بررسي نقش عوامل مؤثر بر فراواني حوادث در لوله‌هاي اصلي آب رساني با استفاده از الگوي رگرسيوني تركيبي

مسعود تابش[*۱]، آرش آقايي[۲] و جليل ابريشمي[۳]

[۱]دانشيار و عضو قطب علمي مديريت و مهندسي زيرساخت ها - دانشكده مهندسي عمران پرديس دانشكده‌هاي فني - دانشگاه تهران

[۲]دانش آموخته كارشناسي ارشد مهندسي عمران آب و مدرس دانشگاه آزاد اسلامي واحد يزد

[۳]دانشيار گروه مهندسي عمران - دانشكده مهندسي - دانشگاه فردوسي مشهد

(تاريخ دريافت ۸۵/۱۲/۱۲ ، تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۶/۱۲/۱ ، تاريخ تصويب ۸۷/۲/۲۹)

چكيده

شبكه‌هاي توزيع آب شهري سهم قابل توجهي از شريان‌هاي اساسي تأمين كننده خدمات آبي به مردم را دربر مي‌گيرند و به دليل اين كه در طي زمان‌هاي اخير مسئوليت مهم راضي نگاه داشتن مردم نسبت به تأمين آب بر عهده سيستم‌هاي توزيع آب بوده، پرهيز از حوادثي چون شكست لوله‌ها و اجزاي ديگر شبكه كه باعث آسيب رساندن به سلامت ساختاري و كارآيي شبكه‌ها مي‌شود، همواره مدّنظر قرار گرفته است. اين مقاله براي بهبود مدل‌سازي شكست لوله‌ها نخست به بررسي و تحليل عوامل اساسي در شكست مي‌پردازد و در ادامه با بررسي انواع ابزارهاي رياضي كلاسيك در تشريح فرآيندهايي كه باعث شكست در لوله‌هاي آبي مي‌شوند، براي پيش‌بيني شكست، مدلي مفيد و مؤثر كه افزايش خرابي و زوال در لوله‌ها را با عواملي يكنواخت ومستقل از زمان (دائمي) چون سن، جنس و قطر لوله و هم چنين عامل فشار آب (غيردائمي) مرتبط مي‌سازد، ارائه مي شود. روش داده‌كاوي پيشنهاد شده تحت عنوان رگرسيون چندجمله‌اي تكاملي، عبارت‌هاي سمبليك (عوامل شكست) و عددي (ضرائب) را با هم تركيب مي‌كند. هم چنين در اين پژوهش، اثر نوفه‌هاي عامل غيردائمي فشار با روند يكنواخت شكستي كه عوامل دائمي پديد مي‌آورند، تركيب مي‌شود. جهت ارزيابي روش ارائه شده نيز بخشي از شبكه‌ي آب رساني شهري ناحيه‌ي چهار شهر مشهد انتخاب شده است. با توجه به معيار قطر- جنس در گروه‌بندي لوله‌ها و هم چنين در نظر گرفتن شرايط هيدروليكي و فشاري در منطقه به عنوان معيار پهنه‌بندي فشار در شبكه، فرم سمبليک مدل‌ها به‌خوبي نشان مي‌دهد كه افزايش نرخ شكست با افزايش سن، طول و فشار لوله در ارتباط بوده و هم چنين نسبتي معكوس بين كاهش نرخ شكست با افزايش قطر وجود دارد. از طرف ديگر مشاهده شد كه در اين شبكه تعداد انشعابات برروي تعداد شكست ها مؤثر نبوده اند. هم چنين ساختار سيمبوليک ايجاد شده براي مدل هاي شكست در لوله‌هاي منطقه، كمک شاياني به بهينه‌سازي زمان تعويض لوله‌ها با توجه به تأثير بيشتري كه يک پارامتر در مدل اعمال كرده است، مي‌نمايد.

واژه‌های كليدی: شبكه‌هاي توزيع آب شهري - حوادث لوله‌ها - داده كاوي - عوامل شكست - روش‌هاي پيش‌بيني شكست - رگرسيون چند جمله‌اي تكاملي

مقدمه

مديريت بحران، براي برنامه‌ريزي بازسازي سيستم توزيع آب شهري به عنوان يكي از شريان‌هاي اساسي تأمين كننده خدمات آبي و هم چنين گران ترين و پرهزينه‌ترين بخش‌هاي يک سيستم آب رساني، نياز به يک روش مناسب براي تجزيه و تحليل اطلاعات دارد. در اين ميان با توجه به اين كه از شكست لوله ها به‌عنوان يک شاخص زوال و كهنگي در ساختار يك سيستم انتقال و توزيع آب ياد مي‌شود و اثرات آن حتي چند ماه بعد از يک حادثه قابل مشاهده است، هم چنين افزايش هزينه‌هاي مستقيم اقتصادي ناشي از شكست لوله‌ها (از قبيل سرمايه‌گذاري در نوسازي و ...) به همان اندازه هزينه‌هاي غير مستقيم وابسته به آن‌ها (مانند هزينه‌هاي خسارت آب)، لزوم شناسايي الگوي شكست لوله‌هاي اصلي آب رساني در يك دوره زماني و جستجو براي يافتن يك استراتژي نوسازي بهينه در شبكه‌هاي آبي را ضروري مي سازد. ازطرف ديگر چون بازسازي سيستم‌ها و تأسيسات آب رساني همواره نيازمند سرمايه‌گذاري كلان مي‌باشد، بحث بهينه‌سازي بازسازي سيستم‌هاي آب رساني به عنوان يک ضرورت اجتناب ناپذير مطرح مي باشد. در همين راستا يكي از اساسي‌ترين موضوعات مطرح در بحث

* نويسنده مسئول : تلفن : ۶۱۱۱۲۲۵۸ , فاكس : ۶۶۴۰۳۸۰۸ , Email: mtabesh@ut.ac.ir

بهينه‌سازي، تخمين يا پيش‌بيني شكست در شبكه‌هاي توزيع آب است به نحوي كه دقت اين تخمين به طور مستقيم بر روي دقت كل فرآيند بهينه‌سازي تأثير مي‌گذارد. يكي از كليدهاي اصلي استراتژي بازسازي، توانايي پيش‌بيني كردن زمان يا تعداد دفعاتي است كه شكست در لوله‌ها به دليل پايان يافتن عمر مفيد آنها جهت انجام وظايف آب رساني، حادث مي‌شود.

به طوركلي عوامل زيادي در وقوع يک حادثه و شكست لوله هاي آب رساني نقش دارند. در شكل (۱) مجموعه‌اي از تنش‌هاي وارد بر يك لوله مشاهده مي‌شود. ديگر عوامل مؤثر در بروز حادثه و شكست لوله‌هاي يك سيستم آب رساني عبارتند از:

- افزايش فرسودگي لوله كه با گذشت زمان باعث آسيب‌پذيري لوله‌ها در برابر فشارهاي داخلي و خارجي مي‌شود.

- حركت خاك اطراف لوله بر اثر نيروهاي وارد بر زمين، لغزش زمين در زمين‌هاي شيبدار و يا بر اثر تكان‌هاي ناشي از زمين لرزه، كه نيروي بسيار زيادي بر لوله وارد مي‌آورد و مي‌تواند باعث شكست آن ها گردد.

- خوردگي در محيط خاك و آب كه براي كليه‌ي ساختارهاي فلزي و سيماني حادتر است.

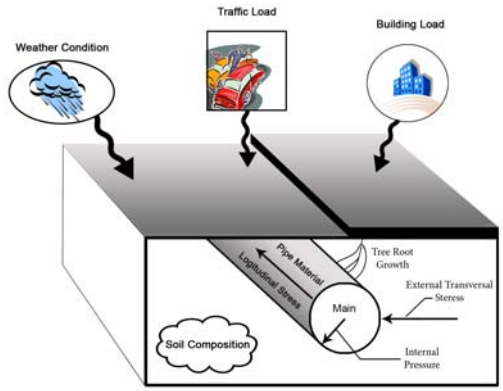
- فشار آب بيش از فشار اسمي لوله كه آن را تحت تنشي بيش از تنش مجاز خود قرار مي‌دهد و در صورت تداوم و يا تكرار، منجر به شكست لوله مي‌گردد.

- نصب غير استاندارد كه موجب ايجاد نشت‌هاي ريز از محل اتصال لوله ها گرديده كه با گذشت زمان شديدتر مي شود.

- استفاده از مصالح نامناسب براي پوشش و زيرسازي لوله‌ها كه در صورت عدم كوبيدگي لازم باعث ايجاد نشست در لوله ها شده، فشارهاي غيريكنواختي به لوله وارد مي‌آورد و مي‌تواند باعث صدمه زدن به لوله شود.

