

2.4. WZORY EMPIRYCZNE

Informacja hydrologiczna jest często potrzebna w zlewniach niekontrolowanych, czyli takich, w których nie są prowadzone obserwacje hydrologiczne. Do ustalenia charakterystyk hydrologicznych, takich jak prędkość wody w korycie rzeczonym i wielkość przepływu (odpływu), posłużyć mogą informacje o tych cechach zlewni i klimatu, które wpływają na wielkości poszukiwanych charakterystyk. Zależności charakterystyk hydrologicznych od warunkujących je czynników mogą być określone na podstawie badań (np. w zlewniach eksperymentalnych) i ujęte w postaci formuł określanych mianem wzorów empirycznych.

Jednym z najstarszych wzorów empirycznych pozwalających obliczyć **średni roczny przepływ rzeki** jest wzór Iszkowskiego, który można stosować w zlewniach o powierzchni większej niż 300 km². Wzór ten ma obecnie wartość historyczną, wart jest jednak przytoczenia ze względu na swoją prostotę i dobrze widoczny, logiczny związek między wielkością odpływu, wysokością opadu i powierzchnią zlewni:

$$Q_{sr} = 0,0317 CPA \quad (2.4.1)$$

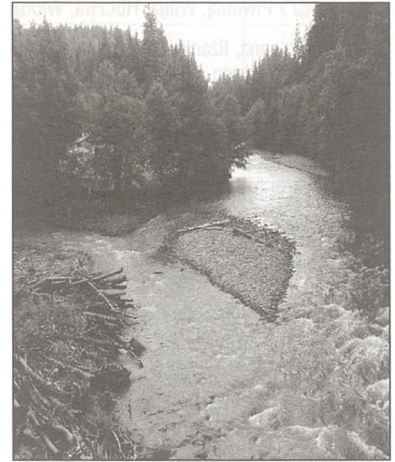
gdzie:

- Q_{sr} – średni przepływ [m³·s⁻¹],
- C – współczynnik odpływu zależny od charakteru zlewni (tab. 2.4.1),
- P – opad roczny normalny [m],
- A – powierzchnia zlewni [km²].

Charakter zlewni	C
Niziny	0,20
Płaskowzgórza	0,25
Płaskowzgórza i pagórki	0,30
Pagórki o łagodnych stokach	0,35
Pagórki o stromych stokach	0,40
Wzgórza	0,45
Góry niskie (np. Góry Izerskie, Góry Sowie, Beskid Wyspowy)	0,50
Góry wyższe (np. Beskid Śląski, Bieszczady, Karkonosze)	0,55
Góry wysokie (np. Tatry)	0,60
Góry bardzo wysokie (np. Alpy)	0,70

Współczynnik odpływu C dobiera się z tab. 2.4.1. Można też wykorzystać tab. 2.4.2, zawierającą regionalne współczynniki odpływu rzek polskich.

Średni roczny przepływ Q_{sr} można także obliczyć według wzoru Kollisa w modyfikacji Dębskiego. Odznacza się on podobnymi zaletami co wzór Iszkowskiego i ma postać:



Wzory empiryczne pozwalają m.in. na oszacowanie natężenia przepływu maksymalnego w rzekach, w których nie prowadzi się obserwacji hydrologicznych

Tab. 2.4.1. Współczynnik odpływu (C) do wzoru Iszkowskiego (tabela zmodyfikowana przez Dynowskich, 1981)

zlewnia eksperymentalna (doświadczalna) – zlewnia, w której prowadzi się sztuczne eksperymenty w celu określenia ich wpływu jakościowego i ilościowego na procesy hydrologiczne

Tab. 2.4.2. Regionalne współczynniki odpływu rzek polskich (Byczkowski, 1961)

Zlewnie rzeczne	C
Noteć wschodnia	0,10
Tyśmienica z Piwonią, Wilga, Huczwa, Włodawka, ciek w widłach Wisły i Bugu, Bzura dolna, Osa, Orla, Noteć (po Nakło)	0,15
Tanew, Kamienna, Ilżanka, Wieprz (od Lubartowa), Wojsławka, Bystrzyca Lub., Bug (do Narwi), małe dopływy Bugu, Krzna z dopływami, Nurzec, Liwec (od Liwu), Bzura, dopływy Bzury, Psina, Barycz (od Wąsoszy), Widawka, Proсна, Lutynia, Noteć (od Nakła po Gwdę)	0,20
Czarna Przemsza (po Będzin), Brynica, Rudawa, Wieprz środkowy, dopływy Wieprza, Radomka, Świder, Bug (poniżej Tanwi), Toczna, Liwiec, Kostrzyń, Wkra, Drwęca (od Nowego Miasta), Łyna, Odra dolna, Ruda, Bierawka, Kłodnica z Dramą, Ostoboga, Barycz, Warta (od Neru), Ner, Noteć (od Gwdy)	0,25
Wisła Dolna (od Bugu), Czarna Przemsza (Radocha), Prądnik, Dłubnia, Wschodnia z Czarną, Wieprz (Zwierzyńiec), Pilica (od Przedborza), dopływy Pilicy, Narew, dopływy Narwi, Drwęca górna (Biała Góra), Odra środkowa (od ujścia Warty), Mała Panew, Piława, Warta (od Widawki po Ner), Liswarta, Ner (Ciechanowice), Gwda, Ina	0,30
Wisła środkowa (od Sanu do Bugu), Przemsza (połączona), Biała Przemsza (do Maczek), Nida (połączona), Łęg, Pilica (Szczekociny), Pastęka, Nysa Kłodzka (poniżej Kopic), Biała Głuchołaska, Warta (od Mstowa po Widawkę), Wiercica, Drawa	0,35
Wisła Górna (od Przemszy po San), Iłownica, Biała, Uszwica, Wisłoka (od Skurowej), Ropa, Jasiołka, Koprzywianka, San (poniżej Tanwi), Wisłok z Mleczką, Brda (po Świt), Odra górna (po Racibórz), Nysa Kłodzka (środkowa), Bystrzyca, Kwisa, Nysa Łużycka, Warta (Korwinów), Rega, Parsęta, Grabowa, Słupia	0,40
Biała Przemsza (po Sławków), Soła, Raba, Dunajec (od Popradu), Poprad (dolny), Wisłoka (Żółków), Wielopolka, San środkowy (od Tanwi), Brda górna (Drzewicz), Nysa Kłodzka (od zb. Otmuchów), Wieprza, Łupawa, Reda	0,45
Skawa (od Suche), Poprad środkowy, Kamienica Nawojowska, Łososina, San górny, Wiar, Wda, Bóbr	0,50
Skawa (po Osielec), Poprad górny	0,55
Czarny Dunajec, Dunajec z dopływami (Krościenko)	0,60

