

CZAS REAKCJI ZLEWNI ZURBANIZOWANEJ NA OPADY WYWOŁUJĄCE WEZBRANIA

Adam Krajewski, Kazimierz Banasik

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki analizy 38 zdarzeń opad-odpływ, zarejestrowanych w małej zlewni zurbanizowanej (28,7 km²) w południowo-zachodniej części Warszawy w okresie 2009–2012. Celem analizy było zbadanie zmienności czasu opóźnienia odpływu, w zależności od wybranych charakterystyk zdarzeń opad-odpływ. Porównano wyznaczony z pomiarów czas opóźnienia odpływu z czasem uzyskanym ze wzorów empirycznych. Wyniki analizy zarejestrowanych zdarzeń wykazały duże zróżnicowanie w wartościach ich czasu opóźnienia (od 1,44 do 15,8 h), nie potwierdzając zależności opisanych wybranymi formułami empirycznymi.

Słowa kluczowe: czas opóźnienia odpływu, opad-odpływ, zlewnia miejska, Potok Służewiecki

WSTĘP

Czas reakcji zlewni rzecznej na opad o dużej wydajności jest istotnym elementem w prognozowaniu wezbrań, a także w wyznaczaniu przepływów obliczeniowych niezbędnych do wymiarowania obiektów infrastruktury technicznej na ciekach. Jedną z miar tej reakcji jest czas opóźnienia (odpływu) definiowany jako odległość mierzona w skali czasu między środkiem ciężkości hietogramu opadu efektywnego a hydrogramu odpływu bezpośredniego [McCuen i in. 1984, Banasik 1994, 2009, Sikorska i Banasik 2008, 2010, Granato 2012]. Wielkość ta ma także istotne znaczenie przy modelowaniu transportu rumowiska unoszonego, odpływającego z małych zlewni rzecznych [Banasik i in. 2006, Hejduk i Banasik 2011]. Czas reakcji zlewni, w tym czas opóźnienia, zależy od wielkości, kształtu i topografii zlewni, rodzaju gleb, użytkowania terenu, istnienia i rodzaju kanalizacji burzowej, stanu cieków i rzeki głównej oraz wilgotności zlewni i charakterystyki opadu. W konkretnej zlewni te ostatnie czynniki, a więc wilgotność przed wystąpieniem opadu (wilgotność początkowa) oraz wysokość i natężenie deszczu w zlewni,

Adres do korespondencji – Corresponding author: Adam Krajewski, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Katedra Inżynierii Wodnej, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: adam_krajewski1@sggw.pl

a także zmienność obszarowa i czasowa tych elementów, mogą wpływać na zróżnicowanie rejestrowanych wartości czasu opóźnienia. Badania Gericke i Smithersa [2013] wskazują na dużą rozbieżność wyników uzyskanych dzięki różnym formułom empirycznym i analitycznym. Porównanie między obserwowanym i obliczonym czasem opóźnienia daje szansę na wyłonienie metod preferowanych w danej zlewni. Od wiarygodnej wartości czasu opóźnienia (*Lag*) zależą wyniki uzyskiwane ze stosowania modelu opad-odpływ do prognozy i predykcji wezbrań. Analiza niepewności prognozy wezbrań wskazuje na siedmiokrotne różnice między obserwowanymi i symulowanymi wartościami przepływu kulminacyjnego [Sikorska i in. 2012].

Celem pracy jest wyznaczenie czasu opóźnienia odpływu wywołanego intensywnym deszczem w małej zlewni zurbanizowanej Potoku Służewieckiego w Warszawie na podstawie monitoringu hydrologicznego prowadzonego przez Katedrę Inżynierii Wodnej SGGW w okresie 2009–2012 oraz zanalizowanie jego zmienności i zależności od wybranych charakterystyk opadu i odpływu. Dalszym celem pracy jest porównanie wyznaczonego z pomiarów czasu opóźnienia z wynikami zastosowania kilku formuł literaturowych.

