

Water and Wastewater, Vol. 34, No. 2, pp: 36-51

Mechanical Failure Risk and Reliability Analysis of Buried Water Pipelines

S. R. Asadollahi Kalkhoran¹, S. Alimohammadi^{2*}, M. Behrouz³

1. MSc. Graduate of Water Resources, Dept. of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2. Assoc. Prof., Dept. of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
(Corresponding Author) s_alimohammadi@sbu.ac.ir and s.asadollahi@ymail.com
3. Lecturer, Dept. of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

(Received Sep. 16, 2022 Accepted Dec. 26, 2022)

To cite this article:

Asadollahi Kalkhoran, S. R., Alimohammadi, S., Behrouz, M. 2023. "Mechanical failure risk and reliability analysis of buried water pipelines" *Water and Wastewater*, 34(2), 36-51.
Doi: 10.22093/wwj.2023.357589.3287. (In Persian)

Abstract

Water Pipelines are vital infrastructures of any country and their failure may have severe consequences. In this article, an attempt has been made to investigate a real project, the important uncertain variables in the system design have been identified and the failure risk and reliability of the water conveyance system have been calculated in two alternatives of a steel pipeline and a GRP pipeline. A wide range of system design variables including pipe structural characteristics, soil types, probability distribution parameters, and the correlation between them were determined as a multivariate normal distribution using Cholesky decomposition method. In the following, the uncertainty analysis of the system was carried out using the Monte Carlo simulation via Latin hypercube sampling. Then the complementary cumulative distribution functions of the output variables were calculated for each alternative and finally, the risk and reliability of the system were calculated in two alternatives based on passing certain design controls. The results showed that the reliability of the system is equal to 96.7% for the steel pipeline and 86.4% for the GRP pipeline.

Keywords: Water Transmission System, Steel, GRP, Risk, Reliability.

آب و فاضلاب، دوره ۳۴، شماره ۲، صفحه: ۵۱-۳۶

تحلیل ریسک شکست مکانیکی و قابلیت اطمینان خطوط انتقال آب مدفون

سعیدرضا اسداللهی کلخوران^۱، سعید علیمحمدی^{۲*}، معصومه بهروز^۳

- ۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
 ۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
 (نویسنده مسئول) s.asadallahi@gmail.com و alimohammadi@sbu.ac.ir
 ۳- استاد مدعو، دانشکده عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(دریافت ۱۴۰۱/۷/۲۵ پذیرش ۱۴۰۱/۱۰/۵)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

اسداللهی کلخوران، س. ر.، علیمحمدی، س.، بهروز، م.، ۱۴۰۲، "تحلیل ریسک شکست مکانیکی و قابلیت اطمینان خطوط انتقال آب مدفون" آب و فاضلاب، ۲۴(۲)، ۵۱-۳۶. Doi: 10.22093/wwj.2023.357589.3287

چکیده

خطوط انتقال آب در حکم زیرساخت‌های حیاتی هر کشوری بوده و شکست آنها تبعات جبران‌ناپذیری به‌همراه دارد. در این پژوهش، تلاشی شد تا با بررسی یک پروژه در دست احداث، متغیرهای تصادفی مؤثر در طراحی سیستم شناسایی شده و ریسک شکست مکانیکی و قابلیت اطمینان سیستم انتقال آب، در دو گزینه لوله فولادی و لوله GRP محاسبه شود. به این منظور طیف وسیعی از متغیرهای طراحی سیستم شامل خصوصیات سازه‌های لوله و جنس خاک همراه با توزیع احتمالاتی و هم‌بستگی متقابل بین آنها مشخص شد. در ادامه، به روش مونت کارلو با نمونه‌گیری لاتین هاپیرکیوب و روش تجزیه چولسکی، متغیرهای تصادفی پایه به‌صورت یک توزیع نرمال چندمتغیره تولید شده و با توجه به معادلات سیستم، متغیرهای خروجی محاسبه شدند. سپس توابع توزیع تجمعی متغیرهای خروجی برای هر گزینه محاسبه شدند و در نهایت ریسک و قابلیت اطمینان سیستم بر اساس تعداد دفعات شکست سناریوها در گذر از کنترل‌های مشخص شده در دو گزینه محاسبه شد. نتایج پروژه بررسی شده نشان داد که قابلیت اطمینان سیستم برای لوله فولادی معادل ۹۶/۷ و برای لوله GRP برابر ۸۶/۴ درصد است.

واژه‌های کلیدی: سیستم خط انتقال آب، فولادی، GRP، ریسک شکست، قابلیت اطمینان

۱- مقدمه

تحلیل ریسک شکست و اعتمادپذیری آنها اهمیت زیادی دارد. از طرفی به‌دلیل مدفون بودن، متغیرهای مؤثر در شکست آنها دارای عدم قطعیت بالایی هستند که به‌منظور تحلیل ریسک باید ارزیابی و کمی‌سازی شوند.

سیستم انتقال^۱ آب، بخشی از سیستمی است که آب را از منبع (مانند رودخانه، سد، یا آبخوان) به سیستم توزیع منتقل می‌کند. از آنجایی که این سیستم‌ها در معرض بارهای گوناگون هستند،

¹ Water Conveyance System



دما منجر به افزایش انبساط حجمی آب و یخزدگی خاک و در نتیجه افزایش ریسک شکست لوله می‌شود (Rezaei et al., 2015).

برای شناسایی عواملی که منجر به خرابی لوله‌های چدنی، فولادی و چدن داکتیل می‌شود، تجزیه و تحلیل آماری از داده‌های خرابی در خطوط لوله با قطر بزرگ ۵ سازه آبی استرالیا انجام شده است. نتایج این پژوهش بیانگر آن بود که خوردگی، فشارهای خط انتقال و بارگذاری‌های روی سیستم از عوامل شکست هستند (Rajeev et al., 2014).

در پژوهشی دیگر، برای حصول الگوی فرسودگی سیستم آب‌رسانی، برخی متغیرهای تصادفی از جمله دما و رطوبت خاک در قالب یک فرایند وابسته به زمان بررسی شده و تأثیرات آنها در نرخ شکست ارائه شده است (Kleiner and Rajani, 2014).

تا پیش از این، اعتمادپذیری و ریسک شکست سیستم انتقال آب تحت تأثیر عوامل مختلف، به صورت شفاهی و غیر عددی ارائه شده است. هدف کلی این پژوهشی، تدوین یک متدولوژی برای تحلیل عدم قطعیت و تحلیل ریسک شکست مکانیکی خطوط انتقال آب مدفون با لحاظ متغیرهای تصادفی مانند ضریب تأخیر و وزن بارهای مرده و زنده بود که پیش از این استفاده نشده‌اند. هدف ویژه در این پژوهش، شناسایی عوامل شکست مکانیکی خط لوله انتقال آب شامل جنس خاک، شرایط محیطی، خصوصیات و جنس لوله، تغییرات تراز آب زیرزمینی و تحلیل عدم قطعیت آنها، مدل‌سازی سیستم و تعیین اعتمادپذیری آن بود.

۲- مواد و روش‌ها

در پژوهش‌های گذشته، با توجه به ارزیابی آسیب‌پذیری و ریسک شکست خطوط لوله تحت تأثیر عواملی مانند زلزله و تغییرات تراز آب زیرزمینی، تحلیل ریسک و عدم قطعیت آنها انجام شده است. بررسی سازه‌ای مجاری زیرزمینی مانند دیگر سازه‌ها، با تعیین بارهای وارد بر آنها آغاز می‌شود. طبیعت مجرا از نظر صلبیت یا انعطاف‌پذیری، میزان نشست کف مجرا، ویژگی‌های مکانیکی خاک ریزهای جناحین و روی مجرا و روش اجرا از جمله عواملی هستند که بار وارد بر مجرا را تحت تأثیر قرار می‌دهند (EAD, 1999).

قابلیت اطمینان یا اعتمادپذیری^۱ مفهومی است که اغلب به صورت مکمل ریسک یا احتمال شکست یک سیستم تعریف شده و از طریق آن امنیت سیستم ارزیابی می‌شود. از منظر تحلیل اعتمادپذیری، سیستم بررسی شده در این پژوهش، از نوع سری بود و شکست در هر یک از لوله‌ها منجر به شکست کل سیستم (عدم امکان انتقال آب) شد.

عدم قطعیت به فقدان اطلاعات کامل در مورد پدیده‌ها، فرایندها و داده‌های مربوط به یک سیستم نسبت داده می‌شود. اعتمادپذیری و ایمنی یک پروژه مهندسی به‌طور مستقیم با میزان عدم قطعیت آن پروژه مرتبط است (Tung and Yen, 2005). عدم قطعیت به دو نوع ذاتی^۲ و ذهنی^۳ تقسیم می‌شود. عدم قطعیت ذاتی مرتبط با ماهیت متغیرها و فرایندهای تصادفی بوده و عدم قطعیت ذهنی مرتبط با خطا و/یا کمبود اطلاعات در خصوص مقدار قطعی است. به‌عنوان مثال دبی روزانه یک رودخانه یک متغیر تصادفی ذاتی بوده، اما ضریب زبری یک لوله مدفون که به آن دسترسی وجود ندارد، یک متغیر تصادفی ذهنی است.

شبه‌سازی مونت کارلو یک روش احتمالاتی برای تحلیل عدم قطعیت بر مبنای تولید متغیرهای تصادفی پایه سیستم، با حفظ خصوصیات توزیع احتمالاتی و هم‌بستگی بین آنها است. در این روش به منظور افزایش دقت محاسبات، از روش نمونه‌گیری لاتین‌هاپریکوب و به منظور اعمال هم‌بستگی بین متغیرها در فرایند تولید متغیرهای تصادفی، از روش تجزیه چولسکی (Tung and Yen, 2005) استفاده می‌شود.