$$Q_{sr} = 0,0317 \varphi PA \quad (2.4.2)$$

gdzie:

φ – współczynnik odpływu obliczany według wzoru:

$$\varphi = \frac{d}{z s} \quad (2.4.3)$$

gdzie:

d – funkcja opadów i wielkości dorzecza,

z – funkcja wielkości dorzecza,

s – funkcja stosunku obszaru dorzecza do jego długości.

Wartości te odczytuje się z tab. 2.4.3, 2.4.4 i 2.4.5.

Jednym z przydatnych parametrów hydrometrycznych jest średnia **prędkość wody** w korycie rzecznym. Jej znajomość może posłużyć do oszacowania natężenia przepływu rzeki, a następnie – wielkości odpływu ze zlewni. Prędkość wody w rzece można obliczyć za pomocą empirycznej formuły Manninga, według której prędkość uzależniona jest od szorstkości dna, kształtu przekroju poprzecznego koryta i spadku zwierciadła wody w rzece. Szorstkość dna opisuje tzw. współczynnik szorstkości Manninga, a kształt przekroju poprzecznego – tzw. promień hydrauliczny. Formuła ma postać:

Tab. 2.4.3. Wartość współczynnika d do wzoru Kollisa jako funkcja opadów i powierzchni zlewni (Dynowscy, 1971)

Opad [mm]	Powierzchnia zlewni [km ²]						
	1	5	10	25	50	100	200
640	0,833	0,743	0,670	0,636	0,628	0,615	0,602
680	0,902	0,775	0,720	0,642	0,636	0,623	0,615
720	0,908	0,802	0,743	0,676	0,650	0,636	0,628
760	0,920	0,835	0,775	0,712	0,676	0,650	0,642
800	0,937	0,853	0,810	0,759	0,712	0,676	0,650
840	0,948	0,880	0,846	0,810	0,775	0,743	0,692
880	0,958	0,908	0,880	0,846	0,827	0,802	0,775
920	0,968	0,937	0,930	0,890	0,880	0,862	0,846
960	0,980	0,958	0,958	0,948	0,930	0,930	0,920
1000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1100	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	500	1000	2 000	5 000	10 000	20 000	60 000
640	0,588	0,578	0,565	0,555	0,542	0,537	0,521
680	0,602	0,597	0,588	0,578	0,570	0,565	0,555
720	0,615	0,610	0,602	0,588	0,584	0,578	0,595
760	0,628	0,623	0,615	0,610	0,602	0,597	0,584
800	0,642	0,636	0,628	0,623	0,615	0,610	0,602
840	0,670	0,650	0,642	0,636	0,636	0,628	-
880	0,743	0,712	0,691	0,670	0,650	0,642	-
920	0,820	0,801	0,793	0,767	0,743	0,736	-
960	0,902	0,890	0,880	0,872	0,866	0,862	-
1000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	-
1100	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	-

Tab. 2.4.4. Wartość z do wzoru Kollisa jako funkcja powierzchni zlewni A [km²] (Dynowscy, 1971)

A	z	A	z
1	1,01	500	1,08
3	1,02	700	1,09
5	1,02	1000	1,09
10	1,03	2000	1,10
15	1,04	5000	1,12
50	1,05	10 000	1,13
100	1,06	20 000	1,14
200	1,07	40 000	1,15
300	1,08	60 000	1,15

Tab. 2.4.5. Wartość s do wzoru Kollisa jako funkcja ilorazu powierzchni zlewni A [km²] i jej długości L [km] (Dynowscy, 1971)

A	s	A	s
L		L	
1	1,10	30	1,57
2	1,16	40	1,63
3	1,20	60	1,72
4	1,24	80	1,78
6	1,29	100	1,83
9	1,35	200	2,01
14	1,42	300	2,12
20	1,49	400	2,20

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{i} \quad (2.4.4)$$

gdzie:

- v – prędkość [m·s⁻¹],
- n – współczynnik szorstkości Manninga,
- R – promień hydrauliczny [m],
- i – spadek zwierciadła wody (patrz wzór 1.2.17).

Współczynnik szorstkości Manninga n wyznacza się z tabeli (tab. 2.4.6). Na przykład, współczynnik szorstkości dna w rzekach górskich, odznaczających się dnem kamienistym, jest większy od

Tab. 2.4.6. Współczynnik szorstkości Manninga*

* Tabela skrócona. Pełną tabelę zawierającą wielkości współczynników szorstkości, w odniesieniu zarówno do koryt sztucznych (kanalów), jak i naturalnych, można znaleźć w podręcznikach hydrologii i hydrometrii, np. E. Bajkiewicz-Grabowskiej, Z. Mikulskiego i A. Magnuszewskiego (1994).

