

Katarzyna WACHULEC, Andrzej WAŁĘGA, Dariusz MŁYŃSKI

Katedra Inżynierii Sanitarnej i Gospodarki Wodnej, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Department of Sanitary Engineering and Water Management, University of Agriculture
in Krakow

Wpływ czasu koncentracji i charakterystyk opadu na kształtowanie się hydrogramu odpływu w małej zlewni niekontrolowanej

The effect of time of concentration and rainfall characteristics on runoff hydrograph in small ungauged catchment

Słowa kluczowe: zlewnia niekontrolowana, czas koncentracji, użytkowanie terenu, model SCS-UH, HEC-HMS

Key words: ungauged catchment, time of concentration, land use, SCS-UH model, HEC-HMS

Wprowadzenie

Jednym z najczęściej spotykanych problemów w hydrologii inżynierskiej jest kwestia pozyskiwania informacji dotyczących wielkości przepływów maksymalnych w zlewniach niekontrolowanych. Wiąże się to z przeprowadzeniem wielu analiz, których wyniki stanowią podstawę obliczeń inżynierskich dotyczących wymiarowania obiektów czy też wyznaczania stref zagrożenia powodziowego (Byczkowski, 1996). Ważnym aspektem jest także potrzeba

monitorowania ekstremalnych zjawisk pogodowych powodujących lokalne podtopienia, a w ostateczności także powodzie. W ostatnich latach obserwuje się znaczne nasilenie tego typu zjawisk (szczególnie w zlewniach zurbanizowanych), które powodują zniszczenia w infrastrukturze i krajobrazie zlewni. W celu wyznaczania kwantyli przepływów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia w zlewniach niekontrolowanych opracowano wiele metod do szacowania ich wielkości (Banasik i in., 2004).

Na obszarze zurbanizowanym na skutek ciągłego zwiększania się powierzchni uszczelnionych obserwuje się ograniczenie wsiąkania wód opadowych, a tym samym zjawisko zwiększania się spływu. Obszarowa zmienność odpływu znacznie wpływa na wyzna-

czenie wartości przepływu w kulminacji. Oprócz wyznaczenia wielkości przepływu w kulminacji bardzo ważnym aspektem w obliczeniach jest określenie czasu reakcji zlewni (zwłaszcza w tych o znacznym stopniu uszczelnienia) na występujący epizod opadowy. Czas reakcji zlewni na opad najczęściej opisywany jest przez czas koncentracji – T_c (Wałęga i in., 2013).

Istotną kwestią jest charakterystyka użytkowania zlewni (zwłaszcza w kontekście modelowania hydrologicznego), którego określenie dostępnymi metodami pozyskiwania informacji może stanowić pewną trudność i wpływać na uzyskiwane wyniki. Problemem pozostaje także ograniczony dostęp lub brak informacji z baz danych opadowych lub kłopoty z dopasowaniem wzorów empirycznych do warunków lokalnych. Brak danych opadowych wymusza także na projektantach zakładanie kształtu oraz czasu trwania hietogramu opadów. Badania nad reakcją zlewni na założony rozkład opadu w czasie prowadzone były między innymi w USA

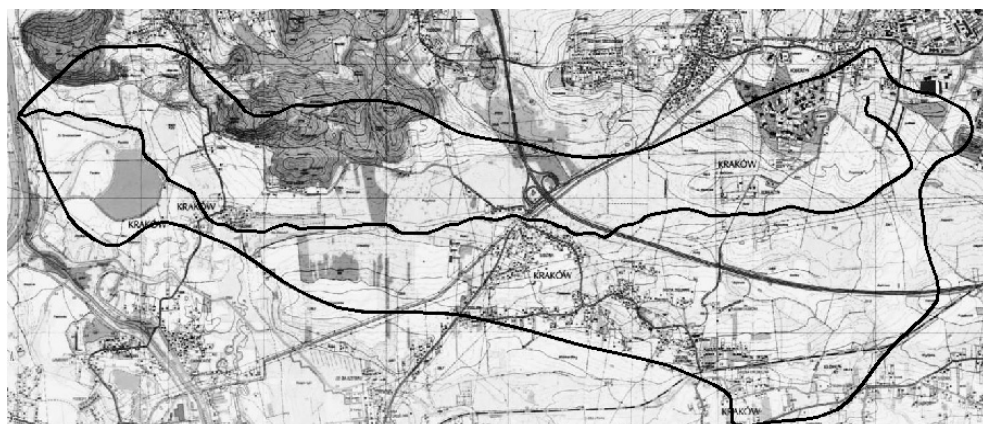
w stanie Illinois (Huff, 1990) oraz w Kanadzie na terenie Ontario (Prodanovic i Simonovic, 2004)

Celem artykułu jest ocena wpływu wyboru metody obliczania czasu koncentracji i charakterystyk opadu na kształt hydrogramu odpływu na przykładzie zlewni rzeki Sidzinki.

