

پیش‌بینی مصرف آب شهر تهران با به کارگیری الگوهای فصلی سری زمانی

منا آقایی^{۱*}، محمد کاوسی کلاشمی^۲ و محمد صادق اللهیاری^۳

چکیده

تعیین مقدار مصرف آبی در شهرها و طراحی ظرفیت مناسب برای سامانه عرضه آب شهری (شبکه‌های انتقال و مجتمع‌های تصفیه آب) ضرورت استفاده از الگوهای رفتاری و پیش‌بینی مقادیر مصرف آب در شهرها را آشکار می‌کند. استقرار سازمان‌های دولتی و خصوصی و صنایع بزرگ در این شهر و اهمیت تهران به لحاظ در برداشتن قطب‌های تجاری و سیاسی در کنار رشد جمعیت، لزوم تجدید مجدد زیرساخت‌های آب شهری را نشان می‌دهد. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از الگوی میانگین متحرک هم‌انباشته خودتوضیحی فصلی (SARIMA)، در پی الگوسازی و پیش‌بینی مقادیر مصرف آب شهر تهران است. در این راستا، با استفاده از سری زمانی ماهانه مصرف آب شهر تهران طی ماه‌های فروردین ۱۳۷۷ تا اسفند ۱۳۸۹، کاربرد آزمون ریشه واحد فصلی مدنظر قرار گرفت. نتایج بیانگر وجود تمامی ریشه‌های غیرفصلی و فصلی در سری زمانی ماهانه مصرف آب شهر تهران است. از این‌رو، با انتخاب فیلتر مناسب، برازش الگوهای SARIMA انجام شد. با توجه به میانگین خطای ۲/۳۲ درصدی پیش‌بینی درون نمونه‌ای و قدرت پیش‌بینی بالای این الگو، پیش‌بینی مقادیر مصرف آب شهر تهران برای ماه‌های سال ۱۳۹۰ می‌تواند نتایج مطلوبی را برای استفاده مدیران شهری فراهم آورد.

واژه‌های کلیدی: الگوهای رفتاری، آزمون ریشه واحد فصلی، شهر تهران، مصرف آب.

ارجاع: آقایی م. کاوسی کلاشمی م. و اللهیاری م. ص. ۱۳۹۲. پیش‌بینی مصرف آب شهر تهران با به کارگیری الگوهای فصلی سری زمانی. مجله پژوهش آب ایران. ۷(۱۳): ۶۹-۷۷.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد اقتصاد کشاورزی، دانشکده اقتصاد و توسعه کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

۲- استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان.

۳- عضو هیأت علمی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رشت.

* نویسنده مسئول: m.Aghabevgi@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۱/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۸/۰۱

مقدمه

پیش‌بینی مصرف آب شهری و تعیین میزان مناسب سرمایه‌گذاری در تأسیسات زیربنایی آب شهری، به سبب گران‌بودن احداث ساختارهای زیربنایی برای تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان شهری بسیار اهمیت دارد. ضرورت پیش‌بینی مصرف آب شهری را می‌توان در مواردی چون برنامه‌ریزی برای دستیابی به منابع آب جدید، بهبود و اصلاح سامانه‌های کنونی توزیع و انتقال آب، اصلاح و بازنگری در قوانین اجرایی، تغییر تنظیمات در این حوزه، اعمال تغییرات سازمانی و انجام پروژه‌های تحقیقاتی و مطالعاتی در حوزه تأمین، توزیع و فرآوری آب شهری خلاصه نمود (کمپبیل، ۲۰۰۴). پرسش‌های پیش‌روی برنامه‌ریزان و پژوهشگران در این عرصه شامل چگونگی شکل‌گیری تقاضای آب، عوامل تعیین‌کننده مقدار تقاضای آب، چگونگی واکنش تقاضای آب به متغیرهای اقتصادی مانند درآمد فرد و قیمت آب و پیش‌بینی مقادیر آبی تقاضای آب است (گریفن و سیکلس، ۲۰۰۱). اغلب مطالعات اقتصادی در حوزه تعیین مؤلفه‌های اثرگذار بر تقاضای آب شهری، بر قیمت آب به عنوان پارامتر کلیدی تأکید داشته، حال آن که نتایج نشان دهنده بی‌کاهش بودن تقاضای آب شهری نسبت به قیمت آن است (بالینگ و گوهر، ۲۰۰۷). نتایج بسیاری از مطالعات میدانی بیانگر آن است که تنها افزایش قابل ملاحظه درآمد منجر به افزایش تقاضای آب می‌شود (کاکتاس و کریسوستوموس، ۲۰۰۶). طیف وسیعی از مطالعات به بررسی و تعیین اثر شرایط آب و هوایی بر مصرف آب شهری پرداخته‌اند، اما به اعتقاد بالینگ و گوهر (۲۰۰۷) با مدنظر قرار دادن اثرات فصلی در تقاضای آب هر فرد شهری، میزان واکنش مصرف‌کننده آب شهری به تغییر در شرایط آب و هوایی نسبتاً ناچیز خواهد بود. روش‌شناسی مناسب و تأکید بر در نظر گرفتن اثرات فصلی باعث استفاده از الگوهای سری زمانی تک متغیره در بسیاری از پژوهش‌های مرتبط با پیش‌بینی تقاضای آب شهری شده است (نیرویادامی و مولینا، ۱۹۸۹؛ رینویک و آرچیبالد، ۱۹۹۸؛ هانسن، ۱۹۹۶؛ نیوگس و توماس، ۲۰۰۰؛ مارتینیز، ۲۰۰۲ و دال هاینز و همکاران، ۲۰۰۳). در پژوهش جین و همکاران (۲۰۰۱) تقاضای آب شهری به صورت هفتگی پیش‌بینی شد. مطالعه ژوا و همکاران (۲۰۰۰) با در نظر گرفتن عواملی چون روند، اثر فصلی، ضریب تصحیح آب و هوا و اجزاء خودتوضیحی، الگوی

