

## تعیین ضریب حداکثر تقاضای لحظه‌ای در شبکه‌های توزیع آب

رامتین مظاهری<sup>۱</sup>، محمدرضا جلیلی قاضی زاده<sup>۲\*</sup>، همایون مطیعی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی محیط زیست گرایش مهندسی آب و فاضلاب، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲- \*نویسنده مسئول: دانشیار دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.  
[m\\_jalili@sbu.ac.ir](mailto:m_jalili@sbu.ac.ir)

۳- دانشیار دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۴

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۶/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۹

### چکیده

شبکه‌های توزیع آب معمولاً بر اساس ضریب حداکثر ساعتی تقاضای آب طراحی می‌شوند. این ضریب نسبت بین جریان حداکثر به متوسط ساعتی را در یک شبانه‌روز نشان می‌دهد. اما برای دستیابی به اهداف بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع آب، بررسی نوسان تقاضا در گام‌های زمانی کمتر از یک ساعت (لحظه‌ای) نیز لازم می‌باشد. با توجه به نبودن اطلاعات کافی برای تعیین ضرایب حداکثر تقاضا برای گام‌های زمانی کمتر از یک ساعت، در این مقاله با اندازه‌گیری جریان ورودی به شبکه آب در پروژه‌های مورد مطالعه، ضریب حداکثر تقاضای آب در گام‌های زمانی کمتر از یک ساعت محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که ضریب حداکثر تقاضا با کاهش هر دو مشخصه جمعیت و گام زمانی، افزایش می‌یابد. برای نمونه در جمعیت ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ نفر، مقدار ضریب حداکثر تقاضا در گام زمانی نیم ساعته نسبت به یک ساعته به ترتیب حدود ۵۳ و ۳۳ درصد افزایش می‌یابد. بر پایه نتایج بدست آمده رابطه جدیدی برای برآورد ضریب حداکثر تقاضا بر اساس جمعیت و گام‌های زمانی مختلف ارائه شد. همچنین ضریب حداکثر تقاضای ساعتی در پروژه‌های مورد مطالعه، با مراجع گوناگون همانند نشریه ۳-۱۱۷ مقایسه گردید. نتایج تحقیق حاضر برای طراحی و بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع آب می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی فارسی: ضریب حداکثر تقاضا، حداکثر تقاضای ساعتی، بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع آب

## Determining the instantaneous peak factor in water distribution networks

Ramtin Mazaheri<sup>1</sup>, Mohammadreza Jalili Ghazizadeh<sup>\*2</sup>, Homayoun Motiee<sup>3</sup>

1. PhD student, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
2. **\*Corresponding Author: Associate Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. m\_jalili@sbu.ac.ir**
3. Associate Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Received: 24/04/2023

Revised: 05/09/2023

Accepted: 10/09/2023

### Abstract

Water distribution networks (WDNs) are usually designed based on hourly peak factor (HPF). The HPF shows the ratio between the maximum and average hourly flow during a day. However, in order to achieve an optimal operation of WDNs, it is necessary to study the water demand changes for less than one-hour (instantaneous) time intervals. Considering the lack of information for less than hourly peak factor (PF), in this paper, using the flow field data in different WDNs, the PFs were calculated for the different time intervals of less than one hour. The results showed that the PF increases by decreasing both population and time intervals. For example, for populations of 1,000 and 10,000, the value of the PF in a half-hour time interval compared to a one-hour time interval increases by 53% and 33%, respectively. Based on the obtained results, a new equation is presented to estimate the PF based on populations and time interval parameters. Also, the HPFs in WDNs were compared with different references, including the 117-3. The results of the present study can be utilized for design and operation of WDNs.

**English keywords:** Peak factor, Maximum hourly demand, Design and Operation of Water distribution network.

از آنجا که جریان در شبکه‌های توزیع آب تابع مصارف مشترکین در ساعات مختلف شبانه‌روز و روزهای مختلف سال است، حداکثر مقدار تقاضای مورد انتظار در یک شبکه توزیع آب شاخص مهمی به‌منظور دستیابی به اهداف طراحی و بهره‌برداری از شبکه محسوب می‌شود (Tricarico et al., 2014). حداکثر تقاضای آب، به‌صورت بیشترین حجم جریان آب در طول یک دوره زمانی نسبتاً کوتاه (به‌عنوان مثال یک ثانیه، یک دقیقه یا یک ساعت) تعریف می‌شود. روش‌های مختلفی برای برآورد حداکثر تقاضای آب از دستورالعمل‌های طراحی و گزارش‌های تحقیقاتی در دسترس است که رایج‌ترین آن‌ها، استفاده از ضریب حداکثر بدون بعد<sup>۱</sup> است (Research, 2003). ضریب حداکثر تقاضا (PF)<sup>۲</sup>، نسبت بین حجم حداکثر به متوسط جریان آب در طول یک گام زمانی نسبتاً کوتاه (مثلاً ساعت) برای یک دوره بررسی زمانی نسبتاً طولانی (مثلاً شبانه روز یا سال) است. لذا حداکثر حجم تقاضای آب در مدت یک ساعت به متوسط حجم تقاضای آب ساعتی در یک روز به عنوان ضریب حداکثر تقاضای ساعتی<sup>۳</sup> تعریف می‌شود. مقادیر ضریب حداکثر تقاضا با توجه به جنبه‌های اجتماعی و اقتصادی موجود در هر ناحیه مورد مطالعه قرار گرفته است (Balacco et al., 2017, Zhang et al., 2005, Gargano et al., 2010, Gato-Trinidad and Gan, 2012). مطالعات نشان می‌دهد که مقدار ضرایب ساعتی با توجه به جمعیت ناحیه، تغییر خواهد کرد (DVGW, 2009, Zhang, 2005, Martínez-Solano et al., 2008, Tricarico et al., 2007, Balacco et al., 2017). به‌عنوان نمونه، دیائو و همکاران یک رابطه معکوس بین ضریب حداکثر تقاضای ساعتی با جمعیت را معرفی کردند (Diao et al., 2010). بالاکو و همکاران نیز با بررسی داده‌های میدانی سه روستا با جمعیت مختلف در جنوب ایتالیا، منحنی‌های تغییرات جریان در مدت ۲۴ ساعت را در گام‌های زمانی ۱۰ دقیقه با مقدار مشترکین موجود در هر ناحیه ارائه کرده و با برازش توزیع گامبل<sup>۴</sup> برای مقادیر ضریب حداکثر تقاضای آب، رابطه‌ای را بین ضریب حداکثر تقاضای لحظه‌ای<sup>۵</sup> و جمعیت ارائه دادند (Balacco et al., 2018). با افزایش جمعیت مقدار ضریب حداکثر تقاضای لحظه‌ای و نوسانات تقاضا (اختلاف مقدار حداکثر و حداقل ضریب تقاضا در الگوی روزانه تقاضای آب) کاهش می‌یابد. بر اساس نشریه ۱۱۷-۳، در شرایط نبودن اطلاعات جریان ورودی به ناحیه مورد نظر، مقادیر ضریب حداکثر تقاضا متناسب با جمعیت مطابق جدول ۱ خواهد بود (معاون نظارت و راهبردی ریاست جمهوری، ۱۳۹۲، معاون نظارت و راهبردی ریاست جمهوری، ۱۳۷۱). در جدول ۱، مقادیر ضریب حداکثر تقاضای ساعتی در نشریه ۱۱۷-۳ با مراجع دیگر (Brière, 2014, Adams, 1961, Ippolito and De Martino, 1995) مقایسه شده است.

