

Ocena stateczności zboczy w ujęciu wybranych modeli jednowymiarowych

Dr inż. Tymoteusz Zydroń

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji

Problematyka oceny stateczności zboczy stanowi istotne zagadnienie z punktu widzenia geotechniki, budownictwa ziemnego czy też geologii inżynierskiej. Obliczenia stateczności są powszechnie wykonywane w fazie prac projektowych, gdzie stanowią ocenę poprawności zaprojektowania ziemnych budowli inżynierskich. Z kolei w przypadku zboczy naturalnych obliczenia stateczności wykorzystywane są jako narzędzie analizy mechanizmu i przyczyn powstania osuwisk. W naturze warunki równowagi zboczy są bardzo często związane z intensywnością i czasem trwania opadów atmosferycznych, a możliwość oceny zmian warunków ich stateczności ma duże znaczenie w kontekście określenia wielkości opadów progowych czy też wydzielania obszarów (fragmentów zboczy) o podwyższonym ryzyku powstania osuwisk.

Najprostszym narzędziem służącym określeniu warunków stateczności są obliczenia z zastosowaniem modelu zbocza o nieograniczonej długości. Model ten znajduje zastosowanie w przypadku analiz osuwisk o charakterze translacyjnym, gdzie powierzchnia poślizgu przebiega równolegle do powierzchni terenu, ale również stosowany jest przy analizie innych typów ruchów masowych (np. spływy błotne i błotno-gruzowe). Pod-

stawową zaletą modelu zbocza o nieograniczonej długości jest możliwość łatwej jego integracji z jednowymiarowymi modelami infiltracji i zaadoptowania go do systemów GIS, co umożliwia opracowanie map obszarów podatnych na powierzchniowe ruchy masowe, czy też pozwala analizować warunki stateczności zboczy na obszarach obejmujących zlewnie.

Istnieje kilka metod obliczeń stateczności powierzchniowych warstw zboczy w ujęciu jednowymiarowym [m.in. 14, 19, 21, 24], które różnią się sposobem podejścia do opisu procesu infiltracji, a także określeniem wytrzymałości gruntów na ścinanie. Celem niniejszej publikacji jest porównanie wybranych modeli stateczności zintegrowanych z modelami infiltracji, a także określenie wpływu wodoprzepuszczalności gruntów na kształtowanie się warunków równowagi zboczy poddanych rozlewnym, jak i nawałnym opadom deszczu. Analiza wpływu intensywności i długości czasu trwania opadów na stateczność powierzchniowych warstw zboczy jest często poruszana w literaturze zagranicznej [m.in. 6, 8, 15, 16, 26, 27, 29], niemniej prezentowane w nich wyniki nie zawsze mogą być odniesione do warunków polskich, głównie z uwagi na inne warunki klimatyczne (czas trwania i natężenia opadów).

KONCEPCJE OBLICZEŃ STATECZNOŚCI POWIERZCHNIOWYCH WARSTW ZBOCZY ZINTEGROWANYCH Z OBLICZENIAMI INFILTRACJI

W postaci klasycznej współczynnik stateczności zboczy określany jest najczęściej jako stosunek wartości aktualnej wytrzymałości gruntu na ścinanie do wartości zmobilizowanej naprężeń stycznych

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (1)$$

gdzie:

τ_f – wytrzymałość gruntu na ścinanie [kPa],
 τ – naprężenia styczne [kPa].

W typowych obliczeniach stateczności wytrzymałość gruntu na ścinanie opisywana jest równaniem Coulomba-Mohra

$$\tau_f = \sigma' \cdot \operatorname{tg} \phi' + c' = (\sigma - u_w) \cdot \operatorname{tg} \phi' + c' \quad (2)$$

gdzie:

σ' – naprężenia efektywne [kPa],
 σ – całkowite naprężenia normalne [kPa],
 u_w – ciśnienie porowe [kPa],
 ϕ' – efektywny kąt tarcia wewnętrznego [°],
 c' – efektywna spójność [kPa].

Jednym z najprostszych sposobów obliczeń stateczności jest metoda oparta na tzw. płaskiej powierzchni poślizgu (model zbocza o nieograniczonej długości), która zakłada, że poślizg gruntu następuje w płaszczyźnie równoległej do powierzchni terenu, a długość strefy poślizgu jest nieskończenie duża w stosunku do głębokości strefy poślizgu. W tego rodzaju przypadku długość strefy poślizgu może być pomijana, a wartość współczynnika stateczności można określać, stosując następujący wzór

$$FS = \frac{c' + (\gamma_s \cdot z - \gamma_w \cdot d_z) \cdot \cos^2 \beta \cdot \operatorname{tg} \phi'}{\gamma_s \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (3)$$

gdzie:

z – głębokość [m],
 d_z – wysokość zwierciadła wody gruntowej [m],
 β – kąt nachylenia zbocza [°],
 γ_s – ciężar objętościowy gruntu przy pełnym nasyceniu porów wodą [kN/m³],
 γ_w – ciężar objętościowy wody [kN/m³],
 ϕ' – efektywny kąt tarcia wewnętrznego [°],
 c' – efektywna spójność [kPa].

W równaniu (2) zakłada się, że efektywna wartość naprężeń przenoszonych przez ośrodek gruntowy odpowiada różnicy pomiędzy wartością naprężenia całkowitego i ciśnienia wody w porach gruntowych. W przypadku gruntów częściowo nasyconych wartość naprężeń efektywnych zależna jest również od wielkości ciśnienia ssania. Pierwszą propozycję opisu naprężeń dla ośrodków nienasyconych przedstawił Bishop [2]

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi \cdot (u_a - u_w) \quad (4)$$

gdzie:

u_a – ciśnienie powietrza w porach gruntu [kPa],
 χ – parametr zależny od stopnia wilgotności gruntu [-].

Opierając się na powyższym równaniu wytrzymałość na ścinanie gruntu nienasyconego można opisać następująco

$$\tau_f = [(\sigma - u_a) + \chi \cdot (u_a - u_w)] \cdot \operatorname{tg} \phi' + c' \quad (5)$$

Vanapalli i Fredlund [30] podają, że wartość parametru χ można opisać za pomocą stopnia wilgotności gruntu

$$\chi \equiv S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (6)$$

gdzie:

S_e – znormalizowany stopień wilgotności [-],
 θ – wilgotność objętościowa gruntu [-],
 θ_s – wilgotność objętościowa gruntu przy pełnym nasyceniu porów gruntowych [-],
 θ_r – rezydualna wilgotność objętościowa gruntu [-].

Nieco inne podejście do opisu stanu naprężeń w gruncie zaproponowali Fredlund i in. [10], którzy przyjęli, że dwie składowe naprężeń – naprężenie netto ($\sigma_n - u_a$) oraz ssanie matrycowe ($u_a - u_w$) gruntu są niezależne z punktu widzenia ich wpływu na właściwości mechaniczne gruntu. Autorzy ci zaproponowali modyfikację opisu wytrzymałości na ścinanie gruntów nienasyconych

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \cdot \tan \phi' + (u_a - u_w) \cdot \tan \phi^b \quad (7)$$

gdzie:

ϕ^b – kąt określający wzrost wytrzymałości na ścinanie w związku ze wzrostem ciśnienia ssania,
 ϕ' – efektywny kąt tarcia wewnętrznego [°],
 c' – efektywna spójność [kPa],
 u_w – ciśnienie wody w porach gruntu [kPa],
 u_a – ciśnienie powietrza w porach gruntu [kPa].

Biorąc pod uwagę wzory (5) i (6), najprostszy warunek równowagi dla zbocza zbudowanego z gruntu nienasyconego można opisać, stosując wzór

$$FS = \frac{\operatorname{tg} \phi'}{\operatorname{tg} \beta} + \frac{S_e \cdot (u_a - u_w) \cdot \operatorname{tg} \phi' + c'}{\gamma \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (8)$$

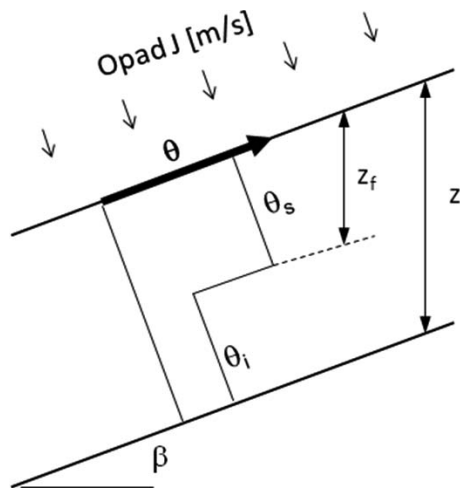
Z kolei w przypadku, gdy uwzględnimy równanie (7), współczynnik stateczności zbocza nienasyconego można zapisać następująco

$$FS = \frac{\operatorname{tg} \phi'}{\operatorname{tg} \beta} + \frac{c' + (u_a - u_w) \cdot \operatorname{tg} \phi^b}{\gamma \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (9)$$

Warunki stateczności powierzchniowych warstw zboczy są w ścisłym związku ze zjawiskami pogodowymi, a największy negatywny wpływ na ich stateczność ma woda opadowa, która infiltrując przez ośrodek gruntowy, powoduje zmianę jego uwilgotnienia, ciśnienia ssania, a tym samym prowadzi do zmiany stanu naprężeń. Dlatego też, analizując warunki równowagi zboczy, istotne znaczenie ma znajomość wartości tych parametrów oraz zakres ich zmian w czasie trwania opadów. Stosowane w praktyce metody obliczeń stateczności zintegrowanych z obliczeniami infiltracji różnią się pod względem opisu przepływu wody w strefie niepełnego nasycenia czy też sposobu obliczeń współczynników stateczności.

Tłokowe modele infiltracji

Stosunkowo prostym narzędziem opisu procesu infiltracji są modele tłokowe (rys. 1), wśród których jednym z bardziej znanych jest model Lumba. W modelu tym położenie frontu zwilżenia w trakcie trwania opadu opisane jest następującą zależnością [20]



Rys. 1. Schemat obliczeniowy infiltracji w modelu tłokowym Green-Ampt

$$z_f = \frac{k_s \cdot t}{n \cdot (S_f - S_0)} \quad (10)$$

gdzie:

- z_f – głębokość frontu zwilżania [m],
- k_s – współczynnik filtracji gruntu przy jego pełnym nasyceniu [m/s],
- t – czas trwania opadu [s],
- n – porowatość [–],
- S_f – końcowy stopień wilgotności [–],
- S_0 – początkowy stopień wilgotności [–].

