

# Accurate Allocation of the Water Demand to the Water Pipe Network Simulation Model

M. Noori Mohammadi<sup>1</sup>, B. Ghahraman<sup>2</sup>, K. Davari<sup>3</sup>

1. PhD Student, Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2. Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran  
(Corresponding Author) [bijangh@um.ac.ir](mailto:bijangh@um.ac.ir)
3. Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(Received May 26, 2018 Accepted Nov. 25, 2018)

#### To cite this article:

Noori Mohammadi, M., Ghahraman, B., Davari, K., 2019, "Accurate allocation of the water demand to the water pipe network simulation model." Journal of Water and Wastewater, 30(5), 61-74.  
Doi: 10.22093/wwj.2018.127043.2666. (In Persian)

## Abstract

The process of spatially allocating the water demand is a potential source of errors that should be considered when building the hydraulic simulation model. There are several methods for this purpose and each has limitations and advantages. In the case of existing accurate recording of coordinates for water meters in GIS, there are several base demand automated allocation strategies for modeling the spatial distribution of water consumption in water networks. Where the spatial data for water meters is not available, conventional methods such as Thiessen and LDM (Length Dependent Method) can be used. If this data is incomplete mixed practices can be used. This study proposed a mixed method named SAWDSL (Spatial Allocation of the Water Demand based on Data of Consumers) that divides the total consumption in subgroups related with corresponding recorded water meters. This method assigns the demand of each subgroup into the nearest pipe. The simulation results of WaterGEMS software using SAWDSL, Thiessen and LDM methods, after calibration, were compared to field measurements in zone II of Mashhad city. RMSE between observed and simulated pressure with the SAWDSL, Thiessen and LDM methods was determined to be 0.9, 2.3 and 1.4 respectively. That shows, if the incomplete data of water meters exists and there is enough time to use them, SAWDSL method is more accurate than others. Otherwise LDM method is more accurate than Thiessen method.

**Keywords:** Water Demand Allocation, Water Pipe Networks, Hydraulic Simulation Model.

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۰، شماره ۵، صفحه: ۶۱-۷۴

## بررسی امکان افزایش دقت تخصیص نیاز آبی در تهیه مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه آب

مجید نوری محمدیه<sup>۱</sup>، بیژن قهرمان<sup>۲</sup>، کامران داوری<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکترا، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی،

دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاده، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی،

دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(نویسنده مسئول) [bijangh@um.ac.ir](mailto:bijangh@um.ac.ir)

۳- استاده، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی،

دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(دریافت ۹۷/۳/۵ پذیرش ۹۷/۹/۴)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

نوری محمدیه، م، قهرمان، ب، داوری، ک، ۱۳۹۸، "بررسی امکان افزایش دقت تخصیص نیاز آبی در تهیه مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه آب" مجله آب و فاضلاب، ۳۰(۵)، ۶۱-۷۴. Doi: 10.22093/wwj.2019.127043.2666

### چکیده

تخمین نیاز آبی یکی از عوامل اساسی ایجاد خطا حین تهیه مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه آب است. روش‌های مختلفی برای این منظور وجود دارد که هر کدام محدودیت‌ها و مزایایی دارند. اگر اطلاعات GIS مصرف مشترکان موجود نباشد، می‌توان از روش‌های معمول مانند تیسن یا روش توزیع نیاز آبی بر اساس طول لوله در تخمین نیاز آبی شبکه استفاده کرد و اگر این اطلاعات ناقص باشد، می‌توان از روش‌های ترکیبی بهره برد. در این پژوهش روش ترکیبی SAWDDC برای تخصیص مکانی نیاز آبی شبکه با استفاده از اطلاعات اکسلی مصرف مشترکان پیشنهاد شد که در آن، مصارف بر اساس آدرس، گروه‌بندی شده و مصارف هر گروه به نزدیک‌ترین لوله اختصاص یافت. نتایج شبیه‌سازی مدل WaterGEMS با استفاده از این روش و روش‌های تیسن و LDM پس از واسنجی، با مقدار اندازه‌گیری شده در شبکه توزیع آب پهنه II شهر مشهد مقایسه شد. مقدار RMSE بین مقدار اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده فشار در روش‌های تیسن، SAWDDC و LDM به ترتیب ۲/۳، ۹/۰ و ۱/۴ تعیین شد که نشان می‌دهد در صورت وجود اطلاعات ناقص مصرف مشترکان و زمان کافی برای استفاده از آنها، روش SAWDDC دقت شبیه‌سازی را افزایش می‌دهد و اگر این اطلاعات موجود نباشد، روش LDM از روش تیسن دقیق‌تر است.

**واژه‌های کلیدی:** تخصیص نیاز آبی، شبکه توزیع آب، مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی

### ۱- مقدمه

اختیار مصرف کننده قرار دهد، از اهمیت زیادی برخوردار است. برای طراحی شبکه توزیع آب در یک منطقه جدید یا اصلاح و توسعه یک شبکه توزیع قدیمی نیاز به مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی نسبتاً دقیق و منطبق با واقعیت است. تهیه مدلی که دقیق و واسنجی شده و منطبق با واقعیت باشد تقریباً غیرممکن است (Walski, 2000).

نرم‌افزارهای مختلفی برای طراحی و مدل‌سازی شبکه‌های

یک سیستم شبکه توزیع آب شامل لوله‌ها، گره‌های مشخص‌کننده محل اتصال لوله‌ها، مخازن ذخیره آب، پمپ‌ها، شیرآلات و لوازم جانبی سیستم مانند شیرهای قطع و وصل و فشارشکن است (Mohapatra et al., 2012). معمولاً ۴۰ تا ۷۰ درصد هزینه‌های پروژه‌های آبرسانی مربوط به احداث شبکه لوله‌ها است (Roy et al., 2015). به همین دلیل طراحی شبکه توزیع آبی که هم صرفه اقتصادی داشته باشد و هم آب را به مقدار و فشار مناسب در

در تهیه یک مدل هیدرولیکی معمولاً با کمبودها و محدودیت‌هایی همراه است. از آنجا که نیاز آبی شبکه توزیع حین مدل‌سازی، نیروی محرک جریان در شبکه‌های توزیع آب است، تخمین دقیق آن، در دقت مدل نقش حیاتی دارد. معمولاً اگر هیچ اطلاعاتی از مصرف مشترکان وجود نداشته باشد، بخشی از جمعیت به هر یک از گره‌های شبکه اختصاص می‌یابد و با ضرب آن در سرانه مصرف آب منطقه، نیاز آبی گره‌های شبکه تعیین می‌شود (Walski et al., 2003). در این پژوهش نیز به دلیل سهولت و کاربرد زیاد از این روش با نام روش تیسن<sup>3</sup> استفاده شده است.

یکی از روش‌های دیگری که در شرایط فقدان اطلاعات مصرفی مشترکان استفاده می‌شود و در بخش محاسبه نیاز آبی با روش تیسن مشترک است ولی در توزیع آن در سطح شبکه با این روش تفاوت دارد، روشی است که در آن نیاز آبی کل بر اساس طول لوله، در سطح شبکه توزیع می‌شود که در این پژوهش به اختصار روش LDM<sup>4</sup> نامیده شده است.

در غیر این صورت به تناسب دسترسی به اطلاعات مورد نیاز، روش‌های مختلفی برای تخصیص مکانی نیاز آبی در سطح شبکه وجود دارد. به عنوان مثال در پژوهشی، نیاز آبی شبکه با استفاده از هزینه صورت حساب‌های پرداختی مشترکان و مختصات UTM<sup>5</sup> بازیابی شد (Basford and Sevier, 1995). در حالی که میچل در سال ۱۹۹۹ از آمار جمعیت و تراکم خانه‌ها برای توزیع نیاز آبی در بین گره‌های شبکه بهره برد (Mitchell, 1999). دیویس و برآون در سال ۲۰۰۰ یک ابزار داخلی برای تخصیص نیاز آبی گره‌های شبکه تهیه کردند و آن را DALLOC نامیدند (Davis and Brawn, 2000).

