

پیش‌بینی تقاضای آب شهر تهران با استفاده از الگوهای ساختاری، سری‌های زمانی و شبکه عصبی نوع GMDH

غلامعلی شرزهای

دانشیار دانشکده اقتصاد دانشگاه تهران

مهدی احراری

پژوهشگر اقتصادی دانشکده اقتصاد دانشگاه تهران

حسن فخرائی

کارشناس ارشد اقتصاد محیط زیست دانشکده اقتصاد دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۱۲/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۹/۱۰

چکیده

روش‌ها و الگوهای اقتصادسنجی متفاوتی، از قبیل تجزیه و تحلیل رگرسیون و سری‌های زمانی به منظور پیش‌بینی تقاضای آب، به طور معمول توسط محققان مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اما در سال‌های اخیر تکنیک جدید شبکه‌های عصبی به عنوان ابزاری مؤثر و کارا در پیش‌بینی متغیرهای اقتصادی مطرح شده است. در مقاله حاضر، از شبکه عصبی نوع GMDH مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، الگوهای ساختاری و همچنین سری‌های زمانی، به منظور مقایسه روش‌های پیش‌بینی تقاضای سرانه آب در شهر تهران استفاده شده است. متغیرهای مورد نظر در الگوهای پیش‌بینی تقاضای آب عبارتند از مصرف سرانه آب، قیمت آب، متوسط درآمد خانوار و متوسط درجه حرارت سالانه در شهر تهران. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که پیش‌بینی تقاضای آب با استفاده از روش شبکه‌های عصبی نوع GMDH، نسبت به برآوردهای حاصل از الگوهای ساختاری و سری زمانی، از درجه کارایی بیش‌تری برخوردار است. بنابراین، استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی متغیرهای اقتصادی، می‌تواند به عنوان ابزاری در کنار سایر روش‌های پیش‌بینی مورد استفاده تصمیم‌گیران و سیاست‌گذاران در بخش مدیریت آب قرار گیرد.

طبقه‌بندی JEL : C5 , C53.

کلید واژه: شبکه عصبی GMDH، تقاضای آب شهر تهران، پیش‌بینی، الگوهای ساختاری و

سری زمانی

۱- مقدمه

امروزه نقش آب از یک ماده حیاتی فراتر رفته و به عنوان کالایی اقتصادی مورد توجه قرار گرفته است، به گونه‌ای که اهمیت و کاربرد آن در فعالیت‌های مختلف اقتصادی، سبب شده که از آن به عنوان کلید توسعه پایدار نام برده شود.^۱ شهر تهران با جمعیتی بالغ بر ۷/۵ میلیون نفر در سال ۱۳۸۵، یکی از شهرهای بزرگ جهان به شمار می‌رود. آب شرب این شهر از سدهای کرج، لار، لتیان و چاه‌های عمیق تأمین می‌شود. رشد بی‌رویه مصرف آب در شهر تهران از یک طرف و فرسوده بودن شبکه آب‌رسانی موجود، سبب شده که منابع آبی مزبور پاسخ‌گوی مصرف آب نباشد. به‌ناچار برداشت آب از منابع زیر زمینی رو به افزایش نهاده و بر تعداد چاه‌ها افزوده شده، به گونه‌ای که نسبت آب برداشتی از چاه‌ها به کل آب تأمین شده، از ۵/۳ درصد در سال ۱۳۴۲، به بیش از ۳۰ درصد در سال‌های اخیر رسیده است.^۲ ادامه این روند می‌تواند تأمین آب مورد نیاز برای کلان‌شهرهایی از جمله تهران را در آینده با مشکل مواجه کند، لذا پیش‌بینی تقاضای آب به منظور برنامه‌ریزی صحیح و اصولی برای آینده حائز اهمیت است.

پیش‌بینی تقاضای آب می‌تواند به صورت کوتاه‌مدت و بلندمدت انجام شود. پیش‌بینی کوتاه‌مدت تقاضای آب، افق‌های زمانی روزانه، هفتگی و ماهانه را شامل می‌شود. پیش‌بینی بلندمدت تقاضای آب شامل دوره‌های زمانی یک تا چند ساله است. پیش‌بینی کوتاه‌مدت تقاضای آب از جهت مدیریت کارای سیستم آب‌رسانی موجود، حائز اهمیت است، در حالی که پیش‌بینی بلندمدت، به منظور برنامه‌ریزی و طراحی شبکه، تأمین منابع آبی جدید و توسعه شبکه آب‌رسانی موجود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مطالعات گذشته پیش‌بینی تقاضای آب مانند سایر متغیرهای اقتصادی با استفاده از روش‌های تجزیه و تحلیل رگرسیون و سری‌های زمانی انجام گرفته است. در سال‌های اخیر، با توجه به کاربرد وسیع شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی متغیرهای اقتصادی، بخشی از مطالعات، به پیش‌بینی تقاضای آب با استفاده از این الگوها پرداخته‌اند. هدف

۱ - شرکت آب و فاضلاب استان تهران، (۱۳۸۳)

۲ - وزارت نیرو (۱۳۸۰).

ما در این مطالعه، استفاده از روش شبکه عصبی GMDH¹ به منظور پیش بینی تقاضای آب و مقایسه آن با الگوهای ساختاری و سری‌های زمانی است. در بخش دوم، به مرور نمونه‌ای از مطالعات انجام شده در رابطه با برآورد تابع تقاضای آب، تخمین الگوی ساختاری و پیش‌بینی تقاضای آب بر اساس این الگو خواهیم پرداخت. بخش سوم، به تدوین الگو و پیش‌بینی تقاضای آب با استفاده از الگوی سری‌های زمانی اختصاص داده شده است. تعدادی از مطالعات انجام شده در زمینه پیش‌بینی تقاضای آب با استفاده از الگوی شبکه‌های عصبی، معرفی شبکه عصبی GMDH و تدوین الگو و پیش‌بینی تقاضای آب شرب شهر تهران با استفاده از شبکه عصبی در بخش چهارم ارائه شده‌اند و بخش پایانی به نتیجه‌گیری و جمع بندی مطالب اختصاص یافته است.

۲ - الگوی ساختاری برای پیش بینی تقاضای آب شرب در شهر تهران

تقاضا برای آب با توجه به کاربردهای وسیع و گوناگون آن، به دسته‌های تقاضای آب کشاورزی، صنعتی، شهری، تفریحی و زیست محیطی تقسیم می‌شود، که در هر کدام از این گروه‌ها آب کاربردهای متفاوتی دارد. تقاضای آب در بخش شهری، شامل تقاضای خانگی، تجاری و عمومی می‌شود. مصرف آب در بخش خانگی معمولاً به دو قسمت مصرف داخلی و مصرف خارجی قابل تقسیم است. مصرف داخلی، به منظور پخت و پز، بهداشت فردی و مواردی از این قبیل است، در حالی که مصرف خارجی به منظور آبیاری باغچه و پر کردن حوض واستخر استفاده می‌شود. مصرف تجاری آب، شامل مصارف آب در فروشگاه‌ها، رستوران‌ها، بوفه‌ها و هتل‌ها بوده و مصرف آب در بخش عمومی شامل آب مصرف شده در پارک‌ها، مدارس، بیمارستان‌ها و مساجد است.

تولید و مصرف آب در شهر تهران در طول دهه‌های گذشته روندی صعودی داشته است، به طوری که حجم آب تولید شده از ۱۸/۱ میلیون متر مکعب در سال ۱۳۳۴، به ۱۰۱۴/۳ میلیون متر مکعب در سال ۱۳۸۴ رسیده است. جدول (۱)، میزان تولید آب در طول دهه‌های گذشته در شهر تهران را نشان می‌دهد.