- ضربه و صدمات ناشي از حفاري كه بر اثر بي احتياطي به لوله ها آسيب مي رساند.

اگرچه شكست لوله لزوماً با پايان عمر مفيد آن همزمان نيست و عوامل ديگري مانند صدمات ناشي از حفاري در مسير لوله، خوردگي و حركت خاک دور لوله، استفاده از مصالح نامناسب براي پوشش و زيرسازي لوله‌ها، نصب غلط و ضربه قوچ، مي‌تواند قبل از پايان عمر مفيد لوله آن را با شكست مواجه كند، ولي آنچه قابل تحقيق و بررسي است، بررسي شكست تحت شرايط عادي يعني كهنگي و زوال طبيعي آن است.



شكل ۱: خلاصه‌اي از تنش‌هاي وارده و عوامل مؤثر بر شكست لوله.

در اين مقاله روش‌هاي مطرح در پيش‌بيني شكست لوله ها كه توسط محققين مختلف در سال‌هاي اخير ارائه شده‌اند از قبيل مدل‌هاي قطعي تواني بر حسب سن، مدل‌هاي قطعي خطي بر حسب سن، مدل‌هاي قطعي چند متغيره و گروهي تک متغيره‌ي احتمالي [۱] بررسي مي‌گردند. لازم به ذكر است كه براي بررسي شكست لوله‌ها مي توان از دو نوع مدل فيزيكي يا آماري استفاده نمود. از آنجا كه مدل‌هاي فيزيكي پرهزينه‌اند و يا فراهم كردن آن‌ها با شرايط طبيعي امري غيرممكن به نظر مي‌رسد، بيشتر تحقيقات در اين زمينه بر مبناي استفاده از مدل‌هاي آماري بوده است. يافتن ارتباطات قابل فهم و آشكار بين نرخ شكست لوله و مشخصاتي از لوله‌ها كه معمولاً بيشتر در دسترس هستند، همواره از اصلي‌ترين موضوعات تحقيقاتي بوده است. سن لوله به عنوان مهم ترين متغير مورد مطالعه كه افزايش نرخ شكست در طول زمان را توصيف مي‌كند، دراكثر مدل‌هاي آماري، بيان گشته است [۲, ۳]. با اين حال سن به تنهايي براي تشريح كامل پديده شكست كافي نمي باشد. Male و همكاران [۴]، در گزارش هاي خود به يک ارتباط قوي بين نرخ شكست، سن و جنس لوله‌هاي آبي متداول (چدني، چدن داكتيل، آزبست) اشاره كرده‌اند. علاوه بر اين، آن‌ها قطر لوله را نيز به‌عنوان يكي از عوامل قابل توجه در شكست مطرح نموده و اعلام مي‌دارند كه لوله‌هاي با قطر كوچك تر نرخ شكست بالاتري را نشان مي‌دهند. ترك‌هاي جانبي

و حفـره‌هـاي ايجـاد شـده ناشـي از فشـار هيـدروليكي را مي‌توان به‌عنـوان يكـي از عوامـل اصـلي افـزايش احتمـال شكست لوله‌هاي با قطر كوچك تر نام بـرده، آن را معلـول كاهش مقاومت خمشي و افزايش سطح خـوردگي لولـه‌هـا دانست. نكته قابل توجه ديگر اينكـه شكسـت در هـر مكـان شرايط بخصوصي دارد و يک مدل پيش‌بيني شكست قابليت تعميم براي عموم لوله ها و كليه شرايط را ندارد، لذا تحليـل داده‌هاي شكست مي‌تواند به مشخص نمـودن دلايـل اصـلي شكست‌ها در محدوده‌هـاي ويـژه‌اي از شـبكه يـا در لولـه‌اي خـاص كمـک نمـوده و كليـه تغييـرات در طراحـي و سياست‌هاي زيـر سـاخت را مشـخص نمايـد. بـراي تحليـل داده‌ها و شكست لوله‌ها روش‌هـاي مختلفـي وجـود دارد. در راستاي انجام تحليل جامع لازم است كه حتي‌المقدور تمـام عوامل دخيل (نظير مشخصات لوله‌ها از قبيل جـنس، قطـر، طول، سن لوله، فشار هيدروليكي و ...) در مسـئله را در نظـر گرفته، نسـبت بـه جمـع‌آوري و ذخيـره آن در يـك پايگـاه داده ها اقدام گردد. سپس از طريق يكي از روش‌ها و از بـين داده‌هاي جمع‌آوري شده، شاخص‌هايي كه به خـوبي بيـانگر تمام جوانب مسأله باشد بـه عنـوان مبنـاي تحليـل انتخـاب گردد. براي نمونه مي‌تـوان از نـرخ شكسـت (تعـداد حـوادث سالانه در واحد طول)، به عنوان يک عامل شاخص نـام بـرد. ويژگي شاخص اين است كه مي‌توان بر اساس آن قضاوت يـا مقايسه‌هـاي لازم را انجـام داد [۵ و ۶]. محققـان زيـادي در زمينه تحليل شكست و پـيش‌بينـي نـرخ شكسـت لولـه‌هـا بررسي هايي انجام داده اند [۱, ۲]، اين در حالي اسـت كـه هنوز اكثريت مدل‌هـاي پـيش‌بينـي شكسـت، منحصـراً بـه صورت تعميم يافته از عوامل استاتيكي و تعداد محـدودي از عوامل مؤثر در شكست بيان شده و به اين دليل از جامعيـت كافي برخوردار نيستند. در تمامي تحقيقاتي كه بيان گرديد، از تعداد يا نرخ شكست، تنها نوعي ارتبـاط يـك بـه يـك بـا برخي از عوامل مؤثر، بيان گرديده است [۲-۶]. علت اين كه در اين تحقيقات با انجام رگرسيون رابطه اي بـين تعـداد يـا نرخ شكست لوله ها با متغيرهاي واحدي نظير سـن، قطـر و طول لوله ها برقرار كرده اند. مي‌توان بـه دو نكتـه، يكـي در مدل‌سازي اين دسته از متغيرهاي وابسته به زمـان، زيـرا بـه محدوده وسيعي از تاريخچه زماني آن متغير نيـاز اسـت كـه معمولاً يا در دسترس نيسـت و يـا بـه دسـت آوردن آن پـر هزينه مي باشد و ديگري سؤالات محرزي است كه پيرامـون نحوه استفاده كردن اين پارامترها در مدل‌هـاي پـيش‌بينـي شكست مطرح مي باشد, اشاره نمود.

با بررسي ساختار روش‌هاي ارائـه شـده مـي‌تـوان دريافت كه رفتار حوادث در لوله‌ها عمدتاً تحت تأثير عوامل مشترك و پيچيده بـه صـورت روابطـي بـين قطـر، طـول، جنس و سن لوله، مي باشد. علـي رغـم مطالعـات فـراوان، فقدان داده‌هايي كه حوادث شكست را تشريح مـي‌كننـد و پيوستگي بين آن‌ها، محدوديت‌هاي بسـياري در جـواب‌هـا اعمال شده و اختلاف سليقه‌هايي را در يافته‌هاي محققـان آشكار ساخته است [۷]. عمده مباحـث تحقيقـاتي در ايـن زمينه دو هدف را دنبال مي‌نمايند: يكي توانايي پيش‌بينـي نـرخ شكسـت و ديگـري تجزيـه و تحليـل آن‌هـا و يـافتن الگوهايي در بازسازي و بهسازي شبكه‌هـا، كـه در مجمـوع اين عوامل موجب بهينه‌سازي سـرمايه‌گـذاري در تعـويض اجزاي شبكه آب رساني مي گردد.

Shamir and Howard رابطه معروف خـود را براسـاس يک تحليل رگرسيوني براي به دست آوردن نـرخ شكسـت يک لوله به صورت تابعي از سن لوله بـه صـورت زيـر ارائـه دادند [۸]:

$$N(t) = N(t_0) \cdot e^{A(t+g)} \qquad (۱)$$

كه در آن $N(t)$ تعداد شكست در واحد طول در سال، $N(t_0)$ برابر $N(t)$ در سال نصب لوله، t زمان سپري شده بر حسـب سال (از زمان حال)، g سن لوله در زمان حال و A ضـريب رشد نرخ شكست (1/Year) مي‌باشد. اين رابطه سال‌ها بـه عنوان نرخ شكست آستانه‌اي، دست‌مايـه‌اي بـراي تحقيـق محققان محسوب مي گردد.

