

Wpłynęło 12.12.2013 r.  
Zrecenzowano 06.02.2014 r.  
Zaakceptowano 10.03.2014 r.

A – koncepcja  
B – zestawienie danych  
C – analizy statystyczne  
D – interpretacja wyników  
E – przygotowanie maszynopisu  
F – przegląd literatury

# WPŁYW CHARAKTERYSTYK OPADOWYCH NA PARAMETRY HYDROGRAMU ODPŁYWU ZE ZLEWNI ZURBANIZOWANEJ

**Bartosz SZELAĞ**<sup>ABDEF</sup>, **Łukasz BĄK**<sup>BDEF</sup>, **Jarosław GÓRSKI**<sup>BDEF</sup>

Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Katedra Geotechniki i Inżynierii Wodnej

## Streszczenie

Celem artykułu była ocena wpływu charakterystyk opadowych na parametry hydrogramu odpływu ze zlewni zurbanizowanej, zlokalizowanej na terenie miasta Kielce. Do wyznaczenia hydrogramu odpływu zastosowano model hydrodynamiczny zlewni opracowany w programie SWMM. Do jego kalibracji wykorzystano wyniki badań deszczów i przepływów z lat 2009–2011. W artykule analizowano wpływ rozkładu natężenia opadu  $I$ , czasu jego trwania  $t_d$  i prawdopodobieństwa przewyższenia  $p$  na parametry hydrogramu odpływu: objętość fali  $V_c$ , przepływ maksymalny podczas kulminacji  $Q_{dmax}$ , czas przyboru  $t_p$ , współczynnik asymetrii rozkładu objętości  $\omega$ . Wysokość opadu określono wzorem Bogdanowicz i Stachy'ego. W badaniach uwzględniono przebieg natężenia opadów opisanych rozkładem opracowanym przez SCS (ang. Soil Conservation Service) typ I, II, III, IV. Wykonane obliczenia wykazały, że wydłużenie czasu trwania deszczu powoduje zwiększenie objętości i wartości parametru kształtu fali odpływu  $\omega$ , a także wydłużenie czasu przyboru (za wyjątkiem opadu opisanego rozkładem typu I o  $p = 50\%$ ).

**Słowa kluczowe:** hydrogram odpływu, kalibracja, model hydrodynamiczny, SWMM

## WSTĘP

Powszechnie wiadomo, że na parametry hydrogramu odpływu ze zlewni, w tym jego kształtu [CINGER 1960; CURRY, AKAN 1998], mają wpływ: charakterystyki fizyczno-geograficzne zlewni [CIEPIEŁOWSKI 2001; MEADOWS, BLANDFORD 1983], długość okresu bezdeszczowego, rozkład natężenia deszczu [BARSZCZ

**Do cytowania For citation:** Szelağ B., Bąk Ł., Górski J. 2014. Wpływ charakterystyk opadowych na parametry hydrogramu odpływu ze zlewni zurbanizowanej. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 14. Z. 2(46) s. 103–114.

2012; DVWK 1984; US SCS 1964], czas trwania opadu oraz kierunek i szybkość przemieszczania się frontu opadowego w zlewni.

Ze względu na stochastyczny charakter opadów, modelowanie zmienności natężenia deszczu w czasie jego trwania staje się bardzo złożone i wymaga zastosowania skomplikowanych narzędzi matematycznych, do których należą mikrokaśkady kanoniczne [GÓRSKI 2013; LICZNAK 2009; RUP i in. 2012], sztuczne sieci neuronowe [HUNG i in. 2009] lub wielowymiarowe rozkłady prawdopodobieństwa [BALISTROCCHI, BACCHI 2011; KUCHAR i in. 2012]. W różnych regionach Polski, na podstawie wieloletnich ciągów pomiarowych opadów, sporządzane są tzw. krzywe IDF (ang. Intensity-Duration Frequency) [BOGDANOWICZ, STACHY 1998; KOTOWSKI i in. 2010; LICZNAK i in. 2005]. Wyznaczone z tych krzywych wysokości deszczów miarodajnych są jednak tworem całkowicie sztucznym, ponieważ w rzeczywistości intensywność opadu nie jest stała, ani w czasie jego trwania, ani w objętej nim przestrzeni. Chwilowe natężenie jednostkowe opadu może być wielokrotnie większe od średniego. Ponadto duża intensywność opadu może występować kilkakrotnie w czasie jego trwania, pojawiając się w różnych momentach zdarzenia. Ze względu na to, w przypadku projektowania dużych systemów kanalizacyjnych, zaleca się obecnie weryfikację częstości wylewów (napiętnień) metodą modelowania hydrodynamicznego sieci, dla różnych wariantów obciążeń opadami.

Z powodu braku badań rozkładu natężenia opadów w czasie ich trwania przyjmuje się typowe rozkłady ich zmienności, ustalone na podstawie wieloletnich obserwacji [DVWK 1984; US SCS 1964].

Symulacje wykonane przez MROWCA [2009] wykazały, że kierunek przemieszczania się frontu opadowego istotnie wpływa na maksymalny odpływ ze zlewni.

