

Analiza hydrauliczna i ekonomiczna innowacyjnej kanalizacji deszczowej na tle kanalizacji klasycznej

Hydraulic and economic analysis of innovative rainwater sewerage system in comparison to the classic sewerage system

PATRYCJA STANOWSKA, JÓZEF DZIOPAK, DANIEL SŁYŚ

DOI 10.36119/15.2024.5.7

Postępująca urbanizacja terenów miejskich powiązana z rozwojem infrastruktury podziemnej wymaga efektywnego sposobu odprowadzania i zarządzania wodami opadowymi na terenach zurbanizowanych. Projektowane budowle kubaturowe, stosowane głównie w celu akumulacji nadmiaru wód opadowych i sterowania ich przepływem w sieci są bardzo kosztowne, a do tego wymagają wolnych terenów pod ich zabudowę. Nowoczesnym systemem, pozwalającym na chwilową retencję wód opadowych w sieci kanalizacyjnej jest innowacyjna kanalizacja deszczowa wyposażona w przegrody piętrzące, która działa w sposób grawitacyjny. Przegrody posiadają odpowiednio zwymiarowane otwory w dolnej części kanału, w celu maksymalnego wykorzystania ich pojemności „po sam strop”, przy jednoczesnym umożliwieniu korzystnego hydraulicznie funkcjonowania sieci kanalizacyjnej. Cała procedura obliczeniowa sprowadza się do prowadzenia symulacji z wykorzystaniem modelowania hydrodynamicznego, stosując autorski algorytm JDM 17 do wymiarowania sieci kanalizacyjnej stanowiącej szeregowy układ kanałów retencyjnych. Celem artykułu jest przedstawienie kształtowania się kosztów inwestycyjnych klasycznej i innowacyjnej sieci deszczowej. Ocenie finansowej poddano kilka wariantów projektowych, w tym różnicując je geometrię sieci, celowo zwiększając dymensje wszystkich przewodów. Analiza kosztów uwzględnia rzeczywiste warunki w badanej zlewni położonej w południowo-wschodniej Polsce i uwzględnia koszty wykonania w niej sieci kanalizacyjnej wraz z niezbędnymi materiałami. Dotychczas przeprowadzone badania potwierdzają walory ekonomiczne, hydrauliczne i eksploatacyjne innowacyjnej kanalizacji deszczowej. Jest to tanie i nowoczesne rozwiązanie, które w dużym stopniu redukuje natężenie przepływu wód opadowych, nawet ponad dwukrotnie, a także energię kinetyczną płynących wód opadowych w porównaniu do powszechnie stosowanych klasycznych rozwiązań odwodnieniowych.

Słowa kluczowe: innowacyjna kanalizacja deszczowa, przegrody piętrzące, kanał retencyjny, wycena, koszty inwestycyjne, wody opadowe

The increasing urbanization of urban terrain related to the development of underground infrastructure requires an effective way of draining and managing rainwater in urbanized areas. Designed cubic facilities, used mainly to accumulate excess rainwater and control its flow in the sewerage system are very expensive. In addition, they require free land for their construction. A modern system, allowing temporary retention of rainwater in the sewerage is an innovative rainwater system equipped with damming baffles, which operates by gravity. Damming baffles have appropriately dimensioned openings in the lower part of the pipe in order to maximize the use of their capacity "up to the ceiling". It allows the sewer system to function hydraulically favorably. The entire computational procedure involves simulation using hydrodynamic modeling, applying the author's JDM 17 algorithm to dimension the innovative sewerage system. The purpose of the article is to present the development of investment costs of classic and innovative rainwater sewerage. Several design variants were evaluated financially, differentiating them by the geometry of the sewer. The dimensions of all pipes were deliberately increased. The analysis takes into account the actual conditions in the studied catchment area located in south-east Poland and the costs of constructing a sewerage system for it, including the necessary materials. The studies carried out so far confirm the economic, hydraulic and operational advantages of the innovative rainwater system. It is a low-cost and modern solution, which to a large extent reduces the flow rate of rainwater, even more than twice. This also reduces the kinetic energy of flowing rainwater compared to commonly used classical drainage solutions.

Keywords: innovative rainwater system, damming baffles, sewage retention canal, estimate, investment costs, rainwater

mgr inż. Patrycja Stanowska, <https://orcid.org/0000-0002-6621-8833> – Szkoła Doktorska Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, Rzeszów, e-mail: d529@stud.prz.edu.pl

prof. dr hab. inż. Józef Dziopak, <https://orcid.org/0000-0001-7985-5797> e-mail: jdziopak@prz.edu.pl,

prof. dr hab. inż. Daniel Słyś, <https://orcid.org/0000-0001-6942-7609> e-mail: daniels@prz.edu.pl

– Katedra Infrastruktury i Gospodarki Wodnej, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Rzeszów, Polska.

Wstęp

Obserwowany od dziesięcioleci rozwój budownictwa i postępująca urbanizacja miast często wymuszają konieczność budowy nowej lub/i rozbudowy istniejącej infrastruktury kanalizacyjnej w celu odprowadzenia dodatkowych objętości ścieków bytowo-gospodarczych, a zwłaszcza nadmiaru wód deszczowych z nowych zlewni zurbanizowanych [15, 16, 18, 22, 29].

Opad jako zjawisko losowe jest trudne do przewidzenia w czasie i przestrzeni. Przy tworzeniu koncepcji projektowych systemów odwodnieniowych sam wybór modelu opadu, jak i jego przekształcanie w spływ powierzchniowy wymaga od inżynierów doboru odpowiedniej metodyki wymiarowania sieci kanalizacji deszczowej i obiektów z nią współdziałających [24, 25, 26, 30, 31, 32]. Natomiast kluczowym aspektem projektowania jest wybór efektywnego rozwiązania, które spełni oczekiwaną funkcję w zakresie transportu i retencji wód opadowych lub innego ich wykorzystania. Zatem, ważne jest wykazanie analizą techniczno-ekonomiczną, że spośród wielu rozpatrywanych wariantów, określona koncepcja projektowa oprócz innych walorów będzie atrakcyjna pod względem finansowym [33, 39, 40, 41, 43].