جدول ۱- تولید آب در شهر تهران در سه دهه گذشته

سال	میزان آب خام (میلیون متر مکعب)	جمعیت شهر تهران (هزار نفر)	متوسط تولید سرانه آب (لیتر در روز)	تعداد مشترکان
۱۳۵۲	۲۹۱	۳۸۸۷	۲۰۵	۴۷۰۳۶۳
۱۳۵۵	۳۴۶	۴۵۳۰	۲۰۹	۵۱۰۶۳۰
۱۳۶۱	۴۷۸	۵۳۸۵	۲۴۳	۵۹۱۱۷۴
۱۳۶۵	۵۴۲	۶۰۴۳	۲۴۶	۶۴۶۰۰۰
۱۳۷۰	۷۶۷	۶۲۷۴	۳۳۵	۷۲۰۳۹۰
۱۳۷۵	۸۷۰	۶۵۱۴	۳۶۵	۷۹۶۳۵۹
۱۳۷۹	۹۰۵	۷۱۲۰	۳۴۸	۸۶۶۰۰۵
۱۳۸۳	۹۵۱	۷۳۰۸	۳۵۶	۸۹۰۴۱۹

ماخذ: شرکت آب و فاضلاب استان تهران

تقاضا برای آب از دهه ۱۹۶۰ به طور گسترده‌ای مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. با توجه به این که به منظور پیش‌بینی تقاضای آب با الگوی ساختاری، ابتدا باید الگو برآورد شده و سپس بر اساس آن به پیش‌بینی تقاضای آب پرداخته شود، لذا نتایج تعدادی از تحقیقات انجام شده در زمینه تقاضای آب شهری که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته، در جدول (۲) به صورت خلاصه آورده شده است.

نتایج حاصل از مطالعات انجام شده، نشان می‌دهد که تقاضای آب (شهری) نسبت به قیمت و درآمد، کم کشش است. هم‌چنین بررسی الگوهای به کار گرفته شده در مطالعات مختلف بیانگر این مسئله است که در ادبیات اقتصادی، متغیرهای متفاوتی به عنوان عوامل مؤثر بر تقاضای آب مورد بررسی قرار گرفته‌اند، که به طور کلی به دو دسته از عوامل قابل تقسیم‌اند. دسته اول متغیرهای اقتصادی - اجتماعی، شامل جمعیت، درآمد، قیمت آب و خصوصیات خانوارها و دسته دوم، متغیرهای جوی شامل دما و بارندگی هستند. عواملی که در دسته اول قرار دارند، تقاضای آب در بلندمدت را تحت تاثیر قرار داده و برای پیش‌بینی بلندمدت مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما عوامل دسته دوم، بیشتر تقاضای کوتاه‌مدت آب را تحت تاثیر قرار می‌دهند.

جدول ۲ - نتایج برخی از مطالعات انجام شده در زمینه تقاضای آب

روش اقتصادسنجی	متغیر قیمت	الگوی برآورد شده	نوع داده‌ها	کشش درآمدی	کشش قیمتی	سال	پژوهش‌گر
OLS	AP	Log-Log	TS	۰/۰۸-۰/۰۷	-۰/۳۳،-۰/۱۳	۱۳۷۲	سعید نیا
OLS	AP	سیستم مخارج خطی	CS-TS TS	۰/۲۱ ۰/۱۷۵	-۰/۱۴ -۰/۱۷	۱۳۷۵	شرزه ای و کلاهی
OLS	MP,AP	خطی و نمایی	CS-TS	۰/۱۲ - ۰/۰۱	-۰/۳۶، -۰/۱۷	۱۳۷۹	اکبری و دینانی*
OLS	AP	Lin&Log-Log	TS	۰/۲	-۰/۱۲	۱۳۷۹	رستم آبادی سفلی
همگرایی جوهانسن	AP	سیستم مخارج خطی	TS	۰/۱۳ - ۰/۲	-۰/۱۲، -۰/۰۸	۱۳۸۲	حسینی و پژویان
OLS	MP	Log-Log	TS CS-TS	۰/۲ - ۰/۲۶ ۱/۰۳ - ۰/۴۸	-۰/۰۲، -۰/۲۸ -۰/۸۲، -۰/۲۶	۱۹۷۰	ونگ
OLS	AP	Log-Log	CS-TS	-----	۰/۲۷، -۰/۷۶	۱۹۷۹	فوستر و بیاتی
OLS	----	سیستم مخارج خطی	TS	۰/۲۱	-۰/۷۷	۱۹۸۵	القنیت و جانستون**
OLS	AP	Log	TS	۰/۵۸	-۰/۴	۱۹۸۵	کوکران و کاتون
OLS	MP	LIN	CS-TS	-----	-۰/۶۸، -۰/۰۳	۱۹۸۷	مون
OLS	MP,AP, Shine	Log	CS		-۰/۰۶، -۰/۲۲	۱۹۹۲	نیزویدومی
OLS	AP	سیستم مخارج خطی GCD	CS-TS	----- ۰/۱۹ - ۰/۱۱	-۰/۲۸، -۰/۱۹ -۰/۴۷، -۰/۳۵	۲۰۰۱	گایودین و همکاران
GLS	MP	سیستم مخارج خطی	TS	۰/۱۳، -۰/۰۷	-۰/۱۳، -۰/۰۷	۲۰۰۴	مارتینز - اسپینیرا و نایگس***
OLS	قیمت بلوک میانی	Log-Lin	CS-TS	۰/۷۱ - ۰/۴	-۱/۳۳، -۰/۹۹	۲۰۰۶	مزانتی و همکاران
همگرایی انگل - گرنجر	MP	سیستم مخارج خطی	TS	-----	-۰/۵، -۰/۱	۲۰۰۷	مارتینز - اسپینیرا***

* در این مطالعه از تفاوت بین قیمت متوسط و قیمت نهایی به عنوان شاخصی برای متغیر تفاضلی طبق تصریح تیلور - نردین استفاده شده است.
 ** در این مطالعه، چندین الگوی دیگر نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند، ولی به دلیل تأکید بر سیستم مخارج خطی، فقط نتایج این الگو در اینجا ارائه شده است.
 *** در این مطالعات از متغیر قیمت نهایی و متغیر تفاضلی تعریف شده بر اساس تصریح تیلور و نردین، استفاده شده است.

علائم اختصاری استفاده شده در جدول بالا مخفف عبارات و اصطلاحات زیر است:

قیمت نهایی: Marginal Price (MP)، قیمت متوسط: Average Price (AP)، مقطع عرضی: Cross (CS)،
 سری زمانی: Time Series (TS)، حداقل مربعات معمولی: Ordinary Least Squares (OLS)،
 قیمت شاین: Shine Price، حداقل مربعات تعمیم یافته: Generalized Least Squares (GLS)

۲-۱- نتایج برآورد الگوی ساختاری

داده‌هایی که در این مطالعه به منظور تدوین الگو و پیش بینی تقاضای بلندمدت آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند، مشتمل بر متوسط درآمد خانوار، متوسط بعد خانوار، متوسط قیمت آب و متوسط دمای سالیانه شهر تهران هستند. این داده‌ها به صورت سری زمانی سالانه، طی سال‌های ۱۳۸۳-۱۳۵۰ جمع‌آوری شده است. فرض بر این است که میزان مصرف آب با درآمد خانوار و متغیر دما، رابطه مثبت و با قیمت آب رابطه معکوس دارد. هم‌چنین انتظار داریم که نسبت به بعد خانوار صرفه‌های اقتصادی در مصرف آب وجود داشته باشد، به طوری که با کاهش بعد خانوار، مصرف سرانه آب افزایش یابد. متغیر وابسته یا متغیر هدف شامل مصرف سرانه آب بر حسب لیتر در روز است که از تقسیم مصرف سالانه آب بر جمعیت شهر تهران به دست آمده است. آمار مربوط به مصرف آب در شهر تهران از دفاتر شرکت آب و فاضلاب شهر تهران استخراج شده است. این آمار، منعکس کننده مجموعه آب مصرف شده در طول سال، توسط گروه‌های مصرف کننده خانگی، تجاری، صنعتی و عمومی در شهر تهران است. از آمار مربوط به متوسط کل هزینه‌های خوراکی و غیرخوراکی جمعیت شهری استان تهران به عنوان شاخصی برای متوسط درآمد خانوار استفاده شده است. قیمت متوسط آب از تقسیم مبلغ کل درآمد آب بهای شرکت آب و فاضلاب استان تهران بر مقدار مصرف آب همان سال محاسبه شده است.

