

UDK: 624.131.537:624.138

Оригинални научни рад

<https://doi.org/10.2298/GSF1919091M>

## АНАЛИЗА СТАБИЛНОСТИ ПАДИНА ПОРЕД ПУТЕВА У УСЛОВИМА БИОАРМИРАНОГ ЗЕМЉИШТА

Младен Марковић, ЈП „Путеви Србије“, Београд, Србија, [mladen.markovic@putevi-srbije.rs](mailto:mladen.markovic@putevi-srbije.rs)

Маст. Инж. Никола Живановић, Универзитет у Београду – Шумарски факултет

Др Гроздана Гајић, ред. проф., Универзитет у Београду – Шумарски факултет

**Извод:** Коренов систем има способност да стабилизује падине, поправком физичко-механичких особина земљишта на којем се развија. Морфологија и тенденција кореновог система да збија честице земљишта у једну монолитну масу, коју називамо био-армирано земљиште, доприноси повећању отпорности земљишта на смицање. У раду је приказана упоредна анализа стабилности падина поред путева без и са утицајем кореновог система. Анализе су рађене у циљу заштите саобраћајница, проналажењем оптималног облика кореновог система као алтернативног решења за стабилизацију падина поред путева. На моделу падине симулиран је утицај четири група вегетације, издвојених на основу морфологије кореновог система (тањираст, срцаст, са израженом срчаницом и недефинисан облик). За сваку изабрану врсту је усвојена вредност кохезије „био-армираног“ земљишта (с). Софтвер за геотехничко нумеричко моделирање - GeoStudio 2007 је коришћен за све анализе стабилности падине. Прорачуном стабилности модела падине без утицаја вегетације утврђено је да падина није стабилна. Увођењем вегетационих група у анализу стабилности постиже се повећање стабилности падине. Највећи утицај на стабилност модела падине има група 2.- вегетација која има корен са израженом срчаницом, следи група 1.- са срцастим кореном, док су група 3, тањирасти корен, и група 4, недефинисани облик кореновог система, дале најмање вредности. Приказани резултати представљају допринос у избору решења за стабилизацију падина поред путева и спречавању ерозионих процеса.

**Кључне речи:** коренов систем, кохезија „био-армираног“ земљишта, вегетација, стабилност падине, заштита путева

## УВОД

Грађевинске активности приликом изградње саобраћајница, често нарушавају природно стање равнотеже падина поред путева, што се манифестује стварањем различитих савремених егзогених процеса (слика 1). Падине поред путева, после градње често остају незаштићене од утицаја ерозионих процеса, што узрокује

гравитационо покретање земљишта и рушења техничких објеката. Swanson and Dyrness (1975) су анализама прикупљених података о шумама открили очигледан пораст појаве броја клизишта као резултат чистих сеча и изградње путева. Примена вегетације представља ефективно решење за стабилизацију падина, елими-

нисањем или ублажавањем процеса ерозије (Abe and Ziemer 1991, Lewis 2000, Greenwood et al., 2006, Mao et al., 2012). Отпорност земљишта, на коме се налази стабилан систем вегетације, може се повећати за 50-70% или се значајно смањити уколико се изврши чиста сеча на падинама (Norris et al., 2008). Вегетација има функцију заштитне баријере између земљишта и агенаса (биотичких и абиотичких) који стимулишу процесе деградације. Ефикасна је мера у заштити од водне и еолске ерозије као и од удара ветрова и снежних наноса. Коренов систем својим растом и развојем поправља физичко-механичке параметре земљишта (повећање кохезије, запреминске тежине, угла унутрашњег трења) (Wu et al., 1979, Wo and Watson 1998, Greenwood et al., 2006, Гајић et al., 2013), чиме се постиже повећање стабилности падине. Разгранатост и разноврсност углова гранања кореновог система повећава отпорност земљишта на смицање (Abe and Ziemer 1991; Mickovski et al., 2007). Коренов систем има тенденцију да збија честице земљишта у једну монолитну масу и тако доприноси повећању отпорности земљишта, пре свега кохезије. Биљне врсте имају три главна облика кореновог система (Köstler 1968): тањираст, срцаст и са израженом срчаницом. Тањираст коренов систем се развија плитко у површинском делу терена, има јаке бочне и fine вертикалне корене. „Био-армирање“ земљишта, врстама са срцастим кореновим системом, знатно утиче на смањење и елиминисање процеса унутрашње ерозије и филтрационих сила код растреситог неконсолидованог земљишта, стварајући специфичну и кохерентну биолошки армирану масу, која је отпорнија на тангенцијалне силе и настанак клизишта (Гајић 2014). Коренов систем срчанице који има разгранату морфологију развоја, у анализу стабилности и отпорности на клизање се уводи као анкерисана група „био-шипова“ под условом да је коренов систем обухватио стабилан терен испод клизне равни. Утицај корена приликом рачунања стабилности падина се изражава преко кохезије „био-армираног“ земљишта (с.) (Mao et al., 2012). Истраживања су показала да садњом и одржавањем вегетације на потенцијалној клизној површини, фактор сигурности може повећати до 10 % (Norris and Greenwood 2006).



