

dr inż. Andrzej Studziński¹⁾*

ORCID: 0000-0002-6551-9490

Koszty naprawy awarii przewodów wodociągowych

Water pipes failure repair costs

DOI: 10.15199/33.2022.11.46

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę kosztów naprawy przewodów wodociągowych, której podstawą są dane eksploatacyjne. W analizie uwzględniono koszty bezpośrednie, na które składają się koszty materiałów, sprzętu oraz robocizny. Wykorzystano wieloetapową analizę regresji, rozpatrywano zależność kosztów usuwania awarii od średnicy przewodu, jego rodzaju, materiału oraz czasu trwania naprawy. Badania nie wykazały zależności kosztów od materiału przewodu i jego rodzaju na przyjętym poziomie istotności 0,05.

Słowa kluczowe: awaria; koszt naprawy awarii; analiza regresji; sieć wodociągowa.

Abstract. The paper presents an analysis of the costs of repairing water pipes, which is based on operational data. The analysis took into account direct costs, which include the cost of materials, equipment and labor. A multi-stage regression analysis was used, the dependence of failure removal costs on: the diameter of the pipeline, its type, material and the duration of the repair was considered. The research did not show any dependence of costs on the pipe material and its type at the statistical significance 0.05.

Keywords: failure; cost of failure removal; regression analysis; water network.

Koszty naprawy przewodów wodociągowych są jednym z istotnych czynników w działalności przedsiębiorstw zaopatrujących w wodę. Ich praktyczne wykorzystanie sprowadza się do konieczności zapewnienia środków finansowych oraz opracowywania strategii remontów i wymiany przewodów [1–6], które są istotnym elementem tworzenia cen dostarczanej wody, a także podstawą dalszych analiz, w tym ryzyka [7–10].

Koszty naprawy przewodów wodociągowych zależą od wielu czynników, w tym w największym stopniu od rodzaju przewodów (średnica, materiał, stan techniczny), typu uszkodzonych elementów (rurociąg, armatura), rodzaju uszkodzeń (nieszczelność złącza, pęknięcie lub perforacja rury) i ich wielkości, a także od zagłębienia przewodów [11–16]. Najczęściej uwzględnianym parametrem jest średnica przewodu. W pracach [11–16] uzyskano jednak istotne korelacje wzrostu jednostkowych kosztów naprawy oraz kosztów składowych (materiały, robocizna, sprzęt) wraz ze wzrostem średnicy przewodów, ale jednym z kluczowych parametrów może być również stopień urbanizacji. Przykładem jest średni koszt naprawy przyłączy wodo-

ciągowych w Nowym Jorku oceniany na 3000–5000 \$ [17]. W literaturze polskiej pierwsze kompleksowe badania kosztów naprawy przewodów wodociągowych pokazano w pracach [11–13]. Opracowano je dla Wrocławia i dotyczyły lat 1993, 1996 i 1999. W pracach tych określono zależność kosztów naprawy od typu uszkodzenia.

Celem prezentowanego artykułu było poszukiwanie zależności pomiędzy kosztami naprawy przewodów wodociągowych K a uznanymi za istotne zmiennymi objaśniającymi, tj. średnicą przewodu X_1 , rodzajem przewodu X_2 , materiałem X_3 oraz czasem trwania naprawy X_4 . W tym celu wykorzystano wieloetapową analizę regresji.

Obiekt i metoda badań

Badania prowadzono, bazując na systemie zaopatrzenia w wodę średniej wielkości miasta zlokalizowanego w południowej Polsce. Wodociąg zaopatruje w wodę ponad 100 tys. mieszkańców miasta oraz sąsiednich miejscowości. Sieć wodociągowa ma długość przekraczającą 1000 km, w tym 5,9% długości stanowiły przewody rozdzielcze, natomiast 40,8% długości miały podłączenia wodociągowe (stan na koniec 2015 r.). W strukturze materiałowej dominowały przewody polietylenowe 57,4% oraz wykonane z żeliwa szarego – 22,5%. Pozostałe materiały, z których

wykonano przewody, miały następujący udział w długości sieci: stal 8,6%, PVC 7,9%, azbestocement AC 3,3% oraz żeliwo sferoidalne 0,3%. Wiek najstarszych eksploatowanych przewodów wodociągowych przekraczał 100 lat. Sieć wodociągowa cechuje się bardzo dobrym stanem technicznym. Średnia intensywność uszkodzeń przewodów λ wynosiła ok. 0,10 $\text{km}^{-1}\text{a}^{-1}$, co świadczy o bardzo dobrej jakości budowy nowych oraz eksploatacji istniejących przewodów wodociągowych.