ZLEWNIA BADAWCZA I DANE POMIAROWE

Zlewnia Potoku Służewieckiego (rys. 1) położona jest w południowo-zachodniej części Warszawy. Obejmuje następujące dzielnice miasta: Włochy, Ochota, Mokotów, Ursynów i Wilanów. Przeprowadzone badania i analizy dotyczą zlewni cząstkowej zamkniętej profilem Wyścigi. Jej powierzchnia stanowi 28,7 km² [Pietrak i Banasik 2009], a stopień uszczelnienia zlewni wynosi 22% [Sikorska i Banasik 2008]. Wyznaczony na podstawie mapy topograficznej przybliżony średni spadek zlewni równy jest 0,27%, a spadek ciekui – 0,15%. Długość ciekui w granicach rozpatrywanego obszaru to około 10 km. Na obsza-



Rys. 1. Lokalizacja zlewni Potoku Służewieckiego (na podstawie UMWM [2013])

Fig. 1. Schematic map of the Upper part of Sluzew Creek in south-west part of Warsaw (by UMWM [2013])

rze portu lotniczego „Okęcie” Potok Służewiecki płynie kanałem zamkniętym. Wzdłuż całej trasy rzeki zlokalizowanych jest ponad 30 dopływów [Banasik (red.) 2002]. Zlewnia jest niejednorodna pod względem zagospodarowania terenu. Północną część zlewni, do połączenia z Rowem Grabowskim, cechuje silna urbanizacja, zlokalizowane jest tu m.in. lotnisko. W południowej części, będącej zlewnią Rowu Grabowskiego, znajdują się osiedla domów jednorodzinnych, pola, nieużytki oraz tereny leśne.

Teren zlewni jest płaski, a spadki są niewielkie. Analizowany fragment w całości zlokalizowany jest na obszarze wysoczyzny morenowej. Zbudowana jest ona głównie z glin zwałowych i osadów fluwioglacjalnych. Niezabudowaną powierzchnię pokrywają głównie gleby bielcowe, płowe i antropogeniczne, z niedużą domieszką brunatnych. Porasta je roślinność typowa dla miejskich zieleńców, segetalna i ruderalna, towarzysząca ogrodom działkowym [SUiKZP 2010].

Dane o wielkości przepływów zostały ustalone dla profilu Wyścigi, znajdującym się tuż powyżej małego zbiornika detencyjnego „Staw Wyścigi”. Na podstawie odczytów z czujnika ciśnieniowego ustalono wartości stanów wody w 10-minutowych przedziałach. Następnie informacje o stanie wody zostały zamienione na przepływy dzięki krzywej przepustowości koryta. Zarejestrowane opady punktowe zostały uśrednione zgodnie z metodą wielokątów równego zadeszczenia (de Thiessena). Metoda ta opisywana była przez m.in. przez Byczkowskiego [1999] oraz Kossakowską-Cezak i Bajkiewicz-Grabowską [2008].

WYNIKI ANALIZY ZDARZEŃ OPAD-ODPŁYW

Do analizy wybrano zdarzenia występujące od kwietnia do października w latach 2009–2012, podczas których przepływ kulminacyjny był czterokrotnie większy od przepływu średniego dla tego okresu. Wezbrania zimowe zostały pominięte. Czas opóźnienia dla każdego zdarzenia ustalono, stosując metodę momentów statystycznych, z równania:

$$Lag = M_{1Q} - M_{1P} \quad (1)$$

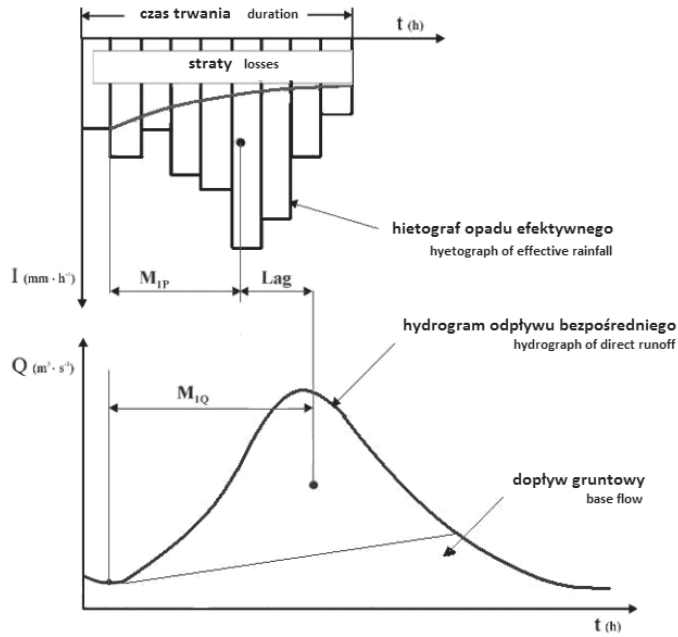
gdzie: Lag – czas opóźnienia,

M_{1Q} – pierwszy moment statystyczny hydrogramu odpływu bezpośredniego,

M_{1P} – pierwszy moment statystyczny hietogramu opadu efektywnego.