با استفاده از شاخص بهای کالاها و خدمات مصرفی شهر تهران، آمار مربوط به قیمت متوسط و متوسط درآمد خانوار به قیمت سال پایه ۱۳۷۶ تعدیل شده است. آمار مربوط به شاخص بهای کالاها و خدمات مصرفی و متوسط دما در شهر تهران از سالنامه‌های آماری استخراج شده است. آمار مربوط به متوسط بعد خانوار و متوسط هزینه کل خوراکی و غیرخوراکی جمعیت شهری استان تهران، از سالنامه‌های آماری و نتایج تفصیلی آمارگیری از هزینه و درآمد خانوارها به دست آمده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۲)، مشاهده می‌شود که الگوهای لگاریتم خطی و سیستم مخارج خطی نسبت به سایر الگوها بیش‌تر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این مطالعه، تقاضای آب شهر تهران با استفاده از اطلاعات سال‌های ۱۳۷۸-۱۳۵۰ و الگوی لگاریتم خطی برآورد شده، که نتایج آن به صورت زیر است:

$$LWD = LDAMA \cdot 0.76 LBOD + 1/76 LP - 0.23 LI - 0.14 + 0.9 DU \cdot 0.14 - 5/11 \quad (5)$$

$$t: (5/06) \quad (-5/08) \quad (1/87) \quad (-8/8) \quad (-8/05) \quad (3/02)$$

در این معادله، LWD، لگاریتم طبیعی مصرف سرانه آب در شهر تهران و متغیر وابسته است. متغیرهای توضیحی به ترتیب شامل لگادریتم طبیعی قیمت آب (LP)، درآمد خانوار شهری (LI)، بعد خانوار (LBOD) و دما (LD) هستند. هم‌چنین برای سال‌های ۱۳۶۷ - ۱۳۵۹ (دوره جنگ)، یک متغیر مجازی (DU_{۵۹}) در نظر گرفته شده است که ارزش این متغیر برای این دوره عدد یک و برای سایر سال‌ها عدد صفر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همه ضرایب معنی دار بوده و علامت‌های مورد انتظار را دارند.^۱ مقدار R^۲، برابر با ۰/۹۴، F، برابر با ۸۵/۸۶ و آماره دوربین - واتسون برابر با ۱/۹۲ است. هم‌چنین کشش‌های قیمتی (-۰/۲۳) و درآمدی (۰/۱۴) آب کوچک‌تر از یک است، که نشان‌دهنده کم‌کشش بودن تقاضای آب بوده و با نتایج به‌دست آمده از سایر مطالعات سازگار است.

۲-۲- نتایج پیش‌بینی با الگوی ساختاری

پیش‌بینی‌ها با استفاده از اطلاعات درون نمونه و برای سال‌های ۱۳۸۳-۱۳۷۹ انجام شده است.^۲ برای ارزیابی پیش‌بینی‌ها، معمولاً از خطاهای پیش‌بینی یا توابعی از آن‌ها استفاده می‌شود. در این مطالعه، میزان خطای پیش‌بینی تقاضای آب با معیارهای ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و میانگین قدر مطلق درصد خطا (MAPE) مورد بررسی قرار گرفته است.^۳

جدول ۳- میزان خطای پیش‌بینی با توجه به معیارهای مختلف (الگوی ساختاری)

معیار	MAPE	MAE	RMSE
خطا	۵/۳۹	۱۲/۵۸	۱۳/۵۸

۱ - متغیر درآمد در سطح ۱۰٪ معنی دار بوده است.

۲- نتایج پیش‌بینی‌ها به منظور مقایسه با سایر الگوها در نمودار (۱) ارائه شده است.

۳- این معیارها به صورت زیر قابل تعریف هستند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (\hat{Y}_t - Y_t)^2}{N}}, \quad MAE = \frac{\sum |\hat{Y}_t - Y_t|}{N}, \quad MAPE = \frac{\sum \left| \frac{\hat{Y}_t - Y_t}{Y_t} \right|}{N}$$

۳- الگوی سری‌های زمانی

الگوهای سری‌های زمانی برخلاف الگوهای سنتی رگرسیون، پایه نظری نداشته و متغیر وابسته در این الگوها بر اساس وقفه‌های آن و جمله اخلاص توضیح داده می‌شود. برای تدوین الگوی سری‌های زمانی، از روش متداول در این زمینه، یعنی روش باکس - جنکینز استفاده می‌شود. تدوین الگوی سری‌های زمانی به روش باکس - جنکینز (ARIMA)^۱، شامل سه مرحله است. در مرحله شناسایی الگو، مرتبه d ، p و q تعیین می‌شود. d ، تعداد دفعات تفاضل‌گیری است، که برای پایا کردن سری لازم است و p و q به ترتیب درجه فرایند خود بازگشت و میانگین متحرک هستند. برای تعیین p و q از توابع خود همبستگی و خودهمبستگی جزئی استفاده شده است. مرحله بعد، مرحله تخمین الگو است. که به منظور تعیین ضرایب معادله، الگو برآورد می‌شود. مرحله سوم مرحله تایید الگو است. در این مرحله، الگو مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و چنانچه الگو نامناسب تشخیص داده شود دوباره به مرحله تشخیص بازگشته و الگوی دیگری را انتخاب خواهیم کرد. اگر الگوی سری زمانی به نحو صحیحی مشخص شده باشد، خطاها باید یک فرایند اغتشاش خالص با میانگین صفر داشته باشند. در عمل، ممکن است چندین الگو مناسب تشخیص داده شوند، که از بین این معادلات بر اساس معیارهای آکائیک و شوارز بهترین الگو انتخاب می‌شود. البته تصمیم‌گیری بر اساس این معیارها ممکن است به نتایج متفاوتی منجر شود. سپس بر اساس الگوی انتخاب شده می‌توان به پیش‌بینی پرداخت.

۳-۱- برآورد الگوی سری زمانی

معمولاً برای پایا کردن سری‌های زمانی در واریانس، از لگاریتم‌گیری و در میانگین از تفاضل‌گیری استفاده می‌شود.^۲ لذا، ابتدا از سری زمانی مربوط به تقاضای آب، لگاریتم گرفته و الگو را بر اساس آن برآورد و انتخاب می‌کنیم. به منظور بررسی مانایی یا نامانایی سری زمانی در میانگین، نمودار خود همبستگی و خود همبستگی جزئی سری زمانی مورد بررسی قرار گرفت، که با توجه به توابع خود همبستگی و خود همبستگی

1 - Auto Regressive Integrated Moving Average.