Kettler and Goulter از يک معادلـه‌ي رگرسـيوني بـه شكل زير براي به دست آوردن نرخ شكست در مقابل قطـر و سن لوله در لوله‌هاي چدني و آزبست استفاده كردند [۲]:

$$N = K_0 \cdot Age \qquad (۲)$$

كه در آن N تعداد شكست در سال و K_0 عامـل رگرسـيون مي‌باشند. هم چنين McMullen از رابطه زير بـراي يـافتن سن لوله در اولين شكست بهره گرفته است [۹]:

$$\mathrm{Age} = 65.78 + 0.028SR - 6.338\,pH - 0.049r_d \qquad (۳)$$

كه در آن Age سن لوله در اولين سال شكسـت (سـال)، SR مقاومت ويژه خاک اشباع (اهم-اينچ)، pH برابر pH خاک و r_d پتانسيل اكسايش مي‌باشد.

Eisenbeis and Le Gat نيـز يـک مـدل خطـر تناسبي پارامتري با متغيرهاي تصادفي كمكي، با فرض يك توزيع ويبل براي شكست‌هاي ميان بـازه‌اي مطـرح كردنـد

[۱۰]. دراقسام مختلف مدل‌هاي ويبل اين امكان وجود دارد كه متغيرهاي مستقل به طول عمر لوله مرتبط گردد. اين متغيرهاي مستقل، همان متغيرهاي كمكي (قطر، طول و سن لوله) مي‌باشند. طول عمر لوله (T) به‌صورت زمان شكست ميان بازه‌اي به‌صورت يك مدل خطي به متغيرهاي كمكي X_j ($X=[1,X_1,X_2,...,X_p]$) مرتبط مي گردد:

$$Y=\ln T=X\beta+\sigma w \qquad (۴)$$

كه Y بردار لگاريتم طول عمرهاي مشاهداتي، X يك ماتريس از متغيرهاي كمكي، بردار β و مقدار عددي σ عوامل رگرسيون مجهول و w يك بردار تصادفي از خطاهايي است كه ناشي از توزيع مقدارهاي حدي فرض شده است.

براي يك لوله با تنش X (بردار مقدار متغيرهاي كمكي براي لوله) تابع بقاء (S) براي مدل شتاب دهنده ويبل به‌صورت تابع زماني زير مي باشد:

$$S(t,\beta,X)=\exp[-\exp(\frac{\ln t-\mathbf{X}'\beta}{\sigma})] \qquad (۵)$$
$$=\exp[-t^{\frac{1}{\sigma}}\exp(\frac{-X'\beta}{\sigma})]$$

براي برآورد بردار β و عامل مقياس σ (عوامل مدل ويبل)، از روش لگاريتم درست‌نمايي[1] استفاده مي‌شود. X' ماتريس الحاقي X بوده و با حل تابع بقاء به‌عنوان تابعي از t (زمان شكست متناظر با احتمال بقاء داده شده)، زمان شكست به‌صورت زير به‌دست مي‌آيد:

$$t=(Ln(\frac{1}{S})\exp(\frac{\chi'\beta}{\sigma}))^{\sigma} \qquad (۶)$$

از نقاط ضعف روش هاي فوق مي توان به جامع نبودن (در نظر نگرفتن همه عوامل)، مشكل بودن جمع آوري و دقت داده هاي مورد نياز و هم چنين پيچيدگي آنها اشاره نمود.

از آن جا كه در شرايط واقعي بهره برداري كه مجموعه اي از عوامل و متغيرهاي كمي و كيفي برروي تعداد و نرخ شكست مؤثر هستند هيچ گاه اين گونه روابط تك عاملي به تنهايي داراي دقت بالايي نمي باشند. در چند سال اخير تعدادي از محققين تلاش نموده اند كه با ارائه روش هايي مجموعه اي از عوامل مؤثر كمي پذير و قابل اندازه گيري برروي نرخ شكست را مورد بررسي قرار داده اندكه از جمله آن ها تابش و سلطاني [۱۲،۱۱] مي باشند كه با استفاده از روش هاي شبكه عصبي مصنوعي و نروفازي روابطي بين نرخ شكست و طول، عمق، قطر, سن و فشار لوله ها برقرار نمودند. هم چنين آقايي [۱۳] و تابش و همكاران [۱۴] با استفاده از آمار حوادث يک شبكه آب رساني شهري كشور تحقيقاتي بر روي تأثير تركيبي از چند عامل استاتيكي و عملياتي مؤثر بر شكست لوله‌ها با روش رگرسيون چندجمله‌اي تكاملي[2] (EPR) انجام داده‌اند. اين تحقيقات عامل فشار را كه جزء عوامل اصلي بروز حوادث است را به طور مستقيم شامل نمي گردد. مدل EPR ازسال ۲۰۰۴ ميلادي توسط Giustolisi & Savic مطرح گرديده و در مدل‌سازي تراز آب‌هاي زير زميني، درجه حرارت آب و ضريب زبري در لوله هاي موجدار استفاده شده و مقالاتي در اين زمينه منتشر گشته است [۱۵]، با توجه به اين كه مدل EPR يک مدل جعبه خاكستری[3] مي باشد براي يافتن عبارات سمبوليک از ميان پديده‌هاي فيزيكي تبحر زيادي دارد و محدوديت خاصي در مورد كاربرد آن در زمينه هاي مختلف گزارش نشده است [۱۶]. با استفاده از اين مدل تنها تحقيقات انگشت شماري براي بررسي ارتباط تعداد شكست لوله ها با عواملي نظير تعداد انشعاب، سن و قطر لوله ها در شرايط خاص شبكه هاي كشور انگلستان انجام شده است كه نتايج آن قابل كاربرد براي سيستم هاي آب رساني ايران نمي باشد.

هدف از اين پژوهش بهره‌گيري از روش پيشرفته داده‌كاوي آماري با عنوان رگرسيون چندجمله‌اي تكاملي (EPR) و استفاده از استراتژي تكاملي تركيبي براي يافتن الگوهايي در داده‌ها و تشكيل ساختار عبارت‌هاي پارامتري شامل متغيرهاي مستقل قابل تشخيص است كه به يافتن ارتباطي توأم، قابل درک و منطقي بين حداكثر متغيرهاي قابل اندازه گيري مانند سن، قطر، جنس، طول و فشار و تعداد انشعابات در برابر تعداد شكست لوله ها منتهي مي‌گردد. لازم به ذكر است كه تركيب و بررسي تأثير توأم همه اين عوامل با تعداد و نرخ شكست لوله ها تاكنون مورد بررسي قرار نگرفته ضمن اين كه هيچ گونه تحقيقي در مورد كارآيي اين روش در شرايط خاص كشور ايران نيز انجام نشده است.

روش تحقيق

مدل‌سازي داده‌گرا[4]؛ رگرسيون چندجمله‌اي تكاملي (EPR)

شيوه‌هاي معمول بسياري براي روش هاي متكي بر داده‌ها (داده‌گرا) وجود دارد، اما شبكه‌هاي عصبي مصنوعي (ANNs) و برنامه‌نويسي ژنتيك[5] (GP) را مي‌توان شناخته شده‌ترين آن ها دانست. رگرسيون‌هاي عددي ساده را معمول‌ترين روش در برازش منحني‌ها مي‌دانند كه غالباً با بهره جستن از الگوي حداقل مربعات خطا به برازش دادن مجموعه داده‌ها پرداخته و عبارات رياضي را پديد مي‌آورند. استراتژي جديد مدل‌سازي بهره گرفته در اين مقاله كه با تلفيق رگرسيون عددي و سيمبليك به يك رگرسيون چندجمله‌اي تكاملي (EPR) دست مي‌يابد، براي نخستين بار توسط Giustolisi & Savic ارائه گرديد [١۶]. رگرسيون‌هاي سيمبليك بر پايه برنامه‌نويسي ژنتيك و مشابه تكنيك الگوريتم ژنتيك[6] (GA) طرح‌ريزي مي‌شوند، با اين تفاوت كه در الگوريتم ژنتيك راه‌حل‌هاي ارائه شده برحسب مسئله داده شده تعيين مي‌گردند. در حالي كه در برنامه‌نويسي ژنتيك، برنامه‌هاي كامپيوتري براي حل مسئله داده شده، استنتاج مي‌شود و به دليل استراتژي استفاده از ساختارهاي چند جمله‌اي مشابه قواعد GP، نيازي به تعيين مدل رگرسيون از قبل نيست. اين استراتژي تركيبي يا برنامه‌نويسي ژنتيك قاعده‌اي[7] (RBGP) پيچيدگي عبارت‌هاي برآورد شده و هم چنين مشكلات مرتبط با GP كلاسيك را كاهش داده ضمن اين كه با محدود كردن محدوده عملگرهايي كه به طور طبيعي در رگرسيون‌هاي سمبليك استفاده مي‌شوند به زيرمجموعه‌هاي خواسته شده، به ارائه جواب‌هايي به‌صورت چند جمله‌اي مي‌پردازد. يك برنامه قاعده‌اي كه شامل ۵۶ قانون جبري مي‌باشد، تمام عبارت‌هاي حاصله را با استفاده از فرآيند تكاملي به شكل طرف راست معادله (٧) تغيير مي‌دهد.

