

IL CONTRIBUTO DEGLI IMPIANTI RADICALI PROFONDI NELLA STABILIZZAZIONE SUPERFICIALE DEI VERSANTI

Patrizio Napoli

Università di Perugia

patrizio.napoli@libero.it

Manuela Cecconi

Università di Perugia

manuela.cecconi@unipg.it

Vincenzo Pane

Università di Perugia

vincenzo.pane@unipg.it

Sommario

Nella nota si riferisce sui risultati di una recente attività di ricerca inerente l'analisi degli interventi di impianti radicali profondi nel terreno per la stabilizzazione di coltri superficiali ed il controllo dell'erosione. L'attenzione è rivolta principalmente alla valutazione dell'incremento di resistenza a taglio offerto al terreno da radici di piante erbacee ad elevata resistenza a trazione. Il contributo delle radici può essere interpretato sia dal punto di vista meccanico (rinforzo radicale) sia idraulico (effetti della variazione del grado di saturazione nel terreno).

1. Premessa

Come noto nella letteratura specialistica (es.: Gray e Sotir, 1996; Bischetti, 2000; Osman, 2006; Wan, 2011), l'impianto di radici nel terreno favorisce generalmente un incremento della resistenza a taglio entro lo spessore radicato; in realtà, il fenomeno dipende da due processi distinti: in primo luogo, il rinforzo meccanico offerto dalle radici; in secondo luogo, la capacità dell'intero impianto erbaceo di influire, anche significativamente, sul bilancio idrologico dell'area di interesse, per la capacità dell'apparato epigeo di intercettare parte della precipitazione e dell'intera pianta di assorbire acqua dal terreno trasferendola all'atmosfera per traspirazione. Il problema dell'interazione - di natura meccanica e idraulica - tra la radice ed il terreno diventa fondamentale allorché l'impianto con apparato radicale profondo abbia il duplice scopo di assolvere alla primaria funzione di protezione dall'erosione e, secondariamente, di contenere eventuali fenomeni superficiali - per spessori delle coltri non superiori a 1 ÷ 1.5 m - di instabilità dei versanti. Il problema è evidentemente complesso, dal momento che i fenomeni in gioco sono molteplici ed il loro studio richiede competenze specifiche in diversi settori, dall'agronomia, alla fisica dei terreni, all'idraulica. Da un punto di vista analitico-numerico, è fondamentale rispettare l'equazione di bilancio delle masse, tenendo conto dei fenomeni di evaporazione del suolo, traspirazione delle piante, infiltrazione di acqua nel terreno, ruscellamento lungo il pendio.

2. Effetto meccanico di piante erbacee caratterizzate da radici sottili

L'impiego di piante erbacee caratterizzate da radici sottili di elevata resistenza a trazione può rappresentare un efficace mezzo di difesa da possibili fenomeni di instabilità di coltri superficiali di

versante, nonché dall'erosione dovuta al deflusso superficiale di acque meteoriche, semplicemente considerando che le radici delle piante agiscono come speciale rinforzo del terreno. Come ben noto dalla letteratura specializzata (es.: Qi and Hu, 2006; Bonfanti, 2009; Preti, 2009; Phillips, 2011), l'incremento di resistenza a taglio del terreno offerto dalla radice, $\Delta\tau_r$, è funzione della resistenza a trazione della singola radice, t_r , dell'angolo di attrito del terreno, ϕ , e del rapporto tra l'area della sezione trasversale della radice, A_r , e l'area della sezione trasversale di terreno radicato, A_{rs} , come dall'equazione:

$$\Delta\tau_r(z) = k \cdot t_r \cdot \frac{A_r(z)}{A_{rs}} \quad (1)$$

ove k è un fattore empirico adimensionale che dipende dalla specie vegetale. La resistenza a trazione della radice, t_r , presente nell'eq. (1), può essere valutata mediante prove sperimentali; i risultati sperimentali ottenuti da prove su diverse varianti di specie erbacee, appartenenti principalmente alle famiglie delle *Graminacee* e *Leguminose* (Bonfanti and Bischetti, 2009, Cazzuffi, 2002), mostrano chiaramente che t_r decresce sensibilmente all'aumentare del diametro della radice, d , e raggiunge valori molto elevati, dell'ordine dei MPa, per radici di diametro medio intorno ai 0.5-1.5mm. Nell'eq.(1), la quantità A_r/A_{rs} è nota nella letteratura specialistica come "*RAR, root area ratio*"; questo rapporto tipicamente decresce con la profondità, ma presenta una grande variabilità dipendente oltre che dalla specie, dalle proprietà del terreno e dalle condizioni climatiche ed ambientali (ad es.: Abe and Ziemer, 1991; Zuo et al., 2004; Preti et al., 2010). In questo studio si esamina un impianto radicale di tipo *fascicolato* caratterizzato da un valore massimo del rapporto di area radicata, RAR_{max} , al piano campagna pari a 0.2% (Cecconi et al., 2013). Per ogni profondità z dal piano campagna l'area totale, $A_r(z)$, delle sezioni trasversali delle singole radici di diametro d_i , è data da:

$$A_r(z) = \sum_{i=1}^m n(z; d_i) \cdot a_{r,i} \quad (2)$$

Nell'eq. (2), il numero di radici $n(z, d_i)$ varia con la profondità e con il diametro della radice; infatti alcune radici non raggiungono la massima profondità di radicazione $z_{r,max}$. Nel calcolo di A_r/A_{rs} è stata utilizzata una funzione casuale che assegna il numero di radici $n(z,d_i)$ per ogni diametro, d_i , e per ogni strato di terreno radicato di spessore 10-30 cm. La Fig 1a) mostra, a titolo di esempio, un profilo rappresentativo $RAR(z)$ per la specie *Ergrass*. L'incremento di resistenza al taglio dovuto al contributo delle radici è stato ricavato estendendo l'eq. (1) all'intero impianto radicale:

$$\Delta\tau_r(z) = RAR(z) \cdot \sum_{i=1}^m (t_{r,i} \cos \theta \cdot \tan \phi + t_{r,i} \sin \theta) \quad (3)$$

ove θ è l'angolo di distorsione della singola radice rispetto alla potenziale superficie di taglio. Evidentemente, affinché l'eq. 3 sia applicabile, le radici devono raggiungere una lunghezza minima di radicazione, l_{min} , per evitare fenomeni di sfilamento della radice stessa dal terreno, prima del raggiungimento della massima resistenza a trazione (Gray & Leiser, 1989):

$$l_{min} = \frac{t_r d_r}{2\tau_{pr}} \quad (4)$$

Se la lunghezza di radicazione è minore di l_{min} , allora la radice potrà sfilarsi prima che si raggiunga la sua massima resistenza a trazione; nell'eq. (4), τ_{pr} , è la massima tensione tangenziale all'interfaccia radice/terreno. L'eq. (3) è stata utilizzata per quantificare l'effetto meccanico di un impianto radicale profondo sulle condizioni di stabilità di una coltre superficiale instabile (1-1.5 m). Nello schema di pendio indefinito, l'espressione del coefficiente di sicurezza, FS_r , si modifica banalmente per tenere conto del contributo meccanico delle radici:

$$FS_r = \frac{\tau_f + \Delta\tau_r}{\gamma z \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha} = \left(1 - \frac{\gamma_w \cdot D_w}{\gamma z}\right) \cdot \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} + \frac{c' + \Delta\tau_r}{\gamma z \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha} \quad (5)$$

ove D_w rappresenta la distanza tra la superficie piezometrica e la superficie di scorrimento, z . L'effetto meccanico apportato da un impianto radicale profondo è stato così valutato con riferimento al caso di un versante di pendenza ($\alpha = 30^\circ$) in terreni granulari incoerenti ($\phi' = 30^\circ$, $c' = 0$). Si è considerata la presenza di sistema radicale costituito da una specie erbacea quale l'*Eragrass*, con radici caratterizzate da un diametro medio $d = 0.66$ mm ($d_{min} = 0.24$ mm, $d_{max} = 1.08$ mm) ed una massima profondità di radicazione $z_{r,max} = 2$ m. I risultati dell'analisi di stabilità del versante radicato, in termini di coefficiente di sicurezza, sono rappresentati nella Fig. 1 (b, c). Si noti che il contributo positivo delle radici è confrontabile con quello indotto da un incremento di coesione di 5kPa-10kPa in un terreno non vegetato (Fig 1c). Gli elevati valori di FS_r calcolati a profondità inferiori a 0.6 m non sono stati rappresentati a causa della loro dispersione e del loro significato poco realistico.

