

KATARZYNA WEINEROWSKA-BORDS

Hydrologia obszarów miejskich

...OPOWIEDZIANA
INACZEJ



PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Dariusz Mikielewicz

RECENZENT

Apoloniusz Kodura

KOREKTA

Anna Nadrowska

REDAKCJA JĘZYKOWA

Agnieszka Frankiewicz

OPRACOWANIE GRAFICZNE I PROJEKT OKŁADKI

Katarzyna Weinerowska-Bords

SKŁAD

Wioleta Lipska-Kamińska

W opracowaniu graficznym książki wykorzystano oprogramowanie Canva. Zdjęcia i grafiki pochodzące z zasobów Canva pozyskano w ramach licencji Canva Pro.

Wydano za zgodą

Rektora Politechniki Gdańskiej

Tekst książki został opracowany w ramach grantu na innowacje dydaktyczne:
*SEJF this town, czyli grywalizacja, elementy escape roomu i e-learning w hydrologii zlewni
zurbanizowanej*, realizowanego na Wydziale Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki
Gdańskiej (projekt nr 034453, porozumienie nr 5/2020/G.DYD).

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
<https://www.sklep.pg.edu.pl>

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakikolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy.

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2022

ISBN 978-83-7348-867-0

To jest spisek. Spisek treści

Intro, czyli winni się tłumaczyć	5
Rozdział 1.	
Ale o co chodzi, czyli wprowadzenie do hydrologii zlewni zurbanizowanej	7
W tym rozdziale: Po co nam ta cała hydrologia? Garść (naprawdę mała!) definicji. Równanie na dzień dobry, czyli bilans zysków i strat. Urbanizacja? Wielkie halo!	
Rozdział 2.	
O modelingu w hydrologii. Dobry i lepszy model, czyli ogólnie o obliczeniach w hydrologii zlewni zurbanizowanej i co z nich wynika	22
W tym rozdziale: Ale model! Dobre i lepsze modele w hydrologii. Czy to naprawdę takie ważne? No dobrze, to jak wybrać?	
Rozdział 3.	
Naprawdę jaka jesteś, nie wie nikt, czyli jak opisać zlewnię i po co?	35
W tym rozdziale: Casting na najpiękniejszą? Dość istotne wymiary. Jakie kształty są najlepsze? Z górki na pazurki. Z wierzchu może trochę szorstka, ale za to jaka głębia... W sieci kanałów.	
Rozdział 4.	
Skoncentruj się, czyli czas koncentracji odpływu ze zlewni	50
W tym rozdziale: Czas na koncentrację odpływu. Pięta Achillesa, czyli hydraulicznie najniekorzystniejszy punkt w zlewni. I po co to komu? Jak to wyznaczyć, czyli pięć kroków do sukcesu	
Rozdział 5.	
Deszcze niespokojne potargaly sad, czyli o opadach w zlewni	59
W tym rozdziale: Deszcz też trzeba opisać. Deszcz na miarę zadania, czyli opad miarodajny. A może pójść blokiem? Historycznie czy syntetycznie? Bardzo ważne formuły	

Rozdział 6.	
Globalnie rzecz ujmując, czyli o modelach globalnych w hydrologii	71
W tym rozdziale: Spójrzmy na to z góry. Do czego hydrologom czarna skrzynka? Coś dla mało ciekawych, czyli... nie interesuj się! Jedno równanie, wiele kłopotów.	
Rozdział 7.	
Czas na integrację. Lepszy model, czyli o modelach zintegrowanych i wielkim wejściu	82
W tym rozdziale: Zabawa w pociąg, czyli każdy proces do osobnego pudełka. Wielkie wejście. Jak ugryźć hietogram syntetyczny?	
Rozdział 8.	
O opadzie jakże skutecznym, czyli ile można stracić?	93
W tym rozdziale: Deszcz jakże efektywny! Ile można stracić na tym terenie? Razem czy osobno?	
Rozdział 9.	
Po niej to sptywa, czyli sptyw powierzchniowy w zlewni	100
W tym rozdziale: Sptywamy, czyli kolejny wagonik. Bardzo ważna klasyfikacja, czyli <i>quo vadis</i> , inżynierze? Zabawa klockami. I znowu SCS	
Rozdział 10.	
Niezły kanał i kontakt z bazą, czyli o przepływie w kanałach i przepływie bazowym	113
W tym rozdziale: No to kanał! Naukowiec nad wodami rzeki. Co na to baza, czyli słów kilka o przepływie bazowym	
Zakończenie. Złap mnie, jeśli potrafisz. I co dalej z tą zlewnią?	119
A na koniec jeszcze jeden spisek...	121
Spis literatury	121
Spis inspiracji	122



Intro, czyli winni się tłumaczą

Jak wiemy, „na każdym zebraniu jest taka sytuacja, że ktoś musi zacząć pierwszy”¹. Także w niemal każdej książce jest takie miejsce, gdzie ktoś – z reguły autor – powinien zagaić i się wytłumaczyć, **czy naprawdę musiał napisać to dzieło**. A więc i ja się usprawiedliwię. Otóż – musiałam. Cytując klasyka²: „Czasami człowiek musi, inaczej się udusi”.

Zanim rozwinę tę głęboką myśl, powiem coś, póki pamiętam: **to nie będzie typowy podręcznik do nauki hydrologii**. Żeby nie było, że nie uprzedzałam. Pomysł na napisanie tej książki podsunęli mi – zapewne całkiem nieświadomie, ale skutecznie – sami studenci, z którymi mam co roku okazję pracować w ramach zajęć z przedmiotu *hydrologia zlewni zurbanizowanej*. Niezależnie od tego, czy są to osoby dopiero zaczynające przygodę z inżynierią, czy też praktycy wykonujący swój zawód od kilku lat (na przykład spora część studentów studiów niestacjonarnych), nasze dyskusje w czasie zajęć, pytania zadawane z sali, moje pytania kierowane do studentów i wreszcie uzyskiwane przeze mnie odpowiedzi (lub ich brak) uświadamiają mi co roku, że zamiast kolejnej książki nabrzmiałej równaniami i opisami metod obliczeniowych potrzebne jest przedstawienie głębszego i szerszego kontekstu, w jakim porusza się pod względem obliczeniowym inżynier.

W trakcie wykonywania dość rutynowych i oczywistych – wydawałoby się – procedur obliczeniowych często brakuje chwili na refleksję nad samymi metodami obliczeń, istotą przyjmowanych założeń czy też konsekwencjami wartości przyjmowanych parametrów. Innymi słowy, potrzebne jest częstsze zadawanie pytań „dlaczego?”, „dlaczego właśnie tak?”, „czy to właściwa droga?” i – kluczowe – „po jakiego grzyba to wszystko?”. Tak więc, reasumując, potrzebę (czy wręcz wspomnianą organiczną konieczność) napisania tej książki zawdzięczam właśnie studentom.

A więc teraz, gdy ustaliliśmy już, **kto jest winny**, zapraszam Czytelników do wspólnej podróży i swoistej nieformalnej rozmowy na temat potrzeby uważności i czujności w pracy inżyniera. Zabawimy się w **detektywów** i niejako z lupką w dłoni pochylimy się nad pozornie dobrze znanymi procedurami obliczania ilości wód opadowych, nad naszymi inżynierskimi „oczywistościami” i poszukamy pęknięć w tej na pozór dobrze rozpoznanej całości. Zapytamy, co można zrobić lepiej i gdzie tkwią potencjalne **pułapki**, w które nieświadomie wpadamy, gdy tracimy uważność.



¹ Wiecie, do którego filmu nawiązuję, prawda? A jeśli nie, koniecznie obejrzyjcie *Rejs* w reż. Marka Piwowskiego. Koniecznie!

² Tym razem innego: Jonasza Kofty, autora piosenki *Śpiewać każdy może* (muz. S. Syrewicz).

Książka przeznaczona jest przede wszystkim dla studentów inżynierii środowiska, ale może się także spodobać innym Czytelnikom, zajmującym się zagadnieniami obliczania ilości wód opadowych, którym nie jest obojętne, czy wyniki własnych obliczeń mają jakieś odzwierciedlenie w rzeczywistości, czy też niekoniecznie...

A ponieważ podróż, w którą zapraszam, jest nieformalna, proszę mi wybaczyć bardziej poufale zwracanie się do Czytelników, mniej sformalizowany język oraz swobodniejszą formę tej książki, także pod względem graficznym. To przecież nie jest typowy podręcznik... To tylko (i aż) wspólna konwersacja o ważności obliczeń inżynierskich... Żeby nie było, że nie uprzedzałam...

Autorka



Rozdział 1. Ale o co chodzi, czyli wprowadzenie do hydrologii zlewni zurbanizowanej

W tym rozdziale: Po co nam ta cała hydrologia? Garść (naprawdę mała!) definicji. Równanie na dzień dobry, czyli bilans zysków i strat. Urbanizacja? Wielkie halo!

Część I. Po co nam ta cała hydrologia?

Chęciny, lipiec 1994

Studenci inżynierii środowiska odbywali praktykę geologiczną. Popołudniową porą wybrali się na swobodną, acz moderowaną przez **Szefa Wyprawy**, wycieczkę po mieście. Nie był im jednak dany błogi odpoczynek. W ciągu kilku minut pogoda uległa nagłej zmianie i na naszych bohaterów (i wszystko wokół) **spadł ulewny deszcz**. Taki z rodzaju *absolutne oberwanie chmury* ⚡. W ciągu kilkunastu minut ulicami zaczęły spływać potoki wody opadowej, które w krótkim czasie przekształciły się w prawdziwe rzeki. Studenci wracali do swojej bazy, a po drodze targały nimi wątpliwości natury iście egzystencjonalnej. Zdjąć buty, by ich nie zniszczyć, ale za to poświęcić stopy i złapać murowane przeziębienie (a może i coś gorszego)? Zostać w butach i być może bezpowrotnie je utracić? Ci, którzy się zawahali, dostali w pakiecie cały wspomniany komplet nieszczęść. Wkrótce wszyscy brnęli po kolana w wodzie. A deszcz padał i padał, a strumienie wody płynęły i płynęły, splukując ze sobą wszystkie zanieczyszczenia z ulicy: to, co wydostało się z przepelnionych studzienek, to, co znajdowało się na trawnikach, i różne inne „niespodzianki”.

Dowolne miasto w Polsce, dowolny letni miesiąc, jakiś inny rok

Pani **Zosia** wyszła po niewielkie zakupy. Przewidując wzięła parasol, bo **zanosilo się na deszcz** ☁. A tym razem **jak się zaniostło, to i spadło**. Ale nie padało jakoś szczególnie intensywnie. Normalny deszcz, o którym nie będzie mowy w telewizji. Pani Zosia z siatkami wędrowała do domu, po drodze zaś musiała przejść dwukrotnie przez jezdnię. I dwukrotnie była zmuszona przedzierać się przez kałuże po kostki, bo akurat w okolicach przejść dla pieszych nie dało się inaczej. Taka rzeźba nawierzchni. I jeszcze, jakby tego było mało, została ochlapana przez jadący samochód (kierowca się ubawił, pani Zosia mniej). Ot, zwykły scenariusz, jakich wiele na naszych ulicach.

Miasto to samo co w poprzednim przykładzie albo inne, ten sam dzień

Dwie sąsiadujące ze sobą posesje. Mniej więcej podobnej wielkości i na pozór podobnie zagospodarowane. I deszcz jak w poprzedniej historii, tylko pada trochę dłużej. Na tyle, że dzieci zaczynają się nudzić, a ulice pustoszeją. Właścicielowi jednej posesji – jak to się ładnie określa – „wybiła kanalizacja” i zalało piwnicę. Drugi właściciel nie poniósł żadnych strat. I gdzie tu sprawiedliwość? A żeby było ciekawiej, w okolicy obu posesji znajduje się nowe osiedle mieszkaniowe. Mieszkańcy niedawno się wprowadzili i zaczęli odpoczywać po przeprowadzkach. Pod koniec tego deszczowego dnia odkryją wodę w piwnicach i garażach.

Co łączy te trzy historie i setki podobnych, które moglibyśmy tu przytoczyć? Nietrudno odpowiedzieć na to pytanie. Odróżnia je zaś od siebie kilka rzeczy – przede wszystkim *skala zjawiska* i *dotkliwość konsekwencji*. Niekiedy są to drobne szkody i niedogodności, o których zapominamy następnego dnia po deszczu, a niekiedy poważniejsze straty. Ale bywa też znacznie gorzej. Nie podano tu przecież najboleśniejszych przykładów, czyli epizodów kilku- lub kilkunastogodzinnych opadów nawalnych, w czasie których spada tyle wody co średnio w ciągu miesiąca. W konsekwencji takich wydarzeń zdarza się, że miasto zostaje sparaliżowane na kilkanaście godzin, zniszczeniu ulega olbrzymia część infrastruktury miejskiej, a w skrajnych przypadkach pojawiają się także ofiary śmiertelne. Wiele polskich miast ma takie smutne karty w swojej historii, a częstotliwość tego rodzaju ekstremalnych zjawisk niestety rośnie.

Po każdym takim epizodzie pojawia się cała masa **pytań**. Przede wszystkim o **przyczyny tych przykrych zdarzeń**, o to, czy można było im zapobiec lub przynajmniej ograniczyć ich skutki, i o to, kto zawinił i kto pokryje koszty. Te finansowe, bo kosztów pozafinansowych często nie da się zrekompensować przez lata... Pojawia się też wiele odpowiedzi na te pytania, pochodzących z różnych pod względem wiarygodności źródeł (**każdy się przecież zna na piłce nożnej, polityce i pogodzie, więc poniekąd na powodziach też**). Jeśli jednak potraktować sprawę poważnie, okaże się, że odpowiedź nie zawsze jest prosta i jednoznaczna. I jedno jest pewne: nie da się jej udzielić (oczywiście jeśli mamy na myśli udzielenie odpowiedzi merytorycznej, w sposób odpowiedzialny i poparty znajomością tematu oraz faktów) bez odpowiedniej wiedzy specjalistycznej i bez dobrego rozpoznania warunków na analizowanym obszarze.

I tutaj na arenę wkracza **hydrologia**. W przypadku obszarów miejskich – ta odniesiona do terenów zurbanizowanych.

Bez odpowiedniej **wiedzy** nie dokonamy rzetelnej analizy i oceny przytoczonych wcześniej przykładów. Ale nie chodzi tu tylko o analizy epizodów minionych. Bez znajomości **zasad i metod obliczeniowych hydrologii zlewni zurbanizowanej** nie wykonamy poprawnie żadnego projektu systemu (lub obiektu) do gromadzenia lub odprowadzania wód opadowych, takiego jak np. zbiornik retencyjny, zbiornik

chłonny, zbiornik infiltracyjny, niecka chłonna, ogród deszczowy, zielony dach, system do oczyszczania wód opadowych, instalacje i systemy odwadniające dla budynków, ulic, boisk, centrów handlowych, lotnisk i tak dalej.

– *Ha! Przecież od tego są wytyczne! Każdy może do nich zajrzeć, a potem z nich skorzystać* – powie ironicznie pan Zenek, który sam zrobił przy swoim domu ogród poniekąd deszczowy i nie potrzebował do tego pomocy „fachowców”.



I nawet po części pan Zenek ma rację, ale nie tak do końca, bo sięgając do tego typu zaleceń, trzeba pamiętać o kilku szczegółach. **Po pierwsze:** wytyczne nie biorą się znikąd (ktoś musiał je wszakże „wytyczyć” i wziąć tym samym „na klatkę” odpowiedzialność za podane tam wskazówki). **Po drugie:** takie wytyczne trzeba umieć czytać, a ściślej – poprawnie interpretować i stosować, tak by móc się cieszyć inwestycją trochę dłużej niż do pierwszego deszczu. **Po trzecie:** warto mieć każdorazowo świadomość możliwości i ograniczeń stosowanych metod. I wreszcie – **po któreś tam z kolei:** o ile da się na szybko zorganizować małe oczko wodne lub zbiornik na wodę opadową we własnym ogródku, o tyle zaprojektowanie i wykonanie analogicznych obiektów dla szkoły, centrum handlowego czy całego osiedla nie jest już takie proste. Nierzadko można spotkać przykłady realizacji różnych obiektów, w których projektant dokonał „standardowych, niewielkich założeń upraszczających”, a wykonawca wprowadził „drobne” zmiany w projekcie, dajmy na to, zielonego dachu. Skutki będą niestety bolesne. I kosztowne.

Bez znajomości hydrologii nie wykonamy też poprawnych obliczeń na potrzeby **ochrony przeciwpowodziowej** w mieście (ani też w sytuacjach odwrotnych, czyli na potrzeby **zapobiegania skutkom susz** w miastach). Bez uwzględnienia hydrologii nie możemy w pełni przeanalizować **jakości** wód opadowych spływających z terenów miejskich i ich wpływu (wód, nie terenów) na odbiorniki (czyli miejsca, do których ostatecznie trafiają wody opadowe, np. wody potoków). Nie dokonamy bez niej oceny minionych epizodów (np. w ramach tak zwanych ekspertyz) ani nie podejmiemy odpowiedzialnych decyzji na przyszłość (projektowanie, strategie rozwoju itp.).

Potrzebujemy zatem:

- **wiedzy** – czyli znajomości podstaw teoretycznych, zasad, wzajemnych powiązań, możliwości i ograniczeń;
- **umiejętności** – czyli opanowania warsztatu samodzielnie wykonywanych poprawnych obliczeń, opanowania trudnej sztuki podejmowania decyzji inżynierskich itp.;
- **narzędzi** – czyli metod (równania), pakietów (oprogramowanie), danych do obliczeń (baza danych, mapy itp.);



- **kompetencji** – np. umiejętności pracy samodzielnej i w zespole, poczucia odpowiedzialności za własne oraz wspólne obliczenia i raporty, świadomości konsekwencji swoich decyzji inżynierskich, uzmysłowienia sobie potrzeby ciągłego uczenia się i dokształcania itp.

I to wszystko stanowi właśnie  **cel** naszych spotkań.

To wszystko ma szansę stać się naszym cennym **zasobem na długie i szczęśliwe lata pracy zawodowej**.

Reasumując

Po co nam ta cała hydrologia?

Wiedza: **rozpoznanie i opis** procesów warunkujących obieg wody na obszarze zlewni (opad, spływ, infiltracja itp.), zrozumienie powiązań między nimi

Umiejętności: **obliczanie** ilości wód odpływających z obszaru „miejskiego”:

- kanalizacja deszczowa (projektowanie, weryfikacja, modernizacja)
 - systemy odwodnieniowe (parkingi, drogi i autostrady, hipermarkety, osiedla itp.)
 - przewody, zbiorniki, przepusty, skrzynki rozsączające, rowy, niecki itp.
- planowanie, projektowanie, weryfikacja, ekspertyzy**

i jeszcze więcej umiejętności:

wspomaganie decyzji dla potrzeb zrównoważonego gospodarowania wodą i ochrony przeciwpowodziowej, m.in.:

- ocena dostępności wody w mieście
- przewidywanie i ocena skutków powodzi w mieście
- ocena stref zagrożenia powodzią
- ocena wpływu urbanizacji na ilość i jakość wód
- projektowanie zbiorników retencyjnych i innych obiektów gospodarowania wodą w obrębie terenu zurbanizowanego
- sterowanie obiektami gospodarki wodnej

pomocniczo: analiza zanieczyszczeń wód opadowych

O czym się dowiemy?

Między innymi o tym:

- jak kształtują się opady w przestrzeni miejskiej
 - co się dzieje z wodą opadową na terenach miejskich
 - w jaki sposób i w jakim stopniu urbanizacja modyfikuje spływ wody
 - jak kształtuje się ilość wód opadowych wymagających zagospodarowania
 - jak można wyznaczyć ilość wód stanowiących potencjalny „problem”
 - w jakim stopniu stosowane metody obliczeniowe odzwierciedlają hydrologiczny przebieg procesów
 - kiedy i w jakim stopniu upraszczać obliczenia
 - jak wykorzystywać gotowe narzędzia inżynierskie
- i co z tego wynika**

Część II. Garść (naprawdę mała!) definicji



No to teraz czas na definicje. Spokojnie, będzie krótko. Nikt raczej nie przepada za definicjami, zwłaszcza jeśli trzeba będzie jeszcze je zapamiętać. U nas pojawi się **zestaw mini**, mający za zadanie przypomnienie, doprecyzowanie i usystematyzowanie pewnych informacji, tak by nie było nieporozumień w dalszej części kursu. Będą tylko trzy pojęcia. Z komentarzem. Taki program obowiązkowy. Do życzliwego zapamiętania.

Zlewnia

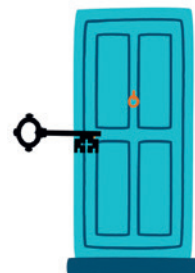
To pojęcie na pewno znamy jeszcze ze szkoły podstawowej, potem średniej, a potem znowu z kursu hydrologii. Przypomnijmy więc tylko:

Zlewnia to

obszar, z którego wszystkie wody spływają do jednego odbiornika.



Odbiornikiem (zwanym niekiedy, jakże mądrze, recypientem) może być potok, rzeka, jezioro, sztuczny zbiornik (jak w hydrologii ogólnej), ale także – w przypadku zlewni zurbanizowanych – kolektor kanalizacji deszczowej, niecka chłonna, rów odwadniający, studnia chłonna czy wręcz nawet pojedynczy wpust deszczowy – wszystko zależy od tego, co aktualnie analizujemy. Przekrój końcowy, przez który prędzej lub później przepłyną wszystkie wody odpływające ze zlewni, nazywać będziemy **przekrojem zamykającym zlewnię**.



Zapamiętajmy, że zlewnia to **obszar**, a zatem teren, obwiedziony jakimiś granicami (nazywamy je **granicami zlewni**, pamiętacie?), o określonym polu powierzchni, kształcie i innych cechach. (Jakich? Będziemy o tym mówić szczegółowo w rozdziale 3).

Warto też zwrócić uwagę na pojawiające się w definicji zlewni określenie „wszystkie”. Wszystkie wody – czyli i te spływające po powierzchni, i te spływające pod powierzchnią terenu. Przypomnijmy, że jeśli granice zlewni określimy tylko na podstawie sytuacji na powierzchni terenu (np. mapy topograficznej + wizji w terenie), będziemy mówić o **zlewni topograficznej**. Jeśli uwzględnimy także sytuację pod powierzchnią terenu, otrzymamy pełną informację o kierunkach spływu wód (co może wpłynąć na modyfikację granic zlewni). Tak wyznaczona zlewnia nosi nazwę **zlewni hydrologicznej**. W zadaniach z zakresu hydrologii obszarów miejskich w praktyce najczęściej będziemy mieli do czynienia z tym pierwszym typem zlewni.

Zlewnia zurbanizowana to

zlewnia, której teren został w sposób istotny poddany działalności człowieka (antropopresja), czego skutkiem jest zmiana charakteru zlewni (granic, spadków, pokrycia terenu itp.), prowadząca do modyfikacji naturalnych warunków obiegu/spływu wód (Weinerowska-Bords 2010).



Skromnie przypomnę, że sama wymyśliłam tę definicję. Ładna, prawda? Pozwala (mam nadzieję) zrozumieć, dlaczego z całej hydrologii wydzielamy jej gałąź, czyli **hydrologię zlewni zurbanizowanej**. No właśnie – dlaczego? Dlatego, że:

zlewnie „miejskie” i zlewnie inne (niezurbanizowane) znacząco różnią się warunkami spływu wód opadowych – m.in. dynamiką (czyli szybkością spływu) i proporcjami między poszczególnymi procesami, a wobec tego do oceny zachodzących w nich zjawisk oraz obliczania ilości spływających wód opadowych potrzebne będzie zastosowanie nieco innego opisu matematycznego, innych wzorów, innych współczynników itp.



Część metod obliczania odpływu z powodzeniem stosowanych dla zlewni niezurbanizowanych (np. zlewni rzecznych) kompletnie nie pasuje do zlewni zurbanizowanych (i z wzajemnością ☺). Niektóre metody można z kolei zastosować do wielu różnych typów zlewni, ale za to trzeba wiedzieć, w jaki sposób prawidłowo wyznaczyć ich parametry (jak się domyślamy, tu będzie *haczyk!*).

Nie ma więc rady – nie da się bezrefleksyjnie stosować dowolnych metod do dowolnych przypadków.

A teraz jeszcze jedna definicja zlewni zurbanizowanej, tym razem według profesora Banasika (Banasik 2009) – czołowej postaci w polskiej hydrologii, autora wielu książek, artykułów i innych opracowań naukowych. Myślę, że już wiecie, dlaczego przytoczyłam najpierw swoją definicję, a dopiero teraz tę drugą – gdybyście przeczytali najpierw definicję profesora, mojej nie chcielibyście już poznać ☺.

Zlewnia zurbanizowana (urbanizowana) (według Banasika) to

zlewnia, w której udział powierzchni nieprzepuszczalnych stanowi – bądź wkrótce będzie stanowić – znaczącą część powierzchni całej zlewni.

Powierzchnie nieprzepuszczalne obejmują drogi, chodniki, parkingi i budynki. Naturalne drogi spływu w zlewni zurbanizowanej są zwykle zastępowane bądź „uzupełniane” uszczelnionymi rynsztokami i rynnami, kanałami burzowymi i/lub innymi elementami inżynierskich systemów odwadniających.



Jak widać, ta definicja odnosi się do zagospodarowania powierzchni zlewni, czyli do tego, po czym poznamy, czy zlewnia jest zurbanizowana, czy też nie. Z uwagi na różne ujęcia tej samej sprawy warto zapamiętać obie definicje, o co oczywiście grzecznie proszę.

Na koniec, reasumując to, co do tej pory napisaliśmy, możemy stwierdzić, że **hydrologia zlewni zurbanizowanej** (*urban hydrology*) to – w sensie formalnym:

interdyscyplinarna nauka o wodzie i jej wzajemnych relacjach z człowiekiem żyjącym w aglomeracji (Jones 1971) lub – prościej – **szczególna gałąź hydrologii odnosząca się do obszarów „miejskich”** (uwaga: w sensie **zagospodarowania terenu**, a nie administracyjnym).

Część III. Równanie na dzień dobry, czyli bilans zysków i strat

Ach, te bilanse... Któż ich nie robi? Bilansujemy stan naszych finansów, zyski i straty przedsięwzięć, znajomości, a niekiedy nawet całe dotychczasowe życie. Bilans jakościowy lub ilościowy – niezależnie od rodzaju dostarcza cennych informacji: pozwala ocenić, podtrzymać lub zmienić kurs, podjąć dobre decyzje na przyszłość.



Tak będzie też w przypadku hydrologii. W kontekście zagadnień, o których mówimy, dokonamy **bilansu ilości wody w zlewni**. Prawie jak w ekonomii – porównamy zyski i straty, po to by móc ocenić, co się dzieje w zlewni – poznać jej potencjał i możliwe zagrożenia z punktu widzenia ilości wody, która jest do dyspozycji. Na tej podstawie można zaś podejmować decyzje, **co z tym zrobić**, czyli **w jakie działania zainwestować**.

Równanie chwilowego bilansu wody w zlewni jest bardzo proste, ale niezmiernie ważne. **Koniecznienależy je zapamiętać**. Będziemy do niego wracać wielokrotnie na różnych etapach naszych analiz. Będzie nam potrzebne do zrozumienia niektórych pojęć i zjawisk. Wreszcie – pod względem ilościowym – będzie punktem wyjścia do prowadzenia dalszych obliczeń.

Bilans wody w zlewni wynika z procesów, jakie w niej zachodzą, a te z kolei są już Wam doskonale znane. Zapewne pamiętacie, **co dzieje się z wodą**, która w wyniku opadu pojawia się w obszarze zlewni. Dla porządku przypomnę, że **całkowita jej ilość** „dostarczona” w trakcie jakiegoś epizodu opadowego **ulega „rozdzieleniu”** (potocznie można by rzec – „spożytkowaniu”) na różne procesy zachodzące na rozpatrywanym terenie. Tę „ilość wody” wygodnie jest każdorazowo definiować jako **wysokość warstwy wody, wyrażoną w milimetrach**. Bilans ilościowy możemy zapisać w formie równania jako:

$$P(t) = L(t) + E(t) + f(t) + R(t) + I(t)$$

przy czym:

P(t) jest tzw. **opadem całkowitym**, czyli wysokością warstwy wody, która spadła na powierzchnię zlewni (czyli, mówiąc potocznie – pewnym „przychodem”),

natomiast:

$L(t)$ to **intercepcja**¹, czyli wysokość warstwy wody zatrzymanej na powierzchni roślinności,

$E(t)$ to **ewapotranspiracja**, czyli wysokość warstwy wody, która odparowała do atmosfery lub została wykorzystana na procesy oddechowe roślin,

$f(t)$ to **infiltracja**, czyli wysokość warstwy wody wnikażąca do gruntu na skutek jego porowatości,

$R(t)$ to **retencja powierzchniowa**, czyli wysokość warstwy wody zatrzymanej na powierzchni zlewni (w jej lokalnych zagłębieniach lub innych obiektach retencyjnych),

$I(t)$ zaś to **reszta**.



Za chwilę się nią zajmiemy, a tymczasem spójrzmy na wymienione **cztery procesy (intercepcję, ewapotranspirację, infiltrację i retencję powierzchniową)**. Wszystkie one łącznie stanowią tzw. **straty opadu**. Można by tu uronić łzę (wszak „strata” zazwyczaj nie kojarzy się z niczym dobrym), ale zupełnie niepotrzebnie. Z punktu widzenia bilansu ilościowego wody w zlewni to przecież bardzo pożyteczne procesy – nie tylko pozwalają **zatrzymać wodę w zlewni** (co stanowi jej cenny potencjał, związany np. z zasileniem wód gruntowych lub dostarczeniem roślinom niezbędnego do życia zasobu), ale także redukują wspomnianą wcześniej „resztę”, czyli nadwyżkę dostarczonej ilości wody ponad to, co zlewnia jest w stanie przyjąć i zatrzymać. **Reszta** bowiem, jako nadmiar, którego już nie da się „skonsumować”, musi ze zlewni odpłynąć. Jest to więc ta ilość wody, która będzie formować **sptyw powierzchniowy**, czyli proces, w którym woda kierowana jest po powierzchni terenu w stronę przekroju zamykającego zlewnię. On też (rzeczony sptyw) bezpośrednio staje się potencjalną przyczyną kłopotów w zlewni. To właśnie sptyw powierzchniowy był powodem „mokrych przygód” bohaterów historii przedstawionych na początku tego rozdziału – studentów odbywających praktykę geologiczną czy też pani Zosi – ofiary bezwzględного i okrutnego kierowcy. Ta ilość wody, która „nie zmieściła się” w naszych „rezerwach” (czyli – specjaliści tacy jak my mogą się nie obawiać formalnych definicji – **nadwyżka opadu całkowitego ponad straty opadu**), nosi nazwę **opadu efektywnego**. Opadem efektywnym nazwiemy więc tę część opadu całkowitego, która przekształcając się w sptyw powierzchniowy, dociera do przekroju zamykającego zlewnię i stanowi odpływ ze zlewni (a zatem – daje niezły „efekt końcowy”). Jest to właśnie $I(t)$ w naszym równaniu bilansowym.

¹ Przy okazji intercepcji pozwolę sobie na drobną uwagę. Jednym z bardzo częstych błędów studentkich w kontekście tego procesu jest twierdzenie, że intercepcja to „pobieranie” czy też „pochłanianie” wody przez rośliny (od razu widzę wtedy roślinki z wielkimi paszczami albo ryjkami, którymi zasysają wodę opadową w trakcie deszczu). Nic z tych rzeczy. Intercepcja to „zatrzymanie” wody na powierzchni roślin – aż tyle i tylko tyle. Roślina, choćby nie wiem jak chciała, nie zdąży w trakcie opadu „pobrać wody” do swojego środka. Mówimy więc tu o tej ilości wody, która nie dotrze do powierzchni terenu, bo wcześniej zatrzyma się na roślinach i z nich potem (kiedyś tam w dalekiej przyszłości) odparuje. Tę porcję wody nazywa się także „stratą przechwytywania” (ale już nie wyobrażajmy sobie, jak taka roślina mogłaby chwycić tą wodę i co z nią potem zrobić...).

Myślę, że nie ma już wątpliwości, dlaczego to równanie będzie dla nas ważne. To ono będzie stanowić punkt wyjścia do oceny, jaka część całkowitej ilości wody dostarczonej do danej zlewni w wyniku opadu będzie z niej odpływać. Tą ilością wody należy się „zaopiekować” – a ściślej – ocenić, na ile stanowi ona zagrożenie, i zawsze przygotować **PLAN**, jak tę wodę zatrzymać lub bezpiecznie odprowadzić.

Równanie bilansu wygląda na pozór banalnie i bardzo prosto. Okazuje się jednak, że prawidłowe policzenie ilości wody, jaka pojawi się na odpływie ze zlewni, jest dużym wyzwaniem inżynierskim. Od **jakości naszych obliczeń, ich wiarygodności i dokładności** zależeć będzie efektywność gospodarowania wodą w zlewni, a w szczególnym przypadku – także jej bezpieczeństwo. **Obliczenia odpływu ze zlewni stanowią punkt wyjścia do projektowania wszystkich obiektów związanych z gospodarowaniem wodą opadową** – poczynając od zwykłych przewodów kanalizacyjnych, poprzez projektowanie odwodnienia różnych obiektów, dobór elementów **błękitno-zielonej** infrastruktury, na ochronie przeciwpowodziowej kończąc. Myślę więc, że specjalistów nie trzeba przekonywać, jak istotne jest, by te obliczenia wykonać poprawnie.



Tymczasem, gdybyśmy zajrzeli choćby do zasobów Internetu, w których roi się od przykładów projektów odwodnienia tego czy tamtego, i gdybyśmy przyjrzeni się bliżej choćby kilku takim opracowaniom, zauważylibyśmy, że problemowi obliczenia ilości wody opadowej podlegającej odprowadzeniu poświęca się zaledwie kilka wierszy, no może pół strony. Większą część opracowania zajmują opisy różnych rozwiązań, dobór spadków, materiałów, karty katalogowe i tak dalej. Paradoksalnie, **obliczenie stanowiące podstawę merytoryczną wszelkich dalszych rozważań najczęściej traktowane jest bardzo rutynowo, bez dokładniejszych wyjaśnień i zagłębienia się w istotę stosowanych założeń**. Najczęściej wykorzystywane są przy tym zwroty typu „przyjęto współczynnik... równy tyle i tyle”, „przyjęto czas trwania deszczu... taki i taki” – i już. Autor takiego opracowania, zapytany, **dla czego** akurat jest tak, a nie inaczej, odpowiedziałby zapewne: „bo tak się robi” lub „bo tak wszyscy robią”.

Dla nas pytanie **dla czego** (i odpowiedź na nie) będzie stanowić myśl przewodnią naszych spotkań. Dokonując pewnego skrótu myślowego, moglibyśmy powiedzieć, że cały kurs hydrologii zlewni zurbanizowanej będzie „sfokusowany” (WOW, jak światowo! ☺) właśnie na te obliczenia. A mówiąc już zupełnie poważnie – wszystkie nasze dalsze analizy i rozważania będą miały na celu:



- **poznanie i usystematyzowanie możliwości obliczeniowych** w tym zakresie;
- **ocenę sensu i skutków wprowadzania uproszczeń** w obliczeniach;
- **uświadomienie sobie wpływu wartości przyjmowanych współczynników na uzyskiwane wyniki**;
- **poznanie procedur obliczeniowych oraz przygotowanie do podejmowania decyzji** dotyczących odpowiedniego i odpowiedzialnego doboru metody obliczeniowej do rozpatrywanego zagadnienia.

Wspaniale, prawda?

Część IV. Urbanizacja? Wielkie halo!

Wszyscy wiemy, czym jest urbanizacja, i nie trzeba tego tłumaczyć. Gdyby zapytać przypadkowego przechodnia – dajmy na to pana Zenka lub panią Zosię z pierwszych stron tego rozdziału – jaki wpływ ma urbanizacja na to, co dzieje się z wodami opadowymi na obszarach zurbanizowanych, prawdopodobnie bez zastanowienia odpowiedzieliby, że współcześnie więcej tych wód spływa ulicami, bo tereny są wybetonowane, wszystko jest uszczelnione, wycięli tyle zieleni i, **panie, kto to widział, żeby uczciwy człowiek nie mógł normalnie przejść przez ulicę, tylko go zaraz ochlapia!** Przekładając to na język bardziej naukowy, czyli taki, który robi lepsze wrażenie na egzaminatorach, a potem na szefie, można powiedzieć tak: w wyniku urbanizacji większą część powierzchni zlewni stanowią tereny nieprzepuszczalne, na skutek czego maleje udział infiltracji w ogólnym bilansie wodnym, a w efekcie maleją „straty opadu”, więc rośnie spływ powierzchniowy. Z kolei mniejsza ilość zieleni (no bo gdzieś te ulice, parkingi, centra handlowe i lotniska trzeba upchnąć) przyczynia się do osłabienia procesów związanych z roślinnością (intercepcja, ewapotranspiracja), a to powoduje – uwaga: zaskoczenie! – mniejsze „straty opadu” i wzrost spływu powierzchniowego.

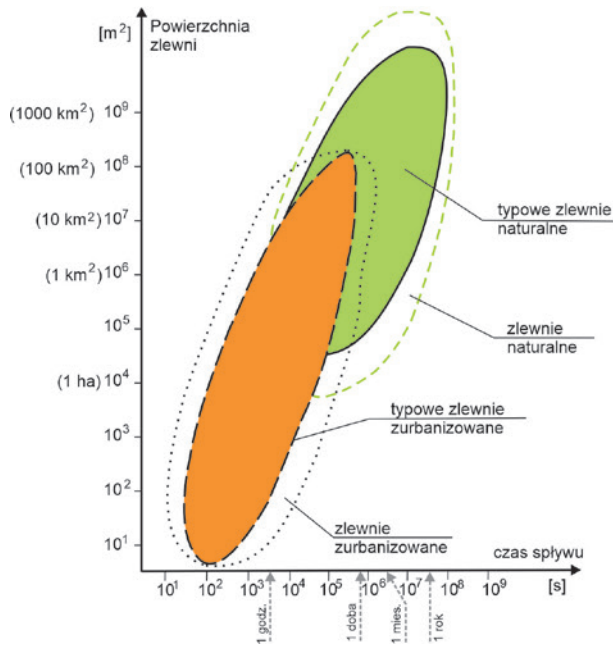
Specjaliści tacy jak my² powinni jednak umieć wskazać nieco więcej cech specyficznych, jakimi zlewnia (z)urbanizowana różni się od tej niepoddanej urbanizacji, i rozumieć ich wpływ na procesy odpływu wody ze zlewni. Zestawmy je więc teraz, czyli poznajmy – uwaga: werble! – **specyfikę zlewni zurbanizowanej**.

