

Dynamic Simulation of Water Networks to Control and Reduce Physical Unaccounted-for Water

Nima. Zorriasateyn¹,
Seyyed Mahmoud Borghet²,

شبیه‌سازی دینامیکی سیستم توزیع آب شهری در جهت کاهش و کنترل آب به حساب نیامده فیزیکی

نیما ذوالریاستین^۱، سید محمود برقی^۲

(دریافت ۸۴/۵/۲۰ پذیرش ۸۴/۹/۱)

Abstract

A significant percentage of unaccounted-for water consists of leakage in water distribution networks in Iran. To detect leakage area with less costs and time spending and then identify the exact place of it with special instruments, would be economical and a better water resource management. In this research, a real case has been selected and examined with dynamic simulation using MIKE NET. The method that has been carried out in this research based on maximizing the correlation coefficient and minimizing the sum of error squares between pressure measured inputs (observed data) and calculated pressure (by model). According to the results, dynamic simulation of municipal water distribution system can be used as a guide to determine the place and the amount of leakage. Thereby the area of large leakage can be simulated with appropriate accuracy through measured pressure. Therefor from management aspect, dynamic simulation can be used to decrease time consumption and to save costs for detecting leakage.

Keywords: *Unaccounted-for-Water, Leakage, Pressure, Simulation, Water Distribution Network.*

1- M.Sc., Student Science and Technology of Tehran Unit I.A.U. Nima_Z177@yahoo.com
2- Assoc. Prof. Dept. of Civil Engineering, Sharif University of Technology

چکیده

نشت از شبکه‌های توزیع آب در ایران، درصد قابل توجهی از تلفات آب به حساب نیامده را تشکیل می‌دهد. در حال حاضر، روشهای مختلفی برای نشت‌یابی از طریق اندازه‌گیری مقدار آن به کمک دستگاههای نشت‌یاب به کار برده می‌شوند. در این مقاله، مکان‌یابی نشت و تعیین مقدار آن، از طریق مجموعه عملیاتی مرکب از "فشارسنجی" و "شبیه‌سازی دینامیکی" به کمک یکی از نرم‌افزارهای موجود مدل‌سازی سیستم توزیع آب شهری صورت گرفته است. مدل‌سازی محل و مقدار نشت در لوله، از طریق نسبت دادن یک روزنه به گره ابتدا یا انتها و یا به نسبت مساوی به گره‌ها میسر می‌گردد. واسنجی مدل در این تحقیق، براساس بیشینه نمودن ضریب همبستگی و کمینه نمودن مجموع مربعات خطا بین داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده فشار، انجام گرفته است که اولی از طریق اطلاعات موجود و دومی توسط نرم‌افزار، به دست آمده است. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی شبکه پایلوت و مقایسه آن با نتایج واقعی اندازه‌گیری شده، نشان می‌دهد که "شبیه‌سازی دینامیکی" می‌تواند به عنوان یک روش کارآمد، برای کاهش وقت و هزینه جستجوی بی‌مورد سراسر شبکه برای نشت‌یابی، با دقت مناسب مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: آب به حساب نیامده، نشت، فشار، شبیه‌سازی، شبکه توزیع آب.

۱- کارشناس ارشد مهندسی محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران Nima_Z177@yahoo.com
۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

تمام شهرها کم و بیش با مشکل آب به حساب نیامده مواجه می‌باشند [۱]. آب به حساب نیامده به دو بخش فیزیکی و غیر فیزیکی تقسیم می‌شود.

تلفات فیزیکی به بخشی از حجم آب به حساب نیامده گفته می‌شود که از طریق نشت در شبکه توزیع آب شهری و نشت و سرریز از مخازن به هدر می‌رود. نشت آب در شبکه یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های آب به حساب نیامده فیزیکی محسوب می‌شود، به طوری که در بیشتر شهرها نیمی از آب به حساب نیامده مربوط به نشت از شبکه توزیع می‌باشد. بنابراین تعیین محل و مقدار نشت به عنوان اولین و مهم‌ترین قدم در جهت کاهش تلفات فیزیکی آب، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اگر به جای صرف وقت و هزینه زیاد در نشت‌یابی سرتاسر شبکه، بتوان با شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی شبکه، محدوده نشت را تعیین کرد، نه تنها در هزینه و زمان نشت‌یابی صرفه‌جویی می‌شود، بلکه موجب کاهش تلفات آب در اسرع وقت می‌شود.

در هنگام وقوع شکستگی یا ترک در یک ناحیه از شبکه توزیع آب، به علت افزایش سرعت جریان، میزان فشار در نقاط نزدیک به محل شکستگی کاهش می‌یابد، در صورتی که در شبیه‌سازی شبکه، این شکستگی در نظر گرفته نشود، میزان فشارگره در شبیه‌سازی بیشتر از میزان فشار واقعی به دست آمده از عملیات فشارسنجی خواهد بود. بنابراین با مجموعه عملیاتی مرکب از فشارسنجی و شبیه‌سازی هیدرولیکی در مسیرها و نقاطی خاص، می‌توان محدوده تقریبی وقوع شکستگی گزارش نشده را مشخص کرد [۲ و ۳]. در این مقاله، برای شبیه‌سازی دینامیکی شبکه توزیع آب، از نرم‌افزار مایک‌نت^۱ که از یک پردازنده تحلیل هیدرولیکی به روز برخوردار است، استفاده شده است. نوع شبیه‌سازی که در نرم‌افزار مذکور به منظور تعیین محل نشت و مقدار آن به کار گرفته شده، شبیه‌سازی دینامیکی یا دوره‌گسترش یافته^۳ برای تحلیل پاسخهای سیستم به صورت سری‌های زمانی^۴ بوده است.