Powszechne trudności z dostępem do wolnych terenów pod budowę obiektów retencyjnych, jak również intensywnie rozbudowana infrastruktura podziemna wielu miast wymuszają potrzebę zarówno udoskonalenia istniejących sposobów transportu i retencji wód opadowych, jak i opracowania nowych koncepcji funkcjonowania grawitacyjnych kanalizacji deszczowych [7, 8, 35, 36, 42, 44]. Takie wymagania spełnia innowacyjna kanalizacja deszczowa. Stanowi ona w pełni nowoczesny i efektywny sposób sterowania w sposób naturalny wielkością transportowanych wód opadowych przy jednoczesnym zapewnieniu akumulacji ich znacznych objętości w samej sieci [1, 2, 20, 34]. W praktyce oznacza to wymierną redukcję natężenia przepływu wód opadowych na całej trasie ich spływu siecią i chwilową ich akumulację odpowiadającą nawet ponad 90 % dyspozycyjnej objętości całego systemu odwodnieniowego. Istotą innowacyjnej sieci jest możliwość nawet całkowitego wyeliminowania bardzo kosztownych kubaturowych obiektów retencyjnych, które są też uciążliwe w eksploatacji. Na przykładzie wielu zrealizowanych inwestycji odwodnieniowych w wielu miastach w Polsce [21] wykazano, że jest ona wyjątkowo konkuren-

cyjna w odniesieniu do powszechnie stosowanej klasycznej kanalizacji deszczowej [27, 37]. W świetle praktycznych oczekiwań związanych z koniecznością tworzenia efektywnych rozwiązań przy rozbudowie i modernizacji wielu eksploatowanych systemów okazuje się, że innowacyjna kanalizacja deszczowa staje się obecnie konkurencyjnym rozwiązaniem i to zarówno w odniesieniu do jej sprawności hydraulicznej, jak również pod względem ekonomicznym. Zatem, aby wykazać zalety innowacyjnej sieci, zagadnieniem priorytetowym staje się porównanie kosztów wykonania innowacyjnej i klasycznej kanalizacji deszczowej w różnych koncepcjach projektowych. Analiza porównawcza jaką zaprezentowano w tej pracy pozwala też na podanie cennych wniosków o znaczeniu poznawczym i aplikacyjnym dla projektantów i inwestorów systemów odwodnieniowych.

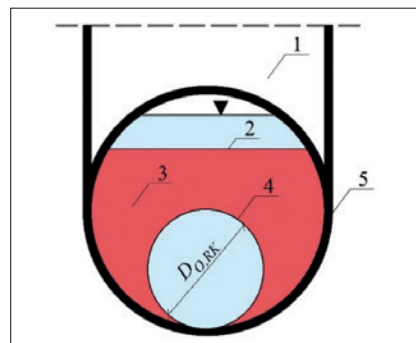
Innowacyjna kanalizacja deszczowa

Innowacyjna kanalizacja wyposażona jest w układ kanałów retencyjnych, które są dzielone specjalnie ukształtowanymi przegrodami piętrzącymi (rys. 1). Idea tego rozwiązania wraz z przykładowym zastosowaniem są podane w opisie patentowym RP o numerze 217405, którego autorami są pracownicy Politechniki Rzeszowskiej [1, 3, 4]. Główną zaletą tego rozwiązania jest równoczesne pełnienie dwóch odmiennych funkcji w systemie odwodnieniowym. Zapewnia ono w tym samym czasie hydrauliczny transport wód opadowych i akumulację ich znacznych objętości w innowacyjnej sieci poprzez prawie pełne wykorzystanie całej dyspozycyjnej pojemności kanałów i studzienek kanalizacyjnych [5, 17].

Przegrody piętrzące montowane w studzienkach kanalizacyjnych lub poza nimi powodują piętrzenie wód opadowych prawie do wysokości stropu kanałów na całej długości sieci kanalizacyjnej. W dolnej części przegrody przy dnie kanału znajduje się odpowiednio zwymiarowany otwór przepływowy. Natomiast górna jej część jest

zakończona koroną przelewową, która pełni rolę czołowego przelewu zrzutowego nadmiaru wód opadowych do niżej położonego kanału retencyjnego (rys. 2). Przegrody piętrzące montowane są do wewnętrznych ścian bocznych kanałów lub spawane do nich [4, 17, 19].

Kanały retencyjne zapewniają znaczną redukcję natężenia przepływu wód opadowych w coraz większym stopniu w niżej położonej sieci. Maksimum osiąga w kanale końcowym z odwadnianej zlewni. Ważnym zadaniem projektanta



Rysunek 2.

Schemat przegrody piętrzącej zamontowanej w studzience kanalizacyjnej. Oznaczenia: 1 – studzienka kanalizacyjna, 2 – krawędź przelewowa, 3 – przegroda piętrząca, 4 – otwór przepływowy, 5 – kanał

Figure 2. Scheme of the damming partition located in a sewer manhole; designations: 1 – sewer manhole, 2 – overflow edge, 3 – damming partition, 4 – flow hole, 5 – sewage canal

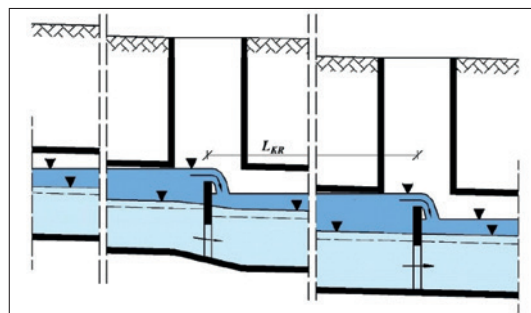
jest dobór geometrii kanałów, rozstawu przegród piętrzących i poprawne zaprojektowanie geometrii przegród piętrzących. Wymiary każdej dobieranej przegrody piętrzącej innowacyjnej sieci są każdorazowo wyznaczane na podstawie autorskiego algorytmu JDM 17 [2, 23].

