

## WPLYW WIATRU NA PRĘDKOŚĆ SPŁYWAJĄCEJ PO ZBOCZU WODY OPADOWEJ\*

*D. Kowalski, P. Gliński*

Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Usuwania Ścieków, Politechnika Lubelska  
ul. Nadbystrzycka 40, 20-044 Lublin

**Streszczenie.** Praca dotyczy oceny wpływu prędkości wiatru, kąta nachylenia stoku, natężenia opadu na prędkość spływu powierzchniowego wody. Analiza potwierdziła związek pomiędzy tymi wielkościami. Została stwierdzona jednocześnie zmienność wagi prędkości wiatru oraz nachylenia stoku na prędkość spływu w zależności od wartości tych wielkości.

**Słowa kluczowe:** prędkość wiatru, intensywność deszczu, kąt nachylenia.

### WSTĘP

Jednym z podstawowych zagadnień przy projektowaniu zabezpieczeń przeciw erozji wodnej jest określenie prędkości spływającej wody opadowej [2,5,7,12-14]. Jest ona uzależniona od szeregu czynników, między innymi kąta nachylenia zbocza, rodzaju powierzchni i jej pokrywy roślinnej czy też (w warunkach dopływu opadu na całej długości spływu) od długości rozpatrywanego stoku.

Innym podstawowym parametrem bezpośrednio wpływającym na prędkość spływającej po stoku wody opadowej jest intensywność opadu [3,9-11]. Parametr ten może również ulegać zmianom w bardzo szerokim zakresie. Jedną z przyczyn tych zmian może być zdaniem autorów artykułu siła i kierunek wiatru.

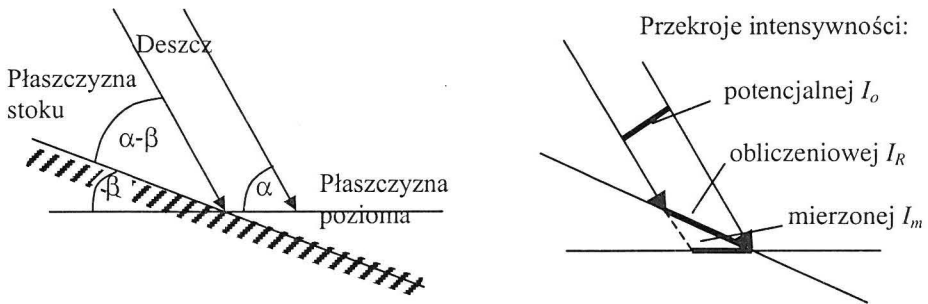
Celem artykułu jest próba wykazania związku pomiędzy kierunkiem i siłą wiatru a intensywnością opadu docierającego do powierzchni spływu oraz prędkością spływu.

---

\* Praca wykonana w ramach projektu badawczego Nr 154/T09/2001/21.

## TEORIA

Intensywność deszczu  $I$  ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ) reprezentuje objętość wody opadającą na płaską, poziomą powierzchnię w jednostce czasu. W warunkach poziomo wiejącego wiatru, odchylającego strumień padającego deszczu od pionu, daje się wyodrębnić trzy różniące się od siebie powierzchnie odniesienia – prostopadłą do strumienia padającego deszczu, dla której jego intensywność oznaczono jako potencjalną  $I_o$ , poziomą, reprezentującą położenie przyrządów do pomiaru intensywności, dla której intensywność oznaczono jako mierzoną  $I_m$  oraz leżącą w płaszczyźnie stoku, oznaczoną jako  $I_R$  (Rys. 1).



**Rys. 1.** Schemat ideowy opadu deszczu na płaską powierzchnię nachyloną pod kątem  $\beta$ , w stosunku do poziomej płaszczyzny deszczomierza.

**Fig. 1.** Schematic diagram of rainfall on a flat surface under inclination angle  $\beta$  in relation to horizontal plane of ombrometer.