تحلیل ریسک شکست مکانیکی منوط به شناخت عوامل شکست است. بر اساس پژوهش دیبون و همکاران در سال ۲۰۱۰ پیرامون مقایسه خطر شکست در شبکه آب‌رسانی، نشان داده شد لوله‌هایی با طول کوتاه، قطر زیاد، فشار کم و نصب شده در زیر پیاده‌روها کمتر در معرض شکست قرار می‌گیرند (Debón et al., 2010).

تأثیر شرایط هیدرولیکی پویا در خرابی لوله‌ها در پژوهش رضایی و همکاران نشان داد، به گونه‌ای که کاهش فشار و یا افزایش قطر لوله باعث کاهش ریسک شکست لوله شده و کاهش

¹ Reliability

² Aleatory

³ Epistemic



بار) از نمودار بوسینسک و با توجه به میزان قطر لوله و ارتفاع خاک روی آن به دست می‌آید. در اینجا میزان ضریب ضربه (I_c) برابر $1/5$ و وزن کامیون (P) ۹ تن یا ۹۰ kN لحاظ شده است.

۲-۱-۲- مشخصات خاک

به علت به وجود آمدن پدیده خزش در خاک جناحین، ضریبی به نام ضریب تأخیر (D_l) معرفی می‌شود. در صورتی که خاک جناحین خوب دانه‌بندی شده و متراکم شده باشد، ضریب تأخیر در حدود ۱ و در غیر این صورت این مقدار می‌تواند به حدود ۲ نیز برسد. در طرح‌های اجرایی مقدار ضریب تأخیر در حدود $1/25$ توصیه شده است (EAD, 1999).

۲-۱-۳- تغییر شکل لوله انعطاف‌پذیر

میزان تغییر شکل لوله انعطاف‌پذیر از معادله معروف به Iowa محاسبه می‌شود (Moser and Folkman, 1990)

$$\Delta x = D_l \times \frac{KW_c r^3}{EI + 0.061E_l r^3} \quad (3)$$

که در آن

Δx تغییر شکل لوله (mm)، D_l ضریب تأخیر (بدون بعد)، K ضریب ثابت بستر، W_c بار وارد بر واحد طول مجرا (N/mm^2)، E مدول الاستیسیته مصالح مجرا (N/mm^2)، E_l مدول خاک، r شعاع متوسط لوله (mm) و I ممان اینرسی واحد عرض مقطع جدار مجرا (mm^4/mm) است.

۲-۱-۴- کمانش

لوله مدفون در خاک ممکن است به خاطر ناپایداری الاستیک که در اثر بارهای وارده و تغییر شکل لوله است، دچار شکستگی یا کمانش شود. مجموع بارهای وارده باید برابر یا کمتر از کمانش مجاز باشد که به صورت زیر محاسبه می‌شود (AWWA, 2013)

$$q_a = \left(\frac{1}{FS}\right) \left(\frac{32R_w B' E' EI}{D^3}\right)^{0.5} \quad (4)$$

همچنین کنترل کمانش تحت بار مرده از معادله ۵ و میزان کمانش تحت بار زنده از معادله ۶ به دست می‌آیند

مجاری زیرزمینی از لحاظ جنس دو دسته‌اند: مجاری صلب^۱ و مجاری انعطاف‌پذیر^۲. از مجاری صلب می‌توان به لوله‌های بتنی و چدن نشکن و از مجاری انعطاف‌پذیر می‌توان به لوله‌های فولادی، پشم شیشه و PVC^۳ اشاره کرد.

۲-۱-۱- عوامل مؤثر بر شکست خطوط لوله

۲-۱-۱-۲- بارها

بارهای وارد شده به مجاری زیرزمینی به سه گروه عمده تقسیم می‌شوند: الف) بار خارجی ناشی از وزن خاک روی مجرا، سربارهای سطحی و فشار آب خارجی، ب) فشار داخلی سیال و ج) بارهای اتفاقی یا بارهای ثانویه که مقدار آنها به طور دقیق قابل پیش‌بینی نیست. بارهای ناشی از تغییرات دمای محیط، رطوبت خاک و ریشه گیاهان از جمله بارهای اتفاقی هستند. بار وارد بر مجرا ناشی از وزن ستون خاک عبارت است از (Moser and Folkman, 1990)

$$W_c = \gamma H B_c \quad (1)$$

که در آن

B_c قطر (یا عرض) افقی مجرا (m)، H ارتفاع خاک روی لوله (بر حسب m) و γ وزن مخصوص خاک (kN/m^3) است.

$$W_l = I_c (C_1 P) B_c \quad (2)$$

معادله ۲ توسط Marston برای بار زنده بر روی مجاری پیشنهاد شده است که در آن W_l (kN/m) بار متوسط بر واحد طول مجرا، I_c ضریب ضربه (بین $1/5$ تا ۲)، C_1 ضریب توزیع بار طبق نظریه بوسینسک^۴، P (kN) وزن بار متمرکز (۸۰ تا ۹۰ kN با توجه به استاندارد ایران) است. حاصل ضرب $C_1 P$ بار یکنواخت فرضی در عرض کل مجرا است. در پژوهشی، نموداری را برای تعیین مقدار C_1 ارائه داده‌اند (Moser and Folkman, 2008).

در معادله برآورد بار زنده (معادله ۲) مقدار C_1 (ضریب توزیع

¹ Rigid Pipe

² Flexible Pipe

³ Polyvinyl Chloride (PVC)

⁴ Boussinesq



$$H_{\text{total}} = H_f + H_e \quad (10) \quad \gamma_w H_w + R_w(W_c/D) + P_v < q_a \quad (5)$$

$$\text{که در آن} \quad \gamma_w H_w + R_w(W_c/D) + (W_l/D) < q_a \quad (6)$$

H_e اختلاف هد ارتفاعی (بین ابتدا تا انتهای مسیر) و H_f افت هد مسیر است.

که در آنها

FS ضریب اطمینان ($2/5$ برای $H/D > 2$ و 3 برای $H/D < 2$), D , قطر مقطع دایره (mm), B' ضریب تجربی, q_a فشار کماتش مجاز (N/mm^2), H ارتفاع خاک در بالای تاج (m) و H_w ارتفاع تراز آب زیرزمینی (m) در بالای تاج است. R_w ضریب غوطه‌وری خاک است که از معادله γ به دست می‌آید

$$R_w = 1 - 0.33 \left(\frac{H_w}{H} \right) \quad \& \quad 0 < H_w < H \quad (7)$$

۲-۱-۵- فشار ضربه

لوله‌های فولادی در مقابل اثرات ضربه قوچ مناسب‌تر از سایر انواع لوله‌ها هستند. بزرگی فشارهای ضربه قوچ حاصل از تغییر سرعت بستگی به هندسه سیستم، بزرگی تغییر سرعت و سرعت موج ضربه قوچ دارد (Moser and Folkman, 2008).

معادله تالبوت با توجه به تغییر سرعت جریان، میزان فشار ضربه را به صورت زیر برآورد می‌کند. با معلوم بودن دبی جریان و قطر لوله، سرعت جریان مطابق معادله ۹ است

$$P_s = \frac{a}{g} \times \frac{SG}{2.3} \times \Delta V \quad (8)$$

$$\Delta V = V = 0.409 \times (Q/d^2) \quad (9)$$

که در آنها

P_s فشار ضربه (ft), g شتاب گرانش (ft^2/s), a سرعت موج فشاری (ft/s), ΔV تغییرات سرعت جریان (ft/s), Q دبی جریان (gpm), d قطر داخلی لوله (in.) و SG وزن مخصوص سیال است.

۲-۱-۶- فشار کار

فشار کار، حداکثر فشار عملیاتی بلندمدت پیش‌بینی شده سیال در نتیجه عملکرد معمول سیستم است. مقدار این فشار از معادله ۱۰ برآورد می‌شود (AWWA, 1999a)

۲-۲- تحلیل عدم قطعیت و شبیه‌سازی مونت کارلو

هدف از تحلیل عدم قطعیت، تعیین خصوصیات آماری خروجی‌های سیستم تحت تأثیر متغیرهای ورودی تصادفی سیستم است. به عبارت دیگر تحلیل عدم قطعیت یک چارچوب برای تحلیل خروجی‌های سیستم فراهم می‌کند (Tung and Yen, 2005). در این پژوهش، به منظور تولید سناریوهای تصادفی (مجموعه متغیرهای تصادفی) از روش مونت کارلو استفاده شد. دقت توزیع احتمالاتی خروجی مدل شبیه‌سازی شده تابعی از تعداد شبیه‌سازی‌ها یا تکرارهای انجام شده، بود. در این پژوهش، ۱۰۰ سناریو برای شبیه‌سازی و تحلیل عدم قطعیت و محاسبه ریسک شکست مکانیکی سیستم تولید شد. بر اساس پژوهش‌های پیشین، توزیع نرمال به‌عنوان تابع چگالی احتمال متغیرهای تصادفی انتخاب شد. روش نمونه‌برداری لاتین هایپرکیوب^۱ نسبت به سایر روش‌های نمونه‌برداری به تعداد نمونه کمتری برای شبیه‌سازی نیاز دارد. در این روش محدوده یک متغیر تصادفی به M بازه هم احتمال تقسیم شده (M تعداد سناریوها است) و از هر محدوده یک مقدار تصادفی نمونه‌برداری می‌شود (Tung and Yen, 2005).