سری زمانی برای پیش‌بینی مصرف روزانه آب شهر ملبورن^۱ در استرالیا ارایه دادند. پژوهش بوگادیس و همکاران (۲۰۰۵) با به کارگیری الگوهای ARIMA با درجات مختلف به این نتیجه رسید که الگوی (۰، ۱، ۲) بهترین هم‌پوشانی را با داده‌های واقعی مصرف آب شهر اوتاوا^۲ در کانادا دارد. از مطالعات داخلی می‌توان به مطالعه شرزهای و همکاران (۱۳۸۷) با عنوان پیش‌بینی تقاضای آب شهر تهران با استفاده از الگوهای ساختاری، سری زمانی و شبکه عصبی نوع GMDH اشاره کرد. در این مطالعه از شبکه عصبی نوع GMDH مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، الگوهای ساختاری و همچنین سری‌های زمانی، برای مقایسه روش‌های پیش‌بینی تقاضای سرانه آب در شهر تهران استفاده شده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن بوده است که پیش‌بینی تقاضای آب با استفاده از روش شبکه عصبی GMDH، نسبت به برآوردهای حاصل از الگوهای ساختاری و سری زمانی، دارای درجه کارایی بیشتری هستند. تایش و همکاران (۱۳۸۳) در مطالعه‌ای با توجه به تأثیرپذیری مصرف کوتاه‌مدت آب از عوامل آب و هوایی و همچنین وجود الگوی مصرف مشابه در روزهای متوالی، دو مدل به روش سری‌های زمانی برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت مصرف آب شهری تهران تهیه کرده‌اند. در مدل اول با تجزیه سری زمانی مصرف روزانه آب به مؤلفه‌های روند، تغییرات فصلی، تغییرات تصادفی و تعیین هر یک از آنها با استفاده از روش رگرسیون، پیش‌بینی انجام شده است. در مدل دوم با استفاده از مدل‌های ترکیبی اتورگرسیو و میانگین متحرک فصلی، الگوی مصرف در گذشته شناسایی شده و با فرض این که در آینده نیز این الگو ادامه داشته باشد، از آن برای پیش‌بینی مصرف آب استفاده شده است. در نهایت نتایج دو مدل تهیه شده با نتایج واقعی مقایسه شد که توانایی این مدل‌ها را برای پیش‌بینی مصرف کوتاه‌مدت آب شهری تهران نشان داد. از بین این دو، مدل پیشرفته دارای خطای کمتری برای داده‌های شهر تهران بوده است.

شهر تهران به عنوان یکی از شهرستان‌های مهم استان تهران با مساحت ۷۳۰ کیلومتر مربع و جمعیت ۸۴۲۹۸۰۷ نفر هجدهمین شهر پرجمعیت جهان به شمار می‌آید. توجه بیش از پیش به آب به عنوان یک کالای اقتصادی و

می‌توان به الگوی ARIMA اشاره کرد. در الگوی میانگین متحرک پیش‌بینی آینده مبتنی بر میانگین تعدادی از آخرین داده‌های یک سری زمانی می‌باشد. در واقع این الگو بر این اصل استوار است که مقدار آتی یک متغیر، میانگینی از مقادیر گذشته خود است. الگوهای سری زمانی مجموعه‌ای از الگوها را در بر می‌گیرند که می‌توان آن‌ها را به صورت دو دسته کلی الگوهای تک متغیره و الگوهای چندمتغیره در نظر گرفت. از مهم‌ترین الگوهای تک متغیره می‌توان به الگوهای خود توضیح (AR)، میانگین متحرک (MA)، و الگوی عمومی خودتوضیح جمعی میانگین متحرک (ARIMA) اشاره نمود. مدل ARIMA در واقع شکل خلاصه شده‌ای از مدل‌های برداری بوده و در صورت وجود داده‌های کافی می‌توانند، به همان خوبی مدل‌های برداری سری‌های زمانی را پیش‌بینی نمایند. مدل SARIMA از توسعه مدل ARIMA معمولی به دست آمده که برای تجزیه و تحلیل اطلاعات سری زمانی که شامل رفتارهای فصلی یا غیرفصلی است به کار می‌رود. این مدل خصوصیت فصلی را در داده‌های سری زمانی محاسبه می‌کند. همچنین برای پیش‌بینی مصرف آب مربوط به داده‌های فصلی به طور گسترده استفاده می‌شود. مزایای پیش‌بینی این مدل در مقایسه با دیگر مدل‌های سری زمانی به وسیله یک سری مطالعات بررسی شده است که به عنوان مثال می‌توان به مطالعه ورشونا و جوسی (۲۰۰۱) پرداخت که از این مدل برای پیش‌بینی تقاضای کوتاه مدت آب استفاده کرده‌اند.

