پیش‌بینی بلندمدت مصرف آب شهری با استفاده از شبکه بیزین (مطالعه موردی: شهرستان نیشابور)

مسعود تابش*[۱]، مهدی ملارمضانی[۲]، اکبر شیرزاد[۳]، نیوشا راثی فقیهی[۴]

[۱] استاد دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
[۲] فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
[۳] دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی ارومیه
[۴] فارغ‌التحصیل کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران- محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

(دریافت: ۹۷/۱۱/۱۷، پذیرش: ۹۹/۱۱/۵، نشر آنلاین: ۹۹/۱۱/۵)

چکیده

با توجه به مشکل کمبود آب در کشور، پیش‌بینی بلندمدت مصرف آب شهری می‌تواند به‌عنوان یک راه‌حل مؤثر برای سیاست‌گذاری‌های مدیریت تقاضا و آب‌رسانی در شبکه توزیع آب شهری اتخاذ شود. برای تحقق این امر لزوم تدوین مدلی که بتواند با دقت بالا، پیچیدگی و تأثیر عوامل مختلف بر میزان مصرف آب و عدم قطعیت هریک از این عوامل را نشان دهد، محسوس است. گسترش عدم قطعیت در طول بازه پیش‌بینی سبب شده است که علاوه بر روش‌های قطعی، روش‌های احتمالاتی از جمله شبکه بیزین (Bayesian network) نیز مورد بررسی قرار گیرد. شبکه‌های بیزین با توجه به ساختار احتمالاتی، سهولت در نظر گرفتن عدم قطعیت در پیش‌بینی و نیز لحاظ نمودن روابط علّی، برای پیش‌بینی مصرف آب شهری بسیار مطلوب است. در این مقاله با استفاده از شبکه بیزین، دو مدل برای پیش‌بینی بلندمدت مصرف آب شهرستان نیشابور ارائه شده است. همچنین کارایی مدل‌های بیزین مزبور در مقایسه با تابع استون-گری و حساسیت مدل‌های ارائه‌شده نسبت به ساختار شبکه‌ای و دسته‌بندی داده‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بررسی‌های صورت‌گرفته نشان می‌دهد مدل‌های پیشنهادی توانایی پیش‌بینی بلندمدت مصرف آب با دقت بالا را دارند. مقایسه انجام‌شده میان شبکه‌های بیزین و تابع استون-گری (Stone-Geary function) نشان‌دهنده بالاتر بودن دقت شبکه بیزین به‌میزان ۵۰ درصد نسبت به تابع استون-گری است، به‌طوری‌که درصد میانگین خطای مطلق برای مدل بیزین برابر با ۰/۰۵ و برای مدل استون- گری برابر با ۰/۱ به‌دست‌آمده است. همچنین تابع استون- گری حداکثر مقادیر پیش‌بینی‌شده برای مصرف سرانه آب را کم‌تر از مدل بیزین و حداقل مصرف را نیز بیشتر از مدل بیزین پیش‌بینی می‌کند.

کلیدواژه‌ها: شبکه بیزین، پیش‌بینی بلندمدت مصرف آب شهری، عدم قطعیت، روش‌های احتمالاتی.

۱- مقدمه

کشور ایران از لحاظ جغرافیایی در منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک قرار دارد. بارش اندک به‌همراه رشد روزافزون جمعیت موجب افزایش مصرف منابع آب می‌شود. بنابراین پیش‌بینی می‌شود در سال‌های آتی، کشور با مشکل کمبود آب روبه‌رو شود. لذا پیش‌بینی مصرف آب شهری و اتخاذ سیاست‌های بلندمدت، میان‌مدت و کوتاه‌مدت مناسب برای بهینه‌سازی مصرف آب، نقش مؤثری در حفاظت از منابع آب کشور خواهد داشت. اما دسترسی به دقت بالا در پیش‌بینی‌ها، از چالش‌های پیش‌رو است (تابش و همکاران، ۱۳۹۳؛ پور صالحی و همکاران، ۱۳۹۸). لذا باید تأثیر متغیرهای مختلفی از جمله وضعیت اقتصادی جامعه (درآمد سالیانه)، نرخ بی‌کاری، سطح آموزش‌وپرورش، تراکم جمعیت، رشد جمعیت، فعالیت‌های تجاری و صنعتی، قیمت آب، تغییر اقلیم و الگوی مصرف مردم را که بیشتر آن‌ها ماهیت احتمالاتی دارند، در مدل در نظر گرفت.

مهاجرانی و همکاران (۱۳۸۹) به معرفی مدل‌های احتمالاتی- گرافیکی بیزین و کاربرد آن‌ها در مدیریت سیستم‌های منابع آب پرداختند. آنان معتقد بودند که کاربرد مدل‌های شبکه بیزین به‌دلیل در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌ها و همچنین توانایی مدل کردن سیستم‌های پیچیده طبیعی در عرصه مدیریت منابع آب، بسیار

*نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۶۶۴۹۸۹۸۱-۰۲۱
آدرس ایمیل: mtabesh@ut.ac.ir (م. تابش)، m.molaramezani@ut.ac.ir (ن. ملارمضانی)، a.shirzad@uut.ac.ir (ا. شیرزاد)، n.rasifaghihi@ut.ac.ir (ن. راثی فقیهی).

مفید واقع می‌شود. تابش و همکاران (۱۳۹۳) یک مدل ترکیبی اقلیمی و مدل پیش‌بینی مصرف را برای ارزیابی اثرات تغییرات اقلیم بر مصرف آب شهر نیشابور به‌کار بردند. نتایج پیش-بینی مصرف آب برای سه سناریو، نشان‌دهنده افزایش مصرف آب با توجه به تغییرات اقلیمی در آینده بود.

Ramin و همکاران (۲۰۱۲) از شبکه بیزین برای ترکیب چند مدل مختلف به‌منظور پیش‌بینی کیفیت آب و تعیین عوامل مؤثر بر آن استفاده نمودند. دیدگاه‌های امروزه به این صورت است که یک مدل صحیح و واقعی در سیستم اکولوژیک[1] برای اهداف خواسته‌شده موجود نیست و به‌جای استفاده از یک مدل به‌عنوان بهترین مدل، باید ترکیبی از مدل‌های موجود را موردبررسی قرار داد.

Bakker و همکاران (۲۰۱۴) سه مدل مختلف تطبیقی، تاریخی، انتقالی و یک مدل رگرسیون خطی چندگانه را برای پیش‌بینی مصرف آب ارائه نمودند. در این تحقیق آنان عملکرد مدل‌ها را باوجود داده‌های هواشناسی و بدون این داده‌ها موردبررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد در حالت استفاده از داده‌های هواشناسی، بیش‌ترین خطاهای پیش‌بینی تا ۱۱ درصد و خطاهای متوسط تا ۷ درصد کاهش پیدا می‌کنند.

Magiera و Froelich (۲۰۱۵) با استفاده از شبکه بیزین، تقاضای روزانه آب را پیش‌بینی کردند. برای آن‌که شبکه بیزین بتواند روند پیش‌بینی را به‌درستی بپیماید، تمام داده‌های سری زمانی به‌صورت جدا درآمدند. تعداد بازه‌های زمانی در گسسته‌سازی به‌عنوان یک پارامتر در فرایند آموزش و آزمایش قرار گرفت. پس از مقایسه الگوریتم‌های مختلف برای آموزش شبکه و استفاده از پارامترهای متفاوت شبکه بیزین، نتایج نشان داد که یک شبکه ساده با دو گره، بسیار بهتر از مدل‌های پیچیده برای داده‌های در نظر گرفته‌شده عمل می‌کند.