در این پژوهش، روش تجزیه چولسکی به منظور لحاظ هم‌بستگی میان متغیرها و تولید هم‌زمان آنها به صورت یک تابع توزیع نرمال چند متغیره به شرح زیر که بر پایه تبدیل متعامد ماتریس کوواریانس C_x است، استفاده شد (Tung et al., 2005)

$$C_x = L \times L^t \quad (11)$$

$$(12)$$

$$C_x = \begin{bmatrix} \text{Var}_1 & \text{Cov}_{12} & \dots & \text{Cov}_{1k} \\ \text{Cov}_{21} & \text{Var}_2 & \dots & \text{Cov}_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Cov}_{k1} & \text{Cov}_{k2} & \dots & \text{Var}_k \end{bmatrix};$$

$$(\text{Cov}_{ij} = \rho_{ij} \times \sigma_i \times \sigma_j)$$

¹ Latin Hypercube Sampling (LHS)



در استاندارد AWWA M11 ارائه شده‌اند (AWWA, 2013).

۲-۳-۲- لوله GRP²

برای این جنس لوله پنج کنترل، به این شرح باید انجام شود:
 ۱- کنترل کلاس فشار Pc و فشار کار Pw، ۲- کنترل فشار ضربه، ۳- کنترل تغییر شکل قائم، ۴- کنترل تنش ترکیبی و ۵- کنترل کمانش تحت بار خارجی.

در ارزیابی کنترل‌های اول و دوم، مجموع فشار ضربه و کار که متأثر از متغیرهای قطر، طول و افت خط هستند باید از ۱/۷ کلاس فشار کمتر باشند. پارامتر کلاس فشار نیز باید از نسبت ضخامت به قطر و تنش (تحت فشار هیدرواستاتیک³ به ضریب اطمینان کمتر شود. همچون مقایسه کنترل برای لوله فولادی، تأثیر بارهای مرده و زنده بر تغییر شکل قائم لوله GRP ارزیابی شده و مقدار آن باید از ۵ درصد قطر لوله کمتر باشد. به منظور بررسی کنترل چهارم یعنی تنش ترکیبی (σ_c)، حداکثر تنش حاصل از اثرات ترکیبی فشار داخلی و تغییر شکل محاسبه شده و در نهایت باید از معکوس ضریب اطمینان کمتر باشند. کنترل کمانش مانند کنترل کمانش برای لوله فولادی است. روابط مربوط به کنترل‌های این جنس لوله در استاندارد AWWA M45 ارائه شده‌اند (AWWA, 1999b).

۲-۳-۳- محاسبه اعتمادپذیری خط لوله

مبنای محاسبه اعتمادپذیری هر یک از خطوط لوله‌ها (فولادی و GRP) کنترل‌هایی است که به آنها اشاره شد. به این ترتیب در هر سناریو چنانچه تمام قطعات خط لوله این کنترل‌ها را رعایت کنند، آن سناریو یک موفقیت و در غیر این صورت، یک شکست در نظر گرفته خواهد شد. اعتمادپذیری عبارت است از مجموع سناریوهای موفق تقسیم بر کل سناریوها.

۳- مطالعه موردی

پژوهش انجام شده مربوط به خط انتقال آب کشاورزی شهرستان باشت از توابع استان کهگیلویه و بویراحمد بود (شکل ۱). در سیستم مورد مطالعه جریان به صورت تحت فشار بود و بر اساس پژوهش‌ها برای مسیر خط انتقال، دو ایستگاه پمپاژ طراحی شد. کل

L ماتریس پایین مثلثی متناظر با ماتریس کوواریانس است (Tung and Yen, 2005). بردار چند متغیره متغیرهای تصادفی نرمال از معادله ۱۳ به دست می‌آید

$$X = \mu_x + L \times Z \quad (13)$$

که در آن

μ_x بردار مقدار میانگین متغیرهای تصادفی، Z بردار متغیرهای نرمال استاندارد مستقل و X بردار متغیرهای تصادفی وابسته است.

۲-۳-۳- کنترل‌های انجام شده و محاسبه اعتمادپذیری

کنترل‌های انجام شده برای هر جنس لوله در اینجا بر مبنای روابط ارائه شده در نشریات انجمن کارهای آبی آمریکایی^۱ بوده و تحلیل اعتمادپذیری بر اساس آنها انجام شده که در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

۲-۳-۱- لوله فولادی

چهار کنترل برای ارزیابی اعتمادپذیری این جنس لوله انجام شد:
 ۱- کنترل تنش با تأثیر اثر ضربه، ۲- کنترل کمانش تحت فشار خارجی شعاعی، ۳- کنترل تغییر شکل جانبی و ۴- کنترل کمانش تحت بارهای مرده و زنده. در کنترل اول، اگر مجموع فشارهای ضربه و کار منجر به حصول تنش (σ) شد، این مقدار باید از ۵۰ درصد تنش تسلیم فولاد کمتر باشد. نسبت قطر به ضخامت و فشار خارجی شعاعی، نقش کلیدی به ترتیب در برآورد تنش در کنترل اول و کمانش در کنترل دوم ایفا می‌کنند. چنانچه فشار خارجی شعاعی از فشار خلاً کمتر شود، سناریو شکست خورده قلمداد می‌شود.

کنترل تغییر شکل جانبی لوله بر اساس مجموع بارهای مرده و زنده انجام می‌شود. چنانچه تغییر شکل انجام شده از ۳ درصد قطر لوله فراتر رود، شکستگی در لوله لحاظ می‌شود. در نهایت کنترل کمانش یک‌بار با لحاظ بار مرده و بار دیگر با لحاظ بار زنده برآورد می‌شود و تحلیل ریسک در این سناریو بر اساس مقایسه آن با کمانش مجاز انجام می‌شود. کلیه روابط مربوط به کنترل‌های فوق

² Glass Reinforced Plastic (GRP)

³ Hydrostatic Design Basis (HDB)

¹ American Water Works Association (AWWA)



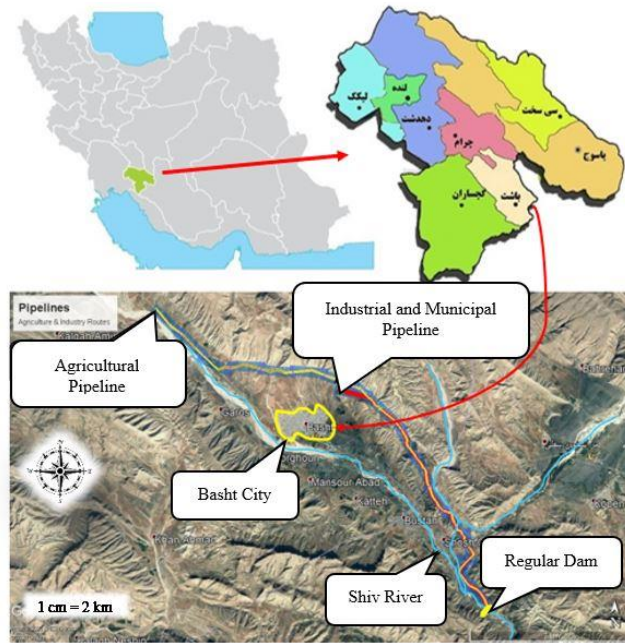


Fig. 1. General locations of Basht city and pipeline
 شکل ۱- موقعیت عمومی شهرستان باشت و مسیر خط انتقال آب

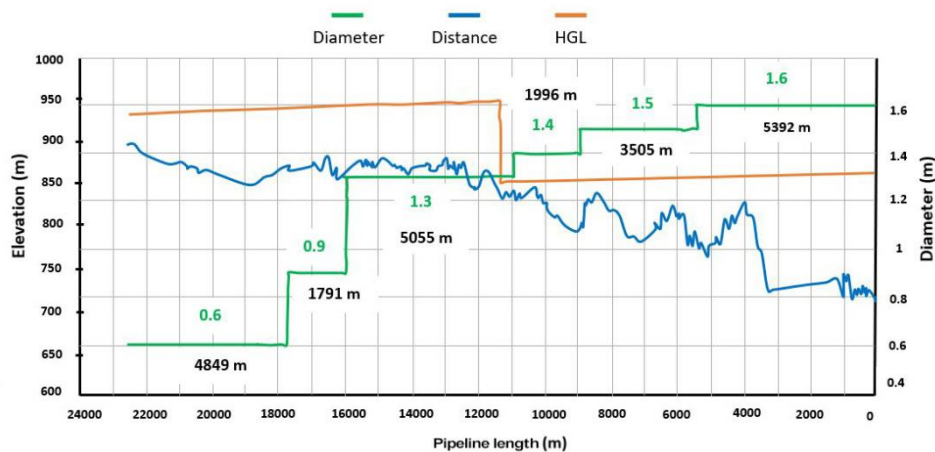


Fig. 2. Hydraulic profile and agriculture pipelines diameters
 شکل ۲- پروفیل هیدرولیکی، طول و قطر لوله‌های انتقال آب کشاورزی در مسیر

کشاورزی در این گزینه مطابق با شکل ۲ است (Abdan Faraz Consulting Engineers, 2017).

