غیر ممکن است. از طرف دیگر، هر چه تعداد پارامترهای مدل کمتر باشد واسنجی مدل سریع‌تر و آسان‌تر خواهد بود. Minousepehr و همکاران (۲۰۱۸) چهار پارامتر ارتفاع از سطح دریا، جمعیت، درجه شهری و تناوب جمع‌آوری پسماند را انتخاب نمودند (۵). Nasrollahi و همکاران (۲۰۱۶) علاوه بر آن میزان بارش، میانگین دما و رطوبت ماهانه را نیز به‌عنوان متغیر ورودی در نظر گرفتند (۶). اما جمعیت و GDP به عنوان مؤثرترین پارامترهای مستقل شناخته شده‌اند (۱، ۷، ۸).

تاکنون روش‌های متعدد و پیچیده بسیاری برای مدلسازی و برآورد مقدار پسماند تولیدی به کار گرفته شده است که به‌طور کلی می‌تواند به پنج دسته اصلی تقسیم شوند: روش‌های آمار توصیفی؛ مدل جریان مواد؛ تحلیل رگرسیون؛ تحلیل سری زمانی و مدل‌های هوش مصنوعی. هر چند که هر یک از این روش‌ها نقاط ضعف و قوت خود را دارد (۹).

در روش‌های آمار توصیفی معمولا از رشد جمعیت و میانگین سرانه تولید پسماند برای پیش‌بینی تولید پسماند جامد شهری استفاده می‌شود و پویایی فرایند تولید پسماند نادیده گرفته می‌شود. Nojedehi و همکاران (۲۰۱۶) به منظور ارزیابی تولید انرژی از گاز دفن‌گاه پسماند تا سال ۲۰۳۵ از این روش برای برآورد کمیت پسماند تهران استفاده کردند (۱۰). در مقابل، مدل جریان مواد می‌تواند به طور کامل خواص پویایی فرایند تولید پسماند جامد شهری را مشخص کند. در مدل جریان مواد، محصول مورد استفاده توسط مصرف‌کنندگان برای تولید پسماند در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب کمیت تولید پسماند می‌تواند از طریق تجزیه و تحلیل ورودی و خروجی تعیین شود. تحلیل جریان‌های مواد نیز می‌تواند برای اهداف اعتبارسنجی پژوهش‌های برآورد تولید پسماند استفاده شود؛ همچنین، به جای جمع‌آوری اطلاعات تولید پسماند در مسیر جمع‌آوری پسماند مخلوط و تفکیک شده از مبدأ،

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2024-11-13]

برای پیش‌بینی کل پسماند جمع‌آوری شده مورد استفاده قرار گیرد (۱۱). این روش در تخمین تولید پسماند الکتریکی و الکترونیکی کاربردی خواهد بود.

تحلیل رگرسیون به‌دلیل سادگی ریاضیات پایه و تئوری آماری به یک روش مناسب و مرسوم برای برآورد تولید پسماند تبدیل شده است. در تحلیل رگرسیون، تولید پسماند به‌عنوان متغیر وابسته بر پایه عوامل مختلفی از جمله داده‌های جمعیت شناختی، نفوس و اجتماعی- اقتصادی تخمین زده می‌شود (۴، ۱۲). این عوامل در اکثر مدل‌های پیش‌بینی به‌عنوان متغیرهای مستقل مورد توجه هستند. مدل‌های رگرسیونی با دقت مناسب می‌توانند ابزاری مفید و قدرتمند در پیش‌بینی تولید پسماند و سرانه آن باشند و توسط مدیران و تصمیم‌گیران این حوزه در برنامه‌ریزی برای طرح‌های بلند و کوتاه مدت استفاده شود. با روش رگرسیون خطی چندگانه (Multiple Linear Regression (MLR)) می‌توان هم‌زمان به تحلیل و بررسی چندین متغیر مختلف پرداخت؛ اما برای به‌دست آوردن نتایج مطلوب، نمونه‌ها باید زیاد و دقیق باشند (۵).

در مقایسه با روش تحلیل رگرسیون، تحلیل سری زمانی بر عوامل نفوس، اجتماعی و اقتصادی تکیه نمی‌کند و به داده‌های تاریخی وابسته است. در حالت فقدان داده‌های مربوط به عوامل مذکور، این موضوع می‌تواند یک مزیت محسوب شود. روش سری زمانی می‌تواند ماهیت دینامیکی داده‌های تولید پسماند را تعیین کند (۸)؛ اما، برخلاف روش تحلیل رگرسیون توجیه تجربی ندارد.

مدل‌های هوش مصنوعی مانند شبکه عصبی مصنوعی (Artificial Neural Networks (ANN)) (۱۳)، سامانه استنتاج تطبیقی فازی- عصبی (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS)) (۶)، ماشین بردار پشتیبان (Support Vector Machines (SVM)) (۱۴) و K- نزدیک‌ترین همسایگی (K-Nearest Neighbors (KNN)) (۹) به‌طور گسترده‌ای برای پیش‌بینی تولید پسماند به‌کار می‌روند و این ظرفیت را دارند که بتوانند طبیعت پویای فرایند تولید پسماند و عوامل اجتماعی- اقتصادی مختلف را برای پیش‌بینی روند تولید آینده مدیریت کنند. این مدل‌ها به‌دلیل انعطاف‌پذیری بالا و توانایی پیش‌بینی اثبات شده خود، محبوبیت زیادی به‌دست آورده‌اند (۹). روش تحلیل رگرسیون، اگرچه توانایی یادگیری ندارد؛ اما، پیچیدگی‌های مدل‌های هوش مصنوعی را نیز ندارد. ساختار مدل‌ها در تحلیل رگرسیون بیانی ساده از رفتار متغیر وابسته مبتنی بر متغیرهای مستقل و خصوصیات سیستماتیک ذاتی آنها است.