سه روش بالا هر یک برای پروژه و شرایط خاص خود نتایج خوبی نشان دادند ولی کاربرد آنها در شرایط و پروژه‌های دیگر نتایج قابل قبولی ارائه نکرده است (Wu et al., 2003).

در شرایطی که اطلاعات ثبت شده کاملاً در محیط GIS از مصرف مشترکان وجود داشته باشد، روش‌های مختلفی برای تخصیص خودکار نیاز آبی شبکه با ابزارهای GIS وجود دارد که تفاوت آنها در نحوه تخصیص مقادیر مصرف در فایل GIS به گره‌ها

توزیع آب استفاده می‌شوند که شامل نرم‌افزارهای عمومی مانند EPANET، Branch و Loop و نرم‌افزارهای تجاری مانند Aquis، H<sub>2</sub>Omap، KYPipe، WaterCAD و WaterGEMS هستند. این نرم‌افزارها از جنبه‌های مختلف از جمله قابلیت‌ها، ارتباط و سازگاری با سایر نرم‌افزارها، اطلاعات مورد نیاز، قابلیت ارتباط گرافیکی با کاربر<sup>1</sup>، الگوریتم‌های بهینه‌سازی، زبان‌ها و برنامه‌هایی که با آن نوشته شده‌اند، با هم متفاوت‌اند. در ادامه به بعضی از پژوهش‌هایی که از این نرم‌افزارها استفاده کرده‌اند اشاره می‌شود.

نرم‌افزار Loop برای تحلیل شبکه آب شهر تامپل نادوی هند استفاده شد و نتایج تحلیل با آن، مفید ارزیابی شد (Sumithra and Amaranath, 2013).

نرم‌افزار EPANET برای طراحی و بررسی شبکه آب شهر پنجاب هند استفاده شد و مقایسه نتایج این مدل با مقدار اندازه‌گیری شده نشان از دقت کافی این مدل داشت (Gupta et al., 2013).

از WaterCAD برای تحلیل و بررسی شبکه آب شهر تانتای مصر استفاده شد و استفاده از ابزارهای مختلف این نرم‌افزار در طراحی و بهینه‌سازی شبکه مفید ارزیابی شد (Elsheikh et al., 2013).

نرم‌افزار WaterGEMS نسخه پیشرفته نرم‌افزار WaterCAD است که توسط شرکت بنتلی<sup>2</sup> ارائه شده است. برجسته‌ترین ویژگی نرم‌افزار WaterGEMS قابلیت نمایش نتایج با ابزارهای گرافیکی مختلف مانند استفاده از قابلیت‌های ArcMap، نقشه‌های شماتیک با قابلیت رنگ‌بندی، ترسیم خطوط کننتور و پروفیل است که همراه با دقت باعث جذابیت و افزایش روزافزون کاربران آن شده است (Sonaje and Joshi, 2015). در ایران نیز این نرم‌افزار بیشترین کاربرد را در تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های توزیع، بین کارشناسان دارد. پژوهش‌های مختلفی توانایی نرم‌افزار WaterGEMS را در تحلیل هیدرولیکی شبکه تأیید کرده‌اند (Mukherjee et al., 2015).

(Nazari and Meisami, 2008, Roy et al., 2015)

تهیه یک مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی علاوه بر اطلاعات توپوگرافی منطقه و خصوصیات ظاهری اجزای شبکه، به اطلاعات نیاز آبی در گره‌های شبکه هم نیاز دارد که جمع‌آوری همه این موارد

<sup>3</sup> Thiessen Polygons

<sup>4</sup> Length Dependent Method (LDM)

<sup>5</sup> Universal Transverse Mercator (UTM)

<sup>1</sup> Graphical User Interfaces

<sup>2</sup> Bentley

تله‌متری و اتاق کنترل شبکه، عدم دسترسی آزاد و رایگان به اطلاعات، هزینه زیاد بررسی‌های شبکه، تمایل به روش‌های ساده و احتمالاً کم دقت، با کمبودها و محدودیت‌هایی روبرو است. این کمبودها و محدودیت‌ها این سوال را به ذهن می‌رساند که در نهایت کدام روش بیشترین نسبت سود به هزینه را دارد یا به عبارت دیگر کدام روش با امکانات موجود و حداقل وقت و هزینه باعث بیشترین دقت شبیه‌سازی می‌شود.

در این پژوهش علاوه بر روش‌های ساده و پرکاربردی مانند تیسسن و LDM، روشی پیشنهاد شد که حداکثر استفاده را از اطلاعات موجود برای افزایش دقت مدل‌سازی داشته باشد. روش حاضر در این پژوهش SAWDDC<sup>۶</sup> نامیده شد. در این روش اطلاعات مکانی مصرف مشتریان وجود نداشت و تنها اطلاعات در دسترس گزارش‌های اکسل مصرف مشتریان بود بنابراین با گروه‌بندی اطلاعات برای هر کوچه و خیابان بر اساس آدرس و اختصاص مجموع مصرف ثبت شده هر گروه به نقاط مصرفی مربوط به آن آدرس در محیط GIS، فایل ساده شده مکانی مصرف مشتریان تشکیل شد. سپس با استفاده از ابزار تخصیص نیاز آبی<sup>۷</sup> در مدل WaterGEMS و دو گزینه نزدیک‌ترین لوله<sup>۸</sup> و طول واحد<sup>۹</sup> ابتدا مقدار مصرف به نزدیک‌ترین لوله اختصاص یافت و سپس مقدار تلفات اندازه‌گیری شده به هر یک از لوله‌ها اضافه شد و نتایج شبیه‌سازی با این روش، روش تیسسن و LDM پس از واسنجی با مقدار اندازه‌گیری شده در شبکه توزیع آب پهنه II شهر مشهد مقایسه شد. اهداف این پژوهش را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

(۱) مقایسه نتایج تخصیص نیاز آبی به گره‌های شبکه با روش‌های معمولی مانند تیسسن و LDM (روش‌های بدون نیاز به اطلاعات مصرف مشتریان) و روش SAWDDC که از اطلاعات مصرف مشتریان برای این منظور استفاده می‌کند.

(۲) نمایش مراحل و مشکلات استفاده از روش‌های مختلف تخمین نیاز آبی در شهری مانند مشهد.

(۳) مقایسه نتایج هر سه روش با مقدار اندازه‌گیری شده و تعیین دقت هر روش.

و یا لوله‌های شبکه است به‌عنوان مثال در روش تخصیص مقدار اندازه‌گیری شده<sup>۱</sup>، مقدار اندازه‌گیری شده مصرف مشترکان با توجه به موقعیت مکانی به نزدیک‌ترین گره شبکه اختصاص می‌یابد و یا در روش تجمیع مقدار اندازه‌گیری شده<sup>۲</sup>، همه مقادیر اندازه‌گیری شده مصرف مشترکان که در چند ضلعی<sup>۳</sup> مربوط به یک گره مصرف قرار می‌گیرند به آن گره اختصاص می‌یابند (Basford and Sevier, 1995).

در نرم‌افزار WaterGEMS نیز گزینه‌های مشابهی وجود دارد که در صورت وجود اطلاعات GIS مصرف مشترکان می‌توان از آنها برای تخمین نیاز آبی استفاده کرد مانند تجمیع مقادیر اندازه‌گیری شده، نزدیک‌ترین لوله<sup>۴</sup> و نزدیک‌ترین گره<sup>۵</sup>. در روش نزدیک‌ترین لوله و نزدیک‌ترین گره، مقدار مصرف آب با توجه به موقعیت مکانی در فایل GIS به ترتیب به نزدیک‌ترین لوله و یا نزدیک‌ترین گره اختصاص داده می‌شود (Sonaje and Joshi, 2015).