۲- روش بررسی

نشت در هر جای شبکه شامل لوله و گره، ممکن است رخ دهد؛ اما در مدل‌سازی در این مقاله، محل و مقدار نشت در لوله، به گره ابتدا یا انتها و یا به نسبت مساوی، به گره‌ها اضافه می‌شود [۴]. در نرم‌افزار مزبور، گنجاندن نشت در شبکه، از طریق نسبت دادن یک روزنه با ضریب K معین به هر گره دلخواه از شبکه میسر می‌گردد

[۵ و ۶]. این گره دلخواه در واقع همان گره مشکوک به نشت می‌باشد. فرمول مورد استفاده برای شبیه‌سازی نشت در این نرم‌افزار، فرمول روزنه (اریفیس^۵) است [۷]:

$$Q_i = 3.6K \sum_{i=1}^m P_i^n h_i \quad (1)$$

که در آن، i شماره گره، Q_i دبی نشت در گره i بر حسب متر مکعب در روز، K ضریب نشت، P_i ارتفاع معادل فشار در گره i بر حسب متر، n توان معادله که بستگی به متغیرهای فشار، سطح مقطع منافذ نشت، جنس و عمر لوله و شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه دارد، h_i تعداد ساعتی در شبانه روز که فشارگره i معادل با P_i است و عدد $۳/۶$ ضریب تبدیل L/S به m^3/day می‌باشند [۸ و ۹].

تعیین محل نشت و مقدار آن در شبکه پایلوت با استفاده از داده‌های فشارسنجی شبکه در طول یک سال آبی (برای همپوشانی خطاهای احتمالی)، به عنوان داده‌های اندازه‌گیری شده فشار، صورت پذیرفته است.

قابلیت نرم‌افزار مایک‌نت، در تعیین محل و مقدار نشت در دو حالت: ۱- وجود یک نشت در شبکه (آنالیز یک نشت)، ۲- اضافه شدن یک نشت دیگر به شبکه (آنالیز دو نشت)، ارزیابی شده است [۵ و ۶].

روش تجزیه و تحلیل داده‌ها در این بررسی، به روش آمار تحلیلی و براساس بیشینه نمودن ضریب همبستگی و کمینه نمودن مجموع مربعات خطا بین داده‌های اندازه‌گیری شده (اطلاعات موجود) و محاسبه شده فشار (توسط نرم‌افزار)، انجام گرفته است. در این راستا، فعالیت‌هایی به شرح زیر برای ایجاد مدل صورت پذیرفته است.

۲-۱- تهیه فایل‌های اطلاعات ورودی

پیکربندی اطلاعات ورودی در نرم‌افزار انتخابی بر اساس پرونده^۶ اطلاعاتی نقشه‌کدگذاری شده است که هر یک از عوارض سیستم توزیع آب دارای یک جعبه اطلاعاتی منسوب به خود^۸ باشد [۵].

۲-۲- تعیین میزان مصرف گره‌ای و الگوهای حاکم بر آن

نرم‌افزار مایک‌نت، قابلیت توزیع خودکار مصارف گره‌ای براساس "مصرف کل شبکه" و یا "مصارف منطقه ای" با استفاده از دو روش طول لوله‌ها و ضرایب مصرف K_{1i} و K_{2i} را دارا می‌باشد. در هر دو روش مذکور، تخصیص مصرف کل شبکه در امتداد

⁵ Orifice

⁶ Format

⁷ File

⁸ Attribute Box

¹ Mike Net

² State-of-the-art

³ Extended Period Simulation-EPS

⁴ Time Series

لوله‌ها بر اساس توزیع مصرف محاسبه شده بین دو گره انتهایی هر لوله بوده که از روابط زیر تبعیت می‌کند [۵]

$$q_{pi} = ((Q - \sum O_i) \cdot I_i \cdot K_{1i}) / (\sum I_i \cdot K_{1i}) \quad (2)$$

که در این روابط، q_{pi} مصرف گره‌ای، Q مصرف کل شبکه، O_i مجموع مصارف اضافی، I_i طول لوله و K_{1i}, K_{2i} ضرایب مصرف از پیش تعریف شده می‌باشند.

لذا، ابتدا توزیع مصارف گره‌ای بر اساس مصارف واقعی منطقه‌ای و به روش طول لوله، صورت پذیرفته و در قسمت آنالیز حساسیت، میزان اختلاف نتایج به دست آمده فشار با روش ضرایب مصرف و بر اساس مصرف کل شبکه مورد بررسی قرار گرفته است.

لازم به ذکر است میزان مصارف منطقه‌ای از قرائت کنتور مرجع منطقه در دوره‌های متوالی مصرف یک سال آبی حاصل شده و الگوی واقعی مصرف آن منطقه به عنوان معیار توزیع مصارف گره‌ای، انتخاب شده است.

۲-۳- واسنجی^۱ مدل

در طی فرآیند واسنجی مدل، مقبولیت مدل‌سازی تأمین می‌شود. معمولاً یک مدل واسنجی نشده نمی‌تواند بیانگر سیستم واقعی باشد. از طرف دیگر، مدل واسنجی شده را می‌توان با اطمینان، برای شرایط بهره‌برداری مورد استفاده قرارداد [۸ و ۹]. نرم‌افزار مایکنت، دارای قابلیت انجام واسنجی مدل سیستم‌های هیدرودینامیکی بوده که با بهره‌گیری از الگوریتم‌های ژنتیکی^۲، ضریب زبری لوله‌های گروه بندی شده (بر حسب سن و جنس لوله) شبکه توزیع مورد مطالعه را به کمک داده‌های میدانی فشار، در بهترین حالت مطابق با آنچه در سیستم در حال رخداد است، قرار می‌دهد (شکل ۱). از این رو، برای جمع‌آوری اطلاعات واسنجی، نیاز به اطلاعات میدانی یا واقعی فشار در بعضی نقاط می‌باشد. از طرفی، با توجه به محدود بودن تعداد فشارسنجها نسبت به تعداد نقاط موجود، انتخاب نقاط برای نصب فشارسنج از اهمیت بالایی برخوردار بوده و می‌تواند دقت کار را بالا برده و موجب صرفه‌جویی در زمان شود. لذا، تعیین ایستگاههای فشارسنجی به شرح زیر انجام گرفته است.