Charakterystyka obszaru badań

Przedmiotem badań została objęta zlewnia rzeki Sidzinki. Jest to rzeka II rzędu, uchodząca do Wisły między Tyńcem a ujściem Skawinki na wysokości 201,9 m n.p.m. Jej zlewnia w większości znajduje się na terenie gminy miejskiej Kraków (rys. 1).

Powierzchnia zlewni wynosi 11,796 km², a długość cieków wynosi 8,54 km. Źródła Sidzinki wypływają na terenie południowo-zachodniej części Krakowa, na wysokości 246 m n.p.m. Średni spadek całej zlewni wynosi 0,84%. Zlewnia należy do makroregionu Bramy Krakowskiej i mezoregionu Pomost Krakowski, położona jest na obszarze



RYSUNEK 1. Zlewnia rzeki Sidzinka (www.geoportal.gov.pl)

FIGURE 1. Catchment of Sidzinka river (www.geoportal.gov.pl)

Zapadliska Karpackiego. W podłożu zlewni znajdują się osady trzecio- i czwartorzędowe, występujące jako osady rzeczno-lodowcowe, sypkie oraz spiste. Obszar zlewni znajduje się głównie w zasięgu gleb brunatnych lub brunatnych oglejonych wytworzonych z ilów mioceńskich, a w dnie doliny dominują piaski słabogliniaste (Prognoza oddziaływania..., 2010). Według Wosia (1996) badany obszar należy do strefy klimatycznej śląsko-krakowskiej. Średnia roczna temperatura waha się między 8,1 a 8,5°C, a średnie roczne sumy opadów wynoszą 420–900 mm (Senisson, 2005). Pod względem użytkowania dominują tereny rolnicze stanowiące 50% całkowitej powierzchni. Pozostałą część stanowią pastwiska – 25%, lasy – 16%, tereny zabudowane – 7% oraz wody stojące – 2%. Na terenie zlewni znajduje się stary system melioracyjny, który z powodu braku konserwacji nie spełnia swojej funkcji, powodując podtopienia obszarów przyległych w okresach roztopowych i deszczowych. Zlewnia Sidzinki położona jest na obszarze „Tyniec – Węzeł Sidzina”, który został objęty miejskim planem zagospodarowania przestrzennego i tym samym ochroną przeciwpowodziową.

Metodyka badań

Ze względu na to, że Sidzinka jest zlewnią niekontrolowaną do określenia hydrogramu odpływu wykorzystano model opad – odpływ (w tym przypadku model SCS-UH).

Z powodu braku stacji opadowych na obszarze zlewni procedurę obliczeniową rozpoczęto od obliczenia wysokości maksymalnego opadu rocznego

o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia. Na potrzeby tego artykułu określono go, kształtując metodę Bogdanowicza i Stachego (1998). Wysokość opadu maksymalnego rocznego obliczono dla prawdopodobieństwa przewyższenia (p) wynoszącego 1 i 50%. Na wielkość przepływów maksymalnych, oprócz sumy i czasu trwania opadów, duży wpływ ma rozkład ich natężenia. W trakcie obliczeń wykorzystano cztery rozkłady natężenia deszczu dla czasów trwania równych czasem koncentracji. Założono rozkład blokowy (najczęściej przyjmowany przez projektantów systemu odwodnienia, zakłada stałe natężenie opadu w poszczególnych krokach czasowych) oraz o maksymalnym natężeniu występującym na początku, w środku i na końcu epizodu opadowego. W przypadku hietogramu o maksymalnym natężeniu na początku epizodu przyjęto, że występuje ono w czasie wynoszącym 25% czasu trwania opadu, w przypadku hietogramu o maksymalnym natężeniu w środku epizodu założono, że występuje ono w czasie wynoszącym 50% czasu trwania opadu, z kolei dla hietogramu o maksymalnym natężeniu na końcu epizodu założono, że występuje ono w czasie wynoszącym 75% czasu trwania opadu. Pozostałe natężenia określono na podstawie wartości z krzywej natężenie – czas – trwania – prawdopodobieństwo według procedury podawanej przez Chowa i innych (1988).