۲- به طور کلی برای تثبیت واریانس از تبدیل باکس - کاکس استفاده می‌شود. برای مباحث بیشتر رجوع کنید به: ابریشمی و مهرآرا (۱۳۸۱)

جزئی تقاضای آب، مشخص شد که سری زمانی لگاریتم تقاضای آب سرانه (Lwd) در سطح متغیر می‌تواند ناپایا باشد. لذا با استفاده از آزمون دیکی فولر و دیکی فولر تعمیم یافته (ADF) و آزمون پرون، از ناپایا بودن سری اطمینان حاصل کردیم.^۱ نتایج آزمون ریشه واحد بیانگر این مسئله بود که سری زمانی در سطح ۵٪ دارای ریشه واحد بوده، لذا ابتدا از سری تفاضل گرفته و تابع خود هم‌بستگی و خود هم‌بستگی جزئی برای تفاضل مرتبه اول سری زمانی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نمودار تابع خود هم‌بستگی و خود هم‌بستگی جزئی، مشخص می‌شود که در سری تفاضل گیری شده هیچ کدام از وقفه‌ها معنی دار نبوده و بنابراین توابع خود هم‌بستگی و خود هم‌بستگی جزئی با یک فرآیند تصادفی محض سازگار است. لذا با توجه به این که سری زمانی در سطح ۱۰٪ مانا بود، تدوین الگو بر اساس سری بدون تفاضل گیری انجام شده است. نمودارهای خود هم‌بستگی و جزئی سری (LWD) حاکی از آن هستند که سری از یک فرآیند خود بازگشت مرتبه اول پیروی می‌کند. برای اطمینان از الگوی انتخاب شده، بعد از تخمین الگو، نمودار خود هم‌بستگی و خود هم‌بستگی جزئی جملات پسماند مورد بررسی قرار گرفت، که نشان‌دهنده این مسئله بود که این مقادیر همگی کوچک بوده و از هیچ الگوی خاصی پیروی نمی‌کنند.

الگوی برآورد شده به صورت زیر است:

$$LWD = 2/26 + 0/0086T + 0/53 LWD_{(-1)} \quad (6)$$

$$t(3/34) (2/63) (3/7)$$

در این الگو، T نشان‌دهنده روند زمانی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همه متغیرها معنی دارند. مقدار R^2 برابر با ۰/۸۷ و F برابر با ۸۷ است.

۳-۲ - نتایج پیش‌بینی با الگوی سری زمانی

همانند الگوی ساختاری، الگوی سری زمانی برای دوره ۱۳۷۸-۱۳۵۰ برآورد شده و پیش‌بینی‌ها برای دوره ۱۳۸۳-۱۳۷۹ انجام گرفته است^۲، که میزان خطای پیش‌بینی با توجه به معیارهای مختلف محاسبه و در جدول (۴) ارائه شده است.

۲- نتایج آزمون‌ها در جداول (۱) و (۲) ضمیمه آمده است.

۱- نتایج پیش‌بینی‌ها به منظور مقایسه با سایر الگوها در نمودار (۱) ارائه شده است.

جدول ۴- میزان خطای پیش بینی با توجه به معیارهای مختلف الگوی AR(1)

معیار	MAPE	MAE	RMSE
خطا	۵/۷۷	۱۴/۴۱	۱۸/۷۳

۴- الگوی شبکه عصبی

مطالعات انجام شده در زمینه پیش بینی کوتاه مدت و بلندمدت تقاضای آب محدودند. لیو و همکاران^۱ (۲۰۰۳)، به بیان این مسئله پرداخته اند که اگرچه در مورد استفاده از شبکه های عصبی به منظور پیش بینی تقاضای آب تحقیقات زیادی انجام نگرفته است، اما به نظر می رسد که رویکرد تدوین الگوی تقاضای آب در نواحی شهری با استفاده از شبکه های عصبی، آینده درخشانی داشته باشد. در زمینه پیش بینی تقاضای انرژی با استفاده از شبکه های عصبی، مطالعات متعددی به منظور پیش بینی تقاضای کوتاه مدت برق (پیش بینی بیشینه بار) انجام شده است. این مسئله می تواند به دلیل عدم قابلیت ذخیره الکتریسیته باشد، که در نتیجه، پیش بینی صحیح تقاضای برق در کوتاه مدت را از اهمیت فوق العاده ای برخوردار می کند.

۴-۱- مروری بر پیشینه تحقیقات شبکه های عصبی (کاربرد در پیش بینی تقاضا)

الصبا و الیمین^۲ (۱۹۹۹)، تقاضای بار بلندمدت برق در کشور عربستان را با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی (ANN)^۳ پیش بینی کرده و با نتایج حاصل از الگوهای سری زمانی مقایسه کرده اند. از داده های بار پیک سالانه طی دوره ۱۹۹۶-۱۹۸۱ به عنوان مجموعه آموزش شبکه استفاده شده است. پیش بینی تقاضای پیک برای سال های ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۶ انجام گرفته و با برآوردهای حاصل از الگوهای AR و ARMA و ARIMA مقایسه شده اند. نتایج مطالعه بر حسب عملکرد خطا نشان می دهد که شبکه عصبی مصنوعی، نتایج دقیق تر و صحیح تری را نسبت به دیگر تکنیک های پیش بینی، با توجه به تعداد کم داده های تاریخی^۴ ارائه کرده است.

چین و همکاران^۵ (۲۰۰۱) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، به پیش بینی تقاضای کوتاه مدت آب پرداختند. متغیرهای ورودی در این مطالعه شامل تقاضای آب، میانگین

1- Lio, Junguo. , et al(2003).

2 - Al – Saba, Tawfiq., El – Amin, Ibrahim (1999).

3- Artificial Neural Network .

4 -Historical data.

5 -Jain , Ashu et al (2001).

دمای هوا و مقدار بارندگی برای شهر کانپور (هند) در هفته بوده‌اند. علاوه بر الگوی شبکه عصبی مصنوعی، سه الگوی رگرسیون خطی و دو الگوی سری زمانی به منظور مقایسه عملکرد الگوها در پیش بینی تقاضای آب، مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج مطالعه نشان داد که عملکرد شبکه عصبی مصنوعی از سایر الگوها بهتر بوده است. هم‌چنین الگوهای رگرسیونی نسبت به سری زمانی، پیش‌بینی‌های بهتری را ارائه داده و الگوهای غیر خطی^۱ نسبت به خطی عملکرد بهتری داشته‌اند.

لیو و همکاران^۲ (۲۰۰۳)، تقاضای آب شهر وینان^۳ در چین را توسط شبکه عصبی مصنوعی برای سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰، پیش‌بینی کرده‌اند. هر چند که در این مطالعه مقایسه‌ای با سایر روش‌های پیش‌بینی انجام نگرفته، اما با توجه به اختلاف کم مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی (کم‌تر از ۳ درصد) می‌توان به برازش خوب الگو اشاره کرد.

عبدل - آل (۲۰۰۶)^۴، به پیش‌بینی بار پیک روزانه مصرف برق با استفاده از شبکه‌های مقایسه‌ای^۵ پرداخته است. نتایج مطالعه نشان‌دهنده برتری نسبی شبکه‌های مقایسه‌ای نسبت به سایر روش‌ها، بر حسب معیار میانگین مطلق درصد خطا (MAPE)^۶ و کم‌تر بودن تعداد خطاهای بزرگ در پیش‌بینی است.^۷

از جمله مطالعات داخلی می‌توان به مطالعه گوشه (۱۳۸۲) اشاره کرد، که پس از بررسی عوامل مؤثر بر تقاضای آب شهری، به پیش‌بینی تقاضای کوتاه‌مدت آب در شهر تهران پرداخته است. در نهایت، شبکه عصبی با دو لایه پنهان (که دارای یک نرون در لایه پنهان اول و ۷ نرون در لایه پنهان دوم است) را به عنوان بهترین ساختار مناسب برای پیش‌بینی تقاضای کوتاه‌مدت آب در شهر تهران تشخیص داده است. هم‌چنین مقایسه‌ای بین الگوی شبکه عصبی مصنوعی و فازی در مورد پیش‌بینی تقاضای

۱ - منظور از الگوهای غیرخطی در این مطالعه، الگوهایی است که نسبت به متغیرها غیرخطی ولی نسبت به ضرایب رگرسیون، خطی هستند.