جدول ۱. مقادیر ضریب حداکثر تقاضا براساس مراجع مختلف

ضریب حداکثر ساعتی					جمعیت (نفر)
Ippolito and De (Martino, 1995)	Adams, (1961)	(Brière, 2014)	(معاون نظارت و راهبردی ریاست جمهوری، ۱۳۷۱)	(معاون نظارت و راهبردی ریاست جمهوری، ۱۳۹۲)	
۵-۴	۲/۲-۵/۹	۳/۴-۳/۵	۲-۲/۵	۳-۲	کمتر از ۵۰۰۰
۲/۴-۹	۲/۲-۴/۵	۲/۳-۹/۳	۱/۲-۵	۱/۲-۸	۲۰۰۰۰-۵۰۰۰
۲-۲/۹	۲/۲-۱/۴	۲/۲-۶/۹	۱/۱-۴/۸	۱/۱-۶/۸	۱۰۰۰۰۰-۲۰۰۰۰
۱/۲-۵	۲-۲/۱	۲/۲-۵/۶	۱/۱-۲/۶	۱/۱-۴/۶	۳۰۰۰۰۰-۱۰۰۰۰۰
۱/۵	۱/۲-۹	۲/۲-۲/۵	۱/۱-۲/۴	۱/۱-۲/۴	بیش از ۳۰۰۰۰۰

نتایج تحلیل داده های بررسی میدانی انجام شده در شهرستان کاشمر جهت مطالعه ضریب حداکثر تقاضای آب، نشان داد که ضریب حداکثر ساعتی در شهرستان کاشمر در بازه ۱/۳ تا ۱/۴ متغیر می باشند که با مقادیر پیشنهادی نشریه ۳-۱۱۷ بازنگری اول کمی تفاوت دارد (تابش و همکاران، ۱۳۹۴). بررسی میدانی ضریب حداکثر تقاضا در شبکه های توزیع آب روستایی در شمال شرق خوزستان با اندازه گیری جریان تقاضا در گام های زمانی ۷/۵ دقیقه به مدت یک سال، تفاوت قابل ملاحظه بین ضرایب حداکثر نتیجه شده از این تحقیق با معیارهای پیشنهادی استانداردها و مراجع ملی و بین المللی، اهمیت منطقه ای کردن ضرایب حداکثر را نشان داد. برای مثال، در خصوص کوچک ترین شبکه مورد مطالعه، ضریب حداکثر پیشنهادی نشریه ۳-۱۱۷، به مقدار ۲۷/۳ درصد کمتر از ضریب حداکثر واقعی به دست آمده در پژوهش یادشده است (مرادی سبزوکی و همکاران، ۱۳۹۳). روابط ضریب حداکثر تقاضای ساعتی ( $PF_h$ ) متناسب با جمعیت هر ناحیه بر حسب هزار نفر ( $P$ ) یا تعداد مشترکین ( $N$ ) در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. روابط ضریب حداکثر تقاضای ساعتی

مرجع	ضریب حداکثر تقاضای ساعتی ( $PF_h$ )	ردیف
(Metcalf and Eddy, 1915)	$\begin{cases} P \leq 4 & P \leq 5 \\ \frac{4}{8} & \\ P > 5 & P^{0.113} \end{cases}$	۱
(Harmon, 1918)	$\frac{18 + \sqrt{P}}{4 + \sqrt{P}}$	۲
(Harmon, 1918)	$1 + \frac{\sqrt{P}}{4 + \sqrt{\frac{P}{10000}}}$	۳
(Babbitt, 1928)	$79/62 P^{-0.12}$	۴
(Johnson, 1942)	$\frac{5/2}{P^{0.15}}$	۵
(Giffit, 1945)	$\frac{5}{P^{0.167}}$	۶
(Zhang, 2005)	$\begin{cases} 9/0 & P \leq 0.22 \\ 7 & \\ P > 0.22 & P^{0.167} \end{cases}$	۷
(Tricarico et al., 2007)	$11 N^{-0.12}$	۸
(Martínez-Solano et al., 2008)	$\frac{17/12}{\sqrt{N}} + 2/185$	۹

(DVGW, 2009)	$-0.75 \ln P + 13/40.6$	۱۰
(DVGW, 2009)	$57/847 P^{-0.1682}$	۱۱

بزرگی ضریب حداکثر تقاضا در الگوی روزانه تقاضای آب علاوه بر مقدار جمعیت ناحیه، به مقدار انتخابی گام زمانی در الگوی تقاضای آب نیز بستگی دارد. لازم به ذکر است در روابط ۱ الی ۱۱ گام زمانی ثابت (یک ساعت) بوده و تنها عامل تغییر در ضریب حداکثر تقاضا، جمعیت می باشد. به عنوان مثال با توجه به تغییرات نرخ جریان در طول روز، معمولاً میانگین ضریب حداکثر جریان تعیین شده در یک گام زمانی ۱۰ ثانیه‌ای در مقایسه با ضریب حداکثر جریان تعیین شده در یک گام زمانی ۵ دقیقه‌ای بیشتر است. رابطه تجربی ۱۲ برای محاسبه ضریب حداکثر در شهرهای مسکونی کوچک پیشنهاد شده است (Goodrich, 1942):