W kontekście warunków kształtowania się odpływu wód opadowych do podstawowych cech wyróżniających zlewnie zurbanizowane spośród pozostałych należą:

- 1. stosunkowo małe rozmiary zlewni** – czyli w konsekwencji znacznie mniejsza powierzchnia, z której następuje spływ wody do rozpatrywanego punktu (przekroju zamykającego). Ktoś mógłby powiedzieć, że to przecież dobrze: mniejsza powierzchnia → mniej wody → mniejszy problem. Niby tak, ale niestety jest tu mały haczyk. Wyjaśnienie znajdziemy na wykresie (rys. 1.1), który przedstawia wyznaczoną na podstawie analiz wielu zlewni jakościową relację między wielkością zlewni a czasem odpływu wody ze zlewni. Oczywiście, zlewnie mogą się znacznie między sobą różnić, stąd na wykresie obrazującym relację **rozmiar zlewni** 🏠 *versus* **czas spływu** 🕒 poszczególne typy zlewni reprezentowane są poprzez pewne obszary (zwane dalej plackami). Jeśli za przeciętnego reprezentanta danego typu zlewni wybierzemy punkty ze środka placka, to stwierdzimy, że „typowa” zlewnia nieurbanizowana ma powierzchnię rzędu około 10 km², a spływ z niej trwa około doby. „Typowa” zlewnia zurbanizowana ma natomiast powierzchnię rzędu 1 ha (to około 1000 razy mniejszy placek!), a czas spływu

² Ilekcóż piszę o „specjalistach takich jak my”, przypomina mi się bohater serii książek *Hej, Jędrzek* Rafała Skarżyskiego i Tomasza Lwa Leśniaka. Wszystkim serdecznie polecam ☺. Jego soczysta narracja jest dla mnie niewysychającym źródłem inspiracji i czytelniczej radości, oraz – jak widać – niekiedy także istotnych cytatów.

wynosi zaledwie około godziny lub jeszcze mniej. Ma to poważne konsekwencje: jeśli w zlewni zurbanizowanej wystąpi ulewny deszcz, to praktycznie nie ma już czasu na żadne działania ochronne. Już po kilkunastu minutach od początku silnego opadu w przekroju końcowym może wystąpić kulminacja odpływu. Świadczy to o tym, że zlewnia zurbanizowana jest systemem dużo bardziej dynamicznym;



Rys. 1.1. Porównanie powierzchni i czasów spływu dla typowych zlewni naturalnych i zurbanizowanych (na podstawie: Schilling 1991, Weinerowska-Bords 2010)

- 2. granice zlewni zmodyfikowane** działalnością inżynierską człowieka – o ile w przypadku zlewni niezurbanizowanych granice zlewni powierzchniowej wynikają z ukształtowania powierzchni, które z kolei wpływa na spadki i kierunki spływu, o tyle w przypadku zlewni zurbanizowanych, oprócz czynników naturalnych, na kierunki spływu wód opadowych wpływa też inżynierska działalność człowieka. Człowiek swoim działaniem do pewnego stopnia może modyfikować drogi spływu, przekierowywać wody opadowe do innych odbiorników, a w skrajnych sytuacjach przepompowywać relatywnie duże ilości wód opadowych wzdłuż tras, którymi woda opadowa nigdy by sama z siebie nie popłynęła. Gdyby zatem ktoś stanął przed zadaniem wyznaczenia granic obszaru naturalnego, z którego woda spływa powierzchniowo do określonego przekroju zamykającego, powinien wykorzystać mapę wysokościową – na podstawie układu warstwic wyznaczyć linie grzbietowe i linie spływu i z kolei na tej podstawie określić granice poszukiwanego obszaru (w takich przypadkach mówimy też: granice obszaru **ciągłego** do

danego przekroju). Jeśli jednak mamy do czynienia z obszarem zurbanizowanym, oprócz **mapy wysokościowej** konieczne jest zebranie **dokumentacji** dotyczącej istniejących (i ewentualnie także planowanych) obiektów i systemów związanych ze zbieraniem i odprowadzaniem wód opadowych. Często – ze względu na niekompletność, niejasność lub nieaktualność dokumentacji – zachodzi konieczność **wizji lokalnej** i naocznego stwierdzenia, co naprawdę wykonano w terenie i w jaki sposób faktycznie odbywa się tam odpływ wód. Proces ustalania granic zlewni w obszarze zabudowanym jest więc bardziej kłopotliwy i czasochłonny niż analogiczne działanie w przypadku terenów naturalnych. Krótko mówiąc – w przypadku obszarów zurbanizowanych wymaga to więcej pracy. A chyba specjalistów i pasjonatów hydrologii nie muszą przekonywać, że „jakość” wykonania tego zadania (czyli poprawność określenia przebiegu granic zlewni, a w konsekwencji – kształtu i wielkości analizowanego obszaru) będzie mieć zasadniczy wpływ na dokładność i wiarygodność późniejszych obliczeń. Nieuwzględnienie w obliczeniach jakiegoś fragmentu zlewni na skutek błędnej analizy lub zbyt pochopnego podejścia (choćby do jakiegoś fragmentu terenu leśnego, z którego – jak zapewnia pan inżynier z pewnego biura projektów – „nic nie spłynie, wszystko wsiąknie, bo to las”) może mieć bardzo poważne skutki;

3. **zmodyfikowane lokalne spadki terenu** – dla potrzeb tworzenia terenów pod zabudowę (mieszkaniową, usługową, przemysłową itp.) często konieczne jest lokalne wyrównywanie terenu, niwelowanie zbyt dużych spadków czy nierówności terenu. Istnieje też tendencja przeciwna – celowo tworzone są lokalne skarpy lub sztuczne zagłębienia terenu. Skutkuje to zmianą lokalnych nachyleń powierzchni terenu, a tym samym z jednej strony zmianą prędkości spływu wody, a z drugiej – niekiedy – zmianą możliwości i intensywności infiltracji czy też retencji;
4. **zwiększony udział terenów uszczelnionych i obszarów nieprzepuszczalnych** – już o tym czynniku wspominaliśmy, wiadomo więc, o co chodzi ☺;
5. **relatywnie mniejszy udział terenów zielonych** – to również dość oczywisty skutek działań urbanizacyjnych, prowadzący do zmniejszenia procentowego udziału terenów przepuszczalnych (a tym samym – do **zmniejszenia strat na infiltrację**), ale także do zmniejszenia ilości roślin, a zatem – **zmniejszenia strat na intercepcję**, obniżenia ilości dostarczanej do atmosfery wilgoci (**zmniejszenia parowania i transpiracji**) oraz (uwaga: to często zapominany skutek) **zmniejszenia szorstkości powierzchni terenu**, co prowadzi do zwiększenia prędkości spływu. Czyli – z punktu widzenia bilansu wodnego – same nieszczęścia. Należy więc w tym miejscu dodać trochę optymizmu i przypomnieć, że działania inżynierskie wdrażające ideę błękitno-zielonej infrastruktury w mieście mogą skutecznie zahamować czy wręcz odwrócić te niekorzystne efekty. Są zatem niezmiernie pożądane, a niekiedy po prostu niezbędne;
6. **istnienie systemu kanalizacji deszczowej** – to paradoksalnie także przyczyna pewnych problemów. Woda opadowa „złapana” szybko w przewody kanalizacyjne zamiast spokojnie spływać po relatywnie szorstkiej powierzchni terenu (jak

byłaby to uprzejma czynić, gdyby pozostawiono ją samą sobie), zaczyna się bardzo szybko przemieszczać do przekroju zamykającego. Jest więc wprawdzie ujęta w bezpieczny system zamknięty pod poziomem terenu, ale za to jak zasuwa tym systemem! Jeśli zatem się okaże, że w jakimś miejscu ilość wody dopływającej z różnych obszarów miasta stanie się zbyt duża, nastąpi wylanie, a stąd już tylko krok do kolejnych kłopotów. Istnienie kanalizacji deszczowej powoduje więc **zwiększenie dynamiki spływu wody** w zlewni i znaczące **skrócenie czasu dopływu wody** do przekroju końcowego. Jasna sprawa, że nie będziemy postulować rezygnacji z systemów kanalizacyjnych. Są one niezbędnym elementem racjonalnego gospodarowania wodą opadową w mieście, bo pozwalają (a przynajmniej powinny pozwalać) na bezpieczne odprowadzenie nadmiaru wody, skierowanie wód opadowych do pożądaných odbiorników, zapewnienie w przypadku obiektów inżynierskich (w tym: dróg, lotnisk, boisk, parkingów itp.) bezpiecznego ich użytkowania w różnych warunkach pogodowych czy też umożliwiają zachowanie odpowiednich norm sanitarnych. Należy jednak wyraźnie podkreślić fakt wielokrotnie już zweryfikowany przez naturę: systemy kanalizacyjne nie mogą być jedynymi obiektami gospodarowania wodą opadową. Pomysł z ubiegłego wieku: „złapmy wody opadowe i jak najszybciej się ich pozbądźmy, wyprowadzając je poza nasz teren” nie zdał egzaminu z wielu powodów. Należało go więc zastąpić nowym podejściem: „zatrzymajmy jak najwięcej wody opadowej «u źródła», czyli tam gdzie się pojawia, bo woda ta nie jest PROBLEMEM, ale **CENNYM ZASOBEM**”;

- 7. obecność sztucznych systemów odwodnieniowych** (w tym m.in. kanałów odwadniających) – łatwo się domyślić, że efekty pojawienia się tego typu obiektów są zbliżone do wskazanych z poprzednim punkcie. Jest jednak oczywiste, że w wielu przypadkach system odwodnieniowy stanowi absolutnie konieczne rozwiązanie. Spróbujmy choćby wyobrazić sobie funkcjonowanie w czasie ulewnego deszczu np. lotniska czy autostrady pozbawionych poprawnie działającego odwodnienia (funkcjonowania boisk piłkarskich nie musimy sobie specjalnie wyobrażać – historia dostarczyła nam różnych ciekawych przykładów...). Warto więc pamiętać: systemy odwodnieniowe – oczywiście TAK, ale ze świadomością konsekwencji, poprawnymi obliczeniami i doborem oraz rozpatrzeniem możliwości alternatywnych, zwłaszcza w obecnych czasach, gdy do dyspozycji jest coraz więcej różnych rozwiązań, dodatkowo o wysokich walorach estetycznych i przyrodniczych;

8. **regulacja istniejących naturalnych cieków i potoków** – w kontekście wcześniejszych punktów łatwo przeanalizować wpływ takich zabiegów na dynamikę spływu wody opadowej – pozostawiam to szanownym Czytelnikom do indywidualnej refleksji;
9. **zmodyfikowane pokrycie obszarami wodnymi** – do niedawna związane było najczęściej z działaniami szczególnie popularnymi pod koniec XX wieku, mającymi na celu likwidację wszelkich małych, „dzikich” oczek wodnych lub zagłębień, które były uznawane za brzydkie i niepożądane, a które przecież w czasie opadów mogłyby stanowić dodatkową rezerwę retencyjną wody. Na szczęście obecnie obserwuje się intensywne „przywracanie” wody do miasta, a ściślej – wprowadzanie obiektów – znowu to trzeba powtórzyć – błękitno-zielonej infrastruktury, czyli zbiorników retencyjnych, fontann wykorzystujących wodę opadową, placów wodnych, ogrodów deszczowych, sztucznych otwartych kanałów w miastach i innych obiektów, które z jednej strony poprawiają mikroklimat, estetykę, komfort i warunki życia w mieście, z drugiej zaś stanowią elementy systemu gospodarowania wodami opadowymi i ochrony przeciwpowodziowej;
10. **intensyfikacja terenów komunikacyjnych i przemysłowych** na relatywnie małym obszarze – co w pierwszej kolejności kojarzy się – i słusznie – z potencjalnym większym zanieczyszczeniem powietrza, wody (w tym także opadowej) i gruntu. Ale jest też drugi – rzadziej uświadamiany – aspekt. Silny wzrost urbanizacji na relatywnie małym obszarze może powodować wyraźną lokalną zmianę warunków wilgotnościowych i termicznych w mieście, prowadząc do powstawania tzw. **miejskich wysp ciepła**. Zmiana warunków termicznych i wilgotnościowych (dodatkowe zyski ciepła i wilgoci ze źródeł przemysłowych) powoduje lokalną zmianę kierunków przemieszczania się mas powietrza. Na skutek zanieczyszczeń następuje wzrost koncentracji jąder kondensacji, co skutkuje zwiększeniem częstotliwości tworzenia się chmur burzowych. W efekcie w dużych aglomeracjach miejskich (a nawet w pewnej odległości od nich) obserwuje się odmienne warunki kształtowania się opadu – ściślej: opady intensywne pojawiają się częściej (badania wskazują, że można mówić nawet o 30–40% wzroście!³). A to, przynajmniej, dodatkowo zwiększa problemy związane z wodą opadową w mieście.

³ Więcej o tych badaniach można przeczytać m.in. u Chełmickiego (Chełmicki 2002).

Reasumując

Po co analizować stopień urbanizacji zlewni?

Działania urbanizacyjne w zlewni:

- mniejsze rozmiary zlewni
- zmodyfikowany przebieg granic zlewni
- zmodyfikowane spadki zlewni
- zmodyfikowane pokrycie terenu zlewni – więcej terenów uszczelnionych, mniej zieleni
- zmiany w udziale obszarów wodnych
- istnienie systemu kanalizacji deszczowej
- istnienie systemów odwodnieniowych
- regulacja naturalnych cieków wodnych
- wzrost udziału obszarów przeznaczonych na transport i przemysł – zanieczyszczenia, miejskie wyspy ciepła


prowadzą do:

- zmniejszenia infiltracji
- zmniejszenia intercepcji, parowania, transpiracji
- zmian w retencji powierzchniowej zlewni
- w przypadku dużych aglomeracji – wzrost częstotliwości opadów intensywnych

W konsekwencji:

1. maleją straty opadu ➔ rośnie spływ powierzchniowy (wzrost opadu efektywnego) **czyli więcej wody opadowej trzeba bezpiecznie zagospodarować**
 2. skraca się czas trwania spływu – system staje się bardziej dynamiczny (czyli... „Kruca bomba, mało casu...”⁴)
 3. następuje potencjalny wzrost zanieczyszczeń
-

⁴ Swoją drogą, jestem ciekawa, kto z Was wie, z jakiego filmu pochodzi ten cytat 😊.



Rozdział 2. O modelingu w hydrologii.

Dobry i lepszy model, czyli ogólnie o obliczeniach w hydrologii zlewni zurbanizowanej i co z nich wynika

W tym rozdziale: Ale model! Dobre i lepsze modele w hydrologii. Czy to naprawdę takie ważne? No dobrze, to jak wybrać?

Część I. Ale model!

Do you want to be a top model? – pyta z obcym akcentem jurorka jednego z popularnych programów telewizyjnych, a kandydaci z zaangażowaniem zapewniają, że właśnie o tym marzą, odkąd jako dzieci wykonali pierwsze samodzielne kroki!

Najnowsze stylizacje liderów z branży modelingu światowego przyprawiają o szybsze bicie serca niejednego redaktora, prezenterkę telewizyjną i celebrytę, a także – jak przypuszczam – pewną liczbę „zwykłych obywateli”. Z zupełnie niezrozumiałego dla mnie powodu **modeling w inżynierii środowiska** nie wywołuje podobnej ekscytacji. **Why?** – pytam z niepokojem. Dla większości studentów „modelowanie” w inżynierii kojarzy się z tym samym poziomem szczęścia co – dajmy na to – spotkanie oko w oko ze stonką ziemniaczaną 🐛. Absolutnie niesłusznie, powiadam. **Trzeba to zmienić!** Wszakże i na naszym podwórku możemy znaleźć naprawdę **nieźle modele!** Mogą być dla nas przydatne, mogą też stać się nam bliskie, jeśli tylko będziemy mieć do nich odpowiednie podejście 😊.

Zacznijmy od przypomnienia, że:

model to

pewne **odzwierciedlenie rzeczywistości**, mające na celu odwzorowanie wybranych cech i właściwości oryginału, który „naśladuje”.

Nie bójmy się więc spojrzeć prawdzie w oczy i zapamiętajmy, że

model – choćby nie wiadomo jak piękny – to tylko kopia, która odtwarza jakąś ograniczoną część prawdy o rzeczywistym obiekcie.

Dobry (czy raczej: **odpowiedni**, **dobrze dobrany do naszych potrzeb**) model powinien **jak najlepiej odwzorowywać te cechy (zależności, procesy), które w danym przypadku są kluczowe** z punktu widzenia analizowanego problemu, może zaś pomijać pozostałe właściwości oryginalnego obiektu, które akurat w danym zadaniu nie są istotne.

Modele stosowane w inżynierii środowiska są **klasyfikowane** według różnych (naprawdę imponujących) kryteriów. Osoby zainteresowane rozszerzeniem lub pogłębieniem wiedzy w tym zakresie, a także tych wszystkich, którzy podobnie jak **Herkules Poirot** lub **Adrian Monk** kochają uporządkowanie i systematyczność, zachęcam do sięgnięcia do innych publikacji, w których można znaleźć przegląd i usystematyzowanie różnych typów modeli¹. Dla nas i dla tych, którzy nie mają tak nieposkromionych detektywistycznych ambicji, istotne będzie tylko kilka spośród tych kryteriów – zostaną one zaprezentowane poniżej.

Jak zapewne pamiętamy, **odzwierciedlenie rzeczywistości** można uzyskać na różne sposoby. Możemy np. wykonać **kopię rzeczywistego obiektu**, zazwyczaj o zredukowanych wymiarach (i często także uproszczonej strukturze), i umieścić ją np. w laboratorium lub na wystawie. W ten sposób można stworzyć model zapory wodnej z Włocławka, model dzikiej rzeki z aquaparku czy też – z innej beczki – figurę woskową znanej postaci z Muzeum Madame Tussaud. Taki typ modelu nazywamy **modelem fizycznym**. Kopia istnieje naprawdę, można jej dotknąć, powąchać ją, zrobić sobie przy niej zdjęcie i wrzucić je na Facebooka, a nawet – w niektórych przypadkach – przeprowadzić z jej użyciem ważne eksperymenty w laboratorium (np. pomiary przepływu wody przez zaporę), które dostarczają cennych informacji na temat działania obiektu rzeczywistego oraz pozwalają rozwiązać istotne zadania inżynierskie.

W zależności od tego, co chcemy osiągnąć (z badać, zmierzyć), nasz model musi być wykonany w myśl określonych zasad, by dobrze spełnił swoją rolę. **Figura woskowa Herkulesa Poirota powinna możliwie wiernie imitować jego postać** (w tym wypadku wykreowaną przez określonego aktora), ale jedynie w sensie wizualnym.

¹ Jako szczególnie przydatne w przypadku naszych rozważań mogą polecić książki *Hydrologia stosowana* (Ozga-Zielińska i Brzeziński 1997) oraz *Wpływ uproszczeń na obliczanie spływu deszczowego w zlewni zurbanizowanej* (Weinerowska-Bords 2010).



Nie oczekujemy przecież, że model naszego detektywa pomoże nam rozwiązać zagadkę świątecznego puddingu.



Jeśli jednak chcielibyśmy stworzyć **model fizyczny zlewni**, który nie tylko stanowiłby makietę danego terenu, ale też pozwoliłby wykonać w laboratorium pomiary przebiegu zjawisk hydrologicznych, to byłoby to już znacznie trudniejsze zadanie! Pojawia się tu bowiem **problem skali**, w której nie tylko trzeba odtworzyć wymiary fizyczne obiektu, lecz także w odpowiedniej proporcji odwzorować inne parametry, takie jak np. szorstkość powierzchni, współczynnik filtracji gruntu czy retencja roślinności, tak aby dynamika przebiegu procesów była podobna do rzeczywistej. Na dziś jest to praktycznie chyba jeszcze niemożliwe do zrobienia. Fizyczne modele zlewni mogą być przydatne do celów pokazowych (czyli do odzwierciedlenia rzeczywistości w sensie jakościowym – *proszę zobaczyć, tu pada*

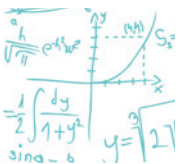
deszcz, tu woda się zatrzymuje, tu wsiąka, a tu – o, reszta sphywa...). Stworzenie dobrego fizycznego modelu zlewni, który umożliwiłby badania **ilościowe**, jest dużym wyzwaniem na przyszłość.

Innym podejściem do odzwierciedlania rzeczywistości może być zastosowanie **modelu analogowego**. Jak sama nazwa wskazuje, taki model bazuje na pewnej analogii „naszego” systemu do systemu odmiennego pod względem fizycznym, ale podobnie się zachowującego i dającego się opisać zbliżonymi zależnościami matematycznymi. W praktyce zatem bezpośrednio badamy coś innego, ale wyciągamy wnioski na temat naszego obiektu. Klasycznym przykładem zastosowania modelu analogowego z zakresu inżynierii środowiska jest badanie przepływu filtracyjnego pod zaporą na podstawie analogii do przepływu prądu elektrycznego². Takich możliwości jest jednak niewiele, gdyż najczęściej trudno jest znaleźć odpowiednią analogię, nie będziemy więc poświęcać im więcej czasu.

Najczęściej stosowanym i bardzo przydatnym typem modeli wykorzystywanych w inżynierii środowiska są **modele matematyczne**. Na nich się teraz skupimy, bo będą dla nas podstawowym narzędziem rozwiązywania zadań i to właśnie je musimy pokochać i przyjąć jak swoje. W sensie formalnym:

model matematyczny to

matematyczny opis związków pomiędzy wyróżnionymi przez badacza cechami rzeczywistego obiektu (systemu).



² Zainteresowanym Czytelnikom proponuję lekturę odpowiedniego rozdziału w starym skrypcie *Laboratorium z mechaniki płynów i hydrauliki*, w którym opisano doświadczenie wykonywane drzewiej w ramach zajęć z hydrauliki (Biernacki i in. 1995).

Opis ten może w najprostszych przypadkach wyrażać się zwykłym **wykresem** lub **pojedynczym wzorem**, a w bardziej złożonych zagadnieniach może mieć postać skomplikowanych **układów równań różniczkowych cząstkowych**, do których rozwiązania niezbędne jest wykorzystanie narzędzi numerycznych. Ale **spokojnie, nie wpadajmy w panikę!** Nawet jeśli zadanie będzie wymagało zastosowania takich metod, nikt nam nie będzie kazał (przynajmniej nie na zajęciach z hydrologii zlewni zurbanizowanej) pisać samodzielnie programów komputerowych i poświęcać nocy na przypominanie, o co chodziło dokładnie w tych metodach różnic lub elementów skończonych. Świat się o nas zatroszczył i mamy obecnie do dyspozycji wiele przydatnych (niekiedy nawet bezpłatnych!) narzędzi wspomagających pracę inżyniera, w tym oprogramowanie do rozwiązywania nawet relatywnie bardzo złożonych problemów odpływu wody ze zlewni.

Nasze zadania będą natomiast następujące:

- **posiąść odpowiednią wiedzę** na temat problemów hydrologicznych w zlewni;
- **zrozumieć sedno** zadania inżynierskiego;
- **umieć ocenić** wymagany w danej sytuacji stopień dokładności opisu zjawisk;
- **dobrać** odpowiednie **narzędzie obliczeniowe**,

a na koniec:

- **skonstruować model, przeprowadzić obliczenia, przeanalizować wyniki i wyciągnąć wnioski.**

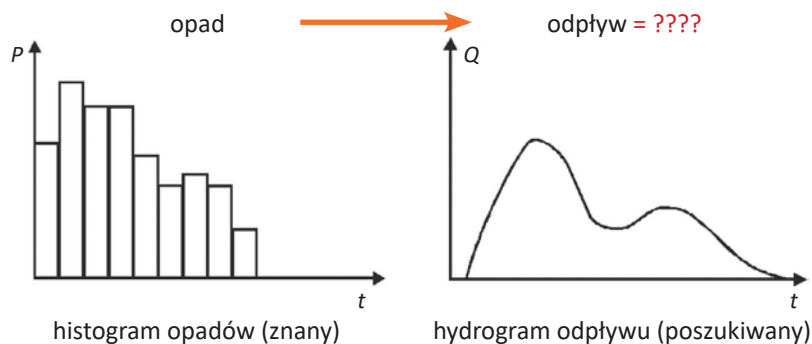
I już! Nieźle, prawda? I choćby nie wiem jak przerażająco to teraz brzmiało, już niedługo (bo pod koniec naszego kursu) będziecie potrafili tego dokonać!

A zatem **odwagi i cierpliwości!**

Podsumujmy teraz informacje i ustalmy, co tak naprawdę będzie naszym głównym zadaniem do rozwiązania.

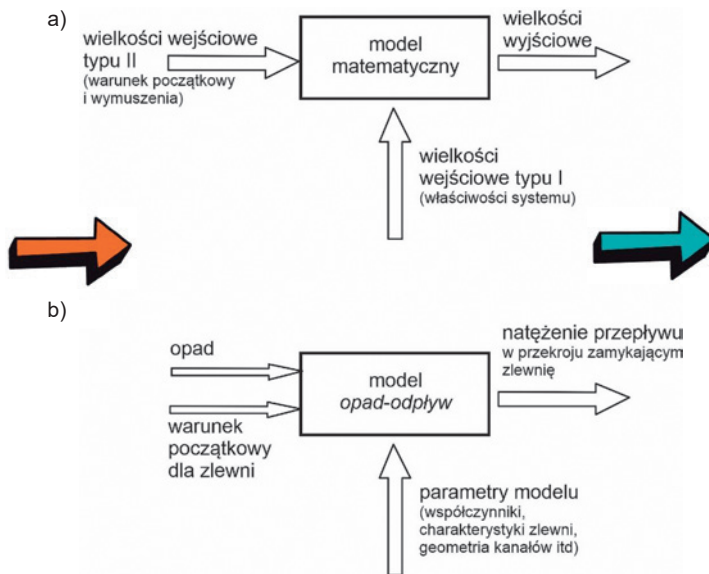
Nasze zadanie

Otóż będziemy dążyć do tego, by **stworzyć dla analizowanej przez nas zlewni model matematyczny umożliwiający wykonanie obliczeń odpływu wód opadowych spowodowanego określonym deszczem**, jaki wystąpił w naszej zlewni (rys. 2.1). W skrócie będziemy go nazywać **modelem opad-odpływ**.



Rys. 2.1. Schematyczne przedstawienie zadania opad-odpływ

Strukturę takiego modelu można przedstawić tak, jak to pokazano na rys. 2.2. Umieszczony w centralnej części każdego ze schematów prostokąt można sobie wyobrazić jako fikcyjne pudełko, w którym umieszczone są wszystkie potrzebne **równania** wiążące ze sobą wielkości, które do pudełka są „wprowadzane” i które „z niego wyjdą”, czyli **wielkości wejściowe do modelu** (wielkości charakteryzujące własności systemu oraz warunki początkowe i brzegowe – tzw. wymuszenia) i **wielkości wyjściowe**. W przypadku modelu opad–odpływ wielkości charakteryzujące system to wszystkie potrzebne parametry i współczynniki charakteryzujące zlewnię (tzw. charakterystyki zlewni i kanałów), a wymuszeniem jest informacja o opadzie, czyli o przyczynie całego zamieszania. Informacją wyjściową będzie odpływ ze zlewni, który jest jednocześnie celem naszych obliczeń.



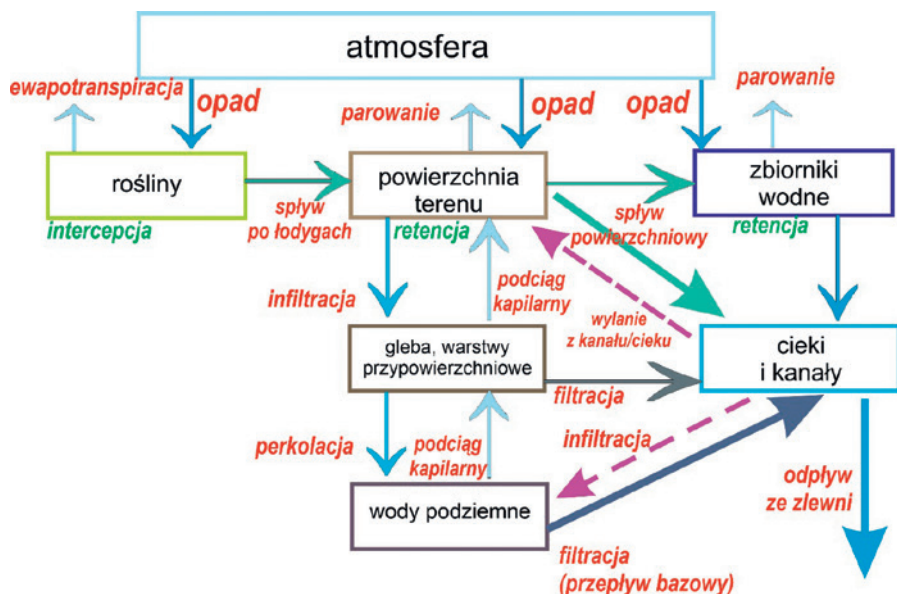
Rys. 2.2. Schemat modelu matematycznego: a) ogólny; b) dla zagadnienia opad–odpływ (Weinerowska-Bords 2010)



Jak się do tego zabrać?

Uświadommy sobie najpierw, że proces kształtowania się odpływu ze zlewni jest w ogólnym przypadku bardzo złożony i zależy od wielu czynników.

Stanowi on efekt wypadkowy naturalnych procesów kształtujących obieg wód w przyrodzie oraz działań inżynierskich człowieka. Schematycznie można to przedstawić jak na rys. 2.3. Złożoną siatkę procesów można zatem ująć w postaci grafu, który – chociaż i tak dość skomplikowany – przedstawia rzeczywistość ze sporym uproszczeniem.



Rys. 2.3. Podstawowe procesy składowe w formowaniu się odpływu ze zlewni – schemat

Specjalistów takich jak my nie trzeba przekonywać, że *inaczej należy podejść do obliczeń dla potrzeb doboru przydomowego zbiornika na deszczówkę lub odwodnienia boiska szkolnego, a inaczej do przygotowania strategii ochrony przeciwpowodziowej całego miasta.*

Dlatego też musimy dysponować wachlarzem (czy też – bardziej artystycznie – paletą 🎨) możliwości, czyli różnymi modelami, z których będziemy mogli wybrać najbardziej odpowiedni. Zanim jednak przejdziemy do prezentacji konkretnych dostępnych modeli i kryteriów ich wyboru, przedstawimy ich generalną klasyfikację – podział na dwie ważne grupy.



Część II. Dobrze i lepsze modele w hydrologii. Czy to naprawdę takie ważne?

Uwaga, teraz potrzebne będzie skupienie 🧠!

Będzie to najważniejszy podział modeli matematycznych z punktu widzenia naszych dalszych analiz. Takie absolutne **MUST KNOW**, **MUST HAVE** i w ogóle wszystkie inne **MUST** na naszym kursie. Taki klucz 🔑 do zrozumienia dalszych rozważań i jednocześnie pewniak na teście 📌. Mam nadzieję, że Was zachęciłam 😊.

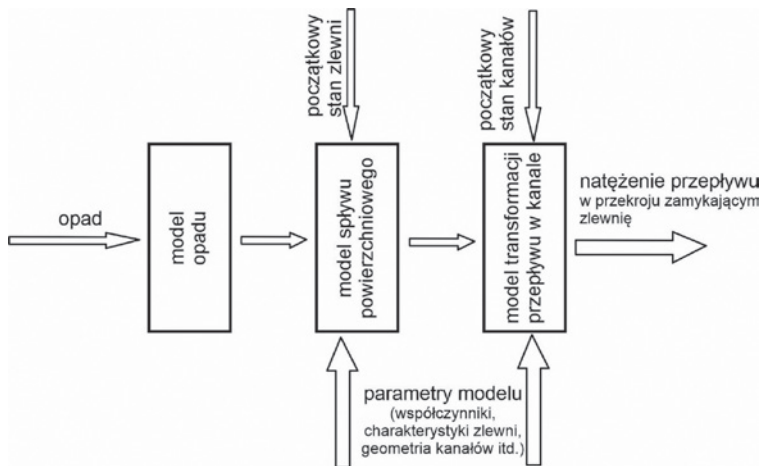
Modele matematyczne dla zagadnień opad–odpływ możemy **podzielić na globalne i zintegrowane**.

Modele globalne to takie, w których całość skomplikowanych procesów opisujemy **łącznie (jednym równaniem)**.

W **modelach zintegrowanych** proces odwzorowania przebiegu zjawisk jest kilkuetapowy – **rozdzielamy poszczególne procesy**, a cały **model** zostaje **złożony (zintegrowany) z odpowiedniej liczby modeli cząstkowych**, opisujących poszczególne procesy (etapy transformacji opadu w odpływ).

W kontekście przedstawionych wcześniej schematów modeli (rys. 2.2) **model globalny** można przedstawić jak na rys. 2.2b, pomijając przy tym warunek początkowy w zlewni (Dlaczego? Zaraz to wyjaśnimy!) oraz wyraźnie zaznaczając, że w środku pudełka znajduje się **tylko jedno równanie**, wiążące opad z odpływem ze zlewni. Jeśli dodam do tego, że równanie to jest bardzo proste, wręcz liniowe, zawiera zazwyczaj zaledwie cztery lub pięć elementów, a rozwiązanie da się uzyskać na kartce papieru, czyli bez zaprzęgnięcia złożonego oprogramowania – to już wystarczy, by do tych modeli zapałać **szczerą miłością** ❤️.

Pamiętajmy, że **uczucia warto jednak lokować rozsądnie**, zanim więc podejmiemy jakiegokolwiek decyzje, przyjrzyjmy się także kandydatowi numer 2.



Rys. 2.4. Schemat najprostszego modelu zintegrowanego – modele cząstkowe w modelu opad–odpływ (Weinerowska-Bords 2010)

Model zintegrowany można schematycznie przedstawić jak na rys. 2.4. Widzimy na nim poszczególne modele cząstkowe, których liczba może ulegać zmianie w zależności od potrzeb. W najprostszym ujęciu model zintegrowany składa się

z trzech modeli wewnętrznych, odpowiadającym trzem głównym etapom transformacji opadu w odpływ:

- **uformowanie opadu efektywnego** (informacja wejściowa do modelu: opad całkowity; informacja wyjściowa: opad efektywny);
- **transformacja opadu efektywnego w spływ powierzchniowy** (wejście: opad efektywny w zlewni; wyjście: hydrogram spływu powierzchniowego);
- **transformacja przepływu w kanałach** (wejście: dopływ do kanałów w postaci spływu powierzchniowego; wyjście: hydrogram odpływu z kanałów, czyli ostatecznie także hydrogram przepływu przez przekrój zamykający zlewnię).

No i? Czy to naprawdę takie ważne?

Tak!

Pozwólcie, że nieco rozwinę tę myśl. Przyjrzyjmy się naszym dwóm modelom:



kandydatowi nr 1, którym jest model globalny,

i **kandydatowi nr 2** – modelowi zintegrowanemu.



Na pierwszy rzut oka widać, że modele zintegrowane są bardziej złożone niż globalne (*ale odkrycie!*). Nie trzeba już dalej tym okiem rzucać, by się domyślić, że w konsekwencji będą one bardziej praco- i czasochłonne, będą wymagały więcej danych, a opisujące je równania już nie będą takie proste, liniowe i łatwe w zastosowaniu. Jednym słowem –

istny koszmar!

Nasz ściśły umysł natychmiast podsunie nam myśl, że

muszą być jednak gdzieś jakieś zalety, no bo co w końcu, kurczę blade!

– że tak zacytuję klasyka³. Oczywiście, nie zawiedziemy się. Nagrodą za dodatkowy nakład pracy, konieczność zmierzenia się z bardziej zaawansowanym aparatem matematycznym i wszystkie inne pozorne niedogodności będzie znacząco lepsza – bardziej dokładna, lepiej odzwierciedlająca rzeczywisty przebieg procesów – informacja wynikowa. Czyli jak zwykle – coś za coś!

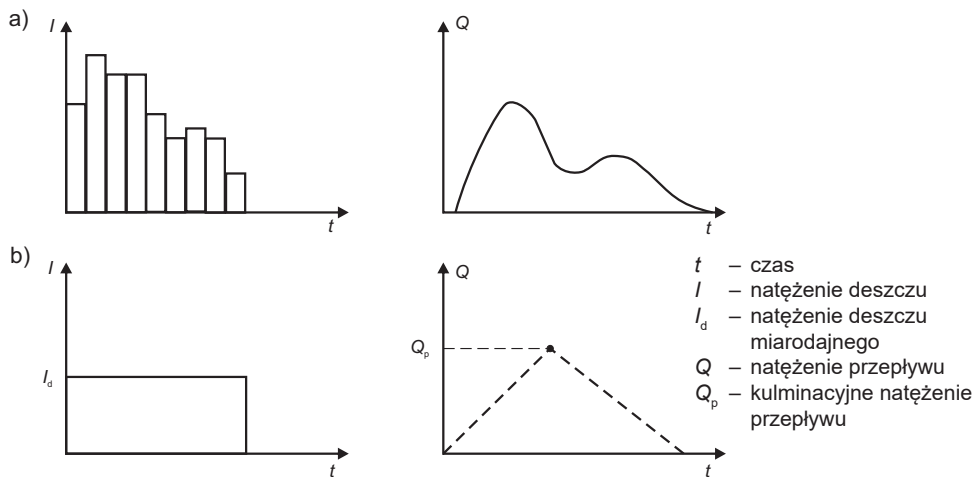
My specjaliści powinniśmy umieć zestawić najistotniejsze różnice pomiędzy tymi dwiema kategoriami modeli. Chociaż przygotowanie pełnej listy powierzam indywidualnej pracy każdego Czytelnika, poniżej przedstawiam kilka kluczowych uwag:

1. Modele zintegrowane pozwalają na uwzględnienie w obliczeniach **zmienności czasowej** analizowanych zjawisk (zarówno dane o opadzie, jak i wyniki hydrogramów są funkcjami zmiennymi w czasie), podczas gdy w modelach globalnych i opad

³ Oczywiście powołuję się tu na mojego ulubionego Mikołajka z serii książek Goscinnego i Sempégo.

(wejście), i odpływ (wyjście) wyrażone są jedną wartością liczbową (odpowiednio: natężeniem opadu, które zakłada się jako stałe w czasie danego epizodu, oraz natężeniem przepływu w przekroju końcowym zlewni, które rozumiane jest jako szczytowa wartość hydrogramu odpływu) (rys. 2.5). Z tego też powodu w przypadku modeli globalnych nie podajemy warunku początkowego, bo stan zlewni z założenia nie zmienia się w czasie. Za pomocą modeli globalnych nie dowiemy się, jakie jest np. tempo spływu, jak kształtuje się fala na odpływie, kiedy wystąpi maksimum i czy jest ono np. efektem niekorzystnego nakładania się maksimum fal pochodzących z kilku różnych części zlewni. To bardzo ważna „ułomność” tych modeli, w wielu przypadkach decydująca o wyborze typu modelu.

2. W modelach globalnych wkładamy wszystko razem do jednego czarnego pudła (lub bardziej formalnie – czarnej skrzynki; czarnej, bo nie widać szczegółów, tego, co jest w środku). Modele te nie rozpatrują więc żadnych procesów **w sposób indywidualny**, a to oznacza, że nie da się na ich podstawie dowiedzieć np., jakie były proporcje udziału infiltracji bądź retencji roślinnej w całym procesie transformacji opadu w odpływ czy też w jakim stopniu retencja obniżyła kulminacyjne natężenie spływu powierzchniowego. W wyniku zastosowania modeli globalnych uzyskamy tylko jedną wartość wynikową – natężenie przepływu w chwili kulminacji na odpływie.



Rys. 2.5. Zmienność w czasie w modelach: a) zintegrowanych; b) globalnych

3. Parametry wprowadzane do modelu globalnego są bardzo nieliczne i dodatkowo muszą mieć stałą wartość w czasie (patrz punkt 1). Oznacza to, że różne cechy skomplikowanego systemu, jakim jest zlewnia, muszą być wyrażone w postaci zaledwie kilku liczb reprezentujących całość zachodzących w niej procesów. Jasne jest więc, że jest to odwzorowanie bardzo niedokładne, a parametry – same w so-

bie bardzo proste – trudno będzie dobrać tak, by w miarę poprawnie oddały ogół cech zlewni.

4. Wyniki uzyskiwane przy wykorzystaniu modeli globalnych są bardzo wrażliwe na wartości wprowadzanych danych (pamiętamy, że równanie ma prostą, liniową postać). Słaba jakość wprowadzonych danych bardzo silnie wpływa na pogorszenie jakości wyników. Pomimo dużej prostoty modelu należy zatem dołożyć wszelkich starań, by wartości parametrów wyznaczyć możliwie najlepiej i biorąc pod uwagę jak największą liczbę przesłanek. Pochopny lub zbyt automatyczny i schematyczny dobór parametrów (tak często niestety obserwowany w wielu opracowaniach) może decydować o bardzo miernej jakości wyników.
5. Niezależnie od dołożonych starań sama struktura modeli globalnych i czynione u ich podstaw założenia sprawiają, że wyniki są zawsze **niedokładne**⁴ i mogą być traktowane jedynie szacunkowo. Może trudno w to uwierzyć, ale uzyskanie za pomocą modeli globalnych błędu w wynikach na poziomie 50–100% nie jest rzadkie! Warto sprawdzić to w obliczeniach praktycznych, by wyczulić się na potencjalne błędy, które tak łatwo w tych modelach popełnić.

No dobrze, ponarzekaliśmy trochę na każdy z modeli. Jak widzimy, *trudno o ideał!* Teraz przedstawimy kilku przedstawicieli modeli, na razie tylko z nazwy. Jak sądzę, niejednen z nich wyda się Czytelnikom znajomy z kursu hydrologii ogólnej. W dalszej części naszych spotkań będziemy je dokładniej omawiać, przypominać i doprecyzowywać w kontekście zagadnień odpływu ze zlewni zurbanizowanej.

Przykłady modeli stosowanych w zagadnieniu opad–odpływ

Modelowanie zintegrowane (różne modele do różnych procesów/etapów spływu), np.:
modele hydrodynamiczne

- model fali dynamicznej (równania de Saint-Venanta)
- model fali dyfuzyjnej
- model fali kinematycznej

modele konceptualne

model hydrogramu jednostkowego

modele zbiornikowe

Modelowanie globalne (jedno równanie opisujące całość procesów), np.:

- metoda stałych natężeń deszczu
 - metoda natężeń granicznych
 - metoda współczynnika opóźnienia odpływu
-

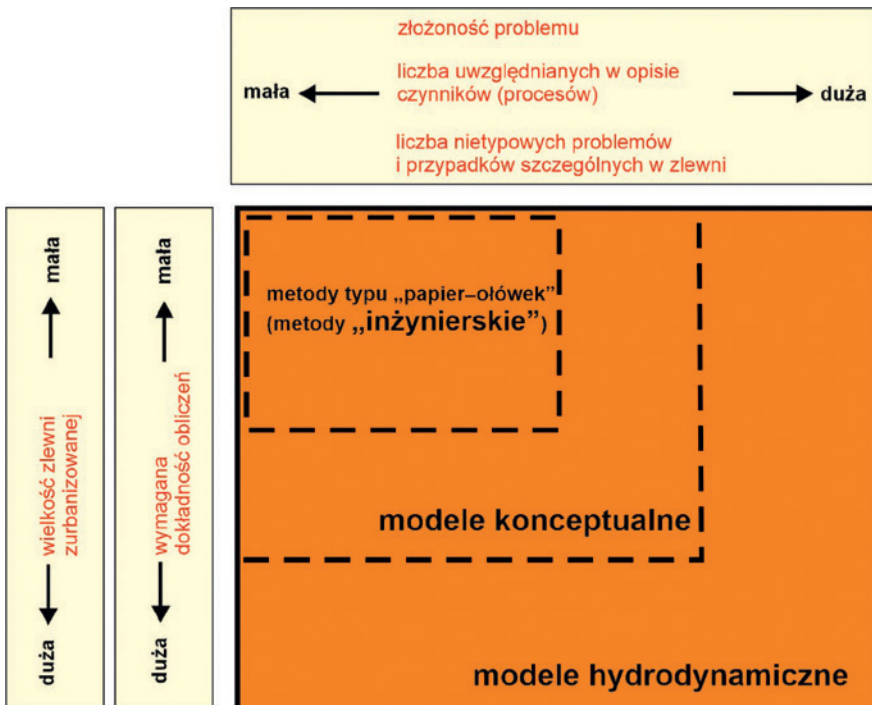
⁴ Warto przy tej okazji podkreślić, że niestety każdy model jest do pewnego stopnia niedokładny. Żaden z dostępnych modeli nie oddaje w pełni skomplikowanego przebiegu procesów. Warto jednak zauważyć, że modele zintegrowane z racji swej struktury, postaci równań opisujących procesy i wprowadzanych danych są znacząco bardziej dokładne niż modele globalne, pod warunkiem że zostaną prawidłowo opracowane i wykorzystane.