Froelich (۲۰۱۵) مدلی برای ارائه یک سیستم کارآمد پیش‌بینی تقاضای روزانه آب شهری، تدوین کرد. وی با استفاده از شبکه بیزین گوسی دینامیکی (DGBN)[2]، یک مدل سری زمانی هیدرولوژیکی پیش‌بینی ساخت. نتایج حاصل نشان داد مدل‌هایی که ساختار آن‌ها طراحی می‌شود در مقایسه با مدل‌های مبتنی بر آموزش خودکار از ساختار شبکه اصلی بسیار کارآمدتر هستند. همچنین مدل ارائه‌شده با استفاده از شبکه بیزین گوسی دینامیکی، با آن‌که یک مدل ساده است اما نسبت به دیگر مدل‌های DGBN و بسیاری از مدل‌های پیچیده پیش‌بینی عملکرد بهتری دارد.

Rasifaghihi و همکاران (۲۰۲۰) به‌منظور تعیین میزان نیاز آبی در بلندمدت و میزان تأثیر تغییر اقلیم بر روی مصرف آب، به پیش‌بینی مصرف آب شهری با استفاده از مدل‌های آماری بیزین پرداختند. آن‌ها نشان دادند مصرف آب پایه، مستقل از تغییر اقلیم بوده و مصرف آب فصلی وابسته به دمای هوای روزانه و بارش کل است. نتایج پیش‌بینی مصرف آب برای سه دهه آینده نیز نشان از روند افزایشی مصرف آب فصلی در طول زمان داشت.

یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در عرصه مدیریت منابع آب، تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت است. این عدم قطعیت می‌تواند به‌دلیل درک ناقص از مسئله موردنظر، دانش ناقص از عوامل مؤثر بر مسئله، تصادفی بودن مکانیزم حاکم بر رفتارها و عملکردها و یا ناقص بودن اطلاعات ثبت‌شده موجود در مسئله موردنظر و یا ترکیبی از موارد مورداشاره باشد. روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی عدم قطعیت عوامل مؤثر بر مصرف آب ارائه شده است که به‌طورکلی می‌توان آن‌ها را به دو دسته روش‌های مبتنی بر تئوری احتمالات و روش‌های مبتنی بر منطق فازی تقسیم‌بندی کرد. روش‌های مبتنی بر تئوری احتمالات دارای اساس تئوری قوی‌تری می‌باشند که برای نمونه شبکه‌های بیزین را می‌توان نام برد (نیکو و کراچیان، ۱۳۷۸). در این روش نه تنها از تجمیع وضعیت پارامترهای علت می‌توان به وضعیت معلول رسید، بلکه با در اختیار داشتن وضعیت معلول یا همان پارامتر پیش‌بینی‌شده، با یک فرایند بازگشت به عقب، امکان محاسبه وضعیت عوامل تأثیرگذار وجود دارد. علاوه بر این، شبکه بیزین قادر است با استفاده از اطلاعات ناقص و غیردقیق نیز به نتایج مناسب در زمینه پیش‌بینی وضعیت فعلی و آینده یک سیستم دست یابد. همچنین شبکه‌های بیزین در صورت عدم وجود داده‌های مشاهداتی کافی می‌تواند به شکل سیستم خبره عمل کند که با توجه به کمبود شدید داده‌های مشاهداتی در پدیده‌هایی مانند مصارف آب باید اهمیت استفاده از نظرات کارشناسان و خبرگان را موردتوجه قرار داد. بنابراین شبکه بیزین با توجه به توانایی‌هایی که در مدل کردن روابط علت و معلولی یک فرایند در قالب شبکه‌ای از احتمالات، آنالیز وضعیت موجود و پیش‌بینی وضعیت آینده یک سیستم یا فرایند دارد، ابزار مناسبی برای انجام پیش‌بینی‌های بلندمدت از جمله در مورد مصرف آب می‌تواند باشد.

هدف از تحقیق حاضر ارائه یک مدل مناسب و قابل‌اطمینان با استفاده از شبکه بیزین برای پیش‌بینی بلندمدت مصرف آب (مطالعه موردی شهرستان نیشابور) با در نظر گرفتن عوامل مختلفی از جمله متغیرهای اقلیمی، اقتصادی، فرهنگی و اجتماعی است. از این‌رو پیش‌بینی و مدیریت مصرف آب در آینده با اطمینان بیشتری ممکن می‌شود. پیش‌بینی نیاز آبی با توجه به تأثیر پارامترهای مختلف و عدم‌قطعیت هریک از آن‌ها از پیچیدگی خاصی برخوردار است و شبکه بیزین به‌دلیل ماهیت احتمالاتی،

1. Ecological System

2. Dynamic Gaussian Bayesian Networks

توانایی بالایی در پیش‌بینی تقاضا و تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت خواهد داشت.

۲- مواد و روش‌ها

به‌طورکلی مدل‌های موجود در بررسی یک پدیده را می‌توان به دو دسته، مدل‌های نظری و مدل‌های آماری تقسیم کرد. مدل‌های نظری گروهی از مدل‌ها هستند که بر پایه فیزیک پدیده و یا دانش موجود در رابطه با پدیده بوده و تنها زمانی مؤثر و مفید هستند که درک کاملی از کلیت پدیده موردمطالعه موجود باشد. اما در مدل‌های آماری کم‌تر به نوع و روند فیزیکی پدیده توجه می‌شود و این مدل‌ها بیشتر بر پایه اطلاعات آماری استوار هستند. برتری و مزیت مدل‌های آماری در مقایسه با مدل‌های نظری این است که در مواردی که از پدیده شناخت کافی در دسترس نباشد و یا پدیده از پیچیدگی بالایی برخوردار باشد، نیز می‌توان انتظار نتایج قابل قبولی را داشت. از انواع این مدل‌ها می‌توان به سیستم-های خبره از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی، سیستم‌های فازی و شبکه بیزین اشاره نمود.

۲-۱- معرفی شبکه بیزین

شبکه بیزین[3] مدلی گرافیکی برای بیان روابط احتمالاتی بین متغیرها است. در طول دو دهه اخیر، از شبکه‌های بیزین برای استفاده از دانش کارشناسان در قالب سیستم‌های خبره استفاده شده و پس از آن محققین روش‌هایی برای آموزش این شبکه‌ها با استفاده از داده‌های موجود توسعه داده‌اند. با استفاده از شبکه‌های بیزین می‌توان به مدل‌سازی روابط علت و معلولی یک فرایند و آنالیز وضعیت فعلی و آینده یک سیستم یا فرایند پرداخت. این تکنیک کارایی خود را در حل تعدادی از مسائل تحلیل داده به‌خوبی نشان داده است. مهم‌ترین ویژگی‌های شبکه‌های بیزین به شرح زیر است (Heckerman، ۱۹۹۶):

- امکان توسعه شبکه در صورت وجود داده‌های ناقص
- امکان ترکیب مناسب نظرات کارشناسی و داده‌های موجود
- امکان و سهولت به‌روزرسانی پارامترها و احتمالات شرطی بین پارامترهای مختلف
- امکان محاسبات رو به جلو و رو به عقب (پی بردن از وضعیت علت به معلول و برعکس)
- نمایش متغیرها در یک مدل به‌صورت گره و روابط علت و معلولی به‌صورت ارتباطات میان این گره‌ها
- استفاده از اطلاعات گذشته به‌منظور پیش‌بینی وضعیت آینده
- تشخیص موقعیت فعلی یک مجموعه براساس موقعیت گذشته آن
- تحلیل مسائل با اطلاعات مبهم، ناکافی، متضاد و غیرقطعی هم در گذشته و هم در حال حاضر

۲-۲- تئوری بیز[4]

برای سال‌های متمادی، احتمالات شرطی رویدادهای موردنظر با استفاده از تئوری بیز محاسبه می‌شد. این تئوری به‌صورت زیر بیان می‌شود (Neapolitan، ۲۰۰۴). اگر دو رویداد E و F مفروض باشند به‌گونه‌ای که $P(E)\neq 0$ و $P(F)\neq 0$، آنگاه:

$$P(E|F) = \frac{P(F|E)P(E)}{P(F)} \quad (۱)$$

همچنین برای n رویداد $E_1, E_2, \ldots, E_n$ که $P(Ei)\neq 0$ باشد، برای $1 \le i \le n$ خواهیم داشت:

$$P(E_i|F) = \frac{P(F|E_i)P(E_i)}{P(F|E_1)P(E_1) + \cdots + P(F|E_n)P(E_n)} \quad (۲)$$

در واقع در مواردی از تئوری بیز استفاده می‌شود که نمی‌توان احتمال شرطی موردنظر را به‌طور مستقیم محاسبه کرد، اما می‌توان با محاسبه احتمالات موجود در طرف راست روابط (۱) و (۲) احتمال موردنظر را تعیین نمود.