با توجه به ابزارهای متنوع و قابلیت‌های نرم‌افزار WaterGEMS در تخمین نیاز آبی، از این مدل در این پژوهش استفاده شد.

در کشورهای در حال توسعه که اطلاعات مکانی مصرف ناقص ثبت می‌شود و یا اصلاً وجود ندارد، باید از روشی ترکیبی استفاده کرد. در شهر کاس در یونان به دلیل فقدان سیستم تله‌متری و اطلاعات GIS، از روشی ترکیبی برای تخمین نیاز آبی شبکه استفاده شد و در آن با گروه‌بندی مشتریان در دو دسته اصلی پرمصرف و کم مصرف و با روشی خاص برای هر گروه، از اطلاعات آنها برای تخمین نیاز آبی شبکه استفاده شد. روش ترکیبی مذکور نسبت به روش تیسسن نیاز آبی را در مرکز شهر ۲ درصد کمتر و در حاشیه شهر، بیشتر تخمین زد (Kanakoudis and Gonelas, 2015).

روش‌های مختلف تخمین نیاز آبی شبکه در ایران به دلایلی نظیر نقص اطلاعات مصرف مشترکان از جمله عدم قرائت صحیح کنتورها، خرابی کنتورها، خطای انسانی، فقدان داده‌های مختصات مکانی کنتورها، عدم بروزرسانی بموقع اطلاعات و نقص سیستم

<sup>6</sup> Spatial Allocation of the Water Demand based on Data of Consumers (SAWDDC)  
<sup>7</sup> LoadBuilder  
<sup>8</sup> Nearest Pipe  
<sup>9</sup> Unit Line

<sup>1</sup> Billing Meter Assignment  
<sup>2</sup> Billing Meter Aggregation  
<sup>3</sup> Polygon  
<sup>4</sup> Nearest Pipe  
<sup>5</sup> Nearest Node



## ۲- مواد و روش‌ها

در تقسیم‌بندی آب و فاضلاب مشهد، پهنه II یکی از نواحی ۱۸ گانه مشهد در تأمین آب مشترکان است. این پهنه در قسمت جنوبی مشهد واقع شده است که مساحتی بالغ بر ۸۵۰ هکتار را شامل می‌شود.

آب مورد نیاز پهنه II از مخزن منطقه ۴ آب و فاضلاب مشهد به مخزن ۱۰۰۰۰ مترمکعبی این پهنه پمپاژ شده و در آن ذخیره شده و به صورت ثقلی به شبکه توزیع آب پهنه وارد می‌شود. این پهنه از شهر مشهد در حال حاضر ۴۹۹۵۸ نفر جمعیت، ۱۷۴۸۹ انشعاب آب، حدود ۷۶ کیلومتر شبکه و ۱۳ عدد شیر فشارشکن دارد. در جدول ۱ خصوصیات لوله‌های شبکه توزیع منطقه طرح نشان داده شده است که در ستون مشخصات لوله این جدول، قطر لوله به همراه مخفف جنس آن ذکر شده است.

## جدول ۱- ویژگی‌های لوله‌های موجود شبکه توزیع آب پهنه II

Table 1. The characteristics of the existing pipe in II water distribution system

Row	Length (m)	Pipe diameter-material
1	6805	100 AC <sup>1</sup>
2	1545	100DI <sup>2</sup>
3	5570	110 PE <sup>3</sup>
4	5606	150AC
5	3435	150 DI
6	4738	200 AC
7	2412	200 DI
8	156	200 ST <sup>4</sup>
9	590	250 AC
10	1162	250 DI
11	518	300 AC
12	2281	300 DI
13	1755	400 DI
14	22495	63 PE
15	149	80 AC
16	16444	90 PE
Sum	75661	

<sup>1</sup> Asbestos Cement (AC)

<sup>2</sup> Ductile Iron

<sup>3</sup> Polyethylene (PE)

<sup>4</sup> Stainless Steel (ST)

## ۱-۲- تعیین نرخ تلفات شبکه

یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در هیدرولیک جریان شبکه و نیاز آبی آن، نرخ تلفات آب در سطح شبکه است. کل جریان ورودی به شبکه توزیع آب شهری به دست مشترکان نمی‌رسد و در بین راه بخشی از آن به دلایلی مانند نشت آب از اتصالات و شیرآلات و ترکیدگی لوله‌ها تلف می‌شود.

جریان هیدرولیکی در لوله‌های شبکه توزیع در حالت واقعی هم شامل آب مصرفی مشترکان و هم تلفات آب می‌شود. نرخ تلفات آب برابر اختلاف آب ورودی به شبکه و آب مصرفی توسط مشترکان است.

برای تعیین نرخ تلفات در این پژوهش همزمان با قرائت کنتورهای مشترکان در یک دوره دوماهه (دوره ۳ سال ۹۴)، حجم تجمعی آب ورودی به شبکه در لوله اصلی با استفاده از کنتور حجمی الکترومغناطیسی نصب شده روی آن ثبت و درصد تلفات ۳۲/۲ درصد محاسبه شد. پس از انجام بازدیدهای مستمر از منطقه مورد بررسی، برداشت اطلاعات شبکه، خصوصیات جریان، رقوم ارتفاعی و وضعیت دقیق شیرآلات شبکه و بهره‌گیری از نقشه‌های همچون ساخت شبکه مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه با استفاده از این اطلاعات و به کمک نرم‌افزار WaterGEMS v8i تهیه شد. پس از وارد کردن اطلاعات ذکر شده، تنها عامل ورودی مهم و مورد نیاز، تخصیص نیاز آبی شبکه بود که به سه روش SAWDDC، تیسسن و LDM به مدل وارد شد.

## ۲-۲- تخصیص نیاز آبی به روش تیسسن

در این روش ابتدا نیاز آبی کل افراد ساکن منطقه با استفاده از مبانی طراحی شبکه در نشریه ۳-۱۱۷ معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری محاسبه شد (Tabesh, 2013).

در شکل ۱ محدوده مورد بررسی به ۵ بخش تراکمی با ضرایب وزنی (۰.۴، ۰.۳، ۰.۲، ۰.۱/۵، ۰/۵) تقسیم شد و بر مبنای این ضرایب، نیاز آبی کل در سطح شبکه توزیع شد.

برای این منظور با استفاده از روش پلیگون بندی تیسسن، به هر یک از گره‌های شبکه، مساحتی از منطقه تحت پوشش شبکه اختصاص یافت. سپس توسط ابزار تخصیص نیاز آبی و استفاده از تراکم جمعیت، پلیگون تیسسن و مصرف سرانه، نیاز آبی هر گره تعیین شد.

توجه به اینکه استفاده از اطلاعات قرائت کنتور مشترکان در ابزار تخصیص نیاز آبی مدل WaterGEMS تنها از طریق فرمت GIS امکان پذیر است، بنابراین با گروه بندی اطلاعات مصارف در فایل Excel بر اساس آدرس، مجموع مصارف به ۲۶۶ گروه تقسیم شد و مصرف هر گروه به نقطه متناظر با آن در محیط GIS اختصاص یافت و فایل ساده شده نقاط مصرف مشترکان در این نرم افزار تهیه شد. سپس با استفاده از گزینه نزدیک ترین لوله در ابزار تخصیص نیاز آبی، مقدار مصرف هر نقطه به نزدیک ترین لوله اختصاص یافت. در بخش بعد تلفات محاسبه شده در کل شبکه با استفاده از گزینه طول واحد در ابزار تخصیص نیاز آبی و بر اساس مصرف هر لوله به آن اضافه شد. مراحل این روش در شکل ۲ نشان داده شده است.