Metodyka badań

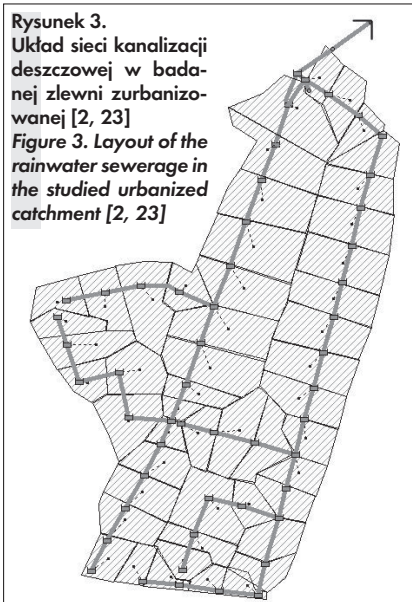
Analizie kosztowej poddano trzy warianty klasycznej sieci deszczowej o geometriach oznaczonych symbolami K0, K1 i K2. Wymiary kanałów w wariantach K0 oznaczono jako DO i dobrano je w oparciu o ustalone przepływy miarodajne wynikające z przyjętego modelu opadowego Bogdanowicz i Stachy. Przyjęto częstotliwość

Rysunek 1. Schemat innowacyjnej kanalizacji deszczowej wyposażonej w przegrody piętrzące; L_{KR} – rozstaw przegród piętrzących [17]

Figure 1. Scheme of an innovative rainwater sewerage equipped with damming partitions; L_{KR} – distance between damming partitions [17]



pojawienia się krytycznego deszczu średnio raz na dwa lata [6, 9, 11, 12]. Wymiary kanałów deszczowych w wariantach K1 powiększono o jedną dymensję średnic w porównaniu do kanalizacji w wariantach K0, oznaczając je jako D1. Średnice kanalizacji deszczowej w wariantach K2 powiększono o dwie dymensje w porównaniu do wariantu K0 i oznaczono je D2. Wody opadowe z całej odwadniającej zlewni są kierowane z ostatniego kanału bezpośrednio do kanału tranzytowego, którego wylot jest skierowany do odbiornika. W kolejnym etapie badań analizie poddano trzy warianty innowacyjnej sieci kanalizacji deszczowej o geometriach kanałów K0, K1 i K2, których podstawowymi elementami są odpowiednio rozmieszczone przegrody piętrzące. Badana zlewnia modelowa położona jest w południowo-wschodniej Polsce i składa się z 50. zlewni cząstkowych o łącznej powierzchni odwadniającej $F_c = 47$ ha (rys. 3).



Przewody sieci kanalizacyjnej wykonane są z polietylenu PEHD SN8 [13, 14]. Do obliczeń wykopów przyjęto, że wody gruntowe znajdują się poniżej dna wykopu, a w składzie gruntu dominuje piasek. Rury kanalizacyjne są posadowione w wykopach otwartych mających oszalowane ściany pionowe. Szerokość wykopów uwzględnia wymagania zapisane w *Warunkach technicznych wykonania i odbioru sieci kanalizacyjnych COBRTI „Instal”* [28]. Minimalne przykrycie kanałów wynosi $h_{k_min} = 1,2$ m [11, 12] i są one licowane stropem. Na prawie całej długości sieci przewody są układane równolegle do terenu. Zachowano spadek dna kanałów, który zapewnia wymaganą minimalną prędkość przepływu wód opado-

wych siecią kanalizacyjną z zachowaniem zasad hydrauliki. W każdym wariantach przyjęto identyczną rzędną stropów poszczególnych kanałów, zachowując stałe położenie stropów względem rzędnej terenu w każdym analizowanym wariantach, bez względu na wybraną opcję geometrii kanałów. Powiększając średnice kanałów w wariantach K1 i K2 przewidziano odpowiednio głębsze i szersze przekroje poprzeczne wykopów. W analizie kosztowej przyjęto warunki lokalne, w których kanalizacja deszczowa będzie układana w terenach zielonych z pominięciem obciążeń dynamicznych od ruchu drogowego i bez konieczności usuwania nawierzchni zewnętrznych.

Każdy zaprojektowany wariant klasycznej i innowacyjnej sieci deszczowej ma taką samą liczbę i identyczne długości kanałów i przyjęte założenia wejściowe. Jedyń różnicę stanowią zastosowane przegrody piętrzące o odpowiednio dobieranych wymiarach otworów przepływowych w sieci innowacyjnej. W tabeli 1

Tabela 1. Zestawienie długości kanałów o ustalonej średnicy przewodów w zależności od rozpatrywanych wariantów kanalizacji K0, K1 lub K2
Table 1. Summary of sewer lengths with determined canal diameters according to the considered sewer variants K0, K1 or K2

Długość kanałów L, m	Wariant K0	Wariant K1	Wariant K2
	Średnica d, mm	Średnica d, mm	Średnica d, mm
522	DN300	DN350	DN400
597	DN400	DN500	DN600
745	DN500	DN600	DN700
140	DN600	DN700	DN800
381	DN700	DN800	DN900
363	DN800	DN900	DN1000
1001	DN900	DN1000	DN1100
$\Sigma L = 3750$ m			

Tabela 2. Zestawienie wartości natężenia odpływu wód opadowych z analizowanych wariantów klasycznych kanalizacji deszczowych K0, K1 i K2
Table 2. Set of rainwater outflow values from the analyzed variants of classic rainwater sewerage K0, K1 and K2

	Klasyczna kanalizacja deszczowa. Wariant K0	Klasyczna kanalizacja deszczowa. Wariant K1	Klasyczna kanalizacja deszczowa. Wariant K2
Maksymalne miarodajne natężenie odpływu wód opadowych w węźle wylotowym $Q_{o_max_KSK}$, dm^3/s	1719	1774	1807

zestawiono wartości odnoszące się do długości poszczególnych kanałów i ich ustalonych średnic w zależności od przyjętego wariantu projektowanej sieci oznaczonych jako K0, K1 lub K2. Sumaryczna długość kanalizacji deszczowej bez względu na wymiar kanałów każdego z wariantów K0, K1 i K2 wynosi $\Sigma L = 3750$ m. Biorąc pod uwagę wymiary wszystkich kanałów i ich długości ustalono, że średnia zastępcza średnica kanałów wynosi $d_{sr} = 600$ mm w wariantach K0,

$d_{sr} = 700$ mm w wariantach K1 i $d_{sr} = 800$ mm w wariantach K2.

Wyniki i dyskusja

Pierwszy etap badań obejmuje analizę funkcjonowania trzech wariantów klasycznej kanalizacji deszczowej działającej grawitacyjnie bez stosowania obiektów retencyjnych. Przeprowadzona symulacja procesów z wykorzystaniem modelowania hydrodynamicznego pozwoliła ustalić w każdym wariantach maksymalne miarodajne natężenia przepływów wód opadowych w węźle wylotowym. W klasycznej sieci deszczowej K0, odpływ ten wynosi odpowiednio $Q_{o_max_KSK} = 1719$ dm^3/s , w kanalizacji o średnicach K1 $Q_{o_max_KSK} = 1774$ dm^3/s . Natomiast w kanalizacji o największych wymiarach kanałów, tj. w wariantach K2, ustalony odpływ wynosi $Q_{o_max_KSK} = 1807$ dm^3/s (tabela 2).