$$PF_t = 1/8t^{-0.10} \dots\dots\dots (12)$$

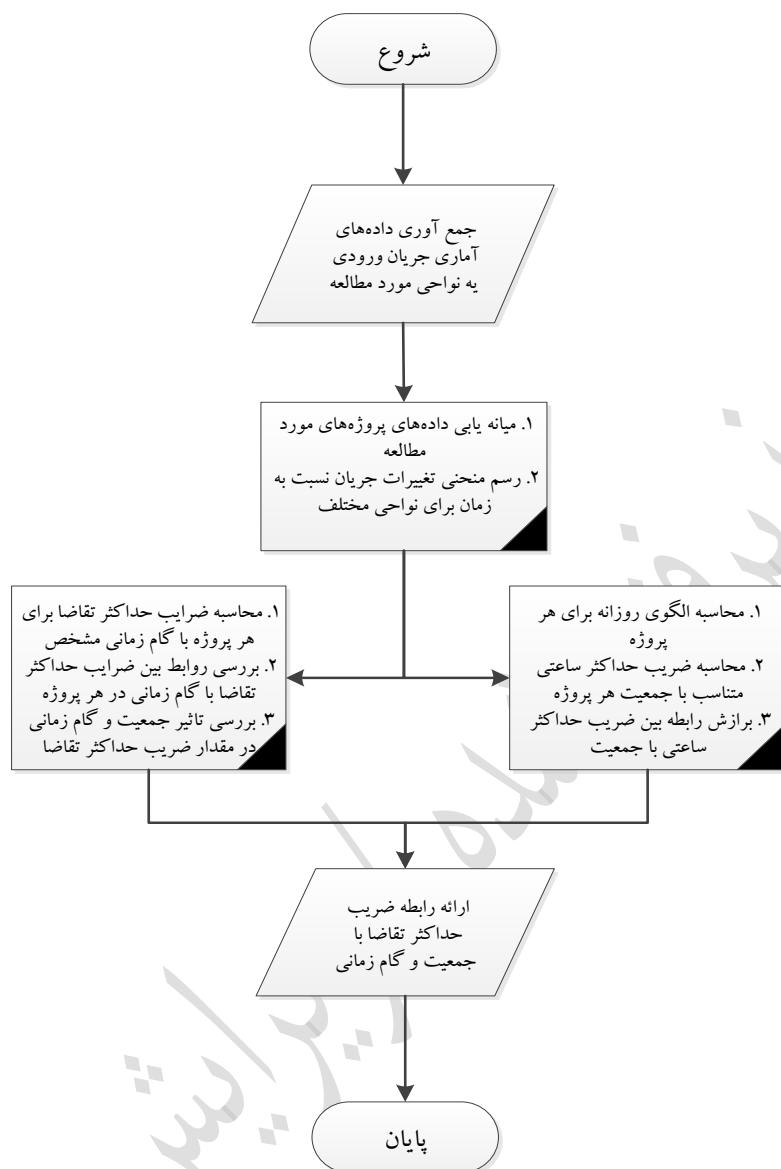
که  $t$  گام زمانی بر حسب روز است که مقدار آن می‌تواند از ۲ ساعت (معادل  $\frac{2}{24}$  روز) تا ۳۶۵ روز، متغیر باشد. این رابطه برای گام‌های زمانی زمانی کوچکتر از ۲ ساعت، قابل استفاده نیست. جدول ۳ نیز مقدار ضریب حداکثر تقاضای  $t$  روزه در سال را برای مدت زمان‌های یک ساعت، روز، هفته و ماه نشان می‌دهد (Tchobanoglous and Schroeder, 1987).

جدول ۳. ضریب حداکثر تقاضای  $t$  روزه در سال (Tchobanoglous and Schroeder, 1987)

ضریب حداکثر تقاضا	مدت زمان، روز
۱/۱-۱/۴	ماه ( $t=30 \text{ d}$ )
۱/۱-۲/۷	هفته ( $t=7 \text{ d}$ )
۱/۲-۶/۲	روز ( $t=1 \text{ d}$ )
۲/۳-۲/۲	ساعت ( $t=\frac{1}{24}$ )

با توجه به رابطه ۱۲ و جدول ۳، با کاهش مقادیر گام‌های زمانی مقدار ضریب حداکثر تقاضا افزایش خواهد یافت. همچنین مقدار ضریب حداکثر تقاضا با کاهش گام مدت زمانی، افزایش می‌یابد (Johnson, 1999). مقدار ضریب حداکثر تقاضا با گام زمانی اندازه‌گیری جریان یک شبکه توزیع آب مرتبط است، زیرا حجم تقاضای آب در گام زمانی مشخص با محاسبه سطح زیر منحنی جریان تقاضای آب نسبت به زمان تعیین می‌شود. بنابراین اگر گام زمانی بزرگتر شود، متوسط حجم تقاضای آب در آن گام زمانی کاهش و لذا ضریب حداکثر تقاضا نیز کاهش می‌یابد. لذا محاسبه حجم متوسط تقاضای آب در طول گام زمانی انتخابی علت تغییرات میزان حداکثر تقاضا است (Diao et al., 2010). در محاسبه حجم متعادل سازی مخازن ذخیره آب شهری، معمولاً گام زمانی یک ساعت انتخاب می‌شود چنانچه گام زمانی بیش از این مقدار انتخاب گردد، با کاهش مقدار تقاضا در گام زمانی مشخص، حجم متعادل سازی کمتر محاسبه خواهد شد و این

موضوع موجب کمبود آب در مخازن ذخیره در ساعات پیک تقاضا خواهد شد. اگر گام زمانی بزرگتر از این مقدار باشد حجم متعادل سازی بیشتر می‌شود، لذا با توجه به انتخاب یک حجم بهینه از نظر اقتصادی و همچنین حجم مناسب هیدرولیکی، گام زمانی مناسب جهت محاسبات هیدرولیکی انتخاب می‌گردد. لذا در طراحی شبکه‌های توزیع آب شهری گام زمانی یک ساعت، و در بررسی نشت و جریان شبانه کسری از یک ساعت در نظر گرفته می‌شود (Davis and Sorensen, 1980, Hammer, 1986, Clark et al., 1969). این موضوع تایید می‌کند که چنانچه مقدار گام زمانی جریان لحظه‌ای تقاضا بیش از حد بزرگ باشد، ممکن است ضریب حداکثر بدست آمده نتواند نماینده مناسبی از حداکثر تقاضای آب مورد نظر برای تجزیه و تحلیل خاص شبکه توزیع آب شهری باشد. در تحلیل‌ها به خصوص به منظور بهره‌برداری بهینه از شبکه توزیع آب شهری، مقدار حداکثر تقاضا با تغییرات گام زمانی کمتر از یک ساعت نیز مورد نیاز است. در دستورالعمل‌های موجود، معمولاً ضرایب نوسان تقاضا برای فواصل زمانی کمتر از یک ساعت ارائه نشده است. لذا بررسی مقدار حداکثر تقاضای مشترکین در گام‌های زمانی کمتر از یک ساعت ضروری است. در مطالعه حاضر با هدف تحقیق رابطه ضریب حداکثر تقاضا متناسب با جمعیت و گام زمانی، داده‌های میدانی در چند پروژه مختلف مطابق شکل ۱ ارزیابی گردید. سپس الگوی تقاضای آب در گام زمانی یک ساعت به ازای جمعیت‌های مختلف اندازه گیری شد. همچنین با استفاده از نتایج الگوی روزانه، رابطه‌ای بین مقدار ضریب حداکثر ساعتی و جمعیت برآزش گردید. با محاسبه الگوهای تقاضای آب برای گام‌های کوچکتر، ضرایب حداکثر تقاضا محاسبه و رابطه بین مقدار ضریب حداکثر تقاضا با تغییرات گام زمانی کمتر از یک ساعت بررسی شده است.



شکل ۱. روندنما پژوهش حاضر

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مورد مطالعه

در مطالعه حاضر هشت شبکه توزیع آب در استان‌های مختلف کشور با توجه به ویژگی‌های تنوع مقادیر جمعیت، گام زمانی اندازه‌گیری و حداقل مقدار نشت به شرح جدول ۴ مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور تغییرات مقدار دبی ورودی با نصب دبی‌سنج در ورودی زیر نواحی مورد مطالعه اندازه‌گیری شد. بازه زمانی اندازه‌گیری برای هر پروژه در جدول ۴ بیان شده است.