به طور کلی با توجه به وضعیت شبکه توزیع و وضعیت توپوگرافی حاکم بر آن، پراکندگی فشارسنجهای نصب شده بر روی سیستم توزیع آب، باید به گونه‌ای باشد که بتوان با قرائت آنها وضعیت فشار سیستم را در کلیه نقاط بادقت قابل قبول برآورد و

تعیین نمود. فشار خطوط اصلی شبکه توزیع آب، تأثیر قابل توجهی در سایر نقاط شبکه اعمال می‌نماید. لذا، نقاط نصب فشارسنج معمولاً بر روی گره‌های خطوط اصلی شامل گره‌های ورودی و خروجی و نیز گره‌های واقع بر خطوط انتقال و لوله‌های با اقطار بالا می‌باشد. بنابراین با توجه به تأثیر رقوم ارتفاعی نقاط در فشار بیشینه و کمینه، لازم است تعداد و محل نصب ایستگاههای فشارسنجی در سیستم توزیع آب شهر پس از بررسی دقیق نقشه‌های توپوگرافی منطقه و تعیین وضعیت و مقدار شیب زمین در جهات مختلف و شناسایی نقاط مرتفع و پست، تعیین شود. در مطالعه شبکه پایلوت، پس از بررسی دقیق منطقه پایلوت و با کمک سعی و خطا، ۵ نقطه مطابق با شکل ۲ برای نصب فشارسنج با شرایط ارائه شده تعیین گردیده است.

۲-۴- محل‌یابی نشت و تعیین مقدار دبی آن

برای محل‌یابی نشت و تعیین مقدار دبی آن به شرح زیر عمل شد [۵ و ۷]:

- ابتدا یک گره از ۵ گره مورد نظر برای فشارسنجی، به طور تصادفی به عنوان حدس اول نشت فرض شد.

- با تغییر مقدار ضریب K (ضریب نشت) در گره فوق در هر بار تحلیل شبکه، بهترین ضریب تعیین^۳ (R^2) بین اطلاعات فشار اندازه‌گیری شده و محاسبه شده گره‌های شبکه تعیین شد. این مقدار K ، به عنوان حدس اولیه ضریب نشت برای محاسبات بعدی در نظر گرفته شد.

- با قرار دادن ضریب نشت اولیه فوق در یکی دیگر از گره‌ها و آنالیز مجدد شبکه، ضریب همبستگی فشار بین داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در گره‌ها به دست آمد.

- با مقایسه ضرایب همبستگی فشار به دست آمده در هر بار تغییر محل گره دارای نشت، گره‌ای که دارای بزرگترین ضریب همبستگی فشار بوده، به عنوان گره دارای نشت شناخته شد.

- سپس ضریب K در گره‌ای که در بند قبل تعیین گردید، در هر بار آنالیز مجدد شبکه، آن قدر تغییر داده شد تا بزرگترین ضریب همبستگی فشار و کوچکترین مجموع مربعات خطا^۴، برای شبکه به دست آمد.

- زمانی که ضریب همبستگی فشار، بیشینه و مجموع مربعات خطا، کمینه شدند، دبی منتج از این مقدار K ، به عنوان مقدار نهایی نشت شناخته شد.

۲-۵- معرفی پایلوت مورد مطالعه

شهر پارس آباد واقع در شمال استان اردبیل با جمعیتی بالغ بر

³ Coefficient of Determination

⁴ Sum of Square Error-SSE

¹ Calibration

² Genetic Algorithms-GAs

بر طبق بررسیهای به عمل آمده بر روی وضعیت خطوط لوله شبکه این شهر، در مجموع حدود ۱۴۳ کیلومتر خط لوله کارگذاری شده که وضعیت آنها به تفکیک جنس در شکل ۳ آورده شده است. بر طبق آمار تولید و مصرف آب این شهر در سال ۱۳۸۲، میزان کل آب تولیدی، ۷۸۳۰۹۱۵ مترمکعب و کل میزان آب فروخته شده، ۳۷۲۷۷۲۹ متر مکعب بوده است که بر این اساس میزان سرانه تولید، سرانه مصرف و متوسط سرانه آب به حساب نیامده (فیزیکی + غیر فیزیکی) در سال مورد بررسی، به ترتیب برابر

۹۰۰۰۰ نفر و مساحتی در حدود ۱۰۰۰ هکتار، در منطقه نیمه صحرائی گرم با زمستانهای معتدل قرار دارد [۱۰]. شبکه مورد مطالعه مطابق با شکل ۲، دارای یک مخزن ۲۵۰۰۰ مترمکعبی، ۱۶۴ اگره و ۱۶۷ لوله بوده که به ۱۲ گروه (بر اساس سن و جنس لوله ها) تقسیم گردیده و ضریب هیزن ویلیامز (C_H) متناظر با هر یک از گروهها، تعریف و پس از مقبولیت مدل طی فرآیند واسنجی (شکل ۱)، مطابق با جدول ۱ پذیرفته شده است.



شکل ۱- پیشرفت واسنجی مدل شبکه پایلوت



شکل ۲- جانمایی متعلقات شبکه آبرسانی منطقه پایلوت، جانمایی ایستگاههای فشارسنجی درون منطقههای فشاری و وضعیت فشار در گرههای سیستم توزیع در زمان اوج مصرف

جدول ۱- گروه‌بندی ضریب هیزن ویلیامز لوله‌ها بر حسب سن و جنس لوله

شماره گروه	گروه بندی لوله ها بر حسب جنس و سن لوله (سال)		ضریب هیزن ویلیامز (C _H)	
	کمینه	بیشینه	پذیرفته شده پس از واسنجی	
۱	۰ ≤ PE ≤ ۵	۱۳۵	۱۴۵	۱۳۶/۴۸
۲	۶ ≤ PE ≤ ۱۰	۱۲۵	۱۳۵	۱۲۵/۰۰
۳	۱۱ ≤ PE ≤ ۲۰	۱۱۵	۱۲۵	۱۱۵/۹۷
۴	۲۱ ≤ PE ≤ ۳۰	۱۰۵	۱۱۵	۱۱۰/۸۴
۵	۰ ≤ AC ≤ ۵	۱۲۵	۱۳۵	۱۲۵/۰۰
۶	۶ ≤ AC ≤ ۱۰	۱۱۵	۱۲۵	۱۱۹/۳۶
۷	۱۱ ≤ AC ≤ ۲۰	۱۰۵	۱۱۵	۱۱۵/۰۰
۸	۲۱ ≤ AC ≤ ۳۰	۹۵	۱۰۵	۱۰۰/۰۴
۹	۶ ≤ GL ≤ ۱۰	۱۰۵	۱۱۵	۱۱۵/۰۰
۱۰	۱۱ ≤ GL ≤ ۲۰	۹۵	۱۰۵	۱۰۵/۰۰
۱۱	۲۱ ≤ GL ≤ ۳۰	۸۵	۹۵	۹۵/۰۰
۱۲	۲۱ ≤ ST ≤ ۳۰	۷۵	۸۵	۷۹/۳۰

توضیحات: PE پلی اتیلن، AC آزیست، GL گالوانیزه و ST فولادی



شکل ۳- وضعیت جنس لوله های شبکه منطقه پایلوت

۳-۱- آنالیز یک نشت

مطابق توضیحات بخش قبل، به عنوان اولین حدس، ضریب K اولیه برابر ۰/۱۲ و گره شماره ۴ به عنوان محل نشت انتخاب شد. سپس با تغییر ضریب K و سعی و خطا در هر بار آنالیز شبکه، بهترین ضریب همبستگی بین اطلاعات فشار مشاهده و اندازه‌گیری شده، در K معادل ۰/۱۷۲ به دست آمد.