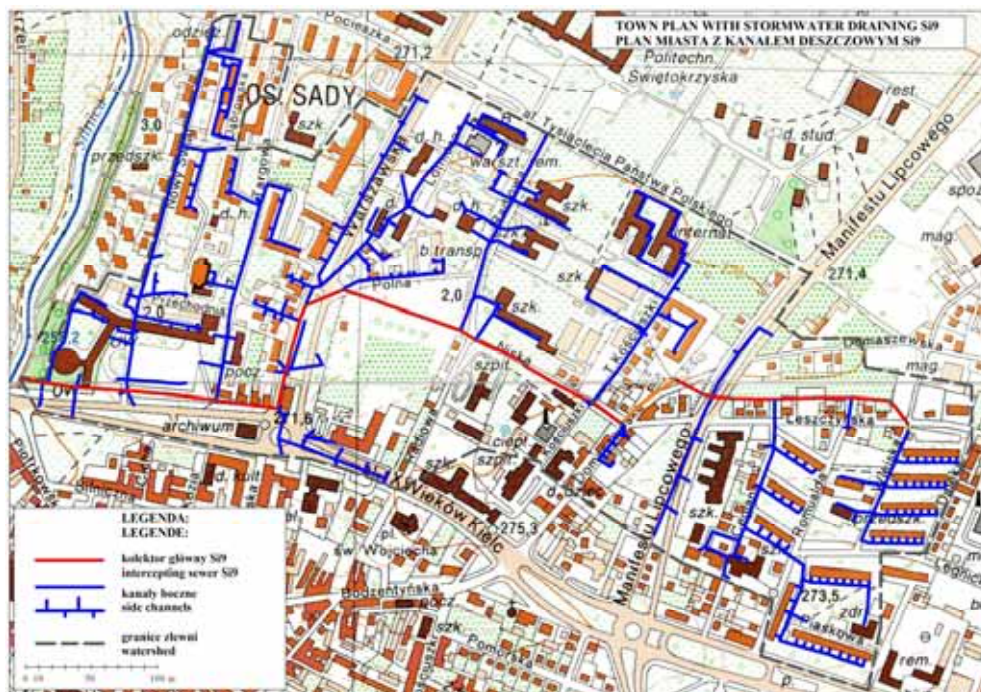
Do opisu kształtu hydrogramu odpływu ze zlewni najczęściej stosuje się smukłość fali ( $\alpha = t_{op} \cdot t_p^{-1}$ , gdzie:  $t_p$  – czas fazy przyboru,  $t_{op}$  – czas fazy opadania), współczynnik asymetrii fali ( $S = V_p \cdot V_c^{-1}$ , gdzie:  $V_p$  – objętość fazy przyboru,  $V_c$  – całkowita objętość fali odpływu) [CINGER 1960] oraz parametry wyrażające nierównomierność rozkładu objętości ścieków ( $\omega = Q_{dmax} \cdot t_p \cdot V_c^{-1}$ , gdzie:  $Q_{dmax}$  – przepływ maksymalny podczas kulminacji) [CURRY, AKAN 1998].

Celem artykułu jest ocena wpływu rozkładu natężenia deszczu, czasu jego trwania i prawdopodobieństwa jego przewyższenia na parametry hydrogramu odpływu ze zlewni zurbanizowanej kanału Si9 w Kielcach. Do tego celu wykorzystano skalibrowany model zlewni wykonany w programie SWMM 5.0.

## MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Zlewnia kanału Si9 (rys. 1) jest zlokalizowana w Kielcach i znajduje się w centralno-wschodniej części miasta. Powierzchnia zlewni kanału liczy 62,0 ha. Kanał Si9 odbiera ścieki deszczowe i roztopowe z części miasta leżącej w lewostronnej

zlewni Silnicy. Kanał główny (600–1250 mm) o długości 1569 m odbiera ścieki deszczowe z 17 kanałów bocznych (300–1000 mm). Łączna długość sieci wynosi 5583 m. Spadek kolektora na poszczególnych odcinkach zmienia się od 0,04 do 3,90%, natomiast spadki kanałów bocznych dochodzą do 2,61%. Zabudowa zlewni to głównie osiedla mieszkaniowe, budynki użyteczności publicznej, ulice magistralne oraz boczne [DĄBKOWSKI i in. 2010]. Najwyższy punkt terenu w zlewni wynosi 271,20 m n.p.m., a najniższy – 260,00 m n.p.m., średni spadek powierzchni jest równy 0,71%.



Rys. 1. Zlewnia kolektora Si9 z układem kanałów bocznych; źródło: opracowanie własne

Fig. 1. Catchment of Si9 collector together with a system of lateral sewers; source: own elaboration

W przekroju zamykającym rozważaną zlewnię jest zamontowany przepływomierz ultradźwiękowy, a w odległości 2 km od granic zlewni jest zlokalizowany posterunek opadowy. Szczegółową charakterystykę zastosowanych urządzeń pomiarowych zamieszczono w pracy DĄBKOWSKIEGO i in. [2010].

Do wyznaczenia hydrogramu odpływu wykorzystano model hydrodynamiczny zlewni kanału Si9, wykonany w programie SWMM 5.0. Szczegółowe informacje o zastosowanym narzędziu można znaleźć w pracach ROSSMANNA [2004] i ZAWILSKIEGO [2010].

Model hydrodynamiczny przyjęty do badań składa się z 92 zlewni cząstkowych o powierzchniach od 0,12 do 2,10 ha, 200 studni kanalizacyjnych oraz 72 odcinków przewodów. Udział powierzchni uszczelnionych w poszczególnych zlewniach cząstkowych (w zakresie od 5 do 100%) określono na podstawie map zasadniczych w skali 1:500.

