

Andrzej WAŁĘGA¹
Agnieszka CUPAK²
Bogusław MICHAŁEC³
Katarzyna WACHULEC⁴

WPLYW PARAMETRÓW FIZYCZNO - GEOGRAFICZNYCH ZLEWNI I CHARAKTERYSTYK OPADU NA CZAS KONCENTRACJI ODPLYWU

Celem artykułu jest ocena wpływu parametrów fizyczno – geograficznych zlewni i charakterystyk opadów na czas koncentracji odpływu ze zlewni o różnym użytkowaniu. Analizy przeprowadzono dla zlewni rzeki Sidzinki i potoku Łęgówka, położonych na terenie miasta Krakowa oraz potoku Rozrywka (Sudół Dominikański), którego zlewnia leży na obszarze gminy Zielonki i gminy Kraków. W zlewni rzeki Sidzinki dominuje użytkowanie w postaci gruntów ornych, w zlewni potoku Łęgówka i Sudół Dominikański – tereny zabudowane. Czas koncentracji obliczono metodami: a) segmentowymi: Kerby-Kirpich, NRCS, wg procedury TR55, Kerby-NRCS i b) metodami „lag”: Haktanir-Sezen, Simas-Hawking i NRCS-Lag. Podstawą przeprowadzonych obliczeń były pomiary terenowe geometrii koryt cieków, mapy topograficzne i ortofotomapy oraz natężenie opadów o różnym czasie trwania i prawdopodobieństwie przewyższenia wg, które zostały obliczone ze wzoru Bogdanowicz-Stachy. Przeprowadzone obliczenia wykazały, że wartość czasu koncentracji jest charakterystyczna dla danej zlewni i zależna od zastosowanej metody obliczeniowej. Największe wartości czasu koncentracji otrzymano dla metod Kerby – Kirpich’a i NRCS Lag, które uwzględniają wyłącznie charakterystykę drogi spływu. Wykazano ponadto, że charakterystyka opadu ma znaczący wpływ na wielkość czasu koncentracji - wzrost prawdopodobieństwa przewyższenia deszczu prowadzi do zmniejszenia jego natężenia, co w efekcie zwiększa wartość czasu koncentracji. Istotnym czynnikiem wpływającym na wielkość cza-

¹ Autor do korespondencji: Andrzej Wałęga, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, tel.: 12 662 40 52, awalega@ar.krakow.pl

² Agnieszka Cupak, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków tel.: 12 662 41 02, a.cupak@op.pl

³ Bogusław Michałec, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków tel.: 12 662 40 52, rmmichbo@cyf-kr.edu.pl

⁴ Katarzyna Wachulec, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków tel.: 12 662 41 46, k.wachulec@op.pl

su koncentracji jest rozmieszczenie terenów uszczelnionych w zlewni. Wzrastający udział powierzchni uszczelnionej w obszarze źródłowym i środkowym zlewni odpowiada za krótszy czas spływu, a przez to mniejsze przepływy w kulminacji.

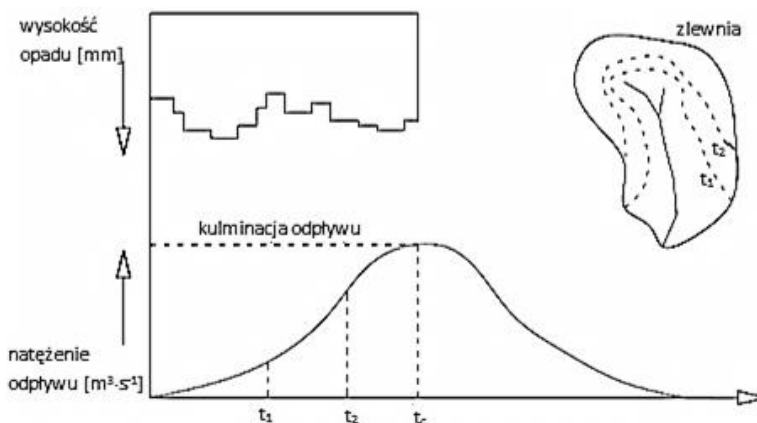
Słowa kluczowe: czas koncentracji, metody segmentowe, zlewnie zurbanizowane

1. Wprowadzenie i cel pracy

Nasilające się w ostatnich dwóch dekadach ekstremalne zjawiska pogodowe oraz postępująca urbanizacja zlewni miejskich, przyczyniają się do nasilenia intensywności odpływu powodując m.in. lokalne podtopienia, wylewy wody z systemów kanalizacyjnych, a w skrajnych przypadkach powódź. Z punktu widzenia hydrologii miejskiej, zarówno krótkotrwałe intensywne opady nawałne, jak i długotrwałe opady deszczu o mniejszej intensywności, mogą wywołać zniszczenia środowiskowe, zwłaszcza w infrastrukturze urbanistyczno-przemysłowej wskutek zalania bądź podtopienia terenu czy też rozmycia powierzchni gruntu. Zjawiska takie występują obecnie i będą też zapewne zdarzały się w przyszłości. Należy więc dążyć do ograniczenia niekorzystnych skutków środowiskowych takich zdarzeń losowych [10]. Działania ograniczające szkody spowodowane intensywnymi opadami deszczu należy podjąć na różnych szczeblach zarządzania w ramach ochrony przeciwpowodziowej, jak również na etapie projektowania systemów kanalizacji ogólnospławnej, kolektorów bądź urządzeń wodnych.

W celu doskonalenia metodyki obliczeń hydrologicznych na potrzeby projektowania: systemów kanalizacji deszczowej lub ogólnospławnej, zbiorników retencyjnych i detencyjnych, służących regulacji stosunków wodnych, odbioru wód opadowych czy ochronie przeciwpowodziowej, należy uwzględnić charakterystyki zlewni.