Część III. No dobrze, to jak wybrać?



Wiemy już, że tworząc lub wybierając model spośród dostępnych możliwości, powinniśmy wiedzieć, które cechy (procesy, właściwości) są dla nas kluczowe (tj. których pominięcie sprawiłoby, że nasze rozwiązanie utraciłoby sens lub wymaganą dokładność), a które są w danym przypadku pomijalne. Innymi słowy – musimy wiedzieć, czego chcemy, czego oczekujemy, jakie są nasze kryteria, co jest dla nas w danym momencie ważne, czyli... *samo życie!*

Aby zdecydować, jaki typ modelu zastosować w konkretnej interesującej nas sytuacji, możemy się na początek zapoznać z pewnymi pomocniczymi kryteriami, jakie warto wziąć pod uwagę. Pomoże nam w tym schemat przedstawiony na rys. 2.6.



Rys. 2.6. Kryteria wyboru modelu, czyli który model jest właściwy (Weinerowska-Bords 2010)

Warto też wspomnieć, że w naszym wyborze nie jesteśmy pozostawieni sami sobie, porzuceni na pastwę inżynierskiego losu. Na szczęście istnieją pewne wskazówki i wytyczne, które do pewnego stopnia wymuszają na autorach obliczeń dokonanie bardziej racjonalnych wyborów. Z jednej strony wytyczne te stanowią cenną pomoc i podpowiedź, z drugiej – zapobiegają całkowitej dowolności w wykonywaniu obliczeń. Należy jednak pamiętać, że

to autor obliczeń jest odpowiedzialny za prezentowane wyniki.

Wytyczne są istotnym punktem odniesienia, ale nie uchronią przed potencjalnymi błędami albo sytuacjami nietypowymi, w których potrzebne jest indywidualne podejście. Dzisiaj od dobrego inżyniera oczekuje się umiejętności krytycznej oceny sytuacji, zdolności do podejmowania odpowiedzialnych decyzji oraz do dyskusji i uzasadniania założeń stosowanych w obliczeniach. Tłumaczenie *bo tak jest w wytycznych* lub *bo wszyscy tak robią* w wielu przypadkach nie jest już wystarczające.

Przedstawimy jednak aktualne (stan na luty 2022 r.) zalecenia w kwestii wyboru modelu obliczeniowego (*uwaga: sprawa do zapamiętania!*, czyli z cyklu „pewniak na teście”⁵):

Zalecenia dotyczące wyboru pomiędzy modelami globalnymi a zintegrowanymi

Dla zagadnień dotyczących **systemów kanalizacyjnych** (PN-EN 752:2017-06):

modele globalne – wybieramy je tylko wtedy, gdy naszym celem jest **projektowanie** (wymiarowanie) **małych standardowych układów** i obiektów odwodnieniowych (zlewnia maks. 200 ha, całkowity czas spływu do 15 min), np.:

- kanałów odwodnieniowych
- kolektorów deszczowych
- urządzeń na sieci kanalizacyjnej
- prostych systemów odwodnienia dróg

modele bardziej złożone (zintegrowane) (konceptualne, hydrodynamiczne) – wybieramy je w pozostałych przypadkach, w tym m.in. przy:

- projektowaniu większych systemów odwodnieniowych
- ekspertyzach i weryfikacji działania istniejących systemów
- prognozowaniu przepływów/odpływów
- ocenie wpływu urbanizacji na ilość/jakość wody
- projektowaniu większych zbiorników
- ocenie i redukowaniu zagrożeń powodziowych
- ocenie możliwości i wpływu regulacji terenów zalewowych
- sterowaniu w systemach odwodnieniowych



Dla zagadnień dotyczących **hydrologii cieków wodnych** (Banasik i in. 2017): „metoda symulacyjna”, czyli **modelowanie zintegrowane**

⁵ Pamiętajmy, że wytyczne, normy i zalecenia ulegają zmianom. Co więcej, w różnych regionach mogą obowiązywać dodatkowe zalecenia władz lokalnych. Należy więc każdorazowo weryfikować ich aktualność.

Podsumowanie

Wiemy już, że model modelowi nierówny, a sam **wybór odpowiedniego kandydata** nie jest sprawą trywialną (**skąd my to znamy?**). Wiemy też, że warunki, jakie powinien spełnić model, zależą od celu naszych poszukiwań, czyli od problemu, który chcemy rozwiązać. Wyboru pomiędzy modelem globalnym a zintegrowanym należy dokonać już na początku procesu obliczeniowego, bo w zależności od podjętej decyzji będziemy potem **poruszać się innymi ścieżkami** „procedur obliczeniowych”. Pamiętajmy też, że w ramach danej kategorii (np. modeli globalnych) mamy jeszcze do dyspozycji kilku różnych przedstawicieli. Warto więc wiedzieć, czym się różnią od siebie, jakie założenia są czynione na poszczególnych etapach obliczeń, jakie parametry trzeba będzie wyznaczyć i na podstawie czego, tak by możliwie najbardziej świadomie podejmować decyzje obliczeniowe i móc potem lepiej „bronić” swoich wyników. O tym będziemy jeszcze rozmawiać. Tymczasem liczę na to, że zachęcę Czytelników do poszukiwania i wyrabiania w sobie tej **inżynierskiej wrażliwości, spostrzegawczości i swoistej „partyzanckiej czujności” przy podejmowaniu własnych decyzji** lub przy ocenie obliczeń, których jesteśmy odbiorcą. Być może zdarzy się kiedyś, że ktoś z nas zapała gwałtownym afektem do jakiegoś przedstawiciela handlowego, który zaoferuje nam (za darmoszkę!) długopis, firmowe dropy i nośnik danych z bezpłatnym oprogramowaniem z logo reklamowanej firmy. Zanim entuzjastycznie przyjmiemy, że oferowany nam program do obliczania tego czy tamtego rozwiąże wszystkie nasze obecne i przyszłe problemy inżynierskie, przypomnijmy sobie, że to tylko pewien model matematyczny, odwzorowujący jakąś część rzeczywistości z określoną i ograniczoną dokładnością. Sprawdźmy więc, jakie założenia poczyniono przy jego tworzeniu, jakie równania zastosowano, jak dobrano współczynniki, do jakich produktów się odnosi (czy np. tylko do systemów danego producenta, czy też jest bardziej uniwersalny) i – w konsekwencji – które zadania można spokojnie przy jego użyciu rozwiązywać, a do których nie powinien być stosowany. Wykażmy inżynierską ostrożność i **lokujmy nasze zawodowe uczucia z rozważą** 😊.



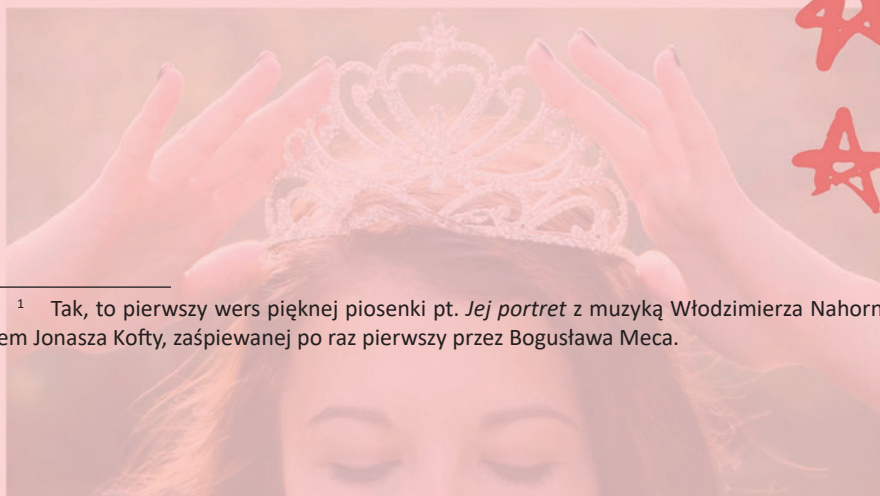
Rozdział 3. *Naprawdę jaka jesteś, nie wie nikt¹, czyli jak opisać zlewnię i po co?*

W tym rozdziale: Casting na najpiękniejszą? Dość istotne wymiary. Jakie kształty są najlepsze? Z górki na pazurki. Z wierzchu może trochę szorstka, ale za to jaka głębia... W sieci kanałów.



Część I. Casting na najpiękniejszą?

Pamiętam, że w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku jako dziecko chętnie oglądałam wybory *Miss Polonia* (wyborów „Misterów” jakoś sobie z tamtych czasów nie przypominam ☺). Na tle szarej rzeczywistości poprzedniego ustroju widok pięknie (choć czasem dosyć skąpo) ubranych dziewczyn, ich makijaże, taniec i wizja „zawojowania świata” w przypadku zwycięstwa stanowiły przyjemną **odskocznnię od chropawej prozy życia**. Panie na scenie obowiązkowo zapewniały, że kochają dzieci, zwierzęta i w ogóle cały świat przyrody ożywionej oraz że od dziecka marzą o czynieniu dobra dla ludzkości. Komentatorzy (czyli, jak wtedy się mówiło, konferansjerzy) podawali ich dane osobowe oraz – co ważniejsze – wymiary: jeden wzdłuż oraz trzy wszcz (pierwszy najlepiej duży, drugi mały, a trzeci – w idealnym przypadku taki sam jak ten pierwszy, czyli też duży, acz nienachalny). Na widowni zasiadało **wysokie jury** – w większości niższe i zdecydowanie mniej kształtne niż kandydatki, za to przekonane o swych bezdyskusyjnych kwalifikacjach do oceniania prezentujących swe wdzięki pań, a tym samym także do wpływania na ich przyszłe losy (że o wpływie na samoocenę tych dziewcząt nie wspomnę). Dopiero jakiś czas później dotarło do mnie, jak straszne są to konkursy...



¹ Tak, to pierwszy wers pięknej piosenki pt. *Jej portret* z muzyką Włodzimierza Nahornego i tekstem Jonasza Kofty, zaśpiewanej po raz pierwszy przez Bogusława Meca.

Opis (ocena, analiza) zlewni w zagadnieniach hydrologicznych to na szczęście

nie *casting na najpiękniejszą*

Zlewnię oczywiście także trzeba opisać („obmierzyć” i „ocenić”), ale nie w subiektywnych kategoriach: „piękna”, „ładna”, „nie w moim typie”. Ocena zlewni nie szereguje jej w jakimś rankingu, ale ma służyć *zupełnie innemu celom*.

No właśnie – jakim?

W ten sposób docieramy do zasadniczego pytania:

po co opisywać zlewnię?

Jako odpowiedź nasuwają mi się *trzy najistotniejsze powody*.

Powód nr 1

Czy pamiętacie, jak we wcześniejszych rozdziałach analizowaliśmy wstępnie, od czego zależy przebieg procesów hydrologicznych w zlewni? Stwierdziliśmy wtedy, że wiele (większość) z nich zależy od specyficznych cech konkretnego obszaru, w odniesieniu zarówno do uwarunkowań naturalnych, jak i do podjętej na tym terenie działalności człowieka. I to w zasadzie wystarczy, by sformułować pierwszy powód: opisu zlewni dokonujemy po to, aby *rozpoznać sytuację*, uchwycić cechy obszaru, które decydują o intensywności i dynamice procesów hydrologicznych, a w konsekwencji – by *poznać* „możliwości i ograniczenia” danej zlewni, czyli jej *potencjał i ewentualne zagrożenia*, jakich możemy się spodziewać.

Powód nr 2

Czy pamiętacie, jak w poprzednim rozdziale mówiliśmy o dobrych i lepszych modelach? Wskazaliśmy wtedy, że dla potrzeb realizacji obliczeń odpływu ze zlewni, obok samego modelu (czyli w naszym przypadku – równań opisujących transformację opad–odpływ) potrzebne są informacje wejściowe do modelu, w tym m.in. dane dotyczące zlewni. Jak je pozyskać? Ano właśnie w trakcie przeprowadzonego wcześniej etapu sporządzania tzw. *charakterystyki zlewni*. Tym razem jednak nie wystarczy opis słowny. Aby coś policzyć, potrzebujemy liczb. (*Zapiszcie to sobie, bo wyszła mi mądrość, o jaką bym się nie podejrzewała!*) Ściślej – potrzebujemy informacji o *cechach zlewni wyrażonych w postaci liczbowej*. Tylko wtedy możemy obliczyć ilość wody biorącej udział w poszczególnych procesach, w tym najważniejszym: odpływie ze zlewni. W konsekwencji będziemy mogli zaprojektować systemy zagospodarowania lub odprowadzania wody opadowej, ocenić bardziej konkretnie zagrożenie powodziowe, wyznaczyć strefy zalania itp. Jest to dla nas najistotniejszy powód opisywania zlewni.

Powód nr 3

Czy zastanawialiście się kiedyś, na jakiej podstawie stwierdzamy, że dwie osoby są do siebie podobne? Zazwyczaj odnosimy się do wyglądu zewnętrznego lub do charakteru. Szukamy wówczas pewnych cech (w wyglądzie lub osobowości), które są jednakowe. Im więcej tych cech znajdziemy, tym za bardziej podobne uznamy oceniane przez nas osoby. Czy to jednak oznacza, że tych dwoje ludzi w każdej sytuacji zachowuje się tak samo? Niekoniecznie, chyba że łączy ich naprawdę duża liczba cech, które weźmiemy pod uwagę.

Analogiczna sytuacja występuje w przypadku zlewni. Możemy z dużym prawdopodobieństwem przypuszczać, że dwie **zlewnie**, które są do siebie **podobne pod względem hydrologicznym**, będą w zbliżony sposób „reagować” na wymuszenia, czyli – innymi słowy – spodziewamy się podobnego przebiegu procesów hydrologicznych. Jeśli więc dla zlewni, którą się aktualnie zajmujemy, znajdziemy dobrze rozpoznaną zlewnię do niej podobną, wiele cennych informacji będziemy mogli pozyskać, stosując **metodę analogii** hydrologicznej. Jak jednak ocenić, czy dwie zlewnie rzeczywiście są do siebie podobne? Otóż trzeba wyznaczyć i porównać jak najwięcej ich cech. Im więcej z nich będzie zgodnych, tym bardziej uzasadnione będzie twierdzenie o podobieństwie tych zlewni. Warto tu wyraźnie podkreślić: **należy wyznaczyć parametry opisujące zlewnię pod względem liczbowym** (czyli te, o których wspominaliśmy przy okazji powodu nr 2), a nie kierować się na przykład ocenionym na oko kształtem lub zagospodarowaniem zlewni czy też przynależnością do jednego regionu. Zlewnie potoków miejskich w Gdyni wcale nie są do siebie podobne, mimo że znajdują się na obszarze tego samego miasta. Zlewnie dopływów tej samej rzeki górskiej nie muszą być do siebie podobne tylko dlatego, że mają tego samego recypienta. (Pamiętajcie, co to? Jeśli nie, wróćcie do rozdziału 1).

Czas na małe podsumowanie dotychczasowych rozważań:

Charakterystyki zlewni to zespół parametrów zlewni, czyli wielkości, które w sposób liczbowy opisują najistotniejsze cechy zlewni.

Cechy zlewni wpływają m.in. na:

- obieg wody w zlewni
- ilość i jakość wody odpływającej ze zlewni
- dynamikę procesów w zlewni

Charakterystyki zlewni wyznaczamy po to, aby:

- poznać właściwości zlewni, jej „potencjał” i ewentualne zagrożenia
- móc obliczać ilości wód odpływających (szczególnie w zlewniach niekontrolowanych!) – może to być ocena ilościowa zasobów, zagrożeń powodziowych itp.
- poszukiwać podobieństw, analogii, tendencji (np. metoda analogii)

A teraz przechodzimy do dalszej części, czyli: **jak opisać zlewnię**, a ściślej: **z jaką dokładnością** to uczynić i **za pomocą jakich parametrów**?

Zacznijmy od pierwszej części tego pytania: **jak dokładnie?**

Otóż – **tak jak trzeba**, w zależności od celów, dla których to czynimy.

Ogólna zasada, jaką powinniśmy się kierować, mówi, że im więcej charakterystyk określimy, tym lepiej i dokładniej rozpoznamy zlewnię, a zatem nasze wyniki obliczeń i wnioski będą lepiej uzasadnione. Nie zawsze jednak wymagane jest wyznaczanie wszystkich znanych nam parametrów, jakimi możemy opisać zlewnię. Czy pamiętacie nasze rozważania z poprzedniego rozdziału na temat **modeli globalnych i zintegrowanych**? W zależności od tego, jaki typ modelu wybierzemy i jakie konkretnie metody zastosujemy (a to – pamiętajmy – powinno wynikać z charakteru naszego zadania), potrzebujemy większej lub mniejszej liczby parametrów wynikających ze specyfiki tych metod. Jasne jest więc, że w przypadku metod globalnych wystarczy kilka podstawowych charakterystyk (ale wówczas – przypomnijmy – nie możemy oczekiwać cudów i żądać precyzyjnych wyników obliczeń), podczas gdy w modelach zintegrowanych ich liczba jest znacznie wyższa, a proces ich wyznaczania z reguły bardziej czasochłonny. Ale wiemy już, dlaczego to robimy i jakie są konsekwencje naszych wyborów dokonywanych na tym etapie, więc nie powinniśmy żałować ewentualnego czasu poświęconego na przygotowania do obliczeń.

A teraz skupmy się na drugiej części zadanego powyżej pytania, czyli: **za pomocą jakich parametrów** możemy opisać zlewnię? Lista możliwości jest tu bardzo duża. O ile w przypadku modeli globalnych mamy stosunkowo nieliczną grupę parametrów wspólnych (lub zbliżonych) dla poszczególnych metod, o tyle w przypadku modeli zintegrowanych zarówno liczba, jak i zróżnicowanie parametrów są znacznie większe i są one bardziej dobrane do konkretnych metod obliczeniowych. Wygodniej jest więc tę drugą grupę parametrów (występujących w modelach zintegrowanych) opisywać dopiero na etapie przedstawiania konkretnych metod obliczeniowych.

Niezależnie jednak od wybranych metod szczegółowych można przedstawić pewien ogólny obraz zagadnienia, a także listę najbardziej podstawowych parametrów opisujących zlewnię.

Przypomnijmy zatem na początek, że wszystkie parametry (czy też charakterystyki) zlewni można zaklasyfikować do kilku podstawowych kategorii.



Podstawowe kategorie charakterystyk zlewni:

- położenie geograficzne
 - geometria zlewni
 - ukształtowanie powierzchni i charakterystyki wysokościowe
 - pokrycie, zagospodarowanie i użytkowanie terenu
 - gleby i cechy litologiczne podłoża
 - charakterystyka sieci hydrograficznej (naturalnej i sztucznej)
 - struktura hydrogeologiczna
-

Dokładny opis poszczególnych kategorii i parametrów do nich zaliczanych można znaleźć w co najmniej kilku dobrych książkach dotyczących hydrologii². Należy pamiętać, że nie wszystkie parametry (w tym także nie każda z wymienionych wyżej kategorii) są w tej samej mierze istotne w zlewni naturalnej i zurbanizowanej. O najistotniejszych *różnicach* obu tych typów zlewni wspominaliśmy już w rozdziale 1. Możemy więc sobie dość łatwo wykoncytować, że – przykładowo – jeśli na obszarze miejskim istnieje gęsta sieć sztucznych przewodów prowadzących wody opadowe, to wyznaczane na ich podstawie parametry sieci hydrograficznej niekoniecznie będą zgodne z prawami cieków, które zostały opracowane dla naturalnych sieci rzecznych. Jeśli z kolei na jakimś obszarze zabetonujemy całą powierzchnię terenu, to cechy gleb i litologii podłoża staną się zdecydowanie mniej istotne niż w zlewni naturalnej. Należy zatem pamiętać, by sporządzając charakterystykę zlewni, nie wyznaczać parametrów w sposób automatyczny, gdyż później możemy dokonać ich mylnej interpretacji. Korzystając więc ze stosunkowo obszernej literatury dotyczącej wspomnianego tematu, powinniśmy każdorazowo dostosowywać liczbę oraz sposób wyznaczania i interpretacji parametrów do sytuacji w analizowanej zlewni. Więcej na ten temat można znaleźć m.in. w książce *Wpływ uproszczeń na obliczanie spływu deszczowego w zlewni zurbanizowanej* (Weinerowska-Bords 2010).

Omówimy teraz kilka podstawowych charakterystyk zlewni, które będziemy wykorzystywać w naszych obliczeniach.

Część II. Dość istotne wymiary. Jakie kształty są najlepsze?



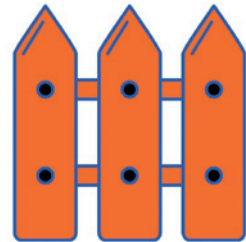
Wprawdzie, jak już mówiliśmy, opis zlewni to nie casting na najpiękniejszą, ale jej wymiary i kształt niestety trzeba scharakteryzować. Obie te grupy parametrów należą do kategorii **geometria zlewni**.

Podstawową wielkość charakteryzującą „rozmiar” zlewni stanowi oczywiście **pole powierzchni zlewni (A)** – bardzo ważny parametr, silnie determinujący odpływ wód opadowych. Jest oczywiste, że im większa jest powierzchnia roz-

² Na przykład: *Hydrologia stosowana* (Ozga-Zielińska i Brzeziński 1997) oraz *Hydrologia dynamiczna* (Soczyńska 1997).

patrywanego obszaru, tym większa będzie ilość wody opadowej, która trafi na naszą zlewnię – tym większa może być zatem także ta objętość wody, którą trzeba odprowadzić bądź zagospodarować. Jednak nie dajmy się zbyt szybko zwieść pozorom – ten ostatni wniosek nie jest tak oczywisty, jak się wydaje. Oprócz samej wielkości zlewni istnieje jeszcze bowiem cała masa innych czynników, które dopiero działając łącznie, zdecydują o tym, co się stanie z wodą, która trafi na teren zlewni w wyniku opadów. Na pewno też pamiętamy z rozdziału 1, że im większa zlewnia, tym dłuższy jest zazwyczaj czas dopływu wód opadowych do przekroju zamykającego zlewnię, co z kolei może pozytywnie wpłynąć na obniżenie dynamiki spływu ze zlewni (a to z punktu widzenia bezpieczeństwa jest dobrą wiadomością).

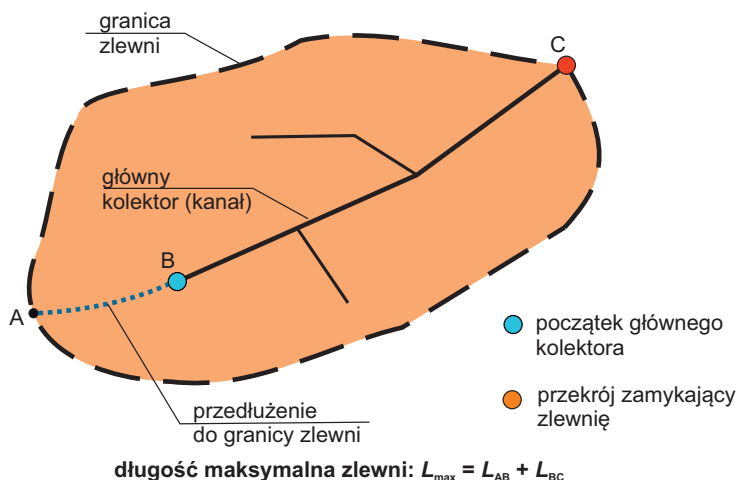
W dzisiejszych czasach wyznaczenie powierzchni zlewni na podstawie mapy nie nastręcza większych trudności. Pamiętajmy jednak, że **aby poprawnie wyznaczyć powierzchnię jakiegokolwiek obszaru, trzeba wcześniej prawidłowo określić jego granice**. Wracamy tu znowu do uwag z rozdziału 1, w którym wspominaliśmy, że wyznaczenie granic zlewni zurbanizowanej może być trudniejsze niż w przypadku zlewni naturalnej. Miejmy to zawsze na uwadze.



Kolejnym istotnym parametrem opisującym zlewnię jest jej **długość**, która może być definiowana w różny sposób. Jedną z możliwości jest określenie tego parametru jako długości odcinka prostego łączącego punkt na cieku (kolektorze) w przekroju zamykającym zlewnię z najbardziej oddalonym punktem na działce wodnym. Z kolei profesor Soczyńska podaje, że długość zlewni to długość odcinka linii prostej przechodzącej przez oś zlewni. Żadna jednak z tych definicji nie będzie dla nas szczególnie przydatna, zauważmy bowiem, że nie oddają one w żaden sposób uwarunkowań spływu wód w zlewni. Mówiąc precyzyjniej – drogi spływu wody mogą być zupełnie inne niż wskazane wcześniej linie. Wspomniane definicje odnoszą się zatem do obszaru zlewni rozumianego ściśle w sensie figury geometrycznej. A my potrzebujemy czegoś więcej. Dlatego też znacznie ważniejszą informacją będzie dla nas tzw. **długość maksymalna zlewni** (L_{\max}), która jest długością doliny głównego cieku (lub trasy głównego kolektora), mierzoną **wzdłuż cieku (kolektora), od punktu** leżącego na granicy zlewni na przedłużeniu osi cieku (kolektora) **do punktu** końcowego w przekroju zamykającym zlewnię. Dzięki przyjęciu takiej definicji długość maksymalna odzwierciedla jednocześnie długość pewnej wybranej trasy spływu wody w zlewni, a zatem mówi nam coś nieośmielnie o drodze, jaką woda będzie miała w rzeczywistości do przebycia (rys. 3.1).

Warto przy tej okazji podkreślić, że **długość maksymalna zlewni** określona według powyższej definicji wcale **nie musi być najdłuższą trasą**, jaką woda ma do przebycia w zlewni. Co więcej, nie musi też być trasą najtrudniejszą, a zatem taką, której pokonanie zabierze wodzie najwięcej czasu. Będzie to miało kluczowe znaczenie w dalszej części naszych rozważań, czyli w rozdziale, w którym będziemy się silnie koncentrować. *(Ta część już wkrótce. Możecie zacząć przygotowywać się do tej lek-*

tury psychicznie i fizycznie. Spakujcie plecak. Zróbcie kanapki 😊). Miejcie więc to w pamięci, kochani Czytelnicy! 😊



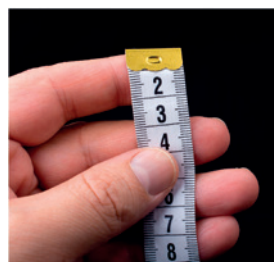
Rys.3.1. Graficzna interpretacja długości maksymalnej zlewni

Kolejnym parametrem jest **szerokość zlewni (B)**, definiowana najczęściej jako stosunek powierzchni zlewni do jej maksymalnej długości (czyli $B = A/L_{\max}$). Będzie to dla nas również bardzo pomocna wielkość.

I w końcu ostatnim parametrem z grupy wielkości opisujących rozmiary zlewni jest długość działu wodnego lub inaczej – **obwód zlewni**, który jednak w przypadku zlewni zurbanizowanych nie pełni tak istotnych funkcji jak w przypadku zlewni naturalnych.

No dobrze, wymiary zlewni z grubsza znamy – i co dalej?

Teraz możemy się pokusić o ocenę **kształtu** geometrycznego zlewni. To zadanie trudne, ale istotne. Łatwo możemy wyobrazić sobie kilka zlewni o tym samym polu powierzchni, ale o zupełnie różnych kształtach. Warunki i dynamika spływu wód w takich zlewniach będą zupełnie inne. Dość szybko dochodzimy więc do wniosku, że kształt zlewni będzie miał znaczenie. Ale *jak go wyrazić w sensie liczbowym?*



Dla zlewni naturalnych wyznacza się całą rodzinę tzw. wskaźników kształtu, które liczbowo oceniają, *jak bardzo zlewnia swoim kształtem zbliżona jest do regularnych figur, takich jak koto lub kwadrat*. Dla potrzeb naszych analiz wystarczy choćby jeden, najprostszy wskaźnik tego typu. Więcej wskaźników przyda się, jeśli będziemy poszukiwać zlewni podobnych (pamiętamy: im więcej podobnych cech, tym lepiej). My skupmy się na jednym:

będzie nim **wskaźnik formy** C_f , definiowany jako stosunek szerokości zlewni do jej długości maksymalnej, czyli $C_f = B/L_{\max}$. Ponieważ niekiedy wygodniej jest stosować jego odwrotność, wprowadźmy jeszcze na nasz użytek **współczynnik wydłużenia zlewni**, rozumiany jako $r_L = L_{\max}/B$. Zauważmy, że oba wskaźniki pozwalają nam ocenić relację między długością maksymalną a szerokością zlewni. Im większą wartość przyjmuje współczynnik wydłużenia, tym zlewnia jest... bardziej wydłużona. (*I znowu wielkie odkrycie!* 😊). Tym samym można sądzić, że jest bardziej bezpieczna, gdyż na uformowanie się maksymalnego natężenia odpływu w przekroju końcowym będzie potrzebny dłuższy czas.

Do grupy modeli globalnych należy jeden, bardzo popularny w Polsce, w którym konieczna jest ocena wydłużenia zlewni, gdyż od niego zależy wartość parametrów przyjmowanych do obliczeń.



Zamiast dokonywać tej oceny „**na oko**” (*uwierzcie mi, wielu inżynierów niestety tak robi!*), lepiej po prostu wyznaczyć wspomniane wskaźniki.

Za zlewnie **przeciętne** pod względem wydłużenia uznaje się te, dla których współczynnik wydłużenia wynosi około 2,0. Zlewnie o niższych wartościach współczynnika wydłużenia, szczególnie jeśli jest on zbliżony do 1,0, nazywane są **zwartymi**, a te o wyższych wartościach – **wydłużonymi**.

Podsumujmy zatem:

Długość maksymalna zlewni L_{\max} – długość głównego ciek (liczona wzdłuż tego ciek) wraz z przedłużeniem do granicy zlewni (po najbardziej prawdopodobnej linii)

Szerokość zlewni B – stosunek pola powierzchni zlewni do jej długości maksymalnej

Kształt zlewni – określany jest przez tzw. *wskaźniki kształtu*, czyli parametry porównujące kształt zlewni do kwadratu lub koła

Współczynnik wydłużenia: $r_L = L_{\max}/B$

- $r_L \approx 2$ – zlewnia przeciętna pod względem wydłużenia
- $r_L > 2,5$ – zlewnia wydłużona (tym bardziej, im współczynnik większy)
- $r_L < 1,5$ – zlewnia bardziej zwarta od przeciętnej (im bliżej wartości 1, tym bardziej zlewnia przypomina kształtem kwadrat lub koło)

Część III. Z górki na pazurki

Kolejną grupę parametrów wpływających na przebieg procesów spływu wód opadowych w zlewni stanowią wielkości opisujące **układ wysokościowy**. O ile same wartości rzędnych poszczególnych punktów nad poziomem terenu mają znaczenie drugorzędne (oprócz tego, że mogą w pewnym stopniu wpływać na kształto-



wanie się opadów), o tyle ich rozłożenie przestrzenne i wynikające z tego **spadki terenu** mają już niebagatelne znaczenie. Bardzo ważną sprawą jest jednak odróżnienie **spadku odnoszącego się do wybranej linii** (najczęściej linii spływu, nazywanej także ścieżką spływu w zlewni) od **uśrednionego spadku danego terenu**, odnoszącego się do całej analizowanej zlewni lub jej wybranego fragmentu. W ogólnym przypadku to dwie różne wartości.

Jak to wyjaśnić, by nie było żadnych wątpliwości?

Wyobraźmy sobie, że zamierzamy pojeźdźać na nartach, sankach, snowboardzie lub cymkolwiek innym, na czym można zjechać, niekoniecznie mieszczącym się w kategorii „sprzętu zimowego” ☺.

Wybraliśmy sobie stosowną górkę, na niej odpowiedni stok i trasę zjazdu, i zaczynamy zabawę. *Narysujmy sobie w wyobraźni linię naszego zjazdu.* O tym, czy trasa jest obiektywnie stroma, czy łagodna, zadecyduje wartość nachylenia tej konkretnej linii do płaszczyzny poziomej. Będziemy wówczas mówić o spadku naszej linii zjazdu. Oczywiście, może on być mniej więcej jednakowy wzdłuż całej trasy bądź też może być odcinkami zmienny. W zależności od potrzeb możemy więc wyznaczyć uśredniony spadek całej trasy albo podzielić sobie tę linię na segmenty i policzyć osobno spadki poszczególnych odcinków. Zawsze jednak policzone wartości będą dotyczyły *tej konkretnej linii*. Nie będą one reprezentować całej góry, całej dzielnicy ani całej miejscowości, w której zjeżdżamy sobie po stoku. To samo odnosi się do każdej wybranej linii spływu wody w naszej zlewni, w tym również do odcinków, na których woda płynie w kanale. Chcąc policzyć spadek takiej linii lub jej wybranego segmentu, będziemy potrzebować rzędnych punktu górnego i dolnego (początku i końca danej linii lub jej segmentu) oraz długości poziomego odcinka będącego rzutem naszej trasy na płaszczyznę poziomą (długość danego odcinka na mapie). **Spadek linii spływu** (lub jej wybranego segmentu) możemy zatem wyznaczyć z formuły:

$$i_s = \frac{H_g - H_d}{L_s}$$



gdzie: H_g – rzędna (dna kanału lub powierzchni terenu) w przekroju górnym analizowanego segmentu [m]

H_d – rzędna (dna kanału lub powierzchni terenu) w przekroju dolnym analizowanego segmentu [m]

L_s – długość analizowanego kanału lub odcinka linii spływu pomiędzy przekrojami górnym i dolnym (mierzona w poziomie)

Taki spadek możemy wyznaczyć w stosunku do dowolnej linii wykreślonej na terenie naszej zlewni, w tym także dla dowolnej ścieżki spływu, a takich jest w naszej zlewni nieskończenie wiele. Zazwyczaj więc będziemy do analiz wybierać pewną linię szczególną, którą nazwiemy *krytyczną linią spływu*. Co to w praktyce oznacza, powiemy w kolejnym rozdziale (tym, w którym będziemy się koncentrować ☺).

A co, jeśli chwilowo nie interesuje nas żadna konkretna linia spływu, tylko chcielibyśmy w sposób ogólny scharakteryzować pod względem spadku całą naszą zlewnię lub jakiś jej fragment?

Na wspomnianym terenie może się znajdować wiele znacząco różniących się od siebie linii spływu, my zaś dążymy do uzyskania wartości reprezentatywnej dla całego interesującego nas obszaru. Przykładem konkretnej sytuacji, w której zachodzi taka potrzeba, może być wybór wartości parametru n dla potrzeb obliczenia współczynnika opóźnienia w metodzie statycznych natężeń deszczu. (Jeśli nie znacie tej metody, to wspaniale – w jednym z kolejnych rozdziałów będziemy o niej mówić. A jeżeli znacie, to bardzo prawdopodobne, że we wspomnianym przed chwilą rozdziale okaże się, że nie do końca, i też będzie ciekawie ☺). Wartość parametru n zależy od tego, czy zlewnia ma łagodne, średnie bądź duże spadki. Jak to ocenić, skoro w różnych miejscach lokalne spadki mogą być bardzo zróżnicowane?

W takiej sytuacji czym prędzej wyzbywamy się pokusy, by ocenić to „na oko”, i wyznaczamy **spadek zlewni** rozumiany **w sensie obszarowym**, a nie liniowym. Istnieje kilka metod jego wyznaczenia (bardziej lub mniej dokładnych), ale my – dla potrzeb naszych obliczeń – wybierzemy najprostsze podejście. Pamiętajmy jednak, że wyznaczona w ten sposób wartość cechuje się dużym przybliżeniem i uśrednieniem, czyli stanowi zaledwie **zgrubnie wyznaczoną wartość reprezentatywną dla całego naszego obszaru**. Nie wyznaczajmy jej więc dla potrzeb jazdy na sankach, bo na pewno się nie przyda ☺.

Uśredniony spadek zlewni można wyznaczyć z formuły znanej w literaturze pod nazwą formuły Hortona i Czerkaszyna lub formuły Kajetanowicza:

$$i_z = \frac{\Delta H}{\sqrt{A_z}}$$





w której ΔH jest tak zwaną deniwelacją, czyli różnicą wysokości między najwyższej i najniższej położonymi punktami na granicy zlewni, natomiast A_z jest polem powierzchni zlewni.

Pamiętajmy przy tym o kontroli jednostek, w jakich podstawiamy wspomniane wartości. Jeśli deniwelację podstawimy w metrach, a powierzchnię zlewni w kilometrach kwadratowych, wówczas uzyskamy wynik w promilach, który – w razie potrzeby – możemy przeliczyć na procenty lub wyrazić spadek bezwymiarowo.

Warto przy tej okazji wspomnieć, że za „przeciętne” spadki zlewni można uznać wielkości w okolicach 4%. Według literatury niemieckiej za tereny o najmniejszych spadkach uznaje się te poniżej 1%, o najwyższych zaś – powyżej 10%. Niestety, ocena opisowa spadku („mały”/„średni”/„duży”) obarczona jest sporym stopniem subiektywizmu.

Część IV. Z wierzchu może trochę szorstka, ale za to jaka głębia...

Kolejne dwie grupy parametrów bardzo silnie wpływających na przebieg procesów spływu stanowią te opisujące **pokrycie terenu**, a ściślej – jego **szorstkość**  i jego **zdolności retencyjne** , oraz **cechy podłoża** (gleby) wpływające na **przepuszczalność**.

Łatwo się domyślić, że cechy te z jednej strony będą oddziaływać na prędkość spływu, a z drugiej – stwarzać lub blokować możliwości zatrzymania wody w zlewni, w tym infiltracji (wsiąkania w podłoże gruntowe). Celowo w tym ostatnim przypadku wspominam jedynie o możliwości, bo o tym, czy i w jakim stopniu zajdzie infiltracja, decydują także spadki terenu. *Kto nie wierzy, niech spróbuje porównać podlewanie kwiatka doniczkowego, gdy doniczka stoi na parapecie prosto, z podlewaniem tego samego kwiatka, gdy doniczkę nachylimy pod kątem 45° do podłoża 😊.*



Do podstawowych i jednocześnie najpopularniejszych parametrów związanych z pokryciem terenu zalicza się przede wszystkim zastępczy **współczynnik szorstkości n według Manninga**, **współczynnik spływu ψ** oraz **parametr CN** (nazwa tego ostatniego pochodzi od skrótu jego angielskiej nazwy *curve number*, czyli dosłownie „numer krzywej”). Wszystkie te współczynniki są już Czytelnikom doskonale znane z podstawowego kursu hydrologii, nie trzeba więc w jakiś szczególny sposób ich opisywać. Warto jednak podkreślić, że **współczynnik spływu jest podstawowym parametrem wykorzystywanym w modelowaniu globalnym, parametr CN natomiast – w modelowaniu zintegrowanym. Oba pełnią podobną rolę** – w całościowy sposób określają możliwości retencyjne zlewni, które – jak wiemy – w rzeczywistości nie tylko stanowią wypadkową wielu czynników, ale są też zmienne w czasie. Zależą one od pokrycia i zagospodarowania terenu, spadku terenu, typu gleb, sposobu podłączenia terenów do systemów kanalizacji deszczowej, uwilgotnienia gleby, charakteru opadów itp. **Różnica** (nie ukrywajmy – *kolosalna*) między obydwojma wspomnia-

nymi współczynnikami dotyczy sposobu określania ich wartości, a w konsekwencji także – jakości uzyskiwanych wyników obliczeń. O ile w przypadku określania wartości **parametru CN** bierzemy pod uwagę sposób zagospodarowania terenu, stan (intensywność) roślinności, rodzaj gleb, sposób podłączenia do kanalizacji deszczowej i uwilgotnienie gleby, o tyle w przypadku **współczynnika spływu** posługujemy się najczęściej jedynie tabelkami uzależniającymi jego wartość od pokrycia i zagospodarowania terenu, rzadziej uwzględniając dodatkowo spadek. O tym, jak można określić ten parametr w sposób przynajmniej przyzwoity, pomimo jego dużej szacunkowości, mówimy na zajęciach praktycznych.