2 -Lio, Junguo., et al (2003).

3 - Weinan.

4 -Abdel - Aal, R.E.,(2006).

5 -Abductive networks.

6 -Mean Absolute Percentage Error.

۷ - در بیش‌تر مطالعاتی که مورد بررسی قرار گرفت، از شبکه‌های پرسپترون چند لایه (Multi layer perceptron) با الگوریتم آموزشی پس انتشار خطا (Error back propagation) به منظور پیش‌بینی متغیرهای اقتصادی استفاده شده است. در شبکه مورد استفاده در این مطالعه از الگوریتم GMDH به‌منظور آموزش شبکه استفاده شده، که نسبت به الگوریتم پس انتشار خطا، توانایی انتخاب نهاده‌های مؤثر بر ستاده را داراست.

کوتاهمدت آب شهری انجام داده، که الگوی شبکه عصبی مصنوعی عملکرد بهتری نسبت به الگوهای فازی برای پیش‌بینی تقاضای آب در شهر تهران داشته است. ذکر این نکته ضروری است که این مطالعه به پیش‌بینی تقاضای روزانه آب شهر تهران پرداخته است و لذا از متغیرهای اقتصادی، شامل قیمت آب و درآمد خانوار در تجزیه و تحلیل خود استفاده نکرده است.

۴-۲- شبکه عصبی نوع GMDH

شبکه عصبی GMDH حاوی مجموعه‌ای از نرون‌ها^۱ است که از پیوند جفت‌های مختلف از طریق یک چند جمله‌ای درجه دوم به وجود می‌آیند. شبکه با ترکیب چند جمله‌ای‌های درجه دوم حاصل از تمامی نرون‌ها، تابع تقریبی \hat{f} را با خروجی \hat{y} ، برای یک مجموعه از ورودی‌های $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ با کم‌ترین خطا، در مقایسه با خروجی واقعی y ، توصیف می‌کند. بنابراین، برای M داده آزمایشگاهی شامل n ورودی و یک خروجی، نتایج واقعی به شکل رابطه (۷) نمایش داده می‌شوند:

$$y_i = f(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in}) \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (7)$$

شبکه زیر می‌تواند مقدار خروجی \hat{y} را، برای هر بردار ورودی X ، مطابق رابطه (۸) پیش‌بینی کند.

$$\hat{y}_i = \hat{f}(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in}) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, M) \quad (8)$$

به طوری که میانگین مربعات خطا بین مقادیر حقیقی و پیش‌بینی کمینه شود، به عبارت دیگر:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^M (\hat{y}_i - y_i)^2}{M} \rightarrow \min \quad (9)$$

شکل عمومی اتصال بین متغیرهای ورودی و خروجی را می‌توان با استفاده از تابع چند جمله‌ای به شکل رابطه (۱۰) بیان کرد:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (10)$$

1- Neuron.

که چند جمله‌ای ایواخنکو^۱ نامیده می‌شود. در بسیاری از موارد کاربردی از شکل درجه دوم و دو متغیره این چند جمله‌ای به صورت معادله (۱۱) استفاده می‌شود:

$$\hat{y} = G(x_i, x_j) = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_j + a_3 x_i^2 + a_4 x_j^2 + a_5 x_i x_j \quad (11)$$

ضرائب مجهول a_i در معادله (۱۱) با تکنیک‌های رگرسیونی آن گونه به دست می‌آیند، که اختلاف بین خروجی واقعی y و مقادیر محاسبه شده \hat{y} برای هر جفت متغیر ورودی x_i و x_j ، کمینه شود. مجموعه‌ای از چند جمله‌ای‌ها با استفاده از معادله (۱۱) ساخته می‌شوند، که ضرائب مجهول همه آن‌ها، با استفاده از روش حداقل مربعات (LS) به دست می‌آیند. برای هر تابع G_i (هر نرون ساخته شده)، ضرائب معادلات هر نرون برای حداقل کردن خطای کل آن به منظور انطباق بهینه ورودی‌ها بر تمام جفت مجموعه‌های ورودی - خروجی، به دست می‌آیند:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^M (y_i - G_i)^2}{M} \rightarrow \min \quad (12)$$

در روش‌های پایه‌ای الگوریتم GMDH، تمامی ترکیبات دوتایی (نرون‌ها)، از n متغیر ورودی ساخته شده و ضرایب مجهول تمامی نرون‌ها با استفاده از روش حداقل مربعات به دست می‌آیند. بنابراین، $\binom{n}{2} = \frac{n(n-1)}{2}$ نرون در لایه دوم ساخته می‌شوند، که آن را می‌توان به شکل مجموعه (۱۳) نمایش داد.

$$\{(y_i, x_{ip}, x_{iq}) | (i = 1, 2, \dots, M) \ \& \ p, q \in (1, 2, \dots, M)\} \quad (13)$$

از شکل درجه دوم تابع بیان شده در معادله (۱۱) برای هر M ردیف سه تایی استفاده می‌کنیم، این معادلات را می‌توان به شکل ماتریسی (۱۴) بیان کرد.

$$Aa = Y \quad (14)$$

که در آن A بردار ضرایب مجهول معادله درجه دو نشان داده شده در معادله (۱۱) می‌باشد، یعنی:

$$a = \{a_0, a_1, \dots, a_5\} \quad (15)$$

و

$$Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_M\}^T \quad (16)$$

از مقادیر بردارهای ورودی و شکل تابع به راحتی قابل مشاهده است که:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_{1p} & x_{1q} & x_{1p}^2 & x_{1q}^2 & x_{1p}x_{1q} \\ 1 & x_{2p} & x_{2q} & x_{2p}^2 & x_{2q}^2 & x_{2p}x_{2q} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{Mp} & x_{Mq} & x_{Mp}^2 & x_{Mq}^2 & x_{Mp}x_{Mq} \end{bmatrix} \quad (17)$$

روش حداقل مربعات از آنالیز رگرسیون چند متغیره، حل معادلات را به شکل معادله (۱۸) امکان پذیر می کند.

$$a = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (18)$$

این معادله، بردار ضرایب معادله (۱۱) را برای تمام M مجموعه سه تایی ایجاد می کند.

شبکه های عصبی مصنوعی و شبکه های عصبی پرسپترون چند لایه با الگوریتم آموزشی پس انتشار خطا با یک سری محدودیت ها و مشکلاتی در تعیین ساختار بهینه شبکه مواجه اند. در طراحی این شبکه ها بایستی تعداد لایه ها و نیز ساختار نرونی، از قبیل تعداد وزن ها و مقادیر اولیه آن ها، تابع تحریک هر نرون، نرخ آموزش و ضریب شتاب^۱، معیار توقف آموزش به منظور جلوگیری از آموزش بیش از حد شبکه و تضمین توانایی تعمیم دهی مناسب به داده های جدید، به شکل درستی انتخاب شوند، تا یک نگاشت مناسب و ایده آل میان داده های ورودی و خروجی برقرار شود. محدودیت دیگر این شبکه ها، عدم آرایه اطلاعات کافی و مناسب درباره روابط بین ورودی ها و خروجی است. هم چنین این شبکه ها به داده های ورودی زیادی به منظور آموزش شبکه نیاز دارند.

موضوع طراحی شبکه عصبی GMDH با مسائل عنوان شده در بالا متمایز است. در این نوع از طراحی، هدف، جلوگیری از رشد واگرایی شبکه و نیز مرتبط کردن شکل و ساختار شبکه به یک یا چند پارامتر عددی است، به گونه ای که با تغییر این پارامترها، ساختار شبکه ها نیز تغییر کند. روش های تکاملی^۲ مانند الگوریتم ژنتیک، کاربرد وسیعی در مراحل مختلف طراحی شبکه های عصبی به دلیل قابلیت های منحصر به فرد خود در پیدا کردن مقادیر بهینه و امکان جستجو در فضاهای غیر قابل پیش بینی، دارند

1-Momentum.
2- Evolutionary.