Charakter koryta rzeki	n		
	min.	śr.	max.
Rzeka nizinna Dno wyrównane, koryto prostolinijne, bez przegłębień i spłyceń	0,025	0,030	0,033
Dno wyrównane, koryto lekko wijące się, nieliczne przegłębienia i spłycaenia	0,033	0,045	0,050
Jak wyżej, lecz przy niższych stanach wody i większej liczbie kamieni	0,045	0,050	0,060
Dno zarośnięte, liczne przegłębienia	0,050	0,070	0,080
Bardzo silnie zarośnięte dno, liczne przegłębienia i spłycaenia	0,075	0,100	0,150
Rzeka górska Dno niezarośnięte z drobnym żwirem i kamieniami	0,030	0,040	0,050
Dno niezarośnięte z gruboziarnistym żwirem i dużymi kamieniami	0,040	0,050	0,070

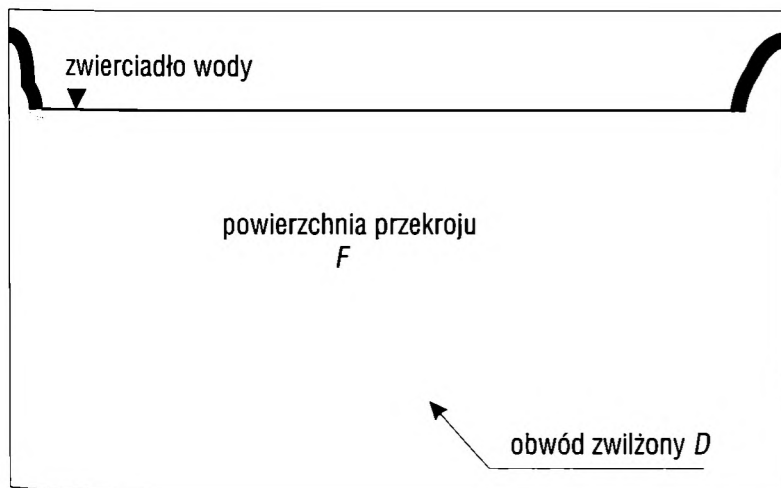
współczynnika szorstkości dna w rzekach nizinnych, o dnie piaszczystym i wyrównanym. Promień hydrauliczny R jest ilorazem pola przekroju poprzecznego koryta F i obwodu zwilżonego D (ryc. 2.4.1):

$$R = \frac{F}{D} \quad (2.4.5)$$

gdzie:

- R – promień hydrauliczny [m],
- F – pole przekroju poprzecznego koryta [m²],
- D – obwód zwilżony [m].

Znając prędkość wody w korycie, można obliczyć **natężenie przepływu** rzeki, które stanowi iloczyn wielkości przekroju poprzecznego koryta i średniej prędkości wody (patrz wzór 4.1.13).



Ryc. 2.4.1. Przekrój koryta

Przykładem innego wzoru pozwalającego obliczyć średnie natężenie przepływu jest *formuła Punzeta*, którą można stosować w odniesieniu do zlewni karpackich o powierzchni nie większej niż 500 km²:

$$Q_{sr} = q_R A \quad (2.4.6)$$

gdzie:

$$q_R = \frac{1,151 \cdot 10^{-5} P^{2,05576} I^{0,0647}}{N^{0,04435}} \quad (2.4.7)$$

$$i = \frac{\Delta W}{L} \quad (2.4.8)$$

$$\Delta W = \frac{H_z - H_p}{\sqrt{A}} \quad (2.4.9)$$

gdzie:

- Q_{sr} – średnie natężenie przepływu [m³·s⁻¹],
- A – powierzchnia zlewni [km²],
- q_R – średni roczny odpływ jednostkowy [dm³·s⁻¹·km⁻²],
- P – średni roczny opad w zlewni [mm],
- I – spadek podłużny [%],
- L – długość cieków od najdalej położonego źródła do przekroju zamykającego zlewnię [km],
- H_z – wysokość źródła [m n.p.m.],
- H_p – wysokość profilu zamykającego zlewnię [m n.p.m.],
- N – wskaźnik nieprzepuszczalności gleb (tab. 2.4.7).

Tab. 2.4.7. Wartości wskaźnika nieprzepuszczalności gleb N dostosowane do *Mapy gleb Polski (1:500 000) (Zasady ..., 1991)*

Lp.	Rodzaj gleby	Nr na mapie glebowej 1: 500 000	Przepuszczalność utworów	Wskaźnik nieprzepuszczalności
	1	2	3	4
1	Gleby szkieletowe i piaszczyste	1	bardzo dobrze przepuszczalne	10
	Gleby żwirowe i piaszkowe	2		
	Gleby wytworzone ze żwirów różnej genezy	20, 35, 44, 49		
	Piaski luźne	45, 50		
2	Mady piaszczyste	8	dobrze przepuszczalne	20
	Czarne i szare ziemie wytworzone z piasków	14		
	Gleby wytworzone z gezy kredowej	28		
	Gleby piaszczyste	30, 48		
3	Czarnoziemy i czarne gleby leśne	16	średnio przepuszczalne	40
	Piaski słabogliniaste i gliniaste	21, 3 6, 46, 51		
	Gleby wytworzone z lessów	25, 40		
	Gleby wytworzone z utworów lessowatych Gleby wytworzone z piasków naglinowych i glin zwałowych lekkich	26 37, 47		
4	Gleby wytworzone z torfów niskich	12	średnio przepuszczalne	50
	Gleby wytworzone z torfów wysokich i przejściowych	13		
5	Mady pyłowe, gliniaste i ilaste	9	mało przepuszczalne nieprzepuszczalne	60
	Mady morskie	10		
	Gleby glejowe	11		
	Gleby wytworzone z piasków gliniastych, naglinowych i glin zwałowych lekkich	22		
	Gleby piaszczyste, gliniaste pyłowe i ilaste	29		
	Gleby wytworzone z utworów lessowatych (podgórskie)	41		
6	Gleby gliniaste szkieletowe	43 ew. 52	nieprzepuszczalne	70
	Rędziny	3, 4, 5, 6, 7		
	Gleby wytworzone z glin zwałowych średnich i ciężkich	23, 38		
	Czarne i szare ziemie wytworzone z glin i iłów pyłowych	15		
	Gleby wytworzone z iłów różnej genezy	24, 39		
	Gleby wytworzone z pyłów różnej genezy	27, 42		
7	Gleby wytworzone z pyłów, glin i iłów	33, 34	nieprzepuszczalne	90
	Gleby gliniaste, pyłowe i ilaste (ze skał metamorficznych)	17		
	Gleby gliniaste szkieletowe	18, 32		
	Gleby gliniaste, pyłowe i ilaste (ze skał osadowych)	19, 31		