Równanie to może być stosowane, gdy intensywność opadu jest większa niż wodoprzepuszczalność gruntu, natomiast w sytuacji odwrotnej Lee i in. [16] zaproponowali modyfikację modelu Lumba

$$z_f = \frac{J \cdot t}{(\theta_a - \theta_0)} \quad (11)$$

gdzie:

- J – intensywność opadu [m/s],
- t – czas trwania opadu [s],
- θ_a – średnia wilgotność objętościowa gruntu po zakończeniu opadu [–],
- θ_0 – początkowa wilgotność objętościowa gruntu [–].

Innym stosunkowo rozpowszechnionym w geologii inżynierskiej narzędziem opisu przepływu wody w ośrodku nienasyconym jest model Green-Ampt [m.in. 6, 9, 15, 24], w którym prędkość infiltracji opisana jest następującą zależnością (12)

$$f = \frac{dF}{dt} = k_s \left(\frac{\psi_f}{z_f} + 1 \right) \quad (12)$$

gdzie:

- dF/dt – zmiana akumulacji infiltracji w czasie [m/s],
- ψ_f – wysokość ciśnienia ssania gruntu u podstawy frontu zwilżania [m],
- k_s – współczynnik filtracji gruntu przy jego pełnym nasyceniu [m/s],
- z_f – głębokość frontu zwilżania [m].

W metodzie tej zakłada się, że wilgotność gruntu w całym profilu jest jednakowa (rys. 1). W kolejnym, Green i Ampt przyjęli, że w trakcie infiltracji następuje nasycenie profilu gruntowego powyżej frontu zwilżania, a ilość wody zakumulowanej w czasie trwania tego procesu można zapisać następująco:

$$F = (\theta_s - \theta_0) \cdot z_f \quad (13)$$

gdzie:

- θ_s – wilgotność objętościowa gruntu w stanie nasycenia [–],
- θ_0 – początkowa wilgotność objętościowa gruntu [–],
- z_f – głębokość frontu zwilżania [m].

Wielkość akumulacji infiltracji w trakcie trwania opadu określa się metodą kolejnych przybliżeń, stosując następujące równanie

$$F = k_s \cdot t + (\theta_s - \theta_0) \cdot \psi_f \cdot \ln \left| \frac{(\theta_s - \theta_0) \cdot \psi_f + F}{(\theta_s - \theta_0) \cdot \psi_f} \right| \quad (14)$$

Założenie modelu odnośnie nasycenia profilu gruntowego wydaje się słuszne w przypadku, gdy intensywność opadu jest większa niż wodoprzepuszczalność gruntu. Dla tego przypadku obliczenia infiltracji polegają na określeniu zmian prędkości infiltracji i jej relacji względem natężenia opadu. Szczegółowy opis metodyki obliczeń dla tego rodzaju analizy przedstawiony jest w pracy Cho i Lee [6]. Z kolei w warunkach, gdy intensywność opadu jest mniejsza niż wodoprzepuszczalność gruntu, prędkość infiltracji jest równa intensywności opadu. W takim przypadku następuje zwiększenie uwilgotnienia gruntu. Maksymalna wartość uwilgotnienia gruntu odpowiada wartości jego wodoprzepuszczalności w stanie niepełnego nasycenia, która z kolei w trakcie trwania opadu ustalonego zrównuje się z jego intensywnością [7]. W związku z tym dla określenia wartości wilgotności możliwej do uzyskania przy danej intensywności opadu niezbędna jest znajomość zależności wodoprzepuszczalności gruntu od jego wilgotności. W tym celu wykorzystuje się znajomość charakterystyki retencyjnej gruntów, a do opisu zależności ciśnienia ssania oraz wodoprzepuszczalności od wilgotności gruntu można zastosować np. równania van Genuchtena [31]

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \cdot \psi)^n]^m} \quad (15)$$

$$k_r(S_e) = \frac{[1 - (\alpha \cdot \psi^{n-1}) \cdot [1 + (\alpha \cdot \psi^n)^{-m}]^2]}{[1 + (\alpha \cdot \psi)^n]^{m/2}} \quad (16)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \cdot \psi)^n} \right]^m \quad (17)$$

gdzie:

- ψ – wysokość ciśnienia ssania [m],
- α, n, m – stałe równania ($m = 1 - 1/n$), parametr α może być wyrażany w m^{-1} ,
- S_e – znormalizowany stopień wilgotności [–],
- θ – wilgotność objętościowa gruntu [–],
- θ_r – rezydualna wilgotność objętościowa gruntu [–],
- θ_s – wilgotność objętościowa gruntu przy pełnym nasyceniu porów gruntowych [–].

Określona na podstawie obliczeń metodą Green-Ampt głębokość frontu zwilżania jest wykorzystywana w obliczeniach stateczności. W postaci klasycznej równanie na wartość współczynnika filtracji ma następującą postać [24]

$$FS = \frac{c' + (\gamma_s - \gamma_w) \cdot z_f \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \phi'}{\gamma \cdot z_f \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (18)$$

gdzie:

- β – kąt nachylenia zbocza [°],
- c' – efektywna spójność [kPa],
- ϕ' – efektywny kąt tarcia wewnętrznego [°],
- γ_s – ciężar objętościowy gruntu przy pełnym nasyceniu porów wodą [kN/m³],
- γ_w – ciężar objętościowy wody [kN/m³],
- z_f – głębokość frontu zwilżania [m].

Powyższe równanie można zastosować w przypadku rozważań warunków równowagi gruntów nasyconych, natomiast analizując warunki stateczności ośrodków nienasyconego, bardziej odpowiednia będzie formuła stosowana w pracach Collinsa i Znidarcica [8] oraz Tsai i in. [29]

$$FS = \frac{\text{tg } \phi'}{\text{tg } \beta} + \frac{c' - \gamma_w \cdot \psi \cdot \text{tg } \phi^b - \gamma_w \cdot h \cdot \text{tg } \phi'}{\gamma \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (19)$$

gdzie:

h – wysokość ciśnienia porowego [m],

ϕ' – efektywny kąt tarcia wewnętrznego [°],

c' – efektywna spójność [kPa],

β – kąt nachylenia zbocza [°],

ψ – wysokość ciśnienia ssania [m],

z – głębokość [m],

ϕ^b – kąt określający wzrost wytrzymałości na ścinanie w związku ze wzrostem ciśnienia ssania.

W równaniu tym wysokość ciśnienia ssania ψ przyjmowana jest jako ujemna w stosunku do wysokości ciśnienia porowego. Człon równania $\gamma_w \cdot \psi \cdot \text{tg } \phi^b$ stanowi komponent odpowiedzialny za przyrost wytrzymałości gruntu na ścinanie związany z działaniem ciśnienia ssania i zgodnie z propozycją Vanapalli i Fredlunda [30] czy też Lu i Likosa [18] może być zastąpiony poprzez iloczyn $\gamma_w \cdot \psi \cdot \text{tg } \phi'$. Parametr Bishopa χ utożsamiany bywa w literaturze ze stopniem uwilgotnienia gruntu i w związku z tym autor proponuje modyfikację równania (19) do następującej postaci:

$$FS = \frac{\text{tg } \phi'}{\text{tg } \beta} + \frac{c' - \gamma_w \cdot \psi \cdot S_e \cdot \text{tg } \phi' - \gamma_w \cdot h \cdot \text{tg } \phi'}{\gamma \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (20)$$

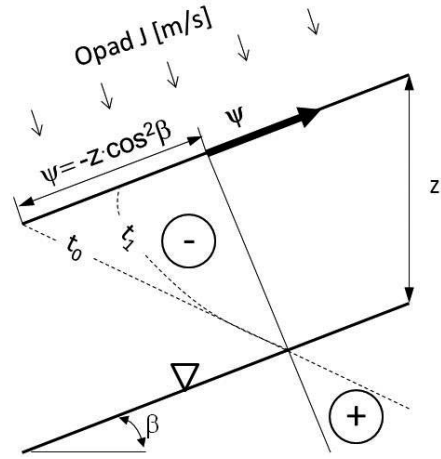
Należy podkreślić, że powyższe równanie można stosować zarówno do ośrodków nienasyconych, jak i nasyconych. Rozważając stateczność zboczy w strefie nasyconej, należy wartość wysokości ciśnienia ssania przyjąć jako równą zero, natomiast prowadząc obliczenia stateczności w strefie nienasyconej, pomijają się człon równania związany z wysokością ciśnienia porowego.

Model Lumba oraz Green-Ampt dają takie same rezultaty dla warunków infiltracji przy niepełnym nasyceniu, natomiast różnią się one w przypadku, gdy występują warunki infiltracji wymuszonej i zatopionej, tzn. gdy intensywność opadu przewyższa wodoprzepuszczalność gruntu.

Model Iversona

Nieco inaczej przepływ wody w gruncie rozpatruje Iverson [14] (rys. 2), gdzie proces infiltracji analizowany jest pod kątem zmian ciśnienia ssania/porowego w profilu gruntowym. W celu uproszczenia toku obliczeń Iverson sprowadził jednowymiarowe równanie infiltracji Richardsa do postaci liniowej, a zakres zmian wartości wysokości ciśnienia ssania/ciśnienia porowego w profilu gruntowym wywołany opadem deszczu w dowolnym czasie t na głębokości z opisał następującymi równaniami:

$$\begin{aligned} \psi(z, t \leq T) &= (z - d) \cdot \cos^2 \beta + \\ &+ \frac{J}{k_s} \left[\left(\frac{4 \cdot D \cdot \cos^2 \beta \cdot t}{\pi} \right)^{1/2} \cdot \exp \left(- \frac{z}{4 \cdot D \cdot \cos^2 \beta \cdot t} \right) - \right. \\ &\left. - z \cdot \text{erfc} \left(\frac{z^2}{4 \cdot D \cdot \cos^2 \beta \cdot t} \right)^{1/2} \right] \end{aligned} \quad (21)$$



Rys. 2. Schemat ideowy modelu Iversona

$$\begin{aligned} \psi(z, t > T) &= \psi(z, t \leq T) + \\ &+ \frac{J}{k_s} \left[\left(\frac{4 \cdot D \cdot \cos^2 \beta \cdot (t - T)}{\pi} \right)^{1/2} \cdot \exp \left(- \frac{z}{4 \cdot D \cdot \cos^2 \beta \cdot (t - T)} \right) - \right. \\ &\left. - z \cdot \text{erfc} \left(\frac{z^2}{4 \cdot D \cdot \cos^2 \beta \cdot (t - T)} \right)^{1/2} \right] \end{aligned} \quad (22)$$

gdzie:

z – głębokość mierzona od powierzchni terenu [m],

T – czas trwania opadu [s],

t – czas odniesiony do momentu rozpoczęcia opadu [s],

d – głębokość położenia zwierciadła wody gruntowej [m],

D – efektywna dyfuzyjność hydrauliczna gruntu, określana na podstawie formuły

$$D = 4 \cdot D_0 \cdot \cos^2 \beta = 4 \cdot \frac{k_s}{C_0} \cdot \cos^2 \beta$$

C_0 – minimalna wartość różniczkowej pojemności wodnej gruntu

$$C_0 = \min C(\psi) = \min \frac{d\theta}{d\psi}$$

erfc – uzupełniająca funkcja błędów.