۲-۳- مفاهیم احتمالاتی

یک مفهوم مهم در شبکه‌های بیزین، مفهوم استقلال شرطی است. دو متغیر A و B مستقل شرطی نامیده می‌شوند، هرگاه اگر متغیر C به متغیرهای A و B وابسته باشد و مقدار متغیر C معلوم باشد، وجود اطلاعات در مورد متغیر B، هیچ‌گونه اطلاعات اضافی در مورد متغیر A ارائه ندهد. این مفهوم را می‌توان به‌صورت رابطه زیر بیان نمود.

$$P(A|B,C) = (A|C) \quad (۳)$$

توزیع احتمالاتی توأم مجموعه‌ای از متغیرهای $x_1, x_2, \ldots, x_n$ با فرض مستقل بودن آن‌ها، از حاصل‌ضرب توزیع احتمالات شرطی آن‌ها به‌دست می‌آید:

$$P(x_1, x_2, \ldots, x_n) = \prod_{i=1}^{n} P(x_i|\pi(x_i)) \quad (۴)$$

که $P(x_1, x_2, \ldots, x_n)$: احتمال توأم مقادیر متغیرها و $\pi(x_i)$: مقادیر کمّی مجموعه علت‌های x_i است. برای مثال اگر متغیر B وابسته به A و متغیر C وابسته به A و B باشد، آنگاه احتمال توأم آن‌ها مطابق رابطه (۵) خواهد بود (HUGIN EXPERT A/S, 2012).

3. Bayesian network

4. Bayes' theorem

$$P(A,B,C) = P(A).P(B|A).P(C|A,B) \quad (۵)$$

۲-۴- استنباط در شبکه بیزین

به محاسبه احتمال شرطی تعدادی از متغیرها براساس اطلاعات موجود سایر متغیرها در شبکه بیزین، استنباط (استنتاج)[5] گفته می‌شود. زمانی که تمامی اطلاعات در مورد گره‌های والد متغیر یا متغیرهای موردنظر موجود باشد، استنباط ساده است. اما اگر اطلاعات فرزندان موجود باشد، باید استنباط را برخلاف مسیر کمان‌ها انجام داد و کار پیچیده‌تر خواهد بود. برای این منظور از کاربرد تئوری بیز که پیش‌تر توضیح داده شد، استفاده می‌شود (HUGIN EXPERT A/S, 2012).

۲-۵- نحوه انتخاب متغیرهای مؤثر مدل‌سازی

با انجام تحلیل همبستگی بین متغیرهای مختلف، عوامل مؤثر مستقل برای تهیه مدل پیش‌بینی مصرف آب شناسایی می‌شوند. تحلیل همبستگی برای کمّی نمودن رابطه بین متغیرها به‌کار می‌رود. به‌عبارت‌دیگر تغییرات موافق دو متغیر با یکدیگر را همبستگی گویند. هنگامی‌که دو متغیر در توافق با هم در یک جهت حرکت می‌کنند، گفته می‌شود آن دو متغیر همبستگی مثبت دارند و برعکس، اگر دو متغیر در توافق با هم ولی در دو جهت مخالف تغییرات داشته باشند، همبستگی آن دو متغیر را منفی گویند. اگر متغیرها در توافق با هم تغییر نکنند، آن‌ها را ناهمبسته گویند. پیرسن[6] ضریب همبستگی را به‌صورت رابطه (۶) تعریف می‌نماید.

$$R = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{(\sum(x-\bar{x})^2.\sum(y-\bar{y})^2)^{1/2}} \quad (۶)$$

که x و y مقادیر دو متغیر، $\bar{x}$ و $\bar{y}$ میانگین دو متغیر و R ضریب همبستگی است. مقدار R بین ۱+ و ۱- قرار دارد. اگر R=۱ باشد، همبستگی را مثبت و کامل گویند و اگر R=-۱ باشد، همبستگی منفی و کامل خواهد بود. به ازای R=۰ دو متغیر ناهمبسته هستند (دینی، ۱۳۸۴).

۲-۶- معیارهای ارزیابی مدل

پس از انجام مراحل آموزش شبکه، دقت و صحت پیش‌بینی‌های مدل موردبررسی قرار می‌گیرد. صحت‌سنجی مدل به‌منظور بررسی عملکرد مدل از اهمیت بالایی برخوردار است. معیارهای ارزیابی مورداستفاده عبارت‌اند از: ضریب همبستگی (رابطه (۶)) و درصد میانگین خطای مطلق (MAPE)[7].

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{|y_{observed\ i} - y_{calculated\ i}|}{y_{observed\ i}} \quad (۷)$$

که $y_{observed\ i}$ و $y_{calculated\ i}$ به‌ترتیب برابر مقادیر i امین داده مشاهداتی و محاسباتی و n تعداد داده‌ها هستند (تابش و همکاران، ۱۳۸۷). همان‌طور از رابطه (۷) نشان می‌دهد، درصد میانگین خطای مطلق نشان‌دهنده میانگین قدر مطلق خطای نسبی می‌باشد.

۲-۷- داده‌های مورداستفاده

به‌طورکلی در مبانی تئوری، عوامل مؤثر بر میزان مصرف آب به‌صورت گسترده موردتوجه قرار گرفته است. اما با توجه به شرایط اقلیمی، فرهنگی، اجتماعی، اقتصادی و خصوصیات شبکه آب‌رسانی در هر منطقه، اهمیت و میزان تأثیر این عوامل در پیش‌بینی کوتاه‌مدت و بلندمدت مصرف آب متفاوت است. از جمله عوامل تأثیرگذار در میزان مصرف آب می‌توان به مواردی همچون پارامترهای اقلیمی، فرهنگی، جمعیت، عمر شبکه، قیمت آب و ... اشاره کرد (تابش، ۱۳۹۵). در این تحقیق، معیار اصلی انتخاب متغیرهای ورودی، وجود همبستگی بالا با مصرف آب می‌باشد. این متغیرها شامل: قیمت متوسط آب، سرانه درآمد خانوار، قیمت سایر خدمات و کالاهای مصرفی، تعداد افراد بی‌کار، تعداد افراد باسواد، بعد خانوار (تعداد اعضای خانواده)، سن افراد، دمای حداکثر ماهانه، دمای حداقل ماهانه و بارش ماهانه است. برای جمع‌آوری داده‌ها از آمار شرکت آب و فاضلاب، مرکز آمار ایران و بانک مرکزی استفاده شده است. مشخصات آماری متغیرهای ورودی در جدول (۱) مشاهده می‌شود.