داده‌های سری زمانی مصرف آب شرب شهر تهران اطلاعات ارزشمندی را در جهت برآورد مقادیر مصرف آتی فراهم آورده و پارامترهای اصلی در تعیین مقادیر مصرف آتی از قبیل روند، اثرات فصلی و شوک‌ها را در اختیار برنامه‌ریزان و پژوهشگران شهری قرار می‌دهد. نخستین رهیافت مورد استفاده در راستای الگوسازی مصرف آب شرب شهر تهران در پژوهش حاضر، الگوی میانگین متحرک هم‌انباشته خودتوضیحی فصلی^۱ (SARIMA) بوده که بسط الگوی میانگین متحرک هم‌انباشته خودتوضیحی (ARIMA) است. اگر سری زمانی مصرف آب شرب شهر تهران WC_t از فرایند $ARIMA(p,d,q)$ تبعیت نموده که در آن p ، تعداد وقفه‌های خودتوضیحی، d ، درجه انباشتگی برای ایستا کردن داده و q تعداد وقفه‌های میانگین متحرک الگو

بخش‌های مختلف برای آب را آشکار می‌کند. همچنین بررسی روند زمانی مصرف آب شهر تهران بر حسب مترمکعب بیانگر روند رو به افزایش مصرف در طی سال‌های مورد بررسی می‌باشد (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۰). رشد بی‌رویه مصرف آب در شهر تهران از یک طرف و فرسوده بودن شبکه آب رسانی موجود، سبب شده که منابع آبی مزبور پاسخگوی مصرف آب نباشد و ادامه این روند می‌تواند تأمین آب مورد نیاز برای کلان شهرهایی از جمله تهران را در آینده با مشکل روبرو کند، لذا پیش‌بینی تقاضای آب برای برنامه‌ریزی صحیح و اصولی برای آینده حایز اهمیت است. پیش‌بینی تقاضای کوتاه‌مدت آب شهری کمک مؤثری به مدیران و بهره‌برداران سیستم‌های آب شهری است تا بتوانند نسبت به مدیریت صحیح مصرف و سامانه عرضه آب اقدام کنند. با توجه به اهمیت مباحث فوق، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از الگوهای فصلی در پی الگوسازی و تدوین الگوی رفتاری مقادیر آتی مصرف آب شهر تهران است.

مواد و روش‌ها

کارایی نهایی هر تصمیم، به طبیعت یک دنباله از حوادث بستگی دارد که در پی آن تصمیم رخ می‌دهد. اگر بتوان جنبه‌های غیرقابل کنترل این حوادث را قبل از تصمیم‌گیری حدس زد، امکان تصمیم‌گیری بهتری به وجود می‌آید. در تجزیه و تحلیل‌های کمی علمی، غالباً پیش‌بینی به صورت استفاده از اطلاعات حال و گذشته در قالب الگوی یک معادله‌ای، الگوی چند معادله‌ای، الگوی سری‌های زمانی یا دیگر الگوها و به کار بردن الگوی مورد نظر برای دوره‌های بعدی است. امروزه پیش‌بینی وقایع آینده مورد توجه پژوهشگران در زمینه‌های مختلف قرار گرفته و روش‌های متنوعی نیز در این زمینه ابداع شده است. در پژوهش‌های اقتصادی، بیشترین مدل‌های پیش‌بینی مورد استفاده، از نوع مدل‌های اقتصادسنجی بوده‌اند. روش میانگین متحرک خودتوضیحی (ARIMA) از پرکاربردترین مدل سری زمانی در اقتصادسنجی است. در حالت کلی می‌توان الگوهای معمول پیش‌بینی را به دو دسته کلی پارامتری و غیرپارامتری تقسیم‌بندی کرد. الگوهای غیرپارامتری شامل الگوهای میانگین متحرک و انواع روش‌های تعدیل نمایی است. الگوهای پارامتری نیز خود به دو دسته الگوهای علی و غیرعلی تقسیم می‌شود. از جمله الگوهای غیرعلی

در گام نخست باید ایستایی^۸ سری زمانی را مورد بررسی قرار داد. به منظور آزمون ایستایی سری زمانی، وجود یا عدم وجود ریشه واحد^۹ بررسی می‌شود. آزمون ریشه واحد در پی تعیین روند تصادفی یا قطعی^{۱۰} در سری زمانی است. در صورت قرار داشتن ریشه‌های واحد در خارج از دایره واحد^{۱۱} سری زمانی ایستا خواهد بود. به منظور انجام آزمون ایستایی برای سری زمانی دارای رفتار فصلی و غیرفصلی، آزمون مورد استفاده باید در بردارنده اجزای فصلی و غیرفصلی باشند. در این راستا از آزمون‌های آماری چون، HEGY، CH، BM، FH و Tayler می‌توان استفاده نمود (هایلی برگ و همکاران، ۱۹۹۰؛ کانووا و هانسن، ۱۹۹۵؛ بیولیو و میرون، ۱۹۹۳؛ فرنسس و هایجن، ۱۹۹۷؛ تیلور، ۱۹۹۷). در رهیافت HEGY برای آزمون ریشه واحد سری زمانی ماهانه مصرف آب شرب شهر تهران (WCt)، الگوی خودتوضیحی ایجاد شده، به نحوی که ریشه‌های واحد فصلی و بلندمدت توسط ضرایب رگرسیون این الگو معرفی شود. الگوی خودتوضیحی مذکور دارای فرم کلی $A(L)y_t = e_t$ بوده، که در آن e_t نوفه سفید و $A(L)$ عملگر وقفه از درجه دوازده می‌باشد. فرآیند فوق در صورتی ایستا بوده که تمامی ریشه‌های چندجمله‌ای $A(L)$ خارج از دایره واحد قرار گیرند. برای آزمون ریشه واحد الگوی فوق، بسط چندجمله‌ای $A(L) = 1 - L12$ مورد استفاده قرار می‌گیرد. تجزیه سری زمانی ماهانه مصرف آب شرب شهر تهران برای تعیین ریشه‌های واحد با استفاده از معادله زیر صورت می‌گیرد (فرانسس، ۱۹۹۱):

$$\Delta_{12} = \frac{(1 - L)(1 + L)(1 + L^2)}{(1 + L + L^2)(1 - L + L^2)(1 + \sqrt{3}L + L^2)} \quad (9)$$