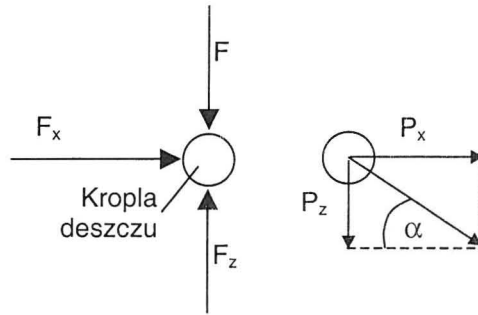
Związki pomiędzy wymienionymi wielkościami omówiono w poprzedniej pracy [6]:

$$I_m = I_o \cdot \sin\alpha$$

$$I_R = I_o \cdot \sin(\alpha - \beta) \quad (1)$$

$$I_R = I_m \cdot \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin\alpha}$$

Kąt padania deszczu  $\alpha$  można wyznaczyć (dla celów modelowych) analizując opad pojedynczej kropli w warunkach poziomo wiejącego wiatru (Rys. 2):



**Rys. 2.** Schemat ideowy rozkładu sił ( $F$ ,  $F_x$ ,  $F_z$ ) działających początkowo oraz składowych pędu ( $P_x$ ,  $P_z$ ) działającego po ustabilizowaniu się prędkości, na kroplę deszczu w warunkach poziomo wiejącego wiatru.

**Fig. 2.** Schematic diagram of distribution forces ( $F$ ,  $F_x$ ,  $F_z$ ) operating initially and component of momentum ( $P_x$ ,  $P_z$ ) operating after stabilization of horizontal wind.

$$\alpha = \text{arc tg} \frac{P_z}{P_x} = \text{arc tg} \frac{v_z}{v_x} \quad (2)$$

gdzie:  $v_x$  odpowiada prędkości wiatru, natomiast  $v_z$  prędkości opadania kropli, przy czym

$$v_z = v_0 + g \cdot t \quad (3)$$

$$t = \sqrt{\frac{8}{3 \cdot g \cdot C_z} \cdot \frac{\rho_w}{\rho_p} \cdot R} \quad (4)$$

gdzie:  $v_0$  - prędkość początkowa kropli,  $t$  - czas, po którym prędkość opadania kropli przyjmuje wartość ustaloną,  $C_z$  - współczynnik oporu, uzależniony od liczby Reynoldsa,  $\rho_p$  - gęstość powietrza,  $\rho_w$  - gęstość wody,  $R$  - promień kropli,  $g$  - przyspieszenie ziemskie.

Zakładając wielkość kropli za [4] oraz następujące założenia:

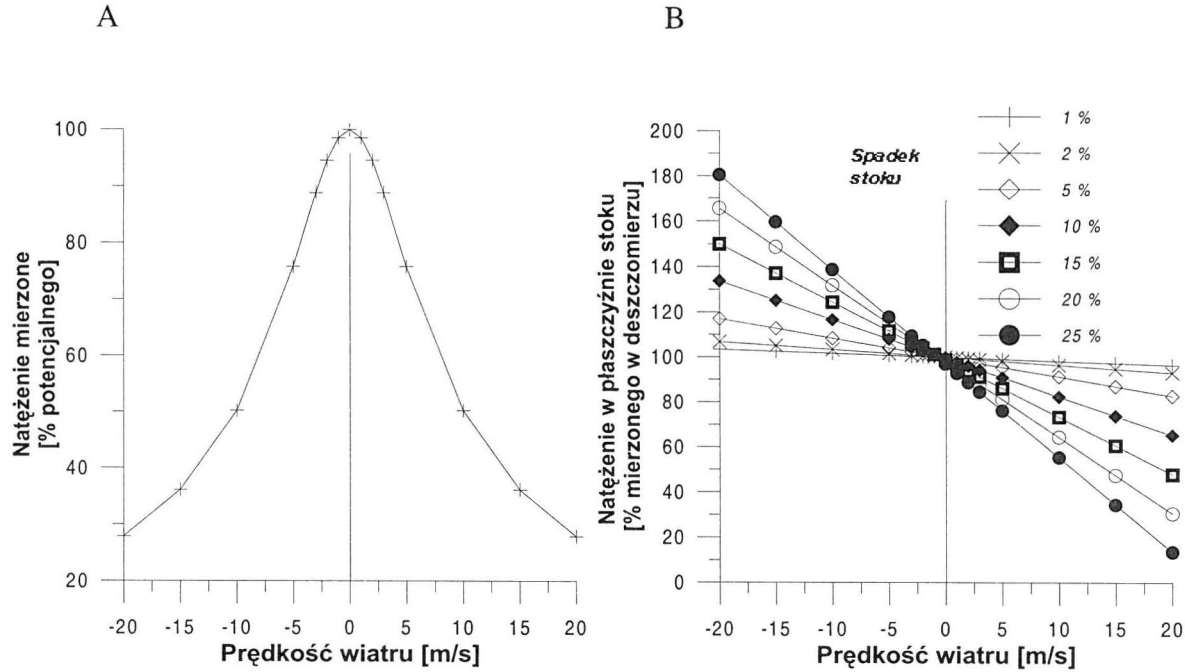
- prędkość początkowa kropli wynosi  $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,
- rozmiar kropli nie ulega zmianie w trakcie trwania jej lotu,
- wiatr wieje w kierunku poziomym, ze stałą prędkością  $v_x$ , zgodnie lub przeciwnie do stoku,
- temperatura powietrza wynosi  $20^\circ\text{C}$ , przy normalnym ciśnieniu atmosferycznym,
- temperatura kropli jest równa temperaturze otoczenia,