Podane wyniki badań symulacyjnych jednoznacznie potwierdzają istotną tezę, że zwiększanie średnic wszystkich kanałów w znikomym stopniu wpływa na zmiany wartości natężenia przepływu wód opadowych w kanalizacji klasycznej.

Korzystając z danych charakteryzujących trzy wersje klasycznej kanalizacji deszczowej o geometriach K0, K1 i K2 zaprojektowano innowacyjną kanalizację deszczową wyposażoną w przegrody piętrzące o stałym zestawie przegród piętrzących LKR1 w odległości co 100 m. W rezultacie zaprojektowano trzy odmienne warianty funkcjonowania innowacyjnej kanalizacji deszczowej. Wyniki badań symulacyjnych pozwoliły ustalić natężenia odpływu wód deszczowych z innowacyjnej sieci odwodnieniowej. W wariantach o średnicach podstawowych K0

maksymalne natężenie ich odpływu z sieci wynosi $Q_{o_max_ISK} = 920$ dm^3/s , zaś współczynnik redukcji natężenia przepływu ma wartość $\beta_{ISK} = 0,54$ i został on obliczony na podstawie zależności (1).

$$\beta_{ISK} = \frac{Q_{o_max_ISK}}{Q_{o_max_KSK}} \quad (1)$$

gdzie:

Q_{o_max} – maksymalne natężenie dopływu wód opadowych do innowacyjnej sieci kanalizacyjnej dm^3/s ;

$Q_{\text{omax_ISK}}$ – maksymalne miarodajne natężenie odpływu wód opadowych w węźle wylotowym innowacyjnej sieci kanalizacyjnej, dm^3/s .

Zwiększając średnice sieci innowacyjnej o jedną dymensję w wariancie K1, maksymalne natężenie odpływu maleje do wartości $Q_{\text{omax_ISK}} = 542 \text{ dm}^3/\text{s}$ przy współczynniku redukcji przepływu $\beta_{\text{ISK}} = 0,32$. Przez zwiększenie średnic o dwie dymensje w wariancie K2, maksymalne natężenie odpływu maleje do ponad pięciokrotnie mniejszej wartości $Q_{\text{omax_ISK}} = 316 \text{ dm}^3/\text{s}$, a wyliczony współczynnik redukcji przepływu ma wyjątkowo niską wartość i wynosi $\beta_{\text{ISK}} = 0,18$. Wyniki badań symulacyjnych innowacyjnej kanalizacji deszczowej przy wykorzystaniu modelowania hydrodynamicznego zamieszczono w tabeli 3.

Tabela 3. Zestawienie wartości odpływów i redukcji przepływu analizowanych koncepcji innowacyjnej kanalizacji deszczowej wyposażonej w przegrody piętrzące w odniesieniu do przepustowości hydraulicznej klasycznej kanalizacji deszczowej o średnicach D0, D1 i D2

Table 3. Set of rainwater outflow and flow reduction values of the analyzed concepts of innovative rainwater sewerage equipped with damming partitions baffles in relation to the hydraulic capacity of classic rainwater sewerage with diameters D0, D1 and D2

Analizowane parametry projektowe	Innowacyjna kanalizacja deszczowa		
	ISK_K0_LKR1	ISK_K1_LKR1	ISK_K2_LKR1
Maksymalne natężenie odpływu wód opadowych ze zlewni $Q_{\text{omax_ISK}}, \text{dm}^3/\text{s}$	920	542	316
Współczynnik redukcji natężenia przepływu w wyniku zastosowania kanałów retencyjnych wyposażonych w przegrody piętrzące β_{ISK}	0,54	0,32	0,18

Wyniki potwierdzają w pełni wniosek o znaczeniu poznawczym, który odnosi się do skuteczności instalowania przegród piętrzących w kanałach deszczowych. Zapewniają one akumulowanie znacznych objętości wód opadowych w innowacyjnej sieci. Wymiernym efektem tego jest duża redukcja ich natężenia przepływu na trasie, a zwłaszcza na wylocie ze zlewni i korzystne opóźnienie spływu z systemu odwodnieniowego do wód odbiornika. Kolejnym istotnym wnioskiem, mającym strategiczne znaczenie poznawcze i aplikacyjne jest wykazanie badaniami symulacyjnymi, że każde zwiększenie geometrii kanałów wpływa bezpośrednio na zmniejszenie wartości natężenia przepływu wód opadowych na całej trasie hydraulicznego transportu, a w największym stopniu w kanale końcowym.

Analizę kosztową inwestycji kanalizacyjnych wykonano korzystając z dostępnych cenników i danych pochodzących od producentów. Do ustalenia nakładów finansowych związanych z zakupem materiałów wykorzystano ceny proponowane przez producentów systemów kanalizacyjnych. Natomiast analizę nakładów finansowych odnoszących się do robót wykonawczych wyznaczono z uwzględ-

nieniem cennika Sekocenbud, IV kwartał, 2022 [10]. Wszystkie podane ceny w artykule odnoszą się do wartości netto.

W ramach rozważań naukowych najpierw analizie poddano całkowite nakłady inwestycyjne na prace wykonawcze związane z budową sieci kanalizacyjnej $K_{S,W}$, na które składają się nakłady inwestycyjne na roboty ziemne i roboty montażowe. W każdej z badanych sieci koszty robót ziemnych znacząco przewyższają koszty montażowe i stanowią one średnio prawie 68% całkowitych nakładów inwestycyjnych na prace wykonawcze. W pierwszym etapie wyznaczono je dla trzech wariantów projektowych kanalizacji klasycznej, w których uwzględniono zróżnicowane geometrie kanałów (warianty K0, K1 i K2) i z tym związane zmiany innych kosztów, także robót ziem-

nych. Wyznaczono nakłady inwestycyjne na prace wykonawcze związane z budową klasycznej sieci deszczowej o podstawowych średnicach w wariancie K0, które wyniosły $K_{S,W} = 5\,766\,794 \text{ zł}$. Przy średnicach powiększonych o jedną dymensję, koszty wykonania kanalizacji w wariancie K1 wzrosły o około 8% do $K_{S,W} = 6\,226\,756 \text{ zł}$. Koszty budowy sieci deszczowej powiększonej o dwie dymensje w wariancie K2 wzrosły o 18% w porównaniu do kanalizacji w wariancie K0 i są one o około 9% większe od kosztów w wariancie K1 i wynoszą $K_{S,W} = 6\,806\,800 \text{ zł}$.