بر این اساس، ریشه‌های واحد غیرفصلی و فصلی ماهانه به ترتیب از چپ به راست به قرار زیر است:

$$\pm 1, \pm i, -\frac{1}{2}(\sqrt{3} \pm i), \frac{1}{2}(\sqrt{3} \pm i), -\frac{1}{2}(1 \pm i\sqrt{3}), \frac{1}{2}(1 \pm i\sqrt{3}) \quad (10)$$

ریشه‌های فوق به ترتیب مربوط به چرخه‌های ∞ ، ۶، ۳، ۹، ۸، ۴، ۲، ۱۰، ۷، ۵، ۱ و ۱۱ در هر سال بوده و فراوانی آن‌ها به ترتیب عبارت از 0 ، p ، $\pm p/2$ ، $m2p/3$ ، $\pm p/3$ ، $m5p/6$ ، $\pm p/6$ است (بیولیو و میرون، ۱۹۹۳). برای انجام آزمون ریشه واحد داده‌های ماهانه

باشد، معادله زیر را می‌توان مدنظر قرار داد (کریچ کاسنر و ولتر، ۲۰۰۷؛ کلیبر و زیلیس، ۲۰۰۸):

$$f(L)(1-L)^d WC_t = q(L)e_t, \quad e_t \approx WN(0, s^2) \quad (1)$$

در معادله فوق، e_t ویژگی نوفه سفید^۱ (WN) را دارا می‌باشد. عملگر وقفه^۲ را نیز می‌توان به صورت $L^k WC_t = WC_{t-k}$ تعریف کرد، از سوی دیگر، دو عملگر خودتوضیحی^۳ و میانگین متحرک^۴ به صورت زیر بیان می‌شود (پفاف، ۲۰۰۸):

$$\phi(l) = 1 - \phi_1 l - \phi_2 l^2 - \dots - \phi_p l^p \quad (2)$$

$$\theta(l) = 1 - \theta_1 l - \theta_2 l^2 - \dots - \theta_q l^q \quad (3)$$

در معادله فوق، $f(L) \neq 0$ بوده و $|f| < 1$ می‌باشد. بسط الگوی ARIMA به SARIMA در الگوسازی سری زمانی مصرف آب شرب شهر تهران (WCt) زمانی مناسب است که سری زمانی دارای هر دو رفتار فصلی^۵ و غیرفصلی^۶ باشد. وجود رفتارهای یاد شده، الگوی ARIMA را ناکارا می‌نماید (اریک، ۲۰۱۰). الگوی SARIMA را میانگین متحرک هم‌انباشته خودتوضیحی فصلی فزاینده^۷ نامیده و برای سری زمانی مصرف آب شرب شهر تهران آن را به صورت $WC(P,D,Q)S$ (ARIMA (p,d,q) نشان می‌دهند. فرم کلی الگوی SARIMA برای سری زمانی ماهانه مصرف آب شرب شهر تهران (WCt) به صورت زیر است (هالیم و بیسونو، ۲۰۰۸):

$$\phi(l)\phi(l^s)(1-l^s)^D WC_t \theta(l)\theta(l^s)\varepsilon_t \quad (4)$$

$$\phi(l) = 1 - \phi_2 l^2 - \dots - \phi_p l^p \quad (5)$$

$$\phi(l^s) = 1 - \phi_1 l^s - \phi_2 l^{2s} - \dots - \phi_p l^{ps} \quad (6)$$

$$\theta(l) = 1 - \theta_1 l - \theta_2 l^2 - \dots - \theta_q l^q \quad (7)$$

$$\theta(l^s) = 1 - \theta_1 l^s - \theta_2 l^{2s} - \dots - \theta_q l^{qs} \quad (8)$$

در الگوی فوق، p ، d و q به ترتیب درجه خودتوضیحی، تفاضل‌گیری و میانگین متحرک غیرفصلی بوده و D ، P و Q به ترتیب درجه خودتوضیحی، تفاضل‌گیری و میانگین متحرک فصلی است. جزء t جمله خطای دارای شرایط نوفه سفید (شوک تصادفی) و S درجه فصلی (برای داده‌های ماهانه برابر با ۱۲) را نشان می‌دهد. به منظور برآورد الگو،

1- White Noise (WN)

2- Lag operator

3- Autoregressive operator

4- Moving Average operator

5- Seasonal

6- Non-seasonal

7- Multiplicative seasonal autoRegressive integrated moving average

8- Stationary

9- Unit root

10- Stochastic or deterministic trend

11- Unit circle

وجود هر ریشه واحد را بدون توجه به وجود یا عدم وجود سایر ریشه‌ها فراهم می‌آورد (فرانسس، ۱۹۹۱). با استفاده از رهیافت فرانسس و هایجن (۱۹۹۷) شکل کلی این آزمون برای داده‌های ماهانه مصرف آب شهر تهران (WCt) به صورت زیر است:

$$\Delta_{12}WC_t = \alpha + \beta T + \sum_{s=1}^11 \delta_s D_{s,t} + \pi_1 Y_{1,t-1} + \pi_2 Y_{2,t-1} + \pi_3 Y_{3,t-1} + \pi_4 Y_{3,t-2} + \pi_5 Y_{4,t-1} + \pi_6 Y_{4,t-2} + \pi_7 Y_{5,t-1} + \pi_8 Y_{5,t-2} + \pi_9 Y_{6,t-1} + \pi_{10} Y_{6,t-2} + \pi_{11} Y_{7,t-1} + \pi_{12} Y_{7,t-2} + \sum_{i=1}^p \lambda_i \Delta_{12}WC_{t-i} + \varepsilon_t \quad (11)$$