جدول ۴. مشخصات نواحی مورد مطالعه

شماره پروژه	جمعیت تقریبی	نام زیر ناحیه	محل پروژه	گام‌های زمانی ثبت	بازه زمانی اندازه‌گیری
-------------	--------------	---------------	-----------	-------------------	------------------------

	داده‌ها (دقیقه)			(نفر)	
۱	۰/۵	خراسان رضوی، شهر مشهد	خسروی ۱	۳۵۰	بهمن ۱۳۹۸ تا اردیبهشت ۱۴۰۰
۲	۰/۵	خراسان رضوی، شهر مشهد	نماز ۴	۶۵۰	فروردین ۱۴۰۰ تا شهریور ۱۴۰۰
۳	۳۰	اصفهان، روستای شیدان	شیدان	۸۵۰	مهر ۱۴۰۰ تا اردیبهشت ۱۴۰۱
۴	۳۰	اصفهان، روستای کبوترآباد	کبوترآباد	۱۷۰۰	آبان ۱۴۰۰ تا اردیبهشت ۱۴۰۱
۵	۰/۵	خراسان رضوی، شهر مشهد	خسروی ۵	۳۵۰۰	فروردین ۱۴۰۰ تا اسفند ۱۴۰۰
۶	۶۰	خراسان جنوبی، شهر بیرجند	معصومیه	۸۰۰۰	فروردین ۱۳۹۹ تا اردیبهشت ۱۴۰۰
۷	۶۰	خراسان جنوبی، شهر طبس	زون ۱ طبس	۱۱۰۰۰	تیر ۱۴۰۰ تا دی ۱۴۰۰
۸	۵	خراسان رضوی، شهر مشهد	زون II	۱۰۰۰۰۰	دی ۱۳۹۹ تا شهریور ۱۴۰۰

## ۲-۲- محاسبه ضرایب حداکثر تقاضا برای گام‌های زمانی متفاوت

با توجه به اینکه یکی از اهداف این مطالعه بررسی تاثیر گام‌های زمانی مختلف (۰/۵ تا ۶۰ دقیقه) در محاسبه ضرایب حداکثر تقاضا است، از داده‌های مربوط به پروژه‌های ۱، ۲، ۵ و ۸ (جدول ۴) که دارای دقت بالای اندازه‌گیری با گام‌های زمانی ۰/۵ و ۵ دقیقه هستند، استفاده شد. به منظور محاسبه ضرایب حداکثر تقاضا در بازه ۰/۵ تا ۶۰ دقیقه، هشت گام زمانی مختلف مطابق جدول ۵ انتخاب شد.

جدول ۵. ضرایب حداکثر تقاضا برای گام‌های زمانی مختلف

$PF_{\Delta t}$	$PF_{\Delta t/5}$	$PF_{\Delta t/10}$	$PF_{\Delta t/15}$	$PF_{\Delta t/20}$	$PF_{\Delta t/30}$	$PF_{\Delta t/45}$	$PF_{\Delta t/60}$	$PF_{\Delta t(\min)}$
گام زمانی (دقیقه)	۰/۵	۱	۲/۵	۵	۱۰	۱۵	۳۰	۶۰

بر اساس اطلاعات پروژه‌های مذکور، گام‌های محاسباتی زیر به منظور استخراج ضرایب حداکثر تقاضا در گام‌های زمانی مختلف انجام شد:

۱. حجم متوسط تقاضای آب با استفاده از سطح زیر منحنی نمودار جریان لحظه‌ای در گام زمانی مشخص (جدول ۵) محاسبه شد؛

۲. برای گام زمانی مورد نظر با محاسبه متوسط حجم تقاضای آب و تعیین مقدار حداکثری آن، ضریب حداکثر تقاضا با نسبت حداکثر حجم متوسط تقاضای آب به حجم متوسط تقاضای آب روزانه طبق معادله ۱۳ تعیین شد (Scheepers, 2012):

$$PF_{\Delta t} = \frac{(V_{\Delta t})_{\max}}{(\bar{V}_{\Delta t})} \dots \dots \dots (13)$$

که در معادله فوق  $(V_{\Delta t})_{\max}$ : بیشترین مقدار حجم متوسط تقاضای آب و  $(\bar{V}_{\Delta t})_{\text{avg}}$ : حجم متوسط تقاضای آب روزانه در گام زمانی مشخص است.



در نمودار شکل ۲ تغییرات مقدار جریان لحظه‌ای برای یک منطقه مسکونی در بازه زمانی پنج دقیقه ارائه شده است. این نمودار مثالی از محاسبات انجام شده توسط معادله ۱۵ با میانگین تقاضای ۴۳۲ مترمکعب می‌باشد. (Scheepers, 2012). ضریب حداکثر تقاضا در گام زمانی ده ثانیه و پنج دقیقه‌ای نیز در یک دوره زمانی ۲۴ ساعت با استفاده از محاسبه حجم متوسط تقاضای آب ( $V_{\Delta t}$ ) در گام زمانی مشخص (ده ثانیه و پنج دقیقه) تعیین شده است. با توجه به منحنی تغییرات جریان (آبی رنگ) در شکل ۲، مقدار سطح زیر منحنی جهت محاسبه حجم متوسط تقاضای آب برای گام‌های زمانی ده ثانیه، پنج دقیقه و ۲۴ ساعت، به ترتیب ۰/۲، ۵/۱ و ۴۳۲ متر مکعب می‌باشد. بنابراین حجم متوسط تقاضای آب روزانه ( $\bar{V}_{\Delta t}$ ) در گام زمانی ده ثانیه برابر ۰/۰۵ مترمکعب در هر ۱۰ ثانیه ( $\frac{432}{24 \times 60 \times 60} = 0/05$ ) و در گام زمانی پنج دقیقه برابر ۱/۵ مترمکعب در هر ۵ دقیقه ( $\frac{432}{24 \times 12} = 1/5$ ) می‌باشد. لذا مقدار ضریب حداکثر تقاضا در گام‌های زمانی ده ثانیه ( $\frac{0/2}{0/05} = 4$ ) و پنج دقیقه ( $\frac{5/1}{1/5} = 3/8$ ) محاسبه می‌شود.