Bardzo pomocnymi parametrami wykorzystywanymi w obliczeniach są także **procentowe udziały terenów o określonym zagospodarowaniu powierzchni** (*notabene* potrzebne też do wyznaczania współczynników spływu i parametru CN) lub – bardziej ogólniej – procentowe udziały terenów nieprzepuszczalnych (uszczelnionych) i przepuszczalnych w całkowitej powierzchni zlewni.



Współczynnik szorstkości (powierzchni terenu) n wykorzystuje się w obu podejściach (zarówno globalnym, jak i zintegrowanym), zależnie od wybranych rozwiązań szczegółowych. Pojawi się więc on jeszcze w kolejnych rozdziałach. Jego wartość odczytujemy ze stosownych tabel, ale uwaga: nie tych samych, z których korzystamy, gdy chcemy wyznaczyć analogiczny współczynnik dla kanałów. Po raz kolejny

uprasza się więc o *inżynierską czujność*, nawet przy tak pozornie banalnych sprawach.

Podsumujmy jeszcze na koniec tej części rozdziału najistotniejsze informacje na temat współczynnika spływu, bo on jako pierwszy będzie nam potrzebny w obliczeniach.

Podsumowanie informacji dotyczących współczynnika spływu

Współczynnik spływu – określa całościowo możliwości retencyjne zlewni

(w sensie formalnym wyraża stosunek ilości wody spływającej ze zlewni Q_s w stosunku do ilości wody pojawiającej się na terenie zlewni na skutek opadów Q_o):

$$\psi = \frac{Q_s}{Q_o}$$

Wartość współczynnika spływu dla zlewni zależy od:

- rodzaju powierzchni (sposobu zagospodarowania terenu zlewni)
- rodzaju gruntu, gleby
- spadku terenu
- wielkości i charakteru opadu
- czasu trwania deszczu
- wilgotności zlewni w chwili rozpoczęcia opadu

Wartość współczynnika spływu nie jest dla danej zlewni stała.

Wartość współczynnika spływu należy przyjmować rozważnie i z uwzględnieniem różnych czynników, gdyż ma on bardzo istotny wpływ na wyniki obliczeń.

Współczynnik spływu dla obszaru o zróżnicowanym pokryciu terenu:

$$\psi = \frac{\sum_{i=1}^n (\psi_i A_i)}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

Przedstawione wyżej parametry charakteryzujące różne cechy zlewni to zaledwie mały wycinek *szeroiego wachlarza* wielkości, które można wykorzystać. Warto przy tej okazji zwrócić uwagę, że *im bardziej precyzyjne rozwiązania stosujemy* (oczywiście chodzi tu o modelowanie zintegrowane, bo w wypadku globalnego trudno mówić o „precyzji”), *tym więcej bardziej szczegółowych parametrów musimy określić.*

Przy **modelowaniu globalnym** w zaledwie dwóch lub trzech parametrach będziemy starali się zawrzeć jak najwięcej informacji o zlewni. Tym bardziej zatem powinniśmy się starać jak najlepiej te parametry wyznaczyć, bo nasz model będzie bar-

dzo **wrażliwy** na wprowadzane do obliczeń wartości. (Jak bardzo ta wrażliwość będzie istotna, dowiemy się wkrótce. Musi być w końcu jakiś element napięcia i oczekiwania 😊). Natomiast w modelach cząstkowych podejścia **zintegrowanego**, które opisują osobno różne etapy transformacji odpływu, możemy zastosować dużą liczbę parametrów przypisanych indywidualnie poszczególnym cechom zlewni. Oczywiście to ostatnie podejście ma sens tylko wtedy, gdy dysponujemy danymi na tyle dokładnymi, by te parametry prawidłowo wyznaczyć. Pamiętajmy jednak, że zarówno w modelach globalnych, jak i zintegrowanych **jakość wprowadzanych danych determinuje w dużym stopniu jakość uzyskiwanych wyników**. Żaden wysublimowany opis matematyczny nie pomoże, jeśli parametrów modelu nie przygotujemy rzetelnie, tylko zaczerpnijemy je z tak zwanego **parasola...**

Część V. W sieci kanałów

Oprócz spływu po powierzchni terenu woda opadowa może podróżować także wewnątrz kanałów (*tam dopiero musi być ciekawie...*).

W obliczeniach tej formy spływu absolutnie podstawowym wzorem jest **wzór Manninga**, który każdy szanujący się inżynier zajmujący się zagadnieniami hydrologicznymi powinien znać na pamięć (**MUST HAVE** naszej pamięci, czytaj – **pewniak na zaliczeniu** 🐱). Wzór ten pozwala określić średnią prędkość przepływu w kanale zgodnie z formułą:

$$v = \frac{1}{n} R_h^{2/3} i_s^{1/2} \quad [\text{m/s}]$$

Pojawiają się w nim podstawowe parametry wpływające na dynamikę przepływu w kanale: n – czyli **współczynnik szorstkości według Manninga** dla kanału (pamiętajmy, nie ten sam co dla powierzchni zlewni), i_s – **spadek dna kanału** (ściślej – spadek hydrauliczny, ale z racji trudności w jego wyznaczeniu, dla potrzeb prostych obliczeń zakładających ruch jednostajny – utożsamiany ze spadkiem dna) oraz parametr R_h , który jest długością **promienia hydraulicznego** wyrażoną w metrach. Jak na pewno pamiętamy, promień hydrauliczny to stosunek pola przekroju czynnego kanału do obwodu zwilżonego, jest więc wielkością zależną zarówno od **kształtu przekroju poprzecznego kanału**, jak i od aktualnego napełnienia kanału. Jak jednak określić napełnienie, skoro nie wiemy, ile wody płynie w kanale (przecież dopiero chcemy to policzyć)?

Spokojnie, już to ktoś ogarnął lub – jeśli wolicie – rozkminił.



Możliwe są tu dwa podejścia – albo iteracyjne (które moglibyśmy określić jako „dochodzenie do prawdy w kolejnych przybliżeniach”), albo odgórne **założenie, że kanał pracuje w warunkach maksymalnego napętnienia**. W zadaniach, którymi się zajmujemy, najczęstszym podejściem jest to drugie. Warto przy tym zauważyć, że jest to założenie najmniej korzystnych warunków przepływu, co stawia nas po tej „bezpieczniejszej stronie”.

Prędkość przepływu w kanale przydaje się nam do co najmniej dwóch ważnych obliczeń – możemy na jej podstawie określić natężenie przepływu w kanale (w tym także **maksymalną przepustowość** kanału, czyli maksymalną ilość wody, jaka zmieści się w tym kanale bez wylania na zewnątrz), a także możemy – znając **długość kanału** – policzyć **czas przepływu przez kanał** (czyli czas potrzebny na pokonanie tego odcinka drogi spływu – *wiecie, wystarczy wykorzystać znany i lubiany wzór $t = L/v$*). Oczywiście, nie wystarczy to, by w pełni odwzorować transformację przepływu w kanale, ale *cieszymy się z tego, co mamy*. Reszta przyjdzie w swoim czasie...


******cdn.*

Rozdział 4. Skoncentruj się, czyli czas koncentracji odpływu ze zlewni

W tym rozdziale: Czas na koncentrację odpływu. Pięta Achillesa, czyli hydraulicznie najniekorzystniejszy punkt w zlewni. I po co to komu? Jak to wyznaczyć, czyli pięć kroków do sukcesu



Uwaga, a teraz potrzebne będzie maksymalne skupienie,  żeby nie powiedzieć... **koncentracja**.

Będzie to bardzo ważny i, co gorsza, *nowy* materiał. Kolejne absolutne **MUST KNOW**, **MUST HAVE** i w ogóle wszystkie inne **MUST** na naszym kursie, a jednocześnie pewniak na teście!  Zachęciłam, prawda?



Część I. Czas na koncentrację odpływu. Pięta Achillesa, czyli hydraulicznie najniekorzystniejszy punkt w zlewni

Nadal pozostajemy przy tematyce związanej z **przygotowaniem danych wejściowych do modelu opad-odpływ**. Wciąż omawiamy pierwszy typ informacji wejściowych – parametry opisujące nasz system, czyli wielkości dotyczące zlewni – ściślej: jej cech wpływających na natężenie i dynamikę procesów spływu wody.

W przypadku **modeli globalnych** (przypomnijmy: opisujących całość procesów **jednym równaniem**) nie ma zbyt wielu możliwości, by w obliczeniach ująć całą gamę aspektów istotnych przy formowaniu się spływu. Parametry zlewni, te już wcześniej wymienione i te z pozostałych kategorii, wspomnianych w poprzednim rozdziale, i tak znacząco przekraczają liczbę informacji, którą „typowy inżynier” wykorzystuje w obliczeniach natężenia przepływu metodą stałych natężeń deszczu lub metodą natężeń granicznych.

Celem naszych analiz jest jednak **jak najlepsze odzwierciedlenie w obliczeniach „prawdy hydrologicznej”**. Zamiast stwierdzać *Przyjęto... (bo tak się robi, takie są typyczne...)*, my będziemy pytać: *Dlaczego akurat tak, a nie inaczej?* i *Czy da się to zrobić lepiej?*

Okazuje się – na szczęście dla nas, specjalistów i pasjonatów tematu – że pomimo prostoty modeli globalnych można się im bardziej przyjrzeć i postarać się przygotować „lepsze” dane oraz „wycisnąć” z tych modeli więcej. Będzie nam w tym pomocne wprowadzenie terminu **czas koncentracji odpływu ze zlewni**. **Zacznijmy od definicji** (*Do zapamiętania i zrozumienia! Koniecznie!*):

Czas koncentracji odpływu ze zlewni to

czas potrzebny na to, by woda z hydraulicznie najniekorzystniejszego punktu zlewni dotarła do przekroju zamykającego.

Zwróćmy uwagę na określenie **hydraulicznie najniekorzystniejszy punkt zlewni**. Jest to miejsce, z którego podróż do przekroju zamykającego zlewnię zajmuje najwięcej czasu. Taka **pięta Achillesa** naszej zlewni. Inaczej mówiąc: spośród wszystkich możliwych tras (dróg spływu, ścieżek spływu), jakie pokonuje woda, spływając w czasie deszczu ze zlewni w kierunku przekroju zamykającego, interesuje nas droga „**najtrudniejsza**”, czyli ta, która zajmie najwięcej czasu. Taka trasa wyznacza nam tzw. **długość hydrauliczną zlewni**. Pamiętajcie, że wcześniej mówiliśmy o **długości maksymalnej zlewni**? Podobnie mogliśmy sobie pogawędzić na przykład o **długości najdłuższej linii spływu**. Dla tej ostatniej kryterium stanowiłaby długość trasy do pokonania, rozumiana w sensie geometrycznym. Teraz wprowadzamy kolejne pojęcie – **długość hydrauliczną zlewni** – czyli, powtórzmy, trasę zabierającą najwięcej czasu. Ta długość będzie **najważniejsza z hydrologicznego punktu widzenia**. Czas na jej pokonanie nazywamy **czasem koncentracji odpływu ze zlewni** i oznaczamy t_c .



W porządku, chyba wszyscy już wyczuli podekscytowanie autorki... Ale jakie jest znaczenie tego czasu koncentracji odpływu ze zlewni? Po co to w ogóle wyznaczać?

Część II. I po co to komu?

Kochani, już wyjaśniam (*pełna koncentracja*)! 😊

Wyobraźmy sobie, że ustawiamy się jako obserwatorzy w przekroju zamykającym zlewnię i za chwilę będziemy mierzyć natężenie odpływu ze zlewni w tym przekroju w czasie deszczu (*Wspaniale, prawda? Marzenie każdego!*). W chwili początkowej natężenie odpływu jest równe zero. Zaczyna padać. W miarę upływu czasu obserwujemy najpierw niewielką, a potem coraz większą ilość wody w przekroju. To spływają wody, które bezpośrednio spadły na nasz przekrój oraz zdążyły już dopłynąć z niewielkich odległości. W miarę upływu czasu obserwujemy wzrastające natężenia przepływu, bo deszcz ciągle pada, a do nas zaczynają dodatkowo docierać wody spływające z coraz odleglejszych części zlewni. **Napięcie rośnie jak u Hitchcocka.**



Jak długo będziemy obserwować taki wzrost, jeśli deszcz nadal pada, a jego natężenie jest ciągle takie samo (czyli stałe, jak zakładamy w modelach globalnych)? Chwila do namysłu... Czy już wiecie? Otóż – *tak długo, aż dopłyną do nas wody z pięty Achilleśa* – „najtrudniejszego miejsca” w zlewni, czyli tego punktu, z którego podróż zabiera wodzie *najwięcej czasu*. Innymi słowy: wzrost natężenia będzie obserwowany aż do czasu $t = t_c$. Od tej chwili cała powierzchnia zlewni uczestniczy już w odpływie obserwowanym w przekroju zamykającym.

A co się dzieje dalej, jeśli deszcz nadal pada? Ustala się pewien **stan równowagi**. Natężenie już nie wzrasta, bo woda dopływa z całości zlewni i więcej (w przeliczeniu na jednostkę czasu) jej nie dopłynie. Obserwujemy ustabilizowanie się natężenia przepływu ($Q = \text{const}$) tak długo, jak długo trwa deszcz. Po ustaniu opadów zaczniemy obserwować stopniowy spadek natężenia odpływu – najpierw przestaną odpływać wody z najbliższych obszarów, potem z coraz dalszych itd.

Jak długo będzie trwał ten czas obniżania się natężenia odpływu ze zlewni? Myślę, że już wiecie... 😊


Podsumowując:

Dla $t = t_c$ zaobserwujemy po raz pierwszy w czasie danego epizodu **maksimum natężenia na odpływie**. Jest to więc pewien *czas krytyczny* dla naszej zlewni¹.

¹ Wyjątek stanowi sytuacja, w której deszcz się skończy, zanim zdążą dopłynąć wody z najodleglejszego miejsca. Wówczas maksimum natężenia na odpływie wystąpi w momencie zakończenia opadu, ale nie będzie ono tak duże, jakie mogłoby być, gdyby deszcz był uprzejmy popadać nieco dłużej. Czas trwania tego deszczu nie będzie więc czasem krytycznym dla naszej zlewni.

Gdybyśmy teraz chcieli zapytać, który deszcz (ściślej: o jakim czasie trwania) będzie z punktu widzenia projektowania kanalizacji deszczowej lub systemów drenażowych najgorszy dla naszej zlewni, odpowiedzielibyśmy: **ten, który spowoduje największe natężenie na odpływie**. Będzie to **deszcz o czasie trwania $t_d = t_c$** . Trwa on na tyle długo, że wody z całej zlewni zdążą do płynąć do przekroju zamykającego, a jednocześnie możliwie najkrócej, by efekt ten został osiągnięty.

Czas koncentracji odpływu ze zlewni powinien być zatem – z hydrologicznego punktu widzenia – podstawą określania miarodajnego czasu trwania deszczu w modelu globalnym.

Mocne, prawda? 

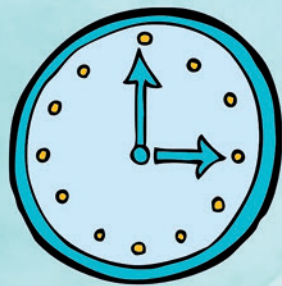
Część III. Jak to wyznaczyć, czyli pięć kroków do sukcesu

Jak zatem wyznaczyć czas koncentracji odpływu ze zlewni?

Przy obliczaniu czasu koncentracji warto wyrobić sobie pewien *nawyk* i postępować zgodnie z poniższymi zasadami:

1. Najpierw przyglądamy się zlewni i **wyznaczamy w niej kierunki spływu wody**.
2. Na podstawie wyznaczonych kierunków spływu **wyberamy trasy potencjalnie najtrudniejsze**. Niekiedy widać od razu, która trasa spływu będzie najbardziej „czasochłonna”. Często jest to najdłuższa linia spływu, ale nie zawsze. Możemy mieć np. w zlewni linię długą, ale przebiegającą po betonie, oraz linię krótką, ale biegnącą po trawie lub w lesie. „Na oko” nie da się określić, która jest gorsza. Wybieramy więc dwie lub trzy „potencjalne kandydatki” i... nie ma rady – trzeba będzie policzyć czas spływu wzdłuż każdej z nich, a ten, który okaże się najdłuższy, wygra nasz konkurs i otrzyma zaszczytny tytuł czasu koncentracji odpływu. Ale to za chwilę. Wcześniej...
3. **Oceniamy, czy trasy, które wybraliśmy do analizy, są jednorodne na swej długości** (czy mają stały spadek, czy panuje tam taka sama forma spływu, czy jest taka sama szorstkość), czy też nie. **Jeśli nie** (a to jest najczęstszy przypadek) – **dzielimy trasę na segmenty** i dla każdego segmentu już w kolejnym kroku wyznaczymy czas potrzebny na jego pokonanie.
4. **Wyberamy metodę obliczenia czasu koncentracji (określenia czasu spływu) i stosujemy ją** do naszych linii spływu (z uwzględnieniem segmentów). Następnie sumujemy uzyskane czasy spływu dla wszystkich segmentów danej linii. *(Jeśli właśnie jesteśmy na granicy zawatu, bo przecież nie znamy żadnych metod obliczania czasu koncentracji, to spokojnie. Za chwilę się tym zajmujemy).*
5. **Porównujemy różne linie spływu** (jeśli musieliśmy wybrać kilka). Wyciągamy wnioski. **Wyberamy zwycięską linię spływu. Otwieramy szampana.**

Czas koncentracji odpływu



5 kroków

1. Określ kierunki spływu wód w zlewni.
2. Wybierz potencjalnie najgorsze linie spływu.
3. Podziel każdą z linii na jednorodne segmenty.
4. Oblicz czas spływu każdego segmentu i określ sumaryczne czasy spływu dla każdej z linii.
5. Wybierz linię o najdłuższym czasie spływu. Ten czas to czas koncentracji odpływu ze zlewni

Jakie wzory (metody) na wyznaczenie t_c mamy do dyspozycji?

Jest ich bardzo wiele. W różnych krajach za najlepsze uznano różne formuły. Na wykładach w ramach naszych zajęć poznajemy podejścia należące do najpopularniejszych, a jednocześnie takie, które dla różnych zagadnień są zalecane w Polsce. O zaleceniach będziemy jednak mówić kiedy indziej. Na razie – tylko metody. Na naszych zajęciach będziemy korzystać z trzech podstawowych metod – wzoru Kirpicha, wzoru FAA oraz metody SCS. Proszę się koniecznie zapoznać z tymi trzema podejściami ☺.

Wzór Kirpicha (1940)

$$t_c = 3,9814 \cdot \left(\frac{L_s^{0,77}}{i_k^{0,385}} \right) \cdot k \quad [\text{min}]$$

L_s – długość analizowanego odcinka drogi sptywu [km]

i_k – spadek analizowanego odcinka drogi sptywu [–]

k – mnożnik korekcyjny

mnożnik korekcyjny $k = 0,4$ dla asfaltu, powierzchni betonowych

0,2 dla kanałów wybetonowanych

1,0 dla powierzchni ziemnych nieporośniętych

2,0 dla powierzchni trawiastych

dla terenów o $CN < 80$ $k = 1 + (80 - CN) \cdot 0,04$

Wzór FAA (Federal Aviation Administration)

$$t_c = \frac{103,104 (1,1 - C) L_s^{0,5}}{(100 i_k)^{1/3}} \quad [\text{min}]$$

L_s, i_k – jak wyżej

C – współczynnik metody racjonalnej, tożsamy z naszym „rodzimym” współczynnikiem sptywu [–]



Metoda SCS²

Metoda SCS zakłada, że spływ ze zlewni może przyjmować trzy różne formy: spływu stokowego, spływu skoncentrowanego po powierzchni zlewni oraz przepływu w kanałach.

1. **Spływ stokowy** – woda w postaci cienkiej warstwy (do ok. 5 cm grubości, zwykle 2–3 cm) spływa po powierzchni terenu zgodnie z jego spadkami (*uwaga: ta forma spływu nie zawsze wystąpi*).

Występuje na stosunkowo gładkich powierzchniach; maksymalnie do ok. 90 m długości początkowego odcinka drogi spływu (zwykle do 25 m).

$$t_s = \frac{5,5}{P_{2,24}^{0,5}} \left(\frac{n L_s}{\sqrt{i_s}} \right)^{0,8}$$

- n – współczynnik szorstkości według Manninga dla spływu stokowego (wg tab. 4.1)
 L_s – długość odcinka, na którym występuje spływ stokowy [m]
 i_s – spadek analizowanego odcinka drogi spływu [–]
 $P_{2,24}$ – wysokość deszczu 2-letniego o czasie trwania 24 godz. [mm] (*o tym, jak tę wartość wyznaczyć, powiemy więcej w kolejnym rozdziale*)

Tab. 4.1. Wartości współczynnika szorstkości według Manninga dla spływu stokowego

Typ pokrycia terenu	n
Gładki asfalt	0,011
Gładki beton	0,012
Betonowe okładziny, obmurowania	0,013
Okładziny drewniane	0,014
Cegła na zaprawie cementowej	0,014
Kamionka, glina	0,015
Żeliwo	0,015
Gruz cementowy	0,024
Ugór	0,050
Ziemia uprawna (rośliny do 20%)	0,060

² Uwaga: SCS, czyli Soil Conservation Service – to dawne służby w USA zajmujące się szeroko pojętą hydrologią i gospodarką wodną. SCS opracowało wiele wzorów dotyczących różnych procesów w hydrologii. Obecnie służby te zmieniły nazwę, ale skrót w nazwach metod pozostał. Teraz mówimy o metodzie SCS obliczania czasu koncentracji. Będą jednak jeszcze inne metody SCS, więc proszę wyказаć się czujnością i ich nie mylić.

Ziemia uprawna (rośliny powyżej 20%)	0,170
Trawa (krótka i rzadka)	0,150
Trawa (gęsta)	0,240
Obszary zadrzewione* (rzadkie zarośla)	0,400
Obszary zadrzewione* (gęste zarośla)	0,800

* Dla obszarów zadrzewionych gęstość ocenia się na podstawie warstwy do 3 cm nad powierzchnią ziemi (tylko ona wpływa na jakość spływu stokowego).

Warto zwrócić uwagę, że wprawdzie wartości podane w tab. 4.1 odnoszą się do różnych form pokrycia terenu, w tym także tych o wysokiej szorstkości powierzchni, w praktyce jednak spływ stokowy zaleca się uwzględniać tylko na terenach o relatywnie gładkiej powierzchni (asfalt, beton), gdyż w naturalnych warunkach wystąpienie spływu stokowego na innych terenach jest bardzo mało prawdopodobne.

2. **Skoncentrowany spływ wody płytkiej** – spływająca po powierzchni terenu woda zaczyna formować strumienie o coraz większych rozmiarach. Czas spływu skoncentrowanego t_{sk} dla każdego segmentu drogi spływu wyznaczamy na podstawie długości tego odcinka drogi spływu L_{sk} i prędkości spływu v , zgodnie z formułą:

$$t_{sk} = \frac{L_{sk}}{60 v} \text{ [min]}$$

przy czym:

$$v = 10 k i_s^{0,5} \text{ [m/s]}$$

oraz: L_{sk} – długość odcinka drogi spływu [m]

i_s – spadek analizowanego odcinka drogi spływu [–]

k – współczynnik dla spływu skoncentrowanego (wg tab. 4.2)

Tab. 4.2. Współczynnik k dla spływu skoncentrowanego

Typ pokrycia terenu	k
Las z gęstą ściółką; łąka z warstwą siana	0,076
Zanieczyszczony ugor; ziemia z niewielką uprawą; tereny zalesione	0,152
Pastwiska, łąki, trawniki z krótką trawą	0,213
Pole uprawne	0,274
Ziemia bez uprawy	0,305
Trawiaste bruzdy	0,457
Tereny nieuszczelnione	0,491
Obszary wybetonowane	0,619

3. Przepływ w kanale (kolektorze, rowie itp.)

Czas przepływu w kanale wyznaczamy na podstawie **długości kanału** L_k i **prędkości przepływu w kanale**. Prędkość przepływu w kanale wyznaczamy **ze wzoru Manninga** – przypomnijmy raz jeszcze:

$$v = \frac{1}{n} R_h^{2/3} i_s^{1/2} \quad [\text{m/s}]$$

Na potrzeby określania czasu koncentracji metodą SCS powierzchnia przekroju poprzecznego oraz obwód zwilżony w kanale wyznaczane są **dla warunków całkowitego napełnienia kanału**.

Teraz pozostaje już tylko wyznaczyć sumaryczny czas spływu wzdłuż analizowanej ścieżki.



Całkowity czas spływu według metody SCS jest równy sumie czasów spływu stokowego, spływu skoncentrowanego i przepływu w kanale przez poszczególne segmenty ścieżki spływu.

Jeśli analizowana ścieżka spływu jest najniekorzystniejszą linią spływu w zlewni, tak policzony czas jest czasem koncentracji odpływu ze zlewni.

Podajmy jeszcze krótkie uwagi do wymienionych wyżej metod:

1. **Wzór Kirpicha** to wzór opracowany pierwotnie dla terenów rolniczych, a dopiero później rozszerzony na inne obszary poprzez wprowadzenie **współczynnika poprawkowego (mnożnika korekcyjnego)**. Niestety, podane wyżej wartości współczynnika k to jedyne wartości referencyjne dostępne w literaturze przedmiotu. Wobec tego trudno jest dobrać jego właściwą wartość. Obliczenia są więc stosunkowo mało dokładne.
2. **Wzór FAA** został opracowany na potrzeby służb lotniczych, a zatem przeznaczony jest głównie dla terenów uszczelnionych. Dzięki temu, że opiera się na współczynniku spływu, możemy ten wzór zastosować do różnych typów powierzchni, także tych zielonych (w sensie pokrycia roślinnością, a nie koloru, rzecz jasna). Ma jednak zasadniczą wadę: nie da się przy jego użyciu wyliczyć spływu odbywającego się w kanale (mamy do dyspozycji jedynie współczynnik spływu, ten zaś jest zdefiniowany dla spływu po powierzchni, a nie w kanałach).
3. **Metoda SCS** to **jedna z najlepszych metod wyznaczania czasu koncentracji**, często zalecana także w Polsce. Absolutnie do zapamiętania! 😊

W tym rozdziale sporo było o czasie. Był czas spływu po powierzchni, był czas przepływu w kanale, wreszcie – czas koncentracji odpływu ze zlewni. A teraz ... czas już kończyć...



Rozdział 5. *Deszcze niespokojne potargały sad*¹, czyli o opadach w zlewni

W tym rozdziale: Deszcz też trzeba opisać. Deszcz na miarę zadania, czyli opad miarodajny. A może pójść blokiem? Historycznie czy syntetycznie? Bardzo ważne formuły

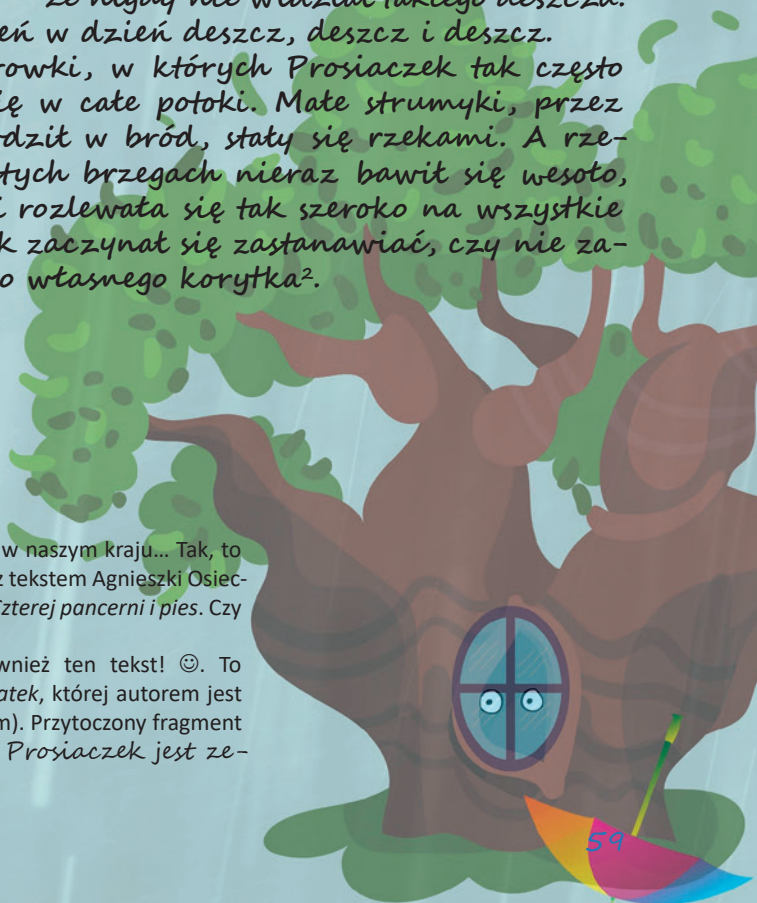
Część I. Deszcz też trzeba opisać

Czy pamiętacie początek pierwszego rozdziału naszej książki? Jasne, kto by nie pamiętał 😊 A zatem przypominacie sobie na pewno przygodę studentów na praktyce w Chęcinach oraz przykry epizod, jaki był udziałem pani Zosi... A co powiecie na to:

Deszcz padał, padał bez końca. Prosiaczek myślał sobie, że nigdy, póki żyje, a miał już on lat bardzo dużo – może trzy, a może i cztery – że nigdy nie widział takiego deszczu. Dzień w dzień, dzień w dzień deszcz, deszcz i deszcz. (...) Mate, wyschłe rowki, w których Prosiaczek tak często gmerat, zmieniły się w całe potoki. Mate strumyki, przez które często przechodził w bród, stały się rzekami. A rzeka, na której urwistych brzegach nieraz bawił się wesoto, wystąpiła z koryta i rozlewała się tak szeroko na wszystkie strony, że Prosiaczek zaczynał się zastanawiać, czy nie załeje ona niedtugo jego własnego korytka?

¹ Ten cytat znają chyba wszyscy w naszym kraju... Tak, to wers z piosenki *Ballada o pancernych* z tekstem Agnieszki Osieckiej, wykorzystanej w czołówce filmu *Czterej pancerni i pies*. Czy pamiętacie, kto ją śpiewał?

² Na pewno rozpoznaliście również ten tekst! 😊 To oczywiście cytat z książki *Kubuś Puchatek*, której autorem jest A.A. Milne (w tłumaczeniu Ireny Tuwim). Przytoczony fragment pochodzi z *Rozdziału IX*, w którym Prosiaczek jest zewsząd otoczony wodą.



Gdybym teraz poprosiła Was o przypomnienie sobie różnych doświadczeń związanych z opadami, zarówno tych własnych, jak i cudzych (z opowieści rodzinnych, zwierzeń sąsiadów, czy też np. przygód Bridget Jones), to zebrałoby się ich zapewne sporo i – co więcej – byłyby to **doświadczenia bardzo różnorodne**. Co z tego wynika dla inżyniera zajmującego się zagadnieniami związanymi z gospodarowaniem wodami opadowymi? Najkrócej rzecz ujmując – wynika z tego pewien sporych rozmiarów **ktopot**. Jako specjaliści, którzy chcą mieć możliwość obliczania ilości wód opadowych spływających ze zlewni, zdajemy sobie świetnie sprawę, że opad staje się tu „**przyczyną całego zamieszania**”, a w sensie formalnym – bardzo ważną **informacją wejściową** do naszego modelu obliczeniowego. Aby pozyskać rzetelne, dobrej jakości wyniki obliczeń, oprócz prawidłowego wyboru modelu obliczeniowego oraz dobrego scharakteryzowania zlewni (o czym już pisaliśmy w poprzednich rozdziałach), musimy także dysponować wiarygodnymi danymi na temat opadów. Oczywiście, **będą nas interesować opady** nie byle jakie, ale takie, które powodują konkretny odpływ ze zlewni, czyli stanowią „wymuszenie” zachodzących w niej procesów. Z przykrością musimy stwierdzić, że taki, dajmy na to, „kapuśniaczek” nie jest w stanie w tej kwestii zrobić na nas jakiegokolwiek wrażenia.

Tymczasem dobrze wiemy, że w sprawie opadów możemy na pewno powiedzieć tyle (i będzie to kolejne wiekopomne odkrycie ☺), iż **deszcze bywają bardzo różne**, odznaczają się sporą **zmiennością** (zarówno **czasową**, jak i **przestrzenną**) i nie sposób ich ściśle przewidzieć w dłuższym horyzoncie czasowym. Warto przy tej okazji przypomnieć, że mówiąc o **zmienności czasowej**, mamy na uwadze zmienność intensywności opadów **w czasie pojedynczego epizodu opadowego, jak również w szerszej perspektywie czasowej** – w skali doby, miesiąca, roku czy też wielolecia. Z kolei **zmiennność przestrzenna** to nie tylko ta „z rozmachem”, czyli o szerokim zasięgu (kraj, region), ale także zmienność w skali znacznie mniejszej – miasta czy wręcz dzielnicy. Co więcej, w czasie trwania danego epizodu opadowego chmura opadowa może obejmować całą zlewnię lub tylko jej część, a ponadto może się przemieszczać (**A kto ją tam wie, w którą stronę taka chmura akurat tego dnia sobie popłynie!**), co jeszcze bardziej komplikuje sytuację (rys. 5.1).

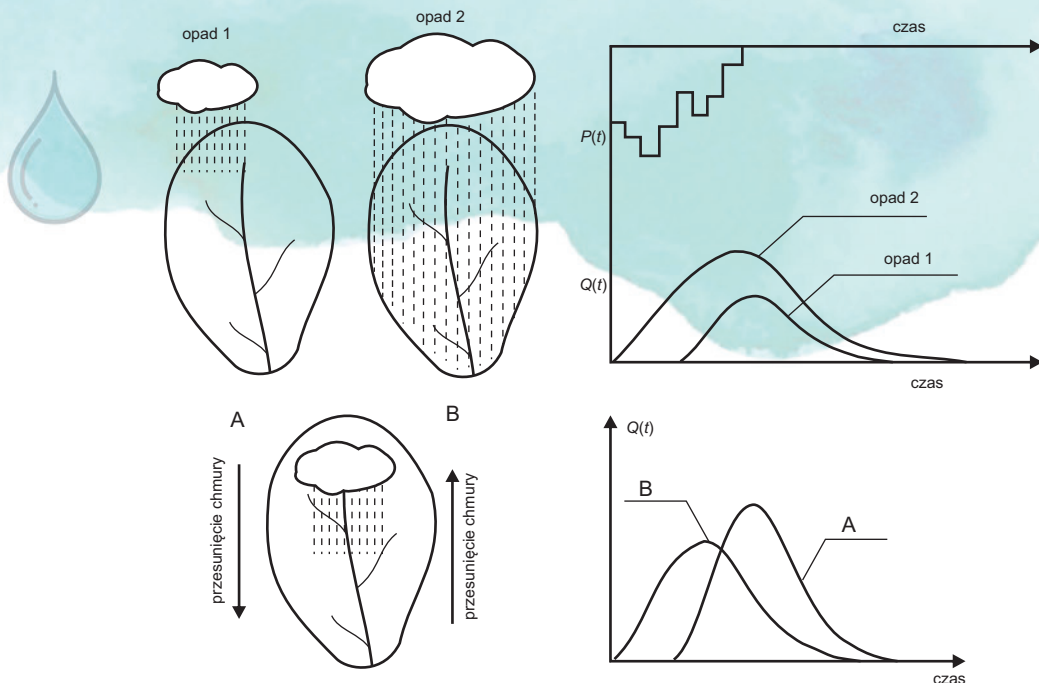
I **co ma zrobić biedny inżynier**, który musi przygotować wiarygodne dane wejściowe do zadania?

Jak żyć w takiej sytuacji?

Porzucając na chwilę drobny przekąs zawarty w postawionych przed chwilą pytaniach, możemy całkiem poważnie stwierdzić, że

dobrze, rzetelne przygotowanie informacji o opadzie wcale nie jest zadaniem trywialnym ani banalnym.

Wielu jednak inżynierów traktuje ten etap obliczeń dość schematycznie i niefrasobliwie, co wprawdzie sprawia, że stosunkowo szybko można mieć go z głowy, ale jednocześnie efekty takich obliczeń bywają zadziwiająco wręcz niezgodne z rzeczywistością...



Rys. 5.1. Wpływ zasięgu (u góry) oraz przesuwania się (na dole) chmury opadowej na wypadkowy hydrogram odpływu ze zlewni (Weinerowska-Bords 2010)

Jak zatem zrobić to możliwie dobrze?

Zanim przejdziemy do próby odpowiedzi na to pytanie, przypomnijmy sobie najistotniejsze definicje oraz pojęcia związane z inżynierskim opisem intensywności opadu. Pamiętajmy przecież, że do obliczeń potrzebujemy **liczb**, bo **opad także trzeba opisać** i wyrazić „po inżyniersku”, czyli w sposób ilościowy.

Zestawienie najistotniejszych pojęć:

epizod opadowy (*rainfall event, storm*) – pewien skończony okres, w którym wystąpił opad o charakterze mierzalnym

czas trwania deszczu (*rainfall duration, storm duration*) t_d – długość okresu, w którym zaobserwowano deszcz, a przed którym i po którym wystąpił okres bezdeszczowy

wysokość opadu (*precipitation depth*) P [mm], h [mm] – wysokość warstwy powstałej z objętości wody, jaka spadła w określonym czasie trwania deszczu (w danej chwili, w danym kroku czasowym itp.), równomiernie rozłożonej na analizowanej powierzchni

całkowita wysokość opadu (*total rainfall depth*) P_T [mm], Sh [mm] – wysokość warstwy, jaka powstałaby w wyniku skumulowania całej ilości wody w analizowanym czasie (np. w czasie danego epizodu, w ciągu roku itp.)

natężenie opadu (*rainfall intensity*) i [mm/min], I [mm/godz] – wysokość opadu odniesiona do czasu, w którym opad wystąpił (w ogólnym przypadku jest zmienne w czasie trwania deszczu)

średnie natężenie opadu (*average rainfall intensity*) i_{sr} [mm/min], I_{sr} [mm/godz] – natężenie uśrednione w dłuższym czasie (np. w czasie danego epizodu, w czasie wybranej fazy deszczu itd.)

natężenie opadu (wydajność deszczu) (*rainfall intensity*) q [dm³/s·ha] – wartość intensywności opadu odniesiona do objętości wody, jaka w ciągu jednostki czasu pojawia się na określonej powierzchni

Związek między i [mm/min] a q [dm³/s·ha]:

$$q = 166,67 \cdot i, \text{ gdzie: } i - \text{ natężenie deszczu [mm/min]}$$

Oczywiście do podanych wyżej pojęć możemy dołączyć kolejne, takie jak: **histogram opadu**, **krzywe sumowe opadu**, **skale intensywności opadu** (np. skala Chomicza), **natężenia fazowe** opadu i tak dalej. Wszystkie te pojęcia są na pewno doskonale znane Czytelnikowi. Przypomnienie ich sobie i ugruntowanie jest warunkiem niezbędnym, by móc poprowadzić jakąkolwiek dyskusję na temat prawidłowego przygotowania danych wejściowych o opadach.



Część II. Deszcz na miarę zadania, czyli opad miarodajny

Powróćmy teraz do kluczowego pytania: jak zabrać się za przygotowanie danych opadowych, by były one „dobre”? Na początek trzeba sobie przypomnieć (a to już wiemy chociażby z analiz zawartych w rozdziale 2), że **punktem wyjścia powinno być każdorazowo przeanalizowanie celu obliczeń**. Innymi słowy, zaczynamy od sprecyzowania zadania, wraz z jego wszystkimi wymogami i ograniczeniami. Musimy jednak pamiętać, że w wielu zadaniach nie jesteśmy w stanie odzwierciedlić pełnej „prawdy hydrologicznej” o opadzie.

Jak to? – zapyta oburzony pan Zenek – *ja nie jestem w stanie? Zaraz Wam pokażę, jak to się robi!*

Cóż, pan Zenek to sympatyczny człowiek, ale niestety chyba jest w błędzie...

Weźmy na przykład pod lupę zadanie zaprojektowania systemu zagospodarowania wody opadowej na terenie nowo budowanego osiedla. Jako inżynierowie chcielibyśmy, aby ten system – po jego wybudowaniu – dobrze służył przez kolejne dwadzieścia lat. Musimy go jednak zaprojektować już teraz. Skąd mamy wiedzieć, jak będą się kształtować opady w tej dzielnicy *za jakieś dziesięć czy piętnaście lat*? Przecież nie umiemy dokładnie przewidzieć nawet tego, co będzie za dwa dni, a co dopiero w tak długiej perspektywie czasowej... A zrobić to jakoś musimy. Jak sobie radzimy? Otóż musimy przyjąć jakiś opad, który nazwiemy „opadem obliczeniowym” i potraktujemy jako informację wejściową do naszych obliczeń, mając przy tym świadomość, że w żaden sposób nie jesteśmy w stanie zagwarantować, że taki opad w ogóle kiedyś wystąpi, czy też – co ważniejsze – ocenić, jak często pojawią się opady większe... Możemy jedynie dokonywać pewnego wnioskowania *na przyszłość* na podstawie naszych dotychczasowych doświadczeń.