Model został skalibrowany na podstawie 5 zdarzeń opad–odpływ (tab. 1). Wzory do wyznaczania wartości miar dopasowania pomierzonych i obliczonych hydrogramów odpływu są przytaczane w wielu pracach [MROWIEC 2009; SKOTNICKI, SOWIŃSKI 2009; ZAWILSKI 2010].

**Tabela 1.** Charakterystyki zdarzeń opadowych oraz parametrów dopasowania hydrogramów pomierzonych i uzyskanych z symulacji

**Table 1.** The characteristics of rainfall events and fitting parameters of measured and simulated hydrographs

Data	Date	$P$ , mm	$t_d$ , min	$V_c$ , m <sup>3</sup>	$R_Q$	$R_V$	$NC$
08.07.2011 r.		8,6	60	1733	0,95	0,83	0,81
15.09.2010 r.		9,2	286	2221	1,00	1,05	0,93
30.07.2010 r.		12,5	107	1908	1,08	1,15	0,70
08.07.2009 r.		16,5	270	3415	1,15	1,20	0,72
03.07.2009 r.		4,2	26	2133	0,98	1,20	0,67

Objaśnienia:  $P$  – wysokość opadu,  $t_d$  – czas trwania opadu,  $V_c$  – całkowita objętość fali odpływu,  $NC$  – współczynnik Nasha-Sutcliffe’a,  $R_V$  – stosunek objętości splywu symulowanej do pomierzonej,  $R_Q$  – stosunek przepływu maksymalnego symulowanego do pomierzonego podczas kulminacji.

Explanations:  $P$  – height of rainfall,  $t_d$  – rainfall duration,  $V_c$  – total volume of outflow wave,  $NC$  – Nash-Sutcliff coefficient,  $R_V$  – the ratio of simulated to measured runoff volume,  $R_Q$  – the ratio of simulated to measured maximum flow during culmination.

Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

W wyniku kalibracji ustalono następujące parametry modelu:

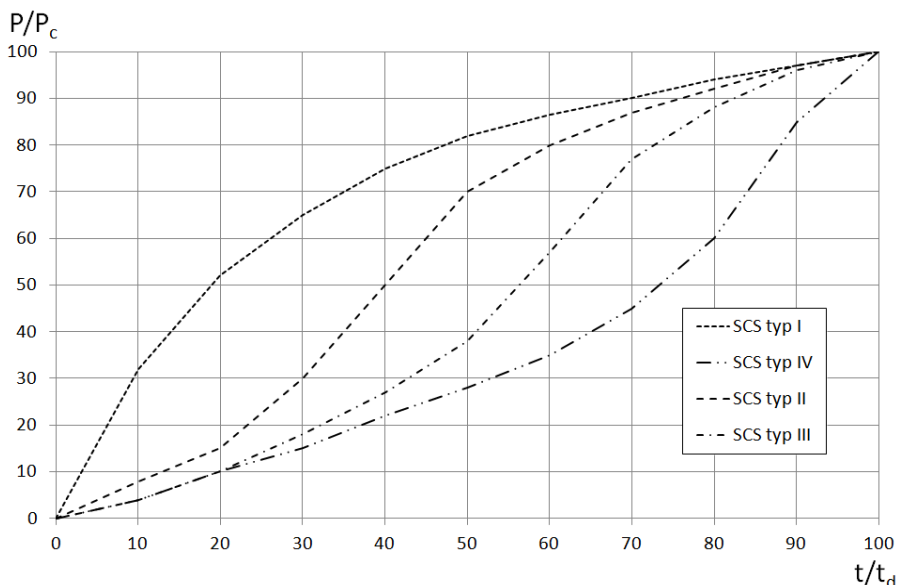
- wysokość retencji terenowej powierzchni uszczelnionych  $d_{IMP} = 1,5$  mm oraz nieuszczelnionych  $d_{PER} = 6,0$  mm,
- współczynnik szorstkości powierzchni uszczelnionych  $n_{IMP} = 0,015 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$  i nieuszczelnionych  $n_{PER} = 0,15 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ ,
- współczynnik szorstkości kanałów  $n = 0,015 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ ,
- szerokość pasa splywu  $W = 1,1 \cdot F^{0,50}$ , gdzie:  $F$  – pole powierzchni danej zlewni, ha.

Do analiz przyjęto wstępnie następujące parametry do równania Hortona, opisującego ilość wody infiltrującej na powierzchniach przepuszczalnych: maksymalna szybkość filtracji do gruntu  $J_{\max} = 90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , minimalna szybkość infiltracji do gruntu  $J_{\min} = 15 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , współczynnik zmniejszania się szybkości filtracji  $\gamma = 3 \text{ h}^{-1}$  i czas całkowitego wysychania  $t_{dr} = 72 \text{ h}$  [SKOTNICKI, SOWIŃSKI 2009; ZAWILSKI 2010]. Symulacje przeprowadzone w programie SWMM wykazały, że równoczesna zmiana wartości parametrów  $J_{\max}$  i  $J_{\min}$  odpowiednio w zakresach 70–120