پس از آن، شبکه با همین ضریب، در چهار گره دیگر آنالیز گردید. ضرایب همبستگی فشار برای گره‌های فوق به ترتیب ۰/۹۹۶، ۰/۹۹۶، ۰/۹۹۶ و ۰/۹۸۷ و مجموع مربعات خطا، به ترتیب ۵/۱۲، ۵/۵۹، ۵/۷۴ و ۲۱/۱۵ به دست آمدند. بنابراین با توجه به اینکه گره دوم، دارای بزرگ‌ترین ضریب همبستگی فشار و کمترین مجموع مربعات خطا بود، در نتیجه به عنوان محتمل‌ترین نقطه نشت شناسایی شد. برای به دست آوردن ضریب همبستگی نزدیک تر به

۲۳۸، ۱۱۳ و ۱۲۵ (روز/نفر/لیتر) قابل برآورد است [۱۰]. لازم به توضیح است متوسط تلفات سرانه آب با اجرای خوب و بهره‌برداری صحیح و دقیق سیستم‌های آبرسانی شهری می‌تواند تا میزان ۲۰ (روز/نفر/لیتر) کاهش یابد [۱۱].

۳- نتایج و بحث

با توجه به مطالب یاد شده، نتایج بر اساس آنالیز یک نشت در شبکه، آنالیز دو نشت در شبکه، آنالیز حساسیت فشار بر اساس روشهای توزیع مصارف گره‌ای، آنالیز حساسیت ضریب K در مکان‌یابی یک نشت و دو نشت و نهایتاً برآورد تلفات فیزیکی در خطوط لوله شبکه پایلوت بر پایه اندازه‌گیری منطقه‌ای و مدل تهیه شده، ارائه می‌گردد.

جدول ۲- نتایج آنالیز مکان‌یابی نشت در شبکه پایلوت

توضیحات		مربعات خطا	خطا	فشار محاسبه شده	فشار اندازه‌گیری شده	ضریب نشت	ایستگاه فشارسنجی
مجموع مربعات خطا	ضریب تعیین	(مترمربع)	(متر)	(متر)	(متر)		
SSE = ۵/۷۱	R ² = ۰/۹۹۶	۰/۰۰۰۹	۰/۰۳	۱۶/۷۳	۱۶/۷۰	k = ۰/۱۲	۱
		۵/۷۱۲۱	۲/۳۹	۲۰/۳۹	۱۸/۰۰		۲
		۰/۰۰۱۶	-۰/۰۴	۳۸/۸۶	۳۸/۹۰		۳
		۰/۰۰۰۰	۰/۰۰	۱۲/۵۰	۱۲/۵۰		۴
		۰/۰۰۲۵	۰/۰۵	۷/۴۵	۷/۴۰		۵
SSE = ۵/۵۷	R ² = ۰/۹۹۶	۰/۰۰۰۱	۰/۰۱	۱۶/۷۱	۱۶/۷۰	k = ۰/۱۵	۱
		۵/۵۶۹۶	۲/۳۶	۲۰/۳۶	۱۸/۰۰		۲
		۰/۰۰۲۵	-۰/۰۵	۳۸/۸۵	۳۸/۹۰		۳
		۰/۰۰۱۶	-۰/۰۴	۱۲/۴۶	۱۲/۵۰		۴
		۰/۰۰۰۴	۰/۰۲	۷/۴۲	۷/۴۰		۵
SSE = ۵/۴۸	R ² = ۰/۹۹۶	۰/۰۰۰۱	-۰/۰۱	۱۶/۶۹	۱۶/۷۰	k = ۰/۱۷۲	۱
		۵/۴۷۵۶	۲/۳۴	۲۰/۳۴	۱۸/۰۰		۲
		۰/۰۰۳۶	-۰/۰۶	۳۸/۸۴	۳۸/۹۰		۳
		۰/۰۰۳۶	-۰/۰۶	۱۲/۴۴	۱۲/۵۰		۴
		۰/۰۰۰۰	۰/۰۰	۷/۴۰	۷/۴۰		۵
SSE = ۲۱/۱۵	R ² = ۰/۹۸۷	۰/۰۰۲۵	۰/۰۵	۱۶/۷۵	۱۶/۷۰	k = ۰/۱۷۲	۱
		۵/۸۵۶۴	۲/۴۲	۲۰/۴۲	۱۸/۰۰		۲
		۰/۰۰۰۹	-۰/۰۳	۳۸/۸۷	۳۸/۹۰		۳
		۰/۰۰۳۶	۰/۰۶	۱۲/۵۶	۱۲/۵۰		۴
		۱۵/۲۸۸۱	-۳/۹۱	۳/۴۹	۷/۴۰		۵
SSE = ۵/۷۴	R ² = ۰/۹۹۶	۰/۰۰۰۴	-۰/۰۲	۱۶/۶۸	۱۶/۷۰	k = ۰/۱۷۲	۱
		۵/۷۱۲۱	۲/۳۹	۲۰/۳۹	۱۸/۰۰		۲
		۰/۰۲۵۶	-۰/۱۶	۳۸/۷۴	۳۸/۹۰		۳
		۰/۰۰۰۹	۰/۰۳	۱۲/۵۳	۱۲/۵۰		۴
		۰/۰۰۲۵	۰/۰۵	۷/۴۵	۷/۴۰		۵
SSE = ۵/۵۹	R ² = ۰/۹۹۶	۰/۰۱۲۱	-۰/۱۱	۱۶/۵۹	۱۶/۷۰	k = ۰/۱۷۲	۱
		۵/۵۶۹۶	۲/۳۶	۲۰/۳۶	۱۸/۰۰		۲
		۰/۰۰۴۹	-۰/۰۷	۳۸/۸۳	۳۸/۹۰		۳
		۰/۰۰۰۱	۰/۰۱	۱۲/۵۱	۱۲/۵۰		۴
		۰/۰۰۱۶	۰/۰۴	۷/۴۴	۷/۴۰		۵
SSE = ۵/۱۲	R ² = ۰/۹۹۶	۰/۰۰۲۵	۰/۰۵	۱۶/۶۵	۱۶/۷۰	k = ۰/۱۷۲	۱
		۵/۱۰۷۶	۲/۲۶	۲۰/۲۶	۱۸/۰۰		۲
		۰/۰۰۴۹	۰/۰۷	۳۸/۸۳	۳۸/۹۰		۳
		۰/۰۰۴۹	۰/۰۷	۱۲/۴۳	۱۲/۵۰		۴
		۰/۰۰۲۵	۰/۰۵	۷/۳۵	۷/۴۰		۵