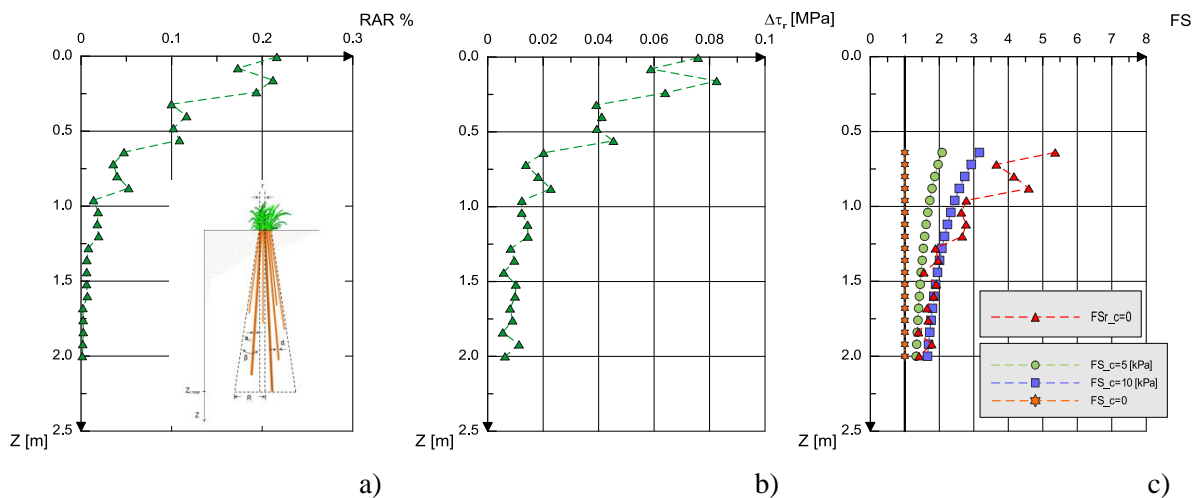


Fig.1. Effetto del rinforzo meccanico apportato da un apparato radicale sulle condizioni di stabilità di un versante: a) profilo RAR (specie erbacea *Eragrass*); b) incremento di resistenza al taglio, $\Delta\tau_r$; c) coefficiente di sicurezza per versante con e senza impianto radicale

3. Effetto idraulico

Oltre all'effetto e al ruolo meccanico, la vegetazione svolge un ruolo importante dal punto di vista idraulico. I fenomeni di cui tenere conto nell'analisi di un problema di interazione terreno-clima-vegetazione consistono nei ben noti processi di intercettazione, evapotraspirazione, ruscellamento, infiltrazione e la trattazione analitica di tali fenomeni è certamente molto complessa da comprendere e da modellare. L'equazione di bilancio di massa può essere scritta simbolicamente nel seguente modo:

$$\sum_{\Delta t} P - R = \sum_{\Delta t} ET + I \quad (6)$$

dove Δt è l'intervallo temporale di riferimento, P è la precipitazione, ET indica l'evapotraspirazione ed I è la quantità di pioggia infiltrata nel terreno. Per poter risolvere il secondo membro dell'eq. (6), possono essere utilizzati differenti approcci, quali: metodi empirici, metodi fisicamente basati e modelli teorici basati sull'equazione di Richards (1931). Quest'ultima può essere riformulata secondo quanto proposto da Mathur e Rao (1999):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right) - S(z, t) \quad (7)$$

ove θ è il contenuto d'acqua volumetrico, h è il carico idraulico totale e $K(h)$ è la conducibilità idraulica del terreno. La quantità $S(z,t)$ definita come *sink term* (contenuto d'acqua volumetrico traspirato dalle piante/radici nell'unità di tempo) dipende principalmente dal contenuto d'acqua iniziale del terreno, dalla densità del profilo radicale e dal tasso di traspirazione potenziale (Feddes et al., 1976, 2001; Prasad, 1988). In letteratura sono presenti diverse funzioni che permettono di determinare $S(z,t)$; alcune di queste si basano sull'assunzione che il tasso di traspirazione può uguagliare l'assorbimento radicale lungo tutto il profilo RAR:

$$S(z, t) = C(z, t) \cdot TR \quad (8)$$

Nell'eq.(8), TR è il tasso di traspirazione delle radici e $C(z,t)$ è un *weighting factor* dipendente dalla densità di lunghezza radicale, dal contenuto d'acqua e, più in generale, dalle proprietà idrauliche del terreno.