(نریمانزاده و همکاران ۲۰۰۲)^۱. در تحقیق حاضر، برای طراحی شکل شبکه عصبی و تعیین ضرایب آن، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

۴-۳ - نتایج پیش‌بینی الگوی شبکه عصبی GMDH

به منظور تدوین الگو و پیش‌بینی تقاضای آب در این مطالعه، از برنامه‌ای در نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.^۲ نرم‌افزار محاسباتی مبتنی بر بهینه‌سازی دو منظوره^۳ (آتشکاری و همکاران ۲۰۰۷)^۴، با هدف کمینه کردن خطای الگو سازی و پیش‌بینی، طراحی شده که به طور هم‌زمان^۵ (امانی فرد و همکاران ۲۰۰۸)^۶ دقت پیش‌بینی و پایداری فرآیند را افزایش می‌دهد. منظور از خطای الگوسازی، خطایی است که به واسطه اختلاف مقادیر برآورد شده با مقادیر واقعی در دوره آموزش شبکه حاصل شده است و منظور از خطای پیش‌بینی، میزان خطایی است که به واسطه اختلاف مقادیر برآورد شده و مقادیر واقعی در مشاهدات دوره پیش‌بینی محاسبه شده است.

متغیرهای ورودی شبکه عصبی به منظور پیش‌بینی بلندمدت تقاضای آب عبارت اند از: متوسط بعد خانوار، دمای هوا در شهر تهران، متوسط درآمد خانوار، متوسط قیمت آب.

داده‌های جمع‌آوری شده طی سال‌های ۱۳۸۳-۱۳۵۰ به دو گروه تقسیم شده‌اند، که داده‌های سال‌های ۱۳۷۸-۱۳۵۰ به منظور آموزش شبکه و داده‌های سال‌های ۱۳۸۳-۱۳۷۹، برای پیش‌بینی تقاضای آب در نظر گرفته شده‌اند. نمودار (۱)، مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده تقاضای آب توسط شبکه عصبی GMDH، الگوی سری زمانی و الگوی ساختاری را نشان می‌دهد.

1 - Nariman-zadeh, N. et al.(2002).

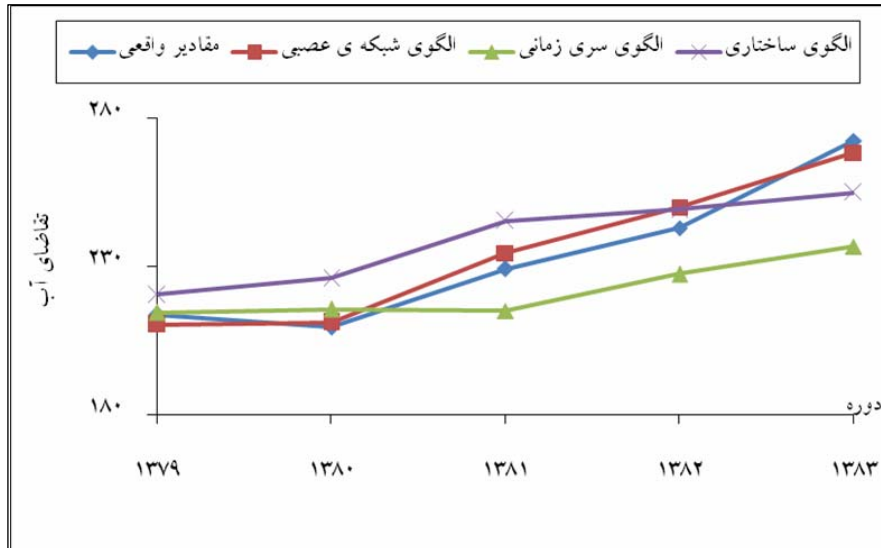
۲ - رجوع کنید به سایت دانشگاه گیلان.

3 - Multi-Objective Optimization Program.

4 - Atashkari, K.et al (2007).

5 - Pareto.

6 - Amanifard, N.et al (2008).



نمودار ۱- مقایسه مقادیر واقعی و پیش بینی شده تقاضای سرانه آب در شهر تهران

همچنین در جدول (۵)، میزان خطای پیش‌بینی‌های انجام گرفته با استفاده از شبکه عصبی بر حسب معیارهای مختلف، به‌منظور مقایسه با الگوهای ساختاری و سری‌های زمانی ارائه شده است.

جدول ۵- میزان خطای پیش‌بینی با توجه به معیارهای مختلف برای شبکه عصبی GMDH

معیار	MAPE	MAE	RMSE
خطا	۱/۸	۴/۲۷۷۴	۴/۶۳۳۴

نتایج تدوین الگو با استفاده از شبکه عصبی GMDH، نشان‌دهنده قدرت مسیریابی و دقت پیش‌بینی این شبکه بوده، که می‌تواند به عنوان ابزاری مناسب در تدوین الگو و پیش‌بینی تقاضای آب شهری مورد استفاده قرار گیرد. هم‌چنین با توجه به توانایی الگوریتم GMDH در شناسایی متغیرهای زاید و انتخاب متغیرهای مهم در فرآیند تدوین الگو، نتایج ارائه شده توسط شبکه عصبی بیانگر این مسئله است که همه متغیرهای ورودی بر خروجی شبکه مؤثر بوده‌اند و هیچ کدام از متغیرها در فرآیند تدوین الگو حذف نشده‌اند.

۵- نتیجه گیری

با توجه به افزایش مصرف آب در سال‌های اخیر، نیاز به برنامه‌ریزی، طراحی بهتر، عملکرد کارا و مدیریت سیستم‌های آبرسانی موجود، ضروری به نظر می‌رسد. یکی از پیش نیازهای مهم در برنامه‌ریزی، طراحی، اجرا و مدیریت بهتر منابع آب، پیش‌بینی دقیق تقاضای آب است. لذا در این مطالعه، از شبکه عصبی GMDH، الگوهای ساختاری و سری‌های زمانی به منظور پیش‌بینی تقاضای بلندمدت آب شرب شهر تهران استفاده شده است. در ابتدا به منظور تدوین الگوی تقاضای آب، از اطلاعات دوره ۱۳۷۸-۱۳۵۰ استفاده شده و در ادامه، پیش‌بینی‌ها (از درون نمونه) برای دوره ۱۳۸۳-۱۳۷۹ انجام گرفته است. سپس عملکرد این الگوها در پیش‌بینی تقاضای آب بررسی شده است. به منظور مقایسه عملکرد الگوها، از معیارهای مختلف، شامل ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین قدر مطلق خطا و میانگین قدر مطلق درصد خطا استفاده شده است، که این معیارها بر حسب مقادیر خطا (اختلاف مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده) تعریف شده‌اند. به منظور پیش‌بینی تقاضای آب با الگوهای ساختاری و شبکه عصبی، اطلاعات موجود سایر متغیرها مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول (۶)، عملکرد الگوهای مختلف در پیش‌بینی تقاضای آب بر حسب معیارهای ارائه شده در بخش‌های قبل را نشان می‌دهد.