در این پژوهش سعی خواهد شد مدل‌های رگرسیونی متعدد از فرم‌های مختلف توابع ریاضی برای پیش‌بینی مقدار سالانه پسماند تولید شده مبتنی بر پارامتر جمعیت در کلان شهر تهران ارزیابی شوند. بهترین مدل براساس شاخص‌های آماری خطاسنجی و اعتبارسنجی مختلف انتخاب خواهد شد. همچنین مقدار سالانه پسماند جامد شهری تولید شده تا سال ۱۴۳۰ براساس بهترین مدل‌های انتخابی پیش‌بینی شود. بنابراین، این مطالعه یک پژوهش تحلیلی- اکتشافی به شمار می‌آید.

مواد و روش‌ها

- داده‌ها و منطقه مورد مطالعه

تهران با $730\ km^2$ مساحت، در $51°17'$ تا $51°33'$ طول شرقی و $35°36'$ تا $35°44'$ عرض شمالی گسترده شده و از ارتفاع $900-1800\ m$ از سطح دریا امتداد یافته است؛ این ارتفاع از شمال به جنوب کاهش می‌یابد. تهران از نظر مدیریت شهری به ۲۲ منطقه تقسیم می‌شود.

داده‌های مورد استفاده مربوط به تولید پسماند از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۶ از سازمان مدیریت پسماند تهران (۱۵) و اطلاعات جمعیتی از سازمان ملی آمار ایران (۱۶) اخذ گردید. برای جمعیت در سال‌های مابین دوره‌های سرشماری از میانگین روش نرخ رشد خطی، هندسی و نمایی استفاده شد (۱۷).

براساس نتایج آخرین سرشماری در سال ۱۳۹۵، شهر تهران ۸۶۹۳۷۰۶ نفر جمعیت دارد. طبق بررسی‌های انجام شده در پژوهش حاضر، میانگین سرانه تولید پسماند برای این شهر $900\ g$ به ازای هر نفر در روز است. کمترین و بیشترین سرانه پسماند تولیدی به‌ترتیب متعلق به منطقه ۱۴ با ۶۲۲ و منطقه ۱۲ با $1385\ g$ به ازای هر نفر در روز بوده است. سرانه تولید پسماند در ۱۷ منطقه شهرداری تهران از $1000\ g$ به ازای هر نفر در روز کمتر است. در پنج سال اخیر در شهر تهران به‌طور متوسط $7360\ ton$

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2024-11-13]

پسماند جامد شهری در هر روز تولید شده است. این در حالی است که از این مقدار تنها ۳۰۰ ton از پسماندهای مخلوط شهری شرق تهران در سامانه هاضم بی‌هوازی جهت تولید بیوگاز و پس از تخلیص برای تولید ۲ MW انرژی برق مصرف می‌شود و ۲۰۰ ton دیگر برای تولید ۳ MW برق در زباله سوز مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطابق گزارش سازمان مدیریت پسماند تهران، ۱۷۷۰ ton از پسماند برای تولید کمپوست مصرف شده و مابقی آن یعنی حدود ۷۰ درصد پسماند جامد شهری تهران راهی دفن‌گاه می‌شود که شرایط استاندارد محیط‌زیستی مورد نیاز برای بازیابی گاز دفن‌گاه و شیرابه آن را ندارد (۱۵). از سوی دیگر پسماندی که به‌صورت تفکیک شده و قابل بازیافت در سطح شهر جمع‌آوری می‌شود به‌طور متوسط ۱۱۲۴ ton در هر روز بوده است.

- پیش‌پردازش و مدلسازی

انتخاب پارامترها به‌عنوان متغیرهای مستقل در مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی کار مهمی است که مستلزم تجربه فراوان و اطلاع کافی از نحوه تاثیر این پارامترها بر متغیر وابسته است. از این‌رو، برای پیش‌بینی تولید پسماند، پارامتر جمعیت به‌عنوان تنها متغیر مستقل انتخاب شد. دلایل این انتخاب به شرح زیر است:

- مؤثر بودن نرخ جمعیت در تولید پسماند؛
- قابلیت دسترسی ساده به اطلاعات جمعیت از طریق آمار نفوس و مسکن؛ و
- وجود آمار و منابع پیش‌بینی جمعیت آینده و همچنین وجود امکان تخمین ساده آن براساس روش‌های نرخ رشد.

نمودار نمایش داده شده در نمودار ۱ گویای ارتباط بین مقدار سالانه تولید پسماند (متغیر وابسته) و تعداد جمعیت شهر تهران در هر سال (متغیر مستقل) هست.