Jedną z podstawowych informacji hydrologicznych jest przepływ maksymalny w kulminacji, w oparciu o który projektowane są m.in. systemy odwodnienia w postaci kanałów otwartych i zamkniętych, czy przepustów. Bardzo ważnym zagadnieniem w obliczeniach, zwłaszcza w zlewniach o znacznym stopniu uszczelnienia, jest określenie czasu ich reakcji na występujący opad. Z kolei czas reakcji zlewni, a przede wszystkim czas koncentracji – T_c w istotny sposób wpływa na wielkości przepływu w kulminacji. Według Międzynarodowego Słownika Hydrologicznego i NRCS [18], czas koncentracji jest to czas, jaki przebędzie kropla wody z najdalszego pod względem hydraulicznym punktu w zlewni do badanego przekroju. Według Byczkowskiego [5] i Maidment'a [11] czas koncentracji ma znaczenie w określeniu odpływu, gdy jest on charakterystyką czasu trwania deszczu (krytycznego czasu trwania) generującego największe wezbranie (rys. 1). Ponieważ nie ma pewności, że założenie to jest prawdziwe, krytyczny czas trwania deszczu poszukuje się drogą prób.



Rys. 1. Graficzna interpretacja zależności odpływu od czasu koncentracji

Fig. 1. Graphical interpretation of the runoff depending on the time of concentration

Określenie wartości przepływu w kulminacji z wystarczająco dużą dokładnością jest jednak trudne w przypadku zlewni miejskiej ze względu na dużą zmienność obszarową odpływu. Koniecznym staje się zwiększenie dostępu projektantów do wiarygodnych baz danych opadowych lub dopasowanie wzorów empirycznych do lokalnych warunków tak, aby czas koncentracji był jak najbardziej skorelowany z krytycznym czasem trwania deszczu, dzięki czemu, wzrośnie dokładność oszacowania przepływu w kulminacji, na który projektowane są systemy odwodnień terenów zurbanizowanych.

Należy jednak pamiętać, iż o wiarygodności każdej metody decyduje jej najsłabsze ogniwo, którym obecnie, w przypadku naszego kraju, jest brak odpowiedniej dokładności lokalnych danych opadowych i parametrów związanych z czasem reakcji zlewni. Według Bondelid i in. [4] błędnie oszacowane parametry związane z czasem reakcji zlewni mogą generować nawet 75%-owy błąd w wartości przepływu w kulminacji. Dlatego czas koncentracji należy szacować porównując różne metody i wybierając wartość optymalną w zależności od charakterystyki zlewni.

Celem artykułu jest ocena wpływu parametrów fizyczno – geograficznych zlewni i charakterystyk opadów na czas koncentracji. Dodatkowo porównano wartości czasów koncentracji określone różnymi metodami i oceniono ich wpływ na przepływ w kulminacji.

2. Charakterystyka obszaru badań

Przedmiotem badań jest rzeka Sidzinka i potok Łęgówka, położone na terenie miasta Krakowa oraz potok Rozrywka (Sudół Dominikański), którego zlewnia leży na obszarze gmin Zielonki i Krakowa (rys. 2).



Rys. 2. Położenie analizowanych cieków na obszarze miasta Krakowa, 1- Potok Rozrywka, 2- Potok Łęgówka, 3- Rzeka Sidzinka [www.geoportal.gov.pl]

Fig. 2. Locality of the analyzed streams in the city of Krakow, 1- Rozrywka Creek, 2- Łęgówka Creek, 3- Sidzinka River [www.geoportal.gov.pl]

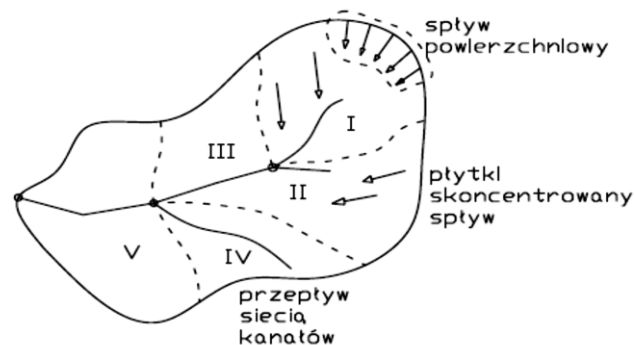
Sidzinka jest prawobrzeżnym dopływem rzeki Wisły, wypływa w południowo zachodniej części dzielnicy Dębniki (Kobierzyn), na wysokości około 246 m n.p.m. Jej długość wynosi 7,762 km, natomiast powierzchnia zlewni równa jest 11,796 km². Potok Łęgówka jest lewobrzeżnym dopływem rzeki Wisły. Wypływa ze źródła w dzielnicy Nowa Huta, następnie przepływa przez osiedle Łęg w Krakowie. Długość cieką wynosi 5,477 km, a powierzchnia jego zlewni równa jest 9,751 km². Rozrywka/Sudół Dominikański jest lewobrzeżnym dopływem rzeki Prądnik/Białucha o długość około 8,54 km i powierzchni zlewni równej 16,44 km². W zlewni rzeki Sidzinki dominuje użytkowanie w postaci gruntów ornych (50% powierzchni zlewni), natomiast tereny zabudowane stanowią 7% powierzchni zlewni. W zlewni potoku Łęgówka tereny zabudowane stanowią 81% powierzchni zlewni, a w zlewni potoku Rozrywka tereny te stanowią 51% powierzchni zlewni. Pozostałą powierzchnię obu zlewni stanowią grunty orne i lasy.

3. Metodyka badań

W pracy czas koncentracji został obliczony metodami zaszeregowanymi do dwóch grup: metody segmentowych i „lag”. Czas koncentracji wg metody segmentowej został obliczony wg: Kerby-Kirpich, NRCS, procedury TR55 i Kerby-NRCS. W metodzie „lag” czas koncentracji został określony wg: Haktanir-Sezen, Simas-Hawkins i NRCS-Lag.