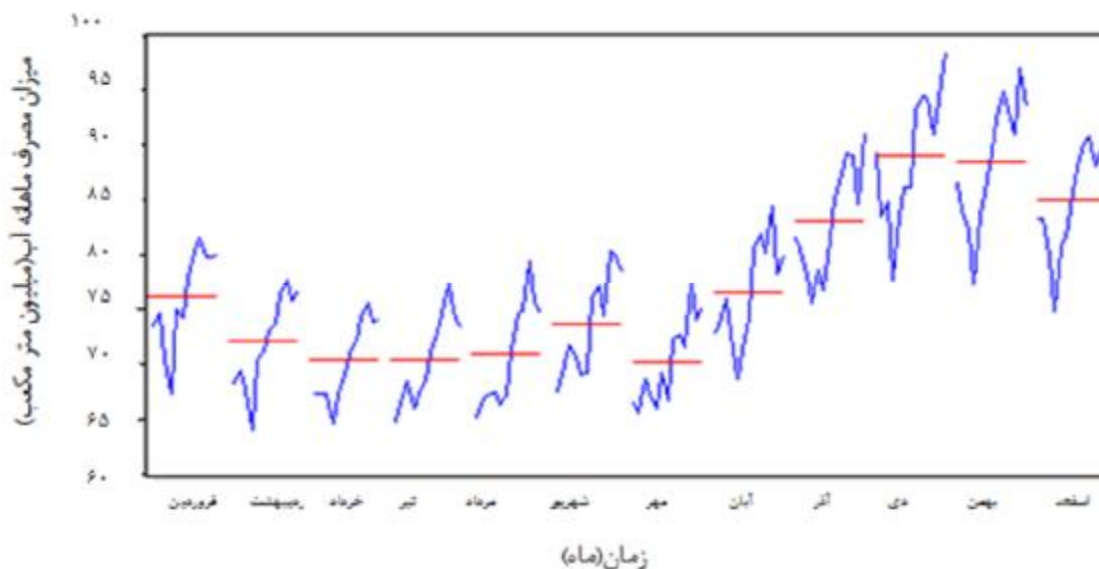
مصرف در ماه تیر و کمترین میزان آن در ماه فروردین رخ داده است (شکل ۱). در دوره مورد بررسی، میزان بیشینه مصرف آب در تیر ۱۳۸۹ و مقدار کمینه آن نیز در آبان ماه سال ۱۳۸۰ می‌باشد. طی این دوره بیشترین نوسانات مصرف آب بین ماه‌های مختلف یک سال، متعلق به سال ۱۳۷۷ (با انحراف معیار ۸/۹۶ میلیون مترمکعب) است. به طور متوسط اختلاف بین مقدار بیشینه و کمینه مصرف ماه‌های مختلف برای سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۹ معادل با ۲۰/۴ میلیون مترمکعب بوده، بیشترین اختلاف (۲۴/۶ میلیون مترمکعب) در سال ۱۳۷۷ و کمترین اختلاف (۱۳/۶ میلیون مترمکعب) نیز در سال ۱۳۸۰ به ثبت رسیده است.

مصرف آب شرب شهر تهران، تشکیل آزمون فرضیه باید بر مبنای بررسی وجود هر یک از ریشه‌های واحد بدون توجه به وجود یا عدم وجود سایر ریشه‌ها، صورت گیرد. در این راستا، با استفاده از تقریب تیلور تبدیل‌های خطی از سری زمانی ماهانه مورد بررسی ایجاد شده که امکان آزمون

در معادله فوق، اجزاء قطعی شامل عرض از مبدا (α)، متغیرهای موهومی ماهانه (D) و روند (T) است. تبدیل‌های خطی y_i نیز به منظور آزمون وجود ریشه‌های فصلی و غیرفصلی در معادله وارد شد. ضریب رگرسیون P_1 برای آزمون وجود ریشه غیرفصلی و ضرایب رگرسیون P_2 تا P_{12} برای سنجش وجود ریشه‌های فصلی استفاده قرار می‌شود.

نتایج و بحث

بررسی شکل انباشتگی فصلی مصرف ماهانه آب شهر تهران بر حسب میلیون مترمکعب نشان داد که به طور متوسط، طی سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۹ بیشترین حجم



شکل ۱- انباشتگی فصلی مصرف ماهانه آب در شهر تهران طی سال‌های 1377 تا 1389

داده و کمترین میزان مصرف آب نیز به ماه فروردین تعلق دارد. برای تبیین الگوهای رفتاری و بررسی صحت و میزان

همان طور که در شکل ۱ دیده شده، به طور متوسط بیشترین مقدار مصرف آب در شهر تهران در تیر ماه رخ

شده مقادیر آماره‌های LM(1) و LM(12) به ترتیب برابر با ۱/۴۸ (سطح احتمالاتی ۲۳ درصد) و ۰/۵۲ (سطح احتمالاتی ۸۸ درصد) بوده که دلالت بر پذیرش فرض صفر و عدم وجود خودهمبستگی است. از این‌رو، مقادیر آماره‌های t و F حاصل از آزمون BM قابل اتکاء هستند. نتایج حاصل از آزمون ریشه واحد فصلی و غیرفصلی BM در جدول ۱ ارائه شده است.