W kolejnym etapie badano udział nakładów inwestycyjnych na materiały użyte do wykonania klasycznej sieci kanalizacyjnej $K_{S,M}$, w tym nakłady inwestycyjne na zakup rur kanalizacyjnych $K_{S,R}$ i studzienek kanalizacyjnych $K_{S,S}$. Zatem koszty materiałów w wariancie K0 wynoszą $K_{S,M} = 1\,558\,762 \text{ zł}$, w tym koszt rur $K_{S,R} = 1\,218\,895 \text{ zł}$, a studzienek $K_{S,S} = 339\,867 \text{ zł}$. W wariancie K1 koszty te rosną o 22% i wynoszą łącznie $K_{S,M} = 1\,904\,616 \text{ zł}$, z podziałem na koszt rur $K_{S,R} = 1\,547\,756 \text{ zł}$ i studzienek $K_{S,S} = 356\,860 \text{ zł}$. Z kolei w wariancie K2 koszty całkowite materiałów rosną o 43% w stosunku do ustalonych w wariancie K0 i o 17% w wariancie

K1, których łączna wartość stanowi $K_{S,M} = 2\,231\,665 \text{ zł}$, a koszt studzienek wynosi $K_{S,S} = 378\,272 \text{ zł}$, zaś koszt rur $K_{S,R} = 1\,853\,393 \text{ zł}$. Analiza kosztów inwestycyjnych wykazała, że koszt rur stanowi średnio 81%, a koszt studzienek kanalizacyjnych 19% kosztów materiałów w przypadku klasycznej kanalizacji deszczowej.

Uwzględniając nakłady inwestycyjne na prace wykonawcze przy budowie sieci klasycznej $K_{S,W}$ i materiałów $K_{S,M}$ ustalono całkowite nakłady inwestycyjne jej budowy o średnicach podstawowych K0, a które wynoszą $K_I = 7\,325\,556 \text{ zł}$. Wykonanie kanalizacji o średnicach powiększonych o jedną dymensję do geometrii K1 przy zachowaniu tej samej wysokości przykrycia kanałów, ale wymagające głębszych i szerszych wykopów zwiększa koszt o około 11% do kwoty $K_I = 8\,131\,372 \text{ zł}$. Jak można przypuszczać, największy koszt wykonania sieci odnosi się do wariantu K2 z kanałami powiększonymi o dwie dymensje. Jest on prawie 11% większy od kosztu wykonania kanalizacji w wariancie K1 i o 23% większy niż w wariancie K0 i wynosi $K_I = 9\,038\,465 \text{ zł}$.

Wyznaczono też średni koszt ułożenia jednego metra bieżącego klasycznej kanalizacji deszczowej przy uwzględnieniu prac wykonawczych i materiałów. Przy podstawowych średnicach K0 koszt ten wynosi $K_{L,1mb} = 1\,953 \text{ zł/m.b.}$, a sieci powiększonej o jedną dymensję do K1 koszt ten stanowi $K_{L,1mb} = 2\,168 \text{ zł/m.b.}$, zaś w przypadku kanalizacji powiększonej o dwie dymensje do K2 osiąga wartość $K_{L,1mb} = 2\,410 \text{ zł/m.b.}$ Korzystając z ustalonych wyników badań, wyznaczono również średni nakład finansowy na budowę jednego m.b. klasycznej kanalizacji deszczowej o wartości $K_{L,1mb} = 2\,177 \text{ zł/m.b.}$

Na podstawie ustalonych całkowitych nakładów inwestycyjnych ponoszonych na budowę klasycznej kanalizacji deszczowej w wariancie K0 można stwierdzić, że koszty jej wykonania stanowią 79%, a koszty materiałów 21%, przyjmując średni wymiar kanałów $d_{sr} = 600 \text{ mm}$. Z kolei w wariancie K1 o średnim wymiarze kanałów $d_{sr} = 700 \text{ mm}$, koszty wykonania stanowią 77%, a koszty materiałów 23%. I odpowiednio w wariancie K2 o średnim wymiarze kanałów $d_{sr} = 800 \text{ mm}$, koszty wykonania klasycznej kanalizacji stanowią 75% a koszty materiałów 25%. Z tej analizy wynika, że uśredniony koszt wykonania klasycznej sieci deszczowej w trzech wariantach stanowi 77% całkowitych kosztów, a koszt materiałów to około 23% (rys. 4). Ta analiza potwierdza tendencję nieznacznego wzrostu



Rysunek 4.

Całkowite nakłady inwestycyjne związane z budową klasycznej kanalizacji deszczowej w wariantach K0, K1 i K2

Figure 4. Total investment expenditure associated with the realization of classic rainwater sewerage in variants K0, K1 and K2

udziału kosztów wykonania odpowiednio do malejących średnic kanałów w skali kosztów całkowitych.

Wszystkie analizowane warianty klasycznej sieci deszczowej przekształcono w kanalizację innowacyjną poprzez montaż przegród piętrzących o średnim ich rozstawie LKR1 co 100 m, których liczba wynosi 42 sztuki. Sformułowano też trzy koncepcje innowacyjnej kanalizacji deszczowej zróżnicowane takimi samymi średnicami, tj. w wariantach K0, K1 i K2. Stąd średnice przewodów i wysokości studzienek, jakie przyjęto do analizy we wszystkich koncepcjach kanalizacji innowacyjnej są analogiczne jak w przypadku badanych wariantów klasycznej kanalizacji deszczowej o średnicach K0, K1 i K2. Takie założenie pozwala przyjąć, że nakłady inwestycyjne na prace wykonawcze związane z budową sieci innowacyjnej są takie same jak badanej sieci klasycznej K0, K1 i K2.

Rozpatrując innowacyjną kanalizację deszczową o wymiarach D0 ustalono koszty inwestycyjne na prace wykonawcze przy budowie jako $K_{S,W} = 5\,766\,794$ zł. Koszty te wzrastają przy średnicach powiększonych o jedną dymensję do D1 do wartości $K_{S,W} = 6\,226\,756$ zł, zaś przy kanalizacji powiększonej o dwie dymensje do D2 koszty wykonania wynoszą $K_{S,W} = 6\,806\,800$ zł. Nakłady inwestycyjne na materiały użyte do wykonania sieci innowacyjnej rosną w nieznacznym stopniu w odniesieniu do kosztów klasycznej kanalizacji. Wynikają one z montażu w sieci specjalnej konstrukcji studzienek kanalizacyjnych z przegrodami piętrzącymi.