Dla celów praktycznych (np. w budownictwie wodnym) potrzebna jest informacja o **natężeniu przepływu maksymalnego**, który może wystąpić w cieku. Formuła racjonalna jest jednym z najstarszych wzorów stosowanych do obliczania natężenia przepływu maksymalnego (od 1842 r.). Pozwala ona określić natężenie przepływu kulminacyjnego wywołanego spływem powierzchniowym, który nastąpił w wyniku opadu o znanym natężeniu:

$$Q_{max} = 0,278 C I_o A \quad (2.4.10)$$

gdzie:

- Q_{max} – natężenie przepływu maksymalnego [$m^3 \cdot s^{-1}$],
 C – współczynnik odpływu wielkiej wody (tab. 2.4.8),
 A – powierzchnia zlewni [km^2],
 I_o – natężenie opadu [$mm \cdot h^{-1}$].

Formuła wynika z analizy spływu wielkich wód, ma więc charakter genetyczny i dotyczy zlewni o powierzchni nieprzekraczającej 1 km^2 . Zakłada ona, że jeśli opad trwa wystarczająco długo, wielkość przepływu kulminacyjnego jest równa iloczynowi średniej intensywności opadu oraz powierzchni zlewni przy uwzględnieniu strat na infiltrację. Im obszar zlewni jest bardziej zabudowany, tym straty na infiltrację są mniejsze, a wartość współczynnika C – większa (tab. 2.4.8). Stosowanie tej formuły jest możliwe po przyjęciu następujących założeń upraszczających warunki istniejące w rzeczywistości:

- opad występuje na obszarze całej zlewni i jest w każdym miejscu taki sam,
- wartość współczynnika odpływu C jest niezmienna w czasie,
- w zlewni nie następuje czasowe zatrzymanie (retencja) wody opadowej,
- czas trwania opadu jest większy od czasu koncentracji, rozumianego jako czas potrzebny na dopłynięcie wody z najbardziej odległej części zlewni do przekroju zamykającego zlewnię.

Charakterystyka obszaru	C
Zabudowa luźna, jednorodzinna	0,30–0,50
Zabudowa luźna, bloki wielorodzinne	0,40–0,60
Zabudowa zwarta, bloki wielorodzinne	0,60–0,75
Zabudowa przemysłowa	0,50–0,90
Parki, cmentarze	0,10–0,25
Boiska	0,20–0,35
Place asfaltowe i betonowe	0,70–0,95
Trawa na podłożu piaszczystym, nachylenie do 2%	0,05–0,10
nachylenie od 2 do 7%	0,10–0,15
nachylenie powyżej 7%	0,25–0,35
Trawa na podłożu gleb ciężkich, nachylenie do 2%	0,13–0,17
nachylenie od 2 do 7%	0,18–0,22
nachylenie powyżej 7%	0,25–0,35

Tab. 2.4.8. Współczynnik odpływu (C) do formuły racjonalnej (Maidment, 1992)

Przepływ maksymalny ciekłu odwadniającego małą zlewnię można obliczyć według wzoru:

$$Q = Aqc \quad (2.4.11)$$

gdzie:

- Q – natężenie przepływu maksymalnego [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],
- A – powierzchnia zlewni [km^2],
- q – maksymalny odpływ jednostkowy [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$] zależny od długości zlewni i ukształtowania terenu (głównie spadków); wyznaczany na podstawie tab. 2.4.9,
- c – współczynnik zmniejszający, obliczany według wzoru:

$$c = 1 - 0,4 \frac{A_c}{A} \quad (2.4.12)$$

gdzie:

- A_c – powierzchnia fragmentu zlewni, która jest zalesiona albo stanowi kamienisty, żwirowy lub piaszczysty nieużytek [km^2].

Tab. 2.4.9. Maksymalny odpływ jednostkowy zależny od długości zlewni i jej spadku [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$] (Byczkowski, 1972)

Długość zlewni [km]	Teren		
	górzysty $i > 20\text{‰}$	falisty $5\text{‰} < i < 20\text{‰}$	płaski $i < 5\text{‰}$
1	8,0	6,4	4,0
3	6,0	4,8	3,0
5	4,5	3,6	2,3
7	4,0	3,2	2,0
10	3,0	2,4	1,5
15	2,0	1,6	1,0
20	1,4	1,1	0,7
25	1,0	0,8	0,5

W ostatnich latach zostały opracowane zależności empiryczne w postaci równań regresji pozwalających na określenie odpływów jednostkowych średnich oraz niższych od średniego dla zlewni w północno-wschodniej części Polski na podstawie sparametryzowanych czynników odpływotwórczych. Zastosowano ulepszone, zmodyfikowane charakterystyki hydrogeologiczne zlewni określone za pomocą programów GIS. Opracowane wzory empiryczne służą do obliczenia następujących odpływów jednostkowych:

– **średniego rocznego** SSq :

$$SSq = 3,032 \cdot 10^{-4} \Psi^{0,15} (J + 1)^{3,965} \cdot P^{1,411} \cdot (W^A)^{0,211} \cdot \Gamma^{-0,033} \quad (2.4.13)$$

– **średniego z minimalnych średnich miesięcznych** $SN(Sq)$:

$$SN(Sq) = 3,357 \cdot 10^{-7} H_p^{0,484} (J+1)^{10,490} \cdot D^{-0,284} \cdot P^{2,355} \cdot (w^A)^{-0,271} \quad (2.4.14)$$

– **średniego z minimalnych średnich dobowych** SNq :

$$SNq = 8,574 \cdot 10^{-8} (J+1)^{13,14} \cdot H_p^{0,46} \cdot D^{-0,323} \cdot P^{2,537} \cdot (w^A)^{0,36} \quad (2.4.15)$$

– **najdłuższego trwającego** NTq :

$$NTq = 5,252 \cdot 10^{-1} \cdot H_p^{0,866} \cdot D^{-0,525} \cdot (J+1)^{7,64} \cdot \xi^{-1,91} \quad (2.4.16)$$

– **najniższego** NNq :

Bibl. Jag.

$$NNq = 1,455 \cdot 10^{-2} (J+1)^{15,956} \cdot \Gamma^{-0,164} \cdot D^{-0,411} \cdot H_p^{1,004} \cdot \lambda^{2,026} \quad (2.4.17)$$

gdzie:

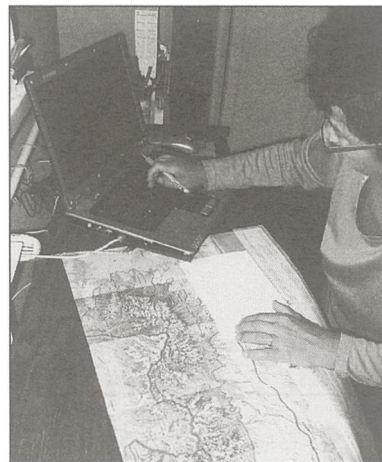
- J – wskaźnik jeziorności zlewni [%] (patrz wzór 1.3.5),
- ξ – wskaźnik pokrycia łąkami [%] (patrz rozdz. 1.2.5),
- λ – wskaźnik zalesienia [%] (patrz wzór 1.2.24),
- D – gęstość sieci rzecznej [$\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$] (patrz wzór 1.2.18),
- H_p – głębokość do zwierciadła wód podziemnych [m],
- ψ – średnie nachylenie zlewni [%] obliczone według wzoru Kajetanowicza

$$\psi = \frac{h_{max} - h_{min}}{\sqrt{A}}$$

- A – powierzchnia zlewni [km^2],
- h_{max} – wysokość maksymalna w zlewni [m n.p.m.],
- h_{min} – wysokość minimalna w zlewni [m n.p.m.],
- w^A – litologiczny współczynnik infiltracji efektywnej opadów atmosferycznych,
- Γ – stała czasowa inercji [doba].

Litologiczny współczynnik infiltracji efektywnej opadów atmosferycznych w^A oraz stała czasowa inercji Γ reprezentują warunki hydrogeologiczne. Współczynnik w^A określa, jaka część średniego wieloletniego opadu atmosferycznego może przesiąkać przez utwory powierzchniowe do pierwszej warstwy wodonośnej. Przyjęto następujące wartości litologicznego współczynnika infiltracji efektywnej na obszarach występowania:

- piasków i żwirów $w^{A1} = 0,4$;
- piasków na glinach zwałowych $w^{A2} = 0,3$;
- piasków gliniastych i pylastych $w^{A3} = 0,2$;



Wiele parametrów stosowanych we wzorach empirycznych można pozyskać z map

- glin zwałowych $w^{A4} = 0,15$;
- ilów $w^{A5} = 0,02$.

Stała czasowa inercji Γ charakteryzuje odpowiedź systemu zlewni na dowolne wymuszenie, tj. czas reakcji zlewni na zasilanie lub drenaż. Wielkość tę oblicza się według wzoru:

$$\Gamma = \frac{L^2 S}{T}$$

gdzie:

- L – średnia odległość między lokalnymi strefami drenażu w zlewni [m] (ustalona na podstawie map hydrogeologicznych),
- S – średnia pojemność wodna drenowanych poziomów wodonośnych w zlewni, określona na podstawie rozpoznania hydrogeologicznego lub tab. 2.4.10,
- T – średnia przewodność hydrauliczna drenowanych poziomów wodonośnych w zlewni [$m^2 \cdot d^{-1}$].

Tab. 2.4.10. Pojemność wodna S poziomów wodonośnych (wg Herbicha, za Punzet i in. 2001)

Charakterystyka warstwy wodonośnej			S
Wykształcenie litologiczne	Zwierciadło		
żwiry i piaski – głównie gruboziarniste	swobodne		0,25
	napięte	głębokość do 50 m	0,001
		głębokość ponad 50 m	0,0005
piaski – przeważnie średnioziarniste	swobodne		0,2
	napięte	głębokość do 50 m	0,001
		głębokość ponad 50 m	0,0005
piaski – przeważnie droboziarniste	swobodne		0,15
	napięte	głębokość do 50 m	0,001
		głębokość ponad 50 m	0,0005

Średnią przewodność drenowanych poziomów wodonośnych T ustala się na podstawie map hydrogeologicznych (np. w *Atlasie hydrogeologicznym Polski*, 1:500 000), *Mapy hydrogeologicznej Polski* w skali 1:200 000 lub 1:50 000 – w zależności od dostępności.