Kolejnym krokiem było wyznaczenie czas koncentracji. Został on obliczony empirycznie, dwoma metodami należącymi do grupy metod typu segmentowego: Kerby’ego-Kirpicha oraz procedurą TR-55. Według Chowa i innych (1988)

całkowity czas, w jakim kropla wody pokona odległość z najdalszego punktu w zlewni do badanego przekroju, składa się z trzech etapów i są one składowymi metody segmentowej. Są to: spływ powierzchniowy, spływ skoncentrowany oraz przepływ ciekim/korytem. Metoda Kerby'ego-Kirpicha służy do kompleksowego szacowania czasu koncentracji i stosuje się ją dla zlewni o powierzchni od około 0,5 do 400 km² oraz przy długości cieków od 1,5 do 200 km (Roussel i in., 2005). Całkowity czas koncentracji (T_c) składa się z czasu spływu powierzchniowego i skoncentrowanego (1) oraz czasu spływu korytem (2).

$$t_s = \frac{1,44 \cdot (L \cdot n)^{0,457}}{S^{0,234}} \quad (1)$$

gdzie:

t_s – czas spływu powierzchniowego (min),

L – długość drogi spływu (m),

n – współczynnik szorstkości powierzchni spływu według Manninga ($s \cdot m^{-1/3}$),

S – spadek drogi spływu (-).

$$t_{sk} = 0,0195 \cdot L^{0,77} \cdot s^{-0,385} \quad (2)$$

gdzie:

t_{sk} – prędkość spływu korytem (min),

L – długość koryta (m),

s – spadek koryta (-).

Procedura TR-55 została opracowana w Departamencie Rolnictwa Stanów Zjednoczonych (USCA). Służy ona do obliczania między innymi czasu koncentracji oraz odpływu z małych zlewni, a w szczególności ze zlewni zurbanizowanych. Spływ skoncentrowany oraz w ciekach obliczany jest zgodnie z metodą NRSC (Brown i in., 2001). Wzór (3) do

obliczenia czasu spływu powierzchniowego (U.S. Department of Agriculture, 1986) należy uwzględnić podczas szacowania T_c , jeżeli na powierzchni terenu występuje płytki, jednolity przepływ wywołany opadem efektywnym trwającym 24 h.

$$t_{s1} = \frac{0,007 \cdot (L \cdot n)^{0,8}}{P^{0,5} \cdot S^{0,4}} \quad (3)$$

gdzie:

t_{s1} – czas spływu powierzchniowego (h),

L – długość drogi spływu (m),

S – spadek drogi spływu (-),

P – natężenie deszczu o prawdopodobieństwie przewyższenia $p = 50\%$ i czasie trwania 24 h.

W trakcie badań terenowych, wykonanych w korycie rzeki Sidzinka, przeprowadzono pomiary geodezyjne przekrojów poprzecznych koryta, co umożliwiło określenie wartości pola powierzchni oraz obwodu zwilżonego. Ponadto określono uśredniony współczynnik szorstkości, potrzebny do obliczenia czasu koncentracji za pomocą procedury TR-55.

Kluczowym zagadnieniem w określeniu hydrogramów odpływu jest oszacowanie wysokości opadu efektywnego. Charakterystykę tę obliczono za pomocą metody SCS-CN (4). W tym celu wyznaczono wartość parametru CN (ang. curve number), którego wielkość zależy od użytkowania zlewni, uwilgotnienia i rodzaju gleby oraz warunków hydrologicznych. Wartości parametru CN określono na podstawie bazy Corine Land Cover 2003 (dalej CLC) oraz przy wykorzystaniu ortofotomap (dane na 2009 rok) w skali 1 : 5000. Dodatkowo na podsta-

wie map glebowych Instytutu Upraw i Nawożenia w Puławach określono gatunek gleb oraz przypisano go do odpowiedniej grupy glebowej. Przyjęto normalny poziom uwilgotnienia w zlewni. Kolejnym krokiem było określenie opadu efektywnego:

$$H_e(t) = \begin{cases} \frac{[P(t) - 0,2S]^2}{P(t) + 0,8S} & \text{dla } P_t > 0,2S \\ 0 & \text{dla } P_t \leq 0,2S \end{cases} \quad (4)$$

gdzie:

H_e – opad efektywny (mm),

S – maksymalna potencjalna retencja zlewni (mm),

$P(t)$ – skumulowany opad całkowity (mm).