Metody segmentowe:

Według Green i Nelson [8] całkowity czas, w jakim kropla wody pokona odległość z najdalszego punktu w zlewni do badanego przekroju składa się z 3 faz i są one składowymi metody segmentowej (rys. 3):



Rys. 3. Charakterystyka drogi splywu w metodach segmentowych

Fig. 3. Characteristics of runoff's way in segmental methods

Metoda Kerby-Kirpich służy do kompleksowego szacowania czasu koncentracji, wymaga stosunkowo niewielkiej liczby parametrów wejściowych, jest łatwa do zastosowania i interpretacji wyników, stosuje się ją dla zlewni o powierzchni od ok. 0,40 do 46 ha [14]. Całkowity czas koncentracji T_c składa się z sumy czasu splywu powierzchniowego i skoncentrowanego – równanie 1 (Kerby) oraz czasu splywu kanałem – równanie 2 (Kirpich).

$$t_{pow} = \frac{0,606 \cdot (L \cdot n)^{0,467}}{S^{0,234}} \quad (1)$$

$$t_{kan} = 3,978 \cdot L^{0,77} \cdot S^{-0,385} \quad (2)$$

gdzie: t_{pow} – czas splywu powierzchniowego, [min]

t_{kan} – czas splywu kanałem, [min]

L – długość drogi splywu, [m]

n – współczynnik szorstkości powierzchni splywu wg Kerby,

S – spadek drogi splywu, [-]

W metodzie NRCS na czas koncentracji składają się sumy czasów splywu: powierzchniowego (3), płytkiego skoncentrowanego strumienia (4) i otwartego przepływu kanałem (4), (5).

Splyw powierzchniowy jest to splyw cienkiej warstwy wody po powierzchni. Często występuje w źródłowych odcinkach cieków [13]. Równanie na czas splywu stokowego zostało wyprowadzone z równania fali kinematycz-

nej, gdzie współczynnik oporów ruchu wyrażony jest współczynnikiem szorstkości Manninga [18]:

$$t_{stok} = \frac{6,92 \cdot (L \cdot n)^{0,6}}{i^{0,4} \cdot S^{0,5}} \quad (3)$$

gdzie: t_{stok} – czas spływu stokowego, [min]
 L – długość drogi spływu, [m]
 n – współczynnik szorstkości powierzchni spływu wg Manninga, [-]
 S – spadek drogi spływu, [-]
 i – natężenie deszczu o prawdopodobieństwie przewyższenia p i czasie trwania t

W celu obliczenia t_{stok} zastosowaną następującą procedurę iteracyjną:

- 1) Przyjęto t_{stok}
- 2) Określono natężenie deszczu dla zadanego prawdopodobieństwa i przyjętego czasu t_{stok} z krzywej natężenie-czas trwania opadu-prawdopodobieństwo,
- 3) Obliczono t_{stok} z równania (3) dla odczytanego natężenia deszczu w pkt 2),
- 4) Porównano wynik obliczeń z przyjętym t_{stok} . Obliczenia prowadzono do momentu, aż przyjęty i obliczony t_{stok} były do siebie zbliżone.

Spływ skoncentrowany występuje w sytuacji, gdy spływająca woda zaczyna się formować w bardziej skoncentrowany spływ [13]. Czas spływu w tej fazie odpływu obliczono ze wzoru:

$$t_{skon} = \frac{L}{v \cdot 60} \quad (4)$$

gdzie: t_{skon} [min].

Średnia prędkość spływu v została obliczona w oparciu o równanie Manninga dla przepływu w kanale, przyjmując zgodnie z wytycznymi „The Maryland State Highway Administration” [1] dla obszarów nieuszczelnionych współczynnik szorstkości $n = 0,05$ i $R = 0,4$, natomiast dla uszczelnionych $n = 0,025$ i $R = 0,2$.

Czas przepływu ciekim t_{kan} obliczono ze wzoru (4) przy założeniu, że prędkość v obliczona będzie z formuły Manninga:

$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (5)$$

gdzie: R – promień hydrauliczny, [m]

Procedura TR55 została opracowana w Departamencie Rolnictwa Stanów Zjednoczonych (USCA) i służy do obliczania m.in. czasu koncentracji oraz odpływu z małych zlewni zurbanizowanych. W swoich założeniach w wyżej wymienionych metodach, dzieli czas koncentracji spływu na trzy etapy: spływ

stokowy, skoncentrowany i odpływ kanałem/ciekiem. Wzory empiryczne służące do szacowania poszczególnych składowych drogi spływu są obliczane zgodnie z metodą NRSC wg równań (4) i (5). Czas spływu stokowego jest określony za pomocą wzoru (6):

$$t_{stokTR55} = \frac{0,007 \cdot (L \cdot n)^{0,8}}{p^{0,4} \cdot s^{0,5}} \quad (6)$$

W porównaniu do równania (3), natężenie deszczu jest charakteryzowane przez opad o czasie trwania 24 godzin i prawdopodobieństwie 50%. Takie założenie pozwala uniknąć czasochłonnej procedury obliczeń iteracyjnych jak w metodzie NRCS.

Metoda Kerby-NRSC jest metodą hybrydową uwzględniającą spływ stokowy i skoncentrowany wg równania Kerby (1) oraz czasu przepływu ciekiem wg NRCS - wzory (4) i (5).

Metody „lag”:

W grupie metod „lag” czas koncentracji szacowany jest jednorazowo dla całej zlewni. Obliczenia polegają na określeniu czasu opóźnienia – LAG, a następnie z zależności parametrów czasowych T_c i LAG, obliczeniu czasu koncentracji. Opóźnienie odpływu określane jest jako odległość mierzona w skali czasu od środka geometrycznego hietogramu opadu efektywnego do środka ciężkości hydrogramu odpływu bezpośredniego lub przepływu maksymalnego [2].