Istnieje wiele metod wyznaczania **przepływu maksymalnego o określonym prawdopodobieństwie przekroczenia**. Jedną z nich polega na zastosowaniu równań regresji, które wyrażają statystyczną zależność między maksymalnymi rocznymi przepływami o danym prawdopodobieństwie przekroczenia a parametrami fizyczno-geograficznymi zlewni. Jakkolwiek równania regresji nie mają fizycznie uzasadnionej postaci, to jednak wpływ poszczególnych parametrów na wynik nie może być sprzeczny z fizyczną interpre-

tacją zjawiska. Przykładem jest formuła tzw. obszarowych równań regresji, wypracowana dla zlewni o powierzchni nieprzekraczającej 50 km². Ma ona następującą, dość złożoną, postać:

$$Q_p = \beta_1 A^{0,92} H_1^{1,11} \varphi^{1,07} I_r^{0,10} \Psi^{0,35} (1 + \gamma)^{-2,11} (1 + B)^{-0,47} \lambda_p \quad (2.4.18)$$

gdzie:

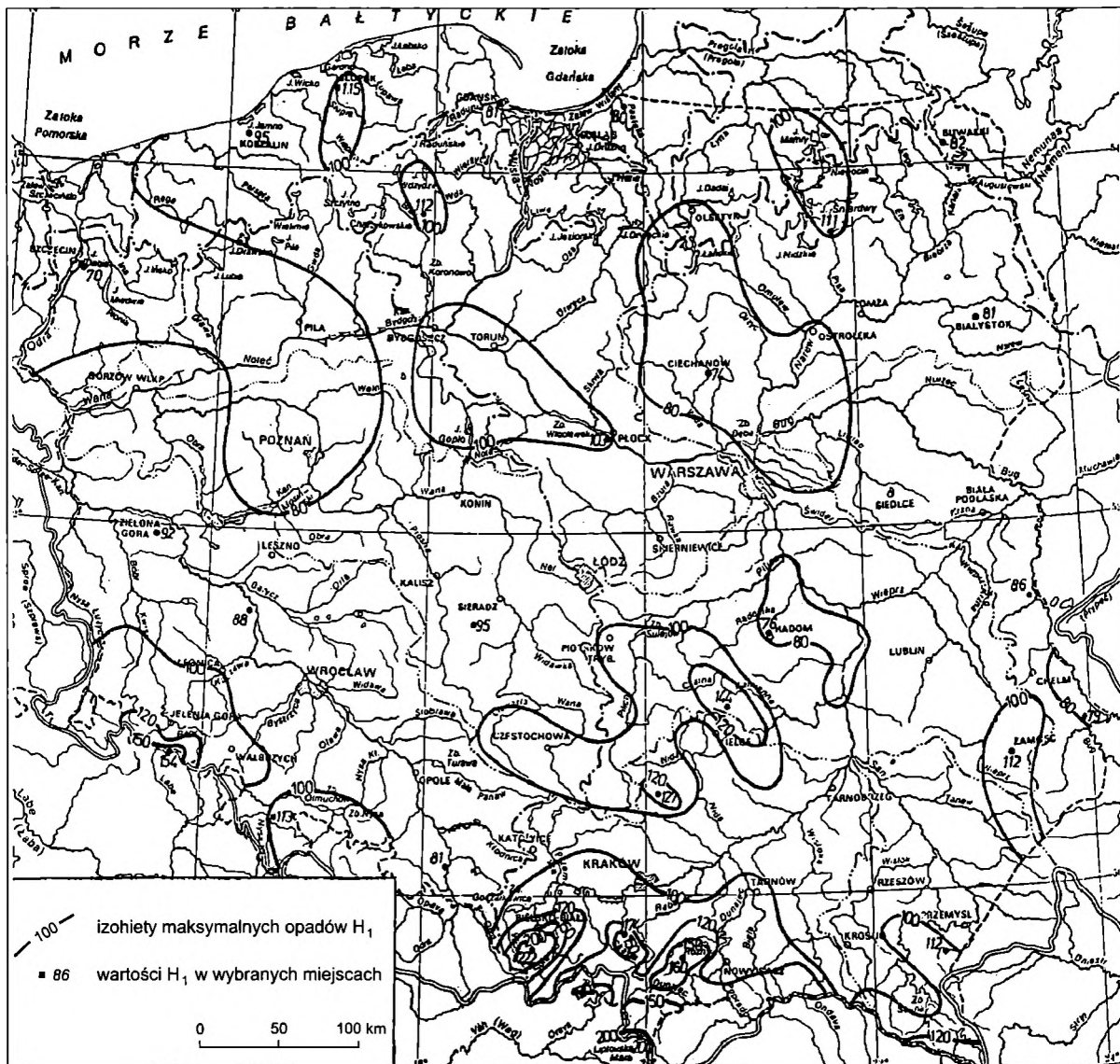
- Q_p – maksymalny roczny przepływ o prawdopodobieństwie pojawiania się p [m³·s⁻¹],
 β_1 – wartość stała odczytywana z tab. 2.4.11,
 A – powierzchnia zlewni [km²],
 H_1 – maksymalny opad dobowy [mm] o prawdopodobieństwie pojawiania się 1%, odczytywany z mapy (ryc. 2.4.2),
 φ – współczynnik odpływu maksymalnego, odczytywany z mapy (ryc. 2.4.3),
 I_r – spadek cieku obliczony jako iloraz różnicy rzędnej działu wodnego w punkcie przecięcia się z osią suchej doliny oraz rzędnej profilu hydrometrycznego i długości cieku wraz z suchą doliną [m·km⁻¹ lub ‰],
 Ψ – średnie nachylenie zlewni (patrz wzór 1.2.11) [m·km⁻¹],
 γ – wskaźnik jeziorności [%] (patrz wzór 1.3.5),
 B – wskaźnik zabagnienia [%] (patrz wzór 1.2.23),
 λ_p – kwantyl rozkładu zmiennej λ_p dla danego prawdopodobieństwa p odczytywany z tab. 2.4.12.