در شکل ۲، HGL گرادیان هیدرولیکی، Distance پروفیل خط لوله و Diameter نیز نشان‌دهنده قطر لوله در بخش‌های مختلف مسیر است. از آنجایی که بخشی از آب در طول

آب مورد نیاز (شامل نیازهای شرب و صنعت و کشاورزی)، ابتدا با دبی ۲۴۹۰ L/s از ایستگاه اول به ایستگاه پمپاژ دوم و سپس با دبی ۱۵۹۰ L/s به نقاط مصرف بعدی منتقل می‌شود. تراز آب‌گیری از حوضچه مکش ۷۱۰ متر از سطح دریا در نظر گرفته شد. تراز کف مخزن شهر باشت معادل ۸۵۰ متر و تراز آخرین نقطه سامانه انتقال ۹۱۰ متر از سطح دریا بود. پروفیل هیدرولیکی خط انتقال آب

¹ Hydraulic Gradient Line (HGL)



جدول ۱ مشخصه‌های آماری متغیرهای تصادفی مرتبط را نشان می‌دهد. مقدار میانگین متغیر ارتفاع خاک روی لوله بر اساس قطر لوله تغییر می‌کند، به طوری که ارتفاع خاک از $1/4$ m برای قطر 1600 mm تا $0/6$ m برای قطرهای 600 و 900 mm متغیر است. ضریب تعیین (R) بین قطر لوله و ارتفاع خاک روی آن، $0/9$ و بین ضریب اطمینان و بار زنده روی لوله $0/7$ در نظر گرفته شد. به دلیل رابطه معکوس بین قطر لوله و ضریب اطمینان (با افزایش قطر لوله استحکام آن افزایش یافته و در نتیجه ضریب اطمینان کمتر می‌شود) مقدار R برابر $0/4$ - لحاظ شد. برای متغیرهایی که هم‌بستگی بین آنها وجود ندارد $R=0$ اعمال می‌شود.

شکل ۳، CCDFهای ضخامت و فشار ضربه لوله‌های فولادی را نشان می‌دهد. همان طور که شکل ۳-a نشان می‌دهد محدوده تغییرات ضخامت برای خط 600 برابر $1/3$ mm و برای خط 1600 برابر $3/9$ mm بود. محدوده تغییرات فشار ضربه نیز برای خط 600 از $0/952$ تا $1/32$ N/mm² و برای خط 1600 از $1/15$ تا $1/6$ N/mm² بود. هر چند بازه تغییرات برای تمام خطوط یکسان بود، اما با افزایش قطر، لوله متحمل فشار ضربه بیشتری شد. مطابق شکل ۴-a، محدوده تغییرات تنش کششی برای خطوط متناسب با فشار ضربه وارد بر آنها است، اما این قاعده برای خطوط 1500 و 1600 به دلیل نسبت قطر به ضخامت صادق نیست و به همین دلیل ریسک تنش آنها از خطوط دیگر کمتر است. محدوده تغییرات σ در سه خط 900 ، 1300 و 1400 از 164 تا 181 N/mm² و برای سایر خطوط 158 تا 174 N/mm² بود.

تأثیر بار زنده را در شکل‌های ۴-b و ۵ می‌توان مشاهده کرد. دو خط ۲ تا 1600 و ۱ تا 1500 بار مرده را در بازه حدوداً 30 تا 50 KN/m و بار زنده را در بازه 5 تا 55 kN/m تحمل می‌کنند. علت گستردگی این بازه تغییرات وسایل حمل و نقل از سبک به سنگین است، از همین رو تغییر شکل جانبی دو خط بیان شده بیش از سایر خطوط بوده، به گونه‌ای که خط 1300 به عنوان خطی که تنها متأثر از بار مرده بود بین $4/5$ تا $7/3$ mm و خط ۱ تا 1500 در بازه $5/7$ تا $13/7$ mm تغییر کرد (شکل ۶).

ضریب غوطه‌وری نسبت مستقیم با کماتش دارد (معادله ۴). یعنی چنانچه سطح آب زیرزمینی کاهش یابد، میزان ضریب غوطه‌وری زیاد شده (معادله ۷) و در نتیجه میزان کماتش مجاز نیز

مسیر توسط آب‌گیرها از خط اصلی برداشت می‌شود، بنابراین قطر خط لوله به صورت تلسکوپي و مطابق شکل کاهش می‌یابد. بر اساس بررسی‌های انجام شده دو نوع جنس لوله فولادی، GRP به عنوان گزینه‌های پیشنهادی معرفی شده‌اند. خط انتقال در مجموع به ۹ قسمت بر اساس تراز آب زیرزمینی، جنس خاک اطراف لوله مدفون، عبور جاده و وسایل حمل و نقل سنگین (کامیون) تقسیم شد تا تحلیل ریسک شکست بر اساس شرایط محیطی مختلف و با دقت بیشتر انجام شود. جاده اصلی که باعث اعمال بار زنده بر خطوط 1600 و 1500 شده جاده گچساران-بابا میدان است.

۴- متغیرهای تصادفی پایه

چنانچه بیان شد، هدف از تحلیل عدم قطعیت، تعیین مشخصه‌های آماری خروجی سیستم که در قسمت پیشین معرفی شدند، بر اساس مشخصات آماری متغیرهای تصادفی پایه یا ورودی است. مشخصه‌های آماری متغیرهای خروجی در صورت به کارگیری شبیه‌سازی مونت کارلو به صورت تابع توزیع تجمعی^۱ یا تابع توزیع تجمعی مکمل ($CCDF=1-CDF$)^۲ حاصل می‌شوند. نمودار CDF یک متغیر، احتمال کوچکتر یا مساوی بودن آن متغیر از مقدار مشخص یعنی $P(X \leq x)$ را نشان می‌دهد. در صورتی که نمودار CCDF نشان‌دهنده احتمال آن است که متغیر موردنظر مساوی یا بزرگتر از مقدار معینی باشد یا $P(X \geq x)$. به عنوان مثال مطابق شکل ۳-b، احتمال آنکه مقدار فشار ضربه در لوله 1400 بیش از $1/4$ N/mm² باشد، $0/2$ است. برای رسم نمودار CCDF پس از تولید متغیرهای تصادفی ورودی یا محاسبه متغیرهای تصادفی خروجی، آنها را به ترتیب صعودی (نزولی) مرتب کرده و یک احتمال تجربی به مقدار آن منصوب می‌شود. به این منظور معمولاً از رابطه موسوم به ویبول به صورت $p=i/(n+1)$ استفاده می‌شود. در این رابطه i رتبه متغیر موردنظر، n تعداد کل مقدار تولید شده (در اینجا $n=100$)، و $p=Pr(X \leq x)$ برای CDF و $p=Pr(X \geq x)$ برای CCDF است (T.Kottogoda and Rosso, 2008).

(2008)

۴-۱- لوله فولادی

¹ Cumulative Distribution Function (CDF)

² Complementary Cumulative Distribution Function (CCDF)



افزایش می‌یابد. از نمودار شکل ۷-a مشخص است که خطوط ۱۵۰۰ و ۱۶۰۰ در بخش‌هایی که سطح آب زیرزمینی در آنها جدول ۱- متغیرهای تصادفی مرتبط با لوله فولادی، و مقدار میانگین و انحراف معیار آنها

Table 1. Random variables related to steel pipe and their mean and standard deviation

	Height of Soil cover	Diameter	Specific weight	Wheel load	Safety factor	Delayed factor	Soil modulus	Groundwater height
Variable	H	D	γ_s	P	FS	D_l	E'	H_w
Unit	m	mm	kN/m^3	kN/m	-	-	N/mm^2	mm
Mean	-	-	20	90	3	1.25	1.4	1200
St. Dev.	-	-	2	45	0.6	0.125	0.07	240

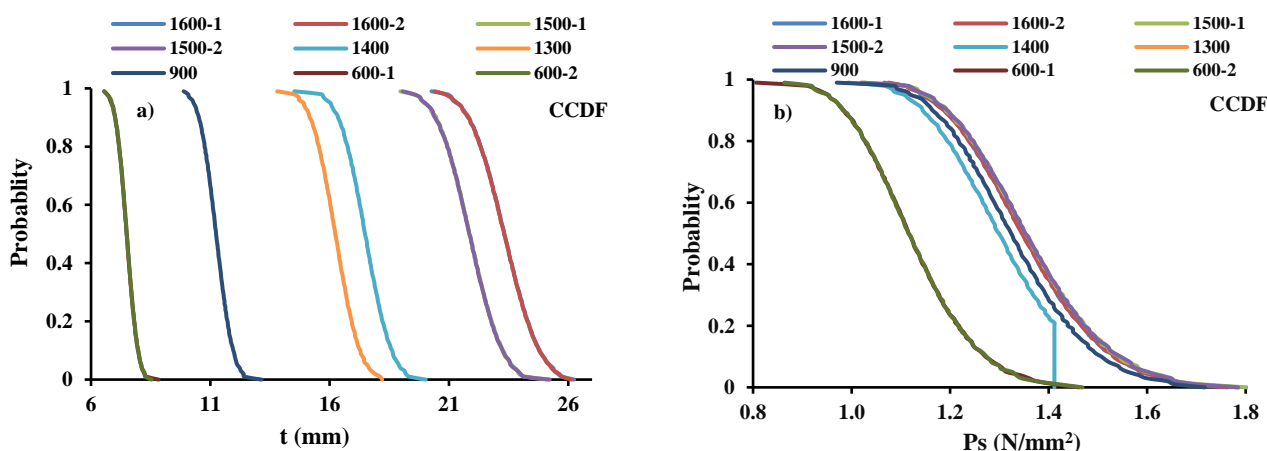


Fig. 3. CCDF curves for thickness and surge pressure for different diameters in steel pipe