Współczynnik stateczności według Iversona określa się na podstawie następującego wzoru

$$FS = \frac{\text{tg } \phi'}{\text{tg } \beta} + \frac{c' - \gamma_w \cdot \psi(z, t) \cdot \text{tg } \phi'}{\gamma \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (23)$$

gdzie:

ϕ' – efektywny kąt tarcia wewnętrznego [°],

c' – efektywna spójność [kPa],

β – kąt nachylenia zbocza [°],

ψ – wysokość ciśnienia ssania [m],

z – głębokość [m].

Równanie (23) stanowi modyfikację wzoru (19), a różnica pomiędzy nimi polega na tym, że Iverson przyjmuje $\phi' = \phi^b$. W równaniu tym wielkość ψ może odpowiadać zarówno wielkości ciśnienia porowego, jak wielkości ciśnienia ssania, przy czym w drugim przypadku przyjmuje ona wartości ujemne. Jak podają Baum i in. [1] model Iversona może być wykorzystywany do obliczeń stateczności zboczy o nachyleniu nieprzekraczającym 60°. Typowy zakres zastosowania modelu Iversona, w przypadku gdy iloraz J/k_s zawiera się w przedziale $<0; 1>$. Z kolei, gdy iloraz ten jest większy od 1,0 Iverson [14] zaleca, aby przyjmować go równym jedności.

Model Lu-Godt

Inny sposób opisu wpływu procesu infiltracji na rozkład ciśnienia ssania w profilu gruntowym przedstawiony jest w pracy Lu i Griffithsa [17]. Autorzy ci uzależniają wartości ciśnienia ssania w gruncie od intensywności zasilania go wodą opadową, przy czym wyniki swych obliczeń odnoszą do warunków panujących w końcowej fazie długotrwałego opadu. Analizując przepływ przez grunt nienasycony, oparli się oni na równaniu analogicznym do stosowanego w modelu Green-Ampta

$$f = J = -k(\theta) \cdot \left[\frac{d\psi}{\gamma_w dz} + 1 \right] \quad (24)$$

Lu i Griffiths [17] dodatkowo uwzględnili zależność pomiędzy wodoprzepuszczalnością gruntu nienasyconego a wielkością wysokości ciśnienia ssania, a dla opisu tej zależności wykorzystali funkcję Gardnera [11]

$$k(\theta) = k_s \cdot \exp(-\alpha\psi) \quad (25)$$

Po podstawieniu równania (14) do (15) i odpowiednich przekształceniach uzyskano formułę opisującą profil ciśnienia ssania w gruncie

$$(u_a - u_w) = \frac{-1}{\alpha} \cdot \ln \left[\left(1 + \frac{J}{k_s} \right) \cdot \exp(-\alpha \cdot \gamma_w \cdot z) - \frac{J}{k_s} \right] \quad (26)$$

We wzorze tym poziom odniesienia stanowi zwierciadło wody gruntowej i w związku z tym w celu uniknięcia konfliktu oznaczeń parametr ten będzie oznaczany w dalszej części referatu jako zw. W przypadku gdy intensywność opadu jest równa lub większa od wodoprzepuszczalności gruntu wartość ciśnienia ssania w całym profilu przybiera wartość zero.

Na podstawie znajomości profilu ciśnienia ssania określa się wartość naprężeń związanych z działaniem sił ssania

$$S_e \cdot (u_a - u_w) = \frac{1}{\alpha} \frac{\ln \left[\left(1 + \frac{J}{k_s} \right) \cdot \exp(-\gamma_w \cdot \alpha \cdot zw) - \frac{J}{k_s} \right]}{\left[1 + \left\{ -\ln \left[\left(1 + \frac{J}{k_s} \right) \cdot \exp(-\gamma_w \cdot \alpha \cdot zw) - \frac{J}{k_s} \right] \right\}^n \right]^m} \quad (27)$$

W innej pracy Lu i Godt [19] zaproponowali wykorzystanie powyższej zależności do określenia współczynnika stateczności:

$$FS = \frac{c' + (\gamma \cdot z \cdot \cos^2 \beta - S_e \cdot (u_a - u_w)) \cdot \tan \phi'}{\gamma \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (28)$$

Mimo że sposób obliczeń stateczności w metodzie Lu-Godta jest bardzo podobny do stosowanego przez Iversona, to występują pewne różnice i dotyczą one przede wszystkim sposobu określania kształtu profilu ciśnienia ssącego oraz sposobu określania stanu naprężeń w gruncie nienasyconym. W obu modelach istotny wpływ na wyniki obliczeń ma początkowe położenie zwierciadła wody gruntowej.

METODYKA OBLICZEŃ

Obliczenia infiltracji i stateczności wykonano w dwóch etapach. W każdym z etapów obliczeń analizowano stateczność powierzchniowej warstwy jednorodnego zbocza o nachyleniu 35°, przyjmując, że poziom zwierciadła wody gruntowej znajduje się 2 m p.p.t. W każdym przypadku do obliczeń przyjmowano te same wartości efektywnego kąta tarcia wewnętrznego i spójności gruntu, odpowiednio: $\phi' = 33^\circ$ i $c' = 3$ kPa. W celu doboru parametrów równania van Genuchtena założono, że wartości współczynników filtracji 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} i 10^{-8} m/s odpowiadają odpowiednio piaskom pylastym, pyłom piaszczystym, glinom oraz glinom pylastym. W związku z tym na podstawie składu granulometrycznego tego rodzaju gruntów za pomocą programu RetC wygenerowano wartości parametrów równania van Genuchtena. Parametry fizyczne gruntów: gęstość objętościowa i wilgotność naturalna w pierwszym i drugim etapie obliczeń przyjęto w sposób arbitralny tak, aby wszystkie analizowane grunty posiadały zbliżoną porowatość, a ich początkowa wilgotność odpowiadała wartości ciśnienia ssania równej 100 cm słupa wody. Z kolei wartości ciśnienia ssania, wykorzystywane w modelu Green-Ampta, dla każdego z gruntów określono według formuły podanej w pracy Morel-Seytoux i Khanji [22]

Tabl. 1. Parametry fizyczne gruntów użyte do obliczeń

Parametry	Rodzaj gruntu według PN-86/B-02480			
	Piasek pylasty	Pył piaszczysty	Gлина	Gлина pylasta
Gęstość objętościowa [g/cm³]	1,77	1,96	1,97	2,01
Wilgotność naturalna [%]	8,9	18,6	19,0	21,3
Gęstość właściwa [g/cm³]	2,65	2,66	2,67	2,68
Stopień wilgotności [-]	0,37	0,81	0,82	0,92
Wysokość ciśnienia ssania w podstawie frontu zwilżenia ψ_f [cm]	0,063	0,207	0,184	0,451
Parametry równania van Genuchtena [1980]				
θ_r [-]	0,034	0,041	0,071	0,058
θ_s [-]	0,385	0,379	0,381	0,383
α [cm ⁻¹]	0,0495	0,0100	0,0106	0,0047
n [-]	1,7106	1,5230	1,4922	1,6784

$$\psi_f = \int_0^{\psi_n} k_r d\psi \quad (29)$$

gdzie:

ψ_n – ciśnienia ssania przy początkowej wilgotności gruntu.

W pierwszym etapie obliczeń analizowano warunki stateczności zbocza poddanego opadowi o wysokości 200 mm i czasie trwania 30, 20 oraz 10 dób. Podana wartość opadu występująca w okresie 30 dób stanowi podawaną w pracy Gil i Długosza [12] progową wartość opadu potrzebną do uaktywnienia płytkich osuwisk. Celem tych obliczeń jest określenie wpływu długotrwałych opadów o niskiej intensywności (opadów rozlewnych) na kształtowanie się stateczności zbocza oraz porównanie wyników obliczeń infiltracji określonych z wykorzystaniem modeli Green-Ampta, Iversona i Lu-Godta. W przypadku tych obliczeń intensywność opadów wynosiła $7,7 \cdot 10^{-8} \div 2,3 \cdot 10^{-7}$ m/s, a więc warunki przepływu w strefie aeracji, w większości rozpatrywanych przypadków, odpowiadały tzw. infiltracji przy niepełnym nasyceniu [28].

W drugim etapie obliczeń analizowano wpływ nawałnych opadów na stateczność zbocza, przy czym obliczenia współczynników stateczności przeprowadzono dla warstwy gruntu do głębokości 1,0 m p.p.t. Do obliczeń przyjęto dwa warianty czasu trwania opadu (4 i 12 godzin) oraz trzy warianty wielkości opadu (48, 96 i 144 mm). Wyniki prac Cebulak [3, 4, 5] opierające się na trzydziestoletniej serii pomiarowej wskazują, że w dorzeczu górnej Wisły, obejmującej również region karpacki, maksymalne opady dobowe kształtowały się w latach 1951-1980 na poziomie od 70 do 200 mm, wykazując największą częstotliwość występowania w przedziale 90 ÷ 150 mm. W przypadku tej części pracy obliczenia infiltracji wykonano stosując modele Green-Ampta i Iversona.

W celach porównawczych wykonano również numeryczne obliczenia infiltracji w programie SEEP/W dla hipotetycznego zbocza o długości 40 m. Warunki brzegowe przyjęto zgodnie z procedurą podaną w pracy Rahardjo i in. [26]. Uzyskane na podstawie obliczeń infiltracji wielkości ciśnienia ssania wykorzystano do określenia współczynników stateczności, korzystając z wzoru (23).