Tab. 2.4.11. Wartości β_1 , potrzebne do wzoru 2.4.13 (Zasady..., 1991)

Nr obszaru	Obszar	β_1
1	sudecki	1,432 · 10 ⁻³
2	nizinno-pojezierny zachodni	1,733 · 10 ⁻³
3	przymorski	1,353 · 10 ⁻³
4	tatrzański	1,797 · 10 ⁻³
5	karpaccy	2,992 · 10 ⁻³
6	nizinno-pojezierny wschodni	3,075 · 10 ⁻³
7	lubelski	2,369 · 10 ⁻³

Tab. 2.4.12. Kwantyle rozkładu zmiennej λ_p ; c_v – współczynnik zmienności przepływów maksymalnych; s – współczynnik asymetrii (Zasady..., 1991)

Lp.	Makroregion	Region (zob. ryc. 2.4.4)	Parametry krzywej regionalnej		Prawdopodobieństwo kwantyli %										
			c_v	s	0,1	0,2	0,5	1	2	3	5	10	20	30	50
1	Sudety	1a	1,732	1,16	1,57	1,39	1,17	1,00	0,834	0,727	0,621	0,461	0,309	0,223	0,123
2		1b	1,247	0,91	1,48	1,34	1,15	1,00	0,857	0,768	0,665	0,522	0,378	0,291	0,185
3	Karpaty	2a	1,509	1,08	1,54	1,37	1,16	1,00	0,843	0,745	0,636	0,482	0,334	0,248	0,145
4		2b	1,115	0,88	1,46	1,32	1,14	1,00	0,860	0,776	0,674	0,536	0,394	0,310	0,205
5	Wyżyny	3a	1,646	1,17	1,56	1,38	1,17	1,00	0,835	0,727	0,622	0,464	0,312	0,227	0,128
6		3b	0,993	0,80	1,43	1,30	1,13	1,00	0,867	0,787	0,694	0,558	0,420	0,341	0,234
7		3c	0,647	0,65	1,35	1,24	1,10	1,00	0,894	0,826	0,747	0,631	0,515	0,444	0,341
8	Niziny	4a	0,998	0,80	1,43	1,30	1,13	1,00	0,867	0,788	0,695	0,559	0,422	0,340	0,233
9		4b	0,665	0,60	1,34	1,24	1,10	1,00	0,894	0,829	0,750	0,637	0,521	0,445	0,342
10	Pojezierza	5a	0,872	0,76	1,41	1,28	1,12	1,00	0,874	0,798	0,706	0,577	0,449	0,367	0,262
11		5b	0,590	0,58	1,32	1,22	1,10	1,00	0,899	0,836	0,761	0,660	0,545	0,470	0,373
12		5c	0,445	0,55	1,28	1,20	1,08	1,00	0,915	0,857	0,795	0,701	0,598	0,536	0,446

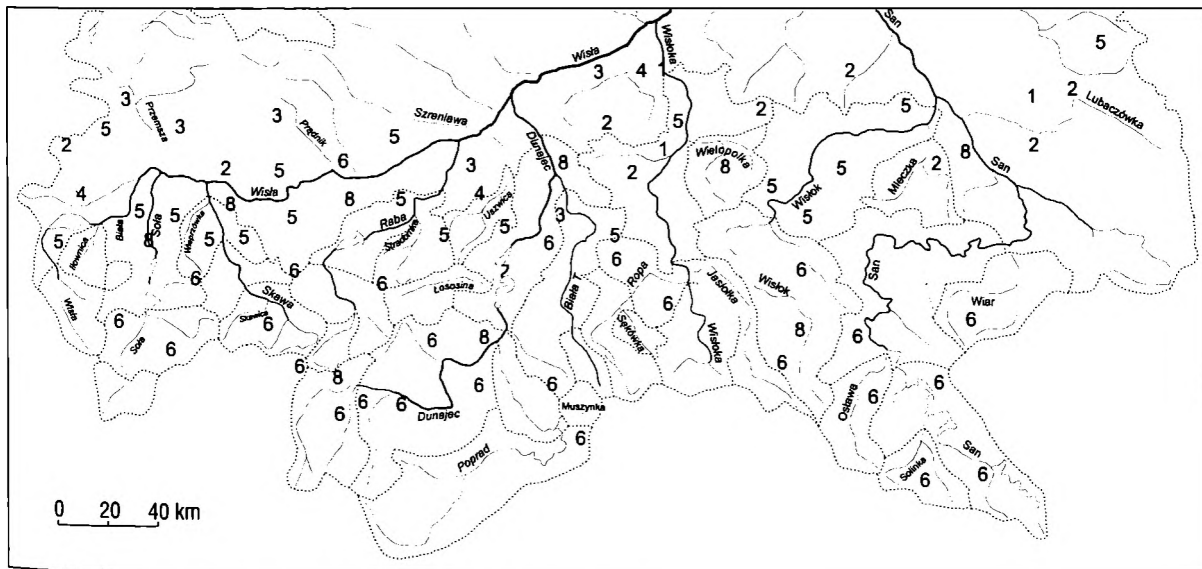


Ryc. 2.4.2. Maksymalne opady dobowe o prawdopodobieństwie pojawiania się 1% – H_1 [mm] (Zasady ..., 1991)

Przykład 1

Oblicz prędkość wody w korycie rzeki przy następujących założeniach:

- powierzchnia przekroju poprzecznego koryta wynosi 20 m^2 ,
- profil poprzeczny rzeki jest zwilżony na długości 25 m,
- na odcinku 2 km zwierciadło wody obniża się o 1 m,
- rzeka posiada piaszczyste, niezarośnięte dno; koryto jest prostolinijne.