با توجه به ارقام موجود در جدول (۱)، برای به‌دست آوردن آمار و اطلاعات میزان مصرف آب در شهرستان نیشابور، با مراجعه به دفتر انفورماتیک و آمار شرکت آب و فاضلاب شهری استان خراسان رضوی، از بانک اطلاعات امور مشترکین، میزان مصرف آب طی فروردین ۱۳۷۶ تا اسفند ۱۳۸۷ استخراج شد. متوسط قیمت آب از تقسیم مبلغ کل درآمد آب‌بهای شرکت مذکور بر مقدار مصرف آب محاسبه شده است. همچنین از آمار مربوط به متوسط کل هزینه‌های خوراکی و غیرخوراکی جمعیت شهری استان خراسان رضوی موجود در سال‌نامه‌های آماری و نتایج تفصیلی آمارگیری، به‌عنوان شاخصی برای متوسط درآمد سرانه افراد استفاده شده است. به‌عنوان جانشین قیمت سایر کالاهای مصرفی نیز از شاخص قیمت خدمات و کالای مصرفی در استان خراسان رضوی استفاده شده است. از آمار تعداد افراد بی‌کار نیز به عنوان متغیری در پیش‌بینی مصرف آب شهری استفاده شده است.

5. Inference
6. Pearson
7. Mean absolute percentage error

جدول ۱- مشخصات آماری متغیرهای ورودی به مدل

متغیر	واحد	میانگین	حداکثر	حداقل	انحراف معیار
سرانه مصرف	m^3	۳/۸۲	۴/۸۹	۲/۸۴	۰/۵
قیمت واقعی	ریال	۵۶/۳۹	۱۰۹/۲۹	۲۳/۴۰	۲۲/۵۳
سرانه درآمد واقعی	ریال	۲۱۴۳۷۵	۵۰۱۲۲۶	۵۶۰۰۰	۱۳۸۴۳۴
شاخص کالا و خدمات	–	۲۳/۹۱	۱۹۶	۳۶	۴۳/۲۰
تعداد باسوادان	نفر	۱۵۳۶۷۶	۱۹۲۴۴۶	۱۲۴۹۷۶	۱۸۷۲۳
تعداد بیکاران	نفر	۱۶۲۹۳۶	۲۷۵۶۵۶	۸۵۹۸۴	۵۴۷۵۲
متوسط دمای حداکثر ماهانه	$^{\circ}c$	۲۲/۲۷	۳۶/۴۳	۵	۹/۷۶
متوسط دمای حداقل ماهانه	$^{\circ}c$	۷/۳۳	۱۷/۸۳	-۵/۹۲	۷/۰۶
بارش	mm	۱۸/۶۴	۱۱۹/۵۰	صفر	۲۴/۵۴
سن (۰ تا ۷ سال)	نفر	۴۸۴۴۳	۷۲۰۵۱	۳۰۶۲۹	۱۲۰۱۴
سن (۸ تا ۱۸ سال)	نفر	۹۰۰۳۹	۱۳۶۳۷۸	۵۵۵۵۴	۲۳۴۲۹
سن (۱۹ تا ۳۰ سال)	نفر	۸۷۳۴۱	۱۷۷۷۶۶	۳۴۳۱۴	۴۰۹۹۹
سن (۳۱ تا ۶۰ سال)	نفر	۹۸۰۲۷	۱۸۰۹۵۱	۴۵۲۶۷	۳۹۰۰۳
سن (بیشتر از ۶۰ سال)	نفر	۲۵۷۵۵	۵۲۸۵۸	۹۹۷۴	۱۲۲۵۰

آمار تعداد باسوادان شهرستان نیشابور به‌عنوان متغیری مؤثر در سطح فرهنگ و آموزش مورداستفاده قرار گرفته است. همچنین از آمار سن افراد در پنج گروه به‌عنوان متغیری مؤثر در سطح اجتماعی و جمعیتی استفاده شده است. متوسط دمای حداکثر و حداقل و بارش اخذشده از ایستگاه سینوپتیک[8] نیشابور برای سال‌های ۱۳۷۶ تا ۱۳۸۷ به‌عنوان متغیری مؤثر در اقلیم منطقه موردمطالعه قرار گرفته است.

۲-۸- ساخت مدل

به‌طورکلی فرایند ساخت مدل و پیش‌بینی مصرف آب با استفاده از مدل بیزین به‌صورت زیر است:

- استخراج داده‌های مشاهداتی
- آماده‌سازی داده‌ها
- تعیین روابط بین آن‌ها در برنامه
- تکمیل اطلاعات مرتبط با گره‌ها و دسته‌بندی آن‌ها
- تقسیم‌بندی داده‌ها به دو دسته کالیبراسیون و صحت‌سنجی
- کالیبراسیون مدل با استفاده از ۷۰ درصد داده‌ها
- صحت‌سنجی مدل با استفاده از ۳۰ درصد داده‌ها
- ارزیابی خروجی برنامه توسط معیارهای ارزیابی
- پیش‌بینی مصرف آب

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تحلیل همبستگی

به‌منظور بررسی تأثیر هریک از عوامل مؤثر بر مصرف آب از تحلیل همبستگی استفاده شده است. با توجه به تعداد زیاد عامل‌ها با انجام تحلیل همبستگی بین عوامل مختلف با مصرف آب و با یکدیگر، عوامل مستقل مؤثر در مدل‌سازی مصرف آب انتخاب شده است. نتایج حاصل از تحلیل همبستگی عوامل مختلف با مصرف آب در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج مربوط به تحلیل همبستگی متغیرهای اقلیمی، متغیرهای اقتصادی و متغیرهای فرهنگی و اجتماعی در جداول (۳) تا (۵) نمایش داده شده است.

با توجه به نتایج جداول (۲) تا (۵)، متغیرهای انتخاب شده همبستگی قابل قبولی با مصرف آب دارند و می‌توان آن‌ها را به‌عنوان متغیرهای مؤثر به‌شمار آورد. از مهم‌ترین متغیرهایی که ضریب همبستگی بالایی با مصرف آب و دیگر عوامل دارند، می‌توان به قیمت آب، تعداد افراد باسواد، سرانه درآمد افراد، حداکثر درجه حرارت و شاخص قیمت خدمات و کالای مصرفی اشاره کرد. با توجه به آن‌که بیش‌ترین ضریب همبستگی متعلق به قیمت آب (۰/۷۶) است، بنابراین سیاست‌های قیمت‌گذاری می‌تواند به‌عنوان راهکار اصلی در کاهش مصرف آب به‌کار گرفته شود.

جدول ۲- همبستگی بین عامل‌های مختلف با مصرف آب

متغیرهای مورداستفاده	ضریب همبستگی
متوسط دمای حداکثر ماهانه	۰/۶۳
متوسط دمای حداقل ماهانه	۰/۵۹
بارش	-۰/۵۱
درآمد سرانه	۰/۶۴
قیمت آب	۰/۷۶
شاخص قیمت خدمات و کالای مصرفی	۰/۶۲
تعداد افراد باسواد	۰/۶۶
تعداد افراد بی‌کار	۰/۵۹
تعداد افراد تا سن ۷ سال	۰/۶۰
تعداد افراد از سن ۸ تا ۱۸ سال	۰/۵۷
تعداد افراد از سن ۱۹ تا ۳۰ سال	۰/۵۴
تعداد افراد از سن ۳۱ تا ۶۰ سال	۰/۵۸
تعداد افراد با سن بالای ۶۰ سال	۰/۶۰

8. Synoptic Station

جدول ۳- نتایج ضریب همبستگی متغیرهای اقلیمی

	مصرف ماهانه آب	متوسط دمای حداکثر ماهانه	متوسط دمای حداقل ماهانه	بارش
مصرف ماهانه آب	۱	۰/۶۳	۰/۵۹	-۰/۵۱
متوسط دمای حداکثر ماهانه		۱	۰/۸۹	-۰/۶۱
متوسط دمای حداقل ماهانه			۱	-۰/۵۳
بارش				۱