WYNIKI OBLICZEŃ I ICH ANALIZA

Wpływ opadów rozlewnych na stateczność zbocza

Wyniki obliczeń kształtowania się wilgotności objętościowej w trakcie długotrwałego opadu określone na podstawie modelu Green-Ampta przedstawiono na rys. 3. Należy zwrócić uwagę, że w każdym z analizowanych przypadków w trakcie trwania opadu dochodzi do częściowego lub całkowitego nasycenia profilu gruntowego, przy czym mechanizm nasycenia ośrodka gruntowego jest zależny od czasu trwania opadu oraz stosunku natężenia opadu do wodoprzepuszczalności gruntu. W przypadku gruntów o współczynniku filtracji $10^{-5} \div 10^{-6}$ m/s oraz częściowo 10^{-7} m/s (opad 30-dniowy) iloraz ten jest mniejszy od 1,0, co odpowiada warunkom infiltracji przy niepełnym nasyceniu. W tych przypadkach, w pierwszej fazie opadu następuje przyrost wilgotności profilu do wartości, przy której wodoprzepuszczalność ośrodka nienasyconego zrównuje się z in-

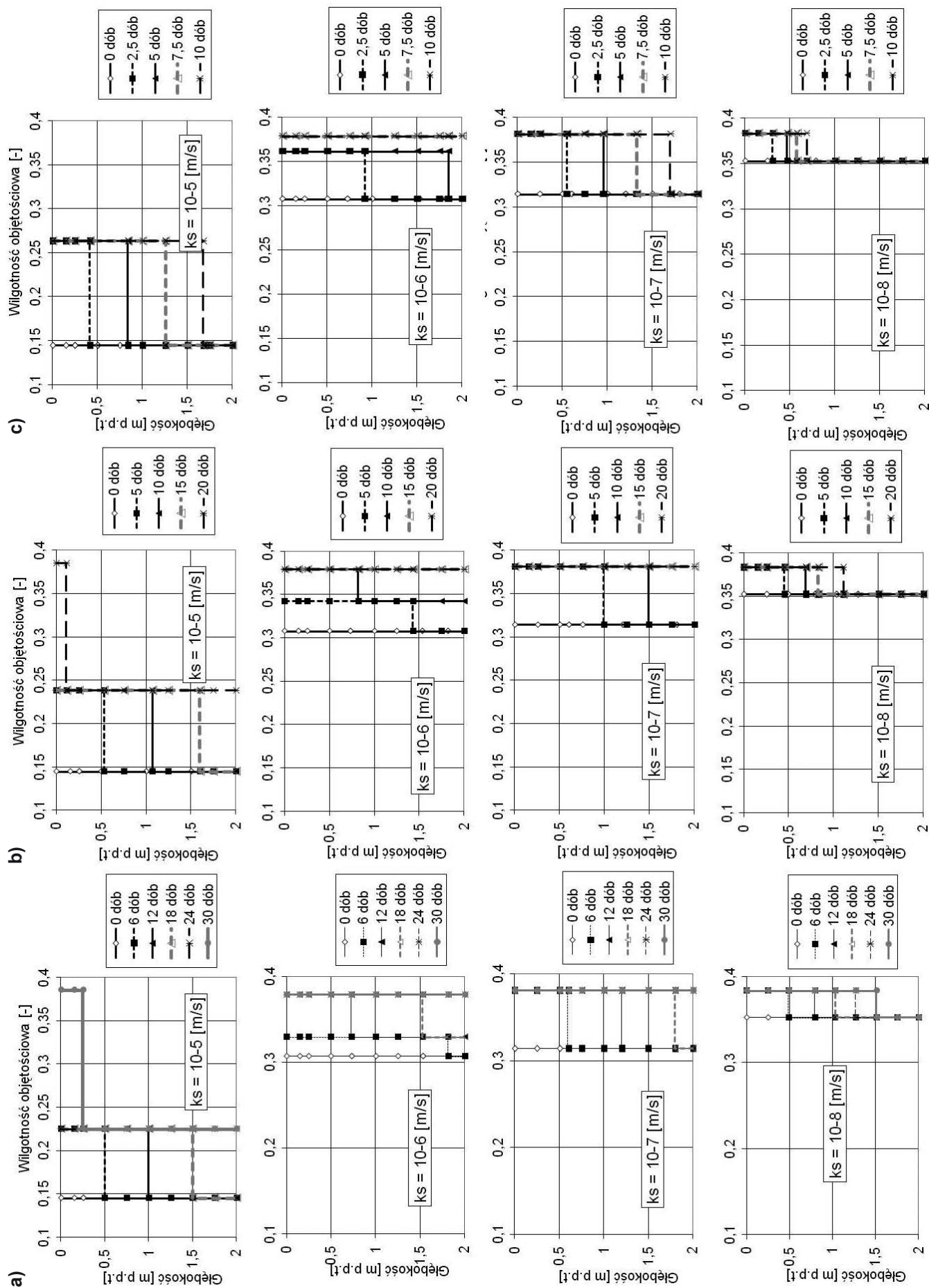
tensywnością opadu. Przyrost ten był tym większy, im mniejsza była wodoprzepuszczalność gruntów oraz im większy był iloraz intensywności opadu – wodoprzepuszczalności gruntu. Przykładowo, dla gruntu o współczynniku filtracji 10^{-5} m/s trzydziestodniowy opad powoduje w pierwszej fazie trwania opadu wzrost wilgotności gruntu odpowiadający wartości stopnia wilgotności $S_e = 0,54$, a dla gruntu o współczynniku filtracji 10^{-6} m/s ten sam opad spowodował początkowe zwiększenie wilgotności gruntu odpowiadające wartości $S_e = 0,85$. Z kolei w drugiej fazie trwania opadu następuje nasycenie profilu gruntowego. W przypadku gruntu o wodoprzepuszczalności 10^{-8} m/s w każdym wariancie obliczeń intensywność opadu przewyższała wodoprzepuszczalność ośrodka gruntowego i w trakcie trwania opadu następowało systematyczne nasycanie profilu gruntowego.

Zasięg nasycenia profilu gruntowego w przypadku analizowanych gruntów był zróżnicowany – najmniejszą wartość osiągnął on w przypadku gruntu o współczynniku filtracji 10^{-5} m/s, a nieco większą w gruncie o wodoprzepuszczalności 10^{-8} m/s. W przypadku gruntu o największej wodoprzepuszczalności brak osiągnięcia pełnego nasycenia profilu gruntowego wynikał wyłącznie z bardzo niewielkiej początkowej jego wilgotności (dużego deficytu wody). Z kolei w przypadku gruntów o wodoprzepuszczalności 10^{-6} i 10^{-7} m/s, poza jednym przypadkiem obliczeniowym, w trakcie trwania opadu nastąpiło całkowite nasycenie profilu gruntowego.

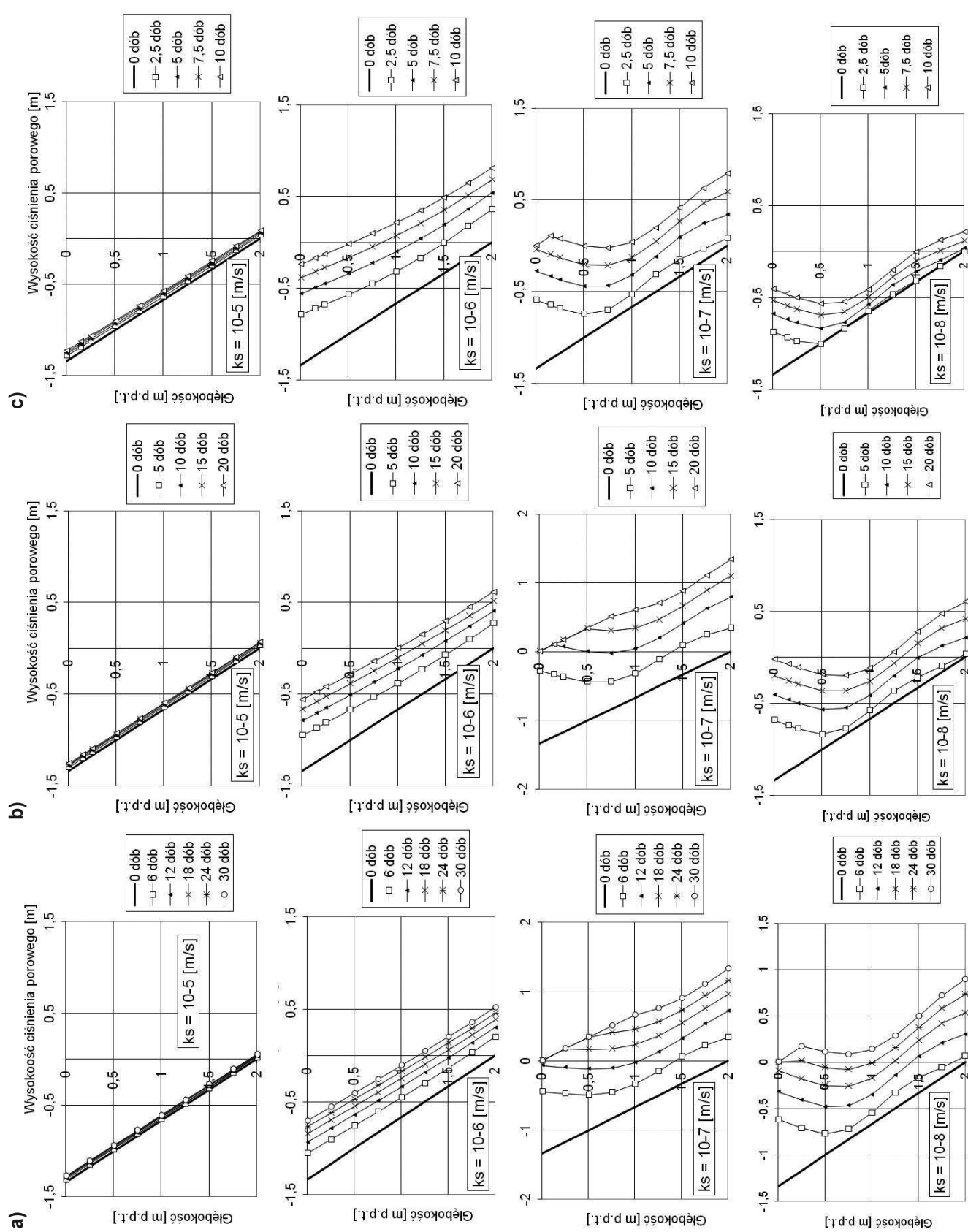
Inne wyniki obliczeń infiltracji uzyskano, stosując model Iversona (rys. 4). W przypadku gruntu o współczynniku filtracji 10^{-5} m/s długotrwały opad, niezależnie od czasu trwania i natężenia, powoduje bardzo znikome zmiany wartości wysokości ciśnienia porowego/ssania. Natomiast w przypadku gruntów o mniejszych wartościach współczynnika filtracji wpływ opadu na zmiany wysokości ciśnienia porowego był wyraźny, przy czym były one największe w przypadku gruntu o wodoprzepuszczalności 10^{-7} m/s. W przypadku gruntu o tej wodoprzepuszczalności dla każdego wariantu obliczeniowego (czasu trwania opadu) uzyskano dodatkowo wartości wysokości ciśnienia porowego w całym profilu gruntowym, które świadczą o jego nasyceniu.