$$y = \sum_{j=1}^{m} a_j . Z_j + a_0 \qquad (٧)$$

كه در آن y تخمين حداقل مربعات مقادير هدف، a_j يك عامل قابل تنظيم براي جمله j ام، a_0 يك بايا‌س (ثابت) انتخابي، m تعداد ترم‌هاي عبارت و Z_j يك متغير تغيير شكل يافته است. ثابت j پيامد متغيرهاي مستقل پيش‌گويي كننده ورودي ($x_1\ x_2\ \dots\ x_k$) مي‌باشد و k تعداد متغيرهاي مستقل پيش‌گويي كننده است. براي تعميم به روش رگرسيون چندجمله‌اي تكاملي، معادله (٧) به شكل معادله (٨) تغيير مي‌يابد [١۶]:

$$Y_{N\times 1}(\theta,z)=\left[I_{N\times 1}\ (Z_j)\ _{N\times m}\right]\times\left[a_0\ \ a_1 \dots\ a_m\right]^T = Z_{N\times d}\times\theta^T_{\ d\times 1} \qquad (٨)$$

كه در آن $Y_{N\times 1}(\theta,Z)$ بردار تخمين حداقل مربعات N متغير هدف، $\theta_{d\times 1}$ بردار عوامل a_j و a_0 با بعد $d = m+1$ (θ^T بردار ترانهاده) و $Z_{N\times d}$ ماتريسي است كه توسط I (ماتريس قطري) شكل گرفته است. مبناي روش رگرسيون چند جمله‌اي تكاملي انجام يك جستجوي پويا است كه از طريق قياس مرحله به مرحله رگرسيون‌ها به تكامل مي‌رسد (در حالي‌كه در روش رگرسيون سيمبليك سنتي جستجوها براساس تجزيه ساختار درختي استوار مي باشد). براي شروع حل مسئله، رگرسيون مرحله‌اي با تكنيك الگوريتم ژنتيك بر روي معادله اصلي برنامه نويسي ژنتيك قاعده‌اي (معادله ٨) انجام مي‌شود. در اين روش مطابق با تابع هزينه‌اي[8] كه كاربر تعيين مي‌كند، يك جستجوي كلي براي توان ورودي‌ها و تركيبات متغيرهاي ورودي انجام مي‌شود.

به عنوان مثال چنان چه ماتريس ورودي X به صورت زير داده شده باشد:

$$\mathbf{X}=\begin{bmatrix} x_{11}\ x_{12} & x_{13}\dots\ x_{1K} \\ x_{21}\ x_{22} & x_{23}\dots\ x_{2K} \\ x_{31}\ x_{32} & x_{33}\dots\ x_{3K} \\ \dots\ \dots & \dots\ \dots\dots \\ x_{N1}\ x_{N2} & x_{N3}\dots\ x_{NK} \end{bmatrix}=[\mathbf{X}_1\ \mathbf{X}_2\ \mathbf{X}_3 \dots\dots \mathbf{X}_K] \qquad (٩)$$

جمله j ام معادله‌ي (٩) مي‌تواند به‌صورت زير نوشته شود:

$$z^J_{n\times 1}=\left[(X_1)^{ES(J,1)}(X_2)^{ES(J,2)}(X_3)^{ES(J,3)} \dots\dots\dots (X_K)^{ES(J,K)}\right]\quad \forall j = 2\dots\dots\dots d \qquad (١٠)$$

كه در آن z^J، j امين بردار ستوني، حاصل ورودي‌هاي انتخاب شده (x_i) و ES ماتريس توان‌ها است. در اين جا هدف، يافتن ماتريس توان‌ها ($ES_{k\times m}$) است كه اجزايش مي‌تواند با مقاديري كه كاربر تعيين مي‌كند، فرض شود. به عنوان مثال اگر بردار توان‌هاي انتخاب شده براي ستون ورودي X به صورت $EX=[-1,0,1]$ انتخاب شده باشد و $m=4$ (تعداد جملات عبارت، بدون مبدا a_0) و $k=3$ (تعداد متغيرهاي مستقل كانديد شده‌ي ورودي) باشد،

هدف رگرسيون چند جمله‌اي، يافتن ماتريس $ES_{4\times3}$ است. يك مثال از چنين ماتريسي مي‌تواند به صورت زير نوشته شود:

$$ES_{m\times K=4\times3}=\begin{bmatrix}1&0&0\\1&1&0\\-1&0&1\\0&1&-1\end{bmatrix} \quad (۱۱)$$

چنان چه اين ماتريس در معادله‌ي (۱۰) جايگذاري شود، خواهيم داشت:

$$\begin{aligned}&Z_1=(X_1)^1.(X_2)^0.(X_3)^0=X_1\\&Z_2=(X_1)^1.(X_2)^1.(X_3)^0=X_1.X_2\\&Z_3=(X_1)^{-1}.(X_2)^0.(X_3)^1=X_1^{-1}.X_3\\&Z_4=(X_1)^0.(X_2)^1.(X_3)^{-1}=X_2.X_3^{-1}\end{aligned} \quad (۱۲)$$

بنابراين برمبناي ماتريس اصلي روش برنامه‌نويسي ژنتيك قاعده‌اي در معادله‌ي (۸) مي‌توان نوشت:

$$\begin{aligned}&Y=a_0+a_1\cdot Z_1+a_2\cdot Z_2+a_3\cdot Z_3+a_4\cdot Z_4=\\&a_0+a_1\cdot X_1+a_2\cdot X_1X_2+a_3\cdot X_3/X_1+a_4\cdot X_2/X_3\end{aligned} \quad (۱۳)$$

حال، عامل قابل تنظيم a_j مي‌تواند با روش حداقل مربعات (LS) محاسبه شود. بايد توجه داشت كه هر رديف ماتريس ES، تنها توان متغيرهاي انتخاب شده جمله j ام معادله‌ي (۸) را تعيين مي‌كند. اين در حالي است كه هر يك از توان‌ها در ماتريس ES مشابه همان مقداري است كه كاربر در ماتريس EX تعريف كرده است. با اين اسلوب، مسئله رگرسيون سمبليك تبديل به مسئله‌اي براي يافتن بهترين ماتريس ES مي‌شود، يا به عبارت ديگر، يافتن ساختار رگرسيون چند جمله‌اي تكاملي به وسيله الگوريتم ژنتيك عدد صحيح مي شود.

با توجه به آن چه از ساختار و روند رگرسيون تركيبي گفته شد، براي تابع‌هاي زير ساخت مدل بر اساس فرمولاسيون ارائه شده در اين بخش، از جعبه ابزار GA موجود در نرم‌افزار Matlab بهره گرفته شده و مراحل فوق به صورت رابط گرافيكي در محيط نرم افزار اجرا مي‌شود.

مطالعه موردي

محدوده مطالعاتي در اين پژوهش بخشي از شبكه توزيع آب شهري شهر مشهد است (شكل ۲). اين منطقه واقع در جنوب غربي شهر مشهد تحت عنوان ناحيه چهار آب و فاضلاب مشهد، داراي مساحتي در حدود ۲۴۱۸ هكتار و شامل ۵۷۹۸۶۰ متر خط لوله اصلي (قطرهاي بين ۶۳ تا ۷۰۰ ميلي متر) مي‌باشد كه با استفاده از آن ۹۳۷۱۹ مشترك اصلي و فرعي، انشعاب مي‌گيرند [۱۷].

وسعت زياد و اختلاف توپوگرافي قابل توجه در منطقه (۱۲۱۴-۱۰۲۱ متر از سطح دريا)، ساختار ويژه خاك منطقه (ناچيز بودن مقاومت فشاري خاك) خصوصاً در قسمت‌هاي جنوبي منطقه، وجود ايستگاه پمپاژ و چندين حلقه چاه محلي كه مستقيماً آب را به شبكه تزريق مي‌كند سبب گشته است تا ناحيه چهار با حجم قابل توجهي از حوادث و شكست در طول سال مواجه باشد.