**Слика 1:** Клизање падине након реконструкције деонице пута Крупањ-Љубовија (извор: аутор)

У раду су приказане анализе и различити сценарији стабилности падина поред путева без и са утицајем кореновог система. Анализе су рађене за потребе одбране саобраћајница, проналажењем оптималног облика кореновог система као алтернативног решења за стабилизацију падина поред путева.

## МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД

Анализа стабилности падине са утицајем и без утицаја кореновог система вршена је на припремљеном моделу терена, са задатим димензијама и физичко-механичким вредностима земљишта (табела 1). Модел је формиран од једног слоја земљишта са вредностима физичко-механичких параметара за услов потпуне потопљености земљишта, када су отпорне карактеристике земљишта најмање. Формирање косина поред путева често се врши само насипањем и планирањем без збијања услед чега се отпорне карактеристике земљишта значајно умањују.

Софтвер за геотехничко нумеричко моделирање - GeoStudio 2007 је коришћен и за све анализе стабилности модела падина, методом Morgenstern and Price (1965). Метода је у основи аналитичка са произвољном клизном равни (кружно цилиндрична), која анализира услове равнотеже за сваку ламелу и целокупно клизно тело. За слој земљишта у датом моделу

**Табела 1:** Димензије и физичко-механичке вредности модела падине

| Дужина (L) | Висина (H) | Угао (α) | Запреминска тежина (γ) | Кохезија (c)        | Угао унутрашњег трења (φ) |
|------------|------------|----------|------------------------|---------------------|---------------------------|
| 19 m       | 7,5 m      | 13°      | 10 kN/m <sup>3</sup>   | 5 kN/m <sup>2</sup> | 6,5°                      |

(извор: аутор)

уносе се параметри отпорности земљишта на смицање и запреминска тежина. Софтвер разматра више потенцијалних клизних равни у задатом моделу и даје критичну клизну раван са најмањим фактором сигурности следећом формулом.

$$F_s = \frac{\sum\{c-l+(N-ul)\tan\phi\}}{\sum W \sin\alpha} \dots\dots\dots [1]$$

Где је: F<sub>s</sub>- фактор сигурности, c- кохезија, N- нормалне силе, u- порни притисак, φ- угао унутрашњег трења, W sinα- смичућа (тангенцијална) сила, l- дужина ламеле, α- нагиб клизне равни

Услов стабилности је задовољен када је вредност фактора стабилности F<sub>s</sub> ≥ 1,5 уколико је вредност нижа, услов није испуњен односно падина није стабилна. У раду су приказане клизне равни са најнижим вредностима фактора сигурности за усвојене услове модела падине.


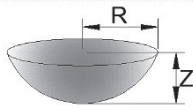

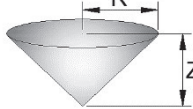

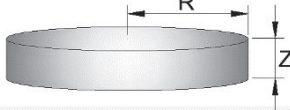
Са аспекта утицаја вегетације на стабилност падина, кроз све моделе анализиран је коренов систем као ламела са појединачним шипом, односно анкерисаним „био-шипом“. Облик и ди-

мензије кореновог система усвојене су на основу морфологије одабраних биљних врста (Kokutse et al., 2006., слика 2). У ламелама које обухватају „био-шип“ утицај кореновог система се уводи у прорачун повећањем кохезије за c<sub>r</sub> што је представљено Mohr-Coulomb - овом једначином напона смицања (Wo 2013.)

$$\tau = c + c_r + (\sigma - u) \cdot \tan \phi \dots\dots\dots [2]$$

Где је: τ- тангенцијални напон, c- кохезија земљишта, c<sub>r</sub>- кохезија „био-армираног“ земљишта, σ- нормални напон, u- порни притисак, φ- угао унутрашњег трења

Био-армирано земљиште може утицати на повећање стабилности код плитких клизишта дубине 2-3 m, док је код дубљих клизишта, која се налазе ван зоне кореновог система, утицај занемарљив (Norris et al., 2008). Вредности кохезије „био-армираног“ земљишта (c<sub>r</sub>) и облика корена за изабране биљне врсте су приказане у табели 2. Димензије кореновог система, R- полупречник, Z- дубина и P- површина коју захвата коренов систем, које су усвојене за

| Облик корена | Морфологија корена  | Геометријска апроксимација   |
|--------------|---|--|
| Срцаст       |  |  |
| Срчаница     |  |  |
| Тањираст     |  |  |