ادامه جدول ۲- نتایج آنالیز مکان‌یابی نشت در شبکه پایلوت

ایستگاه فشارسنجی	ضریب نشت	فشار اندازه‌گیری شده (متر)	فشار محاسبه شده (متر)	خطا (متر)	مربعات خطا (مترمربع)	توضیحات
۱		۱۶/۷۰	۱۶/۲۲	۰/۴۸	۰/۲۳۰۴	
۲	$k = ۰/۶۱$	۱۸/۰۰	۱۹/۵۸	۱/۵۸	۲/۴۹۶۴	$R^2 = ۰/۹۹۷$ $SSE = ۳/۶۸$
۳		۳۸/۹۰	۳۸/۶۱	۰/۲۹	۰/۰۸۴۱	
۴		۱۲/۵۰	۱۱/۸۴	۰/۶۶	۰/۴۳۵۶	
۵		۷/۴۰	۶/۷۴	۰/۶۶	۰/۴۳۵۶	
۱	$k = ۰/۶۱$	۱۶/۷۰	۱۶/۰۸	۰/۶۲	۰/۳۸۴۴	$R^2 = ۰/۹۹۶$ $SSE = ۴/۶۲$
۲		۱۸/۰۰	۱۹/۹۹	۱/۹۹	۳/۹۶۰۱	
۳		۳۸/۹۰	۳۸/۶۴	۰/۲۶	۰/۰۶۷۶	
۴		۱۲/۵۰	۱۲/۱۷	۰/۳۳	۰/۱۰۸۹	
۵		۷/۴۰	۷/۰۹	۰/۳۱	۰/۰۹۶۱	
۱		۱۶/۷۰	۱۶/۴۰	۰/۳۰	۰/۰۹۰۰	
۲		۱۸/۰۰	۲۰/۱۰	۲/۱۰	۴/۴۱۰۰	
۳	$k = ۰/۶۱$	۳۸/۹۰	۳۸/۳۹	۰/۵۱	۰/۲۶۰۱	$R^2 = ۰/۹۹۶$ $SSE = ۴/۸۸$
۴		۱۲/۵۰	۱۲/۲۴	۰/۲۶	۰/۰۶۷۶	
۵		۷/۴۰	۷/۱۷	۰/۲۳	۰/۰۵۲۹	
۱		۱۶/۷۰	۱۶/۳۹	۰/۳۱	۰/۰۹۶۱	
۲		۱۸/۰۰	۱۹/۸۸	۱/۸۸	۳/۵۳۴۴	
۳		۳۸/۹۰	۳۸/۶۷	۰/۲۳	۰/۰۵۲۹	
۴	$k = ۰/۶۱$	۱۲/۵۰	۱۱/۸۷	۰/۶۳	۰/۳۹۶۹	$R^2 = ۰/۹۹۶$ $SSE = ۴/۳۰$
۵		۷/۴۰	۶/۹۳	۰/۴۷	۰/۲۲۰۹	
۱		۱۶/۷۰	۱۶/۷۱	۰/۰۱	۰/۰۰۰۱	
۲		۱۸/۰۰	۲۰/۳۶	۲/۳۶	۵/۵۶۹۶	
۳		۳۸/۹۰	۳۸/۸۵	۰/۰۵	۰/۰۰۲۵	
۴		۱۲/۵۰	۱۲/۵۰	۰/۰۰	۰/۰۰۰۰	
۵	$k = ۰/۶۱$	۷/۴۰	۰/۷۳	۶/۶۷	۴۴/۴۸۹۰	$R^2 = ۰/۹۷۶$ $SSE = ۵۰/۰۶$

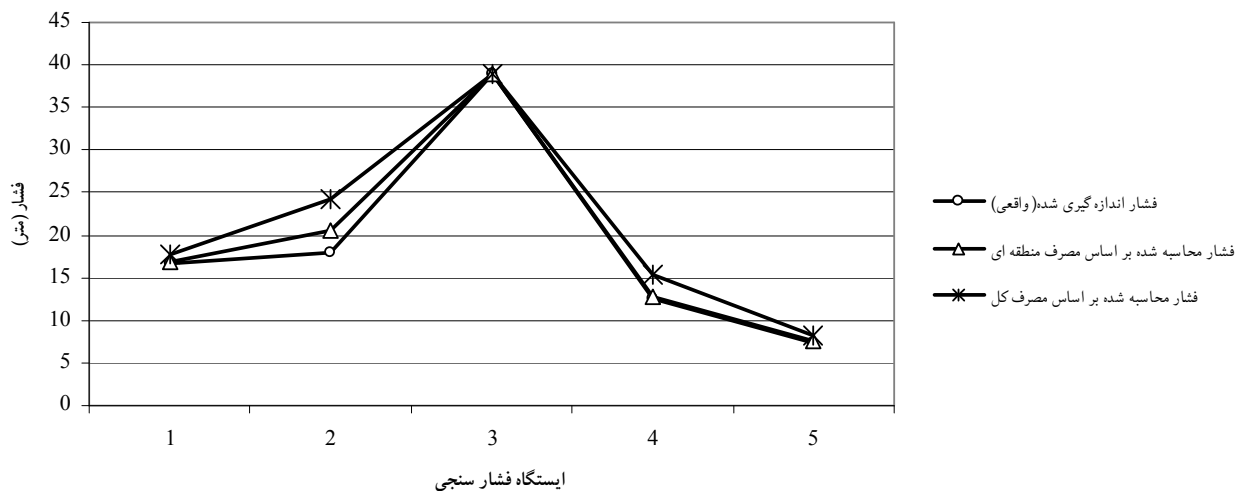
دیگر آنالیز شد و ضرایب تعیین فشار به ترتیب $۰/۹۹۶$ ، $۰/۹۹۶$ ، $۰/۹۹۶$ ، $۰/۹۹۶$ و $۰/۹۷۶$ به دست آمدند. همچنین مجموع مربعات خطا برای گره‌های مذکور به ترتیب $۴/۶۲$ ، $۴/۸۸$ ، $۴/۳۰$ و $۵۰/۰۶$ محاسبه گردید.