A teraz przeanalizujmy inny przykład. W pewnym mieście nastąpiło *obserwowanie chmury*, które spowodowało przeciążenie systemu kanalizacji deszczowej, zalanie piwnic i *awarie* urządzeń infrastruktury miejskiej. Po fakcie próbujemy obliczeniowo odtworzyć ten epizod. Chcemy policzyć, ile wody mogło w tym czasie spłynąć ze zlewni, a ile na przykład można by w zlewni dodatkowo zretencjonować, gdyby wcześniej podjęto określone działania uprzedzające. Czy musimy się w tym przypadku martwić kształtowaniem się opadów w przyszłości? Oczywiście – nie. W tym zadaniu kluczowy jest ten jeden epizod opadowy, który już się przydarzył. Jeśli tylko dysponujemy pomiarami, możemy precyzyjnie odtworzyć histogram tego opadu, a tym samym przygotować dane wejściowe w sposób znacznie dokładniejszy niż w poprzednim przykładzie.

Te dwa przykłady prowadzą nas do bardzo ważnego wniosku: każdorazowo **potrzebujemy „opadu na miarę zadania”**, czyli tak zwanego *opadu miarodajnego*. Opad miarodajny będzie takim wówczas, gdy będzie **reprezentatywny** dla sytuacji, którą odwzorowujemy. W pierwszym przykładzie byłby to opad reprezentatywny dla okresu przyszłych kilkudziesięciu lat opadów z punktu widzenia projektowania określonych systemów gospodarowania wodą. Ze względu na brak możliwości dokładnego jego określenia mógłby to być jedynie opad o określonym prawdopo-

dobieństwie wystąpienia. Z kolei w przykładzie drugim opadem miarodajnym jest konkretny zaobserwowany epizod opadowy.

Ponieważ jako dobrzy specjaliści staramy się, by w każdym przypadku **opad obliczeniowy** (czyli ten, który wprowadzimy do obliczeń jako informację wejściową) był **opadem miarodajnym** (czyli reprezentatywnym), pojęcia te w praktyce obliczeniowej używane są zamiennie:

opad obliczeniowy (projektowy, miarodajny)

ogólne określenie opadu stanowiącego informację wejściową do modelu, który powinien być reprezentatywny dla danego zagadnienia

Część III. A może pójść blokiem? Historycznie czy syntetycznie?

Wiemy już, że w zależności od celu obliczeń i typu rozwiązywanego zadania musimy podjąć decyzję, z jakiego typu modeli chcemy (musimy) korzystać: czy z **modeli globalnych**, czy **zintegrowanych**. Przy okazji: na tym etapie wszyscy już powinniśmy pamiętać, kiedy które modele mogą (powinny) być stosowane i jakie są konsekwencje tego wyboru.

To naprawdę ważne, więc jeśli ktoś tego nie pamięta, niech teraz szybko wróci do rozdziału 2 i jeszcze raz przestudiuje zawarte w nim wiadomości. Właśnie bowiem ta decyzja zdeterminuje od razu na początku naszych działań **charakter informacji o opadzie, jaką musimy zapewnić**. Warto sobie przypomnieć chociażby rys. 2.5, by stwierdzić, że ogólny kształt histogramu opadu jest zależny od przyjętego typu modelu³. W kolejnym etapie przygotowania danych musimy oczywiście doprecyzować czas trwania opadu oraz jego natężenie (w zależności od potrzeb – zmienne lub stałe w czasie jego trwania).

W ramach podsumowania dotychczasowych rozważań dokonajmy zestawienia możliwych postaci opadu miarodajnego (obliczeniowego).

Opad obliczeniowy:

- **rzeczywisty epizod opadowy** (epizod pomierzony, historyczny) – hietogram o zmiennym w czasie natężeniu deszczu
 - **deszcz syntetyczny** – hietogram **utworzony w sposób sztuczny** (na drodze obliczeń):
 - o stałym natężeniu (tzw. **deszcz blokowy**)
 - o natężeniu zmiennym w czasie
-

³ Lub też odwrotnie – charakter opadu, który musimy uwzględnić (np. ten z przytaczanego wyżej drugiego przykładu, zapewne o zmiennym w czasie, ale znanym natężeniu), od razu wskazuje na sposób modelowania, który musi być zastosowany.

Doprecyzujemy jeszcze dwa pojęcia z powyższego zestawienia: **deszcz syntetyczny** oraz jego szczególną postać – **deszcz blokowy** (średnio dobra wiadomość: oba pojęcia są do zapamiętania. Wiecie – **MUST KNOW** i te rzeczy...).

Deszcz syntetyczny to

utworzony w sposób **sztuczny** (na drodze obliczeń) hietogram deszczu **o określonym czasie trwania i określonym prawdopodobieństwie przewyższenia**, stanowiący opad reprezentatywny dla danego zagadnienia.

Wyznaczony przez nas deszcz syntetyczny może się nigdy nie zdarzyć w rzeczywistości (jest to wszakże twór „sztuczny”, stworzony przez nas, zaklinaczy deszczu), ale z punktu widzenia naszych obliczeń jest on deszczem „miarodajnym”. Opady syntetyczne wykorzystywane są przede wszystkim do celów projektowania (bo musimy założyć jakiś opad reprezentatywny na przyszłość) oraz w zadaniach analizy odpływu ze zlewni w sytuacjach hipotetycznych. Więcej na ten temat mówimy w trakcie zajęć praktycznych.

Szczególną postacią deszczu syntetycznego jest tzw. **deszcz blokowy** – reprezentatywny opad w **modelowaniu globalnym**.

Deszcz blokowy to opad:

- o nieograniczonym zasięgu (obejmujący całość zlewni);
 - o **natężeniu stałym w czasie i jednakowym w przestrzeni**;
 - **pojawiający się z określoną, przyjętą dla danego zagadnienia częstotliwością**;
 - **trwający przez określony (założony odgórnie lub obliczony) czas**.
-

Ściślej rzecz ujmując, określenie „blokowy” mogłoby mieć charakter bardziej ogólny i dotyczyć wszystkich hietogramów o prostokątnym kształcie; biorąc jednak pod uwagę to, że – nie oszukujmy się – w przyrodzie raczej nie mamy do czynienia z deszczem, który „pada sobie równo” na całej powierzchni naszej zlewni przez jakiś dłuższy czas i kończy się tak samo nagle, jak się zaczął, deszcz taki możemy śmiało zaliczyć do twórców sztucznych.

No dobrze. W takim razie teraz spróbujmy bardziej konkretnie wskazać, jak stworzyć taki reprezentatywny hietogram deszczu, przy założeniu, że wiemy już, czy ma być on historyczny, czy też syntetyczny, a jeśli syntetyczny – to czy o zmiennym natężeniu, czy blokowy.

Część IV. Bardzo ważne formuły

Z *opadami historycznymi* mamy jakby mniej problemów, oczywiście o ile dysponujemy pomiarami. Jeśli jednak rejestracji opadów nie prowadzono, to z naszego świetnego pomysłu, by precyzyjnie odtworzyć miniony epizod odpływu wód ze zlewni na skutek opadów, raczej będą **nici**. Zakładając jednak optymistycznie, że do takich pomiarów mamy dostęp, możemy na ich podstawie przygotować konkretny hietogram (histogram) opadów. W przeważającej większości przypadków będzie to epizod o zmiennym w czasie natężeniu deszczu, zwłaszcza że zazwyczaj interesują nas deszcze „najciekawsze”, czyli te o największej intensywności, a niekiedy także o relatywnie długim czasie trwania, które praktycznie zawsze cechują się zmiennością natężenia w czasie.

Znacznie trudniej jest z *deszczami syntetycznymi*, czyli tymi „sztucznymi tworamami”, które sami sobie musimy wyznaczyć (i to na dodatek w taki sposób, by były reprezentatywne!), aby móc je następnie „zadać” jako informację wejściową dla modelu opad–odpływ.

Spośród dwóch typów opadów syntetycznych – **hietogramów o zmiennym natężeniu** oraz **hietogramów blokowych** – oczywiście dużo łatwiej stworzyć te drugie, bo wystarczy określić jedną wartość stałego w czasie natężenia. W obu jednak przypadkach należy naszemu opadowi przypisać **reprezentatywne prawdopodobieństwo wystąpienia** oraz określić **miarodajny czas trwania deszczu**. Hietogramy syntetyczne o zmiennym natężeniu wykorzystywane są w modelowaniu zintegrowanym. O nich powiemy dokładniej w rozdziale 7, poświęconym „integracji” ☺. Opady blokowe będą nam potrzebne już w rozdziale 6, gdy będziemy „patrzeć globalnie”. W obu jednak przypadkach do wyznaczenia opadu miarodajnego będą nam potrzebne tzw. *formuły opadowe*.

Formuły opadowe to

formuły pokazujące **zależność pomiędzy natężeniem opadu a czasem jego trwania t_d i okresem jego powtarzalności (prawdopodobieństwem wystąpienia p)**.

Formuły opadowe są opracowywane na podstawie długoletnich obserwacji opadów w danym regionie oraz ich analizy statystycznej

Formuły opadowe mają ogólną postać $q = q(t_d, p)$ lub $P_{\max} = P_{\max}(t_d, p)$ i umożliwiają wyznaczenie natężenia opadu (lub jego maksymalnej fazy) o określonym czasie trwania i zadanym prawdopodobieństwie wystąpienia. Opracowywane są na podstawie analizy wyników wieloletnich pomiarów opadów, przy czym „wieloletnich” oznacza co najmniej dziesięć lat codziennej, konsekwentnej rejestracji opadów, cho-



cięż powinien to być okres znacznie dłuższy – dwadzieścia, pięćdziesiąt, a najlepiej i sto lat! Możecie sobie wyobrazić, jak fascynująca jest to praca. Należy przeanalizować codzienne opady (na przykład z okresu – bagatela! – dwudziestu lat) i wyłuskać z nich poszczególne epizody opadowe, które następnie są analizowane pod względem długości poszczególnych faz deszczu, czasu ich trwania i natężenia. **Szał i euforia!** Dopiero mając do dyspozycji tak długotrwałe obserwacje, można spróbować wyciągnąć wnioski o charakterze statystycznym (czyli: co ile lat możemy się spodziewać tego czy tamtego).

Przypomnijmy przy tej okazji, że prawdopodobieństwo wystąpienia (ściślej: przewyższenia, czyli osiągnięcia lub przekroczenia danej intensywności) opadu p wyrażane jest w procentach i powiązane z tzw. okresem powtarzalności opadów c , wyrażanym w latach, formułą:

$$c = \frac{100}{p}$$

Okres powtarzalności opadów jest bezpośrednio związany z częstością występowania tego zjawiska (opad o okresie powtarzalności c to inaczej opad o częstości występowania raz na c lat). Przykładowo, deszcz o prawdopodobieństwie wystąpienia 20% to opad, który statystycznie pojawia się raz na 5 lat (lub inaczej: tak intensywny (lub jeszcze gorszy) opad zdarza się dwadzieścia razy w ciągu stulecia). Nie należy się więc dziwić, że jeśli na jakimś terenie prowadzimy pomiary zaledwie od pięciu lat, to nie ma szansy wyciągnąć wiarygodnych wniosków o charakterze statystycznym.

Wracając do określania opadu miarodajnego: aby określić poszukiwaną wartość natężenia deszczu, musimy wcześniej wyznaczyć **miarodajny czas trwania opadu** oraz **miarodajną wartość prawdopodobieństwa**, a następnie podstawić obie wartości do **odpowiedniej formuły opadowej**. Wydaje się to banalne, ale praktyka pokazuje, że ten etap obliczeń może być źródłem znaczących błędów, spowodowanych zbyt schematycznym podejściem i brakiem świadomości istotności podejmowanych decyzji. Jest to szczególnie widoczne w przypadku określania **miarodajnego czasu trwania opadu**, który często przyjmowany jest odgórnie (w Polsce zazwyczaj jako 15 lub 10 minut). A jak tu mówić o „miarodajności” czy „reprezentatywności”, jeśli założyliśmy coś odgórnie, czyli „z czapki”? Znowu warto tu powtórzyć: tłumaczenie „bo wszyscy tak robią” jest mało przekonujące, jeśli nie umiemy naszych decyzji poprzeć żadnym merytorycznie uzasadnionym argumentem. Reasumując: to, w jaki sposób powinno się określać miarodajny czas trwania opadów, przeanalizujemy przy okazji omawiania modeli globalnych i zintegrowanych, bo wybór ten jest właśnie silnie uzależniony od typu modelu.





Dobór przyjętego w obliczeniach **prawdopodobieństwa wystąpienia deszczu** jest kwestią pewnego **kompromisu między bezpieczeństwem** (które skłaniałoby nas do przyjmowania jak najniższych wartości prawdopodobieństwa, czyli uwzględniania w obliczeniach przypadków rzadkich, mało prawdopodobnych, ale za to bardzo intensywnych) a **ekonomią** (która z kolei kierowałaby nas ku przypadkom bardziej typowym, mniej skrajnym, czyli opadom bardziej „przeciętnym”, a tym samym – bardziej prawdopodobnym). Trzeba przyznać, że inżynierowi ciężko byłoby podjąć samodzielnie tak ważną i odpowiedzialną decyzję, a co więcej – byłby to wybór bardzo subiektywny. Z pomocą przychodzą nam wytyczne, w których publikowane są wartości, jakie odpowiednie zrzeszenia inżynierów uznały za uzasadnione w różnych przypadkach zadań i obiektów inżynierskich. Przy ustalaniu odpowiednich wartości p brane są pod uwagę różne aspekty, z których część zestawiono poniżej.

Aspekty wpływające na wybór wartości p (lub okresu powtarzalności opadu c):

- istotność obiektu
- założony poziom ochrony (standard odwodnienia)
- koszty budowli/obiektu
- konsekwencje przekroczenia przepustowości
- lokalne wytyczne projektowe

Reasumując, im bardziej „strategiczny” jest analizowany obiekt, im kosztowniejszy i im poważniejsze byłyby skutki ewentualnej awarii, tym wyższe wartości natężenia opadu należałoby przewidzieć w obliczeniach, a zatem – tym niższe wartości prawdopodobieństwa wystąpienia opadu należy przyjmować jako miarodajne.

Przykładowo: *gdybyśmy chcieli zaprojektować odwodnienie parkingu na obszarze wiejskim, na którym istnieje kanalizacja ogólnospławna, za miarodajne prawdopodobieństwo opadu należałoby uznać wartość 50%⁴.*



Jeśli się temu bliżej przyjrzeć, jest to klasyczna sytuacja w stylu „**na dwoje babka wróżyła**” albo coś na kształt **prognozy** góralskiej („*będzie padać albo i nie będzie*”). Oznacza ona w praktyce, że co drugi rok (statystycznie, rzecz jasna) może nastąpić przewyższenie wartości natężenia opadu, którą przyjmujemy do obliczeń. Nie powin-

⁴ Podkreślmy: w myśl obecnie funkcjonujących wytycznych.

niśmy się w związku z tym dziwić (niejako sami się na to zgadzamy), że relatywnie często, bo przeciętnie co drugi rok, może się pojawić jakieś przeciążenie naszego systemu odwodnieniowego, na skutek którego mieszkańcy tego obszaru nie dotrą suchą nogą z parkingu do sklepu. Dla porównania: gdybyśmy podobny parking projektowali w centrum miasta, należałoby przyjąć wartość prawdopodobieństwa 10%. Oznacza to, że przeciążenie tego systemu może nastąpić – statystycznie, rzecz jasna – jedynie raz na dziesięć lat, a zatem:

obuwie mieszkańców centrów miast jest z założenia bardziej chronione niż obuwie mieszkańców wsi.

Oczywiście, należy mieć świadomość, że to wszystko to tylko nasze założenia. A deszcz i tak będzie padać, jak będzie chciał, i być może nie raz nas zaskoczy...

Przyszła wreszcie czas na przedstawienie choćby kilku *formuł opadowych*. Wiemy już, że wyznaczone są one na podstawie długoletnich obserwacji opadów. Co więcej, wiemy też, że opady wykazują dużą zmienność, zarówno czasową, jak i przestrzenną. Chcąc je zatem jak najlepiej opisać, powinniśmy się kierować pomiarami z obszaru jak najbliższego rozpatrywanej przez nas lokalizacji. A to prowadzi nas do wniosku, że **im mniejszy obszar zostanie wzięty pod uwagę przy wyznaczaniu formuły opadowej, z tym większą dokładnością ta formuła będzie oddawała lokalne warunki opadowe**. Inaczej: jeśli opracujemy jedną formułę dla dużego regionu lub wręcz całego kraju, to uzyskamy bardziej „uśrednione” wyniki i tym samym mniej precyzyjnie uwzględnimy ich lokalną specyfikę. Czy pamiętacie **miejskie wyspy ciepła**? Mówiliśmy wtedy, że na skutek zróżnicowanego stopnia urbanizacji możemy mieć do czynienia z bardzo zmiennymi charakterystykami opadowymi w skali nawet jednego miasta.

Reasumując zatem: **pierwszym naszym krokiem powinno być sprawdzenie, czy dla analizowanego przez nas obszaru opracowano wcześniej lokalne formuły opadowe**. Jeśli tak – to z nich właśnie powinniśmy skorzystać. W Polsce opracowano m.in. następujące lokalne formuły opadowe:

- formuła Wołoszyna dla Wrocławia (lata 60. XX w.);
- formuła Gruszeckiego dla Raciborza (1982);
- formuła Sowińskiego dla Poznania (1984);
- formuła Licznara i Łomotowskiego dla Wrocławia (2005);
- formuła (wykresy) Twardosza dla Krakowa (2005);
- formuła dla Gdańska – w trakcie opracowywania.

Jeśli nie dysponujemy formułą lokalną, powinniśmy wybrać odpowiednią (**najlepszą możliwą** – uwaga: **słowa klucz!** 🔑) formułę opracowaną dla naszego kraju. Obecnie w Polsce funkcjonują dwie podstawowe formuły, z których pierwsza (formuła Błaszczyka) jest bardzo popularna, ale niestety z wielu powodów (m.in. niepełnych i nieaktualnych już danych pomiarowych, zebranych tylko dla Warszawy) w większości przypadków nieodpowiednia, druga zaś (formuła Bogdanowicz i Stachy’ego,



zwana też formułą IMGW) – nowsza i bardziej aktualna – jest na chwilę obecną najwłaściwszym rozwiązaniem. Poniżej przedstawiamy obie.

Wzór Błaszczyka (1954)

$$q = \frac{6,631 \sqrt[3]{H^2 c}}{t_d^{0,67}}$$

q – natężenie deszczu [$\text{dm}^3/\text{s} \cdot \text{ha}$]

t_d – miarodajny czas trwania deszczu [min]

c – częstotliwość opadów [lata]

H – średnia roczna wysokość opadów dla danej lokalizacji [mm]

Dla $H = 600$ mm (czyli średniej rocznej wysokości opadu w Polsce) formuła ta przyjmuje bardzo znaną postać:

$$q = \frac{470 \sqrt[3]{c}}{t_d^{0,67}}$$

Wzór IMGW (Bogdanowicz i Stachy'ego) (1998)

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

$P_{\max,p}$ – wysokość opadów maksymalnych o danym prawdopodobieństwie wystąpienia [mm]

t_d – miarodajny czas trwania deszczu [min]

p – prawdopodobieństwo przewyższenia opadów, wyrażone w ułamku dziesiętnym

α – parametr położenia i skali, zależny od regionu i czasu trwania deszczu – wyznaczany z odpowiednich formuł

Formuły oraz mapki umożliwiające wyznaczenie parametru α w zależności od regionu i czasu trwania deszczu można znaleźć w literaturze⁵ oraz materiałach udostępnianych na zajęciach.

I tak dobrnęliśmy do końca tego rozdziału. Czekając niecierpliwie na dalszą część naszych fascynujących przygód z hydrologią na obszarach miejskich, pamiętajmy, że wbrew utartym schematom odgórne przyjęcie 15-minutowego deszczu wyznaczonego ze wzoru Błaszczyka nie zapewni nam szybkiego „rozwiązania problemu” wyznaczania opadu miarodajnego. Owszem, załatwimy sprawę w kilkanaście minut i zajmiemy zaledwie kilka linijek tekstu w naszym raporcie z obliczeń, ale jednocześnie ekspresowo wprowadzimy do naszych wyników niewiadomej wielkości błąd, który – jak wykazały analizy – może o około 40–50% zaniżyć uzyskiwane wartości natężeń odpływu ze zlewni. Nie dowiemy się, czy tak będzie ani w jakim stopniu moglibyśmy poprawić nasze wyniki, dopóki nie podejmiemy wyzwania i nie dokonamy sami lepszych, bardziej dokładnych obliczeń.

Szkoda byłoby, gdyby musiał robić to za nas ktoś inny albo gdyby za jakiś czas sprawdziła nas sama natura...

⁵ Możemy zajrzeć m.in. do oryginalnego opracowania autorów (Bogdanowicz i Stachy'ego 1998) czy też do udostępnionego w zasobach internetowych, cytowanego już w tej książce, opracowania KZGW (Banasik i in. 2017).

Rozdział 6. Globalnie rzecz ujmując, czyli o modelach globalnych w hydrologii

W tym rozdziale: Spójrzmy na to z góry. Do czego hydrologom czarna skrzynka? Coś dla mało ciekawych, czyli... nie interesuj się! Jedno równanie, wiele kłopotów.

Część I. Spójrzmy na to z góry. Do czego hydrologom czarna skrzynka?



Ostatnio sporo mówiliśmy o przygotowaniu danych do obliczeń. Opisaliśmy nasz obiekt hydrologicznych westchnień, czyli *zlewnię*. Ściślej – określiliśmy jej **cechy** (rozmiary, kształty, powierzchność, głębię i jej uwikłanie w sieć kanałów), a następnie cechom tym przypisaliśmy **wartości liczbowe**. Przygotowaliśmy się (przynajmniej wstępnie, teoretycznie) do sprecyzowania informacji wejściowej (w postaci liczbowej, rzecz jasna) o *opadzie*, który możemy traktować jak „bodziec” działający na nasz obiekt, czyli – jak już niejednokrotnie wspominaliśmy – *przyczynę całego zamieszania*. Teraz wypadałoby wreszcie wskazać konkretne równania, do których te dane wstawimy, by uzyskać wyniki, czyli odpowiedź na pytanie, co się stanie, jeśli na naszą zlewnię (tę konkretną, jakże nam już znaną i bliską) spadnie ten ściśle określony, konkretny deszcz.

Wiemy już z rozdziału 2, że dostępne modele obliczeniowe możemy dla naszych potrzeb zaklasyfikować do globalnych lub zintegrowanych. Wiemy też, kiedy które z tych modeli powinniśmy stosować i jakie konsekwencje ma podjęta na tym etapie decyzja. Teraz zajmiemy się tylko **modelami globalnymi**.

A że proces nauki powinien mieć charakter pewnej spirali (w której wprawdzie sukcesywnie przesuwamy się do przodu, jednak nie po linii prostej, czyli jakby na skrót, ale zataczając kolejne kręgi, by powtórzyć i utrwalić najistotniejsze kwestie), więc i my teraz powtórzymy najistotniejsze cechy modeli globalnych (obietuję – będzie bardzo krótko).

Wyobraźmy sobie, że na naszą zlewnię i wszystko, co się w niej dzieje, **patrzmy z góry**, czyli z wysoka, z odpowiedniej, stosunkowo odległej, perspektywy.



Możemy przyjąć, że w takim ujęciu nie jesteśmy w stanie dostrzec szczegółów. Poszczególne cechy naszej zlewni, jak również procesy w niej zachodzące nie są dla nas „widoczne”. Widzimy tylko „ogólny zarys”, czyli mamy jedynie „**zgrubny ogłąd**” sytuacji. Dostrzeżemy wprawdzie „przyczynę” (*o, spadł deszcz!*), ale też w mało dokładnym ujęciu. Ujrzymy jakiś skutek (*o, coś spłynęło!*), ale też bez szczegółów i możliwości dokładnej analizy. Czyli tak jak w życiu... Jeśli patrzymy na coś z daleka i z góry, to nie dostrzegamy istotnych szczegółów, a w związku z tym istnieje duże prawdopodobieństwo, że nasza ocena sytuacji będzie nieprecyzyjna, niekiedy zaś wręcz myląca...

W hydrologii istnieje też podział na modele „białej”, „szarej” i „czarnej” skrzynki. Określenia te mają nam pokazać, na ile transparentne jest to, co „siedzi wewnątrz” naszego modelu. Modele globalne moglibyśmy porównać właśnie do takiej **czarnej skrzynki**.



Wyobraźmy sobie czarne pudło – nasza zlewnia zamknięta jest w środku (biedaczka...), a my widzimy tylko, co do pudła wchodzi (dane o cechach zlewni i opadzie) i co z niego wychodzi (informacja o odpływie).

Oczywiście podane wyżej porównania mają za zadanie zobrazować i pomóc nam zrozumieć pewne rzeczy, nie są natomiast formalnym opisem cech wspomnianych modeli. *Proszę, nie opowiadajcie tego, gdy na przykład będziecie zdawać egzamin na uprawnienia hydrologiczne... Niech to będzie naszą tajemnicą ...*



Część II. Coś dla mało ciekawych, czyli nie interesuj się!

Podsumowując – **modele globalne nie są dla tych, którzy chcieliby poznać szczegóły**. Jeśli interesuje nas, jaki procent ogólnej ilości wód opadowych zostanie wykorzystany na intercepcję i infiltrację, oraz to, w którym momencie (liczonym od początku opadu) procesy te się rozpoczną i jak będzie się zmieniać ich intensywność w czasie – modele globalne nie są dla nas. Jeśli chcemy dokładniej odzwierciedlić hietogram opadu – pokazać, że na przykład deszcz trwał trzy godziny, ale w tym okresie miał zmienną intensywność, a przez pewne pół godziny napadało tyle, ile normalnie nie spada w ciągu całej doby – modele globalne nie są dla nas. Jeśli chcemy poznać kształt hydrogramu odpływu (czy to tylko w przekroju końcowym, czy też także w innych przekrojach obliczeniowych na obszarze naszej zlewni), dowiedzieć się, kiedy występowały szczytowe wartości przepływu (i ile było takich maksimum lokalnych) – modele globalne... już wiecie ☺.

Modele globalne przydają się w zadaniach, w których wymienione wcześniej szczegóły nie są istotne. W zadaniach, **w których możemy bez znaczącej utraty sensu naszych rozważań uśrednić wiele informacji i pominąć wiele detali**.

W zadaniach, w których zadowolimy się wynikiem w postaci jednej liczby, który będziemy traktować tylko jako zgrubne oszacowanie szczytowej wartości natężenia odpływu ze zlewni.

Jeśli nasze zadanie jest właśnie takie – OK, możemy stosować modele globalne.

Chcę tu podkreślić, że nie próbuję szanownych Czytelników zniechęcić do tych modeli. Jest wiele zadań inżynierskich, w których są one wystarczające. Uważam jednak, że dobry inżynier powinien mieć pełną świadomość, jak te modele działają, jakie mają możliwości i „niemożliwości” oraz na co (na jakie uproszczenia) się zgadzamy, stosując którąś z popularnych metod globalnych. Jeśli tego nie wiemy – będziemy widzieć tylko czarne pudełko i wykonywać obliczenia, stosując bezrefleksyjnie podane nam schematy... Osobiście uważam, że możemy wymagać od siebie więcej 😊!

Podsumujmy więc najistotniejsze cechy modeli globalnych:

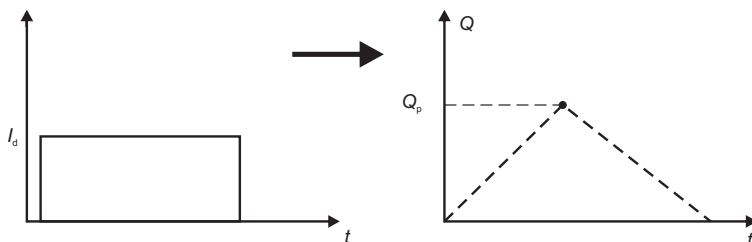
Charakterystyka ogólna modeli globalnych typu opad–odpływ

modele globalne – opis matematyczny całości złożonych procesów determinujących transformację opad–odpływ sprowadzony jest do **jednego prostego równania**

informacja wejściowa o opadzie – hietogram deszczu ma charakter „**deszczu blokowego**”, czyli zakładamy, że w trakcie epizodu natężenie deszczu $q = \text{const}$ ($I = \text{const}$); dla znanych wartości czasu trwania deszczu i prawdopodobieństwa jego przewyższenia wyznaczamy jedną wartość q (lub I), reprezentatywną dla rozwiązywanego zadania

informacja wejściowa o cechach zlewni – relatywnie **niewielka liczba współczynników** charakteryzujących zlewnię jedynie w sposób szacunkowy

wynik obliczeń – obliczeniowa wartość natężenia odpływu ze zlewni w jej przekroju zamykającym – **jedna wartość Q** , rozumiana jako przepływ w chwili maksymalnego wezbrania (**wartość szczytowa**, wartość „w pik”) Q_p



Jakie zatem modele globalne mamy do dyspozycji? I czy da się policzyć nimi coś „dobrze”?

Część III. Jedno równanie, wiele kłopotów

Mimo że modele globalne z natury rzeczy są metodami **szacunkowymi i niedokładnymi**, nie oznacza to, że możemy podchodzić do nich niedbale.

Wprost przeciwnie!

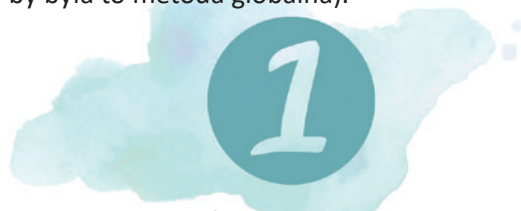
Jeśli wiemy, że będziemy stosować metodę obliczeniową, której potencjał jest stosunkowo niewielki (ale jednak jakiś jest, bo w przeciwnym razie nie byłaby uznawana za dopuszczalną), to nie możemy sobie pozwolić na wprowadzenie byle jakich (pod względem jakości) informacji o opadzie i cechach zlewni. Jeśli bowiem dane przygotujemy „po łebkach”, nie mamy już żadnych szans na uzyskanie jakiegokolwiek podobieństwa do rzeczywistości (słaby model, słabe dane, założone odgórnie wartości... *obliczeniowa bryndza*).

Równie dobrze mogliśmy chyba dobrać wszystko, strzelając w ciemno, i uznać, że to będzie nasza wartość miarodajna. (*Bo tak i już! A kto nam zabroni?*)

Aby jak najwięcej wycisnąć z metod globalnych, czyli policzyć odpływ tak dobrze, jak tylko pozwalają na to ich ograniczenia (a nie ograniczenia dotyczące naszych chęci i czasu), trzeba wiedzieć, **co leżało u podstaw merytorycznych poszczególnych metod** oraz ile to ma wspólnego z hydrologią, a ile z odgórnymi założeniami.

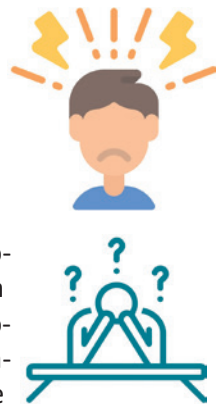
Poniżej skrótowo przedstawimy **trzy najistotniejsze dla nas metody** – **metodę racjonalną**, od której **wszystko się zaczęło**, oraz dwa jej zmodyfikowane warianty używane w Polsce – **metodę natężeń granicznych** i **metodę stałych natężeń deszczu**. Proszę za każdym razem zwrócić uwagę, w których miejscach każda z metod „*spotyka się z hydrologią*”, a w których zdecydowanie od niej odchodzi. Będzie wówczas łatwiej podjąć decyzję, którą z metod zastosować (jeśli już jesteśmy zdecydowani, by była to metoda globalna).

Metoda racjonalna



To historycznie pierwsza z metod – możemy powiedzieć: prekursorka. Została zaproponowana w USA w **1851** roku (*Zauważcie – to połowa XIX wieku! Taką ma już długą tradycję!*), a jej pierwsze zastosowanie (w 1889 roku) wiązało się z obliczeniem szczytowej wartości przepływu w kolektorze w miejscowości Rochester.

Spśród wszystkich wspomnianych metod ta ma **najsilniejsze powiązania z hydrologią**, gdyż jej założenia wprost wywodzą się z analiz, które także i my przeprowadziliśmy w poprzednich rozdziałach. Metoda racjonalna szybko zaczęła być



stosowana także w innych krajach, ale – jak to zwykle bywa – zaczęto ją też przerabiać i „poprawiać”, co ostatecznie sprawiło, że w różnych miejscach świata jej współczesne wersje – choć na pozór podobne – niekiedy w istotny sposób odeszły od podstawowych związków z hydrologią. Prześledzimy to na naszym „podwórku”, ale zacznijmy od oryginalnej wersji metody racjonalnej.

Przyjrzyjmy się najpierw podstawowym założeniom metody.

Założenia metody racjonalnej:

- metoda odpowiednia dla zlewni mniejszych niż 80 ha
- **opad ma natężenie stałe w czasie i przestrzeni** i obejmuje swym zasięgiem całą zlewnię ciągnącą do analizowanego przekroju
- **najniekorzystniejszy czas trwania deszczu równy jest czasowi koncentracji odpływu w danej zlewni**, a zatem $t_d = t_c$
(To kluczowe założenie! Wiemy, na jakiej podstawie je sformułowano – analizowaliśmy to w rozdziale 4)
- obliczonemu natężeniu przepływu na odpływie przypisane jest takie samo prawdopodobieństwo wystąpienia jak w przypadku opadu
Wzór ogólny metody w jej wersji oryginalnej przedstawia się następująco:

$$Q = C \cdot I \cdot A$$

Q – natężenie odpływu ze zlewni w momencie szczytu fali

C – współczynnik metody racjonalnej (współczynnik spływu)

I – natężenie opadów

A – powierzchnia zlewni

Z oczywistych względów należy pamiętać, by przyjąć jednolity system jednostek wielkości występujących we wzorze. Nawiązując do dobrze znanych nam oznaczeń funkcjonujących w Polsce, wzór można więc – bez zmiany jego znaczenia – zapisać następująco:

$$Q = \psi \cdot q \cdot A$$

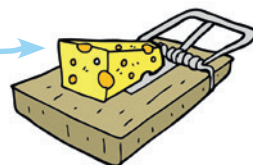
Q – natężenie odpływu ze zlewni w momencie szczytu fali [dm^3/s]

ψ – współczynnik spływu [–]

q – natężenie opadów [$\text{dm}^3/\text{s} \cdot \text{ha}$]

A – powierzchnia zlewni [ha]

Moglibyśmy na tym poprzestać, bo przecież powyższa formuła ma bardzo prostą, chciałoby się powiedzieć – wręcz banalną, postać. Cóż może być trudnego w jej zastosowaniu? Właściwie nic, gdyby nie fakt, że wielu inżynierów (nawet tych doświadczonych) może dać się złapać w *putapkę rutyny*.



Pozwólcie mi więc na kilka istotnych komentarzy.

Po pierwsze, zwróćmy uwagę, że metoda **nie narzuca, w jaki sposób wyznaczyć czas koncentracji odpływu ze zlewni**. To po naszej stronie leży decyzja, która strategia wyznaczania t_c będzie najwłaściwsza w naszym przypadku. Pamiętając, jakie znaczenie ma czas koncentracji w wypadku metod globalnych (czyli wtedy, gdy zakładamy, że zarówno wartości współczynników opisujących zlewnię, jak i natężenie opadu nie zmieniają się w czasie), powinniśmy to zrobić najlepiej, jak umiemy, wykorzystując wszystkie nasze **moce i zasoby** merytoryczne. **Nie idźmy na skróty i na łatwiznę.**

Po drugie, niech nas nie zwiodą prostota formuły i konieczność wyznaczenia tylko trzech wielkości – powierzchni zlewni, współczynnika spływu i natężenia deszczu. O ile powierzchnię zlewni raczej wyznaczymy prawidłowo, o tyle przy wyznaczaniu współczynnika spływu i natężenia deszczu możemy się poślizgnąć i mocą tego ślizgu znacząco odjechać od prawdy. Zauważmy, że jeśli przy wyznaczaniu współczynnika spływu pomylimy się o 10%, to o tyle samo procent zafałszujemy wynik Q .

A co się stanie, jeśli pomylimy się o 50% lub więcej?

Niemożliwe! – powie nasz znajomy pan Zenek.

Oj, panie Zenku, nie byłabym taka pewna.

Na zajęciach praktycznych z naszego przedmiotu pokazujemy, jak łatwo tu o pomyłkę. **Bywa, że 50% błędu to optymistyczny wariant.** A co z natężeniem deszczu? Wiemy, że powinniśmy obliczyć je na podstawie wartości czasu koncentracji i prawdopodobieństwa wystąpienia opadu. Załóżmy, że obie te wielkości wyznaczymy poprawnie. Co się jednak stanie, jeśli podstawimy je do wzoru Błaszczyka, czyli naszej „ulubionej” polskiej formuły, według której – zdaniem niektórych – „wszyscy liczą”? Z rozważań w rozdziale 5 wiemy już, że powinniśmy sprawdzić, czy dla naszego obszaru nie opracowano formuły lokalnej. A jeśli takiej formuły nie ma, to powinniśmy zastosować możliwie najaktualniejszą formułę dla danego regionu. Obecnie (podkreślam, obecnie) najbardziej aktualną formułą opracowaną dla całego kraju jest formuła Bogdanowicz i Stachý’ego (czyli formuła IMGW). Jak bardzo się pomylimy, stosując wzór Błaszczyka zamiast bardziej aktualnego? W jakim stopniu wpłynie to na wynik? Sprawdzamy to na zajęciach praktycznych. Niestety, nie są to różnice, które można pominąć, oj nie... Jaki stąd wniosek?

Nawet jeśli formuła jest prosta, nie znaczy to, że wstawiane do niej wartości można określać niefrasobliwie.

Pamiętajmy, że można to robić z większą uważnością – i o nią właśnie proszę.

Na koniec omawiania metody racjonalnej podsunę jeszcze szanownym Czytelnikom wskazówkę, która będzie dotyczyła większości metod globalnych. Ze względu na stopień skomplikowania rzeczywistych procesów i jednocześnie prostotę metod

globalnych, **nie możemy mieć pewności, że wartość maksymalna natężenia, którą wyznaczymy dla przekroju zamykającego zlewnię, będzie jednocześnie wartością maksymalną w całej zlewni**. Pamiętajmy, że w obliczeniach korzystamy z wartości uśrednionych dla całej zlewni zamkniętej danym przekrojem. Wyznaczamy zatem uśredniony współczynnik spływu dla całego obszaru, określamy czas koncentracji odpływu z całej zlewni itd. Może się jednak zdarzyć, że na terenie naszej zlewni znajduje się jakiś obszar o bardzo niekorzystnych z hydrologicznego punktu widzenia parametrach (np. o dużym stopniu uszczelnienia, słabo przepuszczalnej glebie i dużym spadku lokalnym). Czas spływu z takiego terenu będzie bardzo krótki, a współczynnik spływu – wysoki. Lokalnie mogą więc wystąpić dużo wyższe wartości natężeń odpływu niż te, które otrzymamy w wyniku obliczeń wykorzystujących uśrednienia dla całej zlewni. Nie możemy zatem uznać, że wartość Q obliczona dla całej zlewni jest reprezentatywna dla każdego jej fragmentu. *Co zatem warto zrobić?*

Otóż w niektórych przypadkach, szczególnie gdy cechy zlewni ulegają wyraźnym zmianom w różnych jej częściach, **należy dokonać obliczeń w większej liczbie przekrojów obliczeniowych**. Dzięki temu mamy lepszy obraz sytuacji i możemy zidentyfikować miejsca newralgiczne w zlewni. A to już informacja bardzo istotna z inżynierskiego punktu widzenia.

Metoda natężeń granicznych

2

Przyjrzyjmy się teraz naszej polskiej modyfikacji metody racjonalnej, jaką jest metoda natężeń granicznych. **Wzór ogólny w tej metodzie jest identyczny jak w metodzie racjonalnej**.

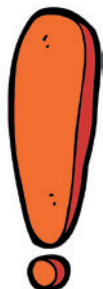
Podobnie **identyczne są założenia o stałości wartości parametrów zlewni oraz natężenia opadu (wiadomo, deszcz blokowy)**. Także **identyczne jest kluczowe założenie mówiące, że miarodajny czas trwania deszczu jest równy czasowi koncentracji odpływu ze zlewni**.

Gdzie zatem jest jakaś różnica?

Otóż tkwi ona w pozornie drobnym szczególe, który jednak może mieć ogromny wpływ na wyniki końcowe. Szczegół ten to **sposób wyznaczenia czasu koncentracji**.

Czy pamiętacie, że w przypadku metody racjonalnej nie mieliśmy narzuconej metody określania t_c ? Mieliśmy to zrobić najlepiej, jak się da. Tym razem jest jednak inaczej. W metodzie natężeń granicznych otrzymujemy instrukcję, jak wyznaczyć czas koncentracji. Jest w niej mowa o tym, że czas dopływu wody do analizowanego przekroju należy wyznaczać z formuły:

$$t_c = t_{kt} + t_r + t_k$$



t_{kt} – czas koncentracji terenowej (czas doływu do kanału) [min]

t_r – czas retencji kanałowej [min]

t_k – czas przepływu w kanale [min]

Gdyby w zaleceniach na tym poprzestano, moglibyśmy uważać, że nadal jest to zgodne z naszymi wcześniejszymi rozważaniami hydrologicznymi (no, może oprócz czasu retencji kanałowej, czyli chwilowego zatrzymania wody w kanale, zanim zacznie ona spływać, czego nie uwzględnialiśmy we wcześniejszych analizach). W utrwalonej jednak w Polsce praktyce obliczeniowej dwie spośród trzech wymienionych we wzorze składowych wielkości mamy **przyjmować odgórnie** zamiast na drodze obliczeniowej. W Polsce ciągle funkcjonują w tym zakresie zalecenia z 1965 roku! Mówią one, że:

- czas doływu do kanału t_{kt} powinien być przyjmowany z zakresu 2–10 minut, w praktyce najczęściej 5 minut;
- czas retencji kanałowej t_r przyjmuje się jako 14–20% t_k – w praktyce najczęściej 20% t_k .