شکل ۳- نمودارهای CCDF برای ضخامت و فشار ضربه لوله‌های فولادی در قطرهای مختلف

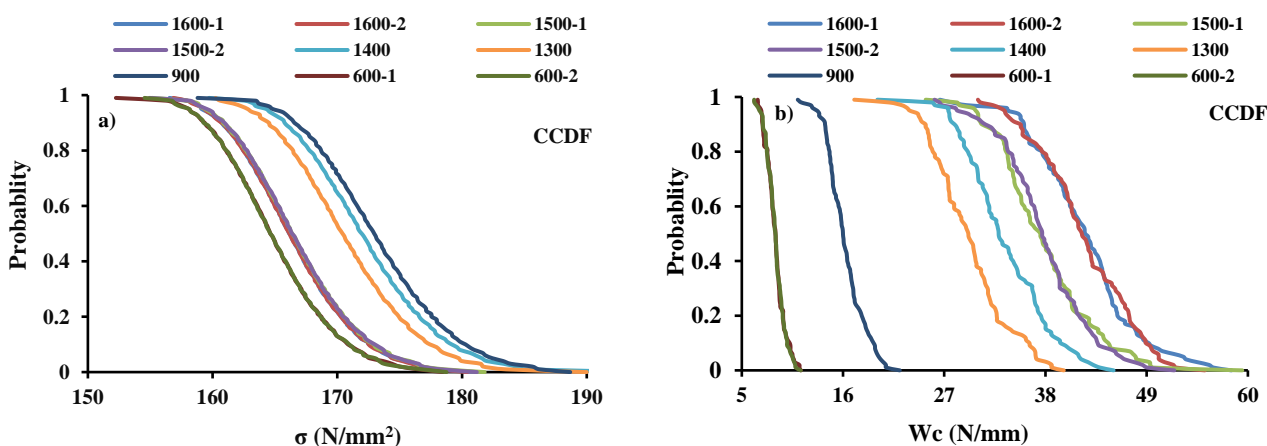


Fig. 4. CCDF curves for ring compression and dead load for different diameters in steel pipe

شکل ۴- نمودارهای CCDF برای تنش کششی و بار مرده در قطرهای مختلف لوله فولادی



۴-۲- لوله GRP

جدول ۲ مشخصه‌های آماری را برای لوله GRP نشان می‌دهد. همبستگی بالا بین قطر لوله و ضخامت آن منجر به انتخاب $R=0.9$ شده است. از سویی دیگر واضح است، با افزایش ضخامت لوله (t) مقاومت آن در برابر تغییر شکل بیشتر شده و در نتیجه ضریب تغییر شکل (D_f) کاهش می‌یابد. بنابراین مقدار R بین این دو متغیر 0.7 - لحاظ شده است.

فشار کار از متغیرهای تأثیرگذار در این جنس لوله بوده و حاصل اختلاف هد ارتفاعی و میزان اصطکاک در مسیر است. بر این اساس و مطابق شکل ۸-۸ می‌توان خطوط لوله بررسی شده را به دو گروه تقسیم کرد: گروه اول خطوطی که جریان ثقلی داشته و در عین حال مسیرشان کوتاه است (مانند خط ۱-۶۰۰). گروه دوم هم اصطکاک بیشتری دارند و هم اختلاف هد ارتفاعی قابل توجهی دارند (مانند خط ۲-۶۰۰). مطابق نمودار شکل ۸ حداکثر فشار کار برای دسته اول با احتمال ۵ درصد برابر 0.5 N/mm^2 و برای دسته دوم تقریباً ۱ (دو برابر) است. روند تغییرات فشار ضربه (شکل ۸-۸) برای لوله GRP مشابه لوله فولادی است. در اینجا نیز خط ۶۰۰ کمتر تحت تأثیر فشار ضربه بوده و علت آن افت جریان در اثر برداشت آب در مسیر خط است. شکل ۸-۸ مجموع فشارهای ضربه و کار را نشان می‌دهد.

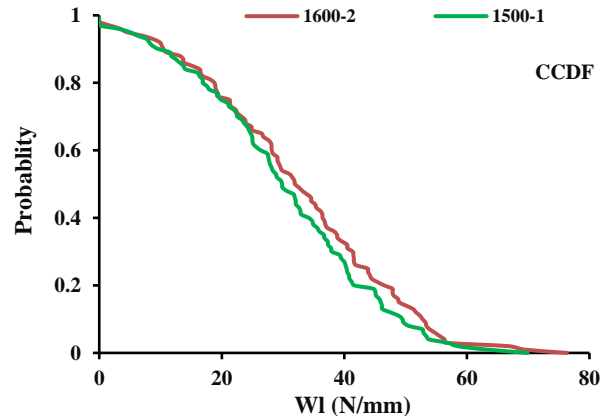


Fig. 5. CCDF curves for live load for different diameters in steel pipe

شکل ۵- نمودارهای CCDF برای بار زنده در قطرهای مختلف لوله فولادی

پایین است، کمانش مجاز بیشتری دارند (خطوط ۲-۱۶۰۰ و ۲-۱۵۰۰) و این نشان می‌دهد با افزایش سطح آب زیرزمینی ریسک شکست نیز بالاتر می‌رود. نمودارهای شکل ۷-۷b و ۷-۷c افزایش کمانش در اثر مکش یا بار زنده را نشان می‌دهند. خط ۲-۱۶۰۰ کمانشی در بازه 0.0813 N/mm^2 تا 0.0912 N/mm^2 دارد، حال آنکه این مقدار برای خط ۱۴۰۰ در بازه 0.0794 N/mm^2 تا 0.0877 N/mm^2 متغیر است.

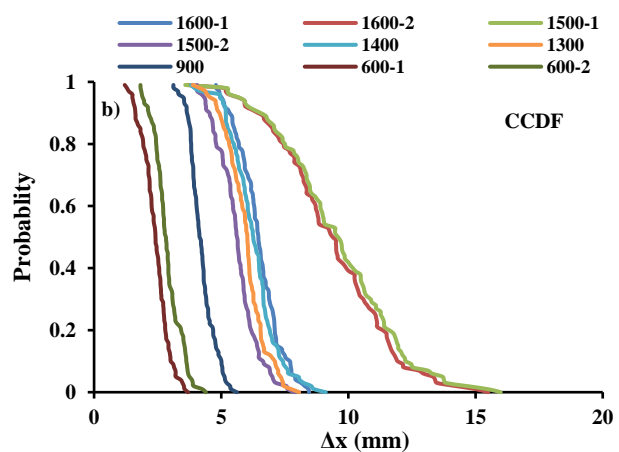
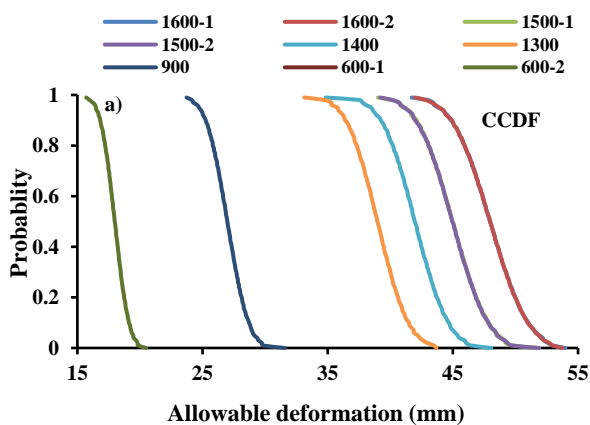


Fig. 6. CCDF curves for horizontal deflection and allowed deflection for different diameters in steel pipe

شکل ۶- نمودارهای CCDF برای تغییر شکل مجاز و تغییر شکل افقی در قطرهای مختلف لوله فولادی



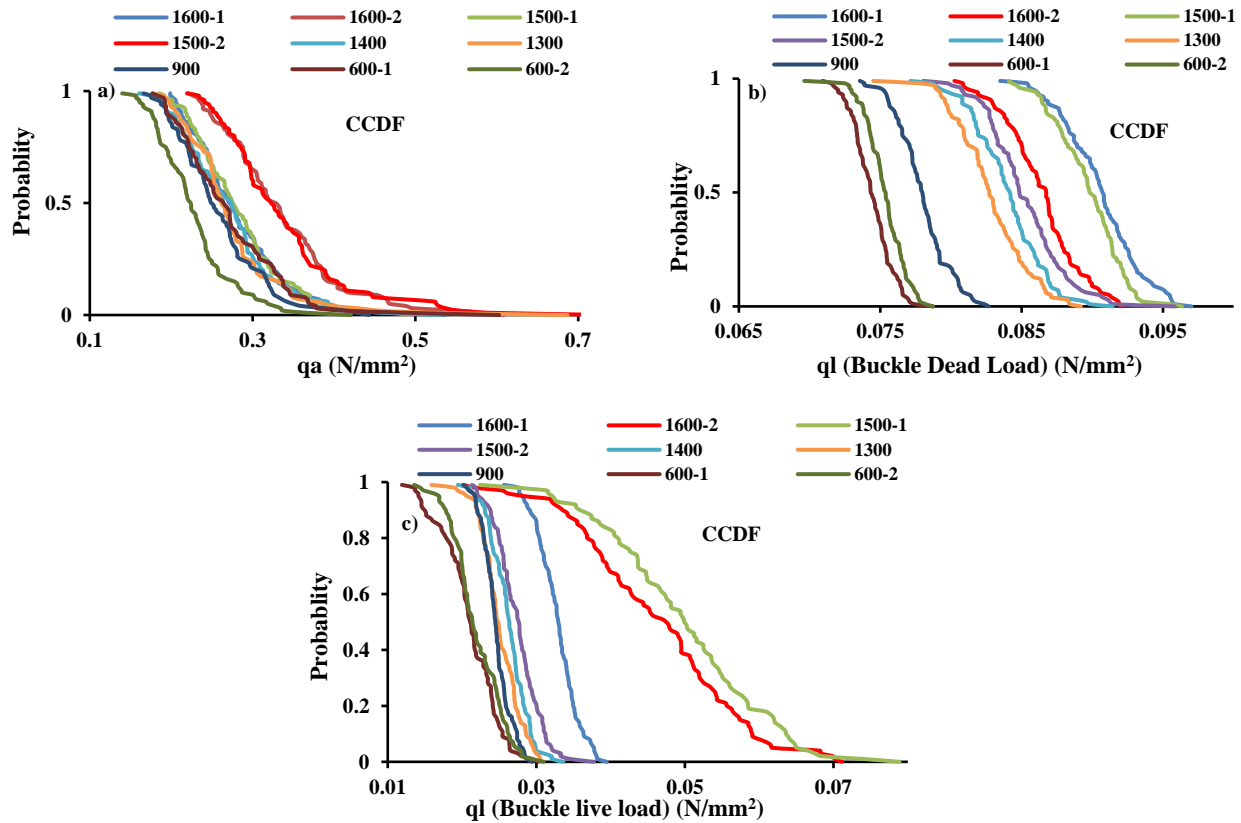


Fig. 7. CCDF curves for dead load, live load and allowed buckle for different diameters in steel pipe
 شکل ۷- نمودارهای CCDF برای کمانش مجاز و کمانش‌های تحت بارهای زنده و مرده در قطرهای مختلف لوله فولادی