جدول ۴- نتایج ضریب همبستگی متغیرهای اقتصادی

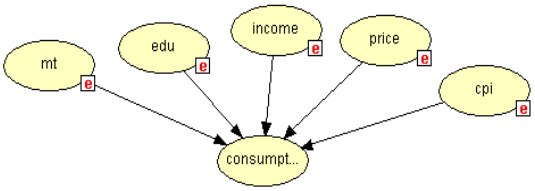
	مصرف ماهانه آب	درآمد سرانه	تعداد افراد بی‌کار	قیمت آب	شاخص خدمات و کالای مصرفی
مصرف ماهانه آب	۱	۰/۶۴	۰/۵۹	۰/۷۶	۰/۶۲
درآمد سرانه		۱	۰/۸۹	۰/۹۴	۰/۸۶
تعداد افراد بی‌کار			۱	۰/۸۷	۰/۹۱
قیمت آب				۱	۰/۸۳
شاخص خدمات و کالای مصرفی					۱

جدول ۵- نتایج ضریب همبستگی متغیرهای فرهنگی و اجتماعی

	مصرف ماهانه آب	تعداد افراد باسواد	تعداد افراد تا سن ۷ سال	تعداد افراد از سن ۸ تا ۱۸ سال	تعداد افراد از سن ۱۹ تا ۳۰ سال	تعداد افراد از سن ۳۱ تا ۶۰ سال	تعداد افراد با سن بالای ۶۰ سال
مصرف ماهانه آب	۱	۰/۶۶	۰/۶۰	۰/۵۷	۰/۵۴	۰/۵۸	۰/۶۰
تعداد افراد باسواد		۱	۰/۸۴	۰/۸۸	۰/۸۷	۰/۸۹	۰/۹۱

۳-۲- مدل‌های اولیه و گسترده

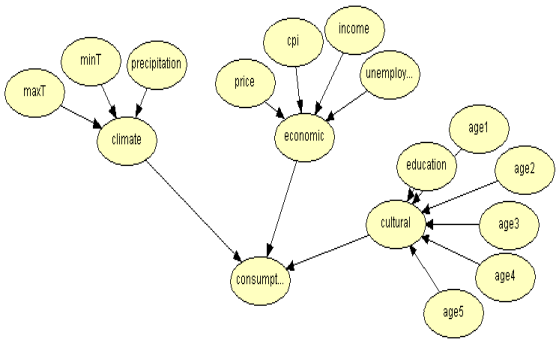
در مدل اولیه سعی شده است از حداقل متغیرهایی که بیشترین همبستگی را با مصرف آب و دیگر عوامل دارند، استفاده شود. مدل گرافیکی موردنظر در نرم‌افزار Hugin 7.8 (HUGIN EXPERT A/S, 2012) ساخته شده است. ساختار نهایی در شکل (۱) مشاهده می‌شود.



شکل ۱- مدل اولیه پیشنهادی در شبکه بیزین

متغیرهای ورودی به مدل شامل تعداد باسوادان (edu)، حداکثر درجه حرارت (mt)، سرانه درآمد مردم (income)، قیمت آب (price) و شاخص خدمات و کالای مصرفی (cpi) به‌صورت ماهانه و خروجی مدل مقدار مصرف آب (consumption) است.

به‌منظور بررسی دقیق‌تر عوامل مؤثر در پیش‌بینی مصرف ماهانه آب و رسیدن به مدلی با اطمینان‌پذیری بیشتر، مدل جامع‌تری ارائه شده است. در مدل مذکور علاوه بر متغیرهای در نظر گرفته‌شده در مدل اولیه، متغیرهایی همچون حداقل درجه حرارت، بارش، تعداد افراد بی‌کار و سن افراد در پنج گروه به‌صورت ماهانه در نظر گرفته شده است. در این مدل متغیرهای قیمت آب و درآمد سرانه و شاخص قیمت خدمات و کالای مصرفی به‌منظور تأثیر مستقیم بر مصرف آب هر یک به‌صورت جداگانه لحاظ شده‌اند. مراحل ساخت مدل، کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل گسترده همانند مدل اولیه است. مدل پیشنهادی در شکل (۲) نمایش داده شده است.



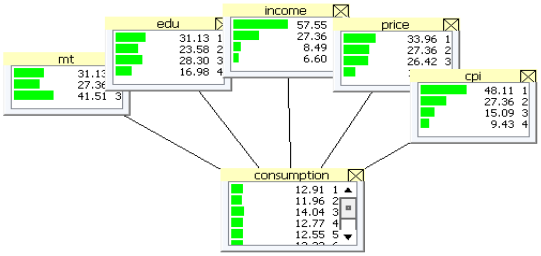
شکل ۲- مدل گسترده پیشنهادی در شبکه بیزین

پارامترهای ورودی به مدل گسترده شامل اقلیم[9]، حداکثر حرارت[10]، حداقل درجه حرارت[11]، بارش[12]، عوامل اقتصادی[13]، سرانه درآمد مردم[14]، قیمت آب[15]، تعداد افراد بی‌کار[16]، شاخص

9. Climate
10. Max T
11. Min T
12. Precipitation
13. Economic
14. Income
15. Price
16. Unemployment

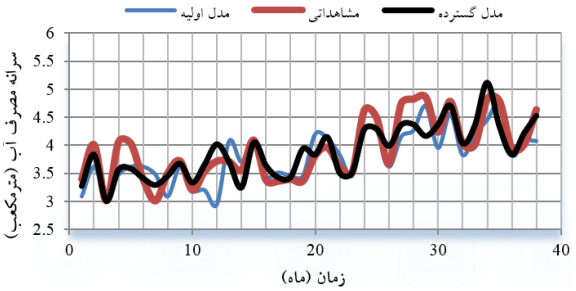
خدمات و کالای مصرفی[17]، عوامل فرهنگی[18]، تعداد باسوادان[19]، سن افراد تا ۷ سال (age 1)، سن افراد از ۸ تا ۱۸ سال (age 2)، از ۱۹ تا ۳۰ سال (age 3)، از ۳۱ تا ۶۰ سال (age 4) و بالاتر از ۶۰ سال (age 5) و خروجی مدل مقدار مصرف آب[20] به‌صورت ماهانه است.

با استفاده از داده‌های کالیبراسیون، آموزش پارامترهای مدل انجام شده است. نتیجه به‌دست‌آمده از اجرای شبکه آموزش‌دیده برای مدل اولیه در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- شبکه بیزین آموزش‌دیده برای مدل اولیه

درصدهای نشان داده‌شده در شکل (۳) برای متغیرهای ورودی، نشان‌دهنده درصد هر یک از دسته‌های مربوط به آن متغیر از لحاظ تعداد داده‌های آن دسته در سری داده‌های کالیبراسیون است. به‌عنوان مثال در داده‌های واردشده، ۵۷/۵۵ درصد از درآمد در دسته اول (دسته‌ای که شامل درآمدهای پایین می‌باشد) و ۶/۶۰ درصد از درآمد در دسته چهارم (دسته‌ای که شامل درآمدهای بسیار بالا است) قرار دارند. همچنین براساس این شکل، می‌توان در مورد حداکثر درجه حرارت اظهارنظر کرد. به‌عنوان مثال ۴۱/۵۱ درصد از حداکثر درجه حرارت، در دسته سوم (دسته‌ای که شامل درجه حرارت بالا می‌باشد) قرار دارد. پس از آموزش شبکه، صحت‌سنجی با استفاده از داده‌های صحت‌سنجی که از قبل به‌صورت تصادفی انتخاب شده‌اند، انجام شده است. نتایج حاصل از صحت‌سنجی در دو مدل اولیه و گسترده در شکل (۴) و جدول (۶) نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل (۴) و جدول (۶) مشخص است، مدل گسترده همبستگی بیشتری با داده‌های مشاهداتی دارد و نسبت به مدل اولیه از درصد میانگین خطای مطلق کم‌تری برخوردار است. همچنین برای بررسی پیش‌بینی مصرف آب، نتایج به‌دست‌آمده از هر دو مدل، برای فروردین ۱۳۹۴ تا اسفند ۱۳۹۸ در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۵) مشخص است، افزایش یا کاهش ناگهانی در پیش‌بینی مصرف آب توسط مدل‌های بیزین مشاهده می‌شود.