Wyniki obliczeń wielkości ciśnienia ssania w profilu gruntowym uzyskane na podstawie obliczeń modelem zaproponowanym przez Lu i Griffithsa [17] przedstawiono na rys. 5a. Analizując otrzymane wyniki obliczeń, można stwierdzić, że pomimo dużych różnic właściwości hydraulicznych analizowanych gruntów, uzyskany zakres wysokości ciśnienia ssania jest bardzo zbliżony. W przypadku gruntu o współczynniku filtracji 10^{-8} m/s wartości wysokości ciśnienia ssania w całym profilu były równe zero, natomiast w przypadku gruntu o wodoprzepuszczalności 10^{-6} m/s wyniosły one maksymalnie 0,26 m.

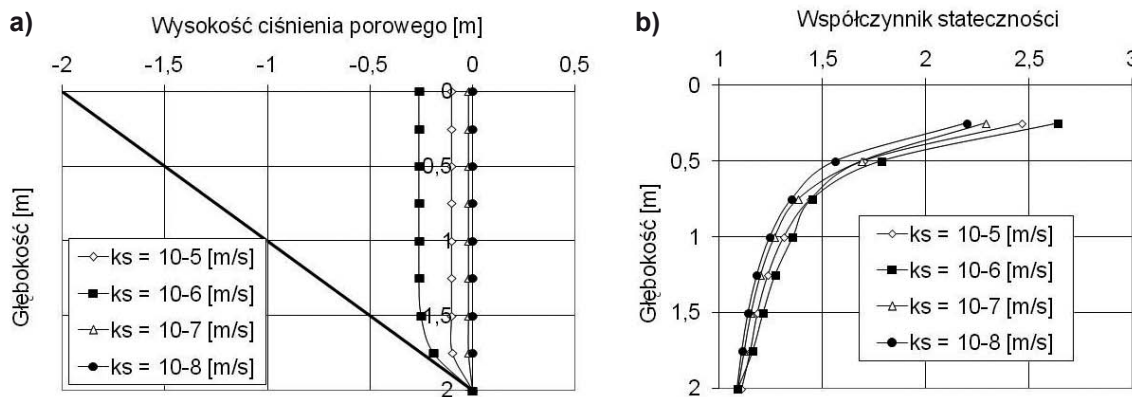
Na rys. 6 zestawiono porównawczo wartości współczynników stateczności obliczonych za pomocą modelu Lu-Godta oraz uzyskanych na podstawie obliczeń infiltracji modelami Iversona i Green-Ampta dla wariantu opadu o 30-dniowym okresie trwania. Zasadniczo największe wartości współczynnika stateczności uzyskano najczęściej stosując model Lu-Godta, przy czym w przypadku każdego z analizowanych gruntów uzyskano prawie takie same wyniki obliczeń, gdyż uwzględniały one warunki równowagi zbocza na poziomie zwierciadła wody gruntowej. Znacznie mniejsze wartości współczynników stateczności uzyskano pozostałymi metodami. Różnica ta wynika przede wszystkim z założeń modelu Lu-Godta, który zasadniczo ma



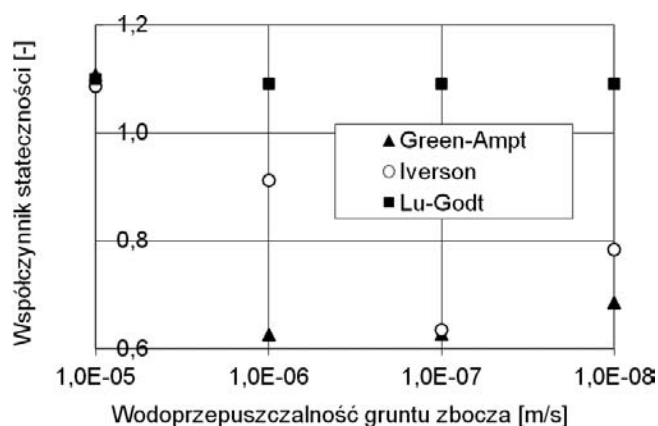
Rys. 3. Zależność zmian wilgotności objętościowej określonych na podstawie modelu Green-Ampt od wodoprzepuszczalności gruntów zbrocza w trakcie trwania 30 (a), 20 (b) i 10 dni (c)



Rys. 4. Zależność zmian wysokości ciśnienia porowego określonych na podstawie modelu Iversona od wodoprzepuszczalności gruntów zbocza dla opadów o czasie trwania 30 (a), 20 (b) i 10 dni (c)



Rys. 5. Zależność rozkładu wartości wysokości ciśnienia porowego i współczynników stateczności od wodoprzepuszczalności gruntów zbocza według obliczeń modelem Lu-Godta



Rys. 6. Zależność minimalnych wartości współczynników stateczności od wodoprzepuszczalności gruntów zbocza dla opadu 30-dniowego

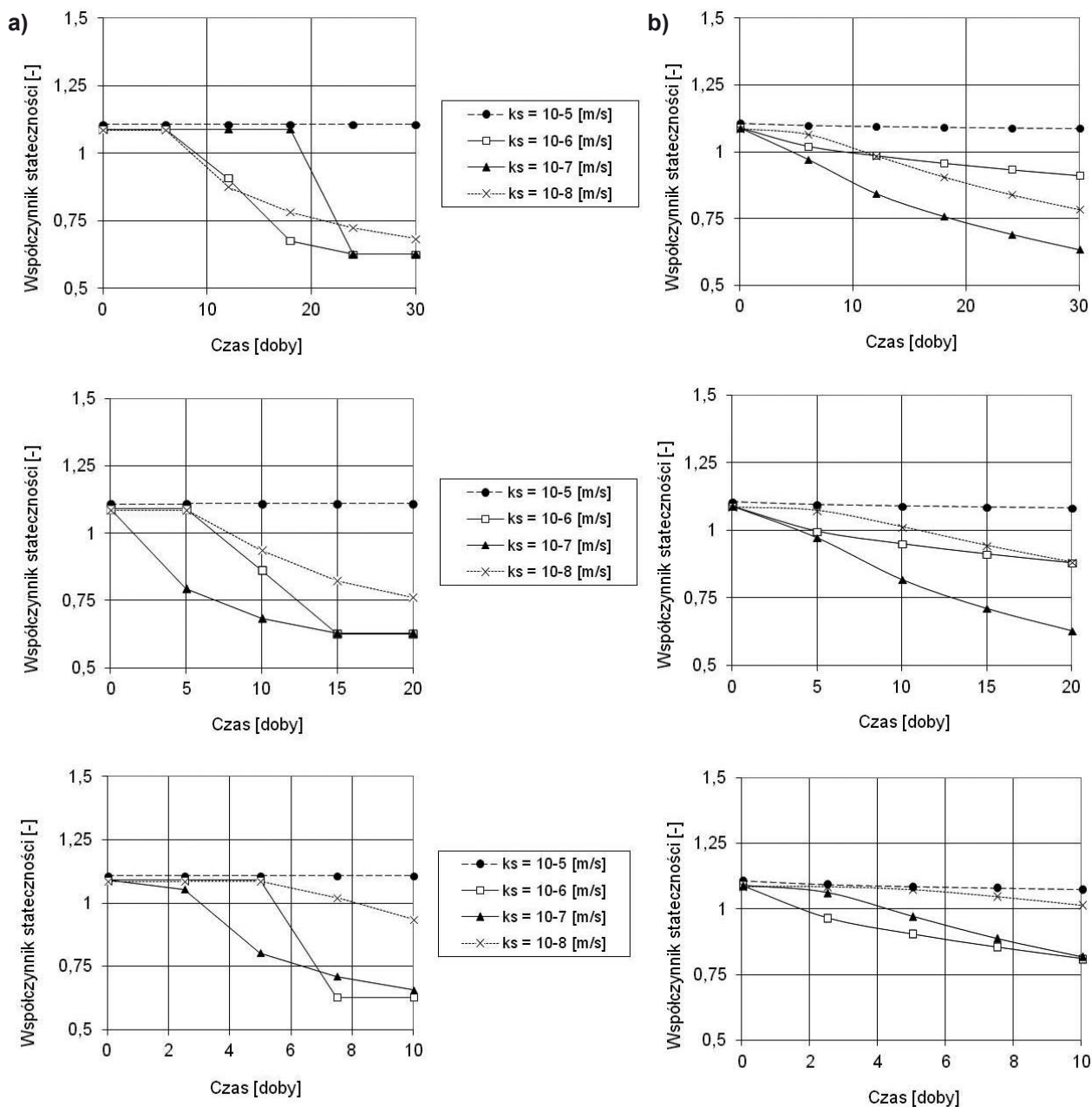
na celu określenie rozkładu wielkości ciśnienia ssania w profilu gruntowym w warunkach infiltracji przy niepełnym nasyceniu, a nie służy do określania zmian poziomu wody gruntowej.