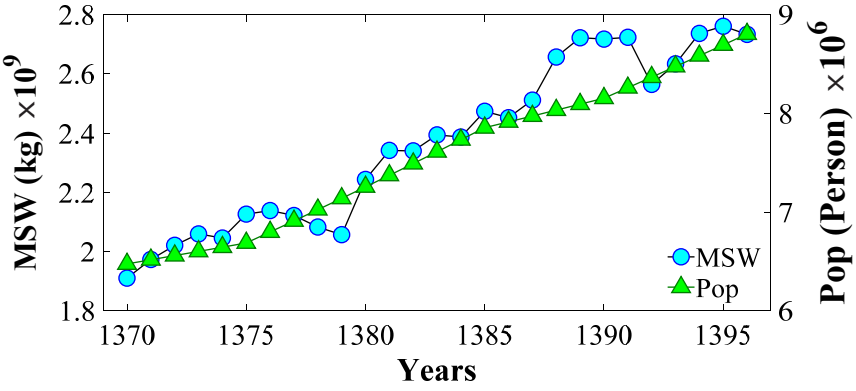
با توجه به اینکه داده‌های مورد استفاده در این مدلسازی ارقام بزرگی هستند، به منظور کاهش دامنه داده‌ها و افزایش دقت، لگاریتم طبیعی مقدار تولید پسماند در مدلسازی لحاظ می‌شود (۷، ۱۸). بیان ساده این موضوع در معادله ۱ قابل مشاهده است. لگاریتم‌گیری علاوه بر تغییر مقیاس داده‌ها، آنها را به حالت ایستایی نزدیک می‌کند (۱۳).

$$ln(MSW) = ln(MSW_{1370}) + f(x) \qquad (۱)$$

که در آن (معادله ۲):

$$x = Pop/Pop_{1370} \qquad (۲)$$

MSW: مقدار سالانه تولید پسماند برحسب کیلوگرم، MSW_{1370}: مقدار سالانه تولید پسماند در سال ۱۳۷۰ برحسب کیلوگرم، Pop: تعداد جمعیت برحسب نفر و Pop_{1370}: تعداد جمعیت در سال ۱۳۷۰ برحسب نفر است، $f(x)$: می‌تواند با هر یک از مدل‌های رگرسیونی موجود در جدول ۱ جایگزین شود.



نمودار ۱- توزیع مقدار کل سالانه تولید پسماند جامد شهری و تعداد جمعیت برای شهر تهران در سال‌های ۱۳۷۰-۱۳۹۶

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2024-11-13]

جدول ۱- مدل‌های تجربی پیش‌بینی مقدار سالانه تولید پسماند مبتنی بر جمعیت

شماره مدل	نوع تابع	ضرایب	مدل تجربی
۱	خطی	b_1, b_2	$f(x)=b_1+b_2x$
۲	چند جمله‌ای درجه دو	b_1, b_2, b_3	$f(x)=b_1+b_2x+b_3x^2$
۳	چند جمله‌ای درجه سه	b_1, b_2, b_3, b_4	$f(x)=b_1+b_2x+b_3x^2+b_4x^3$
۴	نمایی با پایه عدد نپر	b_1, b_2	$f(x)=b_1\,exp(b_2x)$
۵	توانی	b_1, b_2	$f(x)=b_1x^{b_2}$
۶	نمایی با پایه ثابت	b_1, b_2	$f(x)=b_1+b_2^{\,x}$
۷	ترکیب خطی- توانی	b_1, b_2, b_3	$f(x)=(b_1+b_2x)x^{b_3}$
۸	ترکیب خطی- نمایی	b_1, b_2, b_3	$f(x)=(b_1+b_2x)+b_3^{\,x}$

آزمون معنی‌داری هر یک از مدل‌های موجود در جدول ۱ با استفاده از آماره F و معنی‌داری هر یک از ضرایب موجود در مدل‌های رگرسیونی با استفاده از آماره t انجام خواهد شد و به کمک p و مقایسه آن با سطح معنی‌داری (α) در مورد قبول یا رد فرض صفر تصمیم‌گیری می‌شود. فرض صفر در آزمون معنی‌داری مدل رگرسیون، صفر بودن تمام ضرایب مدل و در آزمون ضرورت وجود هر یک از پارامترهای پیشگو در مدل، صفر بودن ضریب مربوط به آن است. به عبارت دیگر فرض صفر بیان می‌کند که متغیرهای مورد بررسی اثری بر روی مدل ندارند.

- شاخص‌های خطاسنجی، مقایسه و اعتبارسنجی

مرسوم‌ترین شاخص در نیکویی برازش مدل‌های رگرسیونی ضریب تعیین (R^2) است که از طریق معادله ۳ قابل محاسبه است. ضریب تعیین نشان می‌دهد که چند درصد تغییرات متغیر وابسته به وسیله متغیر مستقل تبیین می‌شود. اما ضریب تعیین به تنهایی معیار مناسبی برای این تبیین نیست؛ زیرا با افزایش مشاهدات و همچنین با افزایش متغیرهای مستقل میزان آن افزایش می‌یابد و این افزایش ممکن است کاذب باشد. از این‌رو لازم است تا مقدار ضریب تعیین تعدیل شده ($R^2_{Adjusted}$) نیز محاسبه شود؛ چرا که هم تعداد کل مشاهدات (N) و هم تعداد پارامترهای پیشگو در مدل (k) را در نظر می‌گیرد. ضریب تعیین تعدیل شده از معادله ۴ به‌دست می‌آید (۱۹).

$$R^2=1-\sum_{i=1}^{N}\left(y_{i,m}-y_{i,p}\right)^2\Big/\sum_{i=1}^{N}\left(y_{i,m}-y_{m,ave}\right)^2 \qquad (۳)$$

$$R^2_{Adjusted}=1-\left(\frac{N-1}{N-k-1}\right)\left(1-R^2\right) \qquad (۴)$$

در معادلات فوق، اندیس i، i امین مقدار تولید پسماند و اندیس p و m، به ترتیب به مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده تولید پسماند جامد شهری اشاره دارند. $y_{m,ave}$: مقدار میانگین لگاریتم تولید پسماند جامد شهری اندازه‌گیری شده است.