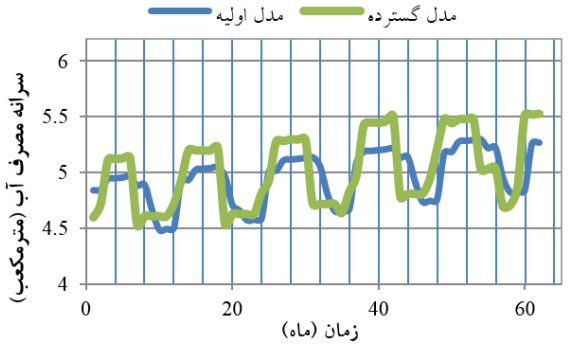


شکل ۴- مقایسه عملکرد مدل‌های پیشنهادشده در بازه صحت-سنجی

جدول ۶- نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل‌های پیشنهادشده

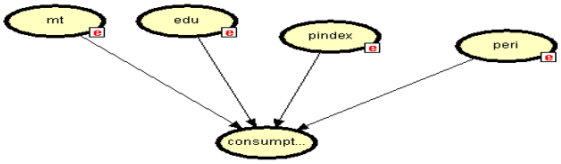
معیار ارزیابی	مدل اولیه	مدل گسترده
ضریب همبستگی	۰/۸۲	۰/۸۹
درصد میانگین خطای مطلق	۰/۰۷	۰/۰۵

با توجه به پیش‌بینی انجام‌شده، مدل گسترده حداکثر مقدار مصرف آب در آینده را بیشتر از مدل اولیه تخمین است، اما زمانی که مقدار مصرف به حداقل مقدار خود می‌رسد، مدل گسترده و اولیه، مقدارهای تقریباً یکسانی را پیش‌بینی کرده‌اند. به‌منظور ارزیابی حساسیت مدل‌های اولیه و گسترده نسبت به ساختار شبکه‌ای خود روابط ساختاری مختلفی بین متغیرها مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت. از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به دو مورد با عنوان‌های مدل اولیه با ساختار متفاوت و مدل گسترده با ساختار متفاوت، که به ترتیب مرتبط با مدل اولیه و گسترده هستند اشاره نمود. در مدل اولیه با ساختار متفاوت نسبت متغیرهای شاخص قیمت خدمات و کالای مصرفی به قیمت آب به عنوان یک متغیر و نسبت متغیرهای درآمد به قیمت آب به عنوان متغیر دیگر در نظر گرفته شده است. ساختار پیشنهادی مدل اولیه با ساختار متفاوت در شکل (۶) و نتایج حاصل از صحت‌سنجی در جدول (۷) ارائه شده است.



شکل ۵- پیش‌بینی مصرف آب توسط مدل‌های پیشنهادی (فروردین ۱۳۹۴ تا اسفند ۱۳۹۸)

17. Cpi
18. Cultural
19. Education
20. Consumption



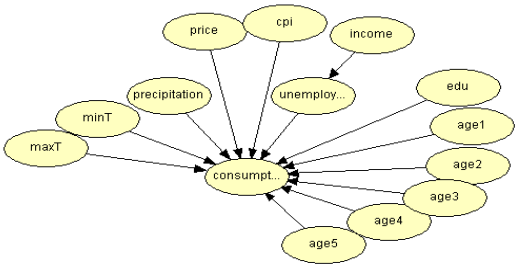
شکل ۶- مدل اولیه با ساختار متفاوت

در ساختار شکل (۶) نسبت درآمد بر قیمت آب[۲۱]، نسبت شاخص خدمات و کالای مصرفی بر قیمت آب[۲۲]، تعداد افراد باسواد[۲۳] و حداکثر درجه حرارت (mt) به‌عنوان عوامل مؤثر بر مصرف در نظر گرفته شده‌اند. در مقایسه این ساختار با مدل اولیه می‌توان نتیجه گرفت که هر چه متغیرها به‌صورت مستقیم، با مصرف آب در ارتباط باشند، دقت مدل بالاتر خواهد رفت.

جدول ۷- نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل اولیه با ساختار متفاوت

معیار ارزیابی	مقادیر ارزیابی
ضریب همبستگی	۰/۷۹
درصد میانگین خطای مطلق	۰/۰۷

ساختار دوم مربوط به مدل گسترده است که همراه با نتایج حاصل از صحت‌سنجی در شکل (۷) و جدول (۸) نشان داده شده است. متغیرهای ورودی به مدل گسترده در شکل (۷) شامل تعداد باسوادان، حداکثر درجه حرارت، حداقل درجه حرارت، بارش، سرانه درآمد مردم، قیمت آب، تعداد افراد بی‌کار، شاخص خدمات و کالای مصرفی و سن افراد تا ۷ سال (age 1)، سن افراد از ۸ تا ۱۸ سال (age 2)، از ۱۹ تا ۳۰ سال (age 3)، از ۳۱ تا ۶۰ سال (age 4) و بالاتر از ۶۰ سال (age 5) به‌صورت ماهانه هستند. در مقایسه نتایج این مدل با مدل گسترده پیشنهادی، در مورد ساختار ارائه‌شده می‌توان گفت هرچه تعداد متغیرهایی که به‌صورت مستقیم با خروجی مدل در ارتباط هستند از مقدار مشخصی بیشتر شود، دقت مدل کاهش می‌یابد.



شکل ۷- مدل گسترده با ساختار متفاوت

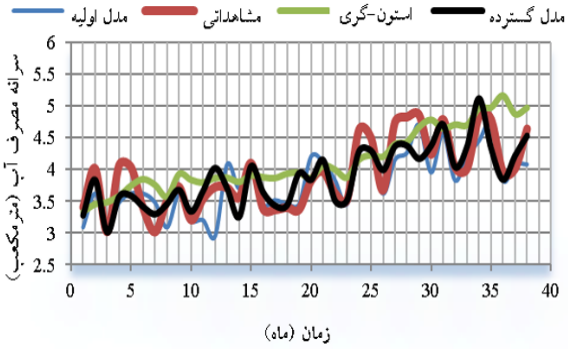
جدول ۸- نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل گسترده با ساختار متفاوت

معیار ارزیابی	مقادیر ارزیابی
ضریب همبستگی	۰/۸۱
درصد میانگین خطای مطلق	۰/۰۷

به‌منظور ارزیابی حساسیت مدل نسبت به تعداد دسته‌بندی متغیرها، متغیرهای مؤثری مورد ارزیابی قرار گرفتند که در هر دو مدل به‌کاربرده شده است و امکان مقایسه هر دو مدل نسبت به متغیرهای در نظر گرفته‌شده وجود دارد. نتایج حاصل در جدول (۹) ارائه شده است. جدول (۹) نشان می‌دهد که مدل اولیه نسبت به تغییر دسته‌بندی عوامل اشاره‌شده خود دارای حساسیت بیشتری می‌باشد که این مقدار تفاوت در نتایج حاصل از مدل گسترده دیده نمی‌شود. در انتها برای بررسی عملکرد مدل‌های پیشنهادی، نتایج حاصل از پیش‌بینی مصرف بلندمدت آب شهرستان نیشابور با استفاده از مدل بیزین، با نتایج مدل تابع استون-گری (Behboudian و همکاران، ۲۰۱۴) مقایسه شده است. نتایج مرتبط با شبکه بیزین و تابع استون-گری و پیش‌بینی حاصل از آن‌ها در شکل (۸) و جدول (۱۰) نمایش داده شده است.