Na rys. 7 przedstawiono wartości współczynników stateczności uzyskanych w oparciu o wyniki obliczeń infiltracji Green-Ampta i Iversona, które uwzględniają zmiany stateczności zbocza w trakcie trwania 10; 20 oraz 30-dniowego opadu. Porównując otrzymane wyniki obliczeń można stwierdzić, że były one zależne nie tylko od zastosowanej metody obliczeń, ale również od współczynnika filtracji gruntów i czasu trwania opadu. W przypadku gruntu o wodoprzepuszczalności 10^{-5} m/s wyniki obliczeń stateczności oboma metodami wykazały zgodnie, że opady o założonej intensywności nie powodują istotnych zmian stateczności zbocza. Ogólnie wyniki obliczeń stateczności przeprowadzonych w oparciu o wyniki obliczeń metodą Green-Ampta wykazały, że najbardziej intensywne zmiany współczynnika stateczności wykazuje grunt o współczynniku filtracji 10^{-7} m/s (warianty opadów 10 i 20 dniowe) bądź 10^{-8} m/s (dla opadu 30-dniowego). W każdym z tych przypadków w trakcie trwania opadów dochodziło do zatopienia powierzchni (infiltracji zatopiona), co powodowało, że grunt znajdujący się bezpośrednio pod powierzchnią terenu był nasycony i tworzył zawieszone zwierciadło wody, powodując tym samym wzbudzenie działania sił ciśnienia spływowego, co jest zgodne z opisem procesu infiltracji podanym w pracach m.in. Pradela i Raada [24] czy też Rahardjo i in. [26]. Wyniki obliczeń stateczności metodą

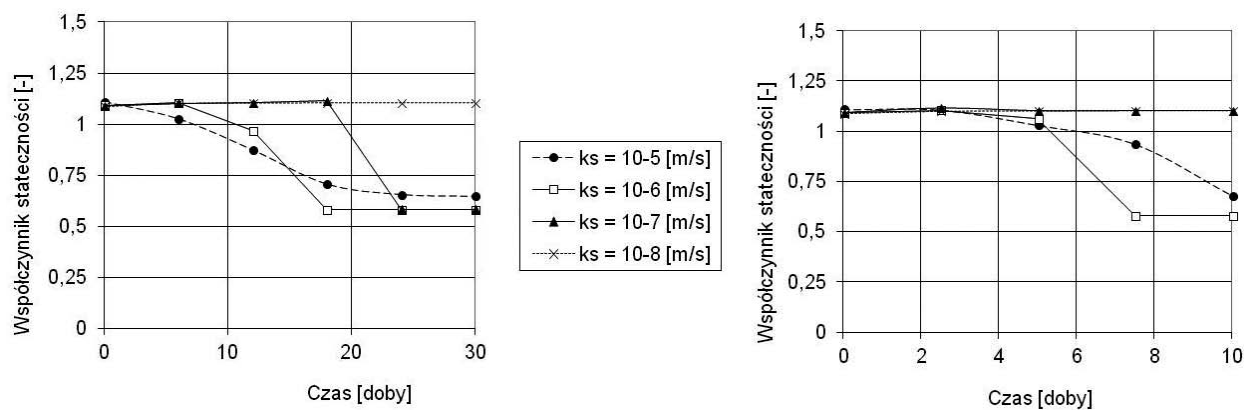
Iversona (rys. 7b) wykazały, że najbardziej intensywne zmiany wartości współczynników stateczności otrzymano w przypadku gruntu o współczynniku filtracji 10^{-7} m/s (opady 20 i 30-dniowe) bądź 10^{-6} m/s (opadu 10-dniowy).

Porównując wyniki obliczeń stateczności opartych o model infiltracji Green-Ampta oraz Iversona (rys. 7a i b), można stwierdzić, że o ile początkowe i końcowe wartości współczynników stateczności są w wielu przypadkach zbliżone, o tyle sam przebieg zmian wartości tych parametrów jest bardzo różny. W przypadku obu modeli początkowa globalna wartość współczynnika stateczności odpowiada głębokości gruntu odpowiadającej położeniu zwierciadła wody gruntowej, gdzie wartość ciśnienia ssania wynosi zero. Z kolei przebieg zmian wartości współczynników stateczności w przypadku modelu Iversona jest zbliżony do liniowego, natomiast w modelu Green-Ampta jest dużo bardziej zróżnicowany. Przyjmując za poziom odniesienia wartość współczynnika stateczności $FS = 1,0$, można stwierdzić, że z reguły krótszy czas jej osiągnięcia otrzymano stosując metodę Iversona (por. rys. 7). Natomiast analizując czas potrzebny do uzyskania współczynnika stateczności $FS = 0,80$, można zauważyć, że bardziej niekorzystne rezultaty dają obliczenia stateczności oparte na modelu infiltracji Green-Ampta. Otrzymane różnice wyników obliczeń stateczności oboma metodami wynikają w dużym stopniu z założeń obliczeniowych, które dotyczą przede wszystkim rozkładu ciśnienia ssania w profilu gruntowym. Według modelu Green-Ampta wilgotność gruntu w profilu gruntowym powyżej zwierciadła wody jest jednakowa (stała), tym samym wartości ciśnienia ssania są również jednakowe. Z kolei w modelu Iversona wartości ciśnienia ssania w profilu gruntowym zmieniają się liniowo, malejąc wraz ze wzrostem głębokości i osiągając zerową wartość na poziomie zwierciadła wody gruntowej.

Na rys. 8 przedstawiono wyniki obliczeń stateczności otrzymanych w oparciu o numeryczne obliczenia infiltracji. Porównując wyniki obliczeń dla wariantu opadu o czasie trwania 30 dni, można stwierdzić, że w przypadku gruntów o współczynnikach filtracji 10^{-7} i 10^{-6} m/s uzyskany zakres zmian wartości współczynników stateczności jest niemal identyczny z uzyskanym z obliczeń stateczności opartych na obliczeniach infiltracji modelem Green-Ampta. Podobną zależność otrzymano również dla wariantu opadu 10-dniowego dla gruntu o wodoprzepuszczalności 10^{-6} m/s. W pozostałych przypadkach obliczeniowych wyniki obliczeń stateczności uzyskane na podstawie obliczeń infiltra-



Rys. 7. Zależność wartości współczynnika stateczności w czasie długotrwałych opadów od wodoprzepuszczalności gruntów zbocza określonych na podstawie obliczeń infiltracji modelami Green-Ampt (a), i Iversona (b)



Rys. 8. Zależność wartości współczynnika stateczności w czasie długotrwałych opadów od wodoprzepuszczalności zbocza określonych na podstawie obliczeń numerycznych

cji metodami analitycznymi i numeryczną różniły się znacząco. W przypadku gruntu o współczynniku filtracji 10^{-8} m/s mniejsze wartości współczynników stateczności otrzymano opierając się o wyniki obliczeń infiltracji modelami analitycznymi, natomiast dla gruntu 10^{-5} m/s bardziej niekorzystne wyniki obliczeń stateczności uzyskano z obliczeń numerycznych.

Wpływ opadów nawaalnych na stateczność zbocza

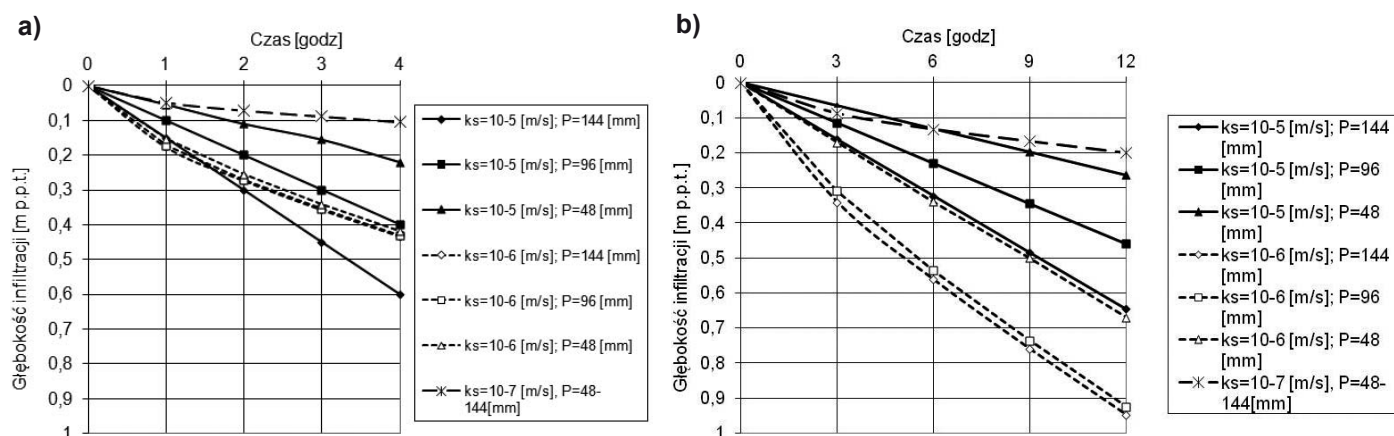
Na rys. 9 przedstawiono zmiany położenia frontu zwilżenia w trakcie trwania 4 i 12-godzinny opadu, które określono na podstawie obliczeń z wykorzystaniem modelu Green-Ampt. W przypadku opadu o czasie trwania 4 godziny (rys. 9a) maksymalny zasięg oddziaływania procesu infiltracji w profilu gruntowym wyniósł 0,6 m p.p.t. i dotyczył on gruntu o współczynniku filtracji 10^{-5} m/s poddanego opadowi o intensywności 0,6 mm/min. Należy zwrócić uwagę, że w przypadku gruntu o podanej powyżej wodoprzepuszczalności przebieg procesu infiltracji był istotnie związany z intensywnością opadu, tzn. im mniejsza jego intensywność, tym mniejsza głębokość infiltracji wód opadowych. Zależność ta miała charakter liniowy i wynikała z faktu, że infiltracja wody opadowej w tym gruncie odpowiadała warunkom przepływu przy niepełnym nasyceniu. Inny przebieg procesu infiltracji określono w przypadku gruntu o współczynniku filtracji 10^{-6} m/s, w którym warunki przepływu wód opadowych w strefie nienasyconej odpowiadały infiltracji wymuszonej i zatopionej. W każdym wariancie obliczeniowym intensywność opadu była większa od współczynnika filtracji, który był większy od 1, a niewielkie różnice w położeniu frontu zwilżenia związane były przede wszystkim z momentem zatopienia powierzchni terenu. Najmniej intensywny przebieg procesu infiltracji wykazał grunt o wodoprzepuszczalności 10^{-8} m/s, w przypadku którego zasięg frontu zwilżenia nie przekroczył głębokości 0,1 m p.p.t. Z kolei w przypadku gruntu o współczynniku filtracji 10^{-7} m/s maksymalny zasięg infiltracji wyniósł około 0,1 m p.p.t.