i  $10\text{--}25 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  prowadzi do zmiany objętości spływu powierzchniowego ( $\pm 2\%$ ) oraz przepływu maksymalnego podczas kulminacji ( $\pm 3\%$ ). Jednocześnie stwierdzono również, że wzrost wartości  $d_{PER}$  od  $2,5$  do  $6,0 \text{ mm}$  oraz  $n_{PER}$  od  $0,10$  do  $0,50 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1/3}$  nie wpływa na zwiększenie objętości spływów powierzchniowych i wartości przepływów maksymalnych podczas kulminacji. Parametry te pozostawały na tym samym poziomie. Z kolei wzrost wartości  $d_{IMP}$  spowodował zmniejszenie współczynnika  $NC$  i wzrost  $R_V$ , co oznaczało pogorszenie się dopasowania hydrogramu pomierzonego i uzyskanego w wyniku obliczeń w programie SWMM. Utrudniło to kalibrację modelu, co jest wyraźnie widoczne na podstawie dwóch zdarzeń opadowych, tj. 08.07.2008 r. i 03.07.2009 r. (tab. 1) i spowodowało zawyżenie objętości spływów powierzchniowych ( $R_V > 1$ ).

W analizach rozważono I, II, III i IV typ rozkładu natężenia opadu opracowanego przez SCS (ang. Soil Conservation Service) (rys. 2) [CIEPIEŁOWSKI, DĄBKOWSKI 2006], przy czym wysokość deszczu  $P_{\max}$  o założonym czasie trwania  $t_d$  i prawdopodobieństwie przewyższenia  $p$  ustalono ze wzoru BOGDANOWICZ i STACHY'EGO [1998]:

$$P_{\max}(t_d, p) = 1,42t_d^{0,33} + \alpha(R, t_d)(-\ln p)^{0,584} \quad (1)$$



Rys. 2. Bezwymiarowe krzywe sumowe opadów wg SCS;  $t$  – czas trwania opadu od początku,  $t_d$  – całkowity czas trwania opadu,  $P$  – wysokość opadu od początku,  $P_c$  – całkowita wysokość opadu; źródło: opracowanie własne

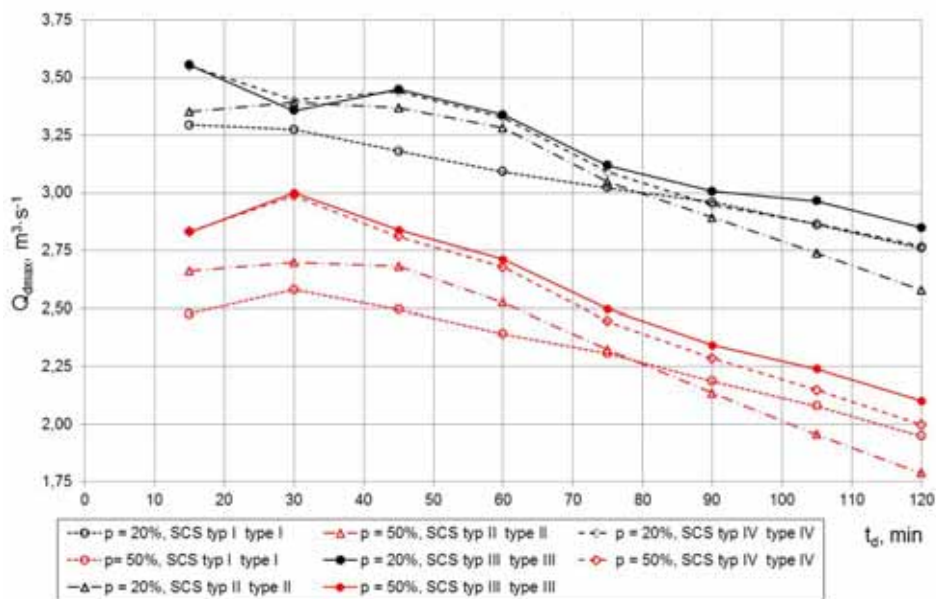
Fig. 2. Dimensionless cumulative rain curves according to SCS;  $t$  – rain duration from the beginning,  $t_d$  – total duration of the rain,  $P$  – rain height from the beginning,  $P_c$  – total height of the rain; source: own elaboration

w którym:  $\alpha(R, t_d)$  – parametr regionalny obliczany w zależności od rozpatrywanej lokalizacji obiektu i czasu trwania deszczu [CIEPIEŁOWSKI, DĄBKOWSKI 2006].

W analizach rozważono opady o czasie trwania  $t_d = 15$ –120 min oraz prawdopodobieństwie przewyższenia  $p = 20\%$  i  $p = 50\%$ .

## WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Z przeprowadzonych analiz (rys. 3) wynika, że wydłużenie czasu trwania opadów zgodnych z rozkładem SCS typu III i IV, o prawdopodobieństwie przewyższenia  $p = 50\%$ , z 15 do 30 min prowadzi do zwiększenia się przepływu maksymalnego podczas kulminacji z 2,80 do 3,00  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (wzrost o 7%). Identyczna zmiana czasu trwania deszczu opisanego rozkładem SCS typu I i II ( $p = 50\%$ ) powoduje zwiększenie się przepływu maksymalnego podczas kulminacji odpowiednio z 2,48 do 2,58  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (wzrost o 4%) i z 2,66 do 2,70  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (wzrost o 2%). Zwiększenie czasu trwania opadu o prawdopodobieństwie przewyższenia 50% z 30 do 120 min prowadzi do zmniejszenia przepływu maksymalnego podczas kulminacji w przypadku wszystkich typów rozkładu (SCS typ I, II, III i IV).