można uzyskać teoretyczny związek pomiędzy natężeniem deszczu potencjalnym ( $I_o$ ) i mierzonym w deszczomierzu ( $I_m$ ) oraz natężeniem obliczeniowym w płaszczyźnie stoku ( $I_R$ ) w stosunku do natężenia mierzonego ( $I_m$ ) [6].

Rysunek 3, oparty o wyznaczony teoretyczny związek pomiędzy prędkością wiatru i jej wpływem na kąt padania deszczu wskazuje, że tradycyjne, poziomo stawiane deszczomierze nie w pełni oddają rzeczywistą intensywność deszczu. Przedstawiony wykres zależności pomiędzy natężeniem potencjalnym, a mierzonym przy użyciu deszczomierza posiada kształt zbliżony do krzywej Gaussa (Rys. 3A), co wskazuje na fakt, że kierunek poziomego wiatru nie posiada w tym przypadku istotnego znaczenia. Mierzone natężenie deszczu odpowiada potencjalnemu jedynie przy braku poziomo wiejącego wiatru. Wraz jednak ze wzrostem tej prędkości natężenie mierzone maleje w stosunku do potencjalnego, osiągając przy prędkości  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  wartość ok. 38% tego ostatniego.

Nieco inaczej przedstawia się związek pomiędzy natężeniem deszczu w płaszczyźnie stoku i mierzonym w deszczomierzu. Rysunek 3B wskazuje na znaczne zróżnicowanie uzależnione zarówno od prędkości poziomego wiatru, jak i kąta nachylenia stoku. Kształt przedstawionych krzywych wskazuje również na istotną w tym przypadku rolę kierunku wiejącego wiatru, który może zwiększać lub zmniejszać natężenie w płaszczyźnie stoku. Zakres zmian w badanym obszarze waha się od 15 do 180%. Wartości mniejsze od 100% pokrywają się z kierunkiem wiatru zgodnym ze spadkiem stoku, zaś większe od 100% z kierunkiem do niego przeciwnym. Oczywiście i tutaj istnieją niewielkie odchylenia, dotyczą jednak one prędkości zbliżonych do  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  i spadków większych od 2%, gdzie porównywane wielkości natężenia są do siebie bardzo zbliżone. Zakres zmian zwiększa się oczywiście wraz ze wzrostem nachylenia rozpatrywanej płaszczyzny stoku oraz kierunkiem i prędkością wiatru.