W efekcie przyjęcia powyższych założeń uzyskuje się wzór na czas koncentracji w postaci:

$$t_c = 5 + 1,2 t_k$$

Prawda, że wygląda znajomo? Zanim go jednak zastosujemy, powinniśmy pamiętać, że zakładamy w nim, iż czas spływu wody po terenie trwa **dokładnie 5 minut**, a czas przepływu przez kanał zwiększamy o dodatkowe 20%, by uwzględnić retencję w kanale. Czy są to słuszne założenia? Kto wie... Jeśli kierujemy się „prawdą hydrologiczną”, to dla większości zlewni powyższe założenia raczej nie będą słuszne. A przynajmniej należałoby to sprawdzić. Czas doływu do kanału zależy przecież od specyfiki drogi spływu – jej długości, pokrycia terenu i spadku. Wydawałoby się, że skoro umiemy to policzyć, po co zakładać coś odgórnie? Obliczenia inżynierskie są jednak pewną wypadkową wiedzy merytorycznej i odgórnych założeń, które mają czasem coś uprościć, czasem zabezpieczyć przed uzyskaniem zbyt niskich wyników itp. Jednakże nasz temat wiodący to **hydrologia (zlewni zurbanizowanej)**. Moim celem jest więc pokazanie stosowanych procedur obliczeniowych w świetle **wiedzy hydrologicznej**. Odgórne narzucanie wartości czasów spływu może być zatem „odejściem” od hydrologii i potencjalnym miejscem „utrąty jakości” naszych wyników, jeśli będziemy je rozpatrywać w kontekście zgodności z przebiegiem procesów hydrologicznych.

Warto na koniec podać, że według nowszych standardów obecnie postuluje się skrócenie wartości czasów doływu do kanału i retencji kanałowej, aby w konsekwencji uzyskać krótszy czas doływu wody do analizowanego przekroju, a co za tym idzie – wyższe miarodajne natężenie deszczu i wyższe wartości Q^1 . Prowadziłoby

¹ Postuluje to m.in. prof. A. Kotowski w swojej książce pt. *Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów* (2011) i innych opracowaniach, proponując m.in. tzw. metodę maksymalnych natężeń.

to do projektowania obiektów gospodarowania wodą opadową na większe wartości miarodajne, a zatem bezpieczniejszych. W myśl tej idei można obecnie znaleźć (w książkach i artykułach) postulowane wartości czasu dopływu do kanału skrócone do 2 minut (jeśli zakładamy kategorie II–IV standardu odwodnienia terenu), a czas retencji kanałowej obniżony do 10% t_k . Nie są to jednak jeszcze powszechnie stosowane wytyczne.

Metoda stałych natężeń deszczu

3

Zajmijmy się teraz metodą, która znacząco **odbiega od dwóch wcześniejszych**. Może o tym świadczyć już sama **postać wzoru ogólnego**, w którym pojawia się dodatkowy współczynnik – **współczynnik opóźnienia**.

Skąd się tam wziął? Jaki był cel jego wprowadzenia?

Przypomnijmy, że ogólny wzór tej metody przybiera postać:

$$Q = \varphi \cdot \psi \cdot q \cdot A$$

gdzie φ to wspomniany współczynnik opóźnienia, który dla $A \leq 1$ ha wynosi $\varphi = 1$, dla $A > 1$ ha liczony jest zaś z formuły:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt[n]{A}}$$

A – powierzchnia zlewni [ha]

n – współczynnik zależny od wydłużenia i spadku zlewni

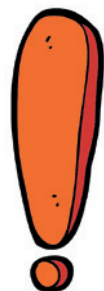
Zapytacie: *! po co to komu?* A co więcej, jak pogodzić fakt, że oto po prostu dodajemy sobie jeszcze jeden współczynnik liczony z tak dziwnego wzoru?

Aby zrozumieć, co autor miał na myśli, trzeba najpierw wiedzieć, że w metodzie tej **zmienia się założenie dotyczące wyznaczania czasu trwania deszczu**. Zamiast czasu koncentracji odpływu, w metodzie stałych natężeń deszczu **miarodajny czas trwania deszczu jest równy czasowi przepływu w kanale**, a więc jest krótszy. **Oto kluczowa różnica.**

Czy zgadza się to z hydrologią? Nie bardzo, bo wiemy przecież, że maksymalne natężenie na odpływie (przy założeniu stałego natężenia deszczu i stałej wartości współczynnika spływu) wystąpi po upływie czasu koncentracji, a ściślej – dokładnie w momencie, gdy $t_d = t_c$. **Dlaczego** więc mamy to zafalszować i przyjąć, że:

$$t_d = t_c ?$$

Przepraszam, ale nie wiem ☹. Mogłoby się wydawać, że jest to celowy zabieg obliczeniowy, by skrócić czas trwania opadu i wstawić do wzoru większą wartość



natężenia deszczu. Na przykład dla bezpieczeństwa. Ale w takim razie po co wstawiać współczynnik opóźnienia, który ma wartość z reguły mniejszą od jedności i tym samym z kolei obniża wartość Q ? Otóż autorzy metody uczynili to w celu „zredukowania” błędu, który wprowadzamy do obliczeń, sztucznie skracając czas trwania deszczu. Założenia metody mówią bowiem, że „**efekt działania retencji (kanału i zlewni) uwzględniany jest poprzez współczynnik opóźnienia**”, *notabene* obecnie nazywany niekiedy – chyba bardziej adekwatnie – współczynnikiem redukcji natężenia deszczu. Innymi słowy, **opóźnienie wynikające z konieczności dopływu wody do kanału uwzględnimy nie w wartości czasu trwania deszczu, ale poprzez dodatkowy współczynnik.**

OK, *ale dlaczego wartość tego współczynnika określamy z takiego wzoru, a nie innego?*

Przecież opóźnienie, o którym wcześniej wspominaliśmy, zależy od drogi, jaką woda musi przebyć, **zanim dotrze do kanału!** Czy zatem współczynnik opóźnienia nie powinien zależeć od pokrycia terenu, długości trasy spływu po terenie i jej spadku? Skąd zatem we wzorze powierzchnia całej zlewni?



Zauważmy dodatkowo, że aby wyznaczyć współczynnik opóźnienia, musimy wcześniej określić jeszcze inny współczynnik – **parametr n** , jak podają wytyczne: „zależny od spadku i wydłużenia zlewni”. Zauważcie: „zlewni”, a nie ścieżki spływu po terenie do kanału. Dlaczego? Cóż, prawdopodobnie pytania te pozostaną bez odpowiedzi. Podany wcześniej wzór na współczynnik opóźnienia na dobre zadowolił się w książkach przedstawiających metodę stałych natężeń deszczu. Niestety, chyba już tam pozostanie, dopóki ktoś nie zaproponuje czegoś lepszego...

Zwróćmy jeszcze uwagę na fakt, że nie mamy klarownej instrukcji, jak należy wyznaczyć parametr n . Wiemy tylko (na podstawie „wytycznych”), że dla zlewni „przeciętnych”² n wynosi 6, dla zlewni bardziej zwartych i o większym spadku – 8, a dla zlewni wydłużonych i o mniejszych spadkach – 4.

Wicie, jak to się kończy? W większości przypadków to wydłużenie zlewni oceniane jest „**na oko**” (*znovu!*). Jak łatwo się domyślić, w opracowaniach najczęściej spotkamy wartość 6, bo przyjęcie warunków przeciętnych wydaje się dość bezpieczne.

Bardziej uważny inżynier doszuka się w literaturze nielicznych propozycji, które mogą w pewnym stopniu być pomocne w bardziej wnikliwym doborze wartości tego parametru³. Ciągłe jednak nie stanowią one standardu obliczeniowego.

Nie będziemy dłużej opisywać tu tej metody. Niewykluczone, że każdy z Czytelników przynajmniej raz miał okazję ją zastosować, więc może sobie przypomnieć, jak wyznaczane były wówczas czas trwania deszczu (*czy czas przepływu w kanale*

² Pamiętajmy, że o zlewniach „przeciętnych” i „nieprzeciętnych” mówiliśmy w rozdziale 3. Warto sobie przypomnieć te pasjonujące rozważania.

³ Przykładem może być artykuł A. Królikowskiego i J. Królikowskiej pt. *Ocena wpływu współczynników spływu i opóźnienia na przepływy obliczeniowe w sieci kanalizacji deszczowej* (2009).

został policzony, czy raczej przyjęty odgórnie? – przyznajcie się!) i współczynnik n (czy wykonywane były jakieś obliczenia wydłużenia zlewni i spadku, czy raczej przyjęto wartość n odgórnie?). Jeśli dodamy do tego wcześniejsze uwagi dotyczące wyboru formuły opadowej oraz wyznaczania współczynnika spływu, zrozumiemy, ile potencjalnych pułapek czeka tu na nieświadomego skali zagrożenia inżyniera... Podkreślmy raz jeszcze – przedstawione analizy nie mają na celu zniechęcania do korzystania z tych metod ani deprymowania tych modeli. Chodzi tu raczej o **świadomość inżynierską**, w ślad za którą podążają **uwaga** i troska o możliwie najlepsze zrealizowanie procedury obliczeniowej. Najlepsze, czyli – w moim odczuciu – takie, w którym pozostaną choć **ślady hydrologii**...



Rozdział 7. Czas na integrację. Lepszy model, czyli o modelach zintegrowanych i wielkim wejściu



W tym rozdziale: Zabawa w pociąg, czyli każdy proces do osobnego pudełka. Wielkie wejście. Jak ugryźć hietogram syntetyczny?

Część I. Zabawa w pociąg, czyli każdy proces do osobnego pudełka

Panie i Panowie! Długo na ten moment czekaliśmy. Przekroczyliśmy półmetek naszych analiz i nareszcie jest! **Integracja!** Któż z nas choć raz jej nie doświadczył? To fajna sprawa, o ile w dobrym guście i dobrym towarzystwie. Nasze – *odrzućmy tu fałszywą skromność* – jest wyśmienite, więc bez obaw możemy przystąpić do działań ☺.

Integracja – jak sama nazwa sugeruje – wymaga co najmniej kilku osób/elementów/obiektów, które chcemy połączyć, by mogły współpracować dla potrzeb uzyskania lepszych efektów. Choć przyświecają jej ważne cele, w życiu codziennym wplątamy w nią zazwyczaj jakieś elementy zabawy... aby było przyjemniej ☺. My też tak zrobimy. W dwóch kolejnych rozdziałach.

Zdaję sobie sprawę, że nikt z nas, specjalistów, nie dał się zwieść i doskonale wie, że integrować będziemy... **modele obliczeniowe**. Wiem, *mogło być lepiej*, ale przyjmijmy to, co oferuje nam w tym momencie życie ☺. Ale i w tę integrację wpleciemy **zabawę**. W tym rozdziale pobawimy się **w pociąg**, a w jednym z kolejnych – **klockami**... Będzie fajnie!

Przejdźmy zatem do konkretów.

Wiemy (*powtarzaliśmy to już kilka razy, a teraz czas na kolejną powtórkę*), że dostępne modele obliczeniowe możemy dla naszych potrzeb zaklasyfikować do **globalnych** lub **zintegrowanych**. Tym razem zajmiemy się tymi **zintegrowanymi**. Z założenia – lepszymi i dokładniejszymi. Wprowadzicie bardziej wymagającymi i czasochłonnymi (*Ale cóż to dla nas?* ☺), za to oferującymi więcej możliwości. W odróżnieniu od podejścia globalnego, nie będziemy tu patrzeć z góry i udawać, że nie wiemy, co się dzieje w zlewni i na ile skomplikowany jest to węzeł wzajemnie powiązanych



procesów. Tym razem spróbujemy się z nimi zmierzyć. No bo w końcu kto, jak nie my... Oczywiście, nawet i na tym etapie przebieg zjawisk związanych z transformacją opadu w odpływ w naszej zlewni możemy analizować **na różnym poziomie szczegółowości**. Niczym Sherlock Holmes możemy, z lupką przy oku, próbować **szczegółowo rozpoznawać** i **odzwierciedlać** każdy proces bądź czynnik w modelu oddzielnie lub też możemy (*kto bogatemu zabroni?*) **łączyć niektóre czynniki i procesy w pewne „paczki”** i przyglądać się im mniej szczegółowo. Nigdy jednak nie załadujemy wszystkiego do „jednego pudła” i nie będziemy próbować opisywać wszystkich procesów **łącznie** jednym równaniem. Zawsze w naszym modelu wyróżnimy kilka modeli cząstkowych, odpowiadających **kolejnym etapom transformacji opad–odpływ**. To trochę jak zabawa w pociąg – ustawiamy lokomotywę i kolejne wagoniki, z których każdy reprezentuje kolejny etap formowania się odpływu ze zlewni



W najprostszym ujęciu naszą transformację opadu w odpływ możemy przedstawić jako ciąg procesów/etapów:

opad całkowity ⇒ **opad efektywny** ⇒ **spyw powierzchniowy** ⇒
przepływ w kanałach ⇒ **odpływ ze zlewni**

W ujęciu bardziej złożonym możemy dodawać kolejne procesy i elementy, np. przepływ przez zbiorniki czy też przepływ wód podziemnych. Zajmijmy się jednak tym prostszym wariantem, wyrażonym za pomocą przedstawionego powyżej łańcucha procesów. Ujęcie to w wielu przypadkach jest uznawane za wystarczające.

Nasz **pociąg będzie się składał z lokomotywy i trzech wagoników**. **Lokomotywa** – wiadomo, nie trzeba tłumaczyć – ciągnie cały skład, a zatem musi być „zasilana” paliwem, które dostarczy energii do tej ciężkiej pracy. W naszym ideowym przykładzie tym „paliwem” będzie **opad całkowity**, który pojawiając się na obszarze zlewni, wywołuje całe zamieszanie i powoduje konieczność „wyruszenia w naszą obliczeniową podróż”.

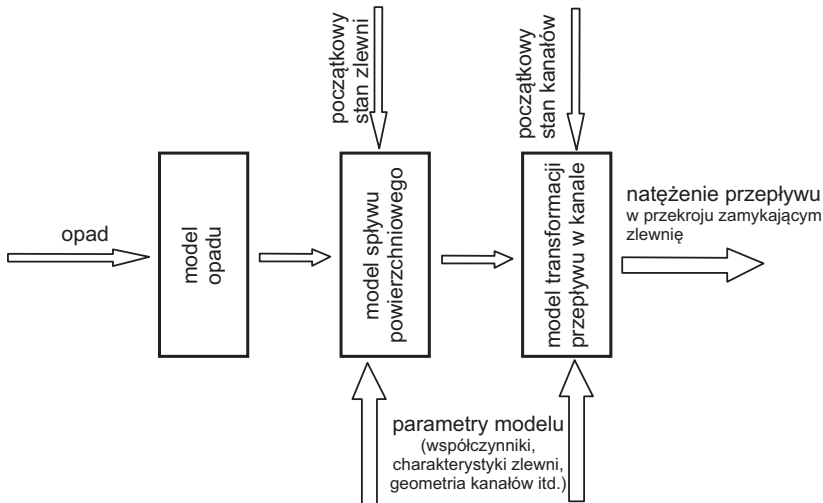


W **pierwszym z wagoników** będzie się znajdować tzw. **model opadu**, czyli narzędzie obliczeniowe umożliwiające wyłuskanie z całości opadu tej jego części, która będzie formować spływ. Wiemy już, że chodzi o **opad efektywny**, i to on będzie wyznaczany w pierwszym etapie. **Wagonik drugi** to model **spływu powierzchniowego**. Opad efektywny przekształcamy tu (w sensie matematycznym, rzecz jasna) w hydrogram spływu po terenie zlewni. Woda spływająca po powierzchni terenu dotrze wkrótce do kanałów, w których nastąpi dalsze przemieszczanie się i transformacja fali odpływu. Obliczeniami **przepływów w sieci kanałów** na obszarze naszej zlewni zajmie się model umieszczony **w trzecim wagoniku**. Odpływ z przekroju

zamykającego zlewnię będzie stanowił „*wyjście*” z całego modelu zintegrowanego i jednocześnie poszukiwaną odpowiedź końcową. Warto jednak zwrócić uwagę, że jeśli tylko chcemy, możemy zajrzeć do każdego wagonika i uzyskać wyniki procesów pośrednich.

Bomba, prawda?

Przypomnijmy (ze względów formalnych, bo przecież może się zdarzyć, że będziemy musieli zdawać jakiś egzamin albo coś...), że wcześniej (w rozdziale 2) już przedstawiliśmy modele zintegrowane w postaci odpowiedniego schematu. Przywołajmy go tutaj ponownie, by dobrze utrwalił się w naszej pamięci (rys. 7.1). To bardziej „poważna” ilustracja naszego pociągu. Taka na oficjalne występy i zaliczenia 😊



Rys. 7.1. Modelowanie zintegrowane – modele cząstkowe w modelu opad–odpływ (Weinerowska-Bords 2010)

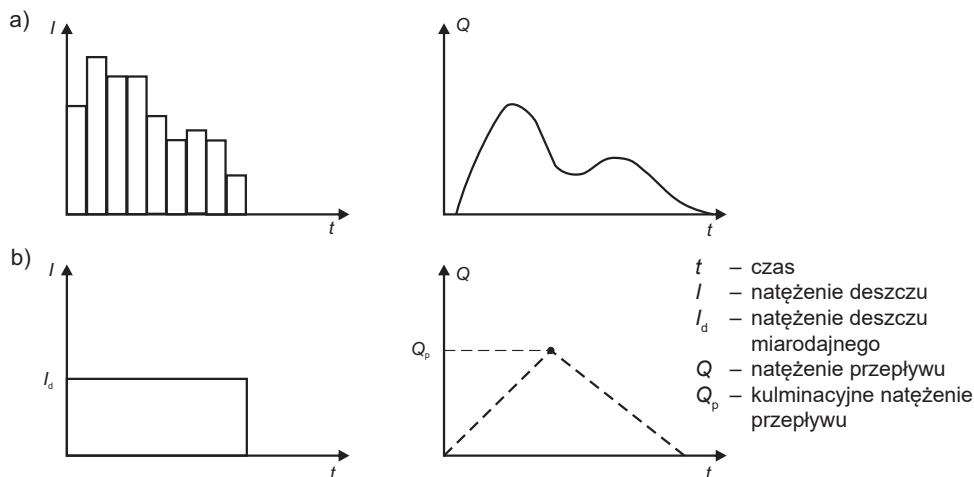
Przypomnijmy także i podsumujmy (*Znowu! Ale cel jest szczytny!*) najważniejsze cechy modeli zintegrowanych.

Najważniejsze cechy modeli zintegrowanych

- modele złożone z kilku modeli składowych odpowiadających etapom formowania się spływu
- lepsze odwzorowanie rzeczywistego przebiegu zjawisk w zlewni
- uwzględnienie zmienności w czasie zachodzących procesów a tym samym:
 - informację wejściową o opadzie stanowi miarodajny histogram opadu o zmiennym w czasie natężeniu
 - informacją wyjściową z modelu będzie funkcja przedstawiająca zmienność natężenia odpływu w czasie (hydrogram odpływu) (rys. 7.2a)



- więcej potrzebnych informacji o zlewni; **parametry modeli są bardziej „precyzyjne”** (uwzględniają mniej czynników, ale w dokładniejszy sposób)



Rys. 7.2. Porównanie kształtów hietogramów deszczu oraz hydrogramów odpływu ze zlewni w modelowaniu: a) zintegrowanym; b) globalnym

Na koniec części wstępnej powtórzmy sytuację, w których powinniśmy się zdecydować na wybór modeli zintegrowanych zamiast podejścia globalnego.

Zastosowanie modelowania zintegrowanego

Przy analizie systemów kanalizacyjnych i odwodnieniowych modele zintegrowane stosujemy w wypadku

wszystkich zadań z wyjątkiem projektowania małych standardowych systemów odprowadzania i zagospodarowywania wód opadowych. Modelowanie zintegrowane stosujemy więc dla takich zadań, jak:

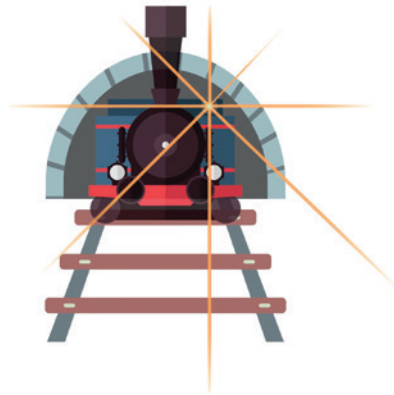
- projektowanie większych systemów odwodnieniowych;
- ekspertyzy i weryfikacja działania istniejących systemów;
- prognozowanie przepływów/odpływów;
- ocena wpływu urbanizacji na ilość/jakość wody;
- projektowanie większych zbiorników;
- ocena i redukowanie zagrożeń powodziowych;
- ocena możliwości i wpływu regulacji terenów zalewowych;
- sterowanie w systemach odwodnieniowych.

Przy analizie zagadnień dotyczących hydrologii cieków wodnych modele zintegrowane wykorzystujemy w wypadku

wszystkich zadań dla zlewni zurbanizowanych niekontrolowanych o powierzchni $< 50 \text{ km}^2$.

Część II. Wielkie wejście. Jak ugryźć hietogram syntetyczny?

Zajmijmy się teraz *lokomotywą*. Skrywa ona „zasilanie”, czyli w przypadku naszych zadań – **opad całkowity**. Przypomnijmy, że w modelowaniu zintegrowanym opad całkowity, stanowiący informację wejściową do obliczeń, **ma postać hietogramu (histogramu) o natężeniu zmiennym w czasie**. Będzie to nasz deszcz obliczeniowy. Omawialiśmy te kwestie już w rozdziale 5 i wspominaliśmy wtedy o dwóch możliwych podejściach.



Przypomnijmy więc teraz, że **deszcz obliczeniowy w modelach zintegrowanych może mieć postać:**

- **rzeczywistego epizodu opadowego** (czytaj: *takiego deszczu, co naprawdę „wziął i spadł”*), czyli hietogramu historycznego o zmiennym w czasie natężeniu deszczu, pochodzącego z **pomiarów**;
- **deszczu syntetycznego**, czyli **utworzonego w sposób sztuczny** (na drodze obliczeń) hietogramu deszczu o zmiennym natężeniu, o określonym czasie trwania i prawdopodobieństwie przewyższenia, który z jakiegoś powodu jest deszczem reprezentatywnym w naszym zadaniu.

Dociekliwy inżynier zapyta:

Kiedy deszczem miarodajnym powinien być deszcz rzeczywisty, a kiedy syntetyczny?

I zaraz otrzyma odpowiedź, którą zawarto w poniższej ramce.

Deszcz rzeczywisty (hietogram rzeczywisty) jest wykorzystywany:

- do kalibracji modeli;
- do weryfikacji modeli;
- do celów prognozowania w czasie rzeczywistym;
- do sprawdzania działania projektowanych lub istniejących obiektów w sytuacjach historycznych;
- na potrzeby odtwarzania rzeczywistych epizodów (np. ekspertyzy) itp.

Deszcz hipotetyczny (syntetyczny) jest wykorzystywany do:

- projektowania;
 - oceny ryzyka (np. powodzi), wyznaczania stref zagrożenia powodziowego itp.;
 - celów wyznaczania „opadu-reprezentanta” dla danego obszaru;
 - sprawdzania działania projektowanych lub istniejących obiektów w sytuacjach hipotetycznych, do tej pory nieobserwowanych.
-

Wiemy, że dane o opadach historycznych czerpiemy z wyników pomiarów. W jaki jednak sposób wyznaczyć hietogram *syntetyczny* w przypadku modeli zintegrowanych? Na pewno pamiętamy, że będą nam potrzebne formuła opadowa, czas trwania deszczu i prawdopodobieństwo jego przewyższenia. Tak było już zresztą w przypadku modeli globalnych. Pojawiają się jednak nowe *pytania*:

- Jak określić miarodajne wartości prawdopodobieństwa opadu oraz czasu jego trwania w przypadku modelowania zintegrowanego? Tak samo jak w modelach globalnych czy może inaczej?
- W jaki sposób uzyskać zmienne w czasie natężenie opadu? W modelowaniu globalnym zakładaliśmy przecież stałość natężenia deszczu w czasie (pamiętacie, deszcz blokowy...), więc akurat z tym nie było wcześniej problemu. A teraz jest...

Odpowiedzmy po kolei na te nurtujące nas wątpliwości.

Jak określić miarodajne prawdopodobieństwo przewyższenia opadów w modelowaniu zintegrowanym?

Uwaga, dobre wieści! Podejście jest w tym wypadku podobne jak przy modelowaniu globalnym. Dobór miarodajnego prawdopodobieństwa przewyższenia opadów opiera się na tych samych przesłankach, jakimi kierowaliśmy się w przypadku modeli globalnych. (*Jakich? Warto sobie przypomnieć, więc kto nie pamięta, powinien jak najszybciej zajrzeć do stosownego rozdziału*). Podobnie jak to miało miejsce w przypadku modeli globalnych, posiłkujemy się zaleceniami i wytycznymi, które podpowiadają nam, jakie wartości są odpowiednie w zależności od rodzaju zadania i celu wykonywania obliczeń. Czyli na razie jest nieźle...

Jak wybrać miarodajny czas trwania opadu dla potrzeb modelowania zintegrowanego?

Z *miarodajnym czasem trwania deszczu* sprawa jest bardziej skomplikowana. Oczywiście, o ile nie mówimy o deszczu historycznym, który już „wziął i spadł”, i – co więcej – został na tym przyłapany i zarejestrowany. W takiej sytuacji mamy wyniki pomiarów i skoro ten, a nie inny historyczny epizod opadowy jest dla nas istotny, to czas jego trwania dostaliśmy niejako *na talerzu*. Nie ma więc o czym mówić i zostawmy te przypadki. Gorzej jest natomiast, gdy mamy przygotować hietogram syntetyczny i to my osobiście musimy określić miarodajny czas trwania deszczu.



W przypadku modeli globalnych podstawową zasadą było przyjęcie za miarodajny czas trwania opadu czasu koncentracji odpływu ze zlewni. Wynikało to wprost z analizy hydrologicznej deszczu o stałym natężeniu pojawiającego się w zlewni o niezmiennych w czasie parametrach. Ta właśnie zasada była wykorzystywana w metodzie racjonalnej i metodzie natężeń granicznych, a z kolei niedopełniona w metodzie stałych natężeń deszczu, co okazało się jakże brzemienne w skutkach... W przypadku *modeli zintegrowanych nie ma już tak łatwo!* Jak pamiętamy, teraz rozpatrujemy większe zlewnie, których cechy (parametry) wcale nie muszą być niezmiennie

w czasie, a co więcej – opad całkowity nie ma stałego w czasie natężenia. Nie udaje się więc w tak prosty i jednoznaczny sposób wyznaczyć krytycznej wartości czasu trwania deszczu.

Jak więc sobie poradzić? Pamiętajmy, że poszukujemy wartości „miarodajnej”, a zatem takiej, która w naszym konkretnym zadaniu ma kluczowe znaczenie. Najczęściej jest to taka wartość czasu trwania deszczu, przy której **kulminacyjna wartość natężenia przepływu na odpływie – albo objętość fali odpływu – będzie najwyższa. Które z tych kryteriów wybieramy** (a może jeszcze inne, np. najwyższą rzędną zwierciadła wody w zbiorniku retencyjnym), zależy od tego, co jest dla nas **kluczowe** z punktu widzenia charakteru i celu naszego zadania. Właśnie ze względu na tę różnorodność **nie mamy w tym wypadku jednego uniwersalnego i prostego wzoru wskazującego, jak tę wartość miarodajnego czasu trwania wyznaczyć.** I to jest zła wiadomość. Ale oczywiście *nie popadajmy w rozpacz*, bo jest także i dobra informacja! Historia zna śmiałków, którzy przyjęli ten problem „na klatę”, i wiemy już, jak sobie z tym poradzić.



Co zatem należy zrobić?

Należy **wykonać wielokrotne obliczenia** odpływu dla opadów o różnym czasie trwania i jako wersję „miarodajną” wybrać ten przypadek, w którym uzyskaliśmy „maksimum” w odniesieniu do naszego, wybranego wcześniej, kryterium. *Brzmi strasznie, prawda?* Niestety, nie ma rady – jeśli ma być porządnie, trzeba się trochę wysilić. Jak więc postępować? Otóż na początek warto wyznaczyć **czas koncentracji odpływu ze zlewni**, po to by wstępnie ustalić zakres wartości, od których zacznie się analizy. Z doniesień hydrologów wynika bowiem, że miarodajne czasy trwania deszczu w zadaniach modelowania zintegrowanego są zazwyczaj dłuższe od czasu koncentracji odpływu, ale w większości przypadków nie przekraczają czterokrotnej jego wartości. Na początek to już coś. Postępujemy więc zgodnie z następującym schematem:

1. Przyjmujemy wstępne założenia:

- miarodajny czas trwania deszczu $t_d >$ czas koncentracji odpływu ze zlewni t_c ;
- pierwsze przybliżenie t_d jest równe ok. 170% t_c (wartość sugerowana w literaturze);
- według zaleceń DVWK¹ t_d mieści się w granicach 1–2 t_c ;
- w praktyce t_d wynosi niekiedy nawet 3–4 t_c .

2. Wybieramy wstępną wartość t_d , przeprowadzamy całość obliczeń, otrzymujemy końcowy hydrogram odpływu.

3. Wybieramy inną wartość t_d , przeprowadzamy całość obliczeń, otrzymujemy inny końcowy hydrogram odpływu.

¹ DVWK – Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Niemiecki Związek Gospodarki Wodnej i Melioracji.

4. Powtarzamy obliczenia dla kilku wartości t_d .
5. Ostatecznie za „miarodajną” uznajemy tę wartość t_d , przy której uzyskano krytyczne (najniekorzystniejsze) wyniki na odpływie.

Na pocieszenie – a czuję, że jest nam tej chwili potrzebne – wspomnę, że proces wykonania obliczeń dla przyjętej wartości t_d zajmuje zaledwie kilka minut! Pamiętajmy, że obliczenia możemy przeprowadzić, gdy już utworzymy cały model, a to właśnie jest największa i najbardziej czasochłonna część naszej pracy. Gdy model jest już gotowy, same obliczenia trwają bardzo krótko. Powtórzenie ich dla kilku różnych wybranych wartości t_d to już pestka w porównaniu z czasem, który musieliśmy wcześniej zainwestować w tworzenie naszego modelu. Warto więc nie odpuścić na samej końcówce i porządnie wykonać obliczenia dla większej liczby czasów trwania deszczu (a co za tym idzie – dla większej liczby różnych scenariuszy opadowych). Na tym etapie odcinamy kupony i korzystamy z możliwości naszego modelu (a należą do nich właśnie szybkość prowadzenia relatywnie skomplikowanych obliczeń i krótki czas, w jakim otrzymywany jest komplet wyników).

Jak uzyskać zmienne w czasie natężenie opadu w obrębie jednego epizodu deszczu?

Oczywiście powyższe pytanie znowu dotyczy hietogramów syntetycznych, bo te historyczne odtwarzamy na podstawie pomiarów. W przypadku hietogramów **syntetycznych** sami musimy zapewnić tę zmienność natężenia, i to w taki sposób, by miało to jakiś związek (*najlepiej duży!*) z rzeczywistością.

Jak się domyślamy, nie musimy tu odkrywać Ameryki i przedzierać się samotnie przez dziewicze obszary naszej niewiedzy. Wystarczy się jedynie przyrzeć dostępnym pomysłom zawartym w literaturze przedmiotu i zastosować jeden z nich. A lista możliwych do wykorzystania metod jest dość długa. Niektóre ze sposobów są bardzo uproszczone, inne zaś bardziej wyrafinowane. Warto sprawdzić, czy dla potrzeb rozwiązywanego przez nas zadania (lub dla obszaru, na którym znajduje się nasza zlewnia) nie istnieją jakieś wytyczne, które wskażą nam preferowane (przez hydrologów lub lokalne władze) metody.

Przykładowe metody opracowywania hietogramów syntetycznych to:

- metoda Yena i Chowa;
- metoda SCS;
- metoda Huffa;
- metoda wg zaleceń DVVK (1984) (obecnie często zalecana w Polsce);
- metoda blokowa.

Zwróćmy przy tej okazji uwagę na szczegół, który niekiedy sprawia kłopot mniej uważnym Czytelnikom: przedstawiona na ostatnim miejscu powyższej listy **metoda blokowa** służy (jak wszystkie pozostałe zresztą) do utworzenia **hietogramu syntetycznego deszczu o zmiennym natężeniu**, będącego czymś zupełnie innym niż deszcz



blokowy, który był bohaterem naszych rozważań w poprzednim rozdziale (i który, przypomnijmy raz jeszcze, charakteryzuje się stałym w czasie natężeniem opadu).



Swoją drogą, wspomniana wyżej **metoda blokowa** to w moim odczuciu metoda najlepsza, bo najtrafniej odwzorowująca warunki opadowe na danym obszarze, o ile zastosujemy ją w połączeniu z właściwą dla danego obszaru formułą opadową. Tak, słuszne są podejrzenia, że skoro jest to metoda lepsza, to pewnie też bardziej pracowita. Owszem, nie zaprzeczam. Ale mimo wszystko tę metodę w mojej subiektywnej ocenie uważam za najbardziej uzasadnioną. Jako jedyna spośród wszystkich wymienionych metod **nie wymaga**

odgórnego przyjęcia kształtu hietogramu; kształt ten jest uzyskiwany w wyniku obliczeń bazujących na formule opadowej. Szczegóły dotyczące zasad stosowania metody blokowej omawiamy w trakcie zajęć i są zawarte w materiałach do przedmiotu. Ale nie namawiam do jej wykorzystywania, ponieważ w Polsce zalecana jest obecnie – i tu niespodzianka – jedna z **najprostszych** metod, czyli **metoda według zaleceń DVWK**. Właśnie tę metodę omówimy bardziej szczegółowo.

Zanim jednak to uczynimy, poznajmy ogólny schemat postępowania w przypadku większości metod wyznaczania hietogramów syntetycznych (dotyczy on czterech pierwszych pozycji z naszej listy, bo ostatnia – jak już wiemy – jest wyjątkowa ☺).

- 1. Przyjęcie ogólnej postaci rozkładu czasowego opadu** (czyli ściślej: założenie ogólnego kształtu hietogramu lub ogólnego układu krzywej sumowej, a także przyjęcie odgórne, w którym momencie (licząc od początku opadu) wystąpi maksymalne natężenie opadu w ciągu całego epizodu).
- 2. Określenie całkowitej (sumarycznej) wysokości opadu**, jaka pojawi się na terenie naszej zlewni w wyniku opadu (wysokość tę wyznaczamy na podstawie określonych wcześniej wartości miarodajnego czasu trwania deszczu i prawdopodobieństwa wystąpienia opadu, korzystając z odpowiedniej formuły opadowej).
- 3. Wyznaczenie szczególnej postaci rozkładu czasowego opadu** (czyli naszego poszukiwanego opadu syntetycznego) – według algorytmu zależnego od zastosowanej metody (przy uwzględnieniu wyników z punktów 1 i 2).

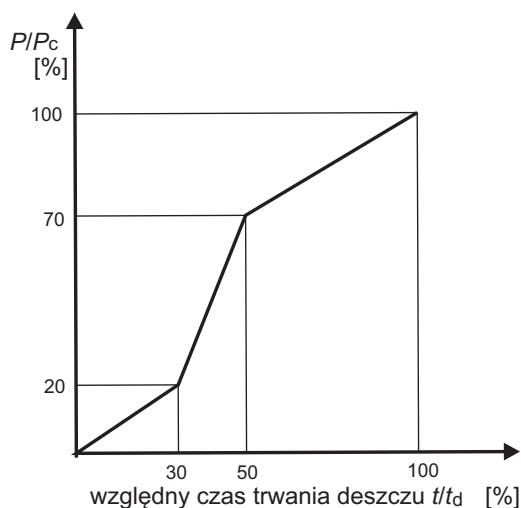
Prześledźmy teraz ten tok postępowania w odniesieniu do zalecanej w Polsce metody wykorzystującej wytyczne DVWK.

Zgodnie ze wspomnianymi wytycznymi zakłada się, że w trakcie trwania naszego epizodu opadowego (o łącznym czasie trwania t_d i sumarycznej wysokości opadu P_c) można wyróżnić trzy etapy o różnym natężeniu deszczu:

- **etap pierwszy** – trwający przez pierwsze **30%** całego czasu trwania deszczu t_d , w trakcie którego spada **20%** całej wysokości opadu P_c , przy czym natężenie opadu podczas tego etapu pozostaje stałe;
- **etap drugi** – trwający przez kolejne **20%** całego czasu trwania deszczu t_d , w trakcie którego spada kolejne **50%** całej wysokości opadu P_c , przy czym natężenie opadu podczas tego etapu pozostaje stałe;

- **etap trzeci** – trwający przez pozostałe **50%** całego czasu trwania deszczu t_d , w trakcie którego spada pozostała część wody, czyli brakujące **30%** całej wysokości opadu P_c , przy czym natężenie opadu podczas tego etapu również pozostaje stałe.

Łatwo się zorientować, że największa intensywność deszczu przypada na etap drugi. Wtedy to w najkrótszym czasie (bo zaledwie w ciągu 1/5 całego czasu trwania deszczu) spada aż połowa całej ilości opadu „przewidzianej” na ten epizod. Graficznie można to przedstawić w postaci krzywej sumowej opadu (wykreślonej w układzie względnym) jak na rys. 7.3.



Rys. 7.3. Kształt krzywej sumowej opadu według zaleceń DVWK

Co zatem konkretnie trzeba zrobić?

Otóż należy zastosować przedstawioną wcześniej trzypunktową procedurę. **Pierwszy punkt** mamy już za sobą – właśnie wybraliśmy (*Dobre sobie! Raczej przyjęliśmy, zgodnie z sugestią zawartą w wytycznych*) zalecany kształt rozkładu czasowego naszego opadu (taki jak na rys. 7.3). Moment wystąpienia maksimum też jest już wyraźnie określony – to cały odcinek czasowy odpowiadający środkowemu etapowi naszego deszczu.

Teraz przechodzimy do realizacji **punktu 2**. Musimy przyjąć miarodajny czas trwania deszczu t_d oraz miarodajną wartość prawdopodobieństwa opadu p (zgodnie z naszymi wcześniejszymi analizami). Musimy także wybrać najodpowiedniejszą dla naszego obszaru formułę opadową. Teraz, znając t_d i p , wyznaczymy – korzystając z formuły opadowej – całkowitą wysokość opadu P_c .

Przechodzimy do **punktu 3** naszej procedury. Znając czas trwania naszego opadu, możemy go podzielić na trzy etapy, trwające odpowiednio 30%, 20% i 50% czasu trwania deszczu. Znając całkowitą wysokość opadu P_c , możemy z kolei wyznaczyć

ilości wody opadowej przypadające na poszczególne etapy, czyli kolejno 20%, 50% i 30% P_c . Wreszcie, znając wysokości opadu i czasy trwania poszczególnych etapów, możemy dla każdego etapu określić odpowiadające mu natężenie opadu.

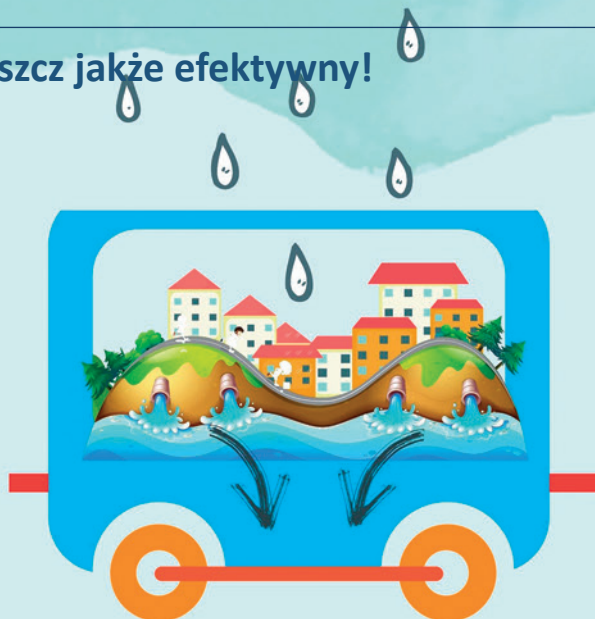
Jest to – jak widać – bardzo prosta procedura. Uzyskany w jej efekcie hietogram opadów – nie oszukujmy się – nie oszałamia swym wyrafinowaniem. Wprost przeciwnie, wygląda raczej mało podobnie do hietogramów, które otrzymujemy w wyniku pomiarów, a więc tych rzeczywistych. Skoro jednak tak sugerują wytyczne, pozostawmy to już bez dalszych dociekań. Cele naszego kursu obejmują przede wszystkim przedstawienie możliwości, wskazanie potencjalnych pułapek, przedyskutowanie kwestii wątpliwych. Problem oceny oraz ostatecznego wyboru metody pozostawiamy autorom obliczeń. Najważniejsze, że właśnie omówiliśmy nasze „*wielkie wejście*” do modelu, czyli „zasilanie” naszej *lokomotywy*.