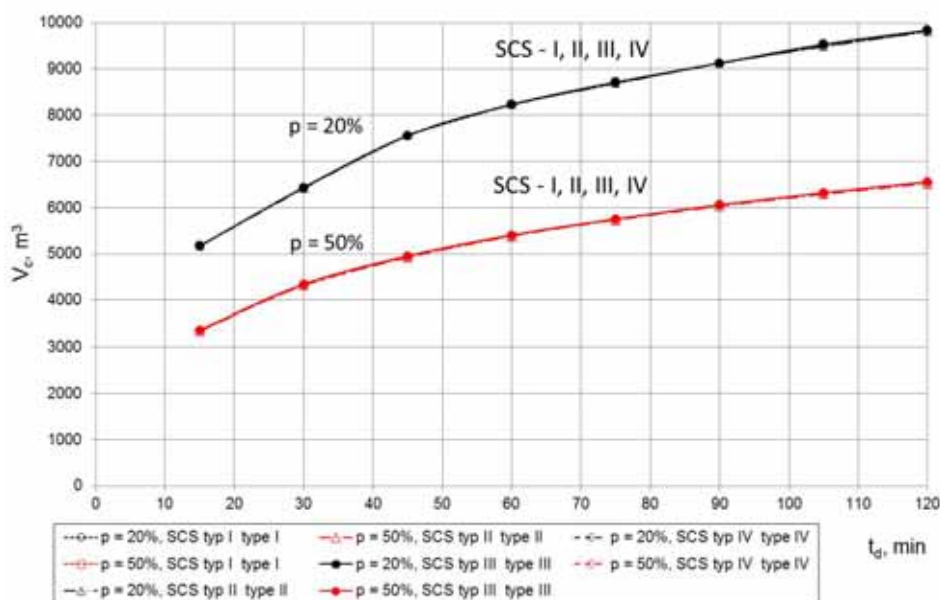


Rys. 3. Zależność przepływów maksymalnych podczas kulminacji  $Q_{dmax}$  od czasu trwania deszczu  $t_d$  i prawdopodobieństwa jego przewyższenia  $p$ ; źródło: opracowanie własne

Fig. 3. Maximum flows during culmination  $Q_{dmax}$  for different rain durations  $t_d$  and precipitation probabilities  $p$ ; source: own elaboration

Wydłużenie czasu trwania opadu o prawdopodobieństwie przewyższenia 20% z 15 do 120 min powoduje zmniejszenie przepływu maksymalnego w przypadku wszystkich typów rozkładów SCS (I, II, III i IV) odpowiednio o: 19% (z 3,27 do 2,75  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), 31% (z 3,32 do 2,54  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), 24% (z 3,55 do 2,87  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) i 29% (z 3,55 do 2,75  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Z wykonanych badań wynika, że przebieg krzywych  $V_c = f(t_d)$  zależy wyłącznie od czasu trwania deszczu  $t_d$  oraz prawdopodobieństwa jego przewyższenia  $p$  (20 i 50%), nie jest natomiast związany z typem rozkładu SCS (I, II, III i IV) – krzywe pokrywają się (rys. 4). Objętość fali odpływu ze zlewni podczas opadu trwającego od 15 do 120 min i prawdopodobieństwie przewyższenia  $p = 50\%$  zmienia się w zakresie 3150–6700  $\text{m}^3$ . W przypadku opadu o  $p = 20\%$  wydłużenie czasu jego trwania z 15 do 120 min prowadzi do zwiększenia objętości fali z 5100 do 9900  $\text{m}^3$ . Różnica objętości fali  $V_c$  obliczonych dla  $p$  równego 20 i 50% wynosi 1800  $\text{m}^3$ , gdy  $t_d = 15$  min oraz 3100  $\text{m}^3$ , gdy  $t_d = 120$  min.

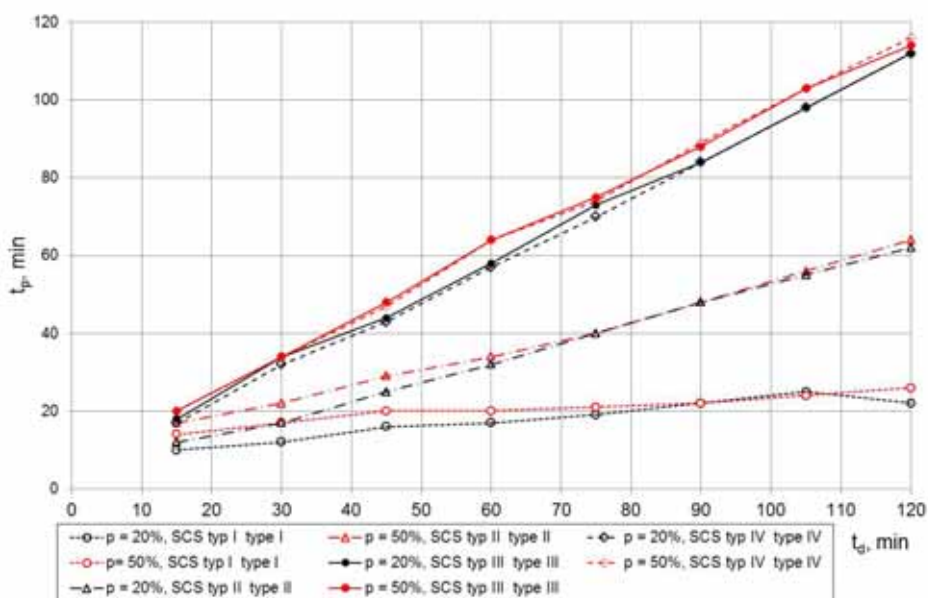


Rys. 4. Zależność objętości fali odpływu  $V_c$  od czasu trwania deszczu  $t_d$  i prawdopodobieństwa jego przewyższenia  $p$ ; źródło: opracowanie własne