Ponieważ naszym zdaniem intensywność deszczu ma istotny wpływ na prędkość spływającej po stoku wody opadowej, zakładając słuszność przeprowadzonych powyżej rozważań, można podjąć próbę wykazania związku pomiędzy prędkością wiatru a prędkością spływających wód opadowych. W tym celu dokonano szeregu obliczeń wydatku objętościowego spływającej po zboczu wody, dla założonych warunków nachylenia stoku, jak i prędkości wiatru odchylającego kierunek lotu kropel padającego deszczu. Wielkości wydatku posłużyły do wyznaczenia prędkości spływu na końcu rozpatrywanego stoku.



**Rys. 3.** Natężenie mierzone w deszczomierzu w stosunku do potencjalnego (A) oraz natężenie w płaszczyźnie stoku w stosunku do natężenia mierzonego w deszczomierzu (B). Ujemne prędkości wiatru oznaczają jego kierunek przeciwny do kierunku spadku stoku.

**Fig. 3.** Measured intensity measured in ombometr in relation to potential intensity (A)

And intensity in slope plane in relation to intensity measured in ombometr (B). Negative wind speed mean its direction opposite to slope inclination.

Uwzględniono podstawowy wzór Chezy-Manninga [8] opisujący prędkość przepływu cieczy w korytach otwartych:

$$v = \frac{1}{n} R_h^{\frac{2}{3}} \cdot i^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

gdzie:  $v$  - prędkość średnia spływającej korytem wody [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],  $n$  - szorstkość koryta [-],  $R_h$  - promień hydrauliczny przepływu (m),  $i$  - spadek koryta przepływowego (-).

Oddzielnym problemem jest określenie współczynnika szorstkości koryta przepływowego. Współczynnik ten zależy przede wszystkim od materiału, z jakiego wykonano koryto przepływowe. Wiadomo, że w warunkach naturalnych stoków, pokrytych roślinnością, współczynnik ten może być bardzo zróżnicowany. Dla celów prezentowanych w artykule rozważań przyjęto jednak wartość współczynnika szorstkości jak dla koryt ziemnych  $n = 0,017$  [8].

Zakładając znajomość wielkości intensywności opadu, wzór Chezy-Manninga, traktowany samodzielnie, nie pozwala na określenie prędkości spływającej po stoku cieczy. Wymagana jest tutaj dodatkowo znajomość jej wydatku objętościowego. Wielkość ta zmienia się na całej długości stoku. Jej wartość w danym miejscu można wyznaczyć ze wzoru [1]:

$$Q = I_R \cdot F \cdot \varphi = I_R \cdot (B \cdot L) \cdot \varphi \quad (6)$$

w którym:  $I_R$  - intensywność opadu docierającego do powierzchni stoku,  $F$  - pole powierzchni, na jaka następuje opad,  $\varphi$  - współczynnik spływu,  $B$  - szerokość pasa spływu,  $L$  - długość stoku.

#### OBLICZENIA

Wszystkie obliczenia modelowe prowadzono przy następujących założeniach:

- stała intensywność w trakcie całego czasu trwania deszczu,
- intensywność referencyjną deszczu, przyjmowaną jako podstawę do wszelkich późniejszych porównań, przyjęto  $50 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,
- deszcz trwa dłużej niż okres stabilizacji prędkości przepływu wody na stoku,
- ustalone warunki przepływu,
- całość opadającej z deszczem wody spływa po zboczu,
- istnieje związek pomiędzy prędkością i kierunkiem wiatru a intensywnością opadu docierającego do powierzchni stoku, opisany teoretycznie w pracy [14],
- intensywność wiatru nie wpływa na strumień spływającej po zboczu wody,
- długość stoku wynosi 100 m,

- szerokość wyodrębnionego pasa spływu  $B = 1,0$  m,
- prędkość wiatru wynosi 1, 2, 3, 5, 10, 15 i  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,
- rozpatrywano jedynie kierunki wiatru zgodne i przeciwnie spadkowi stoku,
- nachylenie płaszczyzny stoku do poziomu przyjęto w wysokości 1, 2, 5, 10, 15 i 20%.