Pierwsza z analizowanych koncepcji innowacyjnej sieci deszczowej oznaczona symbolem ISK_KO_LKR1 jest wyposażona w kanały o średnicach podstawowych wynikających z przepływów miarodajnych i przyjętego modelu opadowego. Ustalono nakłady inwestycyjne na zakup rur do budowy sieci kanalizacyjnej wynoszą $K_{S,R} = 1\,218\,895$ zł, zaś studzienek

$K_{S,S} = 655\,061$ zł, co daje łączny koszt materiałów $K_{S,M} = 1\,873\,956$ zł netto. Następnie analizie poddano innowacyjną kanalizację deszczową o średnicach kanałów powiększonych o jedną dymensję do K1 o symbolu ISK_K1_LKR1. Identycznie jak poprzednio, przyjęto stały koszt zakupu rur i wynosi on $K_{S,R} = 1\,547\,756$ zł. Koszt studzienek kanalizacyjnych wynosi $K_{S,S} = 719\,976$ zł, a łączny koszt materiałów w tej koncepcji to $K_{S,M} = 2\,267\,732$ zł. Innowacyjna kanalizacja deszczowa o największych średnicach w wariantach K2 powiększonych o dwie dymensje wymaga zakupu rur w cenie $K_{S,R} = 1\,853\,393$ zł. Koszt studzienek osiąga kwotę $K_{S,S} = 766\,367$ zł, co daje łączny koszt użytych materiałów w kwocie $K_{S,M} = 2\,619\,760$ zł.

Analogicznie jak w przypadku klasycznej kanalizacji deszczowej, główny koszt materiałów sieci innowacyjnej stanowią przewody kanalizacyjne. Wyznaczono średni udział kosztów rur na około 68%, a studzienek 32%. Zatem w porównaniu do klasycznej kanalizacji deszczowej zarówno o średnicach D0, D1 jak i D2 rośnie procentowy udział kosztów studzienek przy malejącym koszcie rur. To wynika z zastosowania specjalnej konstrukcji studzienek kanalizacyjnych, w których są montowane przegrody piętrzące o zróżnicowanych geometriach.

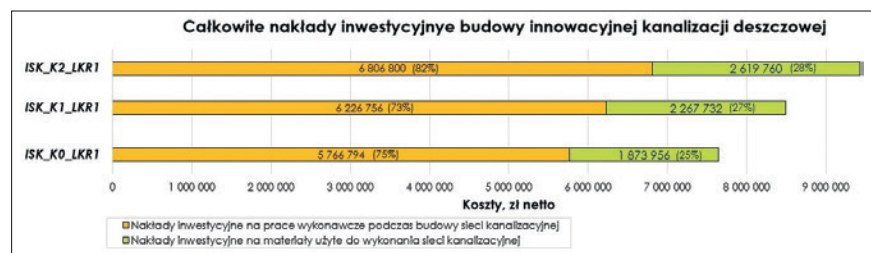
W koncepcji o podstawowych średnicach sieci K0 ustalono całkowite nakłady

inwestycyjne budowy innowacyjnej sieci deszczowej wynoszą $K_I = 7\,640\,750$ zł. Ustalono nakłady inwestycyjne innowacyjnej sieci deszczowej powiększonej o jedną dymensję do średnic K1 rosną o około 11% i wynoszą $K_I = 8\,494\,487$ zł. Kolejno wykazane całkowite nakłady inwestycyjne odnoszące się do kanalizacji powiększonej o dwie dymensje do średnic K2 wynoszą $K_I = 9\,426\,560$ zł. Natomiast w odniesieniu do średnic K0 wzrastają one o około 25% i o 11% w odniesieniu do średnic K1.

Na podstawie dokonanych obliczeń z wykorzystaniem inwestycyjnego modelu nakładów finansowych [10, 38] ustalono koszt wykonania jednego m.b. sieci innowacyjnej, który kształtuje się w przedziale od 2 037 zł do 2 513 zł i to w zależności od analizowanej koncepcji. Natomiast ustalona wartość średnia nakładów finansowych wynosi 2 272 zł/m.b. Porównując podane koszty budowy jako koszty wykonania jednego m.b. innowacyjnej kanalizacji okazuje się, że są one nieznacznie większe od kosztów wykonania tożsamej klasycznej kanalizacji deszczowej o identycznych średnicach kanałów odpowiadających wariantom K0, K1 i K2. Okazuje się, że wyznaczony w analizie koszt wykonania jednego m.b. innowacyjnej sieci deszczowej jest średnio zaledwie o 4% wyższy niż tożsamej kanalizacji klasycznej.

Analiza nakładów inwestycyjnych dotyczących budowy innowacyjnej sieci deszczowej wykazała, że koszty prac wykonawczych stanowią około 75%, a koszty materiałów 25% w przypadku średnic w wariantach K0, w którym średni wymiar kanałów wynosi $d_{sr} = 600$ mm. Odpowiednio w wariantach K1 o średnim wymiarze kanałów $d_{sr} = 700$ mm, koszty wykonawcze stanowią 73%, a koszty materiałów 27%. I w kolejnym trzecim wariantach K2, gdzie średni wymiar kanałów to $d_{sr} = 800$ mm, koszty prac wykonawczych stanowią 72%, a koszty materiałów 28% (rys. 5).

W tabeli 4 zestawiono sumaryczne koszty inwestycyjne, jakie zostały ustalone



Rysunek 5.

Całkowite nakłady inwestycyjne budowy innowacyjnej kanalizacji deszczowej w zależności od rozpatrywanej koncepcji projektowej

Figure 5. Total investment expenditure associated with the realization of innovative rainwater sewerage, depending on the design concept considered

Tabela 4. Zestawienie nakładów inwestycyjnych budowy analizowanych koncepcji przedsięwzięć inwestycyjnych klasycznej i innowacyjnej sieci kanalizacji deszczowej

Table 4. Set of construction capital expenditures of the analyzed concepts of investment projects of classic and innovative rainwater sewerage

Lp.	Wariant projektowy	Nakłady inwestycyjne na prace wykonawcze	Nakłady inwestycyjne na materiały	Całkowite nakłady inwestycyjne budowy przedsięwzięcia	Całkowite nakłady inwestycyjne budowy 1 m.b. przedsięwzięcia	Współczynnik redukcji przepływu
-	-	$K_{S,W}$	$K_{S,M}$	K_I	$K_{I,mb}$	β
-	-		zł netto	zł netto	zł netto/m.b.	-
1	KSK_KO	5 766 794	1 558 762	7 325 556	1953	0,00
2	KSK_K1	6 226 756	1 904 616	8 131 372	2168	0,00
3	KSK_K2	6 806 800	2 231 665	9 038 465	2410	0,00
4	ISK_KO_LKR1	5 766 794	1 873 956	7 640 750	2037	0,54
5	ISK_K1_LKR1	6 226 756	2 267 732	8 494 487	2265	0,32
6	ISK_K2_LKR1	6 806 800	2 619 760	9 426 560	2513	0,18

oddzielnie dla sformułowanych sześciu koncepcji projektowych.