#### ۲-۵- واسنجی مدل هیدرولیکی

برای واسنجی و صحت سنجی مدل هیدرولیکی در مرداد ماه (پیک مصرف) در دو نوبت فشار آب در ۱۰ نقطه مجزا در سطح شبکه و در ساعت پیک مصرف با استفاده از فشارسنج پرتابل اندازه گیری شد.

شکل ۳ موقعیت نقاط اندازه گیری مشخصات جریان در سطح شبکه را نشان می دهد. همچنین برای مشخص شدن تغییرات جریان و برداشت اطلاعات دبی سنجی مورد نیاز در عملیات واسنجی، به مدت ۲۴ ساعت تغییرات دبی جریان در ۶ نقطه در سطح شبکه با استفاده از فلومتر اولتراسونیک پرتابل Xonic 100-P با خطای  $\pm 0/5$  درصد اندازه گیری شد.

مقایر دبی سنجی در این ۶ نقطه در شکل ۴ مشخص شده است. همچنین جدول ۲ حداکثر و میانگین جریان در این ۶ نقطه را نشان می دهد.

به منظور واسنجی مدل هیدرولیکی در هر یک از روش های تیسسن، LDM و SAWDDC از ابزار Darwin Calibrator مدل WaterGEMS استفاده شد. این ابزار به سهولت فرایند واسنجی شبکه را به شکل دستی و یا الگوریتم ژنتیک مهیا می کند. عملیات واسنجی بر اساس حداقل کردن اختلاف بین مقدار اندازه گیری شده دبی و فشار با مقدار شبیه سازی شده بر اساس معادله ۱ انجام شد. طی عملیات واسنجی، با تعدیل خصوصیات جریان (مانند نرخ



Fig. 1. Distribution of population density in the Thiessen method

شکل ۱- توزیع تراکم جمعیت در روش تیسسن

#### ۲-۳- تخصیص نیاز آبی به روش LDM

در این روش مشابه روش تیسسن، نیاز آبی کل شبکه بر اساس جمعیت و مصرف سرانه محاسبه شد. سپس نیاز آبی کل شبکه بر اساس طول لوله در سطح شبکه توزیع شد. برای این منظور ابتدا لیست لوله های شبکه از نرم افزار WaterGEMS دریافت و وارد نرم افزار Excel شد و بر اساس طول هر لوله نسبت به طول کل شبکه، بخشی از نیاز آبی کل به گره انتهایی آن لوله اختصاص یافت. اطلاعات نیاز آبی محاسبه شده برای گره های شبکه در این روش با استفاده از ابزار Demand Control Center وارد مدل WaterGEMS شد.

#### ۲-۴- تخصیص نیاز آبی به روش SAWDDC

اطلاعات مصارف ۱۷۴۸۹ مشترک دوره ۳ سال ۹۴ پهنه II شهر مشهد (مصارف ثبت شده توسط کنتور خانگی مشترکان) از امور مشترکان آب و فاضلاب مشهد دریافت شد و پس از ویرایش و حذف اطلاعات ناقص، با کمک ماموران قرائت کنتور بررسی شد. در نهایت گزارشی در فرمت Excel از این اطلاعات تهیه شد. با

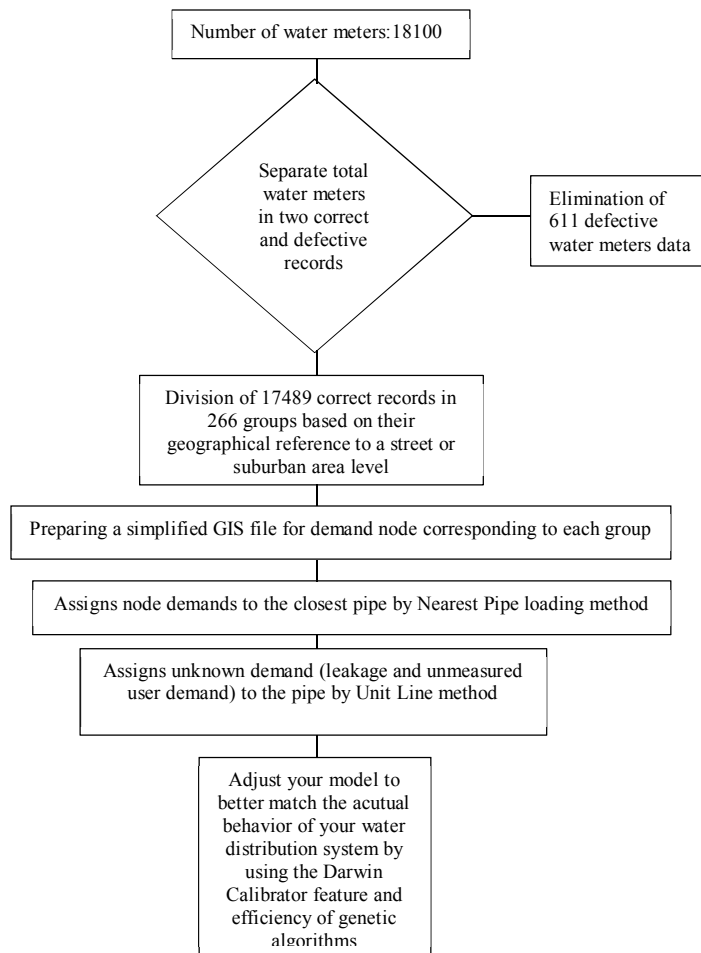


Fig. 2. Flowchart of the SAWDDC method  
شکل ۲- فلوجارت روش SAWDDC



Fig. 3. Location of observed pressure and flow rate in I1 water distribution network  
شکل ۳- موقعیت نقاط اندازه‌گیری فشار و جریان در سطح شبکه I1