Wyniki obliczeń infiltracji dla 12-godzinny opadu (rys. 9b) wykazały, że najbardziej intensywnie proces ten zachodzi w gruncie o współczynniku filtracji 10^{-6} m/s. Położenie frontu zwilżenia w końcowej fazie opadu, zależnie od jego intensywności, wyniosło $0,67 \div 0,95$ m p.p.t. Najmniejszą głębokość infiltracji uzyskano dla wariantu obliczeniowego opadu o wielkości

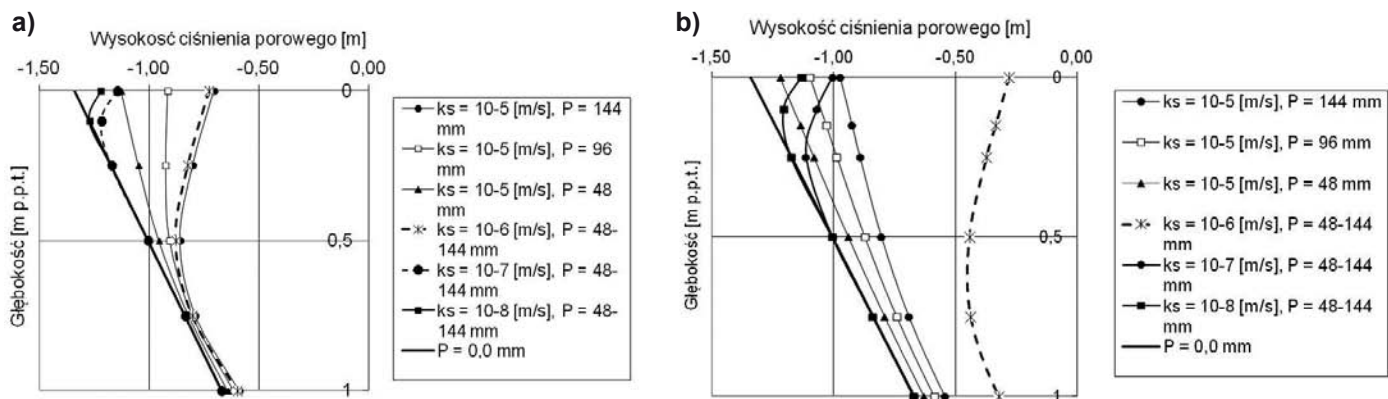
48 mm, którego intensywność ($1,11 \cdot 10^{-6}$ m/s) była nieznacznie większa niż wodoprzepuszczalność gruntu, a warunki przepływu wody opadowej w profilu odpowiadały infiltracji wymuszonej. W przypadku wariantów opadu o wysokości 96 i 144 mm jego intensywność była znacznie większa niż wodoprzepuszczalność gruntu i już w początkowej fazie opadu doszło do zatopienia powierzchni terenu. Z kolei w przypadku gruntu o współczynniku filtracji 10^{-5} m/s końcowa głębokość frontu zwilżenia mieściła się w zakresie wartości $0,26 \div 0,65$ m p.p.t. i podobnie jak w przypadku gruntu o współczynniku filtracji 10^{-6} m/s była ona zależna od wielkości opadu, tzn. przy większym opadzie uzyskano większy zasięg frontu zwilżenia. Należy zaznaczyć, że dla gruntu o współczynniku filtracji 10^{-5} m/s warunki przepływu wody dla wariantu opadów o wysokości 48 i 96 mm odpowiadały infiltracji przy niepełnym nasyceniu. Z kolei w przypadku gruntów o wodoprzepuszczalności 10^{-7} i 10^{-8} m/s warunki infiltracji niezależnie od wielkości opadu odpowiadały infiltracji zatopionej, a maksymalny zasięg oddziaływania infiltracji wyniósł odpowiednio 0,20 i 0,13 m p.p.t.

Wyniki obliczeń infiltracji z wykorzystaniem modelu Iversona dla 4-godzinny opadu wykazały podobną zależność odnośnie zasięgu oddziaływania wód opadowych (rys. 10a) jak wyniki obliczeń uzyskanych za pomocą modelu Green-Ampt. Maksymalny zasięg oddziaływania wód infiltracyjnych na zmianę wartości wysokości ciśnienia ssania/porowego w przypadku gruntów o wodoprzepuszczalności rzędu $10^{-6} \div 10^{-5}$ m/s wyniósł około 0,6 m, natomiast w przypadkach gruntów o mniejszej przepuszczalności ($10^{-8} \div 10^{-7}$ m/s) ograniczył się on do głębokości 0,1 m p.p.t. Z kolei w przypadku opadu o dłuższym czasie trwania (rys. 10b) wyniki obliczeń infiltracji uzyskane modelem Iversona były nieco inne niż otrzymano z modelu Green-Ampt. Dla gruntu o współczynniku filtracji 10^{-6} m/s w trakcie trwania opadu nastąpiła całkowita redukcja ciśnienia ssania praktycznie w całym profilu gruntowym, a największy zakres jego zmian otrzymano w powierzchniowej warstwie gruntu sięgającej do głębokości około 0,5 m p.p.t. Z kolei w przypadku gruntu o wodoprzepuszczalności 10^{-6} m/s zakres zmian ciśnienia ssania był niewielki, ale objął on cały profil gruntowy.

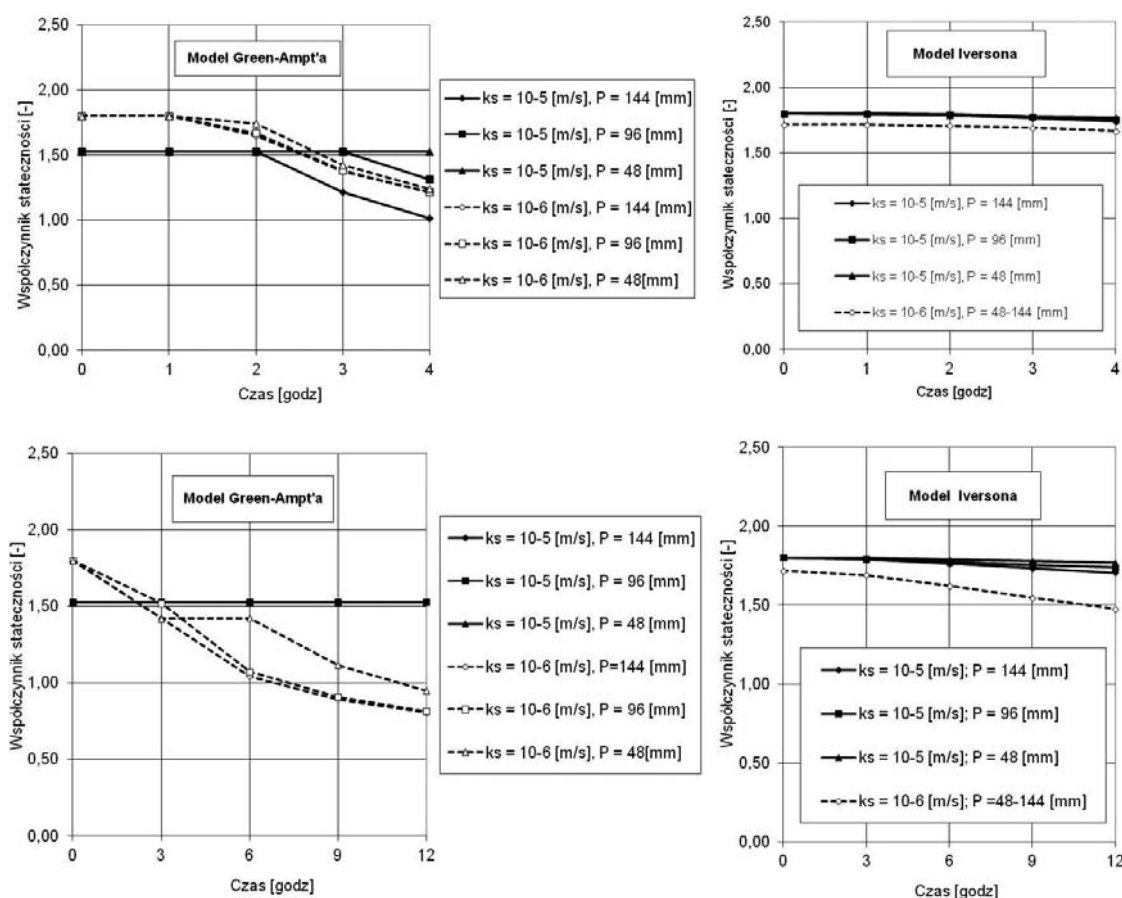
Na rys. 11 przedstawiono wyniki obliczeń współczynników stateczności bazujących na obliczeniach infiltracji modelami Green-Ampt oraz Iversona. W analizie pominięto obliczenia współczynników stateczności dla gruntów o współczynnikach filtracji 10^{-8} i 10^{-7} m/s, dla których efektywny zasięg oddziały-



Rys. 9. Zależność położenia frontu zwilżenia według modelu Green-Ampt w zależności od wodoprzepuszczalności gruntów, czasu trwania i wielkości opadu



Rys. 10. Zależność zmian ciśnienia porowego według modelu Iversona w zależności od wodoprzepuszczalności gruntów i wielkości opadu w trakcie trwania opadu 4-godzinnego (a) i 12-godzinnego (b)



Rys. 11. Zależność wartości współczynników stateczności w czasie trwania 4 i 12-godzinnego opadu uzyskanych na podstawie modelu infiltracji Green-Ampt'a i Iversona

wania procesu infiltracji był niewielki i nie miał wpływu na wyniki obliczeń. Wyniki obliczeń stateczności opartych o obliczenia infiltracji modelem Green-Ampt'a wykazały, że przypadku gruntu o współczynniku filtracji 10^{-5} m/s istotny wpływ na wartości współczynników stateczności miał czas opadu, z którym związana była jego intensywność. W przypadku opadu o czasie trwania 4 godziny największy wpływ na zmiany współczynnika stateczności miał opad o wysokości 144 mm (intensywność 10^{-5} m/s), a najmniejszy opad o wysokości 48 mm (intensywność opadu $3,33 \cdot 10^{-6}$ m/s). Z kolei w przypadku opadu o czasie trwania 12 godzin jego intensywność, niezależnie od wysokości opadu, była znacząco mniejsza niż wodoprzepuszczalność

gruntu i w związku z tym opady te nie spowodowały istotnych zmian stateczności zbocza. W przypadku gruntu o współczynniku filtracji 10^{-6} m/s dla warunków opadu o czasie trwania 4, jak i 12 godzin uzyskano znaczące zmiany współczynnika stateczności zbocza.