دقت مقادیر پیش‌بینی شده، داده‌های مصرف ماهانه سال ۱۳۸۹ از نمونه خارج شده و با بهره‌گیری از داده‌های سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۸ برازش الگوها انجام شد. در گام نخست، در آزمون تعیین ریشه‌های فصلی و غیرفصلی BM، پس از بررسی وقفه‌های مختلف، در نهایت بر مبنای آزمون‌های کنترل تشخیصی وقفه‌ها ۱، ۶ تا ۱۲، ۲۴ و ۳۶ به عنوان وقفه بهینه انتخاب شد. با انتخاب وقفه‌های یاد

جدول ۱- نتایج حاصل از آزمون ریشه واحد BM

مقدار بحرانی (در سطح احتمالاتی پنج درصد)	مقدار محاسباتی (الگوی دارای عرض از مبدا و روند)	فراوانی فصلی	نوع آزمون
-۳/۴۴	-۲/۶	۰	آزمون $t: p_1 = 0$
-۲/۶۵	-۲/۶۲	p	آزمون $t: p_2 = 0$
۵/۷۷	۵/۴۹	$p/2$	آزمون $F: p_3 = p_4 = 0$
۵/۷۷	۱/۴۱	$2p/3$	آزمون $F: p_5 = p_6 = 0$
۵/۷۷	۳/۳۶	$p/3$	آزمون $F: p_7 = p_8 = 0$
۵/۸۴	۳/۶۹	$5p/6$	آزمون $F: p_9 = p_{10} = 0$
۵/۸۴	۳/۷۷	$p/6$	آزمون $F: p_{11} = p_{12} = 0$

(PACF) مدنظر قرار گرفت و مقادیر اولیه درجه الگوی SARIMA انتخاب شد.

بر این اساس، مقادیر اولیه درجه‌ها در الگوی SARIMA برابر با $p=1$ ، $q=2$ ، $P=2$ و $Q=1$ است. علاوه بر الگوی اولیه، درجه‌های مختلف دیگری نیز برای برازش الگوهای SARIMA لحاظ شد. برای انتخاب الگوی مناسب برای پیش‌بینی، با انتخاب مقادیر مختلف برای درجه‌های الگوی SARIMA مبتنی بر پیشنهاد اولیه، الگویی که بر مبنای آماره Q فاقد مشکل خودهمبستگی در سطح پنج درصد آماره بوده، انتخاب شد. الگوی SARIMA برتر بر مبنای آزمون کنترل تشخیصی $(2,1,1)$ SARIMA $(3,1,1)$ می‌باشد. مقدار آماره‌های Q (beg.)، $Q(12)$ ، $Q(24)$ و $Q(36)$ به ترتیب برابر با ۳، ۷/۷۵، ۱۷/۷۴ و ۲۷/۱۸ بوده که با توجه به ارزش‌های احتمالاتی ۸، ۱۷، ۴۱ و ۵۶ درصد بیانگر پذیرش فرض عدم مبنی بر عدم وجود خودهمبستگی در سطح پنج درصد آماری است. نتایج حاصل از برازش الگوی فوق در جدول زیر ارائه شد. پس از برازش و تعیین الگوی برتر، پیش‌بینی درون نمونه‌ای مقادیر مصرف ماهانه آب شهر تهران برای سال ۱۳۸۹ و مقایسه آن با مقادیر واقعی مدنظر قرار گرفت. نتایج حاصل در جدول ۲ ارائه شده است.

بر اساس نتایج جدول ۱، در تمامی فراوانی‌های غیرفصلی و فصلی، مقادیر مطلق آماره‌های محاسباتی کمتر از مقدار بحرانی در سطح پنج درصد بوده، در نتیجه ریشه واحد در تمامی فراوانی‌های یاد شده وجود دارد. با توجه به وجود تمامی ریشه‌های غیرفصلی و فصلی در سری زمانی ماهانه مصرف آب شهر تهران، فیلتر مناسب برای ایستا کردن این سری زمانی $(1-L)I_2$ است.

برای بررسی وجود همزمان تمامی ریشه‌های غیرفصلی و فصلی و تمامی ریشه‌های فصلی به ترتیب از آزمون تیلور محاسباتی $F_{1,2,\dots,12}$ و $F_{2,3,\dots,12}$ استفاده شد. مقدار آماره محاسباتی $F_{1,2,\dots,12}$ برابر با ۳/۰۵ و مقدار بحرانی آن ۵/۸۲ است. همچنین، مقدار آماره محاسباتی $F_{2,3,\dots,12}$ معادل ۳/۱۸ بوده و مقدار بحرانی آن ۴/۵ می‌باشد.

کوچکتر بودن مقدار مطلق آماره محاسباتی $F_{1,2,\dots,12}$ از مقدار بحرانی بیانگر وجود تمامی ریشه‌های غیرفصلی و فصلی بوده، مقدار آماره $F_{2,\dots,12}$ و مقایسه آن با مقدار بحرانی نیز گویای وجود تمامی ریشه‌های فصلی است. پس از تعیین نوع فیلتر مورد استفاده و انتخاب $d=1$ و $D=1$ برای ایستا کردن سری زمانی ماهانه مصرف آب تهران، رسم توابع خود همبستگی (ACF) و خودهمبستگی جزئی

خود همبستگی جزئی		خود همبستگی	
+ RRRRR	+	+ RRRRR	+
RRRRRRRR	+	RRRRRRRR	+
+ RRRR	+	+ RR	+
+ RR	+	+ RR	+
+ RRRR	+	+ RRR	+
+ RRRRR	+	+ RRR	+
+ RRRRR	+	+ RR	+
+ RRRRR	+	+ RR	+
+ RRR	+	+ RR	+
+ RRRRRR+		+ RRRRRR	
+ RRRR	+	+ RRR	+
RRRRRRRRRR	+	RRRRRRRRRR	+
+ RRR	+	+ RR	+
+RRRRRR	+	+ R	+
+ RRRR	+	+ R	+
+ RR	+	+ RR	+
+ RRR	+	+ R	+
+ RRR	+	+ RR	+
+ RR	+	+ RRRR	+
+RRRRRR	+	+ RRR	+
+ RR	+	+ RR	+
+ RR	+	+ RRR	+
+ RRRRRR+		+ RRRRR	+
RRRRRRRRRR	+	+RRRRRR	+
+ RRRRR	+	+ RRR	+
+ RRRRR	+	+ RRR	+
+ RR	+	+ RRR	+
+ R	+	+ RR	+
+ RRRRR	+	+ RRR	+
+ RR	+	+ RRR	+
+ RRRR	+	+ RR	+
+ RR	+	+ RRRR	+
+ RRRRR	+	+ RRRR	+
+ RRRRRR+		+ RR	+
+ RRRRR	+	+ RRRRR	+
+ RR	+	+ RRRR	+
+ RR	+	+ RR	+
+ RRRRR	+	+ RRRRR	+
+ RRRR	+	+ RR	+
+ RRR	+	+ RRRR	+