Podsumowanie i wnioski końcowe

W artykule przeprowadzono szczegółową analizę finansową kosztów wykonania innowacyjnej kanalizacji deszczowej w odniesieniu do klasycznej kanalizacji o takich samych wymiarach. Wykazano badaniami, że udział kosztów materiałów do budowy innowacyjnej kanalizacji deszczowej jest wyższy zaledwie o kilka procent w odniesieniu do klasycznej kanalizacji deszczowej, na które składa się koszt montowanych przegród piętrzących. Wraz ze wzrostem średnic kanałów sieci innowacyjnej, procentowo udział kosztów materiałów tylko nieznacznie wzrasta w skali ustalanych sumarycznych kosztów budowy.

Badaniom poddano sześć opracowanych koncepcji projektowych, w tym po trzy klasycznej i innowacyjnej kanalizacji deszczowej o geometriach K0, K1 i K2. Wyniki badań symulacyjnych pozwoliły ustalić w nich natężenia odpływu wód deszczowych przy wykorzystaniu modelowania hydrodynamicznego. Przy prawie niezmiennych odpływach z odwodnianej zlewni w trzech koncepcjach sieci klasycznej ustalono wysoką redukcję przepływów w sieci innowacyjnej. W wariancie o średnicach podstawowych K0 maksymalne natężenie ich odpływu z całej zlewni wynosi $Q_{\text{omax_ISK}} = 920 \text{ dm}^3/\text{s}$, zaś współczynnik redukcji natężenia przepływu ma wartość $\beta_{\text{ISK}} = 0,54$. W wariancie K1 maksymalne natężenie odpływu maleje do wartości $Q_{\text{omax_ISK}} = 542 \text{ dm}^3/\text{s}$ przy współczynniku redukcji przepływu $\beta_{\text{ISK}} = 0,32$. Natomiast w wariancie K2, maksymalne natężenie odpływu spadło aż do $Q_{\text{omax_ISK}} = 316 \text{ dm}^3/\text{s}$ przy wartości $\beta_{\text{ISK}} = 0,18$.

Wyniki przeprowadzonych badań hydraulicznych potwierdzają wymierny efekt

polegający na dużej redukcji natężenia przepływu wód opadowych na trasie przepływu z jednoczesnym opóźnieniem ich spływu w innowacyjnej sieci deszczowej. Zatem każde zwiększenie geometrii kanałów innowacyjnej sieci daje wymierny efekt hydrauliczny, który polega na redukcji natężenia przepływu wód opadowych na całej długości sieci, a największej na końcu zlewni.

Analizując ustalone zależności na podstawie posiadanej bazy danych, stanowiących wyniki prowadzonych badań można stwierdzić, że wraz ze wzrostem wartości współczynnika redukcji przepływu β_{ISK} w innowacyjnej sieci deszczowej (tabela 2) maleje koszt wykonania jednego m.b. tej sieci. Oznacza to w praktyce dosadną tendencję, która wpisuje się adekwatnie do istotnych wniosków poznawczych i odzwierciedla w pełni specyfikę funkcjonowania innowacyjnej kanalizacji deszczowej w ujęciu hydrauliczno-kosztowym. Przy większej objętości akumulowanych wód opadowych w innowacyjnej kanalizacji deszczowej występuje malejąca wartość współczynnika redukcji przepływu w sieci β_{ISK} , zaś koszt wykonania sieci rośnie, ale nieznacznie. Głównie wynika to z konieczności użycia kanałów o odpowiednio większych geometriach, które wymagają robót ziemnych o większej objętości.

LITERATURA

- [1] Słyś, D., Dziopak, J. (2014). Retencyjny kanał ściekowy. Patent nr 217405. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, Warszawa, Polska.
- [2] Starzec, M. (2020). Modelowanie innowacyjnych systemów odwodnieniowych. Praca doktorska. Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Rzeszów.
- [3] Słyś D. (2018). An innovative retention canal – a case study, E3S Web of Conferences 45, 00084.
- [4] Starzec, M., Dziopak, J., Słyś, D. (2017). Projektowanie hydrodynamiczne innowacyjnych kanałów retencyjnych w kanalizacji, [w:] Dziopak J., Słyś D., Stec A. (red.) Infrastruktura miast,

Oficina Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, s. 221–246.