Ryc. 2.4.3. Współczynnik odpływu maksymalnego (Zasady ..., 1991)

Rozwiązanie

1. Aby obliczyć prędkość wody w korycie, można wykorzystać formułę Manninga. Wcześniej należy wyznaczyć promień hydrauliczny według wzoru (2.4.5):

$$R = \frac{20}{25} = 0,8 \text{ [m]}$$

oraz spadek zwierciadła wody (patrz wzór 1.2.17):

$$i = \frac{1}{2000} = 0,0005$$

a także współczynnik Manninga (z tab. 2.4.6; wynosi on dla rzeki prostolinijnej o piaszczystym i niezarośniętym dnie: 0,030).

2. Obliczenie średniej prędkości wody

Uwzględniając powyższe dane wyjściowe, można obliczyć średnią prędkość wody w rzece, korzystając ze wzoru (2.4.4):

$$v = \frac{1}{0,03} \cdot 0,8^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{0,0005} \approx 0,64 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

Odpowiedź

Średnia prędkość płynięcia wody w korycie wynosi 0,64 m·s⁻¹.



Ryc. 2.4.4. Zasięgi stosowania obszarowych równań regresji (wg Zasady ..., 1991)

Przykład 2

Oblicz natężenie przepływu rzeki opisanej w zadaniu 1.

Rozwiązanie

Natężenie przepływu można obliczyć według wzoru (4.1.13):

$$Q = 20 \cdot 0,64 = 12,8 \text{ [m}^3\text{·s}^{-1}\text{]}.$$

Odpowiedź

Natężenie przepływu rzeki wynosi 12,8 m³·s⁻¹.

Przykład 3

Oblicz średnie natężenie przepływu Soły (Żywiec), przyjmując, że średnia roczna suma opadu w zlewni Soły wynosi 1000 mm, zlewnia ma długość 43 km, a jej powierzchnia wynosi 785 km². Wykorzystaj w tym celu wzór Kollisa.

Rozwiązanie

1. Obliczenie wartości φ

Wartość φ jest zależna od wartości d , z i s . Wartość d ustala się drogą interpolacji na podstawie tab. 2.4.3; wynosi ona 1,0 (sprawdź to samodzielnie!). Na podstawie tab. 2.4.4 ustala się wartość z ; wynosi ona 1,09. Następnie ustala się wartość s , obliczając wcześniej wartość ilorazu $\frac{A}{L}$

$$\frac{A}{L} = \frac{785}{43} = 18,26$$

Wartość s obliczona z tab. 2.4.5 na podstawie interpolacji wynosi 1,47.

Wartość φ ustalona na podstawie wzoru (2.4.3) wynosi zatem:

$$\varphi = \frac{1,0}{1,09 \cdot 1,47} = 0,62$$

2. Obliczenie średniego natężenia przepływu według wzoru Kollisa (2.4.2):

$$Q = 0,0317 \cdot 0,62 \cdot 1 \cdot 785 = 15,4 \text{ [m}^3\text{·s}^{-1}\text{]}$$

Odpowiedź

Średni przepływ Soły obliczony według wzoru Kollisa wynosi 15,4 m³·s⁻¹.

Przykład 4

Oblicz natężenie przepływu kulminacyjnego cieku, który odwadnia zlewnię zurbanizowaną (osiedle domków jednorodzinnych), zajmującą obszar 0,75 km², jeśli opad wywołujący falę wezbraniową miał natężenie 15 mm·h⁻¹.

Rozwiązanie

Do obliczenia natężenia przepływu kulminacyjnego można zastosować formułę racjonalną (2.4.10):

$$Q = 0,278 \cdot 0,40 \cdot 15 \cdot 0,75 = 1,25 \text{ [m}^3\text{·s}^{-1}\text{]}$$

Odpowiedź

Natężenie przepływu kulminacyjnego podczas wezbrania wynosiło $1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Przykład 5

Oblicz wielkość przepływu maksymalnego Starej Rzeki (Pogórze Wiśnickie), której zlewnia po profil w Łazach ma obszar $22,2 \text{ km}^2$, długość $10,6 \text{ km}$, a zalesienie zlewni wynosi 42% .

Rozwiązanie

Do obliczenia wielkości przepływu maksymalnego można zastosować wzór 2.4.11.

1. Wyznaczenie wielkości koniecznych do wzoru

Należy z tab. 2.4.9 odczytać maksymalny odpływ jednostkowy q , który przy $L = 10 \text{ km}$ i terenie falistym wynosi $2,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Następnie ustala się współczynnik c według wzoru (2.4.12):

$$c = 1 - (0,4 \cdot 0,42) = 0,83$$

2. Obliczenie przepływu maksymalnego

$$Q = 22,2 \cdot 2,4 \cdot 0,83 = 44,2 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

Odpowiedź

Przepływ maksymalny Starej Rzeki wynosi $44,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Pytania

1. Jakie parametry zlewni i parametry meteorologiczne zastosowano w wyżej przedstawionych wzorach empirycznych? Dlaczego?
2. Które z parametrów zlewni zastosowano w największej liczbie wzorów na przepływ?
3. Które z wymienionych parametrów są najłatwiejsze do uzyskania? Dlaczego?
4. Czy uzyskane za pomocą wzorów empirycznych wyniki uznajesz za prawdopodobne, czy też wydają Ci się za wysokie lub za niskie? Dlaczego?