ثبت آمار حوادث، تعيين و ارزشيابي عوامل ورودي اصلي در منطقه مطالعاتي و پردازش بسته‌هاي ورودي اطلاعات

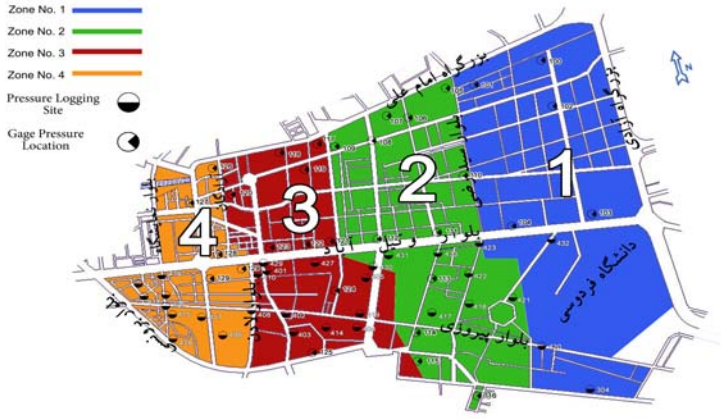
ثبت آمار و گزارش هاي كامل مرتبط با هر حادثه از مهم ترين بخش‌هاي مطالعه شكست لوله‌هاي هر منطقه به حساب مي‌آيد. از آن جا كه تجزيه و تحليل شكست لوله‌هاي شبكه آب رساني بر اساس آمار و اطلاعات شكست لوله‌ها انجام مي‌گيرد، به همين منظور لازمه انجام تجزيه و تحليل صحيح و كاربردي، داشتن سناريويي كامل از حوادث شبكه‌هاي آب رساني، خصوصاً لوله‌ها است. متأسفانه در كشور ما عدم توجه به اين موضوع، باعث ايجاد محدوديت‌هايي در تنظيم دقيق و كامل داده‌ها براي مدل‌سازي گشته است. آن چه همواره در مدل‌هاي آماري پيش‌بيني شكست مطرح بوده، توجه به اين نكته است كه لوله‌ها با مشخصات ساختاري يكسان (قدمت، قطر، جنس و ...) بايد نرخ شكست يكساني داشته باشند و با توجه به همين مطلب از كل لوله‌هاي منطقه مطالعاتي خواه دچار حادثه شده باشند يا نه، عوامل اصلي مدل شكست استخراج گرديده است. عمده متغيرهاي اساسي مورد توجه در مدل پيش‌بيني شكست لوله‌هاي منطقه به شرح زير مي باشد:

۱- سن لوله (Ae)، به‌عنوان مهمترين متغير مورد مطالعه كه افزايش نرخ شكست در طول زمان را توصيف مي‌كند.

۲- قطر لوله (De).

۳- طول لوله (Lt)، به دليل اينكه به بسياري از فاكتورهاي مؤثر ثبت نشده و يا غيرقابل ثبت كه در حوادث شكست لوله تأثير دارند احاطه دارد و نيز به‌دليل مفهوم آماري كه دارد، همواره در مدل‌سازي‌ها استفاده شده است.

۴- تعداد كل انشعاب‌هاي هر لوله (PS)، از نقطه نظر



شکل ۲: کروکي محدوده‌هاي مطالعاتي و نقاط اندازه‌گيري فشار.

گرهي (افـزايش اتصـالات در مقابـل افـزايش نقـاط ضـعف لولـه)، از نقطـه نظـر تقاضـا (افـزايش اتصـالات در مقابـل افزايش اختلاف تنش هيدروليـــــكي در لوله) و هم چنين از نقطه نظر تنش‌هاي خارجي كه افـزايش تعـداد انشـعاب متناسب است با بار ترافيكي بيشتر و متعاقب آن تنش‌هاي شديدتر.

۵- جنس لوله.

۶- شرايط هيـدروليكي و فشـار (Pr) در منطقـه مـورد مطالعه، همراه با پراكنـدگي محسـوس حـوادث در نـواحي مختلف آن.

موارد ذكر شـده ايـده‌هـاي اصـلي تقسـيم‌بنـدي منطقه بـه چهـار محـدوده بـود تـا تـأثيرات سـاير عوامـل محيطي در منطقه كه قابل دسترسي و ارزيابي نبودند، بـه نوعي لحاظ گردند. اندازه‌گيري فشار كـلاس‌هـاي مختلـف قطري لوله‌هاي منطقه، توسط ايستگاه‌هاي انـدازه‌گيـري و دستگاه هاي ثبات فشار (Data Logger) با فواصـل زمـاني ۱۵ دقيقه و اندازه‌گيري‌هـاي گـيج‌هـاي دسـتي فشـار بـه صورت روزانه از شبكه انجام شده اسـت. ايـن برداشـت‌هـا، توزيع فشار متوسطي را در محدوده‌هاي انتخابي كه گستره آن هـا در شـكل (۲) مشـخص شـده اسـت و همچنـين كلاس‌هاي مختلف قطري به دست مـي‌دهـد. توزيـع‌هـاي آماري از مشخصات شبكه (از قبيل قطر، طول كلي خطوط لوله، تعداد انشعابات و ...) نشان دهنده اين موضوع بود كـه هر يـك از ايـن محـدوده‌هـاي فشـاري، خـود بـه تنهـايي مي‌توانند به‌عنوان سيستم‌هاي توزيع آب كوچـك مسـتقل ديده شوند. با پهنه‌بندي منطقه‌ي مطالعاتي، كل مجموعـه داده‌هاي اسـتخراج شـده از مشخصـات شـبكه (تـا كـلاس قطري ۳۰۰ ميلي متر) و آمار حـوادث (كـل حـوادث ثبـت شده حدود ۱۲۳۱۰ مورد بود) به اين محـدوده‌هـا تقسـيم مي‌شود. در همين راستا مجموعه اطلاعات براي لولـه‌هـاي اصلي به ۸ كلاس قطري (۶۳ mm تا ۳۰۰ mm) بـا معيـار تكميلي جنس لوله‌ها، بدين صورت كه لوله‌ها در هر يک از اين گروه‌بندي‌هاي ۸ گانه، داراي جـنس مشخصـي بودنـد تقسيم گرديدند. با توجه به اين كه طبقه بندي لوله‌هـا بـر اساس دو معيار قطر و جنس انجـام شـده، بـراي ايـن كـه پارامتر فشار بتواند در قالب اين طبقه‌بندي‌هـا قـرار گيـرد، لازم بود خط لوله‌اي فرضي تشكيل شـود تـا متغيـر فشـار معادل (شكل ۳) و مشخصات فشاري ثبت شـده تـک تـک لوله‌ها با شكل كلي رابطه (۱۴) براي هر كلاس طبقه‌بندي محاسبه گردد.

$$Pr = \frac{\sum_{class} Lp \cdot Pr_p}{Lt} \qquad (۱۴)$$

كه در آن Pr فشار معادل، Lp مجموع طول كلاس قطري در هر محدوده، Pr_p فشار كلاس قطري در هر محدوده و Lt طول لوله معادل مي باشند.

در ادامه روند تكميل بسته‌هاي ورودي اطلاعات، به‌دليل ناقص بودن اطلاعات سن لوله‌ها، از متوسط سن لوله‌هاي داراي جنس يكسان در هر محدوده استفاده گرديد (مشابه معادله ١٤). هم چنين تعداد كل شكست‌هاي ثبت شده، مجموع طول لوله‌ها و مجموع انشعابات هركلاس, محاسبه گرديد كه در جدول (۱) ارائه شده است.

اگرچه در ايـن مطالعـه مـوردي، انتخـاب قطـر و جنس به عنوان معيارهاي عمده طبقه‌بنـدي، بـه دو دليـل اهميـت آماري و اهميـت مفهـوم فيـزيكي ايـن عوامـل مي باشد ولي با اين وجود عوامـل ديگـري از قبيـل تعـداد انشعاب و طول لوله نيز مي‌تواند به‌عنـوان معيارهـاي قابـل استفاده در طبقه‌بندي مورد استفاده قرار گيرد. طـول كـل لوله‌ها (L_t) و تعداد لوله‌ها (N_p) نيز با قرار گرفتن در هـر كـلاس و ايجـاد شـاخص($\frac{L_t}{N_p}$) قادرنـد معيـاري بـراي اندازه‌گيري پيچيدگي شبكه‌ها باشند [۱۳].