Fig. 4. The relationship between outflow volume  $V_c$ , rain duration  $t_d$  and probability  $p$ ; source: own elaboration

Przeprowadzone symulacje wykazały, że zwiększenie czasu trwania deszczu  $t_d$  prowadzi do wydłużenia czasu przyboru  $t_p$  (rys. 5). Zmiana czasu trwania opadu opisanego rozkładem SCS typu I ( $p = 50\%$ ) z 15 do 120 min prowadzi do wydłu-

zenia czasu przyboru o 14 min (z 10 do 24 min). Identyczna zmiana czasu trwania opadu opisanego rozkładem SCS typu II ( $p = 50\%$ ) powoduje ponad 3,4-krotne wydłużenie czasu przyboru (z 18 min do 63 min). Analizując krzywe  $t_p = f(t_d)$  (rys. 5) dla rozkładu SCS typu III i IV ( $p = 50\%$ ) można stwierdzić, że zmiana czasu trwania deszczu z 15 do 120 min powoduje około 5,5-krotne wydłużenie czasu przyboru (odpowiednio z 18 do 111 min i z 20 do 113 min). Z analizy tych krzywych wynika również, że zmniejszenie prawdopodobieństwa przewyższenia deszczu z 50 do 20% ma nieznaczny wpływ na czas przyboru, zwłaszcza w przypadku rozkładu SCS typu III i IV, w których różnice  $t_p$  dla poszczególnych wartości  $t_d$  nie przekraczają 5 min. W przypadku rozkładów SCS typu I i II w zakresie  $t_d = 15-90$  min różnica wartości czasu przyboru  $t_p$  podczas opadu o prawdopodobieństwie przewyższenia 50 i 20% zmniejsza się ze wzrostem czasu jego trwania.

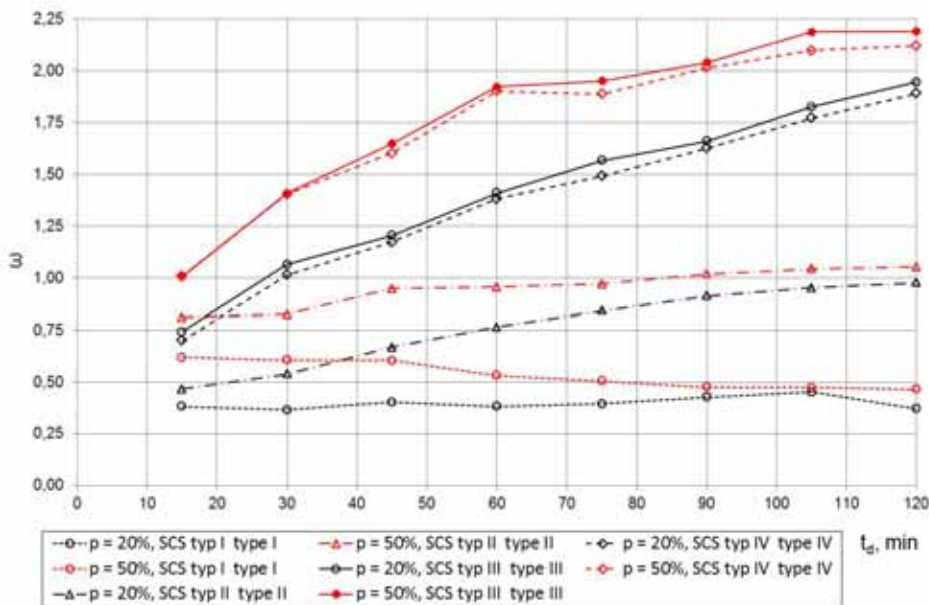


Rys. 5. Zależność czasu przyboru  $t_p$  od czasu trwania deszczu  $t_d$  i prawdopodobieństwa jego przewyższenia opadu  $p$ ; źródło: opracowanie własne

Fig. 5. Water rising time  $t_p$  for different rain durations  $t_d$  and precipitation probabilities  $p$ ; source: own elaboration

Na podstawie zależności  $\omega = f(t_d)$  (rys. 6) można ustalić, że w przypadku zmienności opadu opisanego rozkładem SCS typu I zwiększenie czasu trwania deszczu o  $p = 50\%$  z 15 do 120 min powoduje zmniejszenie parametru  $\omega$  odpowiednio z 0,60 do 0,49. W przypadku identycznego rozkładu natężenia opadu o prawdopodobieństwie przewyższenia  $p = 20\%$  wartość  $\omega$  zmienia się w zakresie 0,37–0,42.