4. Un esempio di analisi di stabilità di un versante radicato

In questo paragrafo sono illustrati i risultati ottenuti da un esempio di calcolo condotto con l'obiettivo di evidenziare gli effetti idraulici e meccanici di impianti radicali profondi sulla stabilità di coltri superficiali di versante, durante e a seguito un evento piovoso. Con riferimento al caso studio trattato precedentemente ($\alpha = \phi' = 30^\circ$, $c' = 0$, $k_{sat} = 1.08 \cdot 10^{-7}$ [m/s]), si consideri ora la presenza di falda a 2.5 m dal piano campagna. L'evento piovoso considerato ha una durata di due giorni, rispettivamente pari a 40 - 80 mm/g.

Per la valutazione delle condizioni di stabilità del versante, in condizioni di parziale saturazione, si è scelto di utilizzare il criterio di resistenza proposto da Vanapalli et al. (1996), modificato per poter includere il contributo meccanico apportato dalla presenza di apparati radicali. In questo caso, e nelle ipotesi di pendio indefinito, l'espressione del coefficiente di sicurezza può essere riscritta nel seguente modo:

$$FS_r(z) = \frac{\tau_{unsat}(z) + \Delta\tau_r(z)}{\gamma z \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha} = \left(1 + \frac{S_r(z) \cdot s(z)}{\gamma z \cdot \cos^2 \alpha} \right) \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} + \frac{c' + \Delta\tau_r(z)}{\gamma z \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha} \quad (9)$$

Mediante l'implementazione di un modello numerico agli elementi finiti, sono stati ricavati i profili di contenuto d'acqua volumetrico e di suzione del terreno sia in presenza che in assenza di apparati radicali caratterizzati da un valore del *leaf area index*, $LAI = 2.7$, $LAI=0$ (Fig 2). L'effetto della traspirazione diventa apprezzabile alcuni giorni dopo l'evento piovoso e consiste in un aumento della suzione nel tempo lungo tutto il profilo radicato. Le Figure 3a) e 3b) mostrano l'andamento del coefficiente di sicurezza (effetto idraulico) durante e a seguito dell'evento piovoso, per una potenziale superficie di scorrimento posta a differenti profondità dal piano campagna. Per profondità prossime al piano campagna (circa 0.4 ÷ 0.5 m), si osserva come la vegetazione abbia una modesta influenza sulle condizioni di stabilità, durante ed immediatamente dopo l'evento, anche per valori differenti di LAI. Tuttavia, la presenza di una copertura vegetale diventa apprezzabile alcuni giorni dopo l'evento, quando l'effetto della traspirazione radicale porta i valori del coefficiente di sicurezza ben al di sopra di quelli ottenuti in assenza di copertura vegetale. Si noti, infine, che in tutti i casi l'effetto meccanico delle radici è senza dubbio prevalente rispetto a quello idraulico sulle condizioni di stabilità, come osservabile in Figura 3c). In sintesi, dunque, è possibile affermare che fenomeni di instabilità di coltri superficiali possono essere efficacemente attenuati dall'intervento con apparati radicali profondi. L'aumento della resistenza a taglio del terreno dipende principalmente dal rinforzo meccanico indotto dalle radici - anche se tale effetto positivo è limitato ad una porzione di terreno superficiale - e, secondariamente, da un effetto di tipo idraulico dovuto essenzialmente alla traspirazione radicale che induce generalmente un aumento di suzione del terreno.