Graficzny obraz zastosowania metody momentów do wyznaczenia czasu opóźnienia odpływu przedstawiono na rysunku 2.

Obliczenia wykonano za pomocą programu komputerowego SNE, napisanego w języku FORTRAN. Przyjęto założenie o równości objętości opadu efektywnego nad zlewnią i objętości odpływu bezpośredniego obserwowanego w korycie. Rozkład opadu efektywnego w czasie przyjęto według metody CN-SCS. Podstawowe charakterystyki – pomierzone i obliczone, analizowanych zdarzeń opad-odpływ podano w tabeli 1. Opady nad zlewnią zawierały się w przedziale od 8,0 do 56,9 mm, ze średnią wartością równą 23,8 mm. Obserwowana retencja (parametr S metody CN-SCS) zmieniała się w zakresie od 13 do 136 mm. Największy przepływ kulminacyjny zmierzono w dniu 31.07.2011 i wyniósł on $5,74 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Średnia wartość przepływu dla okresu 2009–2012 w profilu Wyścigi wyniosła $0,216 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Średni ustalony z pomiarów czas opóźnienia osiągnął wartość 5,65 h, z odchyleniem standardowym równym 2,76 h.



Rys. 2. Idea wyznaczenia czasu opóźnienia metodą momentów, zmieniony [Banasik i Barszcz 2004]

Fig. 2. Definition of lag time of rainfall-runoff event based on the method of moments, modified [Banasik and Barszcz 2004]

Tabela 1. Charakterystyki zdarzeń opad-odpływ
Table 1. Characteristics of the rainfall-runoff events

Lp. No	Data Date	Opad Rainfall [mm]	Odpływ Runoff [mm]	Parametr retencji Retention parameter [mm]	Przeptyw maks. Peak discharge [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	Lag [h]
1	2	3	4	5	6	7
1	31.05.09	12,9	1,07	32.33	0,96	6,61
2	25.06.09	37,3	3,06	93.80	2,16	9,57
3	30.06.09	20,4	1,16	57.96	0,91	3,73
4	05.07.09	37,2	2,20	104.55	1,31	8,42
5	17.07.09	34,8	3,49	80.83	3,23	8,91
6	23.07.09	14,4	1,02	38.16	1,05	3,98
7	27.08.09	22,7	1,43	62.55	1,40	5,56
8	05.04.10	14,7	1,12	38.02	0,95	5,41
9	30.05.10	24,3	1,71	64.50	1,86	3,30
10	02.06.10	18,1	2,37	37.28	1,93	6,60
11	12.06.10	25,4	2,24	62.12	1,96	3,15
12	23.06.10	33,0	4,27	68.29	2,06	6,47
13	03.06.10	42,3	1,72	131.78	2,34	4,09
14	18.07.10	35,4	0,70	127.78	1,98	1,90

Tabela 1, cd.
Table 1, cont.

1	2	3	4	5	6	7
15	25.07.10	36,5	2,36	99.71	1,57	5,13
16	27.07.10	10,2	0,66	27.78	1,07	3,65
17	06.08.10	14,9	5,86	13.31	4,24	8,67
18	04.11.10	25,6	2,38	61.33	1,58	4,60
19	06.11.10	12,9	1,35	29.45	0,99	4,42
20	10.11.10	12,2	1,13	29.23	1,19	6,27
21	03.05.11	16,2	0,59	51.80	0,88	2,53
22	01.06.11	13,6	0,66	40.53	0,89	5,06
23	02.07.11	12,9	1,71	26.38	1,27	5,18
24	04.07.11	10,0	1,64	18.24	1,54	5,74
25	08.07.11	8,0	0,76	19.00	0,94	5,21
26	10.07.11	8,0	0,64	20.30	1,12	3,90
27	15.07.11	39,5	5,46	79.07	3,38	8,25
28	19.07.11	13,1	0,89	35.23	1,13	1,41
29	20.07.11	29,1	5,95	46.31	3,90	10,91
30	27.07.11	15,0	1,24	37.62	1,20	4,20
31	31.07.11	56,9	17,77	64.78	5,74	15,79
32	07.08.11	45,0	3,84	111.47	0,94	8,88
33	15.04.12	20,2	1,43	53.47	1,09	1,99
34	15.05.12	18,6	1,17	51.29	0,92	3,45
35	10.06.12	15,3	1,25	38.56	1,06	5,27
36	13.06.12	19,1	1,52	48.63	1,18	4,74
37	08.07.12	13,4	0,98	35.16	0,99	5,28
38	16.10.12	47,8	2,71	135.99	1,95	6,40
Zakres zmienności – range		8,0	0,59	13,31	0,88	1,41
		56,9	17,77	135,99	5,74	15,79
Średnia – Average		23,8	2,49	57,23	1,71	5,65
Odchylenie standardowe Standard deviation		12,6	2,90	32,47	1,07	2,76