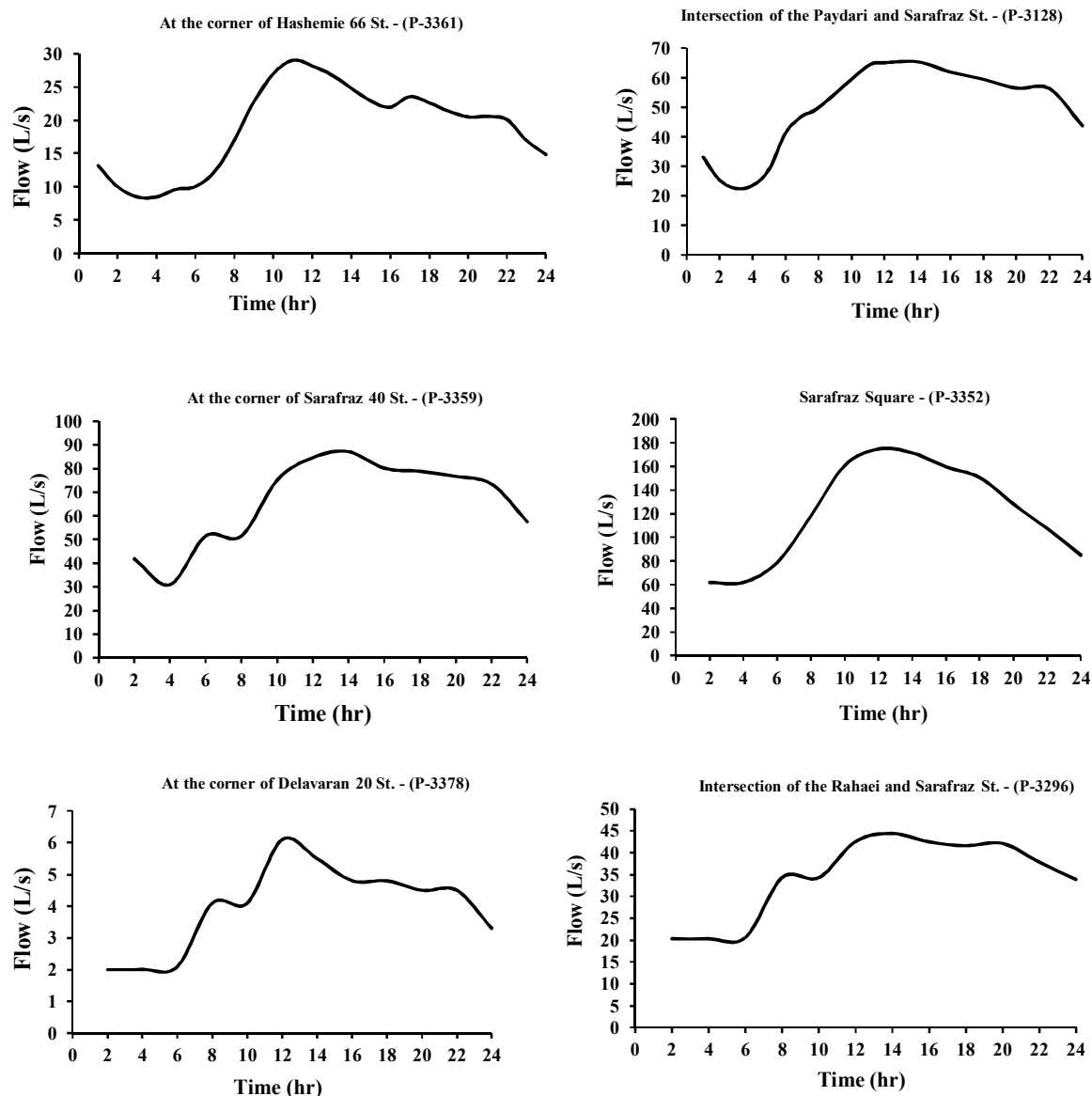


Fig. 4. Observed flow rate at 6 nodes level over the water network

شکل ۴- تغییرات اندازه‌گیری شده دبی جریان در ۶ نقطه در سطح شبکه

جدول ۲- موقعیت و مقدار دبی جریان در ۶ نقطه در سطح شبکه

Table 2. Location and flow rate at 6 points of the water network

Location	Max flow (L/s)	Mean flow (L/s)
1 Sarafraz Square - (P-3352)	174.7	121.6
2 At the corner of Sarafraz 40 St. - (P-3359)	87.2	65.8
3 Intersection of Paydari and Sarafraz St. - (P-3128)	65.4	46.5
4 Intersection of Rahaei and Sarafraz St. - (P-3296)	44.4	34.6
5 At the corner of Delavaran 20 St. - (P-3378)	6.1	4
6 At the corner of Hashemie 66 St. - (P-3361)	29	18.9



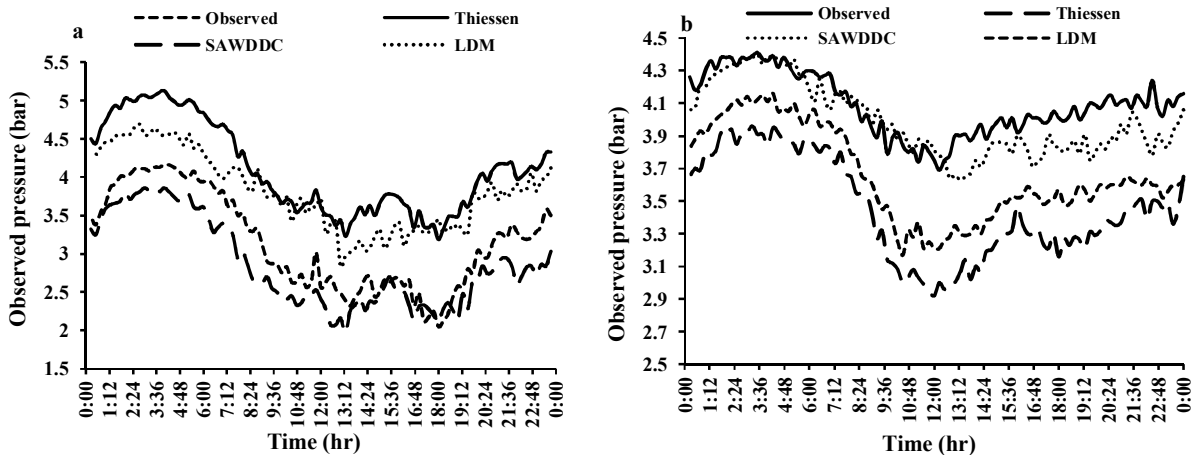


Fig. 5. Observed and simulated pressures in both Rahaei 11(a) and Hashemie 85 St. (b)

شکل ۵- فشار اندازه گیری شده و شبیه سازی شده در خیابان رهاهی ۱۱ (a) و هاشمیه ۸۵ (b)

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی نتایج شبیه سازی در بازه زمانی ۲۴ ساعته

با استفاده از قابلیت<sup>۱</sup> EPS تغییرات جریان شبیه سازی شده نسبت به تغییرات نیاز آبی در یک بازه زمانی محاسبه شد. با توجه به تغییرات متنوع نیاز آبی در سطح شبکه به دلیل تغییرات نوع کاربری و عدم امکان اندازه گیری تغییرات همه کنتورهای مشترکان طی شبانه روز، از رژیم تغییرات جریان در کنتور خط اصلی به عنوان رژیم تغییرات نیاز آبی هر یک از روش های SAWDDC، تیسن و LDM استفاده شد و با ضرب این رژیم تغییرات در نیاز آبی تخمینی، نیاز آبی لحظه ای گره ها در هر روش توسط مدل تعیین شد و پس از تحلیل هیدرولیکی، پارامترهای خروجی مانند فشار آب در این بازه زمانی تعیین شد. مقدار فشار شبیه سازی شده و اندازه گیری شده طی ۲۴ ساعت در گره ۱۰۹۸ در تاریخ ۱۹ مردادماه و در گره ۱۰۷ در تاریخ ۲۱ مردادماه در شکل ۵ مورد بررسی قرار گرفت. گره ۱۰۹۸ در احاطه سایر گره های شبکه و مرکز منطقه مسکونی بوده و گره ۱۰۷ در حاشیه شبکه و مجاور اراضی بایر و طبیعی قرار دارد. روش تیسن در گره ۱۰۹۸ که به فاصله کم از سایر گره ها و مرز شبکه قرار دارد، نیاز آبی کمتری را اختصاص می دهد و حین تحلیل هیدرولیکی، فشار آبی بیشتری برای این گره تعیین می شود. در مقابل نتایج این گره، گره ۱۰۷ قرار دارد که با فاصله زیاد از

جریان و تلفات، ضریب زبری لوله) و به کمک الگوریتم ژنتیک، مناسب ترین حالت برای انطباق هیدرولیکی بین مقدار شبیه سازی و اندازه گیری شده تعیین می شود.

$$Y = \frac{\sum_{np=1}^{NH} w_{nh} \left( \frac{Hsim_{nh} - Hobs_{nh}}{Hpnt} \right)^2 + \sum_{nf=1}^{NF} w_{nf} \left( \frac{Fsim_{nf} - Fobs_{nf}}{Fpnt} \right)^2}{NH + NF} \quad (1)$$