Według równania (4) opad efektywny występuje w momencie kiedy wyczerpane zostaną straty początkowe, dane warunkiem $0,2S$. Transformację opadu efektywnego w odpływ bezpośredni przeprowadzono za pomocą modelu opad – odpływ SCS-UH dla deszczy o różnym czasie trwania. Model SCS-UH zaliczany jest do grupy metod fali jednostkowej. Wielkość fali w kulminacji (q_p) obliczana jest jako:

$$q_p = \frac{c \cdot A \cdot PE}{t_p} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (5)$$

$$t_p = \frac{D}{2} + T_{\text{lag}} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (6)$$

$$T_{\text{lag}} = 0,6 \cdot T_c \text{ min} \quad (7)$$

gdzie:

A – powierzchnia zlewni (km^2),

c – parametr ($c = 2,08$),

PE – jednostkowy opad efektywny o wysokości 1 mm,

t_p – czas wznoszenia się fali kulminacyjnej (h),

D – czas trwania opadu efektywnego (h),

T_{lag} – czas opóźnienia (h),

T_c – czas koncentracji (h).

Obliczenia przeprowadzono za pomocą programu HEC-HMS 4.0.

Wyniki i dyskusja

Zgodnie z wytycznymi programu TR-55 konieczne było określenie elementów wejściowych opisujących charakter takich czynników, jak: opad maksymalny dla czasu $t = 24$ h, użytkowanie zlewni, długość cieku, współczynnik szorstkości koryta, wymiary przekroju poprzecznego koryta. Opady maksymalne o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia obliczono wyznaczono dla czasu trwania równego 24 h. Do dalszych obliczeń wykorzystano $P_{\text{max}1\%} = 93,4$ mm.

Kolejnym etapem było wyznaczenie bezwymiarowego parametru CN . Parametr ten został określony jako średnia ważona pola powierzchni obszaru jednorodnego pod względem wielkości parametru CN i odpowiadającej mu grupie glebowej. Korzystając z dwóch rodzajów podkładów mapowych, tj. ortofotomapy oraz bazy Corine Land Cover, otrzymano odpowiednio $CN_{\text{orto}} = 75,6$ i $CN_{\text{CLC}} = 71,2$. Różnica ta wynika z dokładności wyznaczenia poszczególnych form zagospodarowania terenu. Mniej czasochłonna okazała się baza Corine Land Cover. Do podobnych wniosków doszli Borowicz i inni (2011), którzy analizowali wpływ metody pozyskiwania informacji o użytkowaniu terenu na wartość opadu efektywnego w zlewni rzeki Białej. Współczynniki nieprzepuszczalności

(P_{imperv}), będący procentowym udziałem powierzchni nieprzepuszczalnych na obszarze zlewni, obliczony na podstawie ortofomapy wyniósł 7,2%, a 6,02% dla podkładu Corine Land Cover. Czas koncentracji określony za pomocą procedury TR-55 wyniósł 2,035 h. Obliczenia czasu koncentracji metodą Kerby'ego-Kirpicha wykonano zgodnie z wzorami (1) i (2). W tym przypadku wyniósł on 3,59 h.

Transformację opadu efektywnego w odpływ bezpośredni przeprowadzono przy użyciu modelu SCS-UH za pomocą programu HEC-HMS 4.0. Wykonano symulacje dla czasów trwania deszczu równym czasom koncentracji obliczonych według opisanych wcześniej metod. Wykorzystano także dwie wartości parametru CN : CN_{orto} oraz CN_{CLC} . Wyniki zestawiono w tabeli.

Wyniki obliczeń wykazują zróżnicowanie wartości zarówno przepływów w kulminacji, jak i wysokości oraz objętości odpływu w zależności od wykorzystanego wzoru na czas koncentracji. Różnica między najmniejszą i największą wartością przepływu w kulminacji wyniosła 54%, a wysokości warstwy odpływu – 38%. Większe wartości otrzymano przy wykorzystaniu czasu koncentracji obliczonego według formuły TR-55 niż dla metody Kerby'ego-Kirpicha. Najwyższa wartość przepływu w kulminacji wynosiła $28,46 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (dla CN_{CLC} , przy założonym maksymalnym natężeniu opadu na końcu hietogramu, $T_c = 2,035 \text{ h}$), najmniejsza zaś wyniosła $13,04 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (dla CN_{CLC} , przy założonym opadzie blokowym, $T_c = 3,59 \text{ h}$). Podobne wyniki otrzymali Olivera i Stolpa (2003), którzy badali reakcję zlewni na założony kształt hietogramu i natężenie