جدول ۶- ارزیابی و مقایسه قدرت پیش‌بینی الگوهای مختلف برآورد شده

معیار	MAPE	MAE	RMSE
لگاریتم خطی (ساختاری)	۵/۳۹	۱۲/۵۸	۱۳/۵۸
ARIMA (سری زمانی)	۵/۷۷	۱۴/۴۱	۱۸/۷۳
شبکه عصبی نوع GMDH	۱/۸	۴/۲۸	۴/۶۳۳۴

مقایسه نتایج به دست آمده از الگوی شبکه عصبی با الگوهای ساختاری و سری‌های زمانی، بیانگر این مسئله است که الگوی شبکه عصبی بر اساس همه معیارهای مورد بررسی در این مطالعه، عملکرد بهتری نسبت به الگوهای رقیب در پیش‌بینی تقاضای آب در شهر تهران داشته است. همچنین الگوی ساختاری در پیش‌بینی تقاضای آب نسبت به الگوی سری زمانی عملکرد بهتری داشته است. الگوی ARIMA، چون از داده‌ها و اطلاعات مربوط به سایر متغیرها (قیمت، درآمد، بعد خانوار و دما) استفاده

نمی‌کند، لذا پیش‌بینی‌های ارائه شده بر اساس این الگو نسبت به سایر الگوها از دقت کم‌تری برخوردار است. از سویی، این مسئله می‌تواند به دلیل کافی نبودن داده‌ها (کم‌تر از ۵۰ مشاهده) به منظور ارائه الگوی مناسب در پیش‌بینی تقاضای آب باشد. همچنین با توجه به این مسئله که در الگوهای سری‌های زمانی، به محقق اجازه تعیین سهم نسبی سایر عوامل در تغییرات متغیر مورد نظر داده نمی‌شود، لذا این الگوها برای سیاست‌گذاری اهمیت کم‌تری دارند.

از سویی دیگر، اگرچه شبکه‌های عصبی در مقایسه با رگرسیون‌های معمولی، توانایی مدل‌سازی روابط غیرخطی را دارند، ولی کاربرد این شبکه‌ها به منظور تفسیر و توضیح روابط بین متغیرها مناسب نیست. همچنین به شبکه‌های عصبی به دلیل این‌که روابط بین متغیرها را ارائه نمی‌کنند، جعبه‌های سیاه نیز گفته می‌شود. اگر چه در شبکه عصبی GMDH، روابط بین متغیرها (نهادها و ستاده) به وسیله معادلات نرون‌ها قابل بیان است، ولی این روابط هیچ‌گونه تعبیر و تفسیر اقتصادی نخواهد داشت.

با توجه به این موضوع که پیش‌بینی‌های دقیق به منظور برنامه‌ریزی صحیح برای استفاده از منابع در آینده، می‌توانند کمک قابل ملاحظه‌ای را ارائه کنند، بنابراین، استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیش‌بینی متغیرهای اقتصادی می‌تواند به عنوان ابزاری در کنار سایر روش‌های پیش‌بینی مورد استفاده تصمیم‌گیران و سیاست‌گذاران در بخش مدیریت آب قرار گیرد.

فهرست منابع

- ۱- ابریشمی حمید، مهرآرا محسن، (۱۳۸۱)، *اقتصادسنجی کاربردی (رویکردهای نوین)*، چاپ اول، تهران، انتشارات دانشگاه تهران.
- ۲- اکبری حسین، محمدی دینانی منصور، (۱۳۷۹)، تخمین تقاضای آب شرب شهر کرمان، فصل‌نامه پژوهش‌های اقتصادی ایران، شماره ۷، صص ۶۸-۷۸
- ۳- پژوهان جمشید، حسینی سید شمس‌الدین، (۱۳۸۲)، برآورد تقاضای آب خانگی (مطالعه موردی شهر تهران)، فصل‌نامه پژوهش‌های اقتصادی ایران، شماره ۱۶، صص ۴۷-۶۷
- ۴- رستم آبادی سفلی الهام، (۱۳۷۹)، برآورد معادله مصرف آب در فصول تابستان و زمستان در شهر تهران، مجله برنامه و بودجه، شماره ۵۴ و ۵۵، صص ۷۷-۱۰۶.

- ۵- سعید نیا اسمعیل، (۱۳۷۲)، تخمین تابع تقاضا برای آب آشامیدنی و سیاست‌های قیمت‌گذاری آن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس.
- ۶- شرزه‌ای غلامعلی، کلاهی رضا، (۱۳۷۵)، برآورد تابع تقاضای آب شهری شیراز، مجله آب و توسعه، شماره ۳، صص ۵۶-۶۳.
- ۷- شرکت آب و فاضلاب استان تهران، سال‌های مختلف، عملکرد سیستم آب بهای و تعهدات آب و فاضلاب استان تهران، امور خدمات رایانه‌ای مشترکان.
- ۸- شرکت آب و فاضلاب استان تهران، (۱۳۷۴)، عملکرد سیستم آب بها از سال ۱۳۴۷ نهایت ۱۳۷۲، امور خدمات ماشینی.
- ۹- شرکت آب و فاضلاب استان تهران، ۱۳۸۳، دومین کتاب طلایی صنعت آب و فاضلاب/ایران، تهران، انتشارات آساحور.
- ۱۰- گوشه سیامک، (۱۳۸۲)، تخمین تقاضای کوتاه‌مدت آب شهری با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.
- ۱۱- مرکز آمار ایران، سال‌های مختلف، سال‌نامه‌های آماری کشور.
- ۱۲- مرکز آمار ایران، سال‌های مختلف، نتایج تفصیلی آمارگیری از هزینه و درآمد خانوارها.
- ۱۳- وزارت نیرو، (۱۳۸۰)، کارنامه شرکت آب و فاضلاب استان تهران، معاونت برنامه‌ریزی و بهبود مدیریت.
- 14- Abdel – Al ,R.E., (2006), "Modeling and Forecasting Electric daily peak Loads Using Abductive Networks", *Electrical Power and Energy Systems* 28:133-141.
- 15- Al – Saba , T., El – Amin , I., (1999), "Artificial Neural Networks as Applied to Long – term Demand Forecasting" , *Artificial Intelligence in Engineering* , 13: 189 -197.
- 16- Al – Qunaibet , H .M , Johnston , Richard. S (1985), "Municipal Water demand for Water in Kuwait : Methodological Issue an Empirical Results" , *Water Resources Research* 21(4) : 433 – 438.
- 17- Amanifard, N., Nariman-Zadeh, N., Borji, M., Khalkhali, A., Habibdoust, A.,(2008) "Modelling and Pareto Optimization of

- Heat Transfer and Flow Coefficients in Microchannels Using GMDH type Neural Networks and Genetic Algorithms", *Energy Conversion and Management*, 49(2): 311 – 325.
- 18- Atashkari, K. Nariman-Zadeh, N. Gölcü, M. Khalkhali, A., Jamali, A. (2007) "Modelling and Multi-objective Optimization of a Variable Valve-timing Spark-ignition Engine Using Polynomial Neural Networks and Evolutionary Algorithms", *Energy Conversion and Management*, 48 (3):1029-1041.
 - 19- Cochran, Richard., Cotton, Arthur. W.,(1985), "Municipal Water demand for Water Study", *Oklahoma City and Tulsa, Oklahoma, Water Resources Research*, 21(7) : 941 – 943.
 - 20- Foster, Henry.S., Beattie, Bruce.R.,(1979), "Urban Residential Demand for Water in the United States, *Land Economics*" , 55 (1):43 – 58.
 - 21- Gaudin, Sylvestre., et al (2001), "Demand Specification for Municipal Water Management: Evaluation of the Stone-Geary Form", *Land Economics*, 77(3): 399 – 422.
 - 22- Jain, Ashu., et al.(2001), "Short – term Water demand Forecast Modelling at IIT Kanpur Using Artificial Neural Networks", *Water Resources Management* 15, 299-321.
 - 23- Lio, J., Hubert, H. G. Savenije., XU, J., (2003) , "Forecasting of Water demand in Weinan City in China Using WDF – ANN Model" , *Physics and Chemistry of the Earth* , 28, 219 – 224.
 - 24- Martinez-Espineira, Roberto (2007), "An Estimation of Residential Water demand Using Co-Integration and Error Correction Techniques", *Applied Economics*, 1 : 161 – 184.
 - 25- Martinez – Espineira , Roberto., Nauges, Celine., (2004), Is All Domestic Water Consumption Sensitive to Price Control, *Applied Economics*, 36: 1697-1703.
 - 26- Mazzanti, Massimiliano., Montini, Anna.,(2006), "The Determination of Residential Water demand : Empirical Evidence for a Panel of Italian Municipalities", *Applied Economics Letters*, 13: 107-111.
 - 27- Moncur, James.E.T.,(1987), "Urban Water Pricing and Drought Management", *Water Resources Research*, 23 (3) : 393 – 398.
 - 28- Nariman-zadeh, N.; Darvizeh, A.; Darvizeh, M.; Gharababaei, H., (2002), "Modelling of Explosive Cutting Process of Plates Using GMDH-type Neural Network and Singular Value

Decomposition". Journal of Materials Processing Technology, 128 (1-3): 80-87.