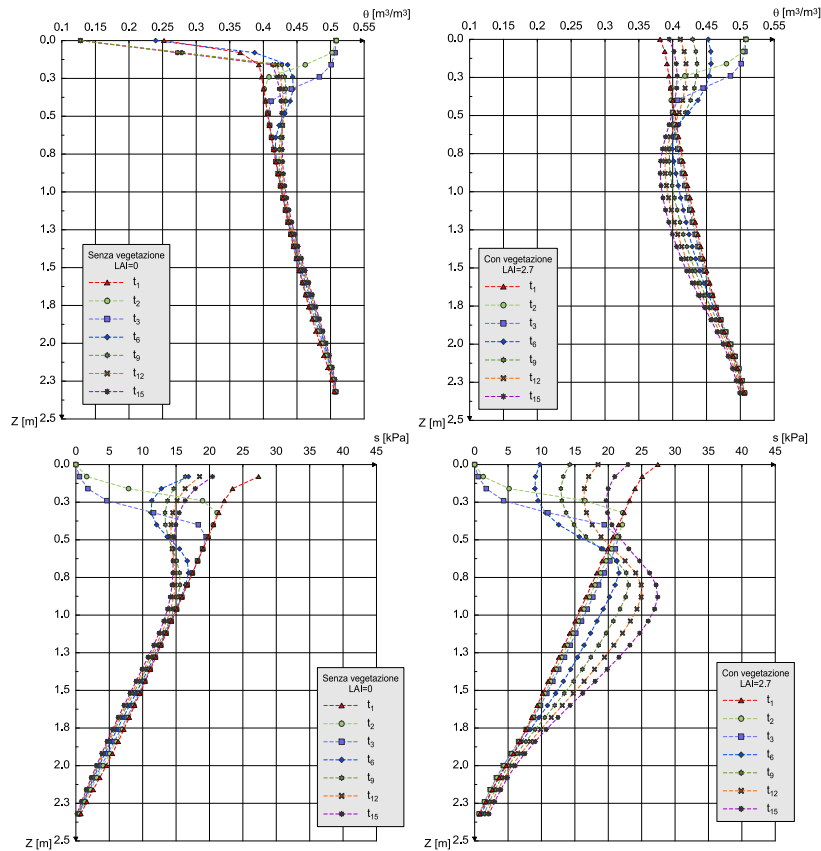


Fig 2. Profili di contenuto d'acqua volumetrico e di suzione, in presenza ed in assenza di apparati radicali.