deszczu. Największa wysokość warstwy odpływu wyniosła 18,75 mm (dla CN_{CLC} , przy założonym opadzie blokowym, $T_c = 3,59 \text{ h}$), najmniejsza zaś wyniosła 11,52 mm (dla CN_{CLC} , przy założonym maksymalnym opadzie na końcu czasu trwania hietogramu, $T_c = 2,035 \text{ h}$). Rozkład opadów miał wpływ tylko na wartości przepływu w kulminacji, w większości przypadków nie wpłynął on na wysokość odpływu. Najszybciej zaobserwowano kulminację, kiedy maksymalne natężenie deszczu wystąpiło na początku trwania hietogramu. W przypadku czasu koncentracji obliczonego procedurą TR-55 maksymalną wartość przepływu osiągnięto po 2,25 h, dla t_c otrzymanego wzorem Kerby'ego-Kirpicha – 3,15 h. Najpóźniej kulminację zaobserwowano w przypadku natężenia deszczu występującego na końcu hietogramu oraz przy wystąpieniu opadu blokowego. Na podstawie wyników uzyskanych za pomocą programu HEC-HMS 4.0 wykreślono hydrogramy odpływu bezpośredniego dla zlewni rzeki Sidzinki (rys. 2).

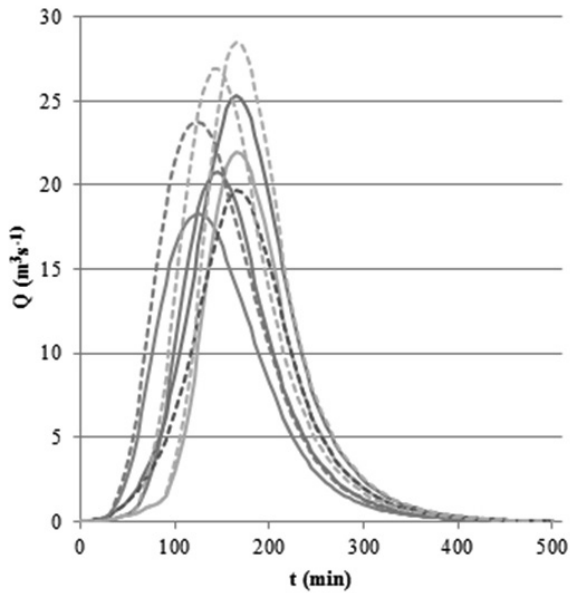
Na podstawie wyników przedstawionych w tabeli oraz na rysunku 2 można zauważyć, że mimo iż różnica pomiędzy wartościami parametru CN wyniosła tylko 6%, znacznie wpłynęło to na wartości przepływów w kulminacji. Oznacza to, że sposób pozyskania informacji o zagospodarowaniu terenu może mieć kluczowe znaczenie w przypadku modelowania hydrologicznego. Nowicka i Wolska (2003) uzyskały podobne rezultaty, badając wpływ zmiany wielkości parametru CN na kształt hydrogramu w zlewni rzeki Skory. Inne badania wykazały (Wałęga i in., 2011, 2012) wrażliwość modeli hydrologicznych typu opad – odpływ na zmiany war-

TABELA. Zestawienie wielkości: przepływów w kulminacji, czasu do wystąpienia kulminacji oraz wysokości i objętości odpływu bezpośredniego dla czasów trwania opadu równym czasom koncentracji obliczonych (opracowanie własne)

TABLE. Comparison of values of: peak flows, time to peak flow and high and volume of direct flow for rainfall duration equal the times of concentrations (own elaboration)