Podstawą opracowania są dane eksploatacyjne zebrane w ciągu roku kalendarzowego i aktualizowane do poziomu cen na koniec 2018 r. Wszystkie awarie były usuwane przez przedsiębiorstwo wodociągowe eksploatujące wodociąg – prace wykonywali pracownicy przedsiębiorstwa z wykorzystaniem sprzętu, którym przedsiębiorstwo dysponowało. Koszty napraw wyznaczono jako sumę kosztów bezpośrednich, tj. kosztów materiałów, robocizny oraz sprzętu wykorzystanego podczas robót. W przypadku każdej awarii zestawiono materiały użyte podczas naprawy, pobrane z magazynu. Ich koszt określono wg stawek obowiązujących w przedsiębiorstwie. Odnotowano liczbę pracowników i ich czas pracy, koszty robocizny określono jako iloczyn liczby roboczogodzin i średniej stawki godzinowej brutto pracowników zatrudnionych w brygadach remontowych. Analogicznie od-

¹⁾ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury; astud@prz.edu.pl

notowano rodzaj i czas pracy użytych maszyn i urządzeń, a ich koszt określono jako iloczyn czasu pracy maszyn i stawek godzinowych obowiązujących w przedsiębiorstwie wodociągowym, przy czym w przypadku konieczności transportu gruntu z wykopów oraz kruszywo używanych do wypełnienia wykopów, koszty sprzętu uwzględniały również zewnętrzne usługi transportowe określone na podstawie faktur od usługodawców. Wszystkie ceny jednostkowe były cenami brutto stosowanymi w przedsiębiorstwie wodociągowym na koniec 2018 r.

Badania dotyczą przewodów wodociągowych o średnicach nominalnych odniesionych do średnicy wewnętrznej przewodu DN/ID 25–800 mm. Zarejestrowano 282 awarie rurociągów oraz 4 awarie armatury (nieuwzględnione w opracowaniu). Zestawienie awarii z uwzględnieniem poszczególnych średnic przewodów i materiałów podano w tabeli 1. W przypadku krajowych sieci wodociągowych przeważają: w starszych przewody stalowe o ϕ 25 mm, a w młodszych podłączeniach wodociągowych PE ϕ 32. W przypadku przewodów rozdzielczych, które dawniej wykonywane były głównie z żeliwa szarego, a obecnie z PE i PVC, dominują przewody o ϕ 80, 100 mm. Koszty awarii zostały pokazane na rysunku 1.

Przedstawione w [13–16] analizy składników kosztów wskazują, że koszty robocizny związane z naprawą przewodów wodociągowych są znacznie zróżnicowane [15] i w największym stopniu uzależnione od średnicy naprawianego przewodu. Nawet w obrębie poszczególnych średnic wykazują jednak dużą rozbieżność. Koszty te nie są wynikiem funkcji przewodów, ale ze względu na powiązanie średnicy z funkcją przewodu można stwierdzić, że **najniższe koszty jednostkowe dotyczą przyłączy wodociągowych, następnie przewodów rozdzielczych, a największe magistral**. Średni koszt robocizny w przypadku awarii wyniósł 800 zł (poziom cen z 2015 r.) i wynikał głównie z czasu trwania naprawy. Z kolei koszty sprzętu są przede wszystkim zależne od średnicy, czasu trwania awarii oraz rodzaju przewodu. Zależność od rodzaju przewodu można tłumaczyć tym, że te kluczowe z punktu

Tabela 1. Zestawienie awarii, poziom cen z 2018 r.