Zmierzone wartości czasu opóźnienia zostały porównane z charakterystykami odpływu i warunkami wilgotnościowymi, reprezentowanymi przez parametr retencji zlewni (S). Wielkość retencji wynika z wartości bezwymiarowego parametru CN . Reprezentuje on sposób zagospodarowania terenu, rodzaj gleb i warunki wilgotnościowe. Używany jest w metodzie CN-SCS do oszacowania warstwy odpływu [USDA-SCS 1985, Banasik i in. 2000, Banasik 2009]:

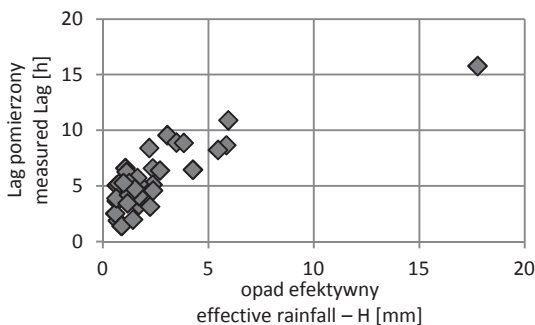
$$S = 5(P + 2H - \sqrt{4H^2 + 5PH}) \quad (2)$$

gdzie: S – maksymalna potencjalna retencja zlewni [mm], obliczana indywidualnie dla każdego zdarzenia na podstawie warstwy opadu i odpływu [Hawkins 1993, Banasik i Woodward 2010],

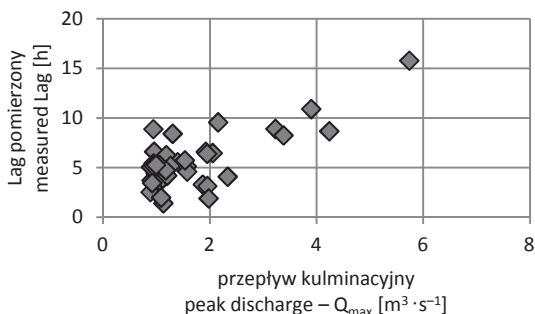
P – opad całkowity [mm],

H – opad efektywny [mm].

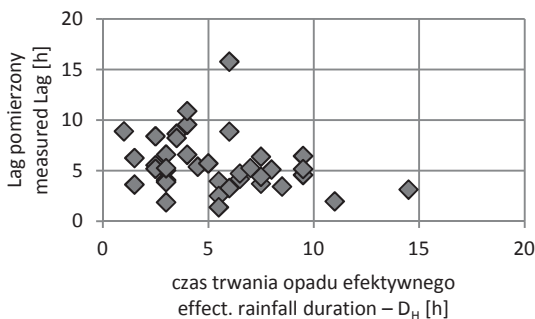
Wyniki w postaci zależności czasu opóźnienia odpływu od wybranych charakterystyk opadu lub odpływu przedstawiono na rysunkach od 3 do 6. Zaobserwowano, że wartość czasu opóźnienia rośnie wraz ze zwiększaniem się warstwy odpływu (rys. 3) oraz z natężeniem przepływu kulminacyjnego (rys. 4), maleje natomiast w miarę wydłużania się czasu trwania opadu efektywnego (rys. 5). Nie wykazano zależności między czasem opóźnienia i parametrem retencji zlewni (rys 6.).