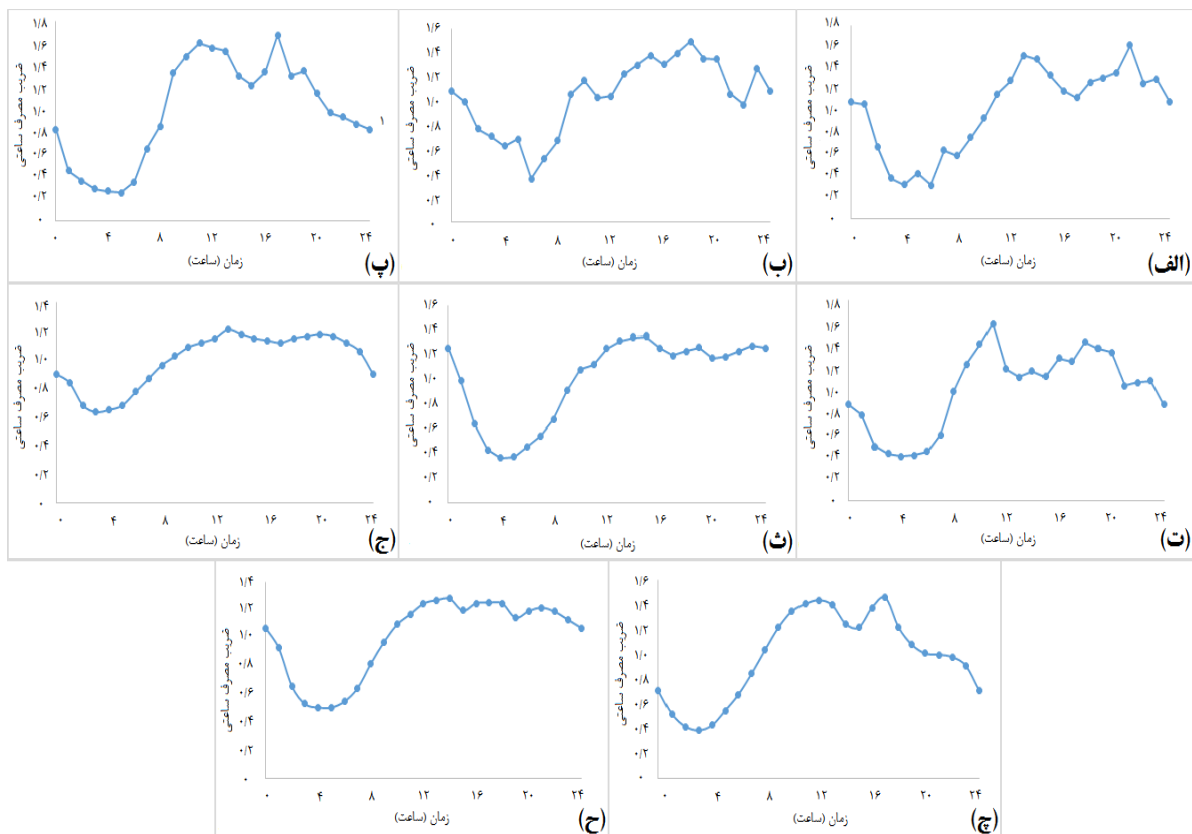


شکل ۲. مثالی از تغییرات نرخ جریان لحظه‌ای روزانه در یک منطقه مسکونی

### ۳- نتایج

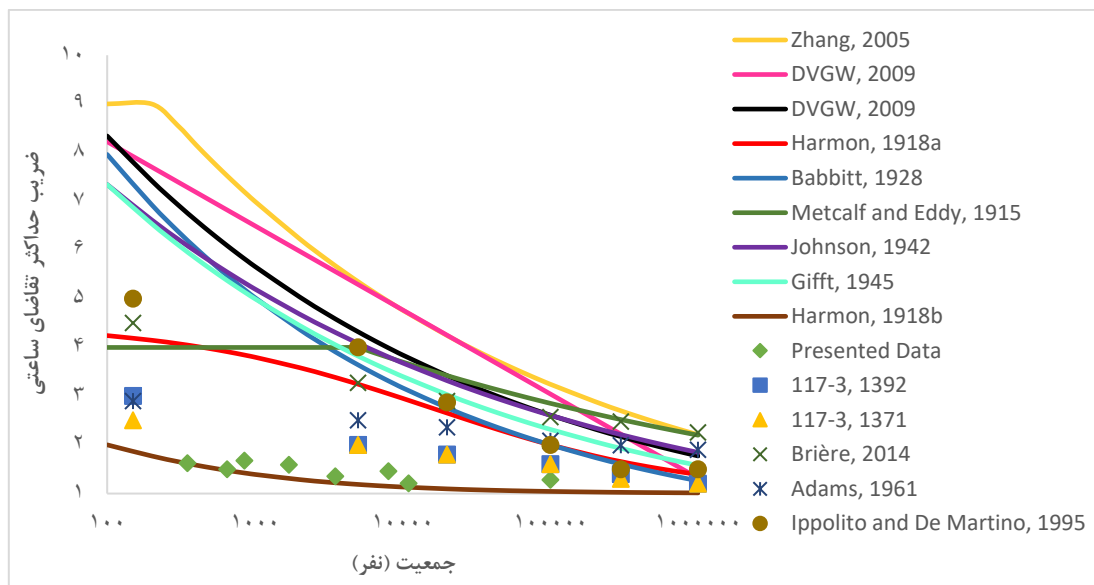
#### ۳-۱- تاثیر جمعیت بر ضریب حداکثر تقاضای ساعتی

الگوی تقاضای آب برای نواحی مورد مطالعه با بررسی سالیانه داده‌ها در شکل ۳ ارائه شده است. در نمودارهای شکل ۳ محور قائم مقادیر ضرایب ساعتی و محور افقی زمان بر حسب ساعت می‌باشد. مقادیر ضرایب ساعتی در الگوی تقاضای آب در نواحی مورد مطالعه، متناسب با جمعیت مقادیر متفاوتی را نشان می‌دهد. همچنین زمان وقوع مقدار حداکثر تقاضای ساعتی در طول مدت زمان بررسی برای هر پروژه متفاوت می‌باشد.



شکل ۳. الگوی تقاضای آب در گام زمانی یک ساعته برای پروژه‌های شماره (الف) یک، (ب) دو، (پ) سه، (ت) چهار، (ث) پنج، (ج) شش، (چ) هفت، (ح) هشت

مقادیر عددی ضریب حداکثر تقاضای ساعتی متناسب با جمعیت هر پروژه از الگوی تقاضای آب هر ناحیه (شکل ۳) استخراج شده و در شکل ۴ با عنوان "داده‌های حاضر"<sup>۶</sup> نمایش داده شده است. در این نمودار محور قائم ضریب حداکثر ساعتی و محور افقی جمعیت بر حسب نفر می‌باشد. همچنین در این شکل روابط ۱ الی ۹ و مراجع جدول ۱ نیز نمایش داده شده است.



شکل ۴. مقادیر ضریب حداکثر تقاضای ساعتی محاسبه شده در نواحی مورد مطالعه

اگر به داده‌های اندازه‌گیری در شکل ۴ داده‌های حاضر یک نمودار برازش داده شود، رابطه ۱۴ پیشنهاد می‌شود.