جدول ۹- ارزیابی حساسیت مدل‌های اولیه و گسترده

	حداکثر درجه حرارت		قیمت		تعداد افراد باسواد	
	ضریب همبستگی	درصد میانگین خطای مطلق	ضریب همبستگی	درصد میانگین خطای مطلق	ضریب همبستگی	درصد میانگین خطای مطلق
مدل اولیه	۰/۶۶۷	۰/۰۸۳	۰/۷۲۶	۰/۰۸۲	۰/۶۷۷	۰/۰۷۹
مدل گسترده	۰/۸۳۶	۰/۰۶۷	۰/۸۷۲	۰/۰۷۰	۰/۸۶۴	۰/۰۶۱



شکل ۸- مقایسه عملکرد مدل‌های اولیه و گسترده با تابع استون-گری

21. Peri
22. Pindex
23. Edu

جدول ۱۰- مقایسه نتایج صحت‌سنجی مدل‌های اولیه و گسترده با تابع استون-گری

معیار ارزیابی	مدل اولیه	مدل گسترده	تابع استون-گری
ضریب همبستگی	۰/۸۲	۰/۸۹	۰/۶۹
درصد میانگین خطای مطلق	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۱۰

با توجه به شکل (۸) تابع استون-گری در اکثر زمان‌ها سرانه مصرف آب را بیشتر از مقادیر واقعی نشان می‌دهد و مقدار مصارف کم را نیز به‌خوبی نمایش نمی‌دهد. به‌بیان‌دیگر، تابع استون-گری، حداکثر مقادیر پیش‌بینی‌شده برای مصرف سرانه آب را کم‌تر از مدل اولیه و گسترده و حداقل مصرف را نیز، بیشتر از دو مدل بیزین پیش‌بینی می‌کند. نتایج صحت‌سنجی ارائه‌شده در جدول (۱۰) حاکی از آن است که حتی مدل اولیه بیزین نسبت به تابع استون-گری ضریب همبستگی بیشتری دارد و همبستگی مدل گسترده ۱/۳ برابر همبستگی تابع استون-گری است. علاوه بر این با استفاده از مدل گسترده، خطا به میزان ۵۰ درصد نسبت به تابع استون-گری کاهش می‌یابد. بنابراین مدل بیزین نسبت به تابع استون-گری از دقت بالاتری برخوردار است.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به مشکل کمبود آب در کشور، تدوین مدلی که بتواند پیش‌بینی الگوی مصرف آب شهری در آینده را ممکن سازد از جمله راه‌حل‌های مؤثر در جهت مدیریت بحران کم‌آبی به‌شمار می‌رود. در این مقاله برای پیش‌بینی بلندمدت آب شهر نیشابور از شبکه‌های بیزین استفاده شده است. شبکه‌های بیزین با توجه به ساختار احتمالاتی، سهولت در نظر گرفتن عدم قطعیت در پیش‌بینی و نیز لحاظ نمودن روابط علّی، برای پیش‌بینی مصرف آب شهری بسیار مطلوب است. از بین متغیرهای موجود، قیمت متوسط واقعی آب، درآمد سرانه واقعی، شاخص خدمات و کالای مصرفی، تعداد افراد بی‌کار، تعداد افراد باسواد، سن افراد، میانگین دمای حداکثر، میانگین دمای حداقل و بارش به‌صورت ماهانه به عنوان متغیرهای مؤثر در این منطقه تعیین شد. با توجه به ضریب همبستگی بالا بین عوامل مختلف با مصرف آب و با یکدیگر، مدل اولیه تدوین شد. به‌منظور تدوین مدلی با دقت بیشتر، علاوه بر مدل اولیه، مدل گسترده با لحاظ نمودن متغیرهای بیشتر ایجاد شد. نتایج صحت‌سنجی نشان‌دهنده همبستگی بهتر مدل گسترده با داده‌های مشاهداتی بوده است. همچنین آنالیز حساسیت دو مدل نسبت به ساختار شبکه و نسبت به تعداد دسته‌بندی نیز صورت گرفت. در انتها مقایسه انجام‌شده میان شبکه‌های بیزین و تابع استون-گری نشان‌دهنده بالاتر بودن دقت شبکه بیزین به میزان ۵۰ درصد نسبت به تابع استون-گری است.

۵- مراجع

پورصالحی ف، اکبرپور ا، هاشمی س ر، محمدی ح، "مدل‌سازی اثر الگوی مصرف بر سرانه آب شهری با استفاده از رویکرد سیستمی (مطالعه موردی: شهر بیرجند)"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۴۰۱، ۵۲ (۱)، ۵۵-۶۶.

تابش م، بهبودیان ص، بیگی س، "پیش‌بینی بلندمدت تقاضای آب شرب (مطالعه موردی: شهر نیشابور)"، تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳۹۳، ۱۰ (۳)، ۱۴-۲۵.

تابش م، دینی م، خوش‌خلق ج، زهرایی ب، "برآورد مصرف کوتاه-مدت آب شهری با استفاده از سری‌های زمانی"، مجله تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳۸۷، ۱۱ (۲)، ۵۷-۶۵.

تابش م، "مدل‌سازی پیشرفته شبکه‌های توزیع آب"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۹۵.

دینی م، "پیش‌بینی کوتاه‌مدت مصرف آب شهری با استفاده از شبکه فازی و نوروفازی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران-آب، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران، ۱۳۸۴.

مهاجرانی ح، مساعدی ا، خلقی م، مفتاح هلقی م، سعدالدین ا، "معرفی شبکه‌های تصمیم‌گیری بیزین و کاربرد آن‌ها در مدیریت منابع آب"، اولین همایش ملّی مدیریت منابع آب اراضی ساحلی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران، ۱۳۸۹.

نیکو م ر، کراچیان ر، "ارزیابی کارایی شبکه‌های بیزی در مدیریت کیفیت آب رودخانه: کاربرد سیستم نسبت- تجارت"، مجله علمی- پژوهشی آب و فاضلاب، ۱۳۸۷، ۲۰ (۱)، ۲۳-۳۳.

Bakker M, Van Duist H, Van Schagen K, Vreeburg J, Rietveld L, "Improving the performance of water demand forecasting models by using weather input", Procedia Engineering, 2014, 70, 93-102.

Behboudian S, Tabesh M, Falah Nezhad M, Alavian Ghavanini F, "A long term prediction of domestic water demand using preprocessing in Artificial Neural Network", Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA, IWA, 2014, 36 (1), 31-42.

Froelich W, "Forecasting daily urban water demand using dynamic Gaussian Bayesian network", Beyond Databases, Architectures and structures, Springer International Publishing, 2015, 333-342.

Heckerman D, "A tutorial on learning with bayesian networks", Microsoft Research Advanced Technology Division, Microsoft Corporation, Redmond, Washington, USA, 1996.

Hugin Expert A/S, "Hugin researcher user guide, version 7.8", Hugin Expert A/S, Denmark, 2012.

Magiera E, Froelich W, "Application of Bayesian networks to the forecasting of daily water demand", Intelligent Decision Technologies, Springer International Publishing, 2015, 385-393.