با توجه به نتایج ضرایب تعیین و مجموع مربعات خطا، گره چهارم محتمل‌ترین نقطه دوم نشت است. جدول ۲، نمایانگر فرآیند آنالیز مکان‌یابی نشت در شبکه پایلوت می‌باشد.

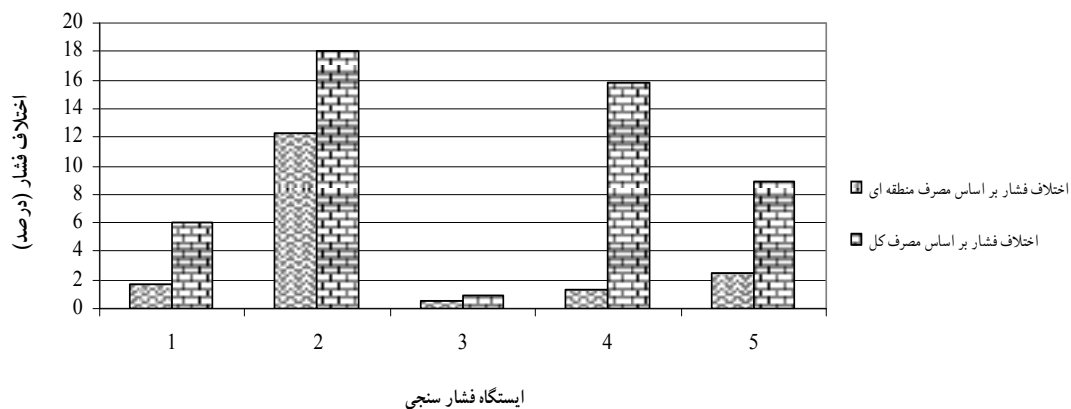
یک، عدد K در گره دوم، باز هم با سعی و خطا در هر بار آنالیز، تغییر داده شد. بر این اساس در $K=۰/۶۱$ ، بزرگترین ضریب تعیین ($۰/۹۹۷$) و کمترین مجموع مربعات خطا ($۳/۶۸$) به دست آمد.

۲-۳- آنالیز دو نشت

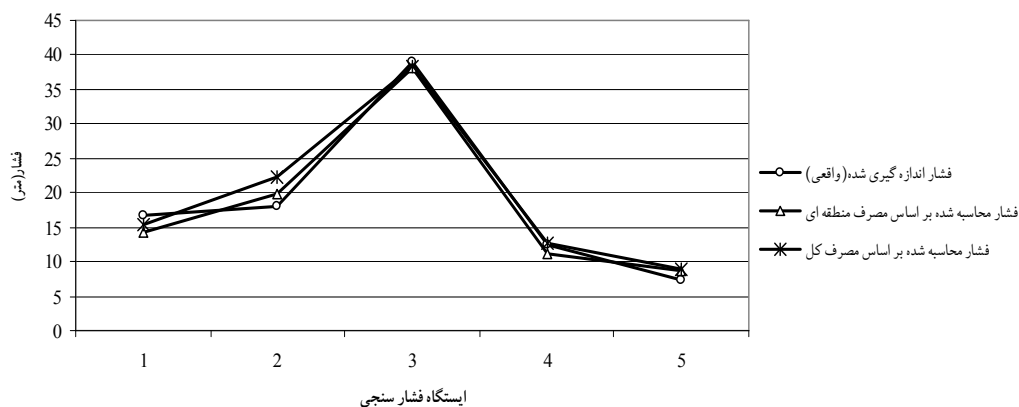
از آنجا که گره دوم به عنوان محل یک نشت مشخص گردید، بنابراین در آنالیز دو نشت، تنها کافی بود محل دومین نشت به دست آید. برای این منظور، هر بار شبکه با $K=۰/۶۱$ در چهارگره



شکل ۴- نتایج آنالیز حساسیت فشار بر اساس توزیع مصارف گره ای با روش طول لوله



شکل ۵- نتایج اختلاف فشار محاسبه شده بر اساس توزیع مصارف گره ای با روش طول لوله



شکل ۶- نتایج آنالیز حساسیت فشار بر اساس توزیع مصارف گره ای با روش ضرایب مصارف

۳-۳- آنالیز حساسیت

۱-۳-۳ آنالیز حساسیت فشار، بر اساس توزیع مصارف گره‌ای با روش طول لوله

در مرحله نخست، توزیع مصارف گره‌ای بر اساس مصارف منطقه‌ای و به روش طول لوله تعیین گردید.

در این قسمت، توزیع مصارف بر اساس مصرف کل منطقه صورت گرفت. میزان اختلاف نتایج به دست آمده فشار در نقاط کنترلی که حداکثر معادل با ۱۸ درصد می‌باشد در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

۲-۳-۳ آنالیز حساسیت فشار بر اساس توزیع مصارف گره‌ای با روش ضرایب مصارف

پس از آنکه روش طول لوله برای تعیین مصارف گره‌ای استفاده گردید، در این قسمت، روش ضرایب مصرف برای توزیع مصارف گره‌ها به کار برده شد. میزان اختلاف نتایج به دست آمده فشار در نقاط کنترلی که حداکثر معادل با ۲۱ درصد می‌باشد، در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است.