Ciąg dalszy nastąpi... niebawem...

Rozdział 8. O opadzie jakże skutecznym, czyli ile można stracić?

W tym rozdziale: Deszcz jakże efektywny! Ile można stracić na tym terenie? Razem czy osobno?

Część I. Deszcz jakże efektywny!



Lokomotywa gotowa. Czas na *pierwszy wagonik*. A w naszym przypadku jest on pełen... **deszczu jakże efektywnego**. Przypomnijmy, na czym polega owa „efektywność” lub inaczej – „skuteczność” opadu. To, mówiąc obrazowo (i tylko na potrzeby naszych swobodnych strumieni myślowych), *tworzenie spływu powierzchniowego*.

Czy pamiętacie nasze arcyważne **równanie „na dobry początek”**? Tak, to z rozdziału 1. No jasne, że tak! Oto ono (raz jeszcze):

$$P(t) = L(t) + E(t) + f(t) + R(t) + I(t)$$

Równanie to pokazuje, że opad efektywny (oznaczony tu symbolem $I(t)$) to **nadwyżka opadu całkowitego $P(t)$ ponad wszystkie straty opadu w naszej zlewni** (a więc: intercepcję $L(t)$, ewapotranspirację $E(t)$, infiltrację $f(t)$ i retencję powierzchniową $R(t)$ razem wzięte). Aby więc mógł powstać spływ powierzchniowy, opad na terenie zlewni musi być dostatecznie duży, by przekroczyć wszystkie jej możliwości retencyjne.



Nie, żeby nam na tym zależało. O, nie. **Straty opadu to coś bardzo pożądanego.** Rozważaliśmy ten temat w rozdziale 1. Teraz skupmy się raczej na poznaniu sposobów, które można wykorzystać, by **wyznaczyć opad efektywny.**

Ogólnie mówiąc, wszystkie metody wyznaczania opadu efektywnego sprowadzają się do wyznaczenia strat opadu, a następnie obliczenia różnicy między opadem całkowitym i wysokością strat. Oczywiście zarówno opad całkowity, jak i możliwości retencyjne zlewni zmieniają się w czasie, a więc obliczenia opadu efektywnego będą polegać na określaniu wyżej wspomnianych różnic w kolejnych krokach czasowych, przy wykorzystaniu aktualnych dla danego kroku czasowego informacji o opadzie i intensywności procesów warunkujących straty.

Intensywność opadu całkowitego na tym etapie już znamy, bo to dana wejściowa do modelu opadu (czyli do pierwszego wagonika). Czerpiemy ją z hietogramu opadu całkowitego, który podróżuje w lokomotywie naszego pociągu ☺. Pozostaje nam więc wyznaczenie strat.

Część II. Ile można stracić na tym terenie? Razem czy osobno?

Ile zatem można stracić? I jak to wyznaczyć?

Ile? To zależy od cech zlewni i specyfiki konkretnego epizodu opadowego. A jak to wyznaczyć?

Otóż mamy do dyspozycji kilka sposobów. Ogólnie wszystkie dostępne podejścia można podzielić na dwie grupy odpowiadające dwóm różnym pomysłom na to, jak potraktować straty opadu.

W pierwszym przypadku **wszystkie procesy warunkujące straty** traktujemy **w sposób łączny**, bez wnikania w to, który proces w jakim

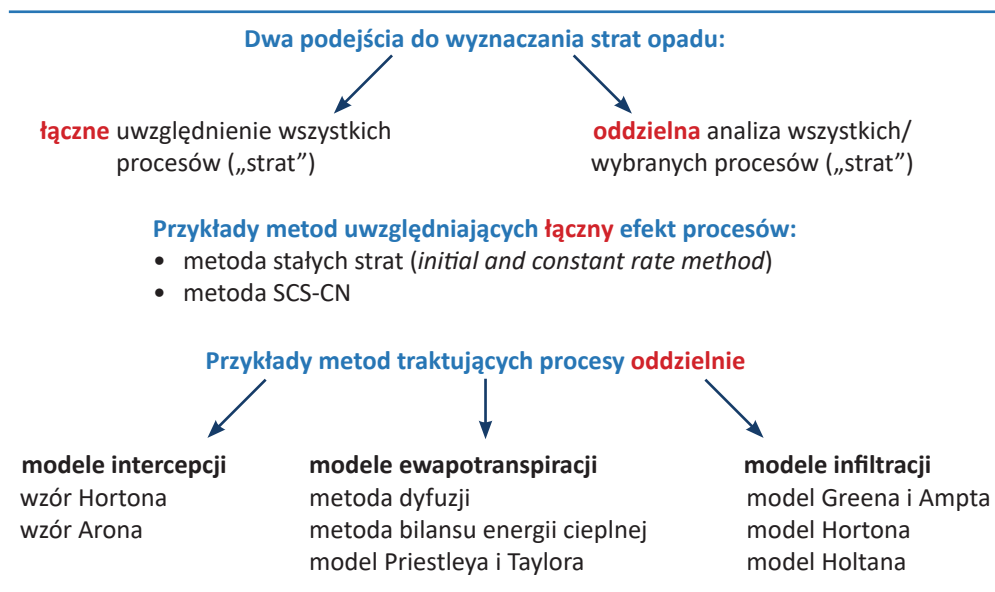
stopniu wpływa na całkowitą wysokość strat na obszarze zlewni. To uproszczone podejście, w wyniku którego wyznaczymy opad efektywny, ale nie poznamy szczegółowo intensywności procesów intercepcji, ewaporacji, infiltracji czy retencji powierzchniowej.

W drugim przypadku obliczamy straty opadu jako sumaryczny efekt **poszczególnych procesów, rozpatrywanych i opisywanych indywidualnie.** Oznacza to, że osobno wyznaczamy wysokość infiltracji, intercepcji i każdego z pozostałych procesów w kolejnych krokach czasowych, po czym je sumujemy i dopiero wtedy uzyskujemy wartość strat. Potrzebujemy więc osobnej metody do



wyznaczania intercepcji, osobnej do infiltracji itd. W podejściu pierwszym w wyniku zastosowania konkretnych wzorów wyznaczamy od razu opad efektywny.

Jak zatem widać, nawet w ramach modeli zintegrowanych możliwe są rozmaite podejścia, różniące się pomiędzy sobą szczegółowością opisu zjawisk i procesów. **Które podejście wybrać?** Oczywiście, będzie to zależać od celu obliczeń oraz naszej wiedzy na temat intensywności procesów zachodzących w rozpatrywanej zlewni. W przypadkach, którymi się tu zajmujemy, czyli w analizie pojedynczych gwałtownych epizodów opadowych powodujących odpływ ze zlewni, możemy przyjąć, że zarówno intercepcja, jak i ewaporacja będą miały stosunkowo niewielkie znaczenie. Wysokość retencji powierzchniowej zależać będzie od cech zlewni oraz ewentualnej obecności sztucznych obiektów, utworzonych przez inżynierów w celu poprawy retencji. Najistotniejszym procesem formującym straty będzie zazwyczaj infiltracja, o ile oczywiście wcześniej nie uszczelniono całej powierzchni zlewni, skutecznie zabezpieczając grunt przed przedostaniem się do niego jakiegokolwiek kropli wody.



W przypadku pojedynczych gwałtownych epizodów opadowych rozdzielanie powyższych procesów i obliczanie każdego z nich odrębnie nie wpłynie w istotny sposób na poprawę dokładności wyników. Co więcej – większa liczba modeli wymaga więcej danych wejściowych. Jeśli ich nie posiadamy albo zamierzamy je wyznaczyć „zgrubnie”, nie ma sensu nadmiernie komplikować matematycznego opisu zjawisk. Uznaje się więc, że

dla potrzeb naszych zadań wystarczająco dobre jest podejście, w którym wszystkie straty wyznaczane są łącznie.

W ramach tego spojrzenia mamy do dyspozycji dwie najpopularniejsze metody obliczania opadu efektywnego:

- **metoda** *initial and constant rate*, czyli w uproszczeniu metoda **stałych strat**;
- **metoda SCS-CN**.

W **metodzie stałych strat** zakłada się, że intercepcja i retencja powierzchniowa razem wzięte stanowią tzw. **straty początkowe**. Ewapotranspiracja jest najczęściej pomijana ze względu na bardzo małą wysokość, ale jeśli bardzo chcemy, możemy także ją dołączyć do strat początkowych. Oznaczmy straty początkowe tak, jak zazwyczaj robi się to w podręcznikach, czyli symbolem I_a (od angielskiej nazwy *initial abstractions*). Wartość ta wyrażana jest w milimetrach i oznacza maksymalną wysokość warstwy wody, jaka może być zatrzymana w zlewni w wyniku wspomnianych procesów. Procesy te uaktywniają się od razu na początku opadu. Dopóki sumaryczna wysokość opadu, jaka spadła na zlewnię od chwili jego rozpoczęcia do analizowanego momentu, jest niższa od strat początkowych, dopóty zlewnia „radzi sobie” z zatrzymaniem wody opadowej i nie obserwujemy żadnego spływu. Od momentu, gdy potencjał retencyjny zlewni w ramach trzech wymienionych wyżej procesów zostanie wyczerpany, ciągle jeszcze istnieje szansa na zatrzymanie pewnej ilości wody. Jest to możliwe dzięki infiltracji, o ile powierzchnia zlewni jest przynajmniej częściowo nieuszczelniona, a grunt choć trochę przepuszczalny. Wielkość **strat na infiltrację** w rzeczywistości zależy od rodzaju gruntu i aktualnych warunków w nim panujących (m.in. stopnia nasycenia wodą). W ogólnym przypadku na początku deszczu infiltracja może przebiegać z większą intensywnością, która z czasem stopniowo maleje i stabilizuje się na pełnej wartości końcowej. Założenie w metodzie stałych strat jest jednak inne. Otóż zakłada się, że **tempo infiltracji jest w ciągu całego epizodu jednakowe** (stąd nazwa metody) i równe są wartości f_a (intensywność strat na infiltrację), wyrażanej w milimetrach na godzinę. Jeśli zatem po zaspokojeniu „strat początkowych” w zlewni natężenie deszczu jest mniejsze niż wartość f_a , całość wód opadowych wsiąka i nadal nie obserwuje się spływu powierzchniowego (czyli opad efektywny jest ciągle równy zero).

Kiedyż zatem wreszcie pojawi się ten spływ, bo wszyscy się już niecierpliwia?

Otóż dopiero wtedy (a w przypadku silnych opadów „już wtedy”, bo wszystko zachodzi bardzo szybko), **gdy wyczerpane zostaną możliwości retencyjne w ramach strat początkowych i jednocześnie aktualne natężenie deszczu będzie większe niż możliwości infiltracyjne w zlewni**. Wówczas owa „nadwyżka” (różnica między natężeniem deszczu a natężeniem infiltracji) będzie „produkowała” **opad efektywny**.

Jak widać, metoda jest bardzo prosta i takie same są również obliczenia. Oczywiście, nikt z nas nie dał się zmylić i doskonale wiemy, że takie podejście trochę zafałszowuje rzeczywistość (**bo w praktyce tempo infiltracji zmienia się w trakcie trwania epizodu**). To jeden z powodów, dla których metoda ta jest mniej dokładna niż metoda SCS-CN, którą przypomnimy sobie za chwilę. Drugim powodem mniej-

szej dokładności metody stałych strat jest **sposób określania parametrów** tego modelu. Pamiętajcie na pewno, że nie ma ich wiele – tylko dwie wartości: I_a i f_a . Niestety, w obu przypadkach wartości te określane są orientacyjnie i tym samym bardzo „zgrubnie”.

Wysokość strat początkowych oceniana jest na podstawie pokrycia i zagospodarowania terenu zlewni, ale nie ma, niestety, precyzyjnych wskazówek, które pomogłyby określić wartość tego parametru. Podobnie jest w przypadku **wielkości f_a** , ustalonej na podstawie rodzaju gleby poprzez zakwalifikowanie jej do jednej z czterech kategorii (oznaczonych literami od A do D), odpowiadających kolejno dobrem, średnim, słabym i bardzo słabym warunkom infiltracyjnym. Są to te same kategorie gleb, które pojawiają się w metodzie SCS-CN. Niestety, na tym podobieństwo się kończy, gdyż w metodzie stałych strat do każdej kategorii glebowej przypisany jest orientacyjny przedział wartości f_a i biedny inżynier musi już sam wybrać konkretną wartość parametru dla swojego zadania. Nie jest to łatwe. Metodę stałych strat warto więc stosować wtedy, gdy prowadzimy wstępne obliczenia i chcemy „zgrubnie” ocenić potencjał zlewni. Pod względem dokładności zdecydowanie lepszym wyborem będzie metoda SCS-CN, chociaż – jak już na pewno się wszyscy domyślili – będzie przy niej więcej pracy. Takie jest życie...

Metoda SCS-CN jest najpopularniejszą i jednocześnie jedną z najlepszych metod określania opadu efektywnego. Z tej zapewne przyczyny jest też metodą najczęściej zalecaną, także w Polsce. Nie trzeba jej tu szeroko omawiać, bo należy do kanonu obliczeń z zakresu hydrologii ogólnej. Warto natomiast przypomnieć – chociażby po to, by porównać to podejście z metodą stałych strat – że także i tu pojawia się parametr nazwany **stratami początkowymi I_a** , w skład których wchodzi: intercepcja, retencja powierzchniowa oraz początkowa faza infiltracji, aż do momentu pojawienia się opadu efektywnego (no i ewentualnie ewapotranspiracja, w której jednak – jak już wiemy – nie powinniśmy pokładać wielkich nadziei, bo jest raczej nienachalna). Straty początkowe określane są na podstawie tzw. **maksymalnego potencjału retencyjnego zlewni S** , który z kolei wyznaczany jest na podstawie znanego i lubianego przez wszystkich **parametru CN**. Na temat tego ostatniego już dyskutowaliśmy w rozdziale 3. *(Tak, wtedy, gdy porównywaliśmy pod względem „jakościowym” i „formalnym” współczynnik CN i współczynnik spływu ψ , i ten ostatni nie miał żadnych szans na zwycięstwo w tym rankingu...)*.

Wartość CN wyznacza się na podstawie rodzaju gleb (poprzez ich zakwalifikowanie do jednej z kategorii od A do D), rodzaju pokrycia i zagospodarowania terenu, jakości szaty roślinnej, stanu uwilgotnienia gruntu, a także – **dodatkowo dla obszarów zurbanizowanych** – procentowego udziału terenów nieprzepuszczalnych oraz bezpośredniego podłączenia (lub braku takowego) obszarów uszczelnionych do systemów odwodnieniowych. Dużo tego, prawda? Warto pod-



kreślić, że te dwa ostatnie aspekty są **szczególnie ważne na obszarach miejskich**, toteż sposób wyznaczania wartości CN dla zlewni zurbanizowanych różni się nieco od wyznaczania tego parametru dla pozostałych typów zlewni. Szczegóły są omawiane w ramach zajęć praktycznych. Warto też podkreślić jeszcze jedną ważną rzecz:

sposób określania CN na podstawie wspomnianych wyżej kryteriów jest w pełni doprecyzowany i pozbawiony subiektywizmu.

To bardzo istotne, bo inżynierom zostaje oszczędzona wątpliwa przyjemność podejmowania trudnych decyzji bez odpowiednich przesłanek merytorycznych. (Wiecie, chodzi o decyzje typu: którą wartość z danego przedziału przyjąć – większą, mniejszą czy „dla bezpieczeństwa” średnią, skoro wiemy, że i tak nikt tego nie sprawdzi, bo sam też nie wie, ile powinno być...).

Wracając do założeń metody SCS-CN: wiemy już, czym są straty początkowe i jak je wyznaczyć. Na pewno każdy z Czytelników przypomina sobie, *co się dzieje, gdy skumulowany opad całkowity* (czyli – jak pamiętamy – zsumowany od początku trwania deszczu do analizowanego momentu) *przekroczy straty początkowe*. O, i wtedy zaczyna się robić ciekawie... Nadal trwa **infiltracja** (choć **jej intensywność stopniowo maleje w czasie**), a także pojawia się **opad efektywny**. Ten ostatni – ściślej: **skumulowany opad efektywny** (czyli... *tak, dokładnie tak: zsumowany opad efektywny od początku trwania deszczu do „teraz”*) – wyznaczany jest z bardziej złożonego wzoru, którego ostateczna postać – przypomnijmy – wygląda tak:

$$P_e(t) = \frac{(P(t) - m \cdot S)^2}{P(t) + (1 - m) \cdot S}$$

gdzie P_e to skumulowany opad efektywny [mm], P – skumulowany opad całkowity [mm], S – maksymalna retencja zlewni [mm], natomiast m to współczynnik wyrażony ułamkiem dziesiętnym, określający, jaką część całkowitej retencji zlewni stanowią straty początkowe.

Maksymalną retencję zlewni wyznaczymy z relacji:

$$S = 254 \left(\frac{100}{\text{CN}} - 1 \right)$$

natomiast wartość m dobiera się na podstawie wartości CN:

- $m = 0,200$ – dla $\text{CN} \geq 90$
- $m = 0,150$ – dla $80 \leq \text{CN} < 90$
- $m = 0,100$ – dla $70 \leq \text{CN} < 80$
- $m = 0,075$ – dla $\text{CN} < 70$

Tabele i wykresy do wyznaczania wartości CN są powszechnie dostępne w literaturze i udostępniane także w materiałach do zajęć praktycznych. Warto zwrócić uwagę, by korzystać z tabel uwzględniających tereny zurbanizowane.

Teraz wystarczy tylko dla każdego kroku czasowego podstawić do wzorów odpowiednie wartości parametrów i – *voilà* – mamy opad efektywny!

W ten oto sposób przeanalizowaliśmy zawartość dwóch pierwszych elementów naszego modelu zintegrowanego i jednocześnie dwóch pierwszych członów naszego *wesołego pociągu* – **lokomotywy** (z hietogramem **opadu całkowitego** w środku) oraz **wagonika nr 1** (w którym wyznaczamy **opad efektywny**).

W tym rozdziale, oprócz powtórzenia najistotniejszych pojęć i zasad, po raz kolejny przypomnieliśmy sobie, że **strata nie zawsze jest zła** i że czasem warto sporo stracić, by zyskać coś innego...

Pozostawiam Was z tą jakże cenną refleksją aż do kolejnego rozdziału, w którym do naszej ciuchci doczepimy kolejny wagonik...



Rozdział 9. Po niej to spływa, czyli spływ powierzchniowy w zlewni

W tym rozdziale: Spływamy, czyli kolejny wagonik. Bardzo ważna klasyfikacja, czyli *quo vadis*, inżynierze? Zabawa klockami. I znowu SCS



Część I. Spływamy, czyli kolejny wagonik

Drodzy Czytelnicy! Na pewno z utęsknieniem czekaliście na kolejny rozdział. Nie wykluczam, że spory wpływ na tę radość oczekiwania może mieć fakt, że powoli zbliżamy się do końca naszych rozważań... Ale na pewno – *i tu nie dam sobie wmówić, że jest inaczej* – absolutnie kluczowym powodem jest to, że w poprzednich rozdziałach zaczęliśmy kompletować skład naszego zintegrowanego pociągu



i ciągle brakuje nam dwóch niezwykle ważnych wagoników... Jeden z nich doczepimy już teraz...

Przypomnijmy: **lokomotywa** ciągnąca cały skład to nasza przeżabawna metafora **opadu całkowitego**, z kolei **wagonik nr 1** – to „model opadu”, czyli narzędzie obliczeniowe umożliwiające wyznaczenie **opadu efektywnego** na podstawie znanego opadu całkowitego i własności zlewni. Podkreślmy ważną rzecz: po realizacji etapu „wciśniętego” w pierwszy wagonik mamy już wyznaczony opad skuteczny (czyli tę część całości opadu, która przekształci się w spływ). A zatem mamy też określoną **całkowitą objętość wody**, która **spłynie** ze zlewni. **Spłynie po powierzchni terenu**, a potem dostanie się do kanałów. (Rzecz jasna, o ile takowe w naszej zlewni występują. Zważywszy jednak na fakt, że mówimy teraz o zlewniach dużych i bardziej skomplikowanych, mamy prawie stuprocentową gwarancję, że chociaż jeden kanał na naszym terenie się znajdzie). W dalszej kolejności woda popłynie tymi kanałami (lub tym jednym, samotnym) do zbiorników, przepompowni lub jeszcze innych obiektów, które znajdują się na naszym terenie. Celowo nie użyłam jeszcze określenia „odpłynie ze zlewni”, bo to, czy woda pomacha nam białą chusteczką i rzeczywiście bezpowrotnie opuści naszą zlewnię, czy też w niej zostanie (np. zretencjonowana w zbiorniku), jeszcze się na tym etapie nie rozstrzyga. Teraz – powtórzmy, bo to ważne – **znamy całkowitą ilość wody, która przekształci się w spływ**.

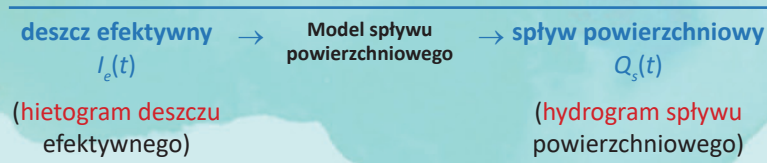
Chcielibyśmy jednak wiedzieć:

- jak ta spływająca ilość wody rozłoży się w czasie i przestrzeni?
- kiedy i w których miejscach zlewni nastąpi maksymalne natężenie spływu?
- w jaki sposób ten spływ zasili kanały i zbiorniki znajdujące się na naszym obszarze?

Takie niewinne inżynierskie marzenia mamy na tym etapie.

Doczepiamy więc **wagonik nr 2** – **model sptywu powierzchniowego** – do którego jako informację wejściową wprowadzimy hietogram opadu efektywnego, a którego „wyjściem” (wynikiem) będą **hydrogramy sptywu powierzchniowego** w interesujących nas przekrojach. Hydrogramy, czyli – przypomnijmy – funkcje zmienności natężenia (sptywu) w czasie.

Schemat modelu cząstkowego w wagoniku nr 2



Transformacja opadu efektywnego w sptyw powierzchniowy to etap bardzo trudny pod względem obliczeniowym. Na przebieg tego procesu, czyli – bardziej obrazowo rzecz ujmując – na to, **w którym miejscu, kiedy, ile wody i z jaką prędkością** będzie sptywać – ma wpływ wiele czynników. Aby to sobie uzmysłwić, wystarczy na chwilę **wcielić się w wyobraźni w kroplę wody** (zawsze o tym marzyliśmy, czyż nie?), która musi po powierzchni terenu dotrzeć do jakiegoś przekroju w kanale lub zbiorniku. To, jak potoczą się jej losy, zależy od pokrycia terenu, zmienności spadków oraz długości trasy, którą musi pokonać.



Kiedy dotrze ona do swojego punktu przeznaczenia? (*Strach pomyśleć, że jej przeznaczeniem jest kanał! A w lepszym przypadku – zbiornik* ☺). Ile koleżanek kropelek spotka po drodze? Czy trafi na „kulinację”, czy będzie sptywać raczej samotnie? Jakie siły będą ją pchać do przodu (grawitacja), jakie zasadzki na nią czyhać (szorstkość otoczenia czy też raczej „luzik” i sptyw po betonie)?

Jak przetrwa tę strasliwą podróż w nieznanne? Czujecie to napięcie jak w filmach Hitchcocka?

A pamiętajmy, że w naszych obliczeniach trzeba wziąć pod uwagę nie tylko jedną wybraną kroplę wody, ale wszystkie! Ich splecione dramatyczne losy na tak wielkim obszarze trzeba „opisać” właśnie modelem sptywu powierzchniowego.

Nic więc dziwnego, że z matematycznego punktu widzenia mamy do czynienia z zagadnieniem dwuwymiarowym (dwa wymiary przestrzenne) i na dodatek zdecydowanie zmiennym, zarówno w czasie, jak i w przestrzeni. **Specjaliści na pewno skojarzą, że**

pachnie to równaniami różniczkowymi cząstkowymi

w dwuwymiarowym, relatywnie dużym obszarze. Dla pasjonatów będzie to zapach piękny niczym aromat konwalii w maju, innym **będzie się kojarzył zgoła inaczej...**

Obiektywnie rzecz ujmując, jest to skomplikowane zadanie, wymagające zaawansowanego aparatu matematycznego. Powiem Wam w zaufaniu, że w świecie naukowym ten temat wcale nie jest zamknięty. Wprost przeciwnie – nawet trwają



pewne spory i dyskusje, jak odwzorować niektóre czynniki, a przede wszystkim, jak wyeliminować błędy numeryczne, które zawsze czyhają na nas w takich przypadkach...

Nic więc dziwnego, że od dawna poszukuje się sposobów, **jak uprościć sobie to zadanie i jakimi alternatywnymi podejściami zastąpić te bardziej złożone.**

Nie omówimy wszystkich możliwych metod obliczeniowych, bo jest ich mnóstwo. Co więcej – większość jest trudna i nie chcę na koniec psuć tej miłej, prawie „chilloucikowej” atmosfery naszej książki. A jeszcze dodam, że teraz – na szczęście – nie musimy się martwić podejmowaniem złożonych decyzji na temat tego, jakimi równaniami opisać ten etap naszych analiz, czy też – co gorsza – podejmować trudu tworzenia własnego oprogramowania. Oczywiście, możemy się wykazać ambicją w tej kwestii (*kto nam zabroni?*), ale nie ma już takiej konieczności, gdyż mamy do dyspozycji **gotowe narzędzia obliczeniowe.**

Dla inżyniera, który woli być praktykiem niż naukowcem, to bardzo przyjemna alternatywa. Ja jednak skupię się na ważnej sprawie, którą z uporem maniaka kolejny raz podkreślam w tej książce (*nie mówiąc już, ile razy wspominał o tym w czasie zajęć, więc dla świętego spokoju każdy Student chyba to zapamięta ☺*).

Z narzędziami obliczeniowymi jest trochę jak z młotkiem.



Każdy może po niego sięgnąć i nim pomajtać (*wszakże to żadna sztuka*), ale nie każdemu powinno się go dać do rąk... Mój postulat jest następujący: owszem, **stosujmy gotowe narzędzia** (*po to prze-*

cież są), **ale:**

- **miejmy** przynajmniej podstawową **wiedzę merytoryczną** na temat przebiegu procesów,
- **poznajmy** (choćby z grubsza) listę dostępnych **możliwości** obliczeniowych,

a także, decydując się na jakiś model obliczeniowy

- **miejmy świadomość jego zalet i ograniczeń**, jak również wpływu, jaki wywierają wprowadzane przez nas wartości parametrów na wyniki obliczeń.

Innymi słowy – **używajmy narzędzi świadomie** i z wiedzą, co jest w środku.

Takie jest właśnie moje marzenie jako belfra... W przeciwnym razie będziemy tylko bezrefleksyjnie wpisywać dane i „konsumować” wyniki, których nie będziemy w stanie ocenić pod względem ich wiarygodności i wartości merytorycznej. A do tego nie potrzeba dyplomu uczelni wyższej.

I właśnie dlatego w tym rozdziale nie będziemy omawiać szczegółowo różnych metod (mało kto by to wszystko spamiętał), ale poznamy – moim zdaniem –

bardzo ważną klasyfikację możliwych podejść, która z kolei determinuje zarówno sposób postępowania przy określaniu wartości parametrów, jak i jakość uzyskiwanych wyników.

Część II. Bardzo ważna klasyfikacja, czyli *quo vadis*, inżynierze?

Przechodząc do konkretów: ze względu na koncepcję opisu procesu modele spływu powierzchniowego można podzielić na dwie grupy:

modele konceptualne i **modele hydrodynamiczne**.

Innymi słowy: znowu stajemy na rozstajach i ponownie mamy wybór, *którą z dwóch dróg chcemy pójść*. W każdej z tych grup znajdziemy co najmniej kilka konkretnych modeli, więc jest z czego wybierać. Ale zanim zdecydujemy się na jeden z nich, przez chwilę stoimy na rozdrożu i pytamy, w którą stronę iść.

No właśnie, w którą? Quo vadis, inżynierze?

Zacznijmy od **modeli hydrodynamicznych**. Są one bardziej złożone i wymagające, ale za to łatwiej wyjaśnić ich podstawowe cechy. Modele hydrodynamiczne to te, w których chcąc opisać nasz proces, pytamy o jego *stronę fizykalną*. Innymi słowy, chcemy wiedzieć, co naprawdę się dzieje w trakcie powstawania spływu – jakie siły działają, jak kształtuje się bilans masy, pędu, energii... Odwołujemy się więc niejako do „prawdy” o przebiegu zjawiska. Wracając do naszych rozważań o podróżach kropelek po terenie naszej zlewni – w podejściu hydrodynamicznym nie ściemniamy, pytając grzecznościowo „jak minął dzień?”. My naprawdę chcemy wiedzieć, jak poszczególnym kroplom powiodła się podróż. U podstaw opracowywania równań opisujących procesy leżą zatem *podstawowe prawa fizyki* (prawo zachowania masy, prawo zachowania pędu itd.). Punktem wyjścia są **równania bilansu masy, bilansu pędu** itd. A te równania są, jak wiemy, równaniami różniczkowymi cząstkowymi, więc – wracamy do poprzednich rozważań – opis matematyczny jest relatywnie trudny. Oczywiście, w ramach tego podejścia możemy upraszczać niektóre aspekty, pomijać niektóre człony (jeśli w naszym przypadku nie są istotne) czy też uśredniać niektóre wielkości, ale nadal odwołujemy się do fizykalnej strony przebiegu zjawisk. To – można powiedzieć – *najwyższa półka modeli*. Przedstawicielami tej grupy są *model fali dynamicznej* (tak, tak, równania de Saint-Venanta), *model fali dyfuzyjnej* czy też *model fali kinematycznej*. Cechą wspólną tych modeli jest to, że ich *parametry mają* w większości (lub wręcz – wszystkie) *ściśłą interpretację fizykalną*. Innymi słowy – mówiąc bardziej potocznie – wiemy, czym jest dana wielkość, bo znamy ją z fizyki lub dziedzin pokrewnych. Można ją zmierzyć, odczytać z mapy lub ocenić w inny, ale zrozumiały dla nas intuicyjnie sposób. Wśród parametrów hydrodynamicznych modeli spływu pojawiają się więc powierzchnia zlewni, długość linii

splywu, spadek terenu, szorstkość powierzchni terenu itp. Próbując podsumować: **modele hydrodynamiczne** są modelami wymagającymi, relatywnie skomplikowanymi pod względem opisu matematycznego, ze stosunkowo dużą liczbą parametrów, przy czym parametry te są nam znane i stosunkowo łatwe do wyznaczenia. Obliczenia są praco- i czasochłonne, ale za to – jeśli zostaną przeprowadzone poprawnie – odznaczają się wysoką dokładnością (bo przecież w miarę możliwości dokładnie i sumiennie odwzorowaliśmy, co dzieje się w zlewni).



Czym na tle swoich obliczeniowych „rywali” są **modele konceptualne**? Otóż są to modele, przy których tworzeniu stosuje się pewien „trick”. Nie przyglądamy się fizycznej stronie analizowanego procesu (*za trudna, za obszerna i w ogóle fuj!*), tylko poszukujemy *pomysłu*, jak w inny sposób osiągnąć ten sam skutek. Chcielibyśmy dla naszego opadu efektywnego otrzymać prawidłowy wynik dotyczący splywu powierzchniowego, ale bez wnikania w „prawdę” o przebiegu procesów,

tylko jakoś tak szybciej, łatwiej i przyjemniej...

Być może teraz wydaje nam się to mniej uzasadnione, niż było jakieś trzydzieści czy czterdzieści lat temu. Jak wiemy – obecnie mamy łatwy dostęp do komputerów, dysponujemy bardzo rozwiniętymi metodami numerycznymi, dostępnością gotowego oprogramowania (w tym także programów bezpłatnych), dużym zasobem literatury na ten temat... Być może nie uwierzycie, ale kiedyś tak nie było. *Normalnie, szok!* W czasach, gdy komputer już istniał, ale zajmował cały pokój, a na wynik obliczeń pojedynczego epizodu trzeba było czekać kilka dni (licząc, rzecz jasna, od momentu, gdy ktoś już odczekał swoje w kolejce, dopchał się do maszyny i „wystartował” procedurę), **poszukiwanie łatwiejszych i szybszych procedur obliczeniowych było bardzo potrzebne**. Grupa modeli konceptualnych dostarczyła właśnie takich rozwiązań.

Modele konceptualne wykorzystują – jak sama nazwa wskazuje – jakąś **koncepcję** (pomysł, ideę), która pozwala wykorzystać do opisu naszego zjawiska coś innego, prostszego, co – chociaż w rzeczywistości dotyczy zupełnie innych zjawisk lub nie ma swojego odzwierciedlenia w „realu” – znakomicie pasuje i w cudowny sposób prowadzi do dobrych wyników. Pora na przykład, który najlepiej zobrazuje to, o czym mówimy.

Czy macie w domu *wannę*?

A może korzystacie raczej z prysznica? Przepraszam za to niedyskretne pytanie. Nie musicie odpowiadać. Nawet jeśli wanny nie ma w wyposażeniu Waszej łazienki, to każdy z Was na pewno poznał tajniki jej obsługi. Wyobraźmy więc sobie taką wannę...

Wanna ma swoje określone rozmiary i kształty (*a jakże!*), ma także otwór w dnie, przez który (*niespodzianka!*) możliwy jest odpływ wody, a nad wanną malowniczo





wkomponowana została bateria czerpalna, zwana powszechnie „kranem”. (...) *A wszystko przepasane, jakby wstęgą, miedzą Zieloną (...)* To, ile wody aktualnie znajduje się w wannie, zależy od początkowego jej napełnienia, intensywności dopływu i odpływu wody oraz kształtu i wielkości samej wanny. I na pewno dla nikogo nie będzie zaskoczeniem, że **nauka zna już równanie, którym możemy to opisać** (*Wow! Co za ulga!*), i dzięki temu każdy z nas może rozwiązywać fascynujące zadania matematyczne o kranach i wannach... Zamiast wanny możemy mieć basen, zbiornik retencyjny lub inny rzeczywisty obiekt kubaturowy, który możemy w podobny sposób napełniać lub opróżniać (niekoniecznie wodą), mając przy tym ogromną frajdę. Równanie opisujące zmiany ilości cieczy w zbiorniku i na wylocie nosi nazwę **równania retencji zbiornika** i powszechnie wykorzystywane jest m.in. w hydrologii i gospodarce wodnej.

A co by się stało, gdybyśmy naszą zlewnię porównali myślowo do takiej wanny?

Zauważmy, że z grubsza sytuacja jest analogiczna: coś do niej dopływa (opad efektywny), coś z niej odpływa (spływ powierzchniowy), a wzajemne proporcje zależą od cech charakterystycznych samej wanny, przepraszam – zlewni. Jest to przykład wspomnianego **pomysłu**. Ktoś naprawdę na to kiedyś wpadł i sprawdził, czy da się zastosować powyższą analogię i opisać proces transformacji opadu efektywnego w spływ powierzchniowy takim samym równaniem, jakie opisuje przepływ wody przez wannę. I wiecie co? **Zadziałało!** Potem wprowadzono pewne modyfikacje poprawiające dopasowanie, zamiast jednego wymyślanego zbiornika zastosowano myślowo całą ich kaskadę (czyli z *rozmachem!*) i w ten sposób powstały dobrze znane w hydrologii **modele zbiornikowe**. Wspaniale, prawda? Modele zbiornikowe to właśnie przykład modelowania konceptualnego.

No dobrze, to **gdzie jest haczyk?** – zapyta czujny młody inżynier i dostanie plusik za aktywność. Haczyk tkwi w części związanej z określaniem wartości parametrów. Bo o ile nasza wanna z pierwszego przykładu naprawdę istnieje, a więc możemy podać podstawowe wartości opisujące jej cechy i ich związek z intensywnością odpływu (np. same wymiary wanny, pole przekroju poprzecznego odpływu wody (*nawet z uwzględnieniem sitka!*) czy też funkcję zmienności pola powierzchni zwierciadła wody w zależności od napełnienia wanny), o tyle nasza **zlewnia**

wanną nie jest,

nie uda nam się więc zmierzyć średnicy odpływu czy jej „gabarytów”. W modelach konceptualnych zatem mamy stosunkowo prosty opis matematyczny i małą liczbę parametrów, ale niestety, parametry te nie mają w ogóle interpretacji fizycznej lub jest ona bardzo ograniczona. Skąd na przykład mamy wiedzieć, ile jest zbiorników w modelu kaskady zbiorników opisującym naszą zlewnię, skoro w rzeczywistości na obszarze naszej zlewni nie ma żadnej kaskady (bo ją sobie tylko wymyśliliśmy dla potrzeb obliczeń)? Myślę, że już czujecie, o co chodzi. Stosując modele konceptualne,



coś „zyskujemy” (bo mamy do rozwiązania łatwiejsze zadanie obliczeniowe), ale też coś „tracimy” (bo trudniej jest prawidłowo określić wartości konceptualnych parametrów i uzyskane wyniki na pewno są mniej dokładne).

Pamiętajcie rozdział 2, którego tematyka dotyczyła *modelingu w hydrologii* oraz dobrych i lepszych modeli? Zawarto tam wstępne omówienie tego problemu oraz przedstawiono przykładowy wachlarz metod obliczeniowych. Warto na chwilę powrócić do tej części książki i spojrzeć na zaprezentowane tam treści w kontekście naszych dzisiejszych rozważań. Mam nadzieję, że wszystko układa się Wam w całość...

Część III. Zabawa klockami

Odmianą od wspomnianej wyżej, ale bardzo ważną w hydrologii, ideą wykorzystywaną w modelowaniu konceptualnym jest koncepcja *hydrogramu jednostkowego*.

To jeden z podstawowych modeli, prawie pewniak na egzaminach i jednocześnie dla wielu twardy orzech do zgryzienia.

Gdy na zajęciach pytam Studentów, czy słyszeli o tej koncepcji, czy ją pamiętają i jakie są te wspomnienia, to połowie osób akurat w tym momencie pechowo coś spada na podłogę i muszą tego poszukać pod stołem. Druga połowa udziela odpowiedzi – wyrażonych werbalnie lub też nie – wskazujących jednoznacznie, że tak, coś było, ale może zapomnijmy o tym i nie pytajmy, o co w tym chodziło...

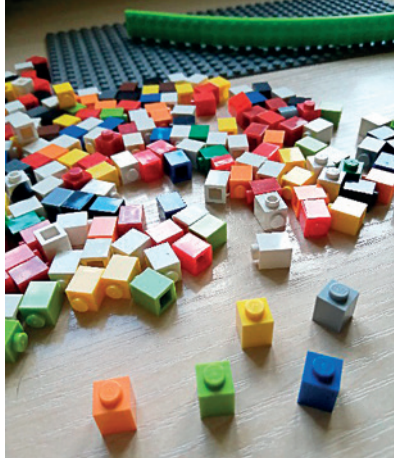
Być może się zdziwicie, ale **nie jestem zaskoczona taką reakcją**. Pomysł hydrogramu jednostkowego jest naprawdę świetny, ale na początku dość trudny do zrozumienia. Sytuacja wygląda w tym wypadku znacznie gorzej niż ze wspomnianą wcześniej wanną. Wannę przynajmniej widzieliśmy i wiemy, czego się po niej spodziewać. Hydrogramu jednostkowego w domu nie mamy i raczej w najbliższym czasie nie zamontujemy. Co gorsza, sam hydrogram jednostkowy w rzeczywistości nie istnieje (poza naszą wyobraźnię)!

Czyli ogólnie – *kiepska sprawa!*

Ale mam dobrą wiadomość! Udało mi się wpaść na pewien pomysł (czy też, moi drodzy, **koncept**), jak ten hydrogram jednostkowy wyjaśnić, by łatwiej było zrozumieć, o co w nim chodzi. Przetestowałam go kilka razy na zajęciach i zadziałało! Teraz zatem go przedstawię. Uwaga – na kartach książki będzie to absolutna premiera! Przyjmijcie ją więc ciepło ☺.

Do wyjaśnienia wykorzystamy... spojrzcie na rys. 9.1 ... *tadam!*

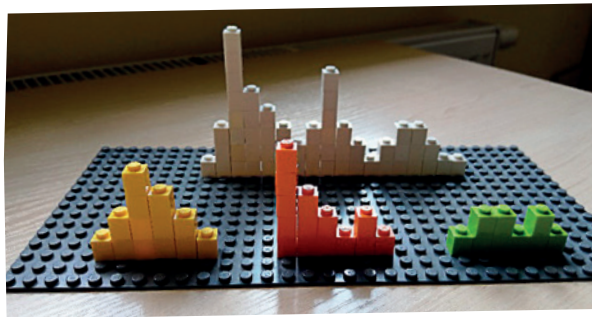




Rys. 9.1. Zestaw małego hydrologa (fot. autorki)

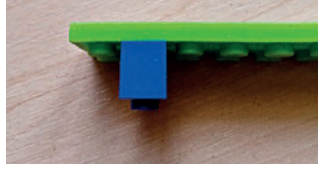
Tak, proponuję zabawę klockami. Ale nie dowolnymi, tylko – przyjrzyjcie się uważnie – jednakowymi pod względem rozmiarów. Ja wybrałam takie jak na zdjęciu, bo najlepiej wpisują się w „jednostkowy” charakter hydrogramu, który będziemy tłumaczyć. Wy możecie użyć innych, tylko nie próbujcie się wymigać ☺.