Neapolitan RE, “Learning Bayesian networks”, Prentice Hall, New Jersey, US, 2004.

Ramin M, Labencki T, Boyd D, Trolle D, Arhonditsis GB, “A Bayesian synthesis of predictions from different models for setting water quality criteria”, Ecological Modelling, 2012, 242 (14), 127-145.

Rasifaghihi N, Li SS, Haghighat F, “Forecast of urban water consumption under the impact of climate change”, Sustainable Cities and Society, 2020, 52, 101848.

University of Tabriz

Journal of Civil and Environmental Engineering
Volume 52 (2022), Issue 2 (Summer), 47-56

EXTENDED ABSTRACT

Long-Term Prediction of Domestic Water Demand Using Bayesian Belief Networks

Massoud Tabesh [a,*], Mahdi Mollaramezani [a], Akbar Shirzad [b], Niousha Rasi Faghihi [a]

[a] *School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran*
[b] *Faculty of Civil Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran*

Received: 07 February 2019; **Accepted:** 25 January 2021

Keywords:
Bayesian belief network, long-term prediction of domestic water demand, Uncertainty, Probability methods.

1. Introduction

According to the water scarcity in recent decades in Iran, long-term prediction of domestic water consumption is a beneficial approach in order to manage water demand and water supply in water distribution systems. Therefore, it is necessary to develop a model which is capable of demonstrating the complexity, uncertainties, and influences of various parameters on water consumption with high accuracy. The increment of uncertainties in the forecasting period leads to apply probability methods such as Bayesian belief networks in addition to deterministic methods. This paper presents two Bayesian networks to predict long-term water demand in Neyshabour city. Furthermore, the efficiency of those models is compared to the Stone-Geary function; moreover, their sensitivity to the network structure and data categories is evaluated.

2. Materials and Methods

In this research Bayesian network is employed for the long-term prediction of urban water consumption. In this regard, the data collected from the Water and Wastewater Authority of Razavi Khorasan Province, Statistical Centre of Iran, Iran Central Bank and Neyshabour synoptic station are used.

3. Results and discussion

3.1. Correlation Analysis

In order to examine the impact of different factors on water consumption, correlation analysis is implemented. Variables such as water price, number of educated people, income per capita, customer price index and the maximum temperature are important variables that are strongly correlated with water consumption and other factors. Since water price has the highest correlation with water consumption (R=0.76), therefore pricing policies can be considered as the major way for reducing water consumption.

3.2. Initial and Extended Models

In this paper, two Bayesian models (initial and extended models) are presented to predict long-term water demand in Neyshabour city. These models are developed in Hugin 7.8 software (HUGIN EXPERT A/S, 2013). In the initial model the minimum number of variables that are strongly correlated with water consumption and other factors, are used as input variables. These variables are: the number of educated people (edu), the

* Corresponding Author
E-mail addresses: mtabesh@ut.ac.ir (Massoud Tabesh), m.molaramezani@ut.ac.ir (Mahdi Mollaramezani), a.shirzad@uut.ac.ir (Akbar Shirzad), n.rasifaghihi@ut.ac.ir (Niousha Rasi Faghihi).

maximum temperature (mt), income per capita (income), water price (price), customer price index (cpi) in monthly form. In the extended model, other variables such as the minimum temperature, precipitation, number of unemployed people and people age in five groups are added to the before mentioned input variables. Fig. 1 shows the structure of the extended Bayesian model.

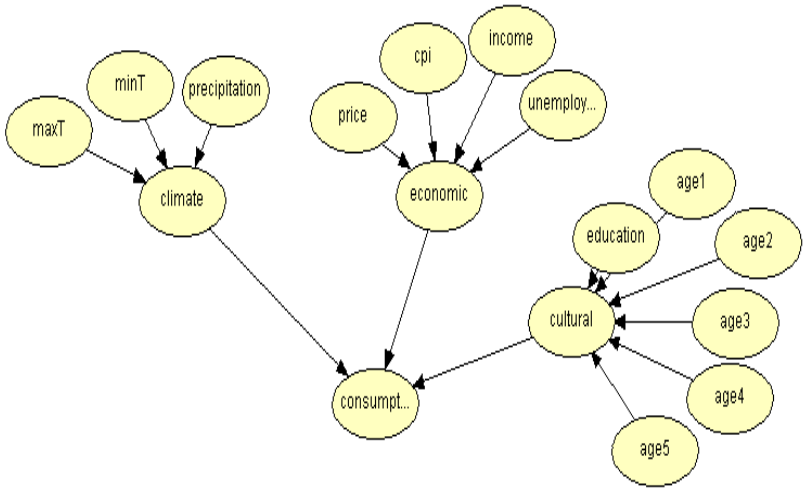


Fig. 1. The proposed extended Bayesian model

After training the initial and extended Bayesian models, their validation is done and results are compared with outputs of the Stone-Geary function (Behboudian et al., 2014) in Fig. 2 and Table 1. According to Table 1, the extended Bayesian model outperformed the initial Bayesian model and the Stone-Geary function. Figure 2 shows that the water consumption values predicted by the Stone-Geary function are often greater than the observed values.

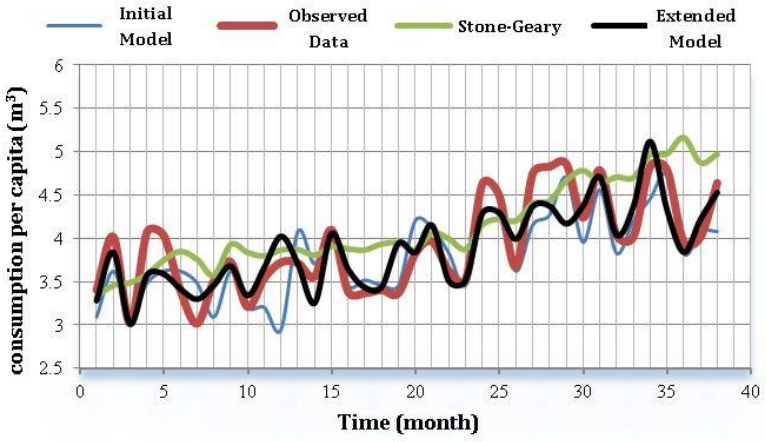


Fig. 2. Performance comparison of the proposed models with the Stone-Geary function

Table 1. Validation results of the proposed models and the Stone-Geary function

Evaluation criteria	Initial model	Extended model	Stone- Geary Model
R	0.82	0.89	0.06
MAPE (%)	0.07	0.05	0.10

4. Conclusions

Considering water scarcity in Iran, long-term prediction of domestic water consumption patterns is one of the effective approaches in order to manage the water scarcity crisis. In this paper Bayesian network is used for the long-term prediction of urban water consumption in Neyshabour city. Variables such as: the average real price of water, real income per capita, consumer price index, number of unemployed people, number of educated people, people age, mean maximum temperature, mean minimum temperature and monthly precipitation are selected as the important variables which influence water consumption in this city.

Considering the high correlation between various factors and water consumption an initial model is developed. In the second step, an extended model with high precision is built considering more variables. According to the validation results, outputs of the extended model have a better correlation with observed data. Furthermore, the efficiency of the developed models is compared to the Stone-Geary function; moreover, their sensitivity to the network structure and data categories is evaluated. Results show that the proposed models are able to forecast the long-term urban water consumption with high precision.

5. References

Behboudian S, Tabesh M, Falah Nezhad M, Alavian Ghavanini F, "A long term prediction of domestic water demand using preprocessing in Artificial Neural Network", Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA, IWA, 2014, 36 (1), 31-42.

HUGIN EXPERT A/S, "Hugin researcher user guide, version 7.8", HUGIN EXPERT A/S, Denmark, 2012.