Z kolei obliczenia stateczności przeprowadzone z wykorzystaniem modelu Iversona wykazały, że zakres zmian współczynników stateczności w trakcie trwania opadu jest znacznie mniejszy, niż uzyskano z obliczeń opartych o obliczenia modelu infiltracji Green-Ampt'a. Ponadto zauważalne jest, że większe wartości współczynników stateczności otrzymano stosując model Iversona. Różnice wyników obliczeń stateczności opar-

tych o obliczenia infiltracji modelem Green-Ampta i Iversona, podobnie jak w przypadku wcześniejszych obliczeń, wynikają z założeń metod obliczeniowych procesu infiltracji. W modelu Green-Ampta wyróżnia się zasadniczo dwa przypadki infiltracji zależne od relacji intensywność opadu-współczynnik filtracji gruntu. Gdy iloraz ten jest mniejszy od 1,0, infiltracja powoduje częściowe nasycenie gruntów i wtedy wytrzymałość gruntu zależy znacząco od sił związanych z ciśnieniem ssania. Taki przypadek odpowiadał warunkom przepływu rozpatrywanym dla gruntu o współczynniku filtracji 10^{-5} m/s. Z kolei gdy stosunek intensywność opadu-wodoprzepuszczalność gruntu jest większy od 1,0, jak w przypadku gruntu o współczynniku filtracji 10^{-6} m/s, warunki przepływu w nienasyconym gruncie odpowiadały infiltracji wymuszonej oraz zatopionej i prowadziły do nasycenia gruntu. Według założeń modelu Green-Ampta w trakcie trwania infiltracji zatopionej następuje całkowita redukcja ciśnienia ssania powyżej frontu zwilżenia oraz wzbudzenie przepływu podpowierzchniowego w kierunku równoległym do powierzchni zbocza, co prowadzi do wzbudzenia działania sił ciśnienia spływowego. Stąd też w trakcie trwania intensywnego opadu (o intensywności większej od wodoprzepuszczalności gruntu) najniekorzystniejsze warunki stateczności występują u podstawy frontu zwilżenia. Z kolei w modelu Iversona infiltracja wody powoduje zmianę (zmniejszenie) wielkości ciśnienia ssania, a jej zakres jest w dużym stopniu związany z intensywnością opadu i przepuszczalnością gruntu. W przypadku analizowanych gruntów początkowa wielkość ciśnienia była stosunkowo wysoka, czas trwania opadów wynoszący nawet 12 godzin był niewystarczający do zredukowania ciśnienia ssania. Stąd też obliczenia infiltracji w przypadku gruntu o wodoprzepuszczalności 10^{-6} m/s wykazały, że po 12 godzinach opadu w profilu (rys. 10b) występuje ciśnienie ssania, natomiast obliczenia infiltracji przeprowadzone modelem Green-Ampta wykazały, że w części profilu położonej powyżej frontu zwilżenia występują negatywne wartości ciśnienia ssania (ciśnienie porowe).

W celach porównawczych przeprowadzono również obliczenia stateczności oparte o wyniki numerycznych obliczeń infiltracji. Obliczenia te wykazały, że w trakcie trwania opadu 12-godzinnego o wysokości 144 mm w przypadku gruntów o współczynnikach wodoprzepuszczalności 10^{-8} i 10^{-7} m/s następują bardzo niewielkie zmiany wielkości ciśnienia ssania. Z kolei dla gruntów o wodoprzepuszczalności 10^{-6} i 10^{-5} m/s obliczenia infiltracji wykazały, że opad powoduje zmniejszenie wielkości ciśnienia ssania do wartości równej zero przy powierzchni terenu, a zasięg oddziaływania procesu infiltracji wyniósł 0,6 m p.p.t. Wykonane na tej podstawie wyniki obliczeń stateczności wykazały, że uzyskane wartości zmian ciśnienia porowego nie wpłynęły zasadniczo na stateczność zbocza i były one podobne do wartości współczynników stateczności uzyskanych z obliczeń modelem Iversona.

PODSUMOWANIE

Przedstawione w pracy wyniki obliczeń infiltracji zintegrowanych z obliczeniami stateczności pozwoliły na określenie roli wodoprzepuszczalności gruntów na kształtowanie się warunków stateczności powierzchniowej warstwy zbocza w warunkach występowania długotrwałych oraz nawalnych i ulewnych opadów. Do obliczeń wykorzystano trzy analityczne modele in-

filtracji różniące się sposobem modelowania przepływu wody w strefie niepełnego nasycenia i oceny wpływu tego procesu na wytrzymałość gruntu na ścinanie.

Wyniki obliczeń stateczności zintegrowanych z obliczeniami infiltracji z zastosowaniem analitycznych modeli Green-Ampta, Iversona oraz Lu-Godta dały zróżnicowane wartości współczynników stateczności. W przypadku występowania długotrwałych opadów o niskiej intensywności wartości współczynników stateczności określone modelem Lu-Godta były wyraźnie większe niż określone z innych metod.

Porównując wyniki obliczeń stateczności opartych na obliczeniach infiltracji z zastosowaniem modelu Green-Ampta i Iversona dla wariantu uwzględniającego długotrwałe opady, trudno jednoznacznie stwierdzić, który model daje bardziej niekorzystne wartości współczynników stateczności. Z kolei obliczenia stateczności dla wariantu występowania opadów krótkotrwałych o dużej intensywności bardziej niekorzystne wyniki obliczeń stateczności otrzymano, korzystając z wyników obliczeń infiltracji modelem Green-Ampta.

Wartości współczynników stateczności określone o numeryczne obliczenia infiltracji w większości analizowanych przypadków różniły się od wyników obliczeń opartych na analitycznych modelach infiltracji. Zaledwie w kilku przypadkach stwierdzono zgodność wyników obliczeń numerycznych z modelem Green-Ampta.

Biorąc pod uwagę, że wartości współczynników stateczności opartych na obliczeniach infiltracji modelem Green-Ampta były z reguły mniejsze bądź porównywalne z wynikami obliczeń numerycznych, model ten wydaje się odpowiednim narzędziem do wstępnej oceny stateczności zboczy.

LITERATURA

1. Baum R. L., Savage W. Z., Godt J. W.: TRIGRS – A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis. Version 2.0. U.S. Geological Survey Open-File Report, 2008-1159, 2008.
2. Bishop A. W.: The principle of effective stress. Teknisk Ukeblad, 106 (39), 1959, 859-863.
3. Cebulak E.: Najwyższe zanotowane maksymalne opady dobowe w dorzeczu górnej Wisły i ich geneza. *Acta Universitatis Wratislaviensis, Prace Instytutu Geograficznego*, seria A, t. V, 1991, 167-171.
4. Cebulak E.: Maksymalne opady dobowe w dorzeczu górnej Wisły. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego, Prace Geograficzne*, 90, 1992, 79-96.
5. Cebulak E.: Zmienność maksymalnych opadów dobowych w dorzeczu górnej Wisły. *Wiadomości Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej*, XVII, 1, 1994, 83-91.
6. Cho S. E., Lee S. R.: Evaluation of surficial stability for homogeneous slopes considering rainfall characteristics. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128, 9, 2002, 756-763.
7. Cho S. E.: Infiltration analysis to evaluate the surficial stability of two-layered slopes considering rainfall characteristics. *Engineering Geology*, 105, 2009, 32-43.
8. Collins B. D., Znidarcic D.: Stability analysis of rainfall induced landslides. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130, 4, 2004, 362-372.

9. Delmonaco G., Leoni G., Margottini C., Puglisi C., Spizzichino D.: Large scale debris-flow hazard assessment: a geotechnical approach and GIS modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 2003, 443-455.
10. Fredlund D. G., Morgenstern N. R., Widger R.A.: The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15, 3, 1978, 313-321.
11. Gardner W. R.: Steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from water table. *Soil Science*, 1958, 85, 228-232.
12. Gil E., Długosz M.: Threshold values of rainfalls triggering selected deep-seated landslides in the Polish Flysch Carpathians. *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, XL, 2006, 21-43.
13. Green W. H., Ampt G. A.: Studies of soils physics I. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*, 4, 1911, 1-24.
14. Iverson R. M.: Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, 36, 7, 2000, 1897-1910.
15. Kim J., Jeong S., Park S., Sharma J.: Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils. *Engineering Geology*, 75, 2004, 251-262.
16. Lee L.M., Gofar N., Rahardjo H.: A simple model for preliminary evaluation of rainfall-induced slope instability. *Engineering Geology*, 108, 2009, 272-285.
17. Lu N., Griffiths D.V.: Profiles of steady-state suction stress in unsaturated soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130, 10, 2004, 1063-1076.
18. Lu N., Likos W. J.: Suction Stress Characteristic Curve for Unsaturated Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132, 2, 2006, 131-142.
19. Lu N., Godt J.: Infinite slope stability under unsaturated seepage conditions. *Water Resources Research*, 44, W11404, doi:10.1029/2008WR006976, 2008.
20. Lumb, P.: Slope Failures in Hong Kong. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 1975, 31-65.
21. Montrasio L., Valentino R.: A model for triggering mechanisms of shallow landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 2008, 1149-1159.
22. Morel-Seytoux H. J., Khanji J.: Derivation of an equation of infiltration. *Water Resources Research*, 10, 4, 1974, 795-800.
23. PN-86/B-02480. Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów. Polski Komitet Normalizacji, Miary i Jakości, Warszawa.
24. Pradel D., Raad G.: Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119, 2, 1993, 315-332.
25. Rahardjo, H., Lim, T. T., Chang, M. F., Fredlund, D. G.: Shear strength characteristics of a residual soil. *Canadian Geotechnical Journal* 32, 1995, 60-77.
26. Rahardjo H., Ong T. H., Rezaur R. B., Leong E. C.: Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, 133, 12, 2007, 1532-1543.
27. Rahimi A., Rahardjo H., Leong E.-C.: Effect of hydraulic properties of soil on rainfall-induced slope failure. *Engineering Geology*, 114, 2010, 135-143.
28. Soczyńska U. (red): Podstawy hydrologii dynamicznej. Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, 434, 1990.
29. Tsai T.-L., Chen H.-E., Yang J.-C.: Numerical modeling of rainstorm-induced shallow landslides in saturated and unsaturated soils. *Environmental Geology*, 55, 2008, 1269-1277.
30. Vanapalli S. K., Fredlund D. G.: Empirical procedures to predict the shear strength of unsaturated soils. *Eleventh Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Hong et al. (eds.), Balkema, 1999, 93-96.
31. Van Genuchten M. T.: A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal*, 44, 1980, 892-898.