عملکرد مدل‌ها توسط سه شاخص آماری ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)، خطای اریبی (MBE)، درصد میانگین خطا (MPE,٪)، براساس مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده لگاریتم پسماند تولید شده ($y=f(x)$) مورد بررسی قرار می‌گیرد. این شاخص‌ها اغلب برای مقایسه و خطاسنجی مدل‌های رگرسیونی به کار می‌روند و به شرح زیر هستند (معادلات ۵ تا ۷):

$$RMSE=\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(y_{i,p}-y_{i,m}\right)^2/N} \qquad (۵)$$

$$MBE=\sum_{i=1}^{N}\left(y_{i,p}-y_{i,m}\right)/N \qquad (۶)$$

$$MPE=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{\left(y_{i,p}-y_{i,m}\right)}{y_{i,m}}\times 100 \qquad (۷)$$

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2024-11-13]

ممکن است یک مدل رگرسیونی توسط این شاخص‌ها مناسب ارزیابی شـود اما برای استفاده در مجموعه جدیدی از داده‌های متغیر مسـتقل جهت پیش‌بینی موفـق عمل نکند. مؤثرترین و گسترده‌ترین روش اعتبارسنجی برای مدل رگرسیون، محاسبه ضریب تعیین پیش‌بینی شده $R^2_{Predicted}$ است که با استفاده از مدل توسعه یافته برای مجموعه جدیدی از داده‌های جمع‌آوری شده به‌دسـت می‌آید (۱۹). چنانچه $R^2_{Predicted}$ خیلی کمتر از R^2 و تعداد ضرایب و پارامترهای پیشـگو در مدل زیاد باشـد یعنی بیش‌برازش (Overfitting) رخ داده و توانایی پیشگویی مدل ضعیف خواهد بود (۲۰). این روش شـبیه به اعتبارسنجی متقابل یک‌طرفـه (Leave-one-out cross-validation (LOOCV)) اسـت و در آن از مجموعه داده‌های آموزشـی، یک مشـاهده خارج شده و براسـاس بقیه مشاهدات، پارامترها برآورد می‌شود. سـپس میزان خطای مدل برای مشاهده خارج شده، محاسبه می‌شود. تعداد مراحل تکرار فرایند اعتبارسنجی با تعداد داده‌های آموزشی برابر است. بیان ریاضی ضریب تعیین پیش‌بینی شده $R^2_{Predicted}$ در معادله ۸ داده شده است.

$$R^2_{Predicted} = 1 - \sum_{i=1}^{N}\left(y_{i,m} - y_{-i,p}\right)^2 \Big/ \sum_{i=1}^{N}\left(y_{i,m} - y_{m,ave}\right)^2 \qquad (۸)$$

که در آن:

$y_{-i,p}$ ، i امین مقدار پیش‌بینی شـده توسط مدل برازش شده روی مجموعه مقادیر اندازه‌گیری شده بدون مشاهده i ام است. فرایند تجزیه و تحلیل رگرسیونی مدل‌های جدول ۱ برای تعیین ضرایـب مدل‌های ۱ تا ۸، نتیجه آزمون معنی‌داری و محاسـبه شاخص‌های آماری در نرم‌افزار MATLAB R2018b انجام شده است.

یافته‌ها

تجزیه و تحلیل رگرسـیونی برای هشت مدل تجربی ارائه شده با اسـتفاده از اطلاعات اخذ شده برای تولید پسماند شهر تهران انجام شـد. ضرایب مدل‌هـای تجربی محاسـبه و در جدول ۲ گزارش شده است.

نتایـج حاصـل از آزمون معنـی‌داری مدل‌های رگرسـیونی در جدول ۳ ارائه شـده اسـت که میزان ارتباط متغیر وابسـته با مجموعـه و هر یک از پارامترهای پیشـگو را توسـط مقدار p مشـخص می‌کند. هر چه مقدار p کمتر باشـد، رد فرضیه صفر راحت‌تر می‌شود. در این پژوهش، سطح معنی‌داری (α) برابر با ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است.

جدول ۲- ضرایب ثابت به‌دست آمده برای هشت مدل معرفی شده در جدول ۱

شماره مدل	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
b_1	-۰/۵۷۷۷	-۱/۷۷۸۴	۱۴/۹۷۰۷	۰/۰۷۸۴	۰/۴۲۰۹	-۱/۲۸۴۷	-۱/۳۰۴۹	-۲/۳۷۹۳
b_2	۰/۹۹۰۵	۳/۰۶۱۵	-۴۰/۰۰۶۴	۱/۶۹۶۹	۱/۹۹۷۳	۱/۷۰۱۵	۱/۷۰۴۰	۳/۱۸۴۲
b_3	-	-۰/۸۸۴۳	۳۵/۸۲۰۷	-	-	-	-۰/۹۶۳۹	۰/۴۹۵۸
b_4	-	-	-۱۰/۳۷۰۳	-	-	-	-	-

جدول ۳- ارتباط تولید سالانه پسماند جامد شهری با جمعیت در مدل‌های جدول ۱ براساس مقدار p

شماره مدل	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
b_1	۰/۰۰۰۰	۰/۰۳۵۷	۰/۱۵۲۳	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۱۴۴	۰/۲۰۸۱
b_2	۰/۰۰۰۰	۰/۰۳۶۰	۰/۱۳۷۲	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۱۷	۰/۱۵۴۴
b_3	-	۰/۱۴۶۷	۰/۱۱۹۴	-	-	-	۰/۱۱۰۶	۰/۰۲۹۱
b_4	-	-	۰/۱۱۱۳	-	-	-	-	-
کل	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2024-11-13]