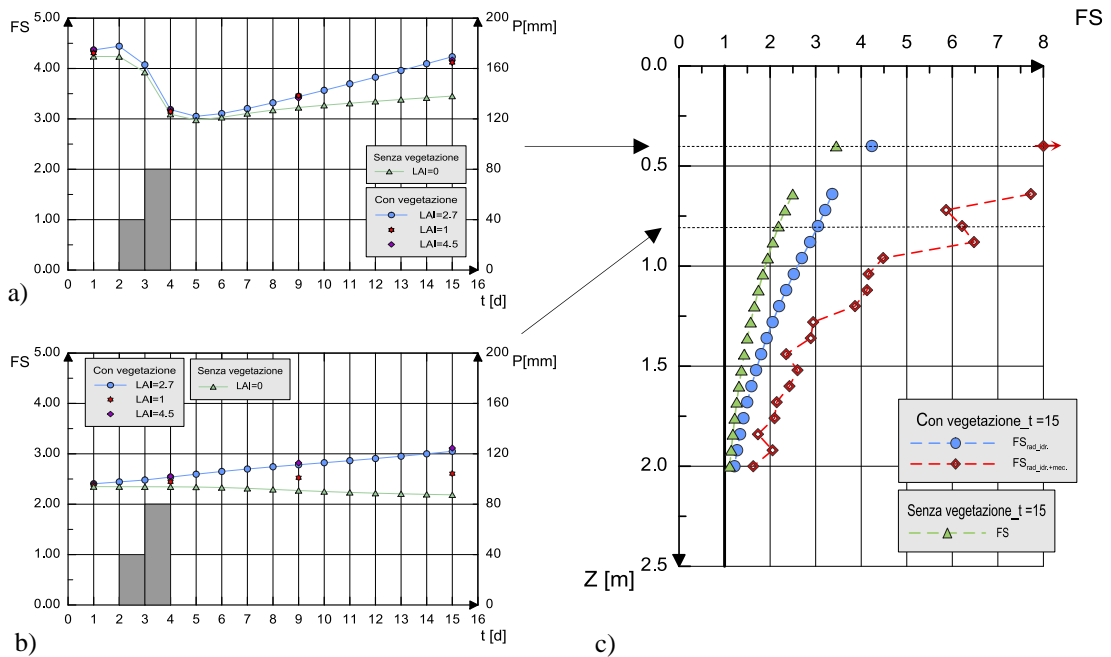


Fig. 3. Variazione del coefficiente di sicurezza durante e a seguito di un evento piovoso, per diverse profondità: a) $z=0.4m$; b) $z=0.8m$; c) FS vs. z .

Bibliografia

- Abe K. and Ziemer, R. (1991). "Effect of tree roots on shear zone: modeling reinforced shear stress", USDA Pacific Southwest Research Station, Forest Service, USA.
- Bischetti G.B. (2000). "Quantificazione dell'effetto dell'apparato radicale sulla stabilità dei versanti", *Journal of Agricultural Engineering*, 2, 70-81.
- Bonfanti F., Bischetti G.B. (2009). "Resistenza a trazione delle radici e modello di interazione terreno-radici", Rapporto interno (in Italian), Istituto di Idraulica Agraria, Università degli Studi di Milano.
- Cazzuffi, D., Riccardi, A.G. 2002. Indagine sperimentale sul contributo di piante Vetiver alla stabilizzazione di versanti. Rapporto CESI agosto 2002
- Cecconi, M., Pane V., Napoli P., Zarotti C. (2013). "Mechanical and hydraulic effects of deep roots planting on slope stability", TC 215 CPEG 2013 Symposium, Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics, Torino, Italy, 1 – 3 July 2013, p. 533-540.
- Feddes R. A., Kowalik P., Malinka K. K., and Zaradny H. (1976). "Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function", *Journal of Hydrology*, 31, 13–26.
- Feddes R.A., Hoff H., Bruen M., Dawson T., De Rosnay P., Dirmeyer P., Jackson R.B., Kabat P., Kleidon A., Lilly A., Pitman A.J., (2001). "Modeling root-water uptake in hydrological and climate models", *Bull. Am. Met. Soc.* 82 (12), 2797–2809.
- Gray D. H., Leiser A. T. (1989). "Biotechnical slope protection and erosion control", Krieger Publishing Company, Malabar, Florida.
- Gray D. H., Sotir R. B. (1996). "Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization: A Practical Guide for Erosion Control", John Wiley and Sons.
- Mathurn S., Rao S., (1999). "Modeling water uptake by plant roots", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 125(3), 159-165.
- Osman, N., Barakbah, S.S., (2006). "Parameters to predict slope stability-soil water and root profiles", *Ecol. Eng.* 28, 90–95.
- Phillips C.J., Ekanayake J.C. and Marden M. (2011). "Root site occupancy modelling of young New Zealand native plants: implications for soil reinforcement", *Plant Soil*, 346: 201–214.
- Prasad R.. (1988). "A linear root water uptake model", *Journal of Hydrology*. 99, 297-306.
- Preti F. and Giadrossich F. (2009). "Root reinforcement and slope bioengineering stabilization by Spanish Broom (*Spartium junceum* L.)", *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 6: 3993–4033.
- Preti F., Dania A., Laio F. (2010). "Root profile assessment by means of hydrological, pedological and above-ground vegetation information for bio-engineering purposes", *Ecological Engineering* 36 (2010) 305–316.
- Qi G. and Hu L. (2006). "Study on mechanism and application of slope protection with vegetation", *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(11): 2220-2225.
- Richards L.A. (1931). "Capillary conduction of liquids in porous mediums", *Physics*, 1, 318-333.
- Vanapalli S.K., Fredlund D.G., Pufahl D.E., Clifton A.W. (1996). "Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction", *Canadian Geotechnical Journal*, 33: 379-392.
- Wan Y., Xue Q., Zhao Y. (2011). "Mechanism study and numerical simulation of vegetation affecting the slope stability", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 16: 742-751.
- Zuo Q., Jie F., Zhang R. Meng L.A., (2004). "Generalized function of wheat's root length density distributions", *Vadose Zone J.* 3.