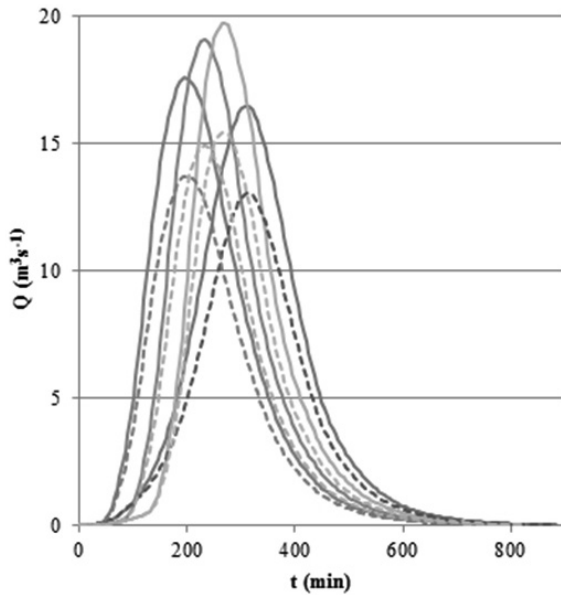
| Opad blokowy/Block rainfall | | | | | | | | |
|---|---|----------------------------------|-------------|-----------------------------|--------------------------------------|------------------------------|-------------|-----------------------------|
| CN | czas koncentracji/time of concentration | | | | | | | |
| | TR55 | | | | Kerby-Kirpich | | | |
| | Q_{\max} ($m^3 \cdot s^{-1}$) | czas do kulminacji (h:min) | Q (mm) | Q ($10^3 \cdot m^3$) | Q_{\max} ($m^3 \cdot s^{-1}$) | czas do kulminacji (h) | Q (mm) | Q ($10^3 \cdot m^3$) |
| Ortofotomapa Orthophotomap (CN = 75,6) | 25,3 | 02:45 | 16,19 | 181,38 | 16,47 | 05:10 | 18,75 | 210,02 |
| CLC (CN = 71,2) | 19,65 | 02:45 | 13,22 | 148,09 | 13,04 | 05:10 | 14,22 | 159,28 |
| Maksymalne natężenie opadu na początku hietogramu/Front-loaded hyetograph | | | | | | | | |
| CN | czas koncentracji/time of concentration | | | | | | | |
| | TR55 | | | | Kerby-Kirpich | | | |
| | Q_{\max} ($m^3 \cdot s^{-1}$) | czas do kulminacji (h) | Q (mm) | Q ($10^3 \cdot m^3$) | Q_{\max} ($m^3 \cdot s^{-1}$) | czas do kulminacji (h) | Q (mm) | Q ($10^3 \cdot m^3$) |
| Ortofotomapa Orthophotomap (CN = 75,6) | 20,75 | 02:25 | 15,69 | 175,73 | 17,58 | 03:15 | 17,36 | 194,49 |
| CLC (CN=71,2) | 23,77 | 02:25 | 11,6 | 130,58 | 13,72 | 03:20 | 13,05 | 146,21 |
| Maksymalne natężenie opadu w środku hietogramu/Center-loaded hyetograph | | | | | | | | |
| CN | czas koncentracji/time of concentration | | | | | | | |
| | TR-55 | | | | Kerby-Kirpich | | | |
| | Q_{\max} ($m^3 \cdot s^{-1}$) | czas do kulminacji (h) | Q (mm) | Q ($10^3 \cdot m^3$) | Q_{\max} ($m^3 \cdot s^{-1}$) | czas do kulminacji (h) | Q (mm) | Q ($10^3 \cdot m^3$) |
| Ortofotomapa Orthophotomap (CN = 75,6) | 18,28 | 02:35 | 15,69 | 175,73 | 19,1 | 03:50 | 17,36 | 194,49 |
| CLC (CN = 71,2) | 26,94 | 02:35 | 11,6 | 130,58 | 14,94 | 03:50 | 13,05 | 146,21 |
| Maksymalne natężenie opadu na końcu hietogramu/Back-loaded hyetograph | | | | | | | | |
| CN | Czas koncentracji/time of concentration | | | | | | | |
| | TR-55 | | | | Kerby-Kirpich | | | |
| | Q_{\max} ($m^3 \cdot s^{-1}$) | czas do kulminacji (h) | Q (mm) | Q ($10^3 \cdot m^3$) | Q_{\max} ($m^3 \cdot s^{-1}$) | czas do kulminacji (h) | Q (mm) | Q ($10^3 \cdot m^3$) |
| Ortofotomapa Orthophotomap (CN = 75,6) | 21,93 | 02:50 | 15,52 | 173,84 | 19,73 | 04:45 | 17,36 | 194,49 |
| CLC (CN = 71,2) | 28,46 | 02:50 | 11,52 | 129 | 15,42 | 04:30 | 13,05 | 146,21 |

a



- opad blokowy, CNorto
- max natężenie opadu na początku hietogram u, CNorto
- max natężenie opadu w środku hietogram u, CNorto
- max natężenie opadu na końcu hietogramu, CNorto
- - - opad blokowy, CNcorine
- - - max natężenie opadu na początku hietogram u, CNcorine
- - - max natężenie opadu w środku hietogram u, CNcorine
- - - max natężenie opadu na końcu hierogram u, CNcorine

b



- opad blokowy, CNorto
- max natężenie opadu na początku hietogram u, CNorto
- max natężenie opadu w środku hietogram u, CNorto
- max natężenie opadu na końcu hietogramu, CNorto
- - - opad blokowy, CNcorine
- - - max natężenie opadu na początku hietogram u, CNcorine
- - - max natężenie opadu w środku hietogram u, CNcorine
- - - max natężenie opadu na końcu hierogram u, CNcorine

RYSUNEK 2. Hydrogram odpływu bezpośredniego dla zlewni rzeki Sidzinki: (a) T_{CTR-55} , (b) $T_{cKerby-Kirpich}$ (opracowanie własne)

FIGURE 2. The runoff hydrograph for Sidzinka river catchment: (a) T_{CTR-55} , (b) $T_{cKerby-Kirpich}$ (own elaboration)

tości parametru *CN*. Zmiana wartości tego parametru wynikająca ze zmiany warunków wilgotnościowych w zlewni przekłada się na zasięg strefy zalewowej (w zależności od wartości *CN* zasięg strefy może wzrosnąć do 20% w zlewniach górskich).