که در این معادله

Y تابع هدف عملیات واسنجی، Hobs<sub>nh</sub> مقدار nh ام اندازه گیری شده فشار، Hsim<sub>nh</sub> مقدار nh ام شبیه سازی شده فشار توسط مدل، Fobs<sub>nf</sub> مقدار nf ام اندازه گیری شده جریان، Fsim<sub>nf</sub> مقدار nf ام شبیه سازی شده جریان، HP<sub>nt</sub> مقدار منطبق کننده فشار بین شبیه سازی و اندازه گیری شده، FP<sub>nt</sub> مقدار منطبق کننده دبی بین مقدار شبیه سازی و اندازه گیری شده، NH تعداد مقادیر اندازه گیری شده فشار، NF تعداد مقادیر اندازه گیری شده دبی جریان، W<sub>nh</sub> و W<sub>nf</sub> فاکتور وزنی نرمال کننده برای مقدار فشار و دبی اندازه گیری شده هستند که با معادلات ۲ و ۳ مشخص می شوند

$$W_{nh} = \frac{Hobs_{nh}}{\sum Hobs_{nh}} \quad (2)$$

$$W_{nf} = \frac{Fobs_{nf}}{\sum Fobs_{nf}} \quad (3)$$

<sup>1</sup> Extended Period Simulation (EPS)

همچنین بررسی اختلاف فشار شبیه‌سازی شده در کل گره‌های شبکه در روش‌های تیسسن و LDM با روش SAWDDC نشان‌دهنده اختلاف کمتر روش LDM با روش SAWDDC بود. مقدار RMSE بین مقدار فشار شبیه‌سازی شده در روش SAWDDC با روش‌های تیسسن و LDM در کل گره‌های شبکه به ترتیب  $10/3$  و  $1/9$  تعیین شد که نشان می‌دهد در کل شبکه نیز نتایج روش SAWDDC به روش LDM نزدیک‌تر است و دو روش تیسسن و LDM در کل گره‌های شبکه، فشار آب را به ترتیب  $734$  و  $426$  متر کمتر از روش SAWDDC تخمین زده‌اند.

روش تیسسن در بخش‌هایی از شبکه که گره‌های آن به صورت منظم و با فاصله تقریباً ثابت نسبت به هم و مرز شبکه گسترده شده‌اند، دقت بیشتری داشته و در سایر بخش‌ها از دقت آن کاسته شده است. با توجه به نزدیکی بیشتر نتایج روش SAWDDC به مقدار اندازه‌گیری شده می‌توان نتیجه گرفت که این روش دقت بیشتری نسبت به دو روش دیگر داشته است و دقت روش LDM از روش تیسسن بیشتر بوده است. برخی از عواملی که سبب بروز خطا در روش LDM شده عبارت‌اند از (۱) یکسان در نظر گرفتن توزیع مشترکان نسبت به طول لوله‌های مختلف در محل‌هایی با شرایط مختلف (۲) یکسان در نظر گرفتن مصرف همه مشترکانی که به لوله‌ها متصل شده‌اند (۳) در نظر گرفتن همه لوله‌ها به عنوان لوله توزیع در صورتی که در شبکه خط انتقال هم وجود دارد (۴) در نظر نگرفتن شرایط مناطق مرزی که در آن ممکن است مشترکان از یک طرف به لوله متصل شده باشند.

تخمین نسبتاً کم دقت نیاز آبی در روش تیسسن و به نسبت کمتر در LDM موجب تعدیل نامناسب ضرایب زبری لوله‌ها برای پر کردن اختلاف بین مقدار شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده است و خطای ایجاد شده در تخمین ضرایب زبری لوله‌ها منجر به خطای محاسبه دبی جریان حین تحلیل هیدرولیکی مدل می‌شود. خطا در تخمین نیاز آبی در این روش‌ها موجب تخمین کم یا زیاد ضریب زبری لوله‌ها نسبت به شرایط واقعی حین عملیات واسنجی می‌شود و ضریب زبری بیشتر و کمتر به ترتیب منجر به جریان کندتر و تندتر آب حین شبیه‌سازی نسبت به شرایط واقعی می‌شود که به خطای ناشی از تخمین نادرست نیاز آبی می‌افزاید. روش تیسسن با خطایی که از نظم خاصی پیروی نمی‌کند، نیاز آبی را در سطح شبکه پخش کرده و با توجه به اختلاف نامنظم و نسبتاً بیشتر مقدار

سایر گره‌ها و مرز شبکه واقع شده است. بررسی شکل ۵ نشان می‌دهد که روش تیسسن نسبت به روش SAWDDC با خطای بیشتری همراه است. یکی از دلایل اصلی خطای روش تیسسن، در نظر نگرفتن اختلاف تراکم میزان مصرف مشترکان در یک زون تراکم جمعیتی است.

روش LDM در هر دو گره دقت روش تیسسن را افزایش داده است. این روش با در نظر گرفتن طول خط لوله به عنوان مبنای میزان مصرف، موجب کاهش خطا نسبت به روش تیسسن شده است. این روش در گره  $1098$  با جمعیت و شبکه مترکم، نیاز آبی را کمتر و فشار را بیشتر تخمین زده است. در این گره مشترکان از هر دو طرف و با تراکم بیشتر به لوله‌ها متصل شده‌اند در صورتی که این روش در همه لوله‌ها، تعداد اتصالات در واحد طول لوله و مصرف مشترکان را ثابت در نظر گرفته است. روش LDM در گره  $107$  نیز با توجه به تعداد اتصال کمتر مشترکان به شبکه (تراکم کمتر آنها) با وجود شبکه نسبتاً مترکم لوله‌ها، نیاز آبی را بیشتر و فشار را کمتر تخمین زده است.

### ۳-۲- صحت سنجی روش‌های SAWDDC، تیسسن و LDM با مقدار اندازه‌گیری شده

در شکل ۶ مقادیر شبیه‌سازی شده فشار در روش‌های تیسسن، SAWDDC و LDM با مقدار اندازه‌گیری شده در ۱۰ نقطه در سطح شبکه مقایسه شد. موقعیت این نقاط در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل ۶ از سه نمودار تشکیل شده که هر کدام مربوط به یکی از روش‌ها است. محور عمودی و محور افقی به ترتیب مقدار اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده فشار را نشان می‌دهند. مقدار RMSE بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی در روش‌های تیسسن، LDM و SAWDDC به ترتیب  $2/3$ ،  $1/4$  و  $0/9$  تعیین شد.

با توجه به شکل ۶، روش SAWDDC نتایج دقیق‌تری نسبت به دو روش دیگر داشته است و باعث کم شدن نیاز به تعدیل ضرایب زبری لوله‌ها در فرایند واسنجی و شبیه‌سازی دقیق‌تر توزیع فشار در سطح شبکه شده است. روش SAWDDC نیاز آبی را در گره‌های حاشیه شبکه، ۳ درصد بیشتر و فشار آب را  $1/1$  درصد کمتر از روش تیسسن تخمین زده است. مقادیر مذکور در روش LDM به ترتیب  $1/4$  و  $0/8$  تعیین شد که نشان از اختلاف کمتر این روش با روش SAWDDC در حاشیه شبکه دارد.



خیابان‌رهای دارای بافت فرسوده‌تر، خانه‌های قدیمی با مساحت کم و متراکم است.

مقدار RMSE بین مقادیر فشار اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در روش‌های SAWDDC، LDM و تیسن در این دو خیابان به ترتیب ۱/۱ و ۲/۱ و ۱/۶ محاسبه شد که نشان داد در بخش مرکزی شبکه نیز دقت شبیه‌سازی روش SAWDDC بیشتر از LDM و LDM بیشتر از تیسن است. مقایسه دو روش LDM و تیسن در این دو خیابان نشان داد که در مناطقی با این خصوصیات نیز، در نظر گرفتن طول لوله‌ها به‌عنوان مبنای توزیع نیاز آبی نسبت به در نظر گرفتن زون تراکم جمعیتی، در افزایش دقت تخمین نیاز آبی مؤثرتر است.