نتايج حاصل از پيش‌بيني مدل‌هاي شكست و تجزيه و تحليل آن‌ها

با توجه به عوامـل انتخـاب شـده، سـاختار كلـي چنـد جمله‌اي زيـر بـا الگـوي رگرسـيوني تكـاملي، بـراي تعـداد شكست ارائه شده است:

$$Br = Ae^{\alpha} \cdot Ps^{\beta} \cdot Lt^{\gamma} \cdot De^{\delta} \cdot Pr^{\mu} + a_0 \qquad (۱۵)$$

كه در آن Br تعداد حوادث در سال آينده را نشان مي‌دهـد. ترم‌هاي سمبليك Ps ، Lt ، De ، Ae و Pr به ترتيب متغيرهـاي تعداد كل انشعاب، طول كلي، قطر، سـن و فشـار متوسـط لوله معادل هر كلاس مي‌باشند. ورودي‌هاي انتخـاب شـده در سـاختار ايـن چنـد جملـه‌اي داراي يـك تـوان صـحيح مـي‌باشـد، كـه در تنظيمـات اوليـه پـيش‌بينـي مـدل، در گستره‌ي [۴ و ۴-] به انضمام صفر قرار مي‌گيرند. قرارگيري تـوان‌هـا در ايـن محـدوده، درجـات مختلفـي از تـأثيرات مستقيم- معكوس هر يک از عوامل ورودي بر روي شكست را مورد مطالعه و بررسي قرار مي‌دهد. علاوه بر اين، انتخاب صفر به‌عنوان يك توان قادر است كه تأثيرات يك يـا چنـد عامل را در طول روند جستجوي تكاملي حذف نمايد. ايـن جايگزيني نشان دهنـده مـوقعيتي اسـت كـه يـك متغيـر ورودي بـراي توصـيف پديـده فيزيكـي، مـورد نيـاز واقـع نمي‌شود. با ايـن سـاختار مـي‌تـوان مقايسـه‌اي ميـان مـدل شكست لوله ها در محدوده هاي مختلف را با مقايسـه سـاده بين توان ورودي‌ها انجام داد. در ساختار معادله (۱۵)، از يك مقدار بايـاس (a_0) بـراي رسـيدن بـه عـدد نهـايي شكسـت استفاده شده است كه اين مقدار بـراي تشـريح تـأثير ديگـر عوامل به جزء ورودي‌هاي انتخاب شده براي شكست، فـرض گرديده است. با توجه به اين موضوع كه براي هـر محـدوده، بسته به تغيير در تعداد ترم‌ها و ضرايب توانی عوامل بـيش از يک مدل شكست ارائه مـي‌شـود، بـراي پـذيرش مـدل‌هـاي پيش‌بيني شكست (از بين ۲۴۰ مـدل توليـد شـده)، معيـار حداكثر و ميانگين خطـا، در كنـار شـاخص آمـاري ضـريب تعيين[9] (CoD) به‌كار گرفته مي‌شـود تـا كـارآيي هـر مـدل ارزيابي گردد. ضريب CoD به عنـوان عمـده‌تـرين شـاخص كارايي مدل به صورت رابطه زير محاسبه مي‌شود:

$$CoD = 1 - \frac{N-1}{N} \cdot \frac{\sum_{N}(Br_{exp} - Br_{rec})^2}{\sum_{N}(Br_{rec} - \bar{Br}_{rec})^2} \qquad (۱۶)$$

كه در آن، N تعداد پردازش داده‌ها است كه براي هر رابطه بسته به تعداد عوامل آن توسط مدل EPR انجام مي‌شود تا به همگرايي نهايي برسد و در جريـان سـاخت هـر رابطـه، بسته به تعداد نسل‌هاي توليد شده توسط مـدل مـي‌توانـد متفاوت باشد. Br_{exp} تعداد شكست‌هـاي پـيش‌بينـي شـده توسط مدل، Br_{rec} تعداد شكست‌هاي ثبت شـده بـراي هـر كلاس لوله و $\bar{Br}_{rec}$ ميانگين تعداد شكست‌هاي ثبت شـده براي هر كلاس لوله مي‌باشند. به عنوان نمونه در شكل (۴) داده‌هاي پيش‌بيني شده توسط مدل برگزيده بـراي ناحيـه شـماره۳ در مقابـل داده‌هـاي واقعـي ثبـت شـده شكسـت ترسيم شده است. در اين منطقه تعداد شكستها براي ۱۸۰ داده كه براي كلاسهاي قطري و سني مختلف دسته بندي شده اند, نمايش داده شده است.

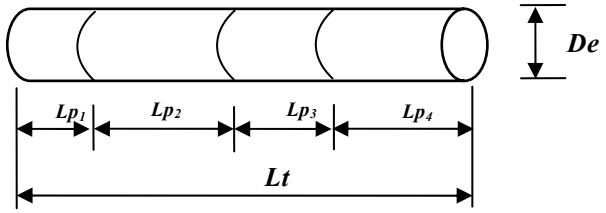
در عبارت‌هاي چند جمله‌اي، روابطي كـه تـرم‌هـاي متعارف و مشترك (عوامل با تأثير شناخته شده) دارند و از ضريب CoD مناسب (بالاتر از ۰/۸۵) برخوردار مي باشند، برگزيده مي‌شود [۱۴]. حصـول چنـين توافـق‌هـايي ميـان روابط مختلف، بيانگر اين واقعيت است كـه ايـن تـرم‌هـاي مشـترك بـراي توصـيف رونـد فيزيكـي اساسـي و نهـايي شكست، نسبت بـه توضـيح نـويز و پراكنـدگي در داده‌هـا اهميت بيشتري دارند.

تجزيه و تحليل مدل‌هاي پيش‌بيني شكست

براي هر چهار محدوده مطالعاتي در منطقـه، براسـاس ضوابط پذيرش مـدل‌هـا كـه قـبلاً اشـاره شـد، ۲۶ رابطـه پـذيرش شـده اسـت كـه در ميـان آن‌هـا چهـارده رابطـه چندجملـه‌اي يـك ترمـي، يـازده چندجملـه‌اي داراي دو قسمت و يـک چندجملـه‌اي سـه ترمـي انتخـاب گرديـده اسـت.

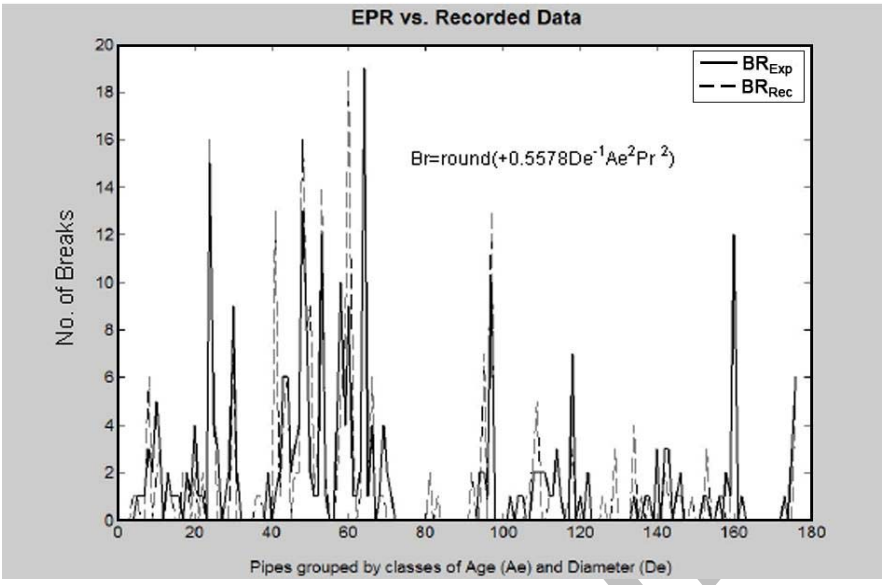
جدول ۱: مشخصات آماري و تعداد حوادث در خطوط اصلي شبكه توزيع به تفكيك محدوده ها (سال ۱۳۸۴).