Wnioski

Na podstawie analiz przeprowadzonych w zlewni rzeki Sidzinki określono wpływ wyboru metody obliczania czasu koncentracji i charakterystyk opadu na kształtowanie się hydrogramu odpływu. Transformacja opadu efektywnego w odpływ bezpośredni została wykonana za pomocą modelu SCS-UH w programie HEC-HMS 4.0. Na tej podstawie sformułowano następujące wnioski:

- Sposób pozyskania informacji dotyczących użytkowania terenu (w tym przypadku ortofotomapa i Corine Land Cover) wpływa na wartość parametru *CN*, a tym samym, na późniejszym etapie obliczeń, na wartość przepływu w kulminacji; ze względu na dokładność oraz czasochłonność w trakcie analizy podkładów mapowych, a także ze względu na aktualizację bazy bardziej wskazane jest korzystanie z serwisu CLC, przy jednoczesnym wspomaganie się informacjami z ortofotomapy.
- Im dłuższy czas koncentracji, tym wartość przepływu w kulminacji jest mniejsza, natomiast krótszy czas koncentracji zwiększa wartość przepływu w kulminacji; ze względu na podejście stosowane w procedurze TR-55, a konkretnie na wymagane szczegółowe informacje dotyczą-

ce charakterystyki zlewni, bardziej zasadne wydaje się wykorzystanie właśnie tej metody. Jest to jednak formuła opracowana dla obszaru Ameryki Północnej i dlatego też zasadne byłoby opracowanie podobnej metodyki dla obszaru Polski.

- Rozkład opadów ma wpływ na czas wystąpienia przepływu w kulminacji; obliczenia przeprowadzone dla zlewni rzeki Sidzinki potwierdziły, że najpóźniej osiągnięta kulminacja fali wezbraniowej następuje przy maksymalnym natężeniu opadu występującym na końcu hietogramu.

Literatura

- Banasik, K., Byczkowski, A. i Gładki, J. (2004). Przepływy maksymalne prawdopodobne dla małej rzeki nizinnej – porównanie metod. *Przegląd Naukowy, Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 29, 14-20.
- Bogdanowicz, E. i Stachy, J. (1998). Maksymalne opady deszczu w Polsce. Charakterystyki projektowe. *Materiały badawcze, Seria: Hydrologia i Oceanologia*, 23. Warszawa: Wydawnictwo IMGW.
- Borowicz, E., Kozak, M. i Madzia, M. (2011). Wpływ metody pozyskiwania informacji o zagospodarowaniu terenu na wartość wyznaczonego opadu efektywnego. *Nauka Przyroda Technologia, Dział Inżynieria Środowiska*, 5, 4, #65.
- Brown, S.A., Stein S.M. i Warner, J.C. (2001). *Urban Drainage Design Manual Hydraulic Engineering Circular 22*. Wyd. II. Report no. FHWA-NHI-01-021 HEC-22. Springfield, Virginia: National Technical Information Service. Pobrano z lokalizacji: <http://isddc.dot.gov/OLPFiles/FHWA/010593.pdf>.
- Byczkowski, A. (1996). *Hydrologia*. Tom 2. Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. i Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology*. New York, NY: McGraw-Hill.