Jedną z metod szacowania czasu koncentracji na podstawie zależności T_c i lag jest metoda Haktanir-Sezen. Opracowany wzór empiryczny jest równaniem regresji uzyskanym na podstawie syntetycznych jednostkowych hydrogramów odpływu dla 10 zlewni położonych na obszarze Turcji. W metodzie tej kolejno oblicza się czas opóźnienia T_{lag} , a następnie na jego podstawie czas koncentracji T_c [9]. Czas opóźnienia i koncentracji jest liczony z zależności:

$$t_{lag} = 26,85 \cdot L^{0,841} \quad (7)$$

$$t_c = \frac{t_{lag}}{0,6} \quad (8)$$

gdzie: t_{lag} , t_c [h]

L – długość koryta głównego, [km]

Simas i Hawkins opracowali wzór empiryczny do obliczania T_c na podstawie danych z 168 zlewni o powierzchni od 0,7 km² do 9,0 km² zlokalizowanych na terenie USA. Dla 3100 przeprowadzonych symulacji opad-odpływ autorzy otrzymali równanie regresji (9), które jest wzorem empirycznym na czas opóźnienia [16] Następnie w oparciu o wzór (10) oblicza się czas koncentracji:

$$t_l = 53,14 \cdot W^{0,594} \cdot s^{-0,15} \cdot R_{max}^{0,313} \quad (9)$$

$$t_c = 1,417 \cdot t_l \quad (10)$$

gdzie: t_l – czas opóźnienia, [h]
 W – szerokość zlewni, [m]
 s – spadek zlewni, [%]
 R_{max} – maksymalna potencjalna retencja, [mm]
 CN – parametr CN, [-]
 t_c – czas koncentracji, [h]

Maksymalna potencjalna retencja zlewni obliczana jest w oparciu o metodę NRCS-CN, w której istotnym parametrem jest numer krzywej (*Curve Number*) charakteryzujący sposób użytkowania zlewni, warunki glebowe i hydrologiczne.

Ostatnia z omawianych metod lag – NRCS-Lag została opracowana dla zlewni rolniczych, jednak z uwagi na to, że w metodzie tej występuje parametr CN wykorzystuje się ją również do szacowania czasu koncentracji w zlewniach zurbanizowanych. Stosuje się ją w zlewniach z dominacją spływu powierzchniowego. Czas opóźnienia jest liczony wg wzoru [12]:

$$T_{lag} = \frac{L^{0,8} \cdot (R_{max} + 1)^{0,7}}{1900 \cdot s^{0,5}} \quad (11)$$

gdzie: T_{lag} [h]
 L – hydrauliczna długość drogi spływu, [km]
 R_{max} – maksymalna potencjalna retencja zlewni,
 s – średni spadek zlewni, [%]

Parametr R_{max} jest liczony ze wzoru:

$$R_{max} = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (12)$$

Wykonanie obliczeń wymagało przyjęcia następujących dodatkowych założeń:

- krzywe: natężenie deszczu-czas trwania-prawdopodobieństwo określono w oparciu o metodę Bogdanowicz i Stachy [3],
- kształt hietogramu opadu całkowitego przyjęto zgodnie z wymogami DVWK [6], przyjmując maksymalne natężenie opadu w środku epizodu, co było niezbędne do przeprowadzenia modelowania odpływu wody ze zlewni,
- opad efektywny został obliczony wg metody NRCS-CN [14], gdzie parametr CN został ustalony w oparciu o zagospodarowanie zlewni, warunki glebowe i hydrologiczne, przyjmując normalne uwilgotnienie zlewni.

Informacje o użytkowaniu zlewni pochodziły z bazy Corine Land Cover, a dane odnośnie gleb z map glebowych w skali 1:25 000 udostępnionych przez Instytut Upraw i Nawożenia w Puławach,

- transformację opadu efektywnego w odpływ bezpośredni przeprowadzono za pomocą modelu opad-odpływ NRCS-UH dla deszczy o różnym czasie trwania [11]. Obliczenia przeprowadzono w pomocy programie HEC-HMS 3.4.

Przeprowadzono także badania terenowe polegające na pomiarach geodezyjnych przekroji poprzecznych koryt analizowanych cieków w wybranych punktach charakterystycznych (zmiany spadku czy kształtu koryta) oraz określeniu współczynnika szorstkości dna i skarp cieku.

4. Wyniki badań i dyskusja

W tabelach 1-3 zestawiono wyniki obliczeń czasu koncentracji w oparciu o wszystkie analizowane metody w badanych ciekach.

Tabela 1. Zestawienie wyników obliczeń T_c dla zlewni rzeki Sidzinka

Table 1. The results of T_c calculation for Sidzinka's River catchment

Metoda	Wzór	Forma spływu powierzchniowego				Czas koncentracji T_c [h]
		stokowy	skoncentrowany	korytowy		
				Odc. 1	Odc. 2	
Segmentowa	Kerby-Kirpich	0,14		2,06	1,39	3,59
	NRCS	0,07	0,01	1,14	0,815	2,04
	TR55	0,026	0,01	1,14	0,815	1,99
	Kerby-NRCS	0,14		1,14	0,815	2,1
Lag	Haktanir-Sezen	-	-	-	-	2,72
	Simas-Hawkins	-	-	-	-	2,63
	NRCS-Lag	-	-	-	-	4,31
Średni czas koncentracji						2,77

Tabela 2. Zestawienie wyników obliczeń T_c dla zlewni potoku ŁęgówkaTable 2. The results of T_c calculation for Łęgówka's Stream catchment

Metoda	Wzór	Forma spływu powierzchniowego			Czas koncentracji T_c [h]
		stokowy	skoncentrowany	koryto	
Segmentowa	Kerby-Kirpich	0,23		3,114	3,34
	NRCS	0,078	0,029	1,28	1,39
	TR55	0,028	0,029	1,28	1,34
	Kerby-NRCS	0,23		1,28	1,51
Lag	Haktanir-Sezen	-	-	-	1,66
	Simas-Hawkins	-	-	-	2,82
	NRCS-Lag	-	-	-	3,42
Średni czas koncentracji					2,21

Tabela 3. Zestawienie wyników obliczeń T_c dla zlewni potoku RozrywkaTable 3. The results of T_c calculation for Rozrywka's Stream catchment