با توجه به اینکه برای تمامی مدل‌ها مقدار ۰/۰۰۰۰ برای p به‌دست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که تعدادی از جملات موجود در مدل‌های ارائه شده به ازای داده‌های شهر تهران به‌صورت معنی‌داری متفاوت از صفر هستند؛ به عبارت بهتر، با اطمینان ۹۹ درصد می‌توان گفت حداقل یکی از ضرایب پارامترهای پیشگو مخالف صفر است و مدل‌های ارائه شده به خوبی قادر به بیان تغییرات متغیر وابسته بوده و دارای اعتبار هستند. اما مقدار p برای هر یک از ضرایب پارامترهای پیشگو در مدل‌ها نشان می‌دهد مقدار تعیین شده آنها برای مدل‌های ۲، ۳، ۷ و ۸ در تحلیل رگرسیون توانایی رد فرض صفر با اطمینان ۹۹ درصد را ندارد.

در جدول ۴ مقادیر شاخص‌های آماری خطاسنجی و اعتبارسنجی ارائه شده است که در نتیجه مقایسه مقادیر برآورد شده پسماند تولیدی با استفاده از هشت مدل مختلف معرفی شده در این پژوهش و نیز مقادیر واقعی گزارش شده توسط سازمان مدیریت پسماند به‌دست آمده‌اند. به طور کلی هر چه مقدار شاخص‌های خطاسنجی، پایین‌تر بوده و میزان شاخص R^2 بالاتر باشد، مدل مربوطه دقیق‌تر و مناسب‌تر است و هرچه اختلاف R^2 و $R^2_{Predicted}$ کمتر باشد مدل توانایی بیشتری در پیشگویی خواهد داشت.

بحث

طبق نتایج ارائه شده در جدول ۲، ارتباط جمله‌های مرتبه بالاتر در توابع چندجمله‌ای به دلیل منفی بودن مقدار عددی ضرایب، معکوس است؛ یعنی با افزایش جمعیت، تولید پسماند کاهش می‌یابد. به عبارت بهتر توابع چند جمله‌ای با تعداد ضرایب بیشتر از ۳ برای پیش‌بینی‌های بلند مدت ۲۰ سال یا بیشتر مناسب نیستند؛ زیرا آینده را همچون تصویر انعکاس یافته از گذشته در آینه توصیف می‌کنند.

همانطورکه در جدول ۳ مشاهده می‌شود، ضرورت وجود ضرایب پارامترهای پیشگو در توابع چندجمله‌ای درجه دو و سه (مدل ۲و ۳) و توابع فرم ترکیبی خطی-توانی و خطی-نمایی (مدل ۷ و ۸) با اطمینان ۹۹ درصد به اثبات نرسید. این در حالی است که با توجه به نتایج شاخص‌های آماری در جدول ۴، مدل‌های ۲ و ۳ دارای کمترین مقدار RMSE و بالاترین مقادیر R^2 هستند و کمترین اختلاف R^2 با $R^2_{Predicted}$ را دارند. مدل ۴ نیز با اینکه آزمون ضرورت وجود پارامترهای پیشگو را با موفقیت پشت سر نهاده و معنی‌دار شده است، MPE بیشتر و R^2 کمتری نسبت به سایر مدل‌ها برای آن حاصل شده است.

با توجه به اینکه شاخص‌های آماری خطاسنجی و اعتبارسنجی گزارش شده در جدول ۴ دامنه چندان وسیعی ندارند، می‌توان چنین تفسیر نمود که مدل‌های ۱، ۵ و ۶ که از آزمون فرض نیز سربلند بیرون آمده‌اند، به طور قابل توجهی نسبت به یکدیگر برتری ندارند. تنها اینکه، مدل ۱ و ۶ مقدار تولید پسماند سالانه را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کنند زیرا مقدار MBE آنها منفی است؛ درحالی که مقدار MBE برای مدل ۵ مثبت است.