Rys. 6. Zależność parametru kształtu fali ( $\omega = Q_{dmax} \cdot t_p \cdot V_c^{-1}$ ) od czasu trwania deszczu  $t_d$  i prawdopodobieństwa jego przewyższenia  $p$ ; źródło: opracowanie własne

Fig. 6. Parameters of hydrograph shape ( $\omega = Q_{dmax} \cdot t_p \cdot V_c^{-1}$ ) for different rain durations  $t_d$  and precipitation probabilities  $p$ ; source: own elaboration

Wydłużenie czasu trwania deszczu o prawdopodobieństwie przewyższenia równym 20 i 50%, opisanego rozkładem SCS typu II, z 15 do 120 min prowadzi do zwiększenia się parametru  $\omega$  odpowiednio z 0,49 do 0,99 oraz z 0,77 do 1,03.

Zwiększenie czasu trwania deszczu o prawdopodobieństwie przewyższenia 20 i 50%, opisanego rozkładem SCS typu III, z 15 do 120 min powoduje zmianę wartości parametru  $\omega$  z 0,75 do 1,95 i z 1,00 do 2,23. Wartości parametrów  $\omega$  dla rozkładu SCS typu IV są nieznacznie mniejsze od wartości  $\omega$  obliczonych dla rozkładu SCS typu III.

## PODSUMOWANIE

Z wykonanych obliczeń wynika, że na objętość fali odpływu ze zlewni ma wpływ prawdopodobieństwo przewyższenia opadu i czas jego trwania. Ponadto, wydłużenie czasu trwania opadu powoduje zwiększenie objętości fali, czasu przyboru i wartości parametru kształtu fali  $\omega$ . Wyjątek stanowi opad o  $p = 50\%$  opisany rozkładem SCS typu I, w przypadku którego zwiększenie  $t_d$  powoduje zmniejszenie wartości parametru kształtu hydrogramu odpływu ze zlewni.

Najmniejsze wartości przepływów maksymalnych podczas kulminacji w całym zakresie analizowanego czasu opadu uzyskano dla deszczu opisanego rozkładem SCS typu I, a największe – dla deszczu opisanego rozkładem SCS typu III. W przypadku pozostałych rozkładów (SCS typu II i III) przepływy te dla poszczególnych  $t_d$  różnią się nieznacznie.

Stwierdzono, że w przypadku opadów o prawdopodobieństwie przewyższenia  $p = 20\%$ , opisanych rozkładem SCS wszystkich typów, w całym zakresie rozważanego  $t_d$ , wydłużenie czasu trwania opadu prowadzi do zmniejszenia przepływu maksymalnego podczas kulminacji.

Zarówno najdłuższe czasy fazy przyboru, jak i największe wartości parametrów kształtu fali  $\omega$  w przypadku opadów o  $p$  równym 20 i 50% zanotowano dla rozkładu SCS typu III i IV, natomiast najmniejsze – dla rozkładu SCS typu I.

Znaczne różnice wartości czasu przyboru  $t_p$ , parametrów kształtu fali  $\omega$  oraz przepływów maksymalnych  $Q_{dmax}$  otrzymane dla rozkładu SCS typu I, II, III i IV potwierdzają istotny wpływ rozkładu natężenia deszczu na parametry hydrogramu odpływu ze zlewni.

Na podstawie wykonanych obliczeń można stwierdzić, że do analizy funkcjonowania systemu kanalizacji deszczowej ze względu na potencjalną liczbę wylań i nadpiętrzeń, należy przyjmować deszcz opisany rozkładem SCS typu III o czasie trwania  $t_d = 15$  min, ponieważ obliczona wówczas wartość strumienia ścieków dopływającego do sieci kanalizacyjnej jest największa. W celu wyznaczenia miarodajnej pojemności zbiornika retencyjnego na odpływie ze zlewni, mającego ograniczyć strumień ścieków odprowadzanych do odbiornika, należy także przyjąć opad opisany rozkładem SCS typu III, ze względu na uzyskane dla tego przypadku największe wartości parametrów kształtu fali  $\omega$ .

## LITERATURA

- BALISTROCCHI M., BACCHI B. 2011. Modelling the statistical dependence of rainfall event variables through copula functions. *Hydrology Earth Systems Science*. Vol. 15. Iss. 6 s. 1959–1977.
- BARSZCZ M. 2012. Znormalizowane rozkłady warstwy opadu w czasie trwania deszczu na obszarze zlewni w Warszawie. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 12. Z. 3 (39) s. 27–38.
- BOGDANOWICZ E., STACHY J. 1998. Maksymalne opady deszczu w Polsce. Charakterystyki projektowe. Materiały badawcze IMGW. Ser. *Hydrologia i Oceanologia*. Nr 23. ISSN 0239-6297 ss. 85.
- CIEPIEŁOWSKI A. 2001. Relationships between selected elements of the flood hydrographs in rivers. *Journal of Water and Land Development*. No. 5 s. 89–105.
- CIEPIEŁOWSKI A., DĄBKOWSKI Sz.L. 2006. Metody obliczeń przepływów maksymalnych w małych zlewniach rzecznych (z przykładami). Bydgoszcz. Ofic. Wydaw. Projprzem-EKO. ISBN 978-83-922194-1-5 ss. 311.
- CINGER V.N. 1960. Transformacja maksymalnych raschodov vodochraniliščami. Leningrad. *Gidrometeoizdat*.
- CURRY D.L., AKAN A.O. 1998. Single outlet pond design and analysis equations. W: *Proceedings of the International Water Resources Conference*. *Water Resources Engineering*. Nr 98 s. 796–801.