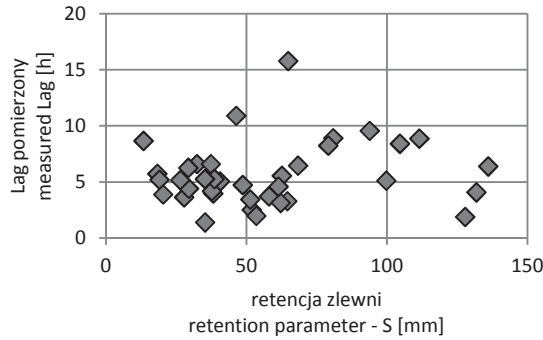
Rys. 3. Związek między opadem efektywnym i czasem opóźnienia
Fig. 3. Relation between runoff depth and lag time



Rys. 4. Związek między przepływem kulminacyjnym i czasem opóźnienia
Fig. 4. Relation between peak discharge and lag time



Rys. 5. Związek między czasem trwania opadu efektywnego i czasem opóźnienia
Fig. 5. Relation between duration of effective rainfall and lag time



Rys. 6. Wartość czasu opóźnienia i obserwowana retencja w zlewni
 Fig. 6. Event lag time vs. maximum potential retention of the catchment

PORÓWNANIE USTALONEGO Z POMIARÓW CZASU OPÓŹNIENIA Z CZASEM WYZNACZONYM ZE WZORÓW EMPIRYCZNYCH

Jak wykazała przeprowadzona analiza, obserwowany w zlewni Potoku Służewieckiego czas opóźnienia cechuje się dużym zakresem zmienności, a na jego wartość wpływają charakterystyki odpływu. W zlewniach niezurbanizowanych obserwuje się mniejszą zmienność czasu opóźnienia [Simas i Hawkins 1999, Folmar i Miller 2008, Karabová i in. 2012].

Większość równań empirycznych uzależnia czas opóźnienia od różnych warunków fizjograficznych [Gericke i Smithers 2013]. Z bogatej puli równań wybrano te, które dają szansę na wyznaczenia czasu *Lag* dla pojedynczego zdarzenia.

Metoda Rao i innych [1972] opracowana została w celu wyznaczenia parametrów IUH według Nasha. Zakłada ona, że czas opóźnienia maleje wraz z wysokością warstwy odpływającej wody i rośnie w miarę wydłużania się czasu opadu efektywnego.

$$Lag = 1,28A^{0,46}(1 + U)^{-1,66}H^{-0,27}D^{0,37} \quad (3)$$

gdzie: A – powierzchnia zlewni [km^2],
 U – udział terenów zabudowanych [–],
 D – czas trwania opadu efektywnego [h].

Skrócenie czasu opóźnienia w związku z wielkością wezbrania występuje także u Boyda [1987, za Banasikiem i Barszczem 2004]:

$$Lag = 2,12A^{0,57}Q_{\max}^{-0,23} \quad (4)$$

gdzie Q_{\max} – przepływ maksymalny [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

W formule zaproponowanej przez byłą amerykańską Służbę Ochrony Gleby [USDA-SCS 1985] występują charakterystyki zlewni:

$$Lag = \frac{L^{0,8}(0,039S + 1)^{0,7}}{734J_z^{0,5}} \quad (5)$$

gdzie: J_z – średni spadek cieku [%],
 L – długość głównego cieku [m].

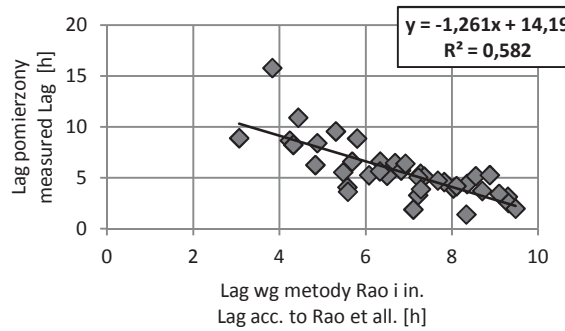
Simas i Hawkins [1999] wyprowadzili równanie regresji dla czasu opóźnienia, w którym także występują charakterystyki zlewni:

$$Lag = 0,0038B^{0,594}J^{-0,150}S^{-0,313} \quad (6)$$

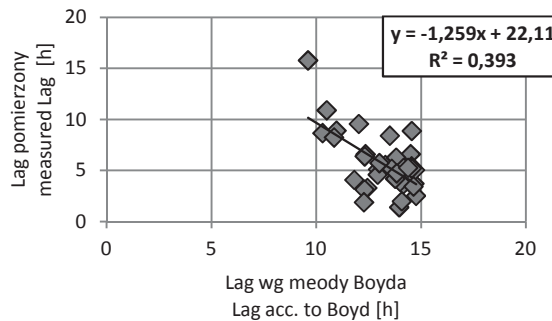
gdzie: B – szerokość zlewni [m],
 J – spadek cieku głównego [-].