جدول ۴- شاخص‌های آماری خطاسنجی و اعتبارسنجی محاسبه شده برای مدل‌ها

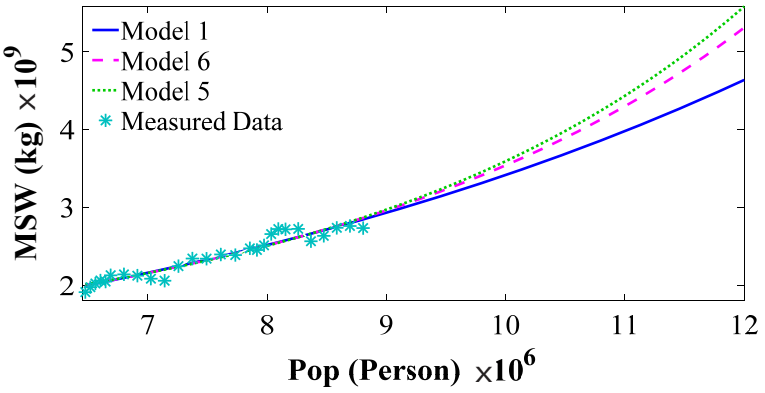
شماره مدل	R^2	$R^2_{Adjusted}$	$R^2_{Predicted}$	RMSE	MBE	MPE
۱	۰/۹۴۱۸۳	۰/۹۳۹۵۰	۰/۹۰۴۶۲	۰/۰۳۴۸۰	-۰/۰۰۰۱۸	۰/۴۲۴۰۶
۲	۰/۹۴۵۵۶	۰/۹۴۱۰۲	۰/۹۱۶۲۲	۰/۰۳۲۵۱	۰/۰۰۰۴۲	۰/۴۴۳۹۸
۳	۰/۹۴۸۵۱	۰/۹۴۱۸۰	۰/۹۲۰۰۰	۰/۰۳۱۹۷	۰/۰۰۰۶۲	۰/۴۴۵۸۶
۴	۰/۹۱۸۸۳	۰/۹۱۵۵۹	۰/۸۸۱۸۷	۰/۰۳۸۸۹	۰/۰۰۰۲۸	۰/۶۵۱۲۱
۵	۰/۹۳۱۹۱	۰/۹۲۹۱۹	۰/۸۹۳۵۰	۰/۰۳۶۶۶	۰/۰۰۰۰۸	۰/۵۴۹۰۸
۶	۰/۹۳۵۹۹	۰/۹۳۳۴۳	۰/۸۹۸۸۸	۰/۰۳۶۰۶	-۰/۰۰۰۱۶	۰/۴۵۳۷۴
۷	۰/۹۴۵۱۹	۰/۹۴۰۶۳	۰/۹۱۴۳۱	۰/۰۳۲۷۴	۰/۰۰۰۳۹	۰/۴۵۲۱۰
۸	۰/۹۴۵۱۸	۰/۹۴۰۶۲	۰/۹۱۵۵۹	۰/۰۳۲۶۰	۰/۰۰۰۴۰	۰/۴۴۴۷۸

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2024-11-13]

مطابق پیش‌بینی انجام شده توسط گروه پژوهشی پردازش داده‌ها و اطلاع‌رسانی پژوهشکده آمار تحت عنوان «بررسی روند تغییرات ساختار و ترکیب جمعیت کشور و آینده آن تا سال ۱۴۳۰»، جمعیت شهر تهران حداقل تا سال ۱۴۳۰ روندی افزایشی دارد. در این تحقیق که توسط مرکز آمار ایران نیز گزارش شده، برای پیش‌بینی جمعیت از روش ترکیبی و نرم‌افزار SpectorumV4 استفاده شده است. در روش ترکیبی، جمعیت پیش‌بینی شده براساس عملکرد مجموعه عوامل مؤثر بر تغییر و تحول جمعیت یعنی باروری، مرگ و میر، مهاجرت و ترکیب سنی و جنسی به‌دست می‌آید. چهار سناریو استفاده شده برای پیش‌بینی جمعیت به‌ترتیب افزایش موالید با متوسط ۲/۵ فرزند، افزایش موالید با متوسط ۲/۱ فرزند، تثبیت موالید با متوسط ۱/۷۵ فرزند، و کاهش موالید با متوسط ۱/۳ فرزند در خانوار است (۱۶). نمودار ۲ پیش‌بینی مقدار سالانه تولید پسماند جامد شهری شهر تهران براساس جمعیت تا حدود ۱۲ میلیون نفر را نشان می‌دهد. براساس مدل‌های ۱، ۵ و ۶ با افزایش جمعیت تولید سالانه پسماند نیز افزایش می‌یابد. نمودار ۳ نیز مقدار سالانه تولید پسماند جامد شهر تهران پیش‌بینی شده با مدل‌های ۱، ۵ و ۶ و عدم قطعیت آنها را در سال‌های ۱۴۰۰-۱۴۳۰ براساس نرخ پیش‌بینی جمعیت در چهار سناریو مذکور نشان می‌دهد.

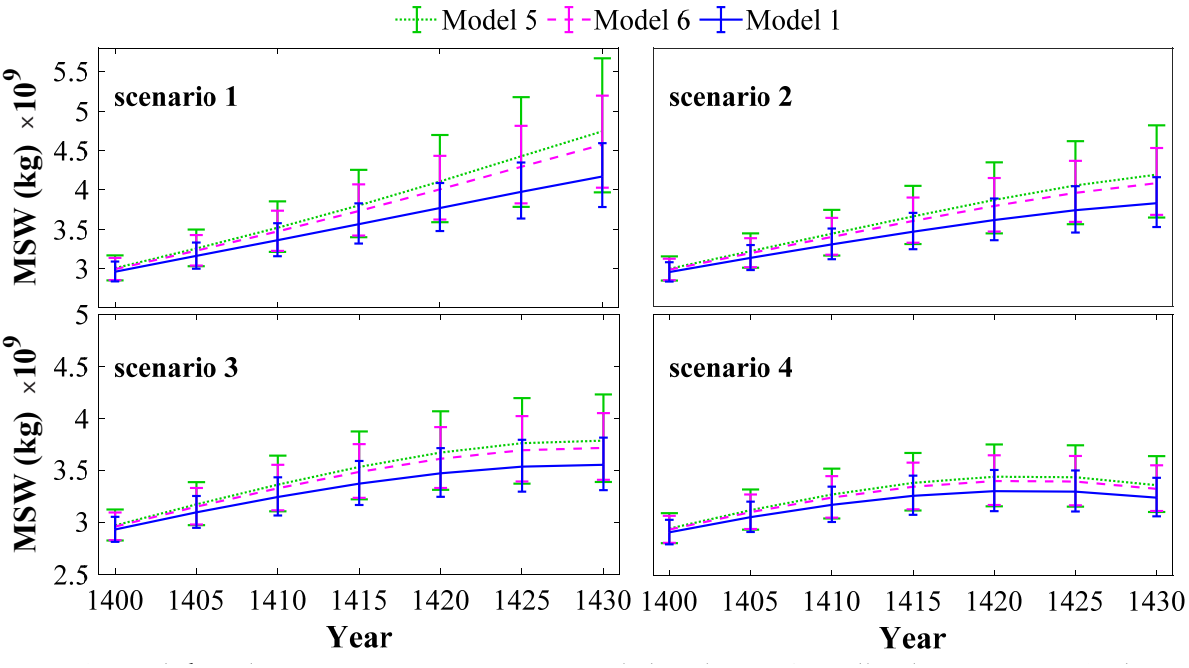
مطابق نمودار ۳ تولید پسماند در سناریوهای ۱، ۲ و ۳ که مبتنی بر افزایش و تثبیت موالید است روند صعودی خواهد داشت. اما در سناریو ۴ که کاهش موالید فرض آن است و بر طبق آن جمعیت از ۱۴۲۵ به بعد رشد منفی خواهد داشت، تولید پسماند سالانه نیز کاهش می‌یابد. همانطور که از مقایسه چهار سناریوی رشد جمعیت در نمودار ۳ آشکار است، با در نظر گرفتن نرخ رشد بالاتر برای جمعیت آینده شهر تهران عدم قطعیت مدل‌ها (به ویژه مدل ۶) در پیش‌بینی مقدار تولید پسماند هم بیشتر می‌شود.