Table 1. Failure list, 2018 price level

DN/ID [mm]	Liczba awarii [-]	Zakres kosztów /mediana [zł]
25	143	241-19657/1701
32	22	507-2513/1358
40	2	1674-5545/3610
50	8	1107-7036/3112
65	3	907-3549/1343
80	31	1159-12388/4084
100	28	452-10379/3519
125	1	3035
150	16	486-14394/3226
200	5	2034-14182/3692
250	3	2977-7691/4702
300	4	5459-21678/9796
400	7	392-36204/6072
450	3	1184-45444/22471
500	2	1752-2471/2112
600	3	3189-7779/5099
800	1	37060

widzenia sprawności sieci wodociągowej przewody naprawiane są w pierwszej kolejności, co wpływa na zaangażowanie znacznych środków, w tym sprzętu. Wyraźne jest zróżnicowanie średnich kosztów materiałów w przypadku trzech grup przewodów, wynikających z ich funkcji. Wynoszą one: 1320 zł – przyłącza wodociągowe; 2691 zł – rozdzielcze, a 6340 zł – magistrale. Zaobserwowane różnice wynikają przede wszystkim ze średnic tych przewodów. Można zatem stwierdzić, że wraz ze wzrostem średnicy przeciętny koszt materiałów ulega zwiększeniu [16].

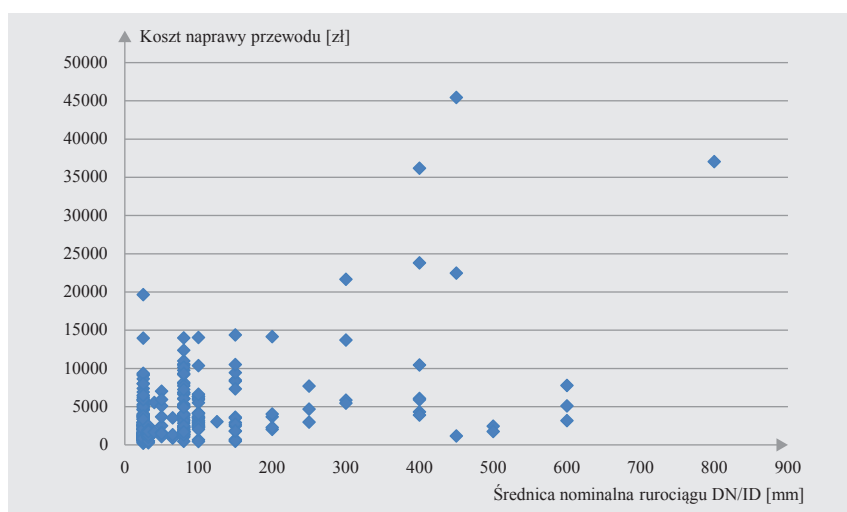
Obliczenia

Przeprowadzono analizę regresji uwzględniającą 4 zmienne: średnicę; rodzaj przewodu; materiał oraz czas naprawy. Predykat średnicy przewodów X_1 wyrażono w mm DN/ID. Przyjęto następujące wartości predykatów X_2 : przyłącze wodociągowe $X_2 = 1$; przewód rozdzielczy $X_2 = 2$; przewód magistralny $X_2 = 3$. Z kolei w przypadku materiałów wartości X_3 są następujące: stal $X_3 = 1$; PE $X_3 = 2$; żeliwo szare $X_3 = 3$; azbestocement AC $X_3 = 4$, PVC $X_3 = 5$ oraz żeliwo sferoidalne $X_3 = 6$. Zmienną czasu naprawy X_4 wyrażono w godzinach.