- [5] Starzec, M., Dziopak, J. (2020). A Case Study of the Retention Efficiency of a Traditional and Innovative Drainage System. Resources 9, no. 9: 108. DOI: 10.3390/resources9090108.
- [6] Bogdanowicz, E., Stachy, J. (1998). Maksymalne opady deszczu w Polsce. IMiGW.
- [7] Burszta-Adamiak, E., Łotomowski, J. (2004). Problemy infiltracji wód opadowych do gruntu, Przegląd Komunalny 11: s. 123–25.
- [8] Dziopak, J., Neverova-Dziopak, E., Słyś, D. (2002). Grawitacyjno-pompowe zbiorniki retencyjne w systemach kanalizacji, Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej. Konferencje Vol. 50, s. 61–72.
- [9] Kotowski, A., Kaźmierczak, B. (2009). Ocena przydatności dotychczasowych wzorów na natężenie opadów deszczowych do projektowania odwodnień terenów w Polsce. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, nr 11, s. 11-17.
- [10] Katalog Nakładów Rzeczowych, Sekocenbud IV kw., 2022.
- [11] BN-83/8836-02 – Przewody podziemne. Roboty ziemne. Wymagania i badania przy odbiorze.
- [12] PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne – Część 1: Zasady ogólne.
- [13] Broszura Uponor Infra. Systemy retencyjne Uponor Infra Rozwiązania do efektywnego zagospodarowania ścieków deszczowych, sanitarnych, wody pitnej oraz ppoż.
- [14] Katalog Produktów, (2020). Uponor Infra.
- [15] Kotowski, A. (2015). Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów. Tom I. Sieci kanalizacyjne. Wydawnictwo Seidel – Przywecki, Łódź.
- [16] Kotowski, A. (2015). Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów. Tom II. Obiekty specjalne. Wydawnictwo Seidel – Przywecki, Łódź.
- [17] Stanowska, P., Dziopak, J., Słyś, D., Starzec, M. (2021). An innovative rainwater system as an effective alternative for cubature retention facilities. Studia Geotechnica et Mechanica, vol.43, no.s.1, 3921, s. 532-547.
- [18] Słyś, D. (2013). Zrównoważone systemy odwodnienia miast, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne.
- [19] Słyś, D., Dziopak, J. (2021) Innowacyjny system kanalizacji grawitacyjnej w infrastrukturze odwodnieniowej miast, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, nr 2 (95), no. 2, s. 38-43.
- [20] Starzec, M. (2018). The impact of construction of piling partitions on the retention efficiency of a sewerage network. E3S Web of Conferences 45, 00087. DOI: 10.1051/e3sconf/20184500087.
- [21] Tarnawska, M. (2018). Retencyjny kanał ściekowy PE-HD – Innowacyjny system działa już w Rzeszowie i Mielcu. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, Listopad-Grudzień.
- [22] Bolt, A., Burszta-Adamiak, E., Gudelis-Taraszkiewicz, Suligowski, Z., Tuszyńska, A. (2012). Kanalizacja: projektowanie, wykonanie, eksploatacja, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Piaseczno.
- [23] Software Storm Water Management Model (SWMM), United States Environmental Protection Agency (EPA), ver.5.1.
- [24] Kotowski, A., Danczewicz, A. i Kaźmierczak, B. (2010). Modelowanie do wymiarowania kanałów. Polska Akademia Nauk. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej. Instytut Podstawowych Problemów Techniki. Polska Akademia Nauk. nr 68, Warszawa.
- [25] Licznar, P., Siekanowicz-Grochowina, K., Oktawiec, M., Zaleski, J., Wilk, P., Wereski, S.,

- Mikołajewski, K. (2020). Maksymalne wysokości i natężenia opadów i ich modele. In book: *Metodyka opracowania Polskiego Atlasu Natężenia Deszczów (PANDa)* (s.55-75). Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy.
- [26] Hettiarachchi, S., Wasko, C., Sharma, A. (2018). Increase in flood risk resulting from climate change in a developed urban watershed – the role of storm temporal patterns, *Hydrology and Earth System Sciences* 22, s. 2041–2056.
- [27] Stanowska, P. (2023). Analiza hydrogramów natężenia odpływu wód opadowych w węźle wylotowym z innowacyjnej i klasycznej kanalizacji deszczowej. Zagadnienia aktualnie poruszane przez młodych naukowców 22. *Creativetime*. ISBN 978 – 83-66772-28-1.
- [28] Warunki techniczne wykonania i odbioru sieci kanalizacyjnych. Wymagania Techniczne COBRTI Instal (2003). Zeszyt 9, Warszawa.
- [29] Dziopak, J., Starzec, M. (2015). *Sewage systems. Basic and desing*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów. ISBN 978-83-7934-032-3.
- [30] Tomczyk, A.M., Szyga-Pluta, K. (2018). Variability of thermal and precipitation conditions in the growing season in Poland in the years 1966–2015, *Theoretical and Applied Climatology*. DOI: 10.1007/s00704-018-2450-4.
- [31] Woś, A. (2010). *Klimat Polski w drugiej połowie XX wieku*, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań.
- [32] Żmudzka, E. (2009). Współczesne zmiany klimatu Polski, *Acta Agrophysica*, 13 (2), s. 555–568.
- [33] Słyś, D. (2008). Retencja i infiltracja wód deszczowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów.
- [34] Starzec, M., Dziopak, J., Słyś, D. (2017). Designing a retention sewage canal with consideration of the dynamic movement of precipitation over the selected urban catchment. In *Underground Infrastructure of Urban Areas* 4, 4th ed.; Madryas, C., Kolonko, A., Nienartowicz, B., Szot, A., Eds.; CRC Press: London, UK, Volume 1, pp. 193–200. ISBN 9781138559530.
- [35] Starzec, M., Dziopak, J., Słyś, D. (2020). An Analysis of Stormwater Management Variants in Urban Catchments. *Resources* 9, no. 2: 19. DOI: 10.3390/resources9020019.
- [36] Grimmond, S. (2007). Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming. *Geographical Journal*, 173: s.83-88. DOI: 10.1111/j.1475-4959.2007.232_3.x
- [37] Stanowska, P. (2023). Możliwości akumulowania wód opadowych w innowacyjnej kanalizacji deszczowej. Zagadnienia aktualnie poruszane przez młodych naukowców 22. *CREATIVETIME*. ISBN 978 – 83-66772-28-1.
- [38] Stec, A., Słyś, D., Dziopak, J. (2015). Optymalizacja w projektowaniu kanalizacyjnych zbiorników retencyjnych. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów*.
- [39] Dabrowski, W., Zielina, M., McGarity, A. (2021). Specyfika kanalizacji w Polsce w kontekście zastosowania zielonej infrastruktury. *Instal* 10, s. 49-52. DOI: 10.36119/15.2021.10.8.
- [40] Dziopak, J. (2004). Modelowanie wielokomorowych zbiorników retencyjnych w kanalizacji. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów*, ISBN 83-7199-293-9.
- [41] Bąk, J., Królikowska, J., Kudlik, K., & Szydłowski, K. (2019). Rola edukacji w programowaniu alternatywnych rozwiązań zagospodarowania wód opadowych. *Instal* 12, s. 51–55. DOI: 10.36119/15.2019.12.8.
- [42] Kuliczkowski A., Jakubowski J. (2002) Ocena porównawcza wybranych metod obliczania miarodajnych przepływów w kanalizacji deszczowej, *Instal* 11, 28–32.
- [43] Dabrowski, W., McGarity, A. (2022). Próba standaryzowania retencji zielonej wód deszczowych. *Instal* 6, s. 49-54. DOI: 10.36119/15.2022.6.7.
- [44] Malmur, R., (2023). Zbiorniki retencyjne jako elementy kanalizacji deszczowej. *Instal* 5, s. 30-36. DOI: 10.36119/15.2023.5.5