جدول ۲- متغیرهای تصادفی مرتبط با لوله GRP و مقدار میانگین و انحراف معیار آنها

Table 2. Random variables related to GRP pipe and their mean and standard deviation

	Height of soil cover	Thickness	Diameter	Specific weight	Wheel load	Safety factor	Deformation coefficient	Delayed factor	Soil modulus
Variable	H	t	D	γ_s	P	FS	D_f	D_l	E'
Unit	m	mm	mm	kN/m^3	kN/m	-	-	-	N/mm^2
Mean	-	-	-	19.8	90	1.4	3.5	1.25	2.8
St. Dev.	-	-	-	1.98	45	0.07	0.35	0.125	0.14

کم (۶۰۰ و ۹۰۰) چنانچه لوله در عمق ترانشه مناسب باشد، حد کمانش مجاز آن بالا بوده و اعتمادپذیری زیادی خواهد داشت. مطابق شکل ۱۱-۱۱ دو خطی که تحت اثر بار زنده هستند با محدوده فاصله اطمینان ۹۰ درصد (۵ تا ۹۵ درصد) در بازه ۳۹/۶ تا ۸۴/۳ برای خط ۱-۱۵۰۰ و نیز برای خط ۲-۱۶۰۰ برای همین فاصله در بازه ۴۳/۸ تا ۸۹/۸ kN/m^2 تغییر می‌کنند. از دیگر متغیرهای تأثیرگذار در ارزیابی این کنترل سطح آب زیرزمینی است. خط ۱-۱۵۰۰ چون در مجاورت رودخانه است، حد کمانش آن تحت بار

متغیر مهم دیگر تغییر شکل قائم در لوله است (شکل ۹). برای تحلیل این متغیر دو خط ۱-۱۵۰۰ و ۲-۱۵۰۰ مقایسه می‌شوند. خط ۲-۱۵۰۰ متأثر از بار زنده نیست (شکل ۱۰). بنابراین در محدوده ۱۲/۹۶ تا ۳۸/۶۶ mm تغییر شکل می‌دهد. اما خط ۱-۱۵۰۰ به دلیل اینکه در مسیر جاده است، میزان تغییر شکل آن ۲۱/۰۹۴ تا ۶۵/۱۰۲ mm است. این مقایسه ریسک بالای شکست لوله در اثر عبور جاده و در نتیجه وسایل نقلیه از روی آن را نشان می‌دهد. همان طور که شکل ۱۱-۸ نشان می‌دهد در قطرهای



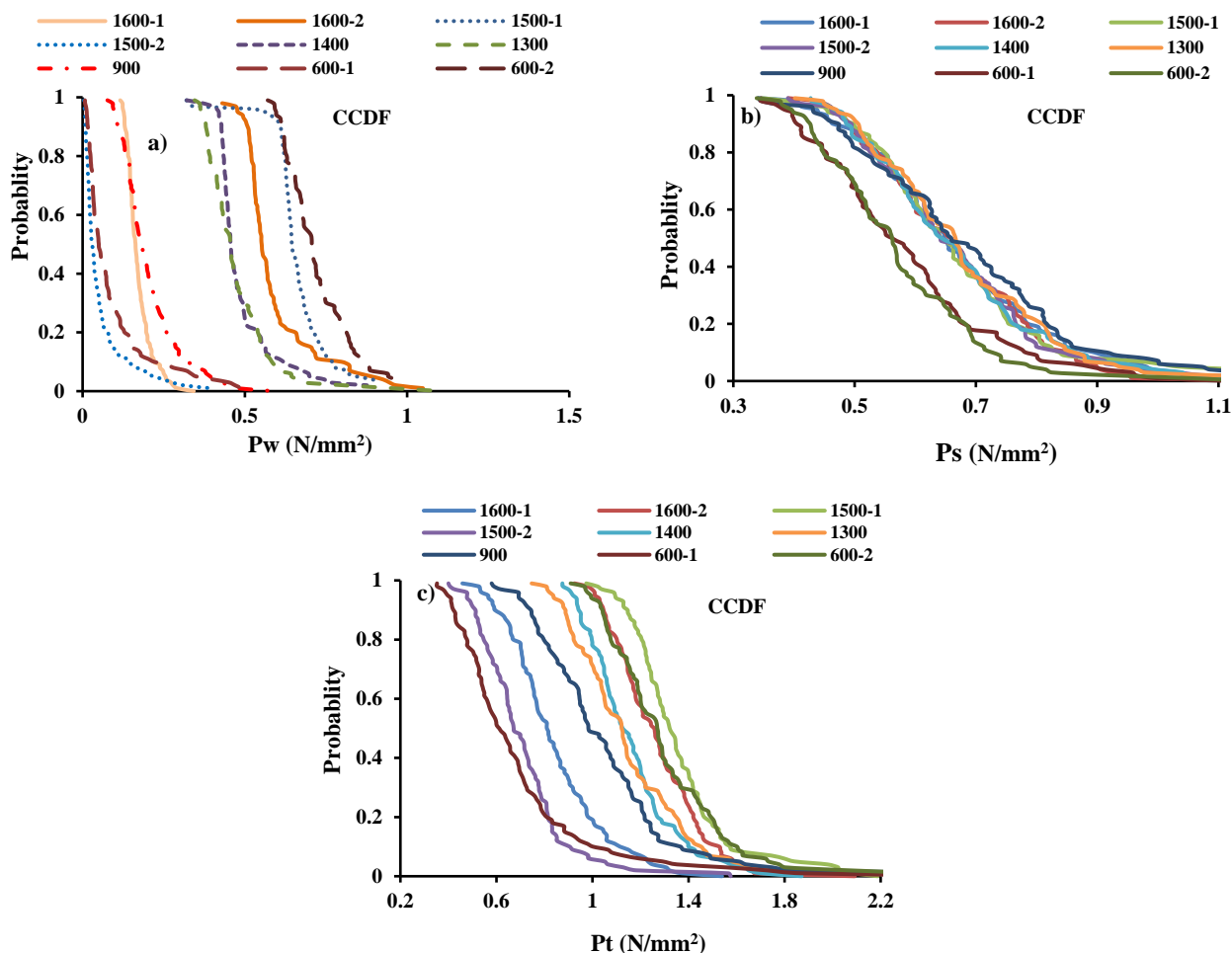


Fig. 8. CCDF curves for working pressure, surge pressure and total pressure for different diameters in grp pipe
 شکل ۸- نمودارهای CCDF برای فشار کار، فشار ضربه و فشار کل در قطرهای مختلف لوله GRP

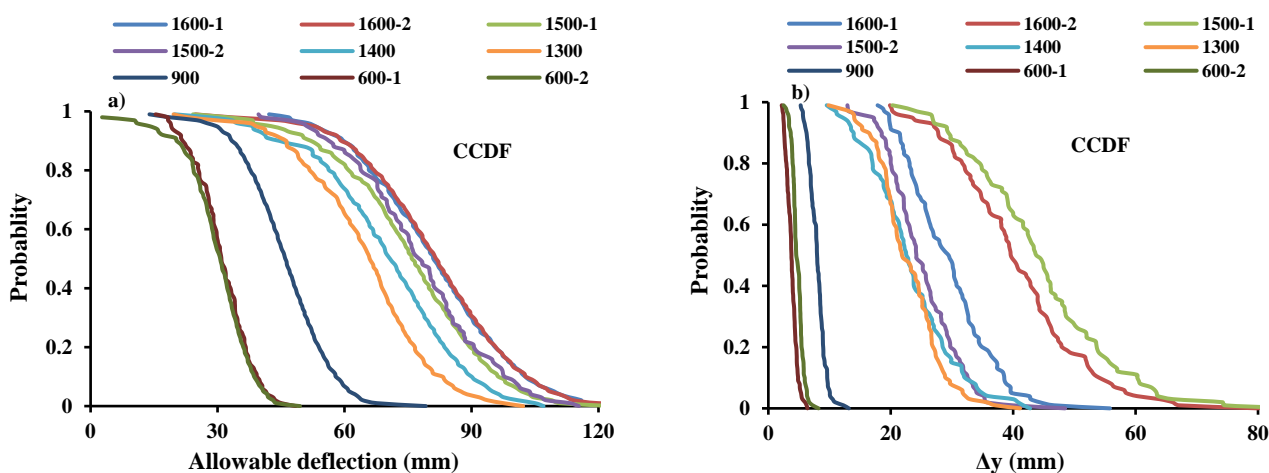


Fig. 9. CCDF curves for vertical deflection and allowed deflection for different diameters in grp pipe
 شکل ۹- نمودارهای CCDF برای تغییر شکل مجاز و انجام شده در قطرهای مختلف لوله GRP