- DĄBKOWSKI Sz.L., GÓRSKA K., GÓRSKI J., SZELAĞ B. 2010. Wstępne wyniki badań ścieków deszczowych w jednym z kanałów w Kielcach. *Gaz Woda i Technika Sanitarna*. Nr 6 s. 20–24.
- DVWK 1984. *Arbeitsanleitung zur Anwendung Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten*. Regeln 113. T. 2. Synthese. Hamburg. Verlag Paul Parey.
- GÓRSKI J. 2013. Analiza szeregów opadowych dla potrzeb hydrologii miejskiej na przykładzie Kielc. Rozprawa doktorska. Kielce. PŚk.
- HUNG N.Q., BABEL M.S, WEESAKUL S., TRIPATHI N.K. 2009. An artificial neural network model for rainfall forecasting in Bangkok, Thailand. *Hydrology Earth Systems Science*. Vol. 13. Iss. 8 s. 1413–1425.
- KOTOWSKI A., KAŻMIERCZAK B., DANCEWICZ A. 2010. Modelowanie opadów do wymiarowania kanalizacji. Warszawa. Monografie Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN. Studia z Zakresu Inżynierii. Nr 68. ISBN 978-83-89687-53-1 ss. 128.
- KUCHAR L., IWAŃSKI S., JELONEK L., SZALIŃSKA W. 2012. Modelowanie przepływów w rzece Kaczawa w perspektywie lat 2030–2050 (półrocze letnie). *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 12. Z. 2 (38) s. 143–157.
- LICZNAR P., ŁOMOTOWSKI J., ROJEK M. 2005. Pomiary i przetwarzanie danych opadowych dla potrzeb projektowania i eksploatacji systemów odwodnieniowych. Poznań. Futura. ISBN 8360055017 ss. 100.
- LICZNAR P. 2009. Generatory syntetycznych szeregów opadowych do modelowania sieci kanalizacji deszczowych i ogólnospławnych. Wrocław. Wydaw. UP. ISBN 8360574723 ss. 179.
- MEADOWS M.E., BLANDFORD G.E. 1983. *Improved Methods and Guidelines for Modeling Stormwater Runoff from Surface Coal Mined Lands*. Report No. 147. Lexington, Kentucky. Water Resources Research Institute. University of Kentucky.
- MROWIEC M. 2009. Efektywne wymiarowanie i dynamiczna regulacja kanalizacyjnych zbiorników retencyjnych. Częstochowa. Wydaw. PCz. ISBN 8371934246 ss. 166.
- ROSSMANN L.A. 2004. *Storm Water Management Model, user's manual*. Ver. 5.0. National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development. Cincinnati. U.S. Environmental Protection Agency.
- RUP D. E., LICZNAR P., ADAMOWSKI W., LEŚNIEWSKI M. 2012. Multiplicative cascade models for fine spatial downscaling of rainfall: parameterization with rain gauge data. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 16. Iss. 3 s. 671–684.
- SKOTNICKI M., SOWIŃSKI M. 2009. Weryfikacja metody wyznaczania szerokości hydraulicznej zlewni cząstkowych na przykładzie wybranej zlewni miejskiej. Warszawa. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Inżynieria Środowiska*. Z. 57 s. 27–43.
- US SCS (Soil Conservation Service) 1964. *National engineering handbook*. Sect. 16. Drainage of Agricultural Land. Washington D.C. US. Department of Agriculture.
- ZAWILSKI M. 2010. Integracja zlewni zurbanizowanej w symulacji spływu ścieków opadowych. *Gaz Woda i Technika Sanitarna*. Nr 6 s. 28–32.

Bartosz SZELAĞ, Łukasz BAK, Jarosław GÓRSKI

**THE INFLUENCE OF RAINFALL CHARACTERISTICS  
ON PARAMETERS OF THE OUTFLOW HYDROGRAPH  
FROM URBANIZED CATCHMENT**

**Key words:** calibration, hydrodynamic model, outflow hydrograph, SWMM

**S u m m a r y**

The purpose of the article was to evaluate the impact of rainfall characteristics on hydrograph parameters of runoff from urbanized catchment located in the city of Kielce. Hydrodynamic model of the catchment was used with SWMM program to determine the outflow hydrograph. The records of rains and flows since 2009 till 2011 were used for calibration. The effect of rain intensity distribution, its duration  $t_d$  and probability  $p$  on hydrograph parameters: wave volume  $V_c$ , maximum flow during culmination  $Q_{dmax}$ , time of water rising  $t_p$  and the asymmetry of volume distribution  $\omega$  was analysed in the paper. The amount of precipitation was determined with the Bogdanowicz and Stachy equation. Rainfall intensity distributions SCS type I, II, III, IV were considered in the study. Calculations showed that extending rain duration increased the volume of outflow, hydrograph parameter  $\omega$  and the time of water rising. The exception was the rainfall of SCS type I, for  $p = 50\%$  as in this case the higher was  $t_d$  value, the smaller was the shape parameter of inflow hydrograph from the catchment.

**Adres do korespondencji:** dr inż. B. Szelağ, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Wydział Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki, Katedra Geotechniki i Inżynierii Wodnej, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25–314 Kielce; tel. +48 41 34-24-735, e-mail: bartoszszelag@op.pl