۳-۳-۳ آنالیز حساسیت ضریب K در مکان‌یابی یک نشت و دو نشت

در این قسمت، میزان اختلاف نتایج به دست آمده ضریب نشت در نقاط کنترلی، با دو روش توزیع مصارف گره‌ای در

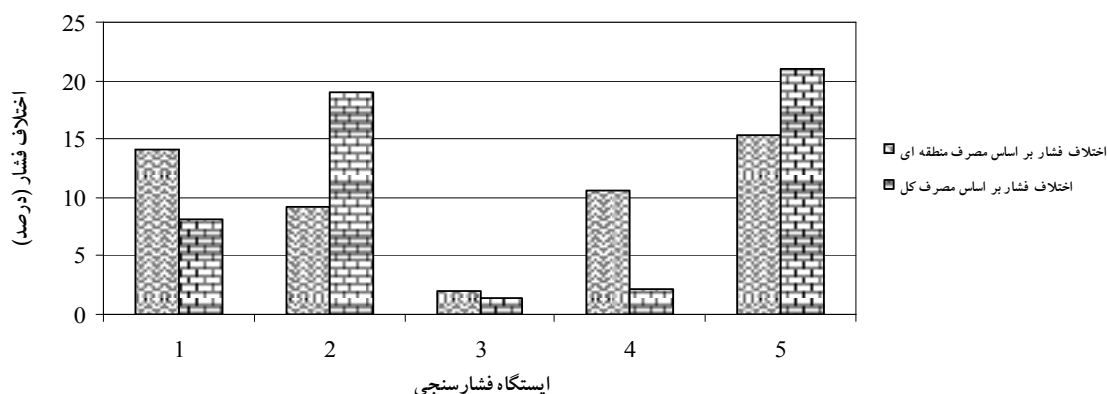
مکان‌یابی یک نشت و دو نشت، مورد بررسی قرار گرفت که در شکل ۸ نشان داده شده است.

۳-۴- برآورد تلفات فیزیکی در خطوط لوله شبکه پایلوت

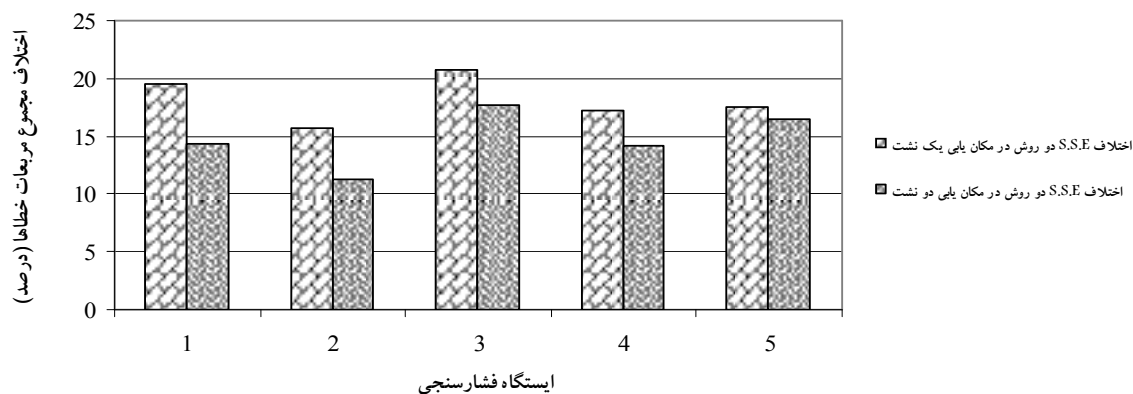
۱-۴-۳- اندازه‌گیری منطقه‌ای^۱

بروز نشت در خطوط لوله به دو صورت مرئی و نامرئی یا نشتهای بزرگ و ریز یا به عبارتی تلفات زمینه^۲ و تلفات ناشی از شکستگیها^۳ یا حوادث و اتفاقات قابل تقسیم است [۱۲]. در روش اندازه‌گیری منطقه‌ای، دبی کل ورودی به منطقه ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ اشتراک اندازه‌گیری شده و کنتورهای مشترکین نیز به طور مرتب قرائت می‌گردند که در صورت اختلاف قابل توجه مصرف، بازرسی برای پیدا کردن محل‌های نشت، به منطقه اعزام می‌شوند. در این خصوص، براساس محاسبات و برآوردهای انجام شده، در مجموع متوسط تلفات روزانه از خطوط لوله به میزان ۳۶۴۵ مترمکعب در روز برآورد گردیده است [۱۰] که بیش از ۱۷ برابر استانداردهای موجود می‌باشد [۱۳].

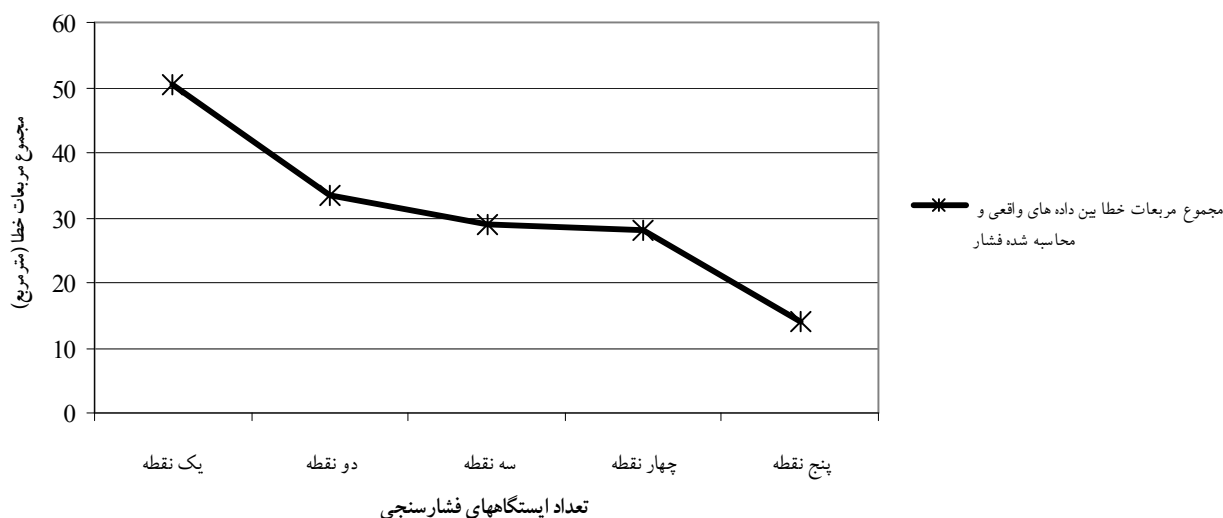
- ¹ District Metering
² Background Losses
³ Burst Losses