Metoda	Wzór	Forma spływu powierzchniowego				Czas koncentracji T_c [h]
		stokowy	skoncentrowany	korytowy		
				koryto naturalne	kolektor	
Segmentowa	Kerby-Kirpich	0,192		1,731	1,154	3,08
	NRCS	0,063	0,024	1,685	0,259	2,03
	TR55	0,025	0,024	1,685	0,259	1,99
	Kerby-NRCS	0,192		1,685	0,259	2,14
Lag	Haktanir-Sezen	-	-	-	-	2,72
	Simas-Hawkins	-	-	-	-	2,56
	NRCS-Lag	-	-	-	-	2,89
Średni czas koncentracji					2,49	

Wyniki obliczeń wskazują na duże zróżnicowanie wartości czasu koncentracji w zależności od zastosowanej metody. W zlewni Sidzinki wielkości T_c zmieniały się od 1,99 do 4,31 h, Łęgówki od 1,34 do 3,42 h, natomiast w zlewni potoku Rozrywka od 1,99 do 3,08 h. Dla zlewni Sidzinki i Łęgówki otrzymano

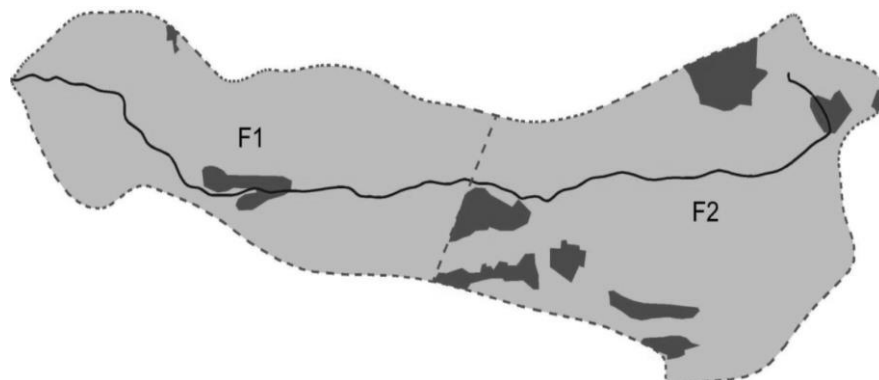
największy czas koncentracji metodą NRCS-Lag, natomiast dla zlewni potoku Rozrywka metodą Kerby-Kirpich'a. Najmniejsze wartości T_c otrzymano dla wszystkich zlewni z metody TR55. Różnice pomiędzy największym a najmniejszym T_c wahają się od 35% dla zlewni potoku Rozrywka do 61% dla potoku Łęgówka. Obliczenia w analizowanych zlewniach potwierdziły tezę m.in. Fang i in. [7], którzy prowadząc badania w 96 małych zlewniach na terenie Texas'u otrzymali różnice wartości T_c od 38 to 207% dla tego samego zestawu parametrów zlewni. W przypadku wszystkich analizowanych zlewni, wyraźnie wyższe czasy koncentracji uzyskano z metod należących do grupy „lag”. W zlewni rzeki Sidzinki średni T_c dla metod segmentowych wyniósł 2,43 h, a dla „lag” 3,22 h, w zlewni potoku Łęgówka wartości te wynosiły odpowiednio 1,90 i 2,63 h, a w zlewni potoku Rozrywka - 2,31 i 2,72 h. Z punktu widzenia projektowania obiektów do odprowadzenia wód opadowych, czy ochrony przeciwpowodziowej korzystniejsze jest przyjmowanie krótszych czasów koncentracji, gwarantujących uzyskanie wyższych, bezpieczniejszych objętości odpływu wody. Wydaje się więc, że w praktyce projektowej powinno się uwzględniać metody hydrauliczne (np. NRCS) w celu określenia czasu koncentracji, jako bardziej bezpieczne z punktu widzenia bezpieczeństwa i niezawodności funkcjonowania systemów odwodnienia, czy urządzeń wodnych. Wg Weinerowskiej-Borys [20] w przypadku zlewni zurbanizowanych powinno się unikać w obliczaniu czasu koncentracji metod nieuwzględniających użytkowania, np. popularnej metody Kirpicha.

W przypadku wszystkich analizowanych zlewni w całkowitym czasie koncentracji wyraźnie dominuje faza spływu korytem nad spływem powierzchniowym. Wynika to ze stosunkowo krótkich odcinków spływu powierzchniowego, które dodatkowo charakteryzowały się znacznymi spadkami (szczególnie w zlewni Rozrywki), co jest typowe w górnych partiach zlewni. Ponadto, szczególnie w przypadku potoku Łęgówka i Sidzinka, górne partie zlewni są silnie uszczelnione, co wpływa na zmniejszenie czasu spływu. W przypadku potoku Sidzinka, koryto cieką podzielono na dwa odcinki, różniące się kształtem przekroju poprzecznego, natomiast w przypadku potoku Rozrywka oddzielnie prowadzono obliczenia dla koryta otwartego i zamkniętego betonowym kolektorem o wymiarach 1,6 m x 1,2 m. Zamknięcie koryta cieką w zamknięty kolektor przejawia się w wyraźnym zmniejszeniu czasu przepływu – tab. 3, co jest spowodowane zmniejszeniem oporów ruchu w kolektorze w stosunku do naturalnego koryta.

Badając wpływ parametrów fizyczno-geograficznych zlewni na wartość czasu koncentracji przeanalizowano takie czynniki jak: powierzchnię zlewni, długość zlewni, kształt, spadek i użytkowanie zlewni. Analiza parametrów wejściowych w poszczególnych metodach szacowania T_c wykazała, że wielkość powierzchni, długość i kształt zlewni nie są uwzględnione bezpośrednio w obliczeniach czasu koncentracji. Średni czas koncentracji dla zlewni Sidzinki (powierzchnia 11,796 km²) wynosi 2,77 h, w zlewni potoku Łęgówka (powierzchn-