**Слика 2:** Геометријска апроксимација облика кореновог система (Kokutse et al. 2006)

**Табела 2:** Вредности изабраних врста  $c_r$  (Norris, Greenwood 2006) и облика корена (Köstler 1968)

| Назив врсте   | Облик корена | $c_r$ - кохезија „био-армираног“ земљишта (КРа) | Аутор                    |
|---|--------------|---|--------------------------|
| <i>Pseudotsuga menziesii</i>  | Срцаст       | 17,5  | Burroughsand Thomas 1977 |
| <i>Alnus glutinosa</i>  | Срцаст       | 12,0  | Endoand Tsuruta1969      |
| <i>Pinus contorta</i>   | Срчаница     | 21,0  | Ziemer 1981              |
| <i>Pinus halepensis</i>   | Срчаница     | 18,2  | VanBeek et al., 2005     |
| <i>Picea sitchensis</i>   | Тањираст     | 5,9   | Wu et al., 1979          |
| * <i>Festuca pratensis</i> ,<br><i>Festuca rubra</i> , <i>Poa pratensis</i> | Недефинисан  | 13,4  | Tobias 1995              |

\*Травна меша

потребе овог рада, приказане су у табели 3. Увођење „био-шипова“ у модел падине извршено је у зависности од димензија геометријске апроксимације кореновог система, како би се избегло преклапања и испоштовали минимални услови распореда садње дрвећа.

- Група 3. биљне врсте са тањирастим кореновим системом (*Picea sitchensis*)
- Група 4. биљне врсте са недефинисаним кореновим системом (*Festuca pratensis*, *Festuca rubra*, *Poa pratensis*)

**Табела 3:** Димензије кореновог система усвојене за прорачун

| Облик корена           | Димензије корена                       |
|------------------------|--|
| Срцаст                 | R=2 m, Z=2 m, P=5 m <sup>2</sup>       |
| Са израженом срчаницом | R=1,5 m, Z=2,5 m, P=4,7 m <sup>2</sup> |
| Тањираст               | R=2 m, Z=0,8 m, P=3,2 m <sup>2</sup>   |
| Недефинисан            | Z=0,5 m                                |

(извор: аутор)

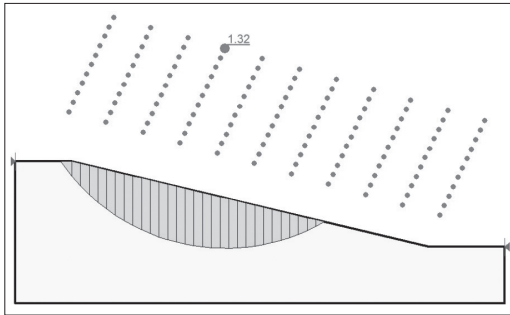
На моделу падине симулиран је утицај четири групе вегетације издвојене на основу облика кореновог система, а за сваку врсту је усвојена вредност кохезије „био-армираног“ земљишта ( $c_r$ ). Модел падине је анализиран са следећим вегетационим групама:

- Група 1. биљне врсте са срцастим кореновим системом (*Pseudotsuga menziesii*, *Alnus glutinosa*)
- Група 2. биљне врсте са кореновим системом са израженом срчаницом (*Pinus contorta*, *Pinus halepensis*)

## РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Изградња путева у брдско-планинским пределима захтева засецање падина, чија је стабилност у погледу клизања упитна, након промене геометрије падине и поремећаја односа напона у земљишту. Након завршене изградње пута, формирање косина поред пута изводи се вишком откопаног земљишта које је у растреситом стању, често без икаквог збијања, те су вредности параметара отпорности на смицање значајно умањене у односу на природне. Анализом стабилности модела падине, без утицаја вегетације са усвојеним вредностима параметара земљишта, добијен је фактор сигурности  $F_s=1,32$  чиме услов стабилности  $F_s \geq 1,5$  није испуњен (слика 3), модел падине није стабилна.

Увођењем вегетације са срцастим обликом кореновог система, група 1, у прорачун стабилности падине, приказане су вредности фактора сигурности за два врсте. Применом врсте *Pseudotsuga menziesii* фактор сигурности износи  $F_s=1,70$  (слика 4, а.). Друга примењена врста је *Alnus glutinosasa* којом је добијен фактор сигур-