Zaprezentowane powyżej wzory zostały użyte do ustalenia wartości czasu opóźnienia w zlewni Potoku Służewieckiego. Metod Rao i innych oraz Boyda użyto w celu wyznaczenia czasu opóźnienia dla pojedynczych zdarzeń opad-odpływ oraz średniej wartości czasu opóźnienia. Wzorów USDA-SCS oraz Simasa i Hawkinsa użyto do określenia średniej wartości czasu opóźnienia. Uzyskane wyniki porównano z wynikami z pomiarów.

Zarówno formuły Rao i innych, jak i Boyda dają wyniki niezgodne z obserwacjami, co przedstawiono na rysunkach 7 i 8. Dla zwiększających się wartości czasu odpływu z pomiarów uzyskuje się – stosując wymienione wzory i odpowiadające pomierzonym zdarzeniom charakterystyki – wartości malejące.



Rys. 7. Zmierzone wartości Lag i wartości wyznaczone na podstawie metody Rao i inni [1972]
 Fig. 7. Measured lag time vs. lag time acc. to Rao et al. [1972]



Rys. 8. Zmierzone wartości Lag i wartości wyznaczone na podstawie metody Boyda [1987]
 Fig. 8. Measured Lag vs. Lag acc. to Boyd [1987]

Charakterystyki zdarzeń opad-odpływ (tj. warstwa opadu efektywnego, przepływ kulminacyjny) wpływają tu odwrotnie na wartość pomierzonego czasu odpływu niż na obliczoną odpowiednią wielkość ze wzorów. Konstrukcja omawianych równań jest zgodna z prawami fizyki, wedle których wraz ze wzrostem warstwy wody (opadu efektywnego, przepływu kulminacyjnego) wzrasta prędkość jej przemieszczania się, a zatem skróceniu ulega czas reakcji zlewni na opad. Zjawisko takie jest także obserwowane podczas przejścia fal powodziowych i potwierdzone w literaturze [Richards i in. 2012]. Stwierdzony w zlewni Potoku Służewieckiego związek między wysokością opadu efektywnego a wartością *Lag* (tj. wydłużenie czasu opóźnienia wraz ze wzrostem warstwy opadu efektywnego) jest przypuszczalnie efektem wielu przekształceń dokonanych w cieku. Zlokalizowane na trasie rzeki liczne przepusty powodują piętrzenie i tłumienie wywołanych opadami przepływów. Może to skutkować spowolnieniem reakcji zlewni. Współczynnik korelacji (*R*) prostej opisującej zależność między zmierzonymi i obliczonymi wartościami czasu opóźnienia jest większy w przypadku zastosowania metody Rao i innych ($R = 0,923$ przy $R_{kr} = 0,335$ dla $\alpha = 0,05$); dla metody Boyda uzyskano mniejszą zgodność ($R = 0,627$ przy $R_{kr} = 0,335$ dla $\alpha = 0,05$). Średni czas opóźnienia odpływu uzyskany dla metody Rao i innych jest bliski wartości średniej z pomiarów, natomiast wartość średnia uzyskana ze wzorów Boyda jest ponad dwukrotnie większa od średniej z pomiarów (tab. 2).

Tabela 2. Średni czas opóźnienia
Table 2. Average lag times

Metoda – Method	<i>Lag</i> [h]
Pomiar – Measurement	5,65
Rao i in.	6,38
Boyd	12,71
Simas i Hawkins	3,99
USDA-SCS	9,06

Przeprowadzona analiza wskazuje także na brak związku maksymalnej potencjalnej retencji zlewni z czasem opóźnienia (rys. 6). Średnia wartość *Lag* uzyskana ze wzorów Simasa i Hawkinsa jest mniejsza, a ze wzorów USDA-SCS – większa od wartości średniej z pomiarów.

PODSUMOWANIE

W pracy wyznaczono wartości czasu opóźnienia dla małej zlewni zurbanizowanej zlokalizowanej w południowo-zachodniej części Warszawy. Wartość *Lag* jest istotnym elementem w prognozach wezbrań opadowych, w wyznaczaniu przepływów maksymalnych i w modelowaniu transportu rumowiska. Dane z monitoringu hydrologicznego (wysokość opadu, stan wody), prowadzonego przez Katedrę Inżynierii Wodnej SGGW w zlewni

Potoku Służewieckiego, posłużyły do ustalenia wartości *Lag* dla pojedynczych zdarzeń opad-odpływ. Dokonano analizy zmienności obserwowanych wartości czasu opóźnienia i zależności od charakterystyk odpływu. Następnie wyniki pomiarów porównano z wynikami uzyskanymi na podstawie podawanych w literaturze formuł empirycznych.