Diameter (mm) – Material Classes									
Parameters		63 PE	80 AC	90 PE	100 AC	150 AC	200 AC	250 AC	300 AC
Zone 1	Total Length (m)	1027	27169	4748	11716	12504	8668	2384	283
	Age (Year)	11	26	14	24	15	16	12	10
	Total Supplied Properties	22	998	137	92	105	81	20	1
	Mean Pressure (atm)	4	4.12	4.19	4.28	4.14	3.88	3.89	4.29
	No. of Breaks	2	61	6	13	7	7	1	0
Zone 2	Total Length (m)	22140	36263	20087	26651	22524	17101	3050	881
	Age (Year)	11	23	15	23	12	13	11	10
	Total Supplied Properties	476	1332	578	150	157	108	23	5
	Mean Pressure (atm)	4	4.12	4.19	4.28	4.14	3.88	3.89	4.29
	No. of Breaks	48	80	26	30	14	15	2	0
Zone 3	Total Length (m)	5228	26586	8366	34715	25235	4747	1892	1214
	Age (Year)	10	22	11	20	13	13	10	10
	Total Supplied Properties	112	976	241	93	147	35	7	5
	Mean Pressure (atm)	4	4.12	4.19	4.28	4.14	3.88	3.89	4.29
	No. of Breaks	12	59	11	40	14	4	1	1
Zone 4	Total Length (m)	1177	4619	8323	24230	9896	6209	930	-
	Age (Year)	8	16	9	14	10	11	7	-
	Total Supplied Properties	25	179	245	73	73	47	4	-
	Mean Pressure (atm)	4	4.12	4.19	4.28	4.14	3.88	3.89	-
	No. of Breaks	3	11	11	28	6	6	0	-

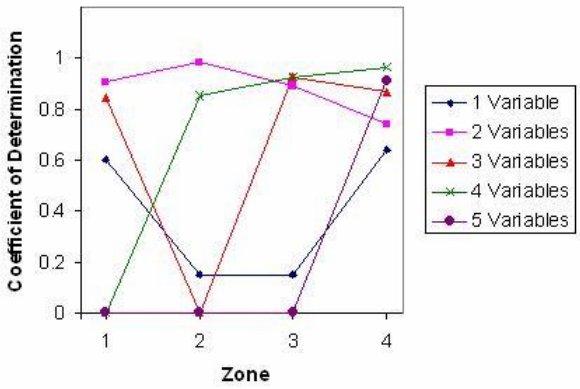


De = قطر كلاس لوله، Lp = مجموع طول كلاس قطري در هر محدوده و Pr_p = فشار كلاس قطري در هر محدوده

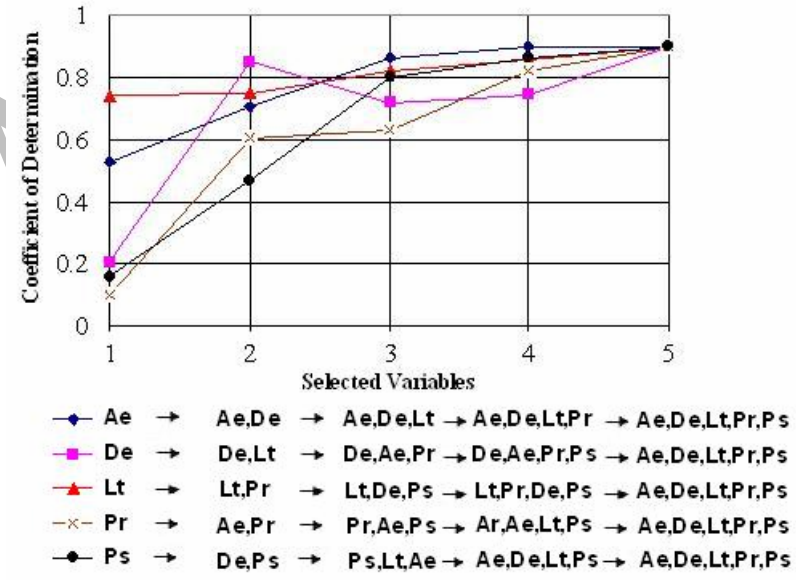
شكل ۳: طرح شماتيک لوله‌ي معادل شده‌ي هر كلاس قطري.



شکل ٤: نمايش پيش‌بيني شكست رگرسيون چند جمله‌اي تكاملي در مقابل شكست هاي ثبت شده در محدوده ۳.



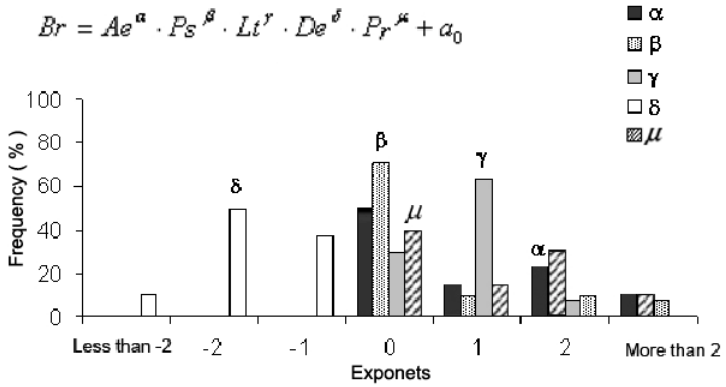
شكل ۵: ميانگين ضريب CoD براي تمامي مدل‌هاي شكست يک تا پنج متغيره به تفكيک محدوده انتخابي.



شكل ٦: ميانگين ضريب CoD براي مدل‌هاي مشخص شكست يک تا پنج متغيره در چهارمحدوده.

جدول ۲: فرمول‌هاي انتخابي پيش بيني شكست در محدوده هاي مطالعاتي ناحيه ٤ شهر مشهد.

Zone	***Burst Predicting Formulas in Pipes***	*CoD*
1	$Br = round(6.385 \cdot 10^{-6} \cdot De^{-1} \cdot Lt^{2} + 2.3024)$`	0.992
2	$Br = round(36.221 \cdot 10^{-5} \cdot De^{-2} \cdot Lt^{2} + 5.15)$	0.980
3	$Br = round(0.5578 \cdot De^{-1} \cdot Ae^{2} \cdot Pr^{2})$	0.978
4	$Br = round(0.097846 \cdot De^{-1} \cdot Lt + 0.0012545 \cdot Ae^{2} \cdot \mathrm{Pr}^{2})$	0.987



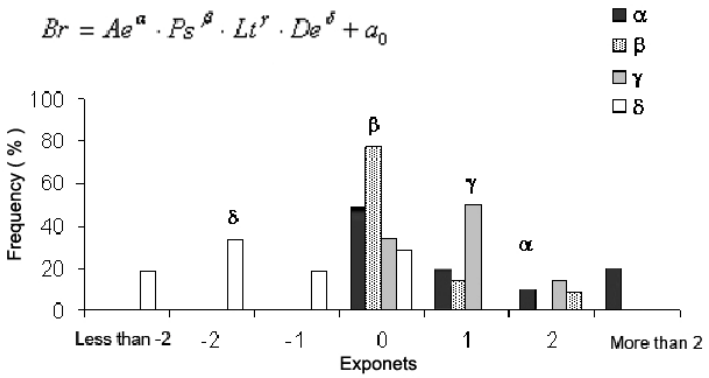
شكل ۷: توان انتخابي در مدل‌هاي شكست لوله‌هاي آب رساني ناحيه چهار شهر مشهد با متغير فشار.

منظور از ترم، تعداد رشته‌هايي است كه ساختار يک مدل را مي‌سازند. در ميان مدل‌هاي پذيرش شده، شاخص *CoD* داراي حداكثر مقدار ۰/۹۹۹ و ميانگين ۰/۸۹۹ مي‌باشد. براي هر يک از چهار محدوده انتخاب شده در منطقه، چندين مدل شكست يک تا پنج متغيره ساخته شد (۵ مدل تک متغيره، ۱۰ مدل دو متغيره، ۱۰ مدل سه متغيره، ۵ مدل چهار متغيره و يک مدل ۵ متغيره). ضرايب برازش *CoD* براي هر يک از ۳۱ مدل محاسبه و ميانگين آن‌ها به تفكيک هر يک از محدوده‌ها در شكل (۵) نشان داده شده است.

با توجه به مطالب فوق‌الذكر، مؤثرترين مدل‌هاي شكست يک تا پنج متغيره كه ضريب برازشي *CoD* آن‌ها در قبل مورد تأييد قرار گرفته بود، به تفكيک اهميت آنها در هر يک از محدوده‌هاي چهارگانه، آزمايش شده و ميانگين ضريب *CoD* در تمام چهار محدوده در شكل (۶) نشان داده شده است. اين مدل‌ها در زيرنويس شكل (۶) به ترتيب افزايش تعداد متغيرها در هر رشته، نشان داده شده است. روند تغييرات ضريب *CoD* در هر يک از رشته‌هاي مدل شكست، تأثير متغيرهاي انتخابي در مدل‌هاي شكست را نشان مي‌دهد. برگزيده‌هايي از ميان كل مدل‌هاي پذيرفته شده يک تا پنج متغيره براي چهار محدوده مطالعاتي در جدول (۲) ارائه شده است.

همان طور كه از شكل (۵) بر مي‌آيد روابط شكست چهار و پنج متغيره براي بعضي از محدوده‌ها توسط مدل توليد نشده است كه نشان از عدم تأثير بعضي متغيرها در مدل شكست لوله‌هاي اين محدوده‌ها مي‌باشد. اين نتيجه به خوبي در شكل‌هاي (۷) و (۸) كه پراكندگي توان متغيرهاي انتخابي را نشان داده است نيز مشخص مي‌باشد.