Falahnezhad و همکار (۲۰۱۵) با در نظر گرفتن متغیرهای اقتصادی، اجتماعی و آب و هوایی مختلف پیش‌بینی بلندمدت (۲۰ سال آینده) تولید ماهانه پسماند شهری مشهد را با استفاده از روش ANN انجام دادند. هدف آنها ارزیابی روش‌های پیش‌پردازش داده‌ها قبل از ورود به شبکه بود (۱۳). توانایی مدل ANN (با تابع آموزش لونبرگ- مارکویت) برای پیش‌بینی تولید ماهانه پسماند جامد شهری در تهران توسط Nasrollahi و همکاران (۲۰۱۶) (۶) و برای پیش‌بینی تولید هفتگی پسماند در تهران توسط Noori و همکاران (۲۰۰۹) (۱۴) نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. اما به تحلیل وضعیت آینده آن نپرداختند. Ebrahimi و همکاران (۲۰۱۶) هم با استفاده از دو روش سری زمانی و مدلسازی پویایی سیستم میزان



نمودار ۲- پیش‌بینی مقدار سالانه تولید پسماند براساس جمعیت

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2024-11-13]



نمودار ۳- پیش‌بینی مقدار سالانه تولید پسماند براساس نرخ پیش‌بینی جمعیت شهر تهران به گزارش مرکز آمار ایران در سال‌های ۱۴۰۰-۱۴۳۰

تولید پسماند شهری اصفهان را تا سال ۱۴۰۰ پیش‌بینی کردند و نرخ رشد سالانه تولید پسماند ۳/۴ درصد حاصل شد (۸). اما، براساس پژوهش حاضر، نرخ تولید پسماند جامد شهری تهران در سال ۱۴۳۰، براساس میانگین پیش‌بینی سه مدل ۱، ۵ و ۶ در چهار سناریوی رشد جمعیت به ترتیب ۱۲۳۱۷، ۱۱۰۳۹، ۱۰۰۹۴ و ۹۰۷۴ ton در روز خواهد شد. همچنین سرانه تولید پسماند برای هر نفر در روز به‌ترتیب ۱۰۹۰، ۱۰۳۰، ۹۸۵ و ۹۴۰ g خواهد شد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش هشت فرم تابع ریاضی برای پیش‌بینی تولید سالانه پسماند جامد شهری بر پایه جمعیت با روش تحلیل رگرسیون در شهر تهران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ضرایب موجود در توابع چند جمله‌ای (درجه ۲ و بالاتر) و همچنین توابع با فرم ترکیبی خطی-نمایی و خطی-توانی با اطمینان ۹۹ درصد توانایی برازش داده‌های مذکور را ندارند. اما، توابع با فرم خطی، توانی و نمایی از دقت خوبی برخوردار هستند. مقدار سالانه تولید پسماند براساس این سه مدل تا سال ۱۴۳۰ در چهار سناریو رشد جمعیت تخمین زده شد. در هر چهار سناریو، پیش‌بینی‌ها افزایش تولید روزانه و سرانه پسماند را بیان می‌کنند. این اهمیت اتخاذ سیاست در مدیریت پسماند را برای سال‌های آینده برجسته می‌کند که درستی آن می‌تواند موجب کاهش تولید پسماند شود و یا پسماند جامد شهری را از جهت محیط‌زیستی به منبع مناسب برای بازیابی ماده یا انرژی بدل نماید.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند.