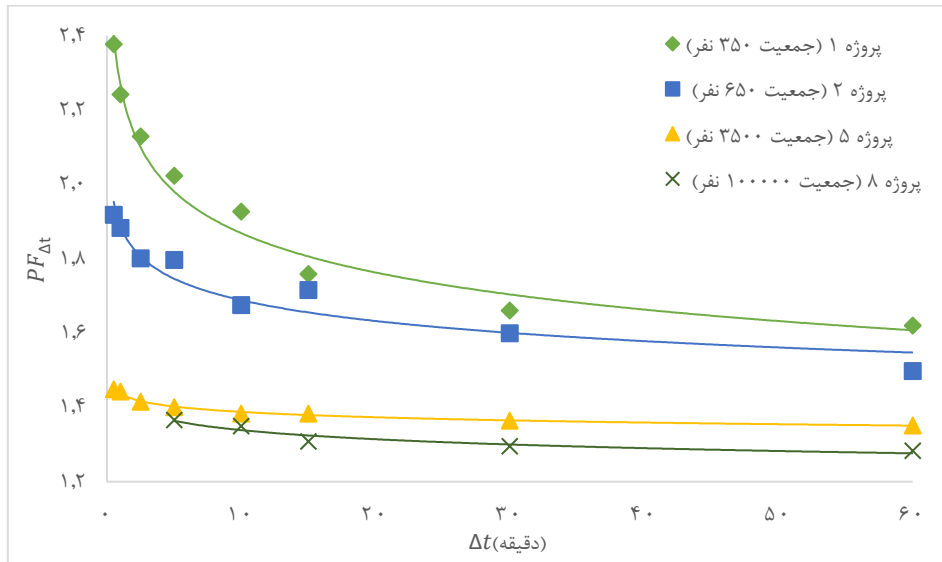
$$PF_h = 5/745P^{-0.173} + 1 \dots \dots \dots (14)$$

در رابطه فوق ( $P$ ) جمعیت بر حسب هزار نفر و مقدار ضریب رگرسیون ( $R^2$ ) این رابطه برابر ۰/۶ است.

در شکل ۴، بین مقادیر ضرایب حداکثر تقاضای ساعتی محاسبه شده توسط داده‌های واقعی و مقادیر ارائه شده در سایر مراجع، تفاوت مشاهده می‌گردد. از جمله مواردی که مقدار نوسان در الگوی تقاضای روزانه آب یا ضریب حداکثر تقاضای ساعتی را تحت تاثیر قرار می‌دهد، میزان جریان ۲۴ ساعت نشت در نواحی مورد مطالعه و وجود مخازن خانگی است. در پروژه شماره ۵، مشترکین دارای مخزن خانگی ۱۳ درصد بوده‌اند. همچنین در پروژه ۶، آب بدون درآمد حدود ۲۰ الی ۳۰ درصد است. در مقایسه پروژه‌های ۶ و ۷، نمودار الگوی تقاضای آب در پروژه ۶ دارای نوسان کمتری می‌باشد. عوامل ذکر شده باعث ایجاد یک جریان تقاضای متفاوت با الگوی تقاضا مشترکین در مدت ۲۴ ساعت می‌گردد. با ترکیب جریان نشت و جریان ورودی به مخازن ذخیره آب خانگی در مدت زمان ۲۴ ساعت با جریان تقاضای آب مشترکین، الگوی تقاضای ورودی به این نواحی دارای نوسان کمتری خواهد شد. بنابراین این موضوع باعث متعادل‌سازی جریان تقاضای آب شده و باعث کاهش مقادیر ضریب حداکثر تقاضای ساعتی می‌گردد. در همین راستا بررسی میدانی ضریب حداکثر تقاضا در شبکه‌های توزیع آب روستایی در شمال شرق خوزستان نشان داده است که در محاسبه ضریب حداکثر تقاضا بدون توجه به اثر هدررفت‌های واقعی، می‌تواند نتایج را بین ۱۴/۵ تا ۲۴/۵ درصد نسبت به واقعیت کاهش دهد (مرادی سبزوکی و همکاران، ۱۳۹۳).

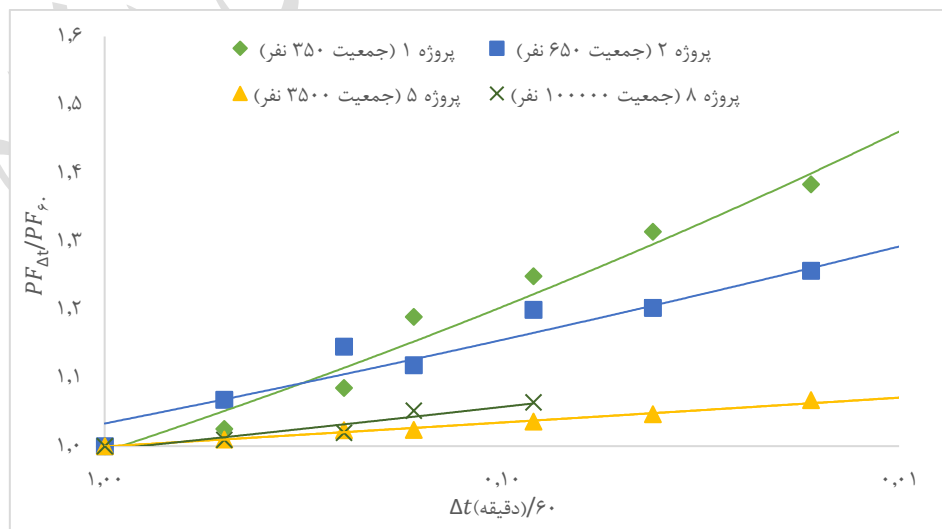
### ۳-۲- تاثیر گام زمانی بر ضریب حداکثر تقاضا

به منظور بررسی تاثیر گام زمانی بر ضریب حداکثر تقاضا، در شکل ۵ ضرایب حداکثر تقاضا بر اساس گام‌های زمانی مختلف مطابق جدول ۵ برای پروژه‌های شماره ۱، ۲، ۵ و ۸ نشان داده شده است. سایر پروژه‌ها به علت عدم امکان اندازه‌گیری ضریب حداکثر تقاضا در گام‌های زمانی کوچک‌تر، در این بخش از پژوهش مورد استفاده قرار نگرفته است.



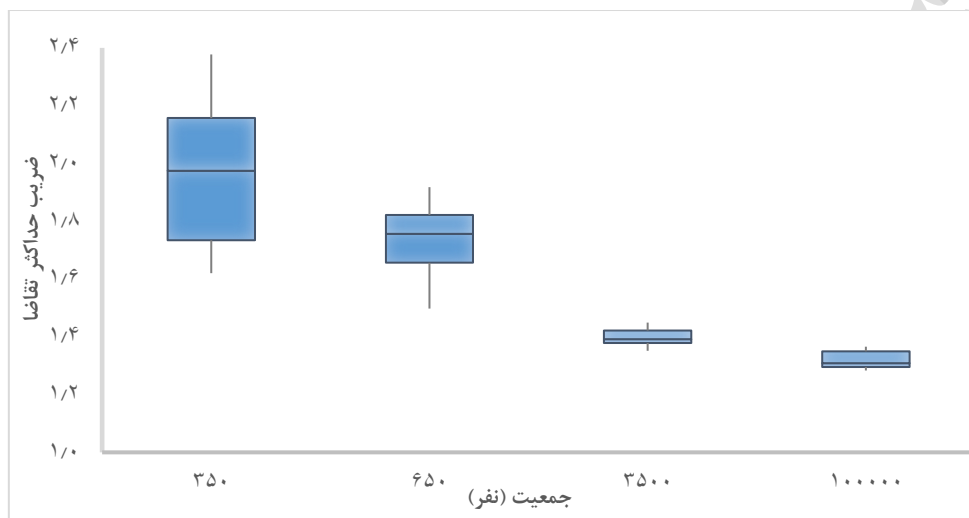
شکل ۵. ضرایب حداکثر تقاضا بر اساس بازه‌های زمانی مختلف برای پروژه‌های مورد مطالعه

نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد که تفاوت بین ضریب حداکثر تقاضا در گام‌های زمانی مختلف (شیب منحنی) وابسته به جمعیت و مقدار گام زمانی است بطوری که با افزایش جمعیت و همچنین افزایش مقدار گام زمانی، شیب نمودارها کاهش می‌یابد. در شکل ۶ نیز تغییرات نسبت مقدار ضریب حداکثر تقاضا به ضریب تقاضای ساعتی برای گام‌های زمانی مختلف تقسیم بر ۶۰ در مقیاس لگاریتمی (محور X) نمایش داده شده است.



شکل ۶. تغییرات ضریب حداکثر تقاضا با گام‌های زمانی مختلف برای پروژه‌های مورد مطالعه

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش گام‌های زمانی، نسبت بین حداکثر حجم متوسط تقاضای آب در گام زمانی مشخص و حجم متوسط تقاضای آب در گام زمانی یک ساعت کاهش می‌یابد و لذا تغییرات جریان کمتر و الگوی تقاضای آب متعادل‌تر می‌گردد. در شکل ۷ بازه تغییرات ضرایب حداکثر تقاضا در گام‌های زمانی ذکر شده در جدول ۵، با توجه به جمعیت هر ناحیه (جدول ۱) به شکل جعبه‌ای نمایش داده شده است. در این شکل محور قائم ضریب حداکثر ساعتی و محور افقی جمعیت بر حسب نفر است. با توجه به شکل ۷، نتایج نشان می‌دهد که بازه تغییرات ضرایب حداکثر تقاضا در گام‌های زمانی مختلف، برای جمعیت ۳۵۰، ۶۵۰، ۳۵۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ نفر، به ترتیب ۴۷، ۲۸، ۷، و ۶ درصد می‌باشد. بنابراین بازه تغییرات ضرایب حداکثر تقاضا در گام‌های زمانی مختلف با افزایش مقدار جمعیت کاهش می‌یابد.



شکل ۷. بازه تغییرات ضرایب حداکثر تقاضا متناسب با تغییرات جمعیت

با توجه به نتایج شکل ۶ برای تعیین ضریب حداکثر تقاضا در گام‌های زمانی مختلف معادله زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\frac{PF_{\Delta t}}{PF_{\phi}} = \left(\frac{\Delta t}{\phi}\right)^{-a} \dots \dots \dots (15)$$

در رابطه فوق مقدار گام زمانی ( $\Delta t$ ) بر حسب دقیقه می‌باشد و توان  $a$  متغیر است. با توجه به نتایج شکل‌های ۶ و ۷ می‌توان نتیجه گرفت که ضریب  $a$  تابعی از جمعیت بوده و با استفاده از رگرسیون غیر خطی برای داده‌های پروژه‌های این مطالعه، مقدار این ضریب طبق رابطه ۱۶ پیشنهاد می‌شود.

$$a = 0.615P^{-0.17} \dots \dots \dots (16)$$

با جایگذاری مقدار ضریب  $a$  در رابطه ۱۵، رابطه ۱۷ با ضریب رگرسیون برابر ۰/۹۲ حاصل می‌شود.

$$\frac{PF_{\Delta t}}{PF_{\phi}} = \left(\frac{\Delta t}{\phi}\right)^{-0.615P^{-0.17}} \dots \dots \dots (17)$$

با تعیین مقدار ضریب حداکثر تقاضای ساعتی ( $PF_{60}$ ) با استفاده از رابطه‌های شماره ۱ الی ۱۱ و جایگذاری در رابطه ۱۷، مقدار ضریب حداکثر تقاضا در گام زمانی دلخواه ( $PF_{\Delta t}$ ) مشخص می‌گردد. با توجه به رابطه ۱۷ زمانی که جمعیت افزایش یابد، مقدار توان در رابطه به عدد صفر نزدیک می‌شود، بنابراین تاثیر مقدار گام زمانی بر ضریب حداکثر تقاضا کاهش می‌یابد ( $PF_{\Delta t} = PF_{60}$ ). به عنوان مثال اگر از رابطه تجربی پیشنهادی شماره ۱۴ برای محاسبه ضریب حداکثر تقاضای ساعتی ( $PF_{60}$ ) استفاده شود رابطه ۱۸ حاصل می‌گردد:

$$PF_{\Delta t} = (\Delta/745P^{-0.173} + 1) \left(\frac{\Delta t}{6}\right)^{-0.615} P^{-0.17} \dots\dots\dots (18)$$

در این رابطه P مقدار جمعیت بر حسب هزار نفر و ( $\Delta t$ ) گام زمانی بر حسب دقیقه است. با توجه به رابطه ۱۸، با افزایش جمعیت مقدار ضریب حداکثر تقاضا به عدد یک نزدیک می‌گردد، لذا حداقل مقدار ضریب حداکثر تقاضا برابر با عدد یک خواهد بود. طبق رابطه ۱۸ با افزایش جمعیت و گام زمانی، مقدار ضریب حداکثر تقاضا کاهش می‌یابد. به عنوان مثال برای جمعیت ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ نفر، با کاهش ۵۰ درصدی گام زمانی (نسبت به گام زمانی یک ساعته)، مقدار ضریب حداکثر تقاضا به ترتیب ۵۳ و ۳۳ درصد افزایش خواهد یافت.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر داده‌های جریان پیوسته مربوط به پروژه‌های مختلف در بازه زمانی سال ۱۳۹۹-۱۴۰۱ مورد بررسی و با استفاده از درون‌یابی و محاسبه حجم متوسط تقاضای آب در مدت یک ساعت، الگوی تقاضای آب ۲۴ ساعته ارائه شد. بر اساس نتایج بدست آمده یک رابطه جدید بین ضریب حداکثر تقاضا و مشخصه‌های جمعیت و گام زمانی ارائه شد. نتایج نشان داد که با افزایش جمعیت و گام زمانی، مقدار ضریب حداکثر تقاضا کاهش می‌یابد. به عنوان مثال مقدار ضریب حداکثر تقاضا در گام زمانی نیم ساعت در جمعیت ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ نفر به ترتیب حدود ۱/۵۳ و ۱/۳۳ برابر ضریب حداکثر تقاضا در گام زمانی یک ساعت خواهد بود. همچنین با کاهش مقدار گام‌های زمانی، مقادیر ضرایب حداکثر تقاضا در گام‌های زمانی مختلف از یکدیگر دور می‌شوند. همچنین نتایج بدست آمده نشان داد که مقادیر ضریب حداکثر تقاضای آب ساعتی اندازه‌گیری شده در شبکه‌های مختلف توزیع آب مورد مطالعه، با مراجع مورد استفاده در طراحی شبکه‌های توزیع آب کشور (نشریه ۳-۱۱۷) لزوماً یکسان نیست، لذا مطالعه بیشتر در مورد ضریب حداکثر تقاضا برای مقاصد طراحی و بهره‌برداری بهینه شبکه‌های آب ضروری است.