- 29- Nieswidomy, Michael. L.,(1992), "Estimating Urban Residential Water demand: Effects of Price Structure", Conservation, and Education, Water Resources Research 28(3) : 609 – 615.
- 30- Wong, S.T. ,(1972), "A Model on Municipal Water demand: A Case Study of Northeastern Illinois", Land Economics, 48: 34-44.

ضمائم

ضمیمه ۱- در مطالعات تجربی، تابع تقاضا به دو صورت قابل استخراج است:

۱- معادلات تقاضای منفرد

در این حالت، تابع تقاضا برای کالا تابعی از قیمت آن کالا، قیمت سایر کالاها و سطح درآمد در نظر گرفته می‌شود که می‌تواند شکل‌های تبعی متفاوتی شامل خطی، لگاریتمی، نیمه لگاریتمی و نمایی و ... داشته باشد. این حالت، انعطاف‌پذیری زیادی دارد و به راحتی می‌توان متغیرهای مؤثر را به الگو اضافه کرد. توابع تقاضایی که بر این اساس برای آب برآورد شده به طور کلی به صورت زیر قابل بیان هستند:

$$Q_W = f(P, I, Z) \quad (1)$$

(Q_W)، مقدار تقاضا برای آب تابعی از قیمت آب (P)، درآمد خانوار (I) و سایر عوامل (Z) (شامل متغیرهای جوی و اقتصادی - اجتماعی) در نظر گرفته شده است. با توجه به این که برای آب جایگزین نزدیکی وجود ندارد، لذا قیمت کالای دیگری به عنوان کالای جایگزین آب در تابع تقاضا وارد نشده است.

۲- معادلات تقاضای سیستمی

در این حالت، ابتدا شکل تابع مطلوبیت را مشخص کرده و سپس به استخراج و تخمین تابع تقاضا پرداخته می‌شود. از اولین مطالعات انجام شده در این زمینه، سیستم مخارج خطی^۱ ارائه شده توسط استون (۱۹۵۴) است، که از تابع مطلوبیت استون - گری^۲ قابل استخراج است. تابع مطلوبیت استون - گری تابعی جمع‌پذیر بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$U(x) = \prod_{i=1}^n (x_i - \alpha_i)^{\beta_i} \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

محدودیت‌های تابع عبارتند از:

$$0 < \beta_i < 1$$

$$X_i > \alpha_i$$

$$\sum_{i=1}^n \beta_i = 1$$

1 - Linear Expenditure System (LES)

2 - Ston - Geary

در معادله (۲)، X_i ، میزان مصرف کالای i ام، α_i ، حداقل مورد نیاز کالای i ام و β_i ، سهم نهایی کالای i ام در تابع مطلوبیت است. به منظور استخراج تابع تقاضا برای آب، معمولاً سایر کالاها به عنوان یک کالای مرکب (Z) در نظر گرفته می‌شوند.

در این حالت، تابع مطلوبیت (بعد از لگاریتم‌گیری) به صورت زیر قابل تعریف است:

$$\ln(U) = \beta_w \ln(Q_w - \alpha_w) + \beta_z \ln(Q_z - \alpha_z) \quad (3)$$

بعد از حداکثر کردن تابع مطلوبیت نسبت به قید بودجه، در نهایت تابع تقاضا برای آب به صورت زیر استخراج می‌شود:

$$Q_w = \theta_1 + \theta_2 \frac{I}{P_w} + \theta_3 \frac{P_z}{P_w} \quad (4)$$

که در این معادله،

$$\theta_1 = (1 - \beta_w)\alpha_w, \quad \theta_2 = \beta_w, \quad \theta_3 = (1 + \beta_z)\alpha_z$$

لازم به ذکر است که در اکثر مطالعاتی که در زمینه تقاضای آب انجام شده، رویکرد اول به منظور استخراج تابع تقاضا مورد استفاده قرار گرفته است. اما تعدادی از مطالعات به منظور استخراج تابع تقاضا برای آب، از تابع مطلوبیت استون - گری استفاده کرده‌اند، که می‌توان به مطالعات شرزهای و کلاهی (۱۳۷۵)، پژویان و حسینی (۱۳۸۲) و (Al - Qunaibet, H. M., Johnston, Richard. S (1985)) اشاره کرد.

ضمیمه ۲- نتایج آزمون دیکی فولر تعمیم یافته و آزمون پرون (بررسی مانایی و نامانایی سری زمانی لگاریتم طبیعی تقاضای آب)

جدول ۱- نتایج آزمون پرون

Phillips-Perron Unit Root Test on LWD

Null Hypothesis: LWD has a unit root Exogenous: Constant, Linear Trend Bandwidth: 0 (Newey-West using Bartlett kernel)		
	Adj. t-Stat	Prob.*
Phillips-Perron test statistic	-3.277010	0.0908
Test critical values:		
1% level	-4.323979	
5% level	-3.580623	
10% level	-3.225334	

جدول ۲- نتایج آزمون دیکی فولر تعمیم یافته

Augmented Dickey-Fuller Unit Root Test on LWD

Null Hypothesis: LWD has a unit root Exogenous: Constant, Linear Trend Lag Length: 0 (Automatic based on SIC, MAXLAG=3)		
	t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-3.277010	0.0908
Test critical values: 1% level	-4.323979	
5% level	-3.580623	
10% level	-3.225334	

جدول ۳- مقایسه مقادیر واقعی و پیش بینی شده تقاضای آب با استفاده از الگوی ARIMA

سال	مقادیر واقعی (WD)	مقادیر پیش‌بینی (WD)	درصد خطا
1379	۲۱۳/۷۱	۲۱۴/۳۵	۰/۳
1380	۲۰۹/۳۸۷۷	۲۱۵/۴۴	۲/۹
1381	۲۲۹/۰۰۶۵	۲۱۴/۹۶	۶/۱
1382	۲۴۲/۹۴۳۷	۲۲۷/۳۵	۶/۴
1383	۲۷۲/۳۳۷۴	۲۳۶/۶۱	۱۳/۱۲

جدول ۴- مقایسه مقادیر واقعی و پیش بینی شده تقاضای آب با استفاده از شبکه عصبی GMDH

سال	مقادیر واقعی (WD)	مقادیر پیش‌بینی (WD)	درصد خطا
۱۳۷۹	۲۱۳/۷۱	۲۱۰/۲۸۸۵	۱/۶
۱۳۸۰	۲۰۹/۳۹	۲۱۰/۹۸۸۸	۰/۷۶
۱۳۸۱	۲۲۹/۰۱	۲۳۴/۳۸۴۱	۲/۳
۱۳۸۲	۲۴۲/۹۴	۲۴۹/۸۰۹۵	۲/۸
۱۳۸۳	۲۷۲/۳۴	۲۶۸/۲۱۶۹	۱/۵