### OMÓWIENIE WYNIKÓW OBLICZEŃ

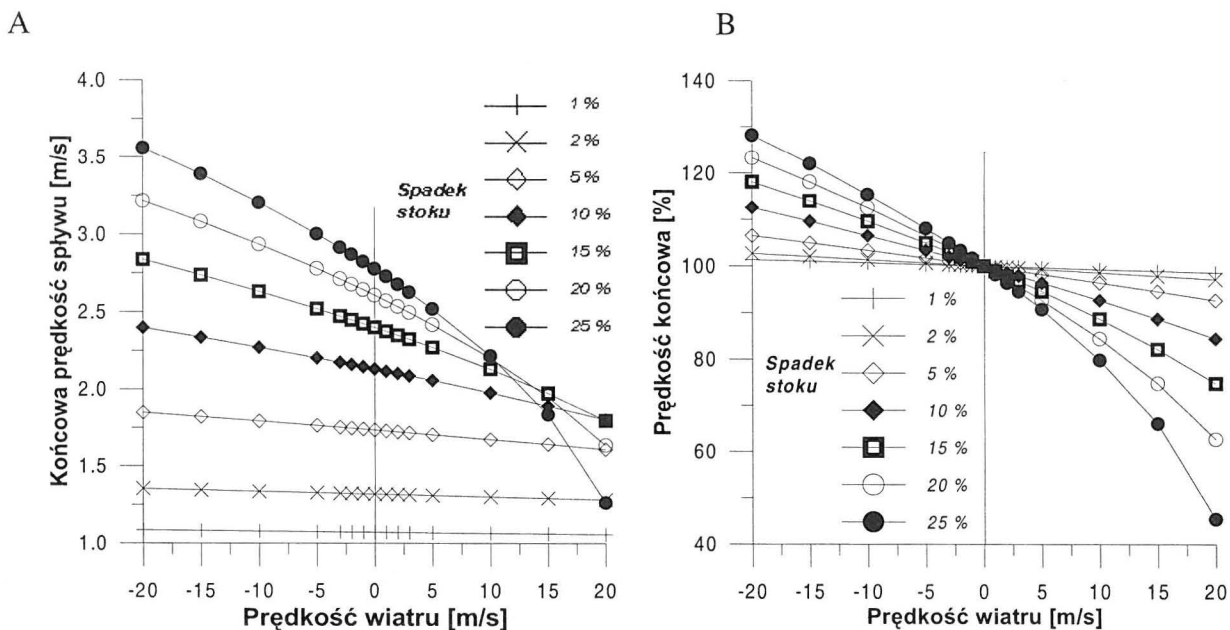
Wyniki obliczeń przedstawiono na Rys. 4 i 5.

Przyjmując za podstawę porównań zmian prędkości końcowej wód opadowych spływających po rozpatrywanym stoku stałą intensywność deszczu, mierzonego w poziomych deszczomierzach, uzyskano wykresy przedstawione na Rys. 4. Duże różnicowanie prędkości końcowych, od  $1,05$  do  $3,55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (Rys. 4A) wynika z przyjęcia warunków odpowiadających deszczowi nawalnemu ( $50 \text{ mm h}^{-1}$ ). Pozwala to jednak na łatwiejszą obserwację zmian tych prędkości w zależności od badanych parametrów.

Rozpatrywane zmiany prędkości spływu wód opadowych na końcu badanego stoku uzależnione są w sposób istotny od kąta jego nachylenia oraz od kierunku i prędkości wiatru. Zakres tych zmian rośnie wraz z kątem nachylenia stoku. Warto zauważyć, że przy spadkach od 15 do 25%, przy wietrze o prędkości  $+10$  do  $+20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , następuje przecinanie się krzywych wynikowych. W granicznym rozpatrywanym przypadku uzyskano niemal jednakowe prędkości dla stoku 2 i 25%. Oznacza to, że w tych warunkach prędkość wiatru ma znacznie większy wpływ na prędkość spływu wód opadowych niż spadek stoku. W pozostałych przypadkach rolę decydującą ma pod tym względem spadek stoku.

Prezentowany wykres wskazuje również na dużo większe niebezpieczeństwo erozji wodnej, związanej z prędkością spływu, w warunkach wiatru wiejącego przeciwnie niż zgodnie ze spadkiem stoku. Wydaje się, że nie jest to do końca słuszne w warunkach odsłoniętego stoku, pozbawionego roślinności. Zagadnienie to wymaga dalszych badań.