nia 9,751 km²) 2,21 h, natomiast w zlewni potoku Rozrywka (powierzchnia 16,440 km²) 2,49 h. Jak wynika z przedstawionych wartości, wielkość powierzchni zlewni nie ma wpływu na T_c. Zlewnia Łęgówki o najmniejszej powierzchni ma najniższą wartość T_c, natomiast czas koncentracji dla zlewni o największej powierzchni – potok Rozrywka, ma pośrednią wartość czasu koncentracji spośród analizowanych zlewni, co potwierdza wcześniejsze stwierdzenie. Istnieje związek pomiędzy długością zlewni a wartością czasu koncentracji. Wraz ze wzrostem odległości między przekrojem pomiarowym, a najbardziej oddalonym punktem na wododziale rosną wartości czasu koncentracji. Dla zlewni rzeki Sidzinki o długości 7,762 km otrzymano najwyższe wartości T_c, w porównaniu z najkrótszą zlewnią potoku Łęgówka o L=5,477 km, gdzie średni czas koncentracji ma najniższą wartość równą 2,21 h. Jak podaje Soczyńska [17], w długich zlewniach obserwuje się wydłużenie czasu spływu wody do badanego przekroju, co wpływa na większe spłaszczenie fali wezbraniowej w stosunku do zlewni o krótkiej drodze spływu. Czas koncentracji jest także uzależniony od kształtu zlewni wyrażanego przez współczynniki: formy CF i wydłużenia CW oraz wskaźnika kolistości CK. Wraz ze wzrostem współczynników CW i CF oraz wskaźnika CK maleje wartość czasu koncentracji. Dla zlewni potoku Łęgówka, którego parametry kształtu wynoszą odpowiednio: CF = 0,34, CW = 0,66 i CK = 0,54 średni czas koncentracji wynosi 2,21 h, natomiast największą wartość T_c otrzymano dla zlewni rzeki Sidzinka o wskaźnikach równych: CF = 0,20, CW = 0,51 i CK = 0,41. Współczynnik kształtu zlewni są w ścisłym związku z długością zlewni, więc podobna jest ich relacja z czasem koncentracji. Na podstawie przeprowadzonych badań w zlewniach rzeki Sidzinki, potoku Łęgówka i Rozrywka nie stwierdzono znaczącego wpływu spadku zlewni na wartość czasu koncentracji. Wielkości średnich spadków zlewni wyniosły 6,0% dla zlewni potoku Rozrywka, 4,1% dla Sidzinki i 1,5% dla Łęgówki. Są to wielkości zbliżone, znajdujące się w tej samej dymensji, dlatego ich wpływ na szacowanie czasu koncentracji nie odegrał znaczącej roli. Użytkowanie zlewni zostało wyrażone przez średni ważony bezwymiarowy współczynnik CN. Przyjmuje on wartości od 1 do 100, przy czym im wyższa jego wartość tym mniejsza zdolność zlewni do retencji wód opadowych. Bezwymiarowy parametr CN dla zlewni rzeki Sidzinka ma wartość równą 75,6, dla zlewni potoku Rozrywka 82,2, a najwyższa występuje dla zlewni rzeki Łęgówka – 83,6. Analizując wartości parametru CN i T_c można stwierdzić, iż użytkowanie zlewni wpływa na kształtowanie się czasu koncentracji. Wraz ze wzrostem parametru CN, maleje czas koncentracji. Wzrost parametru CN wpływa na zmniejszenie strat opadu całkowitego (infiltracja, retencja terenowa) i wzrost opadu efektywnego, a w konsekwencji powoduje szybszą reakcję zlewni na występujący epizod opadowy w wyniku zmniejszenia czasu koncentracji. Wartości czasu koncentracji dla zlewni rzeki Sidzinki i potoku Rozrywka są zbliżone do siebie, pomimo różnych procentowych udziałów powierzchni uszczelnionych: odpowiednio 7,2% dla Sidzinki i 50,5% dla zlewni Rozrywki. W celu

znalezienia prawidłowości wyników czasów koncentracji w zlewniach rzeki Sidzinka i potoku Rozrywka zbadano rozmieszczenie terenów uszczelnionych i ich potencjalny wpływ na kształtowanie się odpływu powierzchniowego (rys. 4 i 5).



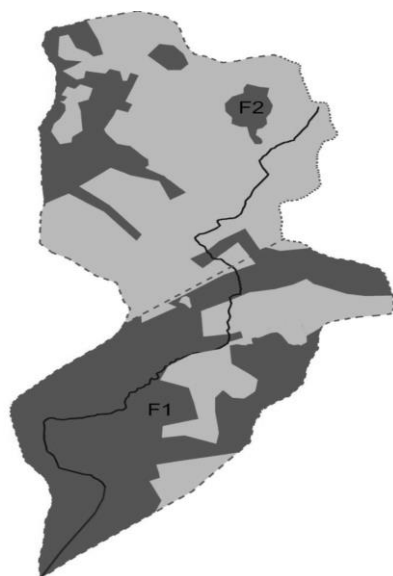
Rys. 4. Rozmieszczenie terenów uszczelnionych (ciemno szare powierzchnie) na obszarze zlewni rzeki Sidzinka

Fig. 4. Distribution of sealed areas (dark gray areas) in Sidzinka's River catchment

W zlewni Sidzinki 83% wszystkich powierzchni uszczelnionych znajduje się z w obrębie źródłowego i środkowego fragmentu zlewni, natomiast w zlewni potoku Rozrywka 72% całkowitego stopnia uszczelnienia przypada na dolną część zlewni. Podział zlewni na obszar źródłowo-środkowy i ujściowy oraz analiza procentowych udziałów uszczelnienia na terenie zlewni wykazuje istotny wpływ rozmieszczenia powierzchni uszczelnieniach na kształtowanie się wartości czasu koncentracji. Całkowity 50,5%-owy udział powierzchni uszczelnionej w zlewni potoku Rozrywka jest bilansowany rolniczym użytkowaniem i niskim udziałem uszczelnienia w źródłowym i środkowym obszarze zlewni. Takie rozmieszczenie użytkowania wpływa na spowolnienie odpływu i wydłużenie czasu koncentracji. Dla kontrastu, w zlewni Sidzinki na końcowy wynik czasu koncentracji znaczący wpływ ma wysoki procentowy udział powierzchni uszczelnionej w początkowym i środkowym odcinku ciek, który zwiększa odpływ i zmniejsza wartość czasu koncentracji.