Wartość czasu opóźnienia, ustalone na podstawie zebranych danych, należy uznać za najbardziej wiarygodne. Mogą one zostać użyte do modelowania procesów opad-odpływ. Jednak w zlewniach miejskich rzadko dysponuje się bogatym materiałem pomiarowym, co zmusza do korzystania z metod pośrednich, jakimi są wzory empiryczne. Formuły empiryczne wybrano tak, by pozwalały określić czas opóźnienia dla pojedynczego zdarzenia. Uwzględniają więc one zmienność *Lag* ze względu na opad efektywny, przepływ kulminacyjny lub aktualne warunki wilgotnościowe w zlewni.

Wyniki uzyskane z zastosowania metody Rao i innych oraz Boyda wskazują na ograniczoną ich przydatność w modelowaniu zdarzeń w tej zlewni w zakresie zdarzeń o rozpatrywanej wielkości. Obserwowany czas opóźnienia wydłuża się wraz ze wzrostem warstwy odpływu i przepływu kulminacyjnego. Stwierdzono brak związku czasu opóźnienia z parametrem retencji zlewni, co uniemożliwia użycie wzoru Simasa i Hawkinsa. Porównane zostały także średnie wartości czasu opóźnienia. Najbliższa średniej z pomiarów jest wartość średnia ustalona ze wzoru Rao i innych.

Przeprowadzone badania i analizy wskazują na potrzebę zachowania dużej ostrożności przy doborze formuł empirycznych do modelowania procesu opad-odpływ w zlewniach o stopniu złożoności (infrastruktura techniczna na ciekach, zróżnicowane zagospodarowanie i duży udział terenów nieprzepuszczalnych) zbliżonym do zlewni Potoku Służewieckiego.

WNIOSKI

1. Zarejestrowane wartości czasu opóźnienia odpływu w zlewni zurbanizowanej Potoku Służewieckiego o powierzchni 28,7 km² charakteryzują się znaczną zmiennością. Stwierdzono, iż czas opóźnienia wyznaczony dla poszczególnych zdarzeń zmienia się w zakresie od 1,44 do 15,8 h, osiągając wartość średnią 5,65 h z odchyleniem standardowym 2,76 h.

2. Porównanie czasu opóźnienia odpływu z wybranymi charakterystykami zdarzeń opad-odpływ wskazuje na: (i) jego wydłużenie wraz ze zwiększaniem się warstwy odpływu (opadu efektywnego), (ii) wydłużenia wraz ze wzrostem przepływu kulminacyjnego wezbrania, (iii) nieznaczne skrócenie wraz z wydłużeniem się czasu trwania opadu efektywnego i (iv) brak związku z parametrem retencji *S* metody CN-SCS. Powyższe wyniki nie potwierdzają zależności opisanych formułami Rao i innych oraz Boyda.

3. Stwierdzony w zarejestrowanych zdarzeniach brak związku między maksymalną potencjalną retencją zlewni a czasem opóźnienia odpływu wskazuje na przydatność wzorów SCS oraz Simasa i Hawkinsa jedynie w odniesieniu do przeciętnych warunków wilgotnościowych zlewni.