Rysunek 4 B przedstawia relatywną zmianę prędkości końcowej wody spływającej po stoku w stosunku do warunków referencyjnych - za 100% przyjęto prędkość odpowiadającą ciszy wietrznej. Uzyskany w ten sposób wykres pozwala na uniezależnienie się od bezwzględnej wartości intensywności deszczu mierzonej w deszczomierzach. Znacznie wyraźniej niż na Rys. 4A widoczny jest tu zakres zmian prędkości spływu w zależności od prędkości wiatru i spadku rozpatrywanego stoku.



**Rys. 4.** Zależność końcowej prędkości spływu wody opadowej po stoku w zależności od kąta jego nachylenia oraz prędkości wiatru, w warunkach stałego (niezależnie od wiatru) natężenia deszczu mierzonego w deszczomierzu (A). Prędkość referencyjna (100%) (B) odpowiada prędkości wiatru  $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Ujemne prędkości wiatru oznaczają jego kierunek przeciwny do kierunku spadku stoku.

**Fig. 4.** relation between final rain runoff velocity along the slope in relation to it inclination and wind speed in conditions of permanent (independent of wind ) rain intensity measured in ombrometer (A). Reference speed ( 100%) (B) is related to wind speed  $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Negative wind speed mean its direction opposite to slope inclination.

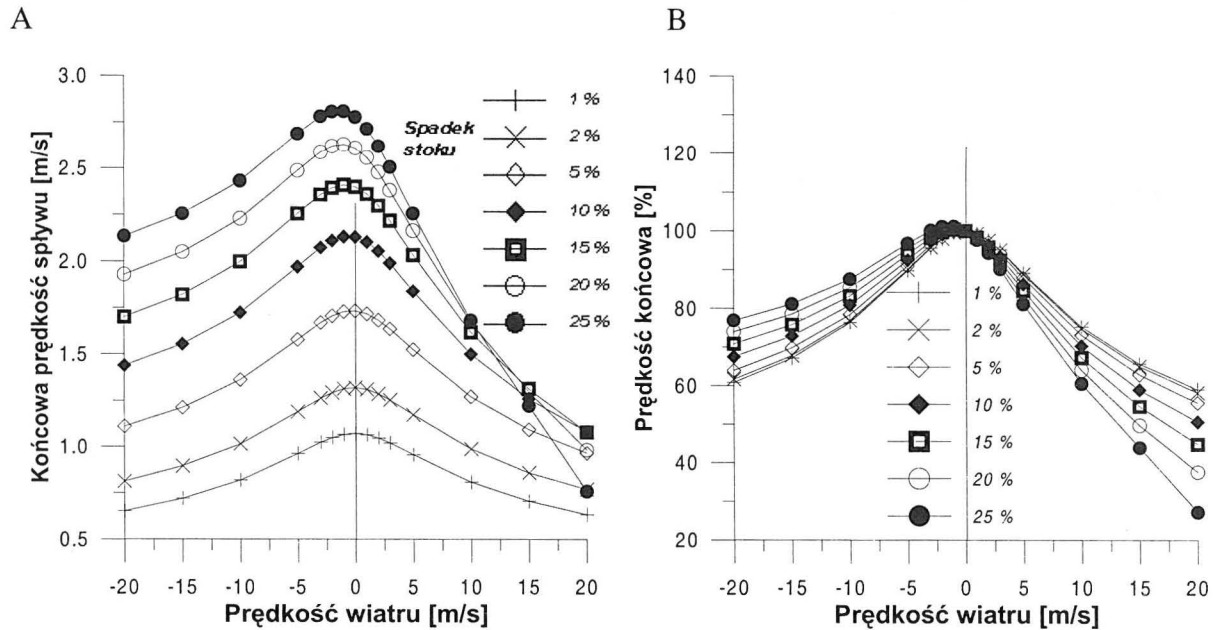


Należy pamiętać, że zgodnie z rezultatami rozważań przedstawionymi na Rys. 3 stała intensywność deszczu mierzona w deszczomierzach nie odpowiada stałej intensywności potencjalnej w warunkach poziomo wiejącego wiatru, co utrudnia nieco interpretację uzyskanych wyników. W związku z tym za podstawę dalszych rozważań przyjęto stałą potencjalną intensywność deszczu. Wyniki przeprowadzonych obliczeń przedstawiono na Rys. 5.