شکل ۷- نتایج اختلاف فشار محاسبه شده بر اساس توزیع مصارف گره‌ای با روش ضرایب مصارف



شکل ۸- نتایج آنالیز حساسیت ضریب K در مکان‌یابی یک نشت و دو نشت



شکل ۹ - نتایج آنالیز حساسیت دقت شبیه سازی به تعداد نقاط اندازه گیری فشار

۳-۴-۲-مدل

با توجه به آنچه در قسمت آنالیز آماری حاصل گردید، مقدار ضریب K (ضریب نشت) برای محتمل ترین گره نشت (گره دوم) در شبکه پایلوت، $K=0/61$ به دست آمد. لذا دبی منتج از این مقدار K (مقدار نهایی نشت) براساس رابطه ۱ فرمول روزنه (أریفیس) با توان معادله $n=1/12$ برابر خواهد بود با

$$Q_i = 3.6K \sum_{i=1}^m P_i^n h_i$$

$$Q_i = 0.61 (20^{1.124} + 30^{1.126} + 50^{1.126} + 60^{1.128}) 3.6$$

$$= 3623 \text{ m}^3/\text{day}$$

همان طور که دیده می شود، تفاوت بین اندازه گیری میدانی و استفاده از نرم افزار برای برآورد تلفات فیزیکی در خطوط لوله پایلوت مورد نظر بسیار کم می باشد. باید در نظر داشت که اندازه گیریهای میدانی نیز می توانند خطا داشته باشند، همان طور که تعداد بیشتر نقاط اندازه گیری فشار برای نرم افزار نیز می تواند مؤثر باشد. با توجه به شکل ۹، هرچه تعداد نقاط (نمونه) فشارسنجی بیشتر باشد، می توان نتایج مطمئن تری را در تعیین محل و مقدار نشت ارائه کرد. اما باید توجه داشت همواره محدودیتهایی در تعداد ایستگاهها، از نظر امکانات ابزاری و انسانی و مشکلات موجود در نصب، کنترل و قرائت مرتب آنها وجود دارد.

لازم به توضیح است برای فشار و نشت در شبکه های توزیع آب برای توان n ، دامنه تغییرات $0/24$ تا $1/98$ ، به دست آمده است [۱۳، ۱۴، ۱۵]؛ اما رابطه به دست آمده برای توان معادله $n=1/12$ ، به دلایل استفاده از پایلوت واقعی و «متغیر در نظر گرفتن فشار» در نقاط مختلف شبکه، از قابلیت اعتماد بیشتری برخوردار است [۱۴]. از طرف دیگر، میزان نشت در شبکه پایلوت براساس $n=1/12$ در بازه $5 \pm$ درصد، حساسیتی حداکثر معادل با ۱۷ درصد نشان می دهد که این نشان از اهمیت دقت در استفاده از ضریب n دارد؛ لذا نیاز به مطالعات و تحقیقات بیشتری در این زمینه می باشد.

۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده، شبیه سازی دینامیکی سیستم توزیع آب آشامیدنی می تواند به عنوان یک روش کارآمد برای کاهش وقت و هزینه جستجوی بی مورد سراسر شبکه برای نشت یابی، مورد استفاده قرار گیرد؛ به طوری که با اندازه گیری فشار شبکه در نقاطی خاص و استفاده از آن به عنوان داده های ورودی به نرم افزارهای مدل سازی می توان محدوده نشتهای بزرگ را با دقت مناسبی شبیه سازی کرد.

۵- مراجع

- ۱- شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور. (۱۳۷۶). گزارش مطالعات کاهش آب به حساب نیامده شهرها و وضعیت استانها، طرح ملی تحقیق، تهران.
- 2-Warusamana, R. (1997). "Reduction of UFW in the greater Colombo area." *Proc., First International Seminar on Unaccounted-for Water*, World Bank, Tehran.
- 3-Yepes, G. (1997). "Reduction of UFW: the job can be done!" *Proc., First International Seminar on Unaccounted-for Water*, World Bank, Tehran.
- 4-Germanopoulos, G. (1985). "A Technical Note on The Inclusion of Pressure Dependent Demand and Leakage Terms in Water Supply Network Models." *J. Civil Engineering Systems, ASCE*, 2, 171-179.
- 5-Petr, I. (2003). "MIKE NET user manual." (CD-Rom), Water & Environment, DHI.
- 6-Rossman, L.A. (2000). "EPANET2 user manual." (CD-Rom), U.S.EPA.
- 7-Pudar, R.S., and Liggett, J.A. (1992). "Leaks in Pipe Networks." *J. Hydraulic Engineering, ASCE*, 118(7), 28-34.
- 8-Shamir, U., and Howard, C.D.D. (2000). "Management of Urban Water." *J. Water Resources Planning & Management, ASCE*, 126 (6), 100-107.
- 9-Jeffcoat, P., and Sarvanapavan, A. (1987). *The Reduction and control of unaccounted-for Water*. World Bank, Washington, USA, 43-47.
- ۱۰- مهندسان مشاور نقش پیراوشن. (۱۳۸۲). طرح تفصیلی شهر پارس آباد، سازمان مسکن و شهرسازی استان اردبیل.
- 11-Linsley, R.K., Franzini, J.B., Freyberg, D.L., and Tchobanoglous, G. (1992). *Water resource engineering*, 4th Ed., McGraw-Hill Inc., New York.
- 12-Lambert, A., and Hirner, W. (2000). *Losses from water supply systems: standard recommended performance measures*, International Water Association (IWA), 133-140.
- 13- Jeffs, C., Lloyd, C., and Posoishil, D. (2001). *An introduction to water loss and leak detection*, National Rural Water Association (NRWA), 55-59.
- ۱۴- غزلی، ع.ا. (۱۳۸۱). کنترل و کاهش آب به حساب نیامده شهرها، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف.
- ۱۵- تابش، م. (۱۳۷۸). مبانی تئوریک نشت در شبکه‌های توزیع آب شهری، طرح ملی تحقیق، تهران.