Spójrzcie teraz na kolejne zdjęcie (rys. 9.2). Cóż za misterne budowle!



Rys. 9.2. Nasze konstrukcje, czyli... (fot. autorki)

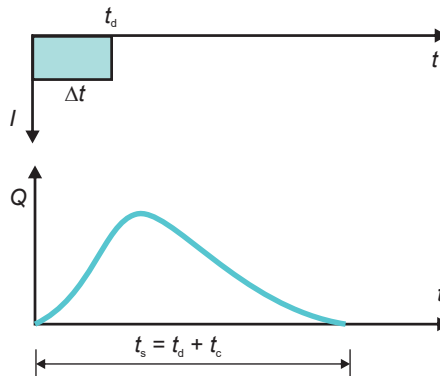
Czy coś Wam to przypomina? Przyjmijmy przez chwilę, że te cztery konstrukcje (każda w innym kolorze) to cztery różne **histogramy opadu efektywnego**. Każdy z nich został zbudowany z odpowiedniej liczby pojedynczych, takich samych klocków. Możemy więc przyjąć, że **dowolny histogram opadu efektywnego może być zbudowany z odpowiedniej liczby** pojedynczych klocków, czyli *jednostkowych impulsów opadowych*, takich jak na zdjęciu poniżej (rys. 9.3).



Rys. 9.3. Pojedynczy klocek = jednostkowy impuls opadowy (fot. autorki)

Za **jednostkowy impuls opadowy** w hydrologii przyjmuje się zazwyczaj opad (czy też raczej „opadzik”) o wysokości 1 cm (czyli 10 mm) i przyjętym (krótkim) czasie trwania Δt (często 10 minut, 15 minut lub 30 minut, w zależności od długości czasu trwania całego deszczu). Tak więc: **każdy dowolny opad efektywny może być traktowany jako odpowiednio poskładana konstrukcja, złożona z pewnej liczby pojedynczych impulsów**. Zauważmy jeszcze, że w czasie składania dokonujemy operacji mnożenia (zwiększania wysokości słupka w ramach danego kroku czasowego, proporcjonalnie do wysokości opadu w danym momencie) oraz dodawania (doklejania kolejnych słupków w kolejnych krokach czasowych).

Wróćmy teraz do rys. 9.3. Wyobraźmy sobie, że taki jednostkowy opad („opadzik”) spada na naszą zlewnię. Pamiętajmy, że jest to opad **efektywny**, więc na pewno przekształci się w spływ powierzchniowy. Jak będzie wyglądał hydrogram spływu wywołanego pojedynczym impulsem opadowym? No, na przykład tak jak na rys. 9.4. Taki hydrogram nazwiemy właśnie **hydrogramem jednostkowym**.



Rys. 9.4. Schemat poglądowy hydrogramu jednostkowego

Możemy już teraz przedstawić oficjalną definicję hydrogramu jednostkowego:

Hydrogram jednostkowy (oznaczany w literaturze zazwyczaj jako **UH**, czyli *unit hydrograph*, lub $u(t)$) to hydrogram spływu powierzchniowego, który stanowi **odpowiedź danej zlewni na „opad jednostkowy”**, czyli na impuls opadowy o jednostkowej wysokości (1 cm) i założonym czasie trwania Δt , rozłożony równomiernie na powierzchni zlewni.

Warto sobie uświadomić, że to, jak zlewnia odpowie na jednostkowy opad, będzie zależało od jej charakterystyki. Jeżeli założymy teraz, że nasza zlewnia jest systemem stacjonarnym, czyli że jej parametry nie zmieniają się w czasie (innymi słowy: za każdym razem zareaguje tak samo na taki sam impuls jednostkowy), możemy ostatecznie sformułować dwa istotne stwierdzenia:

- **każda zlewnia ma „swój” charakterystyczny hydrogram jednostkowy**, czyli swoją „własną”, charakterystyczną dla siebie, funkcję $u(t)$, będącą odpowiedzią zlewni na jednostkowy impuls opadowy;
- **funkcja hydrogramu jednostkowego $u(t)$ stanowi jedną z charakterystyk zlewni i zależy od parametrów i cech charakterystycznych zlewni.**

Biorąc teraz pod uwagę naszą wcześniejszą konkluzję, że:

każdy epizod opadowy można utworzyć z impulsów jednostkowych poprzez ich sumowanie lub przemnażanie przez określoną wartość,

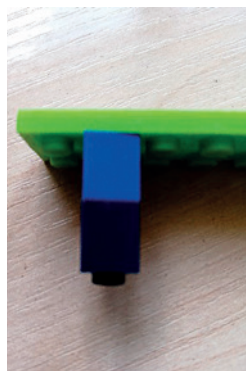
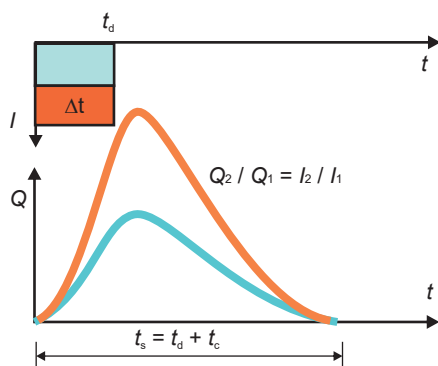
możemy w efekcie sformułować kluczową ideę metody hydrogramu jednostkowego (czyli „pomysł/koncept” modelu konceptualnego):

Jeśli znamy odpowiedź zlewni na jednostkowy impuls opadowy, to możemy wyznaczyć odpowiedź tej zlewni na każdy dowolny epizod opadowy, stosując zasady liniowości i superpozycji.



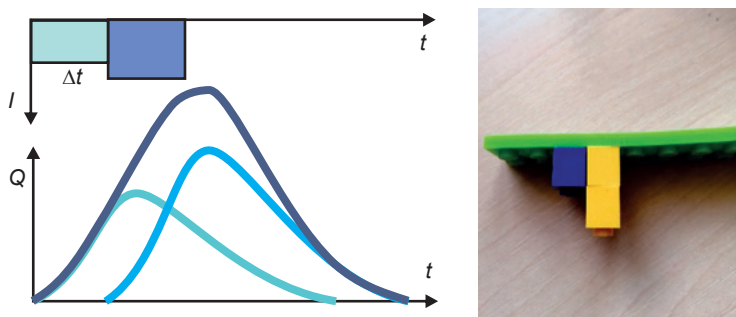
Innymi słowy: jeśli znamy hydrogram jednostkowy dla naszej zlewni, to na jego podstawie skonstruujemy hydrogram odpływu spowodowany dowolnym opadem. W jaki sposób? Dokładnie tak, jak z pojedynczego impulsu opadowego tworzymy histogram danego deszczu – mnożąc i dodając kolejne impulsy. Działają tu bowiem dwie wspomniane wcześniej zasady: liniowości i superpozycji.

Zasada liniowości to inaczej zasada proporcjonalności: jeśli deszcz jednostkowy wywołuje określony spływ, to deszcz k razy większy wywoła k razy większy spływ (rys. 9.5).



Rys. 9.5. Ilustracja zasady liniowości (fot. autorki)

Zasada superpozycji mówi nam z kolei, że zarówno impulsy opadowe, jak i odpowiadające im odpowiedzi zlewni można do siebie dodawać (rys. 9.6).



Rys. 9.6. Ilustracja zasady superpozycji (fot. autorki)

Przykładowo, na rys. 9.6 jasnoniebieska krzywa to spływ powierzchniowy wywołany pierwszym (jasnoniebieskim) impulsem deszczu. Krzywa ciemnoniebieska to odpowiedź zlewni wywołana tylko impulsem drugim (tym wyższym, ciemniejszym, a na zdjęciu – żółtym). Krzywa granatowa to wynik końcowy działania obu impulsów opadowych, jeden po drugim. Uzyskujemy ją, sumując rzędne dwóch krzywych: jasno- i ciemnoniebieskiej. W ten sposób, krok po kroku, możemy „zbudować” odpowiedź zlewni na dowolną konfigurację impulsów opadowych.

Podsumowując, metoda hydrogramu jednostkowego mówi nam zatem, że: **jeśli tylko znasz hydrogram jednostkowy dla swojej zlewni, to wyznaczysz sobie spływ spowodowany dowolnym opadem efektywnym. W tym celu sprawdź, w jaki sposób histogram opadu efektywnego można „złożyć” z jednostkowych impulsów opadowych, a potem w ten sam sposób „złóż” wypadkowy hydrogram spływu z hydrogramów jednostkowych.**

Oczywiście, powyższy algorytm da się wyrazić w postaci formuł matematycznych. Formuły te doskonale znacie, bo pojawiały się na innych zajęciach. Są też przedstawione w materiałach do wykładu i w książkach z zakresu hydrologii. Mają postać odpowiedniej całki splotu. Nie będziemy ich tu teraz przytaczać. Mam tylko nadzieję, że teraz sama idea (koncept) tej metody jest bardziej zrozumiała.

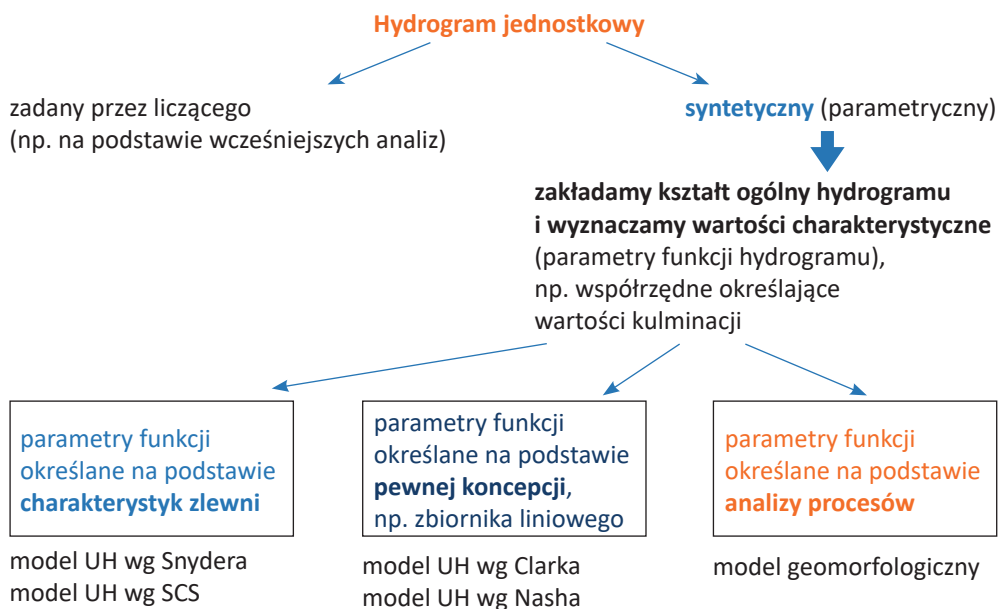
Pozostaje jednak jeden zasadniczy problem:

Skąd wziąć hydrogram jednostkowy dla naszej zlewni?

To przecież warunek powodzenia naszej metody!

Słusznie się domyślacie, że skoro ktoś już wymyślił samą metodę, to ktoś (ten sam lub inny) musiał również zaproponować sposób wyznaczania samych hydrogramów jednostkowych, czyli funkcji opisujących niebieską krzywą na rys. 9.4. I macie rację. Jest wiele pomysłów na to, jak je otrzymać dla danej zlewni. Pomysły te można pogrupować i całość przedstawić w postaci schematu.

O, właśnie takiego:



Wybór konkretnego rozwiązania jest uzależniony od cech naszej zlewni, informacji, które na jej temat posiadamy, a także od możliwości zidentyfikowania (czyli wyznaczenia konkretnych wartości) parametrów modelu. Warto pamiętać o tym ostatnim punkcie oraz o tym, że mówimy o modelu konceptualnym. Pamiętacie? W takim modelu część lub wręcz całość parametrów **nie ma interpretacji fizycznej**. Musimy zatem mieć możliwość wyznaczenia wartości parametrów odpowiadających sytuacji w naszej zlewni, a także wiedzę, jak to zrobić w sposób prawidłowy. Z powodu braku możliwości wiarygodnego wyznaczania parametrów niektóre modele należy wręcz w określonych sytuacjach odrzucić.

Część IV. I znowu SCS

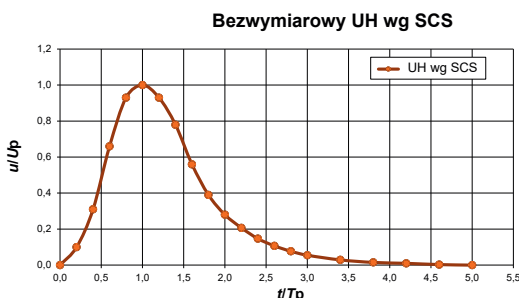
W Polsce metodami najczęściej stosowanymi w odniesieniu do spływu ze zlewni zurbanizowanych są modele hydrogramu jednostkowego (UH) według SCS oraz według Nasha. My, na potrzeby naszych zajęć, wykorzystamy tę pierwszą metodę. Poniżej, już na koniec rozdziału, znajduje się krótkie zestawienie najistotniejszych założeń i wzorów dla tego podejścia.

Model UH według SCS

Założenia:

1. Hydrogram jednostkowy (UH) może być wyznaczony na podstawie **bezwymiarowego hydrogramu syntetycznego**, reprezentującego „typowy” kształt hydrogramu jednostkowego dla wielu przebadanych zlewni (bezwymiarowy UH został określony przez autorów metody i jest podany dalej w formie wykresu i tabeli).
2. W celu wyznaczenia hydrogramu jednostkowego charakterystycznego dla analizowanej zlewni należy **na podstawie cech zlewni wyznaczyć wartości dwóch parametrów funkcji $u(t)$** :
 - czas wystąpienia wartości kulminacyjnej T_p ;
 - wartość hydrogramu w momencie kulminacji („szczytu”) sptywu U_p .
3. Znając kształt bezwymiarowego UH oraz wartości T_p i U_p , wyznaczmy funkcję $u(t)$ dla naszej zlewni.

Bezwymiarowy UH według metody SCS (wykres i tabela):



t/T_p	u/U_p
0,0	0,000
0,2	0,100
0,4	0,310
0,6	0,660
0,8	0,930
1,0	1,000
1,2	0,930
1,4	0,780
1,6	0,560
1,8	0,390
2,0	0,280
2,2	0,207
2,4	0,147
2,6	0,107
2,8	0,077
3,0	0,055
3,4	0,029
3,8	0,015
4,2	0,010
4,6	0,003
5,0	0,000

Wyznaczenie wartości parametrów:

$$T_p = \frac{t_{d,e}}{2} + t_p \quad U_p = \frac{2,08 A}{T_p}$$

gdzie: $t_{d,e} = \Delta t$ – czas trwania jednostkowego impulsu deszczu efektywnego [godz.]

t_p – czas opóźnienia (*lag time*) [godz.]

uwaga: w metodzie SCS: $t_p = 0,6 t_c$

(t_c – czas koncentracji odpływu ze zlewni)

U_p – szczytowa wartość $u(t)$ [m^3/cm]

A – powierzchnia zlewni [km^2]

T_p – czas do wystąpienia wartości szczytowej [godz.]

W celu wyznaczenia funkcji $u(t)$ przemnażamy pierwszą kolumnę tabeli przez T_p , a drugą przez U_p . Otrzymujemy funkcję $u(t)$ w formie dyskretnej.

W ten oto sposób zakończyliśmy omawianie zasobów z drugiego wagonika naszego pociągu... Czas na wagonik ostatni.

Rozdział 10. Niezły kanał i kontakt z bazą, czyli o przepływie w kanałach i przepływie bazowym

W tym rozdziale: No to kanał! Naukowiec nad wodami rzeki. Co na to baza, czyli słów kilka o przepływie bazowym

Część I. No to kanał!

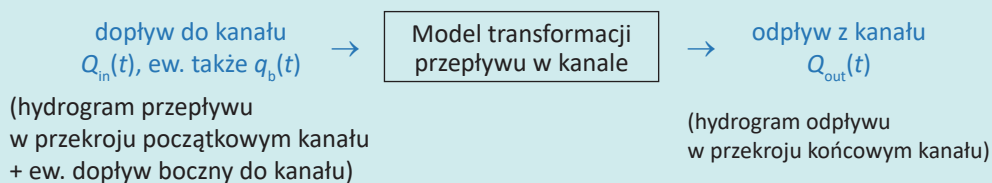
Czas na ostatni wagonik. W *wagoniku numer 3* naszego pociągu podróżuje sobie **model transformacji przepływu w kanałach**. Woda opadowa bowiem, po przygodach przeżytych na etapie spływu powierzchniowego, dociera wreszcie do kanału. Może to być kanał naturalny w postaci potoku miejskiego, a może być to kanał sztuczny (*dzieło rąk ludzkich!*) – np. rów odwodnieniowy bądź też kanał kanalizacji deszczowej lub ogólnospławnej.

W zależności od jego stanu napływającą właśnie z gościnną wizytą wodę czekają miłsze bądź bardziej szorstkie warunki dalszego przepływu.

Model przepływu w kanale ma nam pomóc znaleźć odpowiedź na pytanie, jak będzie wyglądała funkcja hydrogramu (*przypomnijmy – funkcja $Q(t)$*) na wyjściu z kanału, jeśli znane są kształt hydrogramu na wejściu oraz cechy samego kanału.



Schemat modelu cząstkowego w wagoniku nr 3



Tyle już zostało powiedziane, że stosunkowo łatwo się domyślić, jak będzie wyglądać proces obliczeniowy na tym etapie. W zależności od potrzeb wybieramy jedno- lub dwuwymiarowy model przepływu w kanale (w przypadku modeli hydrologicznych – najczęściej jednowymiarowy), który – i tu dobre wieści – można wybrać albo z grupy modeli **konceptualnych**, albo **hydrodynamicznych**. Wiemy już, czym się charakteryzują obie grupy – jest to dokładnie „ta sama bajka” co w przypadku spływu powierzchniowego. Oczywiście, same modele są inne, ale pod względem ideowym sprawę mamy już rozpoznaną.

Przedstawmy więc sobie tylko **najczęściej stosowane modele transformacji przepływu w kanale**, ustawiając je w formie drabinki od najprostszego (u dołu) do najbardziej złożonego (na szczycie ☺).

Wybrane modele przepływu w kanale otwartym

- model fali dynamicznej (układ równań de Saint-Venanta)
 - model fali dyfuzyjnej *modele hydrodynamiczne*
 - model fali kinematycznej
 - model Muskingum-Cunge
 - model Muskingum *modele konceptualne*
 - model *Modified Puls*
 - model *Lag (lag – opóźnienie, przesunięcie, translacja)*
-

Orientacyjną granicę podziału między modelami konceptualnymi (u dołu) a hydrodynamicznymi (na górze) zaznaczono linią przerywaną. Granica ta nie jest jednak do końca ścisła, gdyż niektóre modele konceptualne wymykają się tej klarownej klasyfikacji i niejako „jedną nóżką” wkraczają na terytorium modeli hydrodynamicznych. Ale o tym za chwilę.

Tymczasem spieszę uspokoić tych Czytelników, którzy zdążyli się już zdenerwować, że oto na kolejnych stronach będziemy teraz omawiać poszczególne metody. Nie będziemy. Pełen luz. Równania opisujące transformację przepływu w kanale według różnych modeli zamieszczone są w wielu książkach¹, do których możecie zajrzeć, gdy tylko dopadnie Was tęsknota za równaniami przez duże **R**. Dla potrzeb naszych zadań będziemy stosować najczęściej *model Muskingum-Cunge* (jeden z ulubionych modeli hydrologów, jednocześnie sprawdzony w wielu praktycznych aplikacjach). I to temu modelowi poświęcimy dosłownie chwilę.

Część II. Naukowiec nad wodami rzeki

Omawianie modelu **Muskingum-Cunge** warto rozpocząć od wyjaśnienia nazwy – przynajmniej, ciekawej. Otóż, Panie i Panowie, pierwszy jej człon pochodzi od *nazwy rzeki*, dla której model został opracowany i po raz pierwszy zastosowany. Jak zapewne zwróciliście uwagę, w hydrologii (i na naszej liście przytaczanej wcześniej) funkcjonuje również *model Muskingum* (taki *sauté*, bez dodatków), można więc podejrzewać, że Muskingum-Cunge będzie pewnym rozwinięciem tego pierwszego. I tak w istocie jest. Uważni (i pamiętliwi) Czytelnicy przypominają sobie zapewne moją niedawną uwagę, że niektóre z modeli konceptualnych zaglądnęły na poletko modeli hydrodynamicznych. Dotyczy to między innymi właśnie modelu Muskingum, który w sensie matematycznym stanowi pewną hybrydę *podejścia hydrodynamicznego* (jako że punktem wyjścia jest – *uwaga, werble* – różniczkowe równanie bilansu

¹ Jako przykład możemy tu przytoczyć podręcznik *Podstawy hydrologii dynamicznej* (Szymkiewicz, Gąsiorowski 2010).

masy, czyli równanie ciągłości) oraz **konceptualnego** (odcinek kanału, po scałkowaniu równania ciągłości, opisywany jest **równaniem retencji zbiornika** uzupełnionym o **dotatkowe równanie pokazujące relację między dopływem, odpływem i retencją**). **Dobrze, namówiliście mnie!** Przedstawiam Wam te ostatnie równania:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t) \quad (\text{równanie retencji})$$

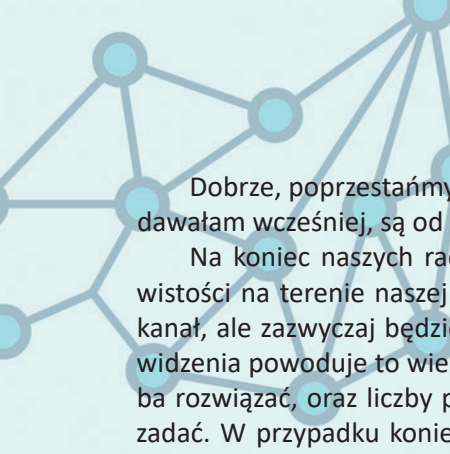
$$V = K [X Q_{out} + (1 - X) Q_{in}] \quad (\text{dotatkowe równanie})$$

W równaniach tych V jest retencją analizowanego odcinka kanału (czyli objętością wody zgromadzonej w tej „sekcji” kanału), Q_{in} i Q_{out} są odpowiednio zmiennym w czasie natężeniem dopływu do kanału oraz natężeniem odpływu, natomiast K i X to parametry modelu. X jest pewnym parametrem wagowym z przedziału $<0, 1>$, natomiast K – parametrem mającym wymiar czasu. Wielkości V i Q_{out} są niewiadomymi, natomiast Q_{in} jest znane. (*Pamiętacie? To informacja wejściowa do naszego modelu. Jest to funkcja dopływu do kanału, na przykład w wyniku spływu powierzchniowego*). Dwa równania, dwie niewiadome – niby prosta sprawa, ale jednak pewien kłopot. Trzeba bowiem zawczasu wyznaczyć wartości parametrów modelu (czyli *drugi rodzaj informacji wejściowej do modelu*), a te w pierwotnej wersji modelu Muskingum miały charakter konceptualny (*wiecie, nie do końca wiadomo, jak je zinterpretować i skąd je wziąć*). Można, oczywiście, próbować dopasować ich wartości metodą „prób i błędów” lub zastosować bardziej wyrafinowane podejście (np. kalibrację na drodze optymalizacji), ale żeby tego dokonać, trzeba dysponować **wynikami pomiarów**, z którymi można by porównać nasze obliczenia, aby móc ocenić, czy trafiliśmy z wyborem wartości parametrów, czy jeszcze nie (*czyli: próbuj dalej*). Dla jednych to cudne wyzwanie inżynierskie, dla innych – lepiej nie mówić... Na pewno oznacza to uciążliwość i wiąże się z ograniczeniem stosowalności metody. A szkoda, taka była ładna, „amerykańska”.

I wtedy pojawia się on! Jean Cunge. I pokazuje, jak wyznaczać parametry K i X w powiązaniu z charakterystykami kanału i prędkością fali wezbrania. I wszystko staje się prostsze i piękniejsze. Czy rozumiecie ten przełom? Nie trzeba już dysponować wynikami pomiarów, by móc dokonać identyfikacji parametrów modelu. Ich wartości można bowiem określić ze stosunkowo prostych relacji (*przytoczmy, a co tam!*):

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad X = 0,5 \left(1 - \frac{Q_r}{B \cdot i_k \cdot c \cdot \Delta x} \right)$$

gdzie Δx jest długością rozpatrywanego odcinka kanału, c – prędkością fali wezbrania, i_k – spadkiem dna analizowanego odcinka kanału, B – szerokością zwierciadła wody, natomiast Q_r jest natężeniem odniesienia (lub mądrzej: referencyjnym), wyznaczanym najczęściej jako średnia wartość hydrogramu dopływu do kanału. Myślę, że teraz już dla wszystkich jest jasne, skąd się wziął drugi człon nazwy **metody Muskingum-Cunge**.



Dobrze, poprzestańmy na tym. Więcej równań nie będziemy przytaczać. Jak podawałam wcześniej, są od tego mądre książki.

Na koniec naszych radosnych rozważań warto jeszcze zaznaczyć, że w rzeczywistości na terenie naszej zlewni najprawdopodobniej nie wystąpi jeden samotny kanał, ale zazwyczaj będzie to *cała sieć kanałów*. Z matematycznego punktu widzenia powoduje to wielokrotne zwiększenie rozmiaru układu równań, który trzeba rozwiązać, oraz liczby parametrów i liczby warunków brzegowych, które trzeba zadać. W przypadku konieczności samodzielnej pracy nad układem równań i jego numerycznym rozwiązaniem byłaby to ogromna trudność. Wobec dostępności gotowych narzędzi obliczeniowych to „tylko” kwestia prawidłowego odzwierciedlenia struktury sieci oraz zdobycia kompletu danych o charakterystykach poszczególnych kanałów (kształt przekroju poprzecznego, wymiary, spadek podłużny kanału, współczynnik szorstkości). To nie tak źle, prawda? Nie zwalnia to jednak inżyniera z partyzanckiej czujności i gotowości do podejmowania decyzji, na przykład w kwestii, która z dostępnych metod będzie optymalna dla naszego zadania.

Część III. Co na to baza, czyli słów kilka o przepływie bazowym

Zbliżyliśmy się wielkimi krokami do zakończenia naszych rozważań. Kolejne wagoniki naszego pociągu zobrazowały nam ciąg procesów umożliwiających odzwierciedlenie transformacji opadu w odpływ w naszej zlewni. Tak przygotowany model będzie nam mógł służyć do wyznaczania hydrogramów odpływu (*czyli tego, co uzyskamy na „wylocie” z ostatniego wagonika, jakkolwiek by to nie brzmiało*), stanowiących odpowiedź zlewni na konkretny opad całkowity (*czyli to, co „załadujemy” do naszej lokomotywy*). Wynik takich obliczeń nosi nazwę **odpływu bezpośredniego**, czyli tego, który jest efektem tylko i wyłącznie pojawienia się wód opadowych.

Wiemy jednak, że w kanałach przepływ może wystąpić także w czasie pogody bezdeszczowej. Najprostszym tego przykładem są potoki miejskie. Taki przepływ, obserwowany długookresowo w warunkach bezopadowych, nosi nazwę **przepływu bazowego**. Łatwo wykoncytować, że całkowity odpływ ze zlewni będzie zatem sumą odpływu bezpośredniego i przepływu bazowego.

odpływ całkowity = odpływ bezpośredni + przepływ bazowy

Baza – ważna rzecz. Nie można o niej zapomnieć. Jeśli będziemy chcieli sprawdzić, czy w czasie opadów nie nastąpi wylanie z kanału, musimy wziąć pod uwagę także przepływ bazowy. Wyobrażam sobie obecny nastrój Szanownych Czytelników...

*Miał być już koniec, a tu znowu jakieś perturbacje?
Spokojnie, tylko spokój może nas uratować.*

Na szczęście w naszych zadaniach przepływ bazowy to prosta sprawa.

Jak go zatem wyznaczyć?

Ogólnie są trzy możliwości. Ale na szczęście mam same dobre wieści. Jeśli nasz system kanałów to kanały kanalizacji deszczowej lub inny sztuczny system odwodnieniowy, to najczęściej przewody te w czasie pogody bezdeszczowej pozostają puste. I to jest sytuacja, którą najbardziej lubimy! Brak przepływu bazowego oznacza **wartość zero**, brak kłopotów i pozamiatane. I to była pierwsza możliwość ☺.

Drugim częstym przypadkiem jest sytuacja, w której przynajmniej część naszych kanałów to potoki miejskie lub inne naturalne ciek. W tym wariacie nie możemy już przyjmować braku przepływu bazowego. Możemy natomiast przyjąć, że w czasie naszego (relatywnie krótkiego) epizodu opadowego wartość natężenia przepływu bazowego nie zmienia się znacząco. Jako przepływ bazowy możemy wówczas przyjąć **średnią wartość natężenia przepływu w naszym cieku**, określoną na podstawie kilkukrotnych pomiarów wykonanych wcześniej w czasie pogody bezdeszczowej.

Wreszcie, istnieją też przypadki bardziej złożone, czyli takie, w których **przepływ bazowy znacząco się zmienia** w okresie objętym symulacją obliczeniową. Powodem tego może być np. istotny co do wartości i zmienny w czasie dopływ wód gruntowych. Takie przypadki nie dotyczą jednak naszych zadań, a raczej długookresowych (na przykład kilkumiesięcznych) analiz sytuacji hydrologicznej w naszej zlewni. Możemy wówczas dla potrzeb określenia przepływu bazowego zastosować model wykładniczej regresji lub – *uwaga* – konceptualny model zbiornika liniowego (*znowu, prawda?*). My nie musimy się tym raczej martwić. Co więcej, nawet gdybyśmy musieli takie podejścia zastosować, są one również uwzględnione w dostępnych programach obliczeniowych.

Na koniec naszych rozważań na temat obliczeń odpływu ze zlewni pozwolę sobie jeszcze na ostatnią uwagę. Przygotowując model zintegrowany dla naszej zlewni, najprawdopodobniej skorzystamy z jednego z dostępnych narzędzi wspierających pracę inżyniera (czyli pakietów obliczeniowych umożliwiających wyznaczenie odpływu ze zlewni). Jest ich sporo, część spośród nich jest ogólnie dostępna i darmowa, więc jest w czym wybierać. Każdy z takich programów ma zazwyczaj zaimplementowaną całą grupę różnych metod obliczeniowych przeznaczonych do modelowania poszczególnych procesów hydrologicznych. Jeśli dodamy do tego przyjazny interfejs, otwierające się okienka z listą danych, które należy przygotować, i część



parametrów dobieranych automatycznie, okazuje się, że dysponujemy bardzo przyjemnym wsparciem naszej pracy. To może w pewnym stopniu uspić czujność inżynierską oraz wzbudzić w nas przekonanie, że „każdy może to zrobić”. Może też się pojawić chęć (szczególnie u początkujących inżynierów) szybkiego uzyskania wyniku. A stąd już tylko krok do zbyt pochopnego, nieuważnego doboru parametrów, zbyt powierzchownej interpretacji wyników oraz przedwczesnego stwierdzenia, że oto nasze zadanie zostało rozwiązane. Pamiętajmy jednak, że chociaż tego rodzaju oprogramowanie stanowi wspaniałe wsparcie naszej pracy, to odpowiedzialność za wyniki ponosi autor obliczeń. Nie jest więc obojętne, co wybierzemy z listy dostępnych opcji oraz jakie wartości danych wprowadzimy do programu. Warto rozumieć, co zawiera się „w środku”, znać metody obliczeniowe (z równaniami włącznie), umieć się zatrzymać i pochylić nad problemem oraz uzasadniać swoje decyzje konkretnymi argumentami merytorycznymi. I takiego rozwiązywania inżynierskich zadań nam wszystkim – Czytelnikom i sobie – życzę ☺.

Zakończenie. Złap mnie, jeśli potrafisz. I co dalej z tą zlewnią?

Kochani, jesteśmy już na końcu naszej podróży. Woda może odpłynąć z naszej zlewni i mamy ostatnią szansę, by coś z tym zrobić... Pamiętajmy, że woda opadowa to nie problem, którego trzeba się szybko pozbyć, tylko cenny zasób, który warto w zlewni zatrzymać. Może więc, zamiast pozwolić jej bezpowrotnie opuścić teren naszej zlewni, zawczasu przygotować dla niej odpowiednią liczbę obiektów, które umożliwią jej retencję?

Złapmy ją, jeśli potrafimy!

Zatrzymajmy ją na naszym obszarze w sposób bezpieczny i atrakcyjny dla mieszkańców. Jak? Gdzie? To już temat innych rozważań... Ale pamiętajmy, że **punktem wyjścia do projektowania jakichkolwiek systemów zagospodarowania wody opadowej jest umiejętność prawidłowego określenia spodziewanej ilości wody.**

Hydrologia zlewni zurbanizowanej wprowadza w ten ciekawy i szeroki temat. Nasze zajęcia pogłębiają wiedzę z zakresu studiów inżynierskich i wyczułają, jak nie popaść w schemat grozący automatyzmem i brakiem inżynierskiej refleksji...

Co dalej z naszą zlewnią?

To już w dużej mierze zależy od nas. Od nas – inżynierów. Od nas – ambasadorów nowego spojrzenia na wodę jako zasób, a nie problem. Od nas – miłośników *zieleni* i *błękitu* w mieście. Od nas i wszystkich tych, których zarazimy naszą postawą...

Hydrologia obszarów miejskich zaczyna powoli machać ręką na pożegnanie... Ale machając ręką, ma pewne ciche nadzieje... Owszem, może była troszkę natrętna i ciągle prosiła o uwagę (*oj, tam, oj, tam*)... Ale nie możemy jej przecież odmówić swego uroku... Dyskretnie podrzuciła Wam kilka prezentów od siebie – trochę wiedzy w małych, nienachalnych pakietkach, trochę umiejętności, kilka porad na



przyszłość i mnóstwo powodów do refleksji. A właśnie **refleksja jest nieodzownym warunkiem rozwijania się** i wzrastania, także w wymiarze inżynierskim...

I co dalej z tą znajomością? Pani Hydrologia będzie czekać na Waszą decyzję... Czy będziecie o niej pamiętać? Czy pozwolicie jej od czasu do czasu mieć wpływ na Wasze inżynierskie poczynania? Czy zaprosicie ją do współpracy na przyszłość?



A na koniec jeszcze jeden spisek...

Tym razem spis literatury i innych dzieł stanowiących inspirację przy tworzeniu tej książki.

Spis literatury

1. Banasik K. *Wyznaczanie wezbrań powodziowych w małych zlewniach zurbanizowanych*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2009.
2. Banasik K., Wałęga A., Węglarczyk S., Więzik B. *Aktualizacja metodyki obliczania przepływów i opadów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia dla zlewni kontrolowanych i niekontrolowanych oraz identyfikacji modeli transformacji opadu w odpływ*. KZGW, Warszawa 2017.
3. Biernacki M., Burzyński K., Geringer J., Granatowicz J., Sawicki J.M., Wołoszyn E. *Laboratorium z mechaniki płynów i hydrauliki*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1995.
4. Błaszczuk W., Stamatello H., Błaszczuk P. *Kanalizacja. Sieci i pompownie. T.1*. Arkady, Warszawa 1983.
5. Bogdanowicz E., Stachý J. *Maksymalne opady deszczu w Polsce. Charakterystyki projektowe*. Materiały badawcze. Seria: Hydrologia i Oceanologia. IMGW, Warszawa 1998.
6. Chełmicki W. *Woda. Zasoby, degradacja, ochrona*. Wydawnictwo PWN, Warszawa 2002.
7. Gruszecki T. *Natężenie, czas trwania i częstotliwość występowania deszczy jako podstawa do projektowania i analizy systemów kanalizacji deszczowej*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna 1982; t. LVI, nr 7: 111–113.
8. Jones D. *Where is urban hydrology practice today?* Journal of the Hydraulics Division 1971; 97: 257–264.
9. Kotowski A. *Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów*. Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2011.
10. Królikowski A., Królikowska J. *Ocena wpływu współczynników spływu i opóźnienia na przepływy obliczeniowe w sieci kanalizacji deszczowej*. Rocznik Ochrona Środowiska 2009; 11: 163–171.
11. Licznar P., Łomotowski J. *Analiza chwilowych natężeń deszczów miarodajnych we Wrocławiu*. Ochrona Środowiska 2005; nr 2: 29–34.
12. Ozga-Zielińska M., Brzeziński J. *Hydrologia stosowana*. Wydawnictwo PWN, Warszawa 1997.
13. Schilling W. *Rainfall data for urban hydrology: what do we need?* Atmospheric Research 1991; 27: 5–21.
14. Soczyńska U. *Hydrologia dynamiczna*. Wydawnictwo PWN, Warszawa 1997.



15. Sowiński M. *Wykorzystanie modelu probabilistycznego do wyznaczania krzywych natężenia deszczu*. Ochrona Środowiska 1984; nr 434/3–4 (20–21): 25–28.
16. Szymkiewicz R., Gąsiorowski D. *Podstawy hydrologii dynamicznej*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2010.
17. Twardosz R. *Dobowy przebieg opadów atmosferycznych w ujęciu synoptycznym i probabilistycznym na przykładzie Krakowa (1886–2002)*. Wydawnictwo Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków 2005.
18. Weinerowska-Bords K. *Wpływ uproszczeń na obliczanie spływu deszczowego w zlewni zurbanizowanej*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2010.
19. Wołoszyn J. *Średnie natężenie, średni czas trwania i rozkład natężenia normalnych opadów we Wrocławiu*. Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Rolniczej we Wrocławiu. Melioracja 1961; nr 61: 23–41.
20. PN-EN 752:2017-06: Zewnętrzne systemy odwadniające i kanalizacyjne – Zarządzanie systemem kanalizacyjnym.

Spis inspiracji

W książce znalazły się także odwołania do takich utworów literackich i filmowych. Podano je w kolejności pojawiania się w tekście książki:

1. Film *Rejs* z 1970 r. w reżyserii Marka Piwowskiego, z genialnymi rolami Stanisława Tyma, Zdzisława Maklakiewicza i Jana Himilsbacha.
2. Piosenka *Śpiewać każdy może* z tekstem Jonasza Kofty i muzyką Stanisława Syrewicza, wykonana po raz pierwszy przez Jerzego Stuhra.
3. Seria książek Tomasza Lwa Leśniaka i Rafała Skarżyckiego pt. *Hej, Jędrzek*, wydana przez wydawnictwo Nasza Księgarnia.
4. Film *Vabank II, czyli riposta* w reżyserii Juliusza Machulskiego z 1984 r.
5. Seria książek kryminalnych Agathy Christie, których bohaterem jest niezawodny detektyw Herkules Poirot, w tym m.in. *Tajemnica gwiazdkowego puddingu* w przekładzie Krystyny Bockenheimer.
6. Serial kryminalno-komediowy *Detektyw Monk* w reżyserii Andy’ego Breckmana, z niezastąpionym Tonym Shalhoubem w roli tytułowej.
7. Seria książek o *Mikołajku* napisana przez René Goscinnego i zilustrowana przez Jean-Jacques’a Sempégo.
8. Piosenka *Jej portret* z muzyką Włodzimierza Nahornego i tekstem Jonasza Kofty, zaśpiewana po raz pierwszy przez Bogusława Meca.
9. Piosenka *Ballada o pancernych* z tekstem Agnieszki Osieckiej i muzyką Adama Walacińskiego (z filmu *Czterej pancerni i pies*, gdzie zaśpiewał ją Edmund Fetting).
10. Książka *Kubuś Puchatek*, której autorem jest Alan Aleksander Milne, z oryginalnymi rysunkami Ernesta H. Sheparda, w przekładzie Ireny Tuwim.
11. Powieść *Dziennik Bridget Jones* Helen Fielding i jej ekranizacja w reżyserii Sharon Maguire.

12. Opowiadania Arthura Conan Doyle'a z lat 1891–1892 o przygodach Sherlocka Holmesa, zebrane w tomiku opowiadań pod tytułem – uwaga, zaskoczenie – **Przygody Sherlocka Holmesa** (polski przekład: Ewa Łozińska-Mańkiewicz).
13. **Pan Tadeusz** Adama Mickiewicza (wydawnictwo dowolne, za każdym razem ten sam trzynastozgłoskowiec, którego nie sposób pomylić z jakimkolwiek innym tekstem...).
14. Film **Sami swoi** w reżyserii Sylwestra Chęcińskiego (1967), z niezapomnianą rolą Wacława Kowalskiego w roli Pawlaka („Patrzaj, Mania, sąsiadom ogiera ukradli. A taki był ładny, amerykański”).



WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie I. Ark. wyd. 6,6, ark. druku 7,75, 1268/1189

Druk i oprawa: Volumina.pl Daniel Krzanowski
ul. Księcia Witolda 7-9, 71-063 Szczecin, tel. 91 812 09 08



ISBN 978-83-7348-867-0

ISBN 978-83-7348-867-0



9 788373 488670