- Huff, F.A. (1990). *Time distribution of heavy Rainstorms in Illinois. Champaign, Circular 173*. Illinois: Illinois State Water Survey.
- Nowicka, B. i Wolska, M. (2003). Wpływ retencji zlewni na formowanie kulminacji wierzbrań opadowych. W M.
- Olivera, F. i Stolpa, D. (2003). Effect of storm hyetograph duration and shape on the watershed response. *Proceedings of the 82nd Annual Meetin of the Transportation Research Board (TBR)*. Washington DC, USA: TBR.
- Prodanovic, P. i Simonovic, S.P. (2004). *Generation of synthetic design storms for the Upper Thames River basin. CFCAS project: Assessment of Water Resources Risk and Vulnerability to Changing Climatic Conditions*. Water Resources Research Report V, no. 049. Ontario, Canada: The University of Western Ontario.
- Prognoza oddziaływania na środowisko do projektu miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego obszaru „Kliny – Zachód II” w Krakowie*. (2010). Tarnów, Kraków: MGGP S.A.
- Senisson, J. (2005). *POŚ i stanowiący jego element Plan Gospodarki Śmieciami dla miasta Krakowa na lata 2008-2011*. Pobrano z lokalizacji: <https://www.bip.krakow.pl>.
- Roussel, C., Thompson, D., Fang, X., Cleveland, T. i Garcia, A. (2005). *Time parameter estimation for applicable Texas watersheds*. (Research Report 0-4696-2). Lamar, Texas: Lamar University.
- United States Department of Agriculture. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds, TR-55*. Washington, DC: USDA. Pobrano z lokalizacji: http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf
- Wałęga, A., Cupak, A., Michalec, B. i Wachulec K. (2013). Wpływ parametrów fizyczno-geograficznych zlewni i charakterystyk opadu na czas koncentracji odpływu. *Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury*, 60(3/13), 143-160.
- Wałęga, A., Cupak, A. i Miernik, W. (2011). Wpływ parametrów wejściowych na wielkość przepływów maksymalnych uzyskanych z modelu NRCS-UH. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 7, 85-95.
- Wałęga, A., Drożdżal, E., Piórecki, M. i Radoń, R. (2012). Wybrane problemy związane z modelowaniem odpływu ze zlewni niekontrolowanych w aspekcie projektowania stref zagrożenia powodziowego. *Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumiectus*, 11(3), 57-68.
- Woś, A. (1996). *Zarys klimatu Polski*. Wydanie III. Poznań: Wydawnictwo Naukowe UAM.

Streszczenie

Wpływ czasu koncentracji i charakterystyk opadu na kształtowanie się hydrogramu odpływu w małej zlewni niekontrolowanej. Celem artykułu była ocena wpływu czasu koncentracji i charakterystyk opadu na kształtowanie się hydrogramu odpływu w małej zlewni niekontrolowanej. Analizę przeprowadzono dla zlewni rzeki Sidzinka. Jej zlewnia w większości znajduje się na terenie gminy miejskiej Kraków. Czas koncentracji obliczono dwoma metodami: Kerby’ego-Kirpicha oraz procedurą TR-55. Wielkość opadu efektywnego obliczono za pomocą metody SCS-CN. Wartości parametru CN określono na podstawie bazy Corine Land Cover 2003 oraz przy wykorzystaniu ortofotomap. W trakcie obliczeń wykorzystano cztery rozkłady natężenia deszczu dla czasów trwania równych czasom koncentracji. Założono rozkład blokowy oraz rozkład o maksymalnym natężeniu występującym na początku, w środku i na końcu epizodu opadowego. Obliczenia przeprowadzono za pomocą programu HEC-HMS 4.0. Wyniki obliczeń wykazują zróżnicowanie wartości zarówno przepływów w kulminacji, jak i wysokości oraz objętości odpływu w zależności od wykorzystanego wzoru na czas koncentracji. Mimo iż różnica pomiędzy wartościami parametru CN wyniosła tylko 6%, znacznie wpłynęło to na wartości przepływów w kulminacji.

Summary

The effect of time of concentration and rainfall characteristics on for of runoff hydrograph in small ungauged catchment. The aim of this paper is to estimate the effect of time of concentration and rainfall characteristics on runoff hydrograph in small ungauged catchment. The analysis were carried out for the catchment of Sidzinka river. This catchment is mostly located in the area of municipalities of Kraków. Time of concentration was calculated by two methods: Kerby-Kirpich and TR-55 procedure. The amount of effective rainfall was calculated by SCS-CN method. The value of CN parameter was estimated by analyzing the Corine Land Cover 2003 base and orthophotomaps. There were assumed four rainfall distribution: block rainfall, front-loaded hyetograph, center-loaded hyetograph and back-loaded

hyetograph. All calculations were made with use of HEC-HMS 4.0 program. The obtained results show the diversity in values of peak flows, amount and volume of runoff, depending on the method to calculate T_c . Although the difference between the CN parameter's values was only 6%, it considerably affected the peak flow values.

Author's address:

Katarzyna Wachulec, Andrzej Wałęga,
Dariusz Młyński
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Katedra Inżynierii Sanitarnej i Gospodarki
Wodnej
al. Mickiewicza 24/28
30-059 Kraków, Poland
e-mail: k.wachulec@op.pl
a.walega@ur.krakow.pl
dariusz.mlynski@gmail.com