مدل‌هاي پذيرش شده، نشان مي‌دهند متغير سن لوله (Ae) كه در نيمي از مدل‌ها نمود داشته داراي مقادير مثبت يا حداقل صفر (خنثي) براي α است، در حالي كه براي متغير قطر لوله (De) كه در ۱۰۰% مدل‌ها ظاهر گشته فقط مقادير منفي براي توان δ انتخاب مي‌شود. اين نتايج دراصل يافته‌هاي مطالعات قبلي را تأييد مي‌كند كه تعداد شكست‌ها با رشد سن لوله, افزايش و با افزايش قطر لوله, كاهش مي‌يابد. در دو محدوده مطالعاتي يک و دو كه مجموع طول لوله‌هاي مسن‌تر بيشتر است، تأثير عامل سن نيز شديدتر مي باشد. علاوه بر اين بايد اشاره نمود كه براي نخستين بار عامل فشار به صورت متغير ورودي در مدل‌سازي وارد گشته، كه در ۶۰% مدل‌ها تأثير خود را نشان داده است. اين تأثير به صورت مقادير مثبت μ آشكار مي باشد.



شکل ۸: توان انتخابي در مدل‌هاي شکست لوله‌هاي آب رساني ناحيه چهار شهر مشهد با حذف متغير فشار.

در دو محدوده مطالعاتي سه و چهار که فشار در شبکه‌ي آن‌ها محسوس‌تر بوده عامل فشار (Pr) در ۸۰% مدل‌ها ظاهر گشته است. هم چنين در مدل‌هاي پذيرفته شده، عامل Ps حذف گرديده و نشان دهنده اين است که تعداد کل انشعاب‌ها از نظر آماري، کمتر از ديگر ورودي‌ها تأثيرگذار هستند. درصد پراکندگي توان هر يک از متغيرها در ميان مدل‌هاي پذيرش شده در منطقه در شکل (۷) آمده است.

چنان چه عامل فشار به صورت يک متغير مستقل در مدل‌سازي شکست لوله‌ها وارد نگردد، تأثيرات غير مستقيم آن بر روي تک‌تک ديگر عوامل قابل ارزيابي است. با حذف فشار و انجام مجدد فرآيند مدل‌سازي، در محدوده‌هاي با فشار متوسط بيشتر، افزايش تأثير سن لوله‌ها در مقابل کاهش تأثير قطر آن ها ملاحظه گرديد. به طوري که در محدوده‌هاي با فشار متوسط کمتر، اين تأثيرات کاملاً معکوس بود. همچنين تفاوت قابل ملاحظه‌اي در تأثير ديگر عوامل، مجموع طول و تعداد انشعابات لوله بر مدل‌هاي شکست لوله‌ها مشاهده نگرديد. شکل (۸) پراکندگي توان چهار متغير قطر، سن، طول و تعداد انشعاب لوله را در مدل‌هاي شکست نشان داده است.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در اين مقاله با بيان انواع روش‌هاي پيش‌بيني شکست در شبکه‌هاي توزيع آب شهري، به نقد و بررسي آن‌ها پرداخته شد. نتايج تحقيقات قبلي نشان داد که بررسي‌هاي تک متغيره در هر يک از اين روش‌ها عمل کرد دقيقي از الگوي شکست در لوله‌هاي يک منطقه را به دست نمي‌دهد. به همين منظور در اين پژوهش با استفاده از روش جديد داده‌کاوي تحت عنوان رگرسيون چندجمله‌اي تکاملي که عبارت‌هاي سيمبليك و عددي را با هم ترکيب مي‌کند، مدل‌هاي متفاوتي از تمام متغيرهايي که در بررسي و تحليل شکست مطرح مي‌باشند (مانند جنس، سن، قطر، طول، انشعاب، فشار آب و شرايط منطقه‌اي لوله) و مقادير آن‌ها قابل دسترسي مي‌باشد، بررسي شده و در يک مطالعه‌ي مورد روابطي براي شبکه توزيع آب شهر مشهد به دست آمده است. در اين روابط که شامل متغيرهاي مستقل قابل تشخيص صريح مي‌باشند، عامل فشار براي نخستين بار به صورت متغير مورد بررسي قرار گرفته و نقش آن در روند شکست لوله‌هاي منطقه مشخص شده است.

تقدیر و تشکر

بدين وسيله از همکاري مسئول محترم واحد حوادث و اتفاقات ناحيه ٤ شرکت آب و فاضلاب شهر مشهد، در زمينه تهيه اطلاعات مورد نياز اين تحقيق قدرداني مي‌گردد.

مراجع

1 - Kleiner, Y. and Rajani, B. B. (2001). "Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models." *Urban Water*, Vol. 3, No. 3, PP. 131-150.

2 - Kettler, A.J. and Goulter, I. C. (1985). "An analysis of pipe breakage in urban water distribution networks." *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 12, PP. 286-293.

3 - Pelletier, G., Mailhot, A. and Villeneuve, J. P. (2003). "Modeling water pipe breaks- three case study." *J. of Water Resource Planning and Management,* ASCE, Vol. 129, No. 2, PP. 115-123.

4 - Male, J. W., Walski, T. M. and Slutski, A. H. (1990). "Analyzing water main replacement Policies." *J. of Water Resource Planning and Management,* ASCE, Vol. 116, No. 3, PP. 363-374.

5 - Tabesh, M. and Abedini, A. A. (2005). "Analysis of pipe failure in water distribution networks." *J. Iran-Water Resources Research,* Vol. 1, No. 1, PP. 78-89, (in Farsi).

6 - Tabesh, M. and Honari, H. (2002). "Analysis of accidents and breaks in water distribution systems, results of a case study." *J. Water & Environment,* No. 50, PP. 17-23, (in Farsi).

7 - Skipworth, P. J., Saul, A. J. and Engelhardt, M. O. (2000). "Distribution network behavior–extracting knowledge from data." *International Symposium on Water Network Modeling for Optimal Design and Management (CWS 2000),* Walters, Savic, eds., Woodbury Park, Exeter, UK, PP. 125-139.

8 - Shamir, U. and Howard, C. D. D. (1979). "An analytic approach to scheduling pipe replacement." *J. Am. Water Works Assoc.,* Vol. 71, PP. 248-258.

9 - McMullen, L. D. (1982). "Advanced concept in soil evaluation for exterior pipeline corrosion." *Proceedings of AWWA Annual Conference,* Miami, FL.

10 - Esenbeis, P. and Le Gat, Y. (1999). "Probabilistic forecast of failure occurrence in water networks with short maintenance records." *Water Industry System: Modeling and Optimization Application,* Savic, Walters (eds.), Research Studies Press Ltd., UK, PP. 191-198.

11 - Tabesh, M. and Soltani, J. (2007). "Optimal operational management of water supply systems by evaluation of mechanical reliability using Artificial Neural Networks (ANN)." *Proceedings of the 2nd National Conference on Iran Water Resources*, (2WRM 2007). Faculty of Engineering, Isfahan University of Technology, Iran, 23-24 Sep., 8 pages, (in Persian).

12 - Tabesh, M. and Soltani, J. (2007). "Modelling pipe failure in water distribution networks using neuro-fuzzy systems." *Proceedings of the 3rd National Congress on Civil Engineering*, University of Tabriz, Tabriz, Iran, 2-4 May.

13 - Aghaei, A. (2006). *Investigation of burst- prediction approach for water distribution systems by evolutionary computing.* MSc Thesis, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.

14 - Tabesh, M., Abrishami, J. and Aghaei, A. (2007). "Pipe failure prediction in water distribution networks using evolutionary measures." *Proceedings of the 1st National Conference on Iran Water Resources,* (2WRM 2007), Faculty of Engineering, Isfahan University of Technology, Iran, 23-24 Jan., 8 pages, (in Farsi).

15 - Giustolosi, O., Savic, D. A. and Doglioni, A. (2004). "Data reconstruction and forecast by evolutionary polynomial regression." *6th International Conference on Hydroinformatics,* Liong, Phoon and Babovic (eds.), Singapore.

16 - Giustolosi, O. and Savic, D. A. (2004). "A novel genetic programming strategy: evolutionary polynomial regression." *6th International Conference on Hydroinformatics,* Liong, Phoon and Babovic (eds.), Singapore, Vol. 1, PP. 787-794.

17 - Sarv-Ab Consulting Engineers, (2004). *The Mashhad suburb wastewater collection and refinery project*. Summary of the first 6 volume reports.

واژه هاي انگليسي به ترتيب استفاده در متن

1 - Log-Likelihood
2 - Evolutionary Polynomial Regression
3 - Gray Box
4 - Data-Driven Modeling
5 - Genetic Programming
6 - Genetic Algorithm
7 - Rule-Based Genetic Programming
8 - Cost Function
9 - Coefficient of Determination