Podobnie jak na Rys. 4 tutaj również można zauważyć wyraźny związek pomiędzy końcową prędkością spływu wód opadowych po rozpatrywanym stoku, a wielkością jego spadku oraz prędkością i kierunkiem wiatru. Inaczej niż w przypadku przedstawionym na Rys. 4 maksimum prędkości spływu odpowiada wiatrowi o prędkości od 0 do  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , co związane jest z występującą wtedy prostopadłością strug deszczu i płaszczyzny stoku. Podobnie jak w na Rys. 4 tutaj również można zaobserwować zróżnicowanie wagi wpływu rozpatrywanych parametrów na prędkość spływu. Generalnie, w całym badanym obszarze, bardziej istotny wydaje się pod tym względem spadek stoku niż prędkość i kierunek wiatru. Sytuacja odwrotna pojawia się jedynie dla spadków od 15 do 25%, przy prędkościach powyżej  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Podobnie jak na Rys. 4A można tutaj zaobserwować niemal identyczny graniczny rezultat prędkości spływu dla spadku 2 i 25%.

Relatywna zmiana prędkości końcowej spływu w stosunku do referencyjnej, wyznaczonej powyżej ciszy wietrznej, przedstawiona na Rys. 5B wskazuje, że inaczej niż w przypadku pokazanym na Rys.4, maksymalne prędkości mogą uzyskiwać jedynie 100% prędkości referencyjnej. Związane jest to z faktem, że wartość ta odpowiada maksymalnemu możliwemu natężeniu deszczu. Wydaje się, że takie podejście do problemu jest bardziej słuszne od poprzedniego, w którym za podstawę rozważań przyjmowano intensywność mierzoną w deszczomierzach.

Wspominane większe niebezpieczeństwo erozji wodnej, związanej z prędkością spływu wód opadowych po stoku, dla warunków wiatru wiejącego w kierunku przeciwnym do jego spadku, zgodnie z Rys. 5 nie wydaje się tak oczywiste jak w przypadku przedstawionym na Rys. 4. Dalsze rozważania należałoby więc poprowadzić w kierunku ustalenia wzajemnego oddziaływania spływających wód opadowych i wiejącego wiatru.



**Rys. 5.** Zależność końcowej prędkości spływu wody opadowej po stoku w zależności od kąta jego nachylenia oraz prędkości wiatru, w warunkach stałego, potencjalnego natężenia deszczu. Prędkość referencyjna (100%) (A) odpowiada prędkości wiatru  $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . (B). Ujemne prędkości wiatru oznaczają jego kierunek przeciwny do kierunku spadku stoku.

**Fig. 5.** Relation between final rain runoff velocity along the slope in relation to its inclination and wind speed in condition of permanent, potential rain in intensity (A). Reference speed (100%) (B) is related to wind speed  $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Negative wind speeds mean its direction opposite to slope inclination.

## WNIOSKI

Przedstawione rozważania, w warunkach rozpatrywanego modelu związku kąta padania deszczu z prędkością poziomo wiejącego wiatru oraz przyjętego modelowego stoku można stwierdzić, że:

1. Wywołana wpływem poziomo wiejącego wiatru zmiana kąta padania deszczu ma istotny wpływ na prędkość spływającej po zboczu wody.
2. Wpływ ten jest tym większy im większy jest spadek stoku.
3. W większości badanego obszaru decydujący wpływ na prędkość spływających wód opadowych ma spadek stoku, jednakże przy przekroczeniu prędkości wiatru  $+10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  oraz spadku stoku 15% ważniejszą rolę przyjmuje prędkość wiatru.
4. W krańcowych przypadkach rozpatrywanego obszaru badań modelowych, prędkość spływu po 25% nachylnym stoku spadała na skutek wiatru do wartości zbliżonych do stoku 2%.
5. Porównując wykresy zmian prędkości końcowej spływu wód opadowych, sporządzone przy założeniach stałego natężenia potencjalnego i w deszczomierzu, można zaobserwować zróżnicowany rozkład tych zmian. W warunkach stałego natężenia potencjalnego maksymalna zaobserwowana wartość wynosiła 100% wartości referencyjnej, natomiast przy stałym natężeniu mierzonym w deszczomierzu ok. 130%.
6. Nie można stwierdzić jednoznacznie, że większe niebezpieczeństwo erozji wodnej, związanej z prędkością spływającej po stoku wody, występuje przy wietrze wiejącym w kierunku przeciwnym do spadku stoku. Zagadnienie to wymaga dalszych badań.
7. W świetle przedstawionych rozważań modelowych wydaje się, że przy rozpatrywaniu zagadnień intensywności deszczu konieczne są, obok standardowych deszczomierzy, pomiary prędkości i kierunku wiatru.

## PIŚMIENNICTWO

1. **Błaszczak W., Stamatello H., Błaszczak P.:** Kanalizacja. t. 1, Arkady, Warszawa, 1983.
2. **Dębicki R., Rejman J.:** Przewidywanie strat gleby w wyniku erozji wodnej. Problemy Agrofizyki 59, 1990.
3. **Dingle A.N., Lee Y.:** Terminal falls speeds of raindrops. Journal of Applied Meteorology, 11, 877-879, 1972.
4. **Erpul G., Gabriels D., Janssens D.:** Assessing the drop size distribution of simulated rainfall in wind tunnel. Soil & Tillage Research, 455-463, 1998.

5. **Gliński P., Dębicki R.:** Ocena zagrożeń erozyjnych oraz charakterystyka jakości wód przy zastosowaniu symulacji komputerowej. *Acta Agrophysica*, 36, 455-463, 2000.
6. **Gliński P., Kowalski D.:** Próba oceny wpływu wiatru i kąta nachylenia stoku na wartość obliczeniową intensywności opadającego deszczu. *Acta Agrophysica*, 78, 25-35, 2002.
7. **Gliński P., Paszczyk J.:** Water erosion hazard of soil in the river Wieprz basin. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 436, 39-48, 1998.
8. **Gryboś R.:** Podstawy mechaniki płynów. PWN, Warszawa, 1989.
9. **Gunn R., Kinzer G.D.:** The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *Journal of Meteorology*, 6, 243 - 248, 1949.
10. **Joss J., Gori G.:** The parameterization of raindrop size distribution. *Revista Italiana di Geofisica*, 2, 275-283, 1976.
11. **Laws J.O., Parsons D.A.:** The relation of raindrop size with intensity. *Transactions of the American Geophysical Union*, 24, 452-459, 1943.
12. **Panini T., Torri D., Pellegrini S., Pagliai M., Salvador Sanchis M.P.:** A theoretical approach to soil porosity and tealing development using simulated rainstorms. *Catena* 31, 199-218, 1997.
13. **Rejman J., Dębicki R.:** Postęp metodyczny w opisie i badaniach procesu erozji wodnej gleb. *Acta Agrophysica*, 63, 159-177, 2002.
14. **Turski R., Słowińska-Jurkiewicz A., Paluszek Paluszek., Dębicki R.:** Naturo aspects of a new approach to erosion of less soil in Poland. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 400, 39-44, 1993.

## INFLUENCE OF WIND SPEED ON RAIN WATER RUNOFF VELOCITY ALONG THE SLOPE

*D. Kowalski, P. Gliński*

Department of Water Supply and Water Disposal, Technical University  
ul. Nadbystrzycka 40, 20-044 Lublin

**Summary.** The evaluation of the influence of wind speed slope angle and rainfall intensity on surface runoff showed relationships between those parameters. Simultaneously the influence of variability of wind speed and slope angle on the runoff intensity depended on the value of their magnitude.

**Key words:** wind speed, rain water runoff, slope.