Analiza regresji czterech zmiennych przedstawiona w tabeli 2 wykazała, że zmienne X_2 oraz X_3 nie są statystycznie istotne na poziomie 0,05. Uzyskano następujące statystyki regresji w przypadku zmiennych X_1, X_2, X_3 oraz X_4 : $R = 0,70, R^2 = 0,49, \text{dopasowany } R^2 = 0,50, \text{ błąd standardowy } 3738$. W związku z tym wykonano obliczenia dla dwóch zmiennych, tj. X_1 – średnicy przewodu i X_4 – czasu trwania awarii (tabela 3). Uzyskano następujące statystyki regresji w przypadku zmiennych X_1, X_2, X_3 oraz X_4 : $R = 0,69, R^2 = 0,48, \text{dopasowany } R^2 = 0,48, \text{ błąd standardowy } 3449$.

Na podstawie przeprowadzonej wieloetapowej analizy regresji otrzymano równanie opisujące zależność statystyczną między K – kosztami naprawy [zł] a X_1 – średnicą przewodu [mm] oraz X_4 czasem trwania awarii [h] (1):

$$K = 1133,68 + 20,21X_1 + 108,78X_4$$



Rys. 1. Koszty bezpośrednie usuwania awarii
Fig. 1. Direct costs of failure repair

Tabela 2. Analiza wariancji dla zmiennych X_1, X_2, X_3 i X_4
 Table 2. Analysis of variance for variable X_1, X_2, X_3 and X_4

	df	SS	MS	F	Istotność F
Regresja	4	3666212394	916553098	65,60103092	5,60051E-39
Resztkowy	277	3870140525	13971626,4		
Razem	281	7536352919			

	Współczynniki	Błąd standardowy	t Stat	Wartość-p	Dolne 95%	Górne 95%
Przecięcie	-167,018	762,0316079	-0,21917441	0,826675602	-1667,126613	1333,090962
X_1	14,26257	3,812258645	3,74123858	0,000222578	6,757890011	21,76724825
X_2	1244,935	744,4782195	1,67222493	0,095609083	-220,6187628	2710,488838
X_3	-15,7023	270,5224631	-0,05804435	0,953755152	-548,2433654	516,8387647
X_4	110,5305	10,49736664	10,5293507	5,0036E-22	89,86570579	131,1952039

Tabela 3. Analiza wariancji dla zmiennych X_1 i X_4
 Table 3. Analysis of variance for variables X_1 and X_4

	df	SS	MS	F	Istotność F
Regresja	2	3614066851	1807033426	128,5379	2,72105E-40
Resztkowy	279	3922286068	14058373		
Razem	281	7536352919			

	Współczynniki	Błąd standardowy	t Stat	Wartość-p	Dolne 95%	Górne 95%
Przecięcie	1133,689614	287,4854226	3,94346817	0,000102	567,7736603	1699,605567
X_1	20,20511713	1,963923973	10,2881361	2,95E-21	16,33912665	24,07110761
X_4	108,7798332	10,41235253	10,44719077	8,87E-22	88,28308473	129,2765817

Omówienie wyników i wnioski

W artykule przedstawiono analizę zależności kosztów usuwania awarii rurociągów wodociągowych na podstawie wieloetapowej analizy regresji. Jej podstawą były dane eksploatacyjne, zawierające koszty bezpośrednie usuwania awarii określone na koniec 2018 r. Rozpatrywano wpływ czterech zmiennych na koszt usuwania awarii: średnicy; rodzaju przewodu; materiału oraz czasu naprawy. Na przyjętym poziomie istotności 0,05 stwierdzono, że na koszt usuwania awarii istotny wpływ mają dwie z tych zmiennych, tj. średnica przewodu oraz czas usuwania awarii. Pierwsza z nich uwzględnia zarówno wzrost kosztów materiałów jak również wielkość nakładu pracy podczas usuwania awarii. Z kolei czas naprawy można pośrednio związać ze stopniem urbanizacji terenu. Wartość współczynnika determinacji R – kwadrat wyniosła 0,49, co oznacza, że model wyjaśnia zmienność kosztów w 49%. Jednocześnie wartość statystyki F jest znacznie mniejsza od

0,05, a więc test F potwierdza, że koszt istotnie zależy od średnicy X_1 oraz X_4 . Wszystkie parametry modelu są na poziomie 0,05.