شکل 2- رسم توابع خود همبستگی و خود همبستگی جزئی

جدول 2- نتایج حاصل از پیش بینی درون نمونه‌های الگوی میانگین متحرک هم‌انباشته خود توضیحی فصلی

ماه‌های سال ۱۳۸۹	مقدار واقعی	مقدار پیش‌بینی	ME	MPE	MAPE
فروردین	۷۵۲۰۳۹۹۸	۷۴۶۱۱۱۱	۵۹۲۸۸۷	۰/۷۹	-۰/۷۹
اردیبهشت	۸۰۰۳۲۱۷۴	۸۱۴۳۳۷۲۰	-۱۴۰۱۵۴۶	۱/۷۵	۱/۷۵
خرداد	۹۱۱۵۲۴۹۰	۸۸۶۴۰۵۵۱	۲۵۱۱۹۳۹	۲/۷۶	-۲/۷۶
تیر	۹۸۵۳۴۱۵۷	۹۶۰۹۰۴۰۳	۲۴۴۳۷۵۴	۲/۴۸	-۲/۴۸
مرداد	۹۳۵۶۴۸۸۹	۹۵۸۷۹۲۳۶	-۲۳۱۴۳۴۷	۲/۴۷	۲/۴۷
شهریور	۸۹۹۹۲۴۳۲	۹۱۹۴۴۸۹۶	-۱۹۵۲۴۶۴	۲/۱۷	۲/۱۷
مهر	۸۳۴۲۵۶۵۰	۸۲۷۰۵۷۷۶	۷۱۹۸۷۴	۰/۸۶	-۰/۸۶
آبان	۷۶۹۴۹۸۳۲	۷۸۱۳۹۰۱۲	-۱۱۸۹۱۸۰	۱/۵۵	۱/۵۵
آذر	۷۴۹۰۸۳۶۱	۷۴۳۱۶۵۲۱	-۱۴۰۸۱۶۰	۱/۸۸	۱/۸۸
دی	۷۴۴۶۲۷۰۸	۷۴۴۹۹۰۱	-۲۰۳۷۱۹۳	۲/۷۴	۲/۷۴
بهمن	۷۴۱۳۳۱۹۷	۷۶۹۹۸۷۷۰	-۲۸۶۵۵۷۳	۳/۸۷	۳/۸۷
اسفند	۷۵۹۱۶۳۸۳	۷۹۳۴۳۷۳۱	-۳۴۲۷۳۴۸	۴/۵۱	۴/۵۱

شده پیش‌بینی برون‌نمونه‌ای مقادیر مصرف آب در شهر تهران برای ماه‌های مختلف سال ۱۳۹۰ صورت گرفت.

متوسط خطای پیش‌بینی درون‌نمونه‌ای برای ماه‌های سال ۱۳۸۹ برابر با ۲/۳۲ درصد بوده که بیانگر قدرت پیش‌بینی مطلوب الگوی SARIMA می‌باشد. با استفاده از الگوی یاد

جدول 3- پیش‌بینی مقادیر مصرف آب شهر تهران برای 1390:01 تا 1390:12. (میلیون مترمکعب)

دوره	مقدار پیش‌بینی	دوره	مقدار پیش‌بینی	دوره	مقدار پیش‌بینی
۱۳۹۰:۱	۷۶/۶۵	۱۳۹۰:۶	۹۲/۶۸	۱۳۹۰:۱۱	۷۸/۴۱
۱۳۹۰:۲	۸۴/۶۳	۱۳۹۰:۷	۸۳/۷۷	۱۳۹۰:۱۲	۸۱/۰۱
۱۳۹۰:۳	۹۱/۲۸	۱۳۹۰:۸	۷۸/۹۱		
۱۳۹۰:۴	۹۶/۱۶	۱۳۹۰:۹	۷۷/۲۶		
۱۳۹۰:۵	۹۵/۱۶	۱۳۹۰:۱۰	۷۸/۰۶		

آب جزء از طریق ترکیب تجارب میدانی مدیران با ظرفیت‌های علمی متخصصان داخلی میسر نخواهد شد.

منابع

۱. تابش م. زهرایی. ب. و خوش اخلاق. ع. ۱۳۸۳. کاربرد تحلیل سری‌های زمانی در پیش‌بینی تقاضای روزانه مصرف آب شهر تهران. اولین کنگره ملی مهندسی عمران.
۲. شرزهای غ. احراری م. و فخرایی ح. ۱۳۸۷. پیش‌بینی تقاضای آب شهر تهران با استفاده از الگوهای ساختاری، سری‌های زمانی و شبکه عصبی نوع GMDH. مجله تحقیقات اقتصادی کشاورزی دانشگاه تهران. ۱۷۵-۸۴:۱۵۱.
۳. گزارش سالانه مرکز آمار ایران. ۱۳۹۰.
4. Balling R. C. and Gober P. 2007. Climate variability and residential water use in the city of Phoenix, Arizona. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 46(6):1130-1137.
5. Beaulieu J. and Miron J. 1993. Seasonal unit roots in aggregate US data. *Journal of Econometrics*. 55(5):305-328.
6. Bougadis J. Adamowski K. and Diduch R. 2005. Short-term municipal water demand forecasting. *Hydrological Processes*. 19(3):137-148.
7. Campbell H. 2004. Prices, devices, people, or rules: The relative effectiveness of policy instruments in water conservation. *Rev. Pol. Res.* 21(9):637-662.
8. Canova F. and Hansen B. 1995. Are seasonal patterns constant over time? A test for seasonal stability. *Journal of Business and Economic Statistics*. 13(11):237-252.
9. Franses P. H. 1991. Seasonality, non-seasonality and the forecasting of monthly time series.