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2024-11-13]

References

1. Kaza S, Yao LC, Bhada-Tata P, Van Woerden F. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Washington DC: The World Bank; 2018.
2. Hoornweg D, Bhada-Tata P. What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management. Washington DC: The World Bank; 2012.
3. Abdoli MA. Municipal Solid Waste Management System and its Control Methods. Tehran: Organization of Recycling and Materials Transformation of Tehran Municipality; 1993 (in Persian).
4. Kolekar KA, Hazra T, Chakrabarty SN. A Review on Prediction of Municipal Solid Waste Generation Models. Procedia Environmental Sciences. 2016;35:238-44.
5. Minousepehr M, Alizadeh MR, Talebbeydokhti N. Performance assessment of computational intelligence techniques in solid waste generation forecasting (a case study). Journal of Civil and Environmental Engineering. 2018;48.1(90):37-75 (in Persian).
6. Nasrollahi S, Alimardani R, Sharifi M, Taghizadeh Yazdi Mr. Prediction of Tehran solid waste production by using of neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system. Iranian Journal of Biosystems Engineering. 2016;47(1):175-83 (in Persian).
7. Al-Salem SM, Al-Nasser A, Al-Dhafeeri AT. Multivariable regression analysis for the solid waste generation in the State of Kuwait. Process Safety and Environmental Protection. 2018;119:172-80.
8. Ebrahimi A, Ehrampoush MH, Hashemi H, Dehvari M. Predicting municipal solid waste generation through time series method (ARMA technique) and system dynamics modeling (Vensim Software). Iranian Journal of Health and Environment. 2016;9(1):57-68 (in Persian).
9. Abbasi M, El Hanandeh A. Forecasting municipal solid waste generation using artificial intelligence modelling approaches. Waste Management. 2016;56:13-22.
10. Nojedehi P, Heidari M, Ataei A, Nedaei M, Kurdestani E. Environmental assessment of energy production from landfill gas plants by using Long-range Energy Alternative Planning (LEAP) and IPCC methane estimation methods: A case study of Tehran. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2016;16:33-42.
11. Brunner PH, Rechberger H, Rechberger H. Handbook of Material Flow Analysis. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press; 2016.
12. Beigl P, Lebersorger S, Salhofer S. Modelling municipal solid waste generation: A review. Waste Management. 2008;28(1):200-14.
13. Falahnezhad M, Abdoli MA. Investigating effect of the preprocessing of the data on the accuracy of the modeling solid waste generation through ANNs. Amirkabir Journal of Civil Engineering. 2015;46(2):29-37 (in Persian).
14. Noori R, Abdoli MA, Ghasrodashti AA, Jalili Ghazizade M. Prediction of municipal solid waste generation with combination of support vector machine and principal component analysis: A case study of Mashhad. Environmental Progress & Sustainable Energy. 2009;28(2):249-58.
15. Tehran Waste Management Organization. Statistic projects. Tehran: Tehran Waste Management Organization; 2019 (in Persian).
16. Statistical Center of Iran. Statistics by topic: population. Tehran: Statistical Center of Iran; 2019 (in Persian).
17. Yusuf F, Martins JM, Swanson DA. Methods of Demographic Analysis. Dordrecht, Netherlands: Springer; 2014.
18. Al-Khatib IA, Abu Fkhidah I, Khatib JI, Kontogianni S. Implementation of a multi-variable regression analysis in the assessment of the generation rate and composition of hospital solid waste for the design of a sustainable management system in developing countries. Waste Management & Research. 2016;34(3):225-34.
19. Kumar A, Samadder SR. An empirical model for prediction of household solid waste generation rate – A case study of Dhanbad, India. Waste Management. 2017;68:3-15.
20. Ghinea C, Drăgoi EN, Comăniţă E-D, Gavrilescu M, Câmpean T, Curteanu S, et al. Forecasting

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2024-11-13]

municipal solid waste generation using prognostic tools and regression analysis. Journal of Environmental Management. 2016;182:80-93.

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2024-11-13]

Available online: http://ijhe.tums.ac.ir

Original Article

The future status of solid waste generation in Tehran metropolis with regression analysis method based on population

Kh Faraji Mahyari, Sh Rafiee*, AR Keyhani, Z Faraji Mahyari

Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

ARTICLE INFORMATION:

Received: 8 May 2019
Revised: 31 July 2019
Accepted: 5 August 2019
Published: 21 December 2019

Keywords: Municipal solid waste, Waste management, Forecasting solid waste generation, Validation of regression analysis, Tehran

***Corresponding Author:**
shahinrafiee@ut.ac.ir

ABSTRACT

Background and Objective: Knowledge about the quantity of municipal solid waste (MSW) generation plays a key role in formulating policies of waste management. So far, different methods have been applied to estimate the quantity of waste generation. In this study, eight specific forms of mathematical functions were evaluated to predict waste generation by the regression analysis method based on population.

Materials and Methods: The significance test of each model and the existence necessity of predictor parameters were performed using the F- and t-statistic, respectively. The statistical indicators of determination coefficient (R^2), adjusted determination coefficient ($R^2_{Adjusted}$), root mean square error (RMSE), mean bias error (MBE) and mean percentage error (MPE) were used for model's goodness of fit. The predicted determination coefficient ($R^2_{Predicted}$) was calculated to assess the predictive ability of models by method of Leave-one-out cross validation.

Results: The results showed that polynomial models of second order and more are not significant (at 0.01 level) despite good accuracy and are not suitable for long-term prediction. Linear, power and exponential models are best with R^2 equal to 0.942, 0.932 and 0.936 and $R^2_{Predicted}$ equal to 0.904, 0.893 and 0.898 respectively. However, the uncertainty was greater in the exponential model.

Conclusion: The status of waste generation was investigated in four scenarios based on growth rate of population (increasing, fixing and decreasing births) at Tehran metropolis in 2021-2051. In all scenarios, annual generation and per capita of waste are increased to 2051. The daily waste generation will increase to 12317 ton in 2051.

Please cite this article as: Faraji Mahyari Kh, Rafiee Sh, Keyhani AR, Faraji Mahyari Z. The future status of solid waste generation in Tehran metropolis with regression analysis method based on population. Iranian Journal of Health and Environment. 2019;12(3):489-500.

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2024-11-13]