#### ۵- پی‌نوشت‌ها

- 1- Dimensionless peak factor
- 2- Peak factor
- 3- Hourly peak factor
- 4- Gumbel distribution
- 5- Instantaneous peak factor
- 6- Presented Data

## ۶- مراجع

- تابش، م.، قره خانی، ب. و حیدرزاده، ر.، (۱۳۹۴)، "بررسی میدانی ضرایب حداکثر مصرف آب (مطالعه موردی: تهران و کاشمر)"، کنفرانس و نمایشگاه مهندسی آب.
- مرادی سبزوکی، ع.، کاشفی پور، س. م. و سلیمی چمکاکایی، آ.، (۱۳۹۳)، "بررسی میدانی ضریب حداکثر تقاضا در شبکه‌های توزیع آب روستایی (شمال شرق خوزستان)"، *مجله آب و فاضلاب*، ۲۵، ۴۴-۵۲.
- معاون نظارت و راهبردی ریاست جمهوری، (۱۳۷۱)، *ضوابط طراحی سامانه‌های انتقال و توزیع آب شهری و روستایی*، نشریه ۱۱۷-۳، دفتر مهندسی و معیارهای فنی وزارت نیرو.
- معاون نظارت و راهبردی ریاست جمهوری، (۱۳۹۲)، *ضوابط طراحی سامانه‌های انتقال و توزیع آب شهری و روستایی*، نشریه ۱۱۷-۳ (بازنگری اول)، دفتر مهندسی و معیارهای فنی وزارت نیرو.
- Adams, R. W. (1961), "The Analysis of Distribution Systems", *Inst. Water Eng.*
- Babbitt, H. E. (1928), "Sewerage and Sewage Treatment", New York, NY, USA.
- Balacco, G., Carbonara, A., Gioia, A., Iacobellis, V. and Piccinni, A. F., (2017), Evaluation of peak water demand factors in Puglia (Southern Italy)", *Water*, 9, 96, <https://doi.org/10.3390/w9020096>.
- Balacco, G., Carbonara, A., Gioia, A., Iacobellis, V. and Piccinni, A. F., (2018), "Investigation of peak water demand variability at local scale in Puglia (Southern Italy)". *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 2, 674, <https://doi.org/10.3390/proceedings2110674>.
- Briere, F. G., (2014), *Drinking-water distribution, sewage, and rainfall collection*, Presses inter Polytechnique.
- Clark, J. W., Viessman, W. and Hammer, M. J., (1969), *Water supply and pollution control*, (No Title).
- Davis, C. V. and Sorensen, K. E., (1980), Handbook of applied hydraulics, *McGraw-Hill Book Co. New York, 3 rd Edition*, (02 A DAV), 1969, 1611.
- Diao, K., Barjenbruch, M. and Bracklow, U. (2010), "Study on the impacts of peaking factors on a water distribution system in Germany", *Water Science and Technology: Water Supply*, 10, 165-172, <https://doi.org/10.2166/ws.2010.168>.
- DVGW (2009), *German Technical and Scientific Association for Gas and Water*.
- Gargano, R., Tricarico, C. and De Marinis, G., (2010), "Residential water demand-daily trends", Proceedings of the Annual International Symposium on Water Distribution Systems Analysis, 1314-1323, [https://doi.org/10.1061/41203\(425\)118](https://doi.org/10.1061/41203(425)118).
- Gato-Trinidad, S. and Gan, K., (2012), "Characterizing maximum residential water demand", *Urban Water*, 122, 15-24, <https://doi.org/10.2495/uw120021>.
- Giffit, H. M. (1945), Estimating Variations in Domestic Sewage Flows, *Water Works Sewerage*.
- Goodrich, R., (1942), "Capacity tests of ground-water sources at Laramie, Wyoming. Journal (American Water Works Association), 1629-1634 , <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1942.tb17293.x>.
- Hammer, M. J. 1986. Water and wastewater technology.
- Harmon, W. G. (1918), Forecasting sewage at Toledo under dry weather conditions, *Engineering News Record* 80: 1233.
- Ippolito, G. and DE Martino, G. (1995), *Appunti di costruzioni idrauliche*, Liguori.
- Johnson, C. F. (1942). Relation between average and extreme sewage flow rates, *Eng. News Rec* 129, 500-501.
- Johnson, E. (1999), Degree of utilisation-The reciprocal of the peak factor, Its application in the operation of a water supply and distribution system, *WATER SA-PRETORIA*-, 25, 111-114.
- Martínez-SOLANO, J., Iglesias-Rey, P. L., PEREZ-GARCÍA, R. and LÓPEZ-JIMENEZ, P. A., (2008), "Hydraulic analysis of peak demand in looped water distribution networks", *Journal of Water*

- Resources Planning and Management*, 134, 504-510, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9496\(2008\)134:6\(504\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(2008)134:6(504)).
- Metcalf, L. and Eddy, H. P. (1915), *American Sewerage Practice* (Vol. 3), McGraw-Hill Book Company, Incorporated.
- Research, C. F. S. A. I. (2003), *Guidelines for Human Settlement and Design*, A report compiled under the patronage of the Department of Housing by the CSIR. Pretoria, South Africa: CSIR Building and Construction Technology.
- Scheepers, H. M., (2012), “Deriving peak factors for residential indoor water demand by means of a probability based end-use model”, PhD. Thesis, Department of Civil Engineering, Stellenbosch University.
- Tchobanoglous, G. and Schroeder, E., (1987), *Water Quality*, Addison and Wesley. Reading, MA.
- Tricarico, C., De Marinis, G., Gargano, R. & Leopardi, A., (2007), “Peak residential water demand”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, Thomas Telford Ltd, 115-121, <https://doi.org/10.1680/wama.2007.160.2.115>.
- Tricarico, C., Morley, M. S., Gargano, R., Kapelan, Z., De Marinis, G. and Savić, D., (2014), “The influence of the existing network layout on water distribution system redesign analysis”, *Journal of Hydroinformatics*, 16, 1375-1389, <https://doi.org/10.2166/hydro.2014.017>.
- Zhang, X., (2005), “Estimating peaking factors with Poisson rectangular pulse model and extreme value theory”, PhD. Thesis, Department of environmental engineering, University of Cincinnati, [https://doi.org/10.1007/978-1-4613-3638-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-3638-9_3).
- Zhang, X., Buchberger, S. G. and Van Zyl, J. E., (2005), “A theoretical explanation for peaking factors”, *Impacts of Global Climate Change*, [https://doi.org/10.1061/40792\(173\)51](https://doi.org/10.1061/40792(173)51).