شبیه‌سازی شده با مقدار واقعی، از تأثیر عملیات واسنجی در این روش کم می‌شود. خطا در تخمین نیاز آبی موجب تخمین نادرست ظرفیت انتقال جریان در لوله‌ها، انتخاب قطر نامناسب و طراحی نادرست شبکه و در نهایت هدر رفت سرمایه می‌شود.

### ۳-۳- مقایسه نتایج شبیه‌سازی هیدرولیکی با مقادیر اندازه‌گیری شده در مرکز شبکه

نتایج شبیه‌سازی هیدرولیکی مدل با روش‌های تیسن، LDM و SAWDDC با مقدار واقعی در بخش مرکزی شبکه (دو خیابان‌رهای و پایداری) مقایسه شد (شکل‌های ۷ و ۸). خیابان‌ر پایداری دارای بافت مجتمع‌های آپارتمانی با ساختمان‌های نسبتاً مرتفع و

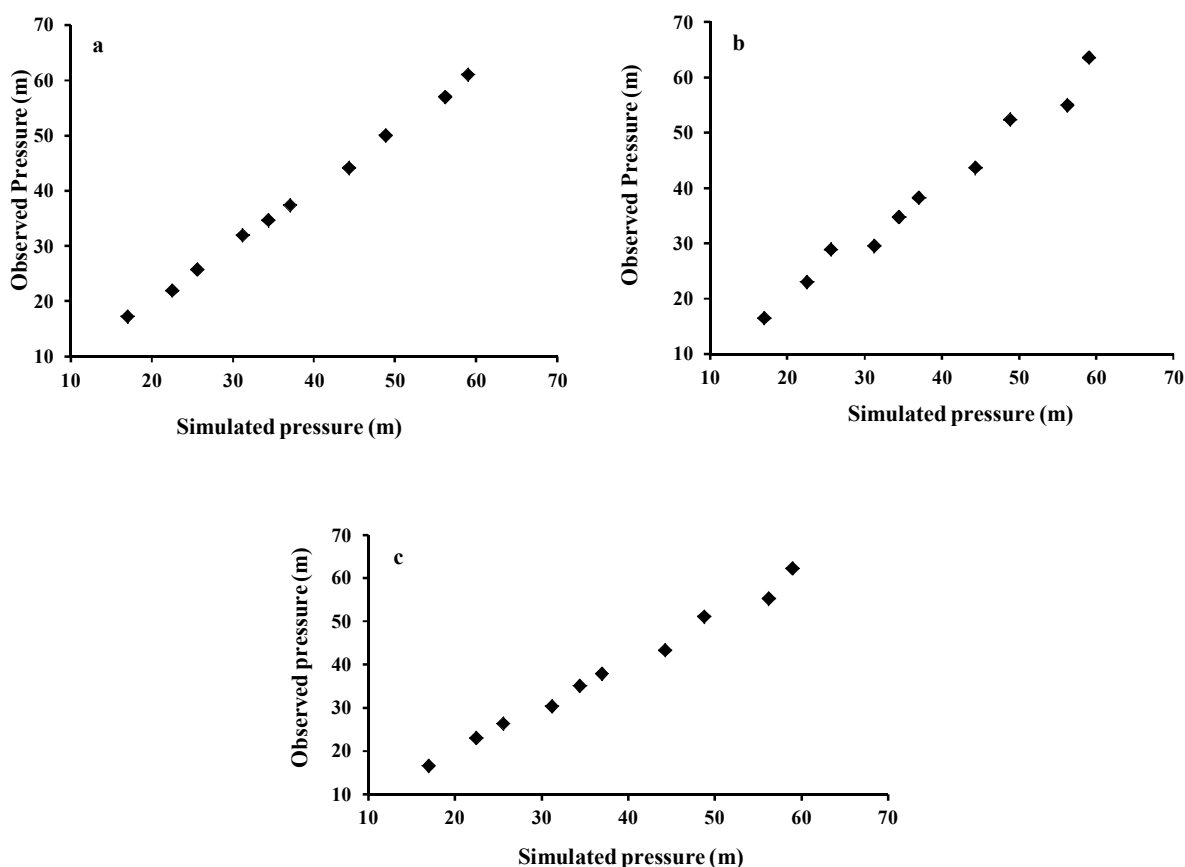


Fig. 6. Correlation between observed and simulated pressures in SAWDDC (a), Thiessen (b) and LDM (c) methods  
 شکل ۶- همبستگی بین مقدار فشار اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در روش (a)، SAWDDC، (b) تیسن و (c) LDM

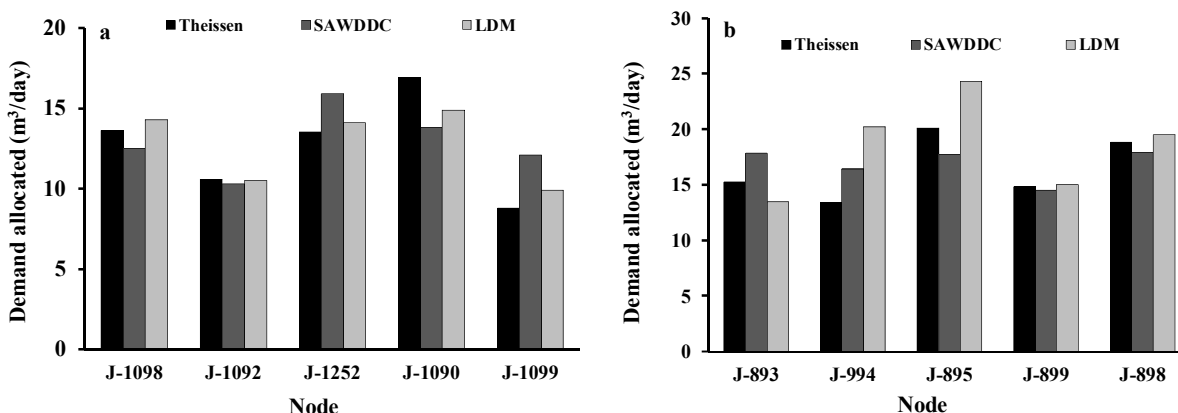


Fig. 7. Comparing the water use allocation results at nodes level in Rahaei (a) and in Paydari (b) St., for SAWDDC, Thiessen and LDM methods

شکل ۷- مقایسه مقادیر برآورد شده نیاز آبی روش SAWDDC، تیسن و LDM در خیابان‌های رهایی (a) و پایداری (b)

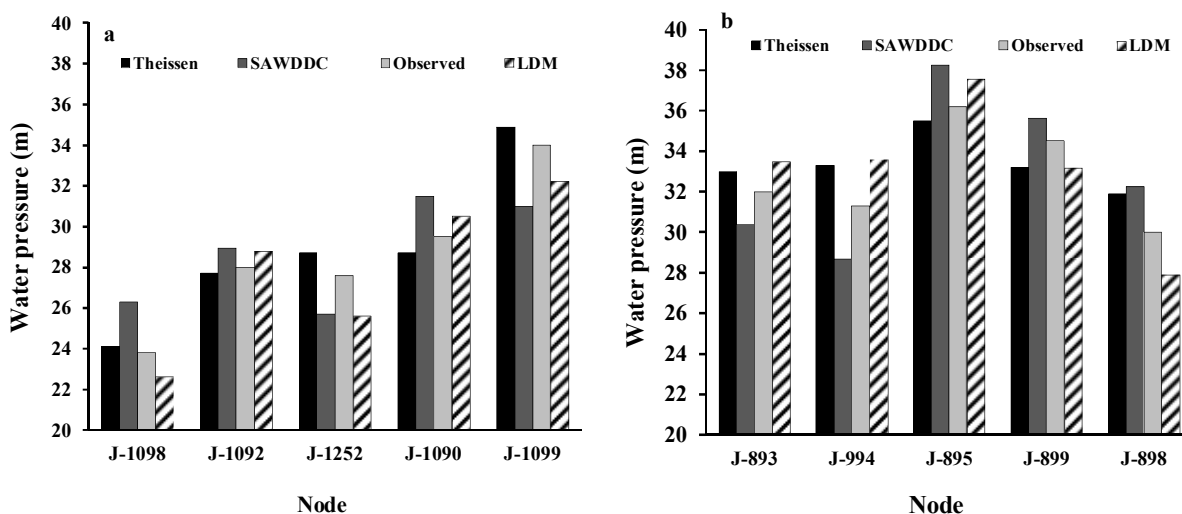


Fig. 8. Comparing the water pressure results at nodes level in Rahaei (a) and in Paydari (b) St., for SAWDDC, Thiessen and LDM methods