Czas koncentracji jest także uzależniony od charakterystyki opadu. Metody: Kerby-Kirpich'a, NRCS Lag, Simas-Hawkins'a i Haktanir-Sezan'a, dla których otrzymano najwyższe wartości T_c uzależnione są wyłącznie od charakterystyki drogi spływu, natomiast w procedurze TR55 i modelu NRCS, dla których otrzymano najniższe wartości T_c , dodatkowym parametrem wejściowym jest natężenie deszczu. W celu sprawdzenia zależności czasu koncentracji od charakterystyki opadu określono wpływ natężenia deszczu

o prawdopodobieństwie przewyższenia 1%, 2%, 5%, 10%, 20% i 50% na wartości spływu stokowego – tab. 4.



Rys. 5. Rozmieszczenie terenów uszczelnionych (ciemno szare powierzchnie) na obszarze zlewni potoku Rozrywka

Fig. 5. Distribution of sealed areas (dark gray areas) in Rozrywka's Stream catchment

Tabela 4. Wpływ prawdopodobieństwa przewyższenia opadu na wartość spływu stokowego w zlewni rzeki Sidzinka i potoku Łęgówka

Table 4. The influence of probability of precipitation on the value of slope runoff in Sidzinka's River and Łęgówka's Stream catchments

Zlewnia	Czas spływu stokowego t_{stok} [min] w zależności od prawdopodobieństwa przeływu [%]					
	1	2	5	10	20	50
Prawdopodobieństwo przewyższenia [%]						
Sidzinka	1,89	1,92	1,97	2,00	2,08	2,26
Łęgówka	1,94	1,97	2,01	2,06	2,15	2,33

Wraz ze wzrostem prawdopodobieństwa przewyższenia, a zarazem zmniejszaniem natężenia opadu, wzrasta czas spływu. Przy dużych natężeniach, jakie ma miejsce przy opadach o niewielkiej częstotliwości, w krótkim okresie czasu na powierzchnię zlewni dociera duża ilość wody, która ma ograniczone możliwo-

ści retencji i infiltracji. Powoduje to w rezultacie szybki odpływ wody Według Shaw i in. [15] w przypadku opadów o bardzo małym prawdopodobieństwie, z uwagi na duże natężenie deszczu, zanika różnica w czasie reakcji zlewni o odmiennym stopniu uszczelniania. Jest to także widoczne w przypadku analizowanych zlewni, gdzie mniejsze różnice w czasie spływu są obserwowane w obu zlewniach (o różnym zagospodarowaniu) w przypadku deszczy o prawdopodobieństwie przewyższenia 1 do 5% (średnia różnica w t_{stok} pomiędzy zlewniami wynosi 0,047 h) w stosunku do opadów czasów spływu dla deszczy o prawdopodobieństwie 10 do 50% (średnia różnica w t_{stok} pomiędzy zlewniami wynosi 0,067 h). Z analizy danych w tabeli 4 pośrednio wynika jeszcze jeden wniosek. Mianowicie znaczne różnice między czasem spływu stokowego między metodą NRCS i TR55 wynikają z tego, iż w metodzie TR55 wprowadza się opad o czasie trwania 24 godz. i prawdopodobieństwie 50%, natomiast w metodzie NRCS czas spływu ustalany jest metodą przybliżeń. Z uwagi na fakt, iż w metodzie TR55 konieczne jest ustalenie kształtu bezwymiarowego hietogramu opadu ważnego dla obszaru USA [19], w obecnym stanie wiedzy ta procedura nie powinna być stosowana w Polsce z uwagi na możliwy odmienny przebieg opadów.

Dla całościowej oceny wpływu czasu koncentracji na charakterystykę odpływu, w tab. 5 zestawiono wyniki symulacji odpływu bezpośredniego z analizowanych zlewni dla różnych czasów koncentracji i prawdopodobieństwa przewyższenia opadów wynoszącego 50%.

Tabela 5. Wpływ czasu koncentracji na wielkość przepływu w kulminacji

Table 5. The influence of time of concentration on the peak discharge value.

Zlewnia	Metoda Tc/ Q_{max}	Kerby- Kirpich	TR55	NRC S	Ker- by- NRCS	Hekta- nir- Sezan	Simas- Haw- king	NRCS -Lag
Sidzinka	Tc [h]	3,59	2,04	1,99	2,10	2,72	2,63	4,31
	Q_{max} [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	2,36	3,19	3,20	2,92	2,59	2,65	2,03
Łęgówka	Tc [h]	3,34	1,39	1,34	1,51	1,66	2,82	3,42
	Q_{max} [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	16,20	26,45	26,85	27,42	25,24	18,05	15,86
Rozyw- ka	Tc [h]	3,08	2,03	1,99	2,14	2,72	2,56	2,89
	Q_{max} [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	16,38	22,50	22,79	20,64	18,12	18,98	17,19

Wyższe wartości czasu koncentracji generowały mniejsze wartości odpływu. Wnika to z faktu, iż w przypadku zlewni o większej zdolności retencyjnej, o długiej drodze spływu jej reakcja na opad jest wolniejsza (większy czas koncentracji), co przejawia się na w mniejszych wartościach przepływów maksymalnych. Różnice w wysokościach przepływu w kulminacji między największą a najmniejszą wartością kształtowały na poziomie 42% dla zlewni Łęgówki, 36% dla zlewni potoku Sidzinka i 28% dla zlewni potoku Rozrywka.