نتایج حاصل از الگوی SARIMA و مقادیر متوسط خطای پیش‌بینی درون‌نمونه‌ای این مدل که برابر با ۲/۳۲ درصد بوده است، نشان داد که الگو دارای قدرت پیش‌بینی خوبی است. همچنین نتایج حاصل از مقادیر پیش‌بینی مصرف آب شرب شهر تهران حاکی از افزایش مصرف آب در سال‌های اخیر بوده است، از این رو نیاز به برنامه‌ریزی، طراحی بهتر، عملکرد کارا و مدیریت سیستم‌های آب رسانی موجود، در شهر تهران ضروری به نظر می‌رسد. یکی از پیش‌نیازهای مهم در برنامه‌ریزی، طراحی، اجرا و مدیریت بهتر منابع آب، پیش‌بینی دقیق تقاضای آب با استفاده از الگوهای پارامتریک و غیرپارامتریک است.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با بهره‌گیری از الگوی میانگین متحرک هم‌انباشته خودتوضیحی فصلی (SARIMA) موفق به پیش‌بینی مقادیر مصرف آب شهر تهران در افق زمانی دوازده ماهه شد. پژوهش حاضر نشان داد که با توجه مقادیر درصد متوسط خطای پیش‌بینی درون‌نمونه‌ای در الگوی SARIMA می‌توان نتیجه گرفت که الگو دارای قدرت پیش‌بینی بالایی برای تخمین تقاضای آب شرب شهر تهران است. از سوی دیگر، این الگو نتایج مطلوب و چشمگیری را برای استفاده در برنامه‌ریزی‌های شهر تهران فراهم آورده است. لذا توصیه می‌شود تا مدیران و تصمیم‌گیرندگان شهری با بهره‌گیری از چنین یافته‌های علمی و تعامل بیشتر با متخصصان دانشگاهی بستر مدیریت بهینه و کارا در حوزه شهری را فراهم آورند. بدیهی است انجام برنامه‌ریزی مطلوب، اتخاذ سیاست‌های کارا و تدوین راهبردهای مناسب در راستای توسعه زیرساخت‌های شهری مانند سامانه فرآوری، انتقال و توزیع

- IIT Kanpur using artificial neural networks. *Water Resources Management*. 15(9):299-321.
20. Maniatis P. 2009. Forecasting Brussels airport passengers, comparison between SARIMA and exponential smoothing forecasting techniques. *The Business Review*. 13(1):111-119.
 21. Martinez-Espineira R. 2002. Residential water demand in the northwest of Spain. *Environmental and Resource Economics*. 21(3):161-187.
 22. Nauges C. and Thomas A. 2000. Privately operated water utilities municipal price negotiation. and estimation of residential water demand (The Case of France). *Land Economics*. 76(1):68-85.
 23. Nieswiadomy M. L. and Molina D. 1989. Comparing residential water estimates under decreasing and increasing block rates using Household Data. *Land Economics*. 65(3):280-289.
 24. Pearce D. 1999. Pricing water: Conceptual and theoretical issues, European Commission for the Conference on Pricing Water. *Economics, Environment and Society*. 567-630.
 25. Pfaff B. 2008. *Analysis of Integrated and Cointegrated Time Series with R*. 2Ed. Springer Science Business Media, LLC, NY, USA. 330-376.
 26. Taylor A. M. R. 1997. On the practical problems of computing seasonal unit root tests. *International Journal of Forecasting*. 13(13):307-318.
 27. Tietenberg T. 1996. *Environmental and Natural Resources*. Harper Collins. N. Y. 228-310.
 28. Zhou S. L. McMahon T. A. Walton A. and Lewis J. 2002. Forecasting operational demand for an urban water supply zone. *Journal of Hydrology*. 259(6):189-202.
 - *International Journal of Forecasting*. 17(2):199-208.
 10. Franses P. H. and Hobijn B. 1997. Critical value for unit root tests in seasonal time series. *Journal of Applied Statistics*. 24(4):25-47.
 11. Ghiassi M. David K. Zimbra K. and Saidane H. 2008. Urban water demand forecasting with a dynamic artificial neural network model. *Journal of Water Resource Planning and Management*. 134(2):138-146.
 12. Griffin R. and Sickles R. 2001. Demand specification for municipal water management. evaluation of the Stone-Geary form. *Land Economics*. 77(3):399-422.
 13. Halim S. and Bisono I. N. 2008. Automatic seasonal autoregressive moving average models and unit root test detection. *International Journal of Management Science and Engineering Management*. 3(4):266-274.
 14. Hamilton J. D. 1994. *Time Series Analysis*. Princeton Univ. Press, Princeton New Jersey. 410-523.
 15. Hansen L. 1996. Water and energy price impacts on residential water demand in Copenhagen. *Land Economics*. 72(1):66-79.
 16. Hylleberg S. Engle R. Granger C. W. J. and Yoo B. 1990. Seasonal integration and cointegration. *Journal of Econometrics*. 44(1):215-238.
 17. Kleiber C. and Zeileis A. 2008. *Applied Econometrics with R*. Springer Science Business Media. LLC, NY, USA. 210-345.
 18. Kirchgässner G. and Wolters J. 2007. *Introduction to Modern Time Series Analysis*. Springer- Verlag Berlin Heidelberg. 120-145.
 19. Jain A. Varshney A. K. and Joshi U. 2001. Short-term water demand forecast modeling at