شکل ۸- مقایسه مقادیر فشار آب در روش SAWDDC، تیسن و LDM در خیابان‌های رهایی (a) و پایداری (b)

همراه است و برعکس اگر گره‌ای در انتهای یک خط لوله فرعی با قطر کم قرار داشته باشد، تغییرات فشار آب در آن گره ارتباط مستقیم با تغییرات نیاز آبی دارد. همچنین گره‌هایی که بر روی لوله‌هایی با آرایش لوب قرار گرفته‌اند، نسبت به آرایش شاخه‌ای تغییر فشار کمتری را نسبت به تغییرات نیاز آبی یا جریان نشان می‌دهند.

همچنین با بررسی توزیع فشار و نیاز آبی در سطح مدل شبیه‌سازی مشخص شد که تغییرات فشار آب نسبت به تغییرات نیاز آبی از رابطه مشخصی پیروی نمی‌کند و بیشتر به موقعیت قرارگیری گره‌ها بستگی دارد. به‌عنوان مثال در گرهی روی خط اصلی به دلیل تأثیر پذیرفتن فشار آب از نیاز آبی کل لوله‌ها و گره‌های زیر مجموعه آن خط لوله، تغییرات نیاز آبی آن گره با تغییرات فشار آب کمتری

## ۴- نتیجه‌گیری

افزایش دقت شبیه‌سازی هیدرولیکی و تعیین میزان انطباق آن با شرایط واقعی بود. مقدار فشار شبیه‌سازی شبکه با مقدار اندازه‌گیری شده در ۱۰ نقطه در سطح شبکه مقایسه شد و مقدار RMSE بین مقدار شبیه‌سازی شده فشار به روش‌های تیسسن، SAWDDC و LDM با مقدار اندازه‌گیری شده به ترتیب ۲/۳، ۰/۹ و ۱/۴ تعیین شد که نشان از دقت بیشتر روش SAWDDC نسبت به دو روش دیگر دارد. روش‌های تیسسن و LDM در مقایسه با روش SAWDDC در کل شبکه به‌طور میانگین فشار آب را به ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۴۲ متر آب کمتر تخمین زده‌اند. بنابراین با توجه به اینکه این دو روش تفاوت چندانی در اطلاعات ورودی مورد نیاز و سهولت استفاده ندارند روش LDM به روش تیسسن برتری دارد.

در این پژوهش، روش ترکیبی SAWDDC به‌منظور تخصیص مکانی نیاز آبی شبکه توزیع آب پیشنهاد شد. اطلاعات مصرف مشترکان برای هر کوچه و خیابان بر اساس آدرس گروه‌بندی شد و مجموع مصرف ثبت شده هر گروه به نقاط مصرفی در محیط اختصاص داده شد و فایل ساده شده مکانی مصرفی مشترکان تشکیل شد. سپس با استفاده از ابزار تخصیص نیاز آبی در مدل WaterGEMS ابتدا مقادیر مصرف هر نقطه مصرف به نزدیک‌ترین لوله اختصاص یافت و سپس مقدار تلفات اندازه‌گیری شده به هر یک از لوله‌ها اضافه شد و نتایج این روش و روش‌های تیسسن و LDM پس از واسنجی با مقدار اندازه‌گیری شده در سطح شبکه توزیع آب پهنه II شهر مشهد مقایسه شد. هدف اصلی این پژوهش بررسی امکان

## References

- Basford, C. & Sevier, C. 1995. Automating the maintenance of a hydraulic network model demand database utilizing GIS and customer billing records. *Proceedings of the 1995 AWWA Computer Conference*, Denver, C10. 197-206.
- Davis, A. L. & Brawn, R. C. 2000. General purpose demand allocator (DALLOC). *Building Partnerships*. doi:10.1061/40517(2000) 190.
- Elsheikh, M. A., Saleh, H. I., Rashwan, I. M. & Et-Samadoni, M. M. 2013. Hydraulic modelling of water supply distribution for improving its quantity and quality. *Sustainable Environment Research*, 23, 403-411.
- Gupta, I., Khitoliya, D. R. & Kumar, D. S. 2013. Study of water distribution network using EPANET. *International Journal of Computational Engineering Research*, 3, 58-61.
- Kanakoudis, V. & Gonelas, K. 2015. Properly allocating the urban water meter readings to the nodes of a water pipe network simulation model. *Desalination and Water Treatment*, 54, 2190-2203.
- Mitchell, A. W. 1999. Population and demand allocation using polygon overlay techniques. *Esri Proceedings*, <<http://Proceedings.esri.com/library/user conf./proc 99/proceed/papers/pap552/P552.htm>>
- Mohapatra, S., Kamble, S., Sargaonkar, A., Labhasetwar, P. & Watpade, S. 2012. Efficiency study of a pilot water distribution system using EPANET and ArcGIS10. *Conference CSIR-NEERI, India Water Week*, at New Dehli, India.
- Mukherjee, B., Das, S. & Sarkar, P. K. 2015. Management in real time operation of drinking water pipeline distribution network: a case study. *Proceedings of the 47th IWWA Annual Convention*, Kolkata, India, 298-303.
- Nazari, A. & Meisami, H. 2008. Instructing WaterGEMS software usage. *Department of Publications and Technical Affairs of Iranian National Retrofitting Center (INRC), Tehran*, 1, 111. (In Persian)

- Plan and Budget Organization of Iran. 2013. *Design criteria of urban and rural water supply and distribution systems No. 117-3*, Tehran, Iran. (In Persian)
- Roy, P. K., Konar, A., Banerjee, G., Paul, S., Mazumdar, A. & Chkraborty, R. 2015. Development and hydraulic analysis of a proposed drinking water distribution network using watergems and GIS. *Pollution Research Paper*, 34 (2), 371-379.
- Sonaje, N. P. & Joshi, M. G. 2015. A review of modeling and application of water distribution networks (WDN) softwares. *International Journal of Technical Research and Applications*, 3, 174-178.
- Sumithra, R. & Amaranath, J. 2013. Feasibility analysis and design of water distribution system for tirunelveli corporation using loop and watergems software. *International Journal on Applied Bioengineering*, 7 (1), 61-70.
- Walski, T. M. 2000. Model calibration data: the good, the bad, and the useless. *Journal-American Water Works Association*, 92, 94-99.
- Walski, T. M., Chase, D. V., Savic, D. A., Grayman, W., Beckwith, S. & Koelle, E. 2003. *Advanced water distribution modeling and management*, 1<sup>st</sup> Ed., Rently Institute Press, Pennsylvania.
- Wu, Z., Wang, R. H., Diaz, D. & Walski, T. 2003. Mining water consumption and GIS-based data for loading water distribution models. *World Water and Environmental Resources Congress 2003*, Philadelphia, Pennsylvania. 1-9. doi: 10.1061/40685(2003) 23.