Opracowany na rzeczywistych danych model regresji może służyć w praktyce eksploatacyjnej zakładów wodociągowych jako efektywne narzędzie do szacowania kosztów naprawy awarii sieci wodociągowych, chociaż obecna dynamika zmiany cen w budownictwie wskazuje na konieczność dalszych badań.

Literatura

[1] Francisque A, Tesfamariam S, Kambir G, Haider H, Reeder A, Sadig R. Water mains renewal planning framework for small to medium sized water utilities: a life cycle cost analysis approach. *Urban Water Journal*, 2017; <https://doi.org/10.1080/1573062X.2016.1223321>.
 [2] Min-Tsai L, Huey Y. Optimal number of minimal repairs with cumulative repair cost limit for a two-unit system with failure rate interactions. *International Journal of Systems Science*. 2016; <https://doi.org/10.1080/00207721.2014.886749>.
 [3] Turan O, Ölçer AI, Lazakis I, Rigo P, Caprace JD. Maintenance/repair and production-oriented life cycle cost/earning model for ship structural optimisation during conceptual design stage. *Ships*

and Offshore Structures. 2009; <https://doi.org/10.1080/17445300802564220>.

[4] Shahata K, Zayed T. Simulation-based life cycle cost modeling and maintenance plan for water mains. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2013; <https://doi.org/10.1080/15732479.2011.552509>.

[5] Ghobadi F, Jeong G, Kang D. Water Pipe Replacement Scheduling Based on Life Cycle Cost Assessment and Optimization Algorithm. *Water*. 2021 <https://doi.org/10.3390/w13050605>.

[6] Giustolisi O, Laucelli D, Savic DA. Development of rehabilitation plans for water mains replacement considering risk and cost-benefit assessment. *Civil Engineering and Environmental Systems*. 2006; <https://doi.org/10.1080/10286600600789375>.

[7] Venkatesh G. Cost-benefit analysis – leakage reduction by rehabilitating old water pipelines: Case study of Oslo (Norway). *Urban Water Journal*. 2012; <https://doi.org/10.1080/1573062X.2012.660960>.

[8] Sáez-Fernández FJ, González-Gómez F, Andrés J, Picazo-Tadeo AJ. Opportunity Costs of Ensuring Sustainability in Urban Water Services. *International Journal of Water Resources Development*. 2011; <https://doi.org/10.1080/07900627.2010.548316>.

[9] Kessler A, Ormsbee L, Shamir UA. Methodology for least-cost design of invulnerable water distribution networks. *Civil Engineering Systems*. 1990; <https://doi.org/10.1080/02630259008970566>.

[10] Osman H, Ammar M, El-Said M. Optimal scheduling of water network repair crews considering multiple objectives. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2017; <https://doi.org/10.3846/13923730.2014.948911>.

[11] Hotłoś H. Ilościowa ocena wpływu wybranych czynników na parametry i koszty eksploatacyjne sieci wodociągowych. *Politechnika Wroclawska, Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska, Seria Monografie, nr 49, Oficyna Wydawn. Politechniki Wroclawskiej, Wrocław 2007*.

[12] Hotłoś H. Analiza kosztów naprawy uszkodzeń przewodów wodociągowych we Wrocławiu. *Ochrona Środowiska*. 2005; 27:37–43.

[13] Hotłoś H. Metodyka i przykłady prognozowania kosztów naprawy przewodów wodociągowych. *Ochrona Środowiska*. 2006; 28:49–54.

[14] Studziński A, Pietrucha-Urbanik K. Analiza kosztów robocizny do usuwania awarii sieci wodociągowych. *Technologia Wody*, 2017, 1(51):24-28.

[15] Studziński A. Analysis of Cost of Building Equipment Used for Removal of Water Conduits Failure. *Springer*. 2020 https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_58.

[16] Pietrucha-Urbanik K, Studziński A. Analiza kosztów materiałów użytych do usuwania awarii przewodów wodociągowych. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2018, 20:1453-1464.

[17] <https://www1.nyc.gov/site/dep/pay-my-bills/service-line-protection-program.page>. 21.09.2022.

Przyjęto do druku: 28.09.2022 r.