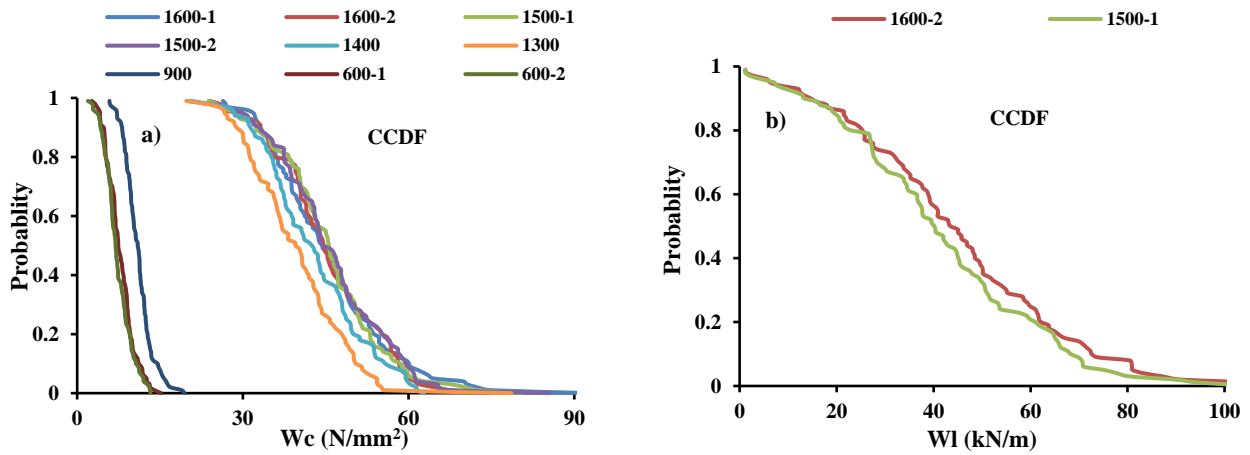


Fig. 10. CCDF curves for dead load and live load in grp for different diameters in GRP pipe
 شکل ۱۰- نمودارهای CCDF برای بارهای مرده و زنده در قطرهای مختلف لوله GRP

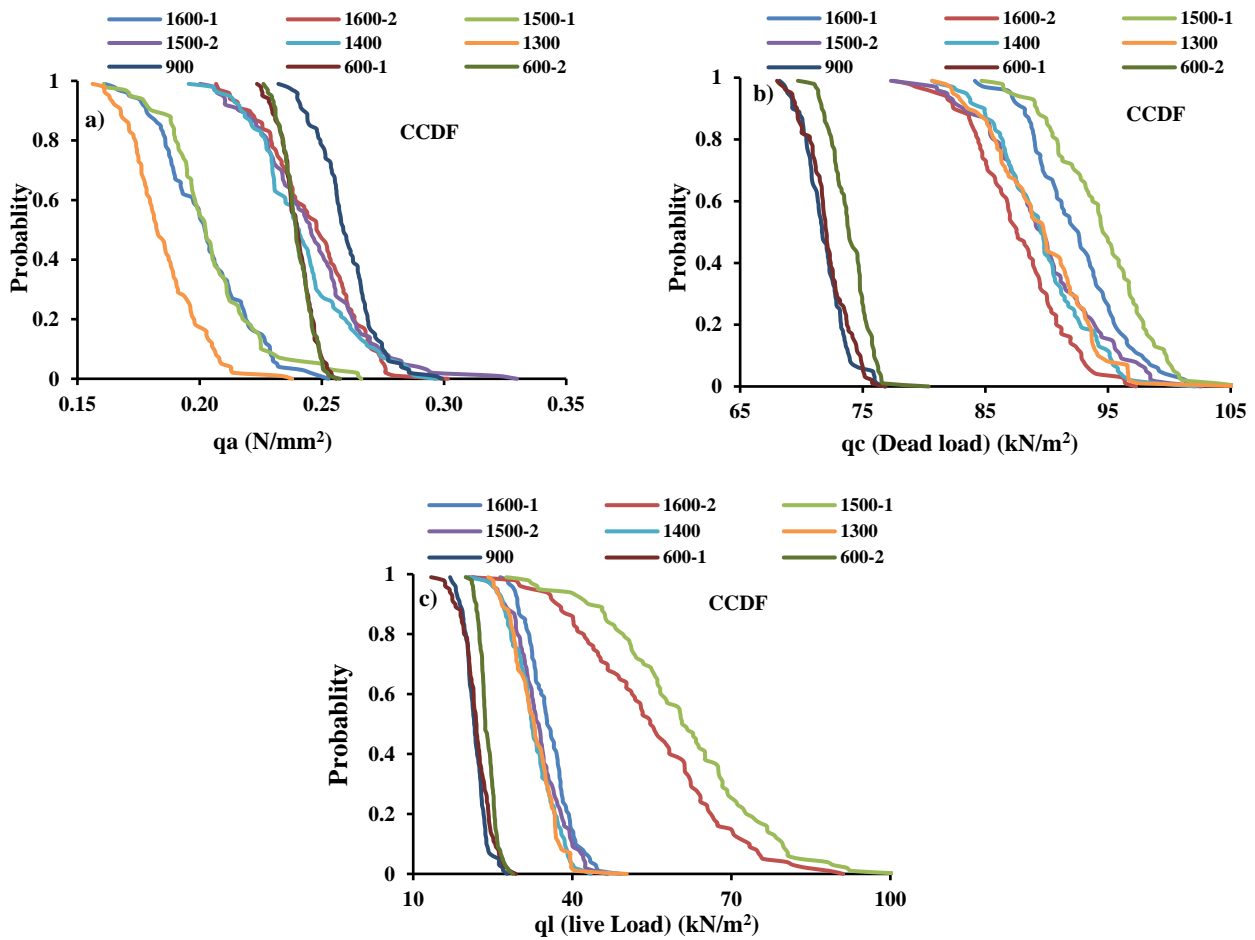


Fig. 11. CCDF curves for dead load, live load and allowed buckle for different diameters in grp
 شکل ۱۱- نمودارهای CCDF برای کمانش مجاز و کمانش‌های تحت بارهای زنده و مرده در قطرهای مختلف لوله GRP



نشده باشد، آن سناریو شکست خورده تلقی می‌شود. در ادامه نتایج برای هر جنس لوله ارائه شده است.

مقدار اعتمادپذیری خط لوله فولادی برای هر بخش از خط لوله به شرح جدول ۳ حاصل شده است. در اعتمادپذیری خط لوله فولادی فشار ضربه نقش بسیار کلیدی ایفا کرده و تقریباً تمامی خطوط متأثر از این متغیر بوده‌اند.

برای خطوط ۹۰۰ تا ۱۶۰۰ روند تغییرات مقدار فشار ضربه یکسان بوده، ولی در میان آنها خط ۹۰۰ علاوه بر آنکه فشار ضربه بیشتری در مقایسه با خطوط ۱۳۰۰ و ۱۴۰۰ متحمل شده، قطر آن نیز به میزان قابل توجهی کمتر بوده و در نهایت در محاسبات، میزان تنش آن نیز بیشتر شده و احتمال افزایش ریسک شکست متناظر با کنترل تنش را افزایش داده است.

خط لوله ۶۰۰ مطابق نمودار شکل ۳ کمترین فشار ضربه را تحمل کرده و در نتیجه مقدار اعتمادپذیری برای این خط بالا است. بخش دوم این خط به دلیل اینکه در مجاورت بستر رودخانه است اعتمادپذیری آن ۱ درصد از بخش نخست آن کمتر است و باعث شده تا این خط پر ریسک‌ترین کمانش تحت بار مرده را تجربه کند. همان طور که جدول ۳ نشان می‌دهد اعتمادپذیری کلی خط انتقال لوله فولادی برابر ۹۶/۶۹ درصد است.

نتایج اعتمادپذیری لوله GRP برای هر بخش به شرح جدول ۴ است. مقایسه مقدار جدول ۳ و ۴ نشان می‌دهد اعتمادپذیری هر بخش لوله فولادی تا چه حد نسبت به لوله GRP بیشتر است. در جدول ۳ دو خطی که تحت اثر بار زنده هستند (خطوط ۲-۱۶۰۰ و ۱-۱۵۰۰) ریسک شکست آنها در بدترین سناریو تقریباً دو برابر سایر خطوط (حدوداً ۸۰ درصد تغییر شکل مجاز، تغییر شکل انجام شده) است.

تأثیر بالا بودن سطح آب زیرزمینی در افزایش کمانش تحت بار مرده در خط ۱-۱۶۰۰ را می‌توان مشاهده کرد. تأثیر همین مؤلفه (سطح آب زیرزمینی) در کمانش تحت بار زنده نیز قابل مشاهده است. هر دو خط ۲-۱۶۰۰ و ۱-۱۵۰۰ متحمل بار زنده و عبور وسایل حمل و نقل هستند، ولی بخش نخست خط ۱۵۰۰ اعتمادپذیری کمتری دارد، زیرا سطح آب زیرزمینی در آن بالا است. مطابق جدول ۴ میزان اعتمادپذیری خط انتقال با لوله GRP برابر ۸۶/۳۵ درصد است.

زنده بیشتر شده است. در شکل ۱۱-b لوله‌هایی با قطر کمتر کمانش کمتری در قیاس با سایر لوله‌ها تحت بار مرده داشته‌اند.