PIŚMIENNICTWO

- Banasik K., 1994. Determination of watershed lag times in rainfall runoff-sediment yield investigations. *Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej*, 67, Seria: Konferencje (34), 17–23.
- Banasik K., 2009. Wyznaczanie wezbrań powodziowych w małych zlewniach zurbanizowanych. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Banasik K., Barszcz M., 2004. Porównanie ocen opóźnień odpływu wezbraniowego dla wybranych małych zlewni rzecznych. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 29, 5–13.
- Banasik K., Woodward D., 2010. Empirical Determination of runoff Curve Number for a small agricultural watershed in Poland. 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, June 27 – July 1.
- Banasik K., Górski D., Ignar S., 2000. Modelowanie wezbrań opadowych i jakości odpływu z małych nieobserwowanych zlewni rolniczych. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Banasik K., Barszcz M., Hejduk L., 2006. Importance of watershed lag times in IUSG development. Sediment Dynamics and the Hydromorphology of Fluvial Systems (Proceedings of a symposium held in Dundee, UK, July 2006). IAHS Publ. 306, 574–581.
- Banasik K., (red.) 2002. Operat hydrologiczny Potoku Służewieckiego w przekroju ul. Przyczółkowej. Maszynopis. Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW, Warszawa.
- Boyd M.J., 1987. Regional flood frequency data for New South Wales Streams. University of Vologong, Vologong NSW.
- Byczkowski A., 1999. *Hydrologia*. T. 2. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Folmar N.D., Miller A.C., 2008. Development of an Empirical Lag Time Equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 134, 4, 501–506.
- Gericke O.J., Smithers J.C., 2013. Review of methods used to estimate catchment response time for the purpose of peak discharge estimation. *Hydrological Sciences Journal* (zaakceptowany maszynopis).
- Granato G.E., 2012. Estimating basin lagtime and hydrograph-timing indexes used to characterize stormflows for runoff-quality analysis. Scientific Investigations Report, 5110, Virginia.
- Hawkins R.H., 1993. Asymptotic determination of curve numbers from data. *Journal of Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers* 119 (2), 334–345.
- Hejduk A., Banasik K., 2011. Recorded lag times of snowmelt events in a small catchment. *Annals of Warsaw University of Life Sciences, Land Reclamation* 2011, 43 (1), 37–46.
- Karabová B., Sikorska A.E., Banasik K., Kohnová S., 2012. Parameters determination of a conceptual rainfall-runoff model for a small catchment in Carpathians. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Land Reclamation* 44 (2), 155–162.
- Kossakowska-Cezak U., Bajkiewicz-Grabowska E., 2008. *Podstawy hydrometeorologii*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- McCuen R., Wong S., Rawls W., 1984. Estimating urban time of concentration. *J. Hydraul. Eng.* 110 (7), 887–904.
- Pietrak M., Banasik K., 2009. Redukcja fali wezbraniowej Potoku Służewieckiego za pomocą małych zbiorników. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 3 (45), 22–34.
- Rao R.A., Delleur J.W., Sarma S.P., 1972. Conceptual Hydrologic Models for Urbanizing Basins. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of the Hydraulics Division*, HY7.
- Richards Z., Gray S., Varga I., Babister M., 2012. How much time do we have? The Variability of riverine flood wave routing speed. *Floodplain Management Association Conference*, Sydney.

- Sikorska A., Banasik K., 2008. Wyznaczenie czasu opóźnienia odpływu bezpośredniego w zlewni Potoku Służewieckiego na podstawie danych pomiarowych. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 4 (42), 19–29.
- Sikorska A., Banasik K., 2010. Parameter identification of a conceptual rainfall-runoff model for a small urban catchment. *Annals of Warsaw University of Life Sciences, Land Reclamation* 42 (2), 279–293.
- Sikorska A., Scheidegger A., Banasik K., Rieckermann J., 2012. Bayesian uncertainty assessment of flood predictions in ungauged urban basins for conceptual rainfall-runoff models. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 16, 1221–1212 (doi:10.5194/hess-16-1221-2012).
- Simas M.J., Hawkins R.H., 1999. Lag time characteristic for small watersheds in the U.S. *Maszynopis. NRCS-USDA*.
- SUiKZP 2010. Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego miasta stołecznego Warszawy, Warszawa.
- UMWM – Urząd Marszałkowski Województwa Mazowieckiego, 2013. Wrota Mazowsza – Mazowiecki System Informacji Przestrzennej Gmin i Powiatów współdziałający w ramach województwa (<http://www.wrotamazowska.pl>, z dn. 28.08.2013 r.).
- USDA – Soil Conservation Service, 1985. *National Engineering Handbook. Sec. 4. Hydrology*, Waszyngton D.C.

RESPONSE TIMES OF URBAN CATCHMENT TO RAINFALL EVENTS

Abstract. Analysis of 38 rainfall-runoff events, recorded in a small urban catchment ($A = 28.7 \text{ km}^2$), located in south-west part of Warsaw, in the period of 2009–2012, has been carried out with the aim of estimating the lag times, and checking they variability. The lag times of recorded events were compared with the estimated ones from empirical formulae. Results of analysis indicated significant variability in lag times among the events (since 1.77 to 15.8 h). Relations between lag time and event characteristics used in selected formulae were not confirmed by the recorded data.

Key words: lag time, rainfall – runoff, urban catchment, Służewiecki Creek

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 20.12.2013