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz sformułowano następujące wnioski:

- wartość czasu koncentracji jest charakterystyczna dla danej zlewni i zależy od zastosowanej metody obliczeniowej,
- największe wartości czasu koncentracji otrzymano dla metod Kerby – Kirpich'a i NRCS Lag, które uwzględniają wyłącznie charakterystykę drogi spływu,
- wzrastający udział powierzchni uszczelnionych zmniejsza wartości czasu koncentracji i zwiększa wartości przepływów maksymalnych,
- rozmieszczenie terenów uszczelnionych istotnie wpływa na wartość czasu koncentracji i kształtowanie fali wezbraniowej; wzrastający udział powierzchni uszczelnionej w obszarze źródłowym i środkowym zlewni odpowiada za krótszy czas spływu, a przez to mniejsze przepływy w kulminacji,
- na wartości czasu koncentracji wpływają zarówno długość drogi spływu, kształt zlewni oraz natężenie deszczu,
- ze względu na bezpieczeństwo projektowania obiektów do odprowadzania wód opadowych i ochrony przeciwpowodziowej w obliczeniach czasu koncentracji powinno się wykorzystywać metody uwzględniające warunki hydrauliczne formowania się odpływu i charakterystyki opadów deszczu.

Literatura

- [1] Application of Hydrologic Methods in Maryland. State Highway Administration 2005.
- [2] Barszcz M., Banasik K., Tönsmann F.: Estimation of lag times of rainfall events for three small river basins. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Environmental Development*, 9 (2), 2006.
- [3] Bogdanowicz E., Stachy J.: Maksymalne opady deszczu w Polsce. Charakterystyki projektowe. *Materiały Badawcze, seria: Hydrologia i Oceanologia* 23, 1998, IMGW, Warszawa.

- [4] Bondelid, T. R., McCuen, R. H., Jackson, T. J.: Sensitivity of SCS models to curve number variation. *Water Resour. Bull.*, 20 (2), 1982, s. 337–349.
- [5] Byczkowski A.: *Hydrologia*, t. II, Wyd. SGGW Warszawa, 1996.
- [6] DVWK Niederschlag – Starkegenauswertung nach Wiederkehrzeit und Dauer. Regeln 124, Verlag Paul Parey, 1985, Hamburg.
- [7] Fang X., Thompson D. B., Cleveland T. G., Pradhan P., Malla R.: Time of Concentration Estimated Using Watershed Parameters Determined by Automated and Manual Methods. *J. of Irrigation and Drainage Engineering* 3-4, 2007, s. 202-211.
- [8] Green J. I., Nelson E. J.: Calculation of time of concentration for hydrologic design and analysis using geographic information system vector objects. *J. of Hydroinformatics* 04.2, 2002, s. 75-81.
- [9] Haktanir, T., Sezen, N.: Suitability of two-parameter gamma and three-parameter beta distributions as synthetic unit hydrographs in Anatolia. *Hydrol. Sci. J.*, 35(2), 1990, s. 167–184.
- [10] Kotowski A., Kazimierzak B., Dancewicz A.: *Modelowanie opadów do wymiarowania kanalizacji*. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, 2010, Warszawa.
- [11] Maidment D.V.: *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill, 1993.
- [12] *National Engineering Handbook Hydrology*. Part 630. National Resources Conservation Service, 1997.
- [13] Roussel M. C., Thompson D. B., Fang X., Cleveland T. G., Garcia C. A.: *Time-Parameter Estimation For Applicable Texas Watersheds*. Research Report 0-4696-2. 2005, Lamar University.
- [14] SCS (Soil Conservation Service). *National Engineering Handbook, Section 4*, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., 1972.
- [15] Shaw E. M., Beven K. J., Chappel N. A., Lamb R.: *Hydrology in practice*. Fourth Edition. Spon Press, London and New York, 2011.
- [16] Simas, M. J., Hawkins, R. H.: Lag time characteristics in small watersheds in the United States. *Proc., 2nd Federal Interagency Hydrologic Modeling Conf.*, Las Vegas. 2002.
- [17] Soczyńska U.: *Hydrologia dynamiczna*. Red. Wyd. PWN Warszawa, 1997.
- [18] *Urban drainage design manual*. Hydraulic Engineering Circular 22, wyd. 2, Amerykański Departament Transportu, 2001.
- [19] *Urban Hydrology for Small Watershed*. TR55. 1986. USDA.
- [20] Weinerowska-Borys K.: Czas koncentracji w uproszczonych obliczeniach odpływu ze zlewni zurbanizowanych. [W:] *Hydrologia w inżynierii i gospodarce wodnej*. T. 1. Redakcja Benjamin Więzik. *Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN*, vol. 68, 2010, Warszawa, s. 367-377.

THE INFLUENCE OF PHYSICAL AND GEOGRAPHICAL CATCHMENT PARAMETERS AND PRECIPITATION CHARACTERISTICS ON THE RUNOFF TIME OF CONCENTRATION

Summary

The aim of this paper is to estimate the influence of physical and geographical catchment parameters as well as precipitation characteristics of the runoff time of concentration for a different catchment use. The analyses were carried out in the catchment of Sidzinka River and Łęgówka Stream, located in Kraków and Rozrywka Stream (Sudół Dominikański), which catchment lies in the area of municipalities Zielonki and Kraków. In the Sidzinka catchment cultivated areas are main cover, in the Łęgówka and Sudół Dominikański stream dominated urban areas. Time of concentration was calculated with use following methods: a) segments methods: Kerby-Kirpich, NRCS, TR55 procedure, Kerby-NRCS and b) "lag" methods: Haktanir-Sezen, Simas-Hawking and NRCS-Lag methods. Cross section measurements and analyze of topographic maps and ortho foto maps and precipitation intensity for different time duration and frequency was base for calculation of time of concentration. The calculations showed that concentration's time value is specific for the given catchment and depends on calculation's method. The highest concentration's time values were obtained for Kerby – Kirpich's and NRCS Lag methods, which take into consideration only characteristic of runoff's road. It was also proved, that precipitation has a significant influence on the time of concentration value – an increase of probability of rain exceedance reduces its strength and increases the value of time of concentration. Distribution of sealed areas in catchment is important factor influencing on time of concentration. The increasing share of the sealed area in the source area and the central basin is responsible for the shorter runoff, and thus lower peak discharge.

Key words: time of concentration, segment methods, urban watershed

DOI: 10.7862/rb.2013.44

Przesłano do redakcji w lipcu 2013 r.

Przyjęto do druku we wrześniu 2013 r.