۳-۴- مقایسه عملکرد دو لوله فولادی و GRP

با مقایسه شکل‌های ۳ و ۸ مهم‌ترین دلیل تفاوت تغییرات فشار ضربه مربوط به مدول دو جنس لوله است که برای لوله GRP تقریباً یک‌دهم لوله فولادی است. این پارامتر در کمانش مجاز نیز تأثیرگذار است و به عبارتی ریسک شکست در اثر فشار ضربه در لوله فولادی می‌تواند بیشتر باشد.

در کنترل تغییر شکل دو لوله اعتمادپذیری لوله فولادی به مراتب بیشتر است، به طوری که در احتمال ۵ درصد تغییر شکل مجاز خط ۲-۱۶۰۰ که تحت اثر بار زنده است، برابر ۵۱/۸۸ و میزان تغییر شکل جانبی برابر ۱۳/۳۲۷ mm است که این میزان ۲۵/۷ درصد ظرفیت خط است همین مقدار مجاز برای همین قطر برای لوله GRP برابر ۱۰۸/۴۱ میلی‌متر و میزان تغییر قائم برابر ۶۷/۰۷۳ میلی‌متر است که برابر ۶۱/۸۷ درصد ظرفیت خط می‌باشد. مدول واکنش خاک موجود در بستر کارگذاری لوله طبق ضوابط طراحی برای لوله GRP برابر ۲/۸ و فولادی معادل ۱/۴ بوده که بیانگر این است که خاک ترانشه برای لوله نوع اول نیاز به درجه تراکم بیشتری دارد.

همچنین مدول الاستیسیته برای فولادی حدوداً ۱۰ برابر GRP است که در مجموع این دو پارامتر از عوامل تأثیرگذار در تغییرات نمودارها است. در نتیجه می‌توان گفت، برای قطرهای کم حد کمانش مجاز در GRP بیش از فولادی است (نمودار شکل‌های ۷ و ۱۱).

۴-۴- تحلیل اعتمادپذیری

به منظور برآورد اعتمادپذیری کلی خط لوله، مجموع وزنی اعتمادپذیری قطعات مختلف آن محاسبه شد. وزن هر قطعه متناسب با طول آن در نظر گرفته شد.

به عنوان مثال خط ۹۰۰ حدود ۸ درصد طول خط انتقال را تشکیل داد که همین مقدار به عنوان مقدار وزنی این بخش لحاظ شد. اعتمادپذیری کلی برای هر بخش خط انتقال در ۱۰۰ سناریو محاسبه شده و در هر سناریو چنانچه تنها یکی از کنترل‌ها تأمین



جدول ۳- اعتمادپذیری برای بخش‌های مختلف خط انتقال لوله فولادی

Table 3. Reliability results for steel pipeline

D	1600-1	1600-2	1500-1	1500-2	1400	1300	900	600-1	600-2
Q(discharge)	2490	2490	2200	2200	1900	1590	1000	400	400
P _w	3.5	3.5	3.5	3.5	3	3	3	3	3
P(wheel load)	0	90	90	0	0	0	0	0	0
Length	2235	3157	2385	1120	1996	5055	1791	1090	3759
W _i	0.10	0.14	0.11	0.05	0.09	0.22	0.08	0.05	0.17
Re _i (reliability)	99	99	99	99	91	95	88	100	99
$\sum Re_i \times W_i$	96.69 = Overall reliability of steel pipeline								

جدول ۴- نتایج اعتمادپذیری برای بخش‌های مختلف خط انتقال لوله GRP

Table 4. Reliability results for GRP pipeline

D	1600-1	1600-2	1500-1	1500-2	1400	1300	900	600-1	600-2
P _c	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.05	1.05	1.05
H _w	1.4	0	1.4	0	1.3	1	0.5	0.5	0
Length	2235	3157	2385	1120	1996	5055	1791	1090	3759
W _i	0.10	0.14	0.11	0.05	0.09	0.22	0.08	0.05	0.17
Re _i (reliability)	88	86	84	92	92	79	90	96	89
$\sum Re_i \times W_i$	86.349 = Overall reliability of GRP pipeline								

۵- نتیجه‌گیری

اعتمادپذیری خطوط لوله انتقال آب است که در پژوهش‌های انجام شده در گذشته مورد توجه قرار نگرفته است. در این پژوهش مشخص شد که اعمال بار زنده در اثر عبور مسیر حمل و نقل جاده‌ای تغییر شکلی تقریباً ۲ برابری در قیاس با سایر خطوط در ریسک ۵ درصد نشان می‌دهند. از جمله متغیرهای غیرقطعی که تأثیر جنس خاک بر ریسک شکست را نشان داد ضریب تأخیر (D_i) بود. در مناطقی که تراکم پذیری خاک بالا است، ضریب تأخیر افزایش یافته و در نتیجه تغییر شکل و ریسک شکست زیاد شد. کماتش متغیری متأثر از سطح آب زیرزمینی، مدول واکنش خاک و ممان اینرسی لوله بود. خروجی نمودارها برای کماتش مجاز هر دو لوله بیان کرد، لوله GRP (به‌عنوان یک لوله انعطاف‌پذیر) حد کماتش مجاز کمتری نسبت به لوله فولادی (به‌عنوان یک لوله نیمه انعطاف‌پذیر) دارد. این موضوع، بیانگر آن بود با افزایش صلبیت لوله ریسک عبور از حد کماتش مجاز کمتر

در این پژوهش، ریسک شکست و اعتمادپذیری سیستم خط لوله انتقال آب کشاورزی شهر باشت از محل رودخانه شیو به دلیل طول زیاد، عبور از شرایط محیطی مختلف (خاک و آب زیرزمینی) و گستردگی تغییرات متغیرهای داخلی (قطر و ضخامت) انتخاب و به‌منظور بررسی ریسک شکست، تحلیل شد. این سیستم در مجموع به ۹ بخش (خط) بر اساس قطر، دبی جریان، سطح آب زیرزمینی و بار زنده تقسیم شد و تحلیل اعتمادپذیری بر روی دو گزینه لوله فولادی و لوله GRP با توجه به کنترل‌های صورت گرفته برای هر یک انجام شد. با به‌کارگیری شبیه‌سازی مونت کارلو و روش نمونه‌گیری لاتین هاپرکیوب، ۱۰۰ سناریو تصادفی از متغیرهای تصادفی با توزیع نرمال تولید شد. نوآوری مشخص این پژوهش استفاده از روش تجزیه چولسکی به منظور تولید متغیرهای تصادفی وابسته به‌صورت یک توزیع نرمال چند متغیره در محاسبه



اعتمادپذیری لوله فولادی حدوداً ۱۰ درصد بیشتر از لوله GRP است.

۶-قدردانی

به این وسیله از شرکت مهندسین مشاور آبدان فراز که در تهیه بخشی از داده‌های مورد نیاز این پژوهش همکاری کردند، قدردانی می‌شود.

می‌شود. نتایج برای متغیر خروجی فشار کار نشان داد در خطوطی که نوع جریان در آنها رانشی است (اختلاف هد ابتدا و انتها مثبت است). هر چه اختلاف هد ارتفاعی افزایش یابد، فشار کار نیز بیشتر می‌شود. همچنین طول مسیر نقش بسیار مهمی در افزایش افت و فشار کار سیستم ایفا می‌کند. به این صورت که هر چقدر طول مسیر بیشتر باشد، فشار کار سیستم بیشتر و به صورت طبیعی ریسک شکست نیز بیشتر است. در نهایت از نتایج مشخص شد که قابلیت

References

- Abdan Faraz Consulting Engineers, 2017. *Summary Report of Designing Water Pipeline for Basht*. Tehran, Iran. (In Persian)
- AWWA. 1999a. *Fiberglass Pipe Design*, AWWA MANUAL M45. ASME. 1996. *Welded Steel Pipe-Steel Plate Engineering Data-3*. [Link]
- AWWA. 1999b. *Fiberglass Pipe Design*, AWWA Manual M45. American Water Works Association Pub., Texas, USA. [Link]
- AWWA. 2013. *Steel Pipe Design Manual*, AWWA Manual M11. American Water Works Association Pub., Texas, USA.
- Debón, A., Carrión, A., Cabrera, E. & Solano, H. 2010. Comparing risk of failure models in water supply networks using ROC curves. *Reliability Engineering and System Safety*, 95(1), 43-48. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2009.07.004>.
- Kleiner, Y. and Rajani, B. 2014. Considering time-dependent factors in the statistical prediction of water main breaks NRC Publications Archive (NPARC) Archives des publications du CNRC (NPARC) Considering time-dependent factors in the statistical prediction of water main breaks Klei, AWWA, (January 2000). [Link]
- Moser, A. P. & Folkman, S. 2008. *Buried Pipe Design*. 3rd Ed. McGraw-Hill Education. New York, USA. [Link]
- Rajeev, P., Kodikara, J., Robert, D., Zeman, P. & Rajani, B. 2014. Factors contributing to large diameter water pipe failure. *Water Asset Management International*, 10(3), 9-14. [Link]
- Rezaei, H., Ryan, B. & Stoianov, I. 2015. Pipe failure analysis and impact of dynamic hydraulic conditions in water supply networks. *Procedia Engineering*, 119(1), 253-262. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.883. [Link]
- Kottegoda, N. T. & Rosso, R. 2008. *Applied Statistics for Civil and Environmental Engineers*. 2nd Ed. Blackwell Publishing. Oxford, UK. [Link]
- Tung, Y. & Yen, B. C. 2005. *Hydrosystems Engineering Uncertainty Analysis*. ASCE Library, North American. [Link]
- Tung, Y., Yen, B. C. & Melching, C. S. 2005. *Hydrosystems Engineering Reliability Assessment and Risk Analysis*. HKUST SPD, The Institutional Repository. Hong Kong University. <https://hdl.handle.net/1783.1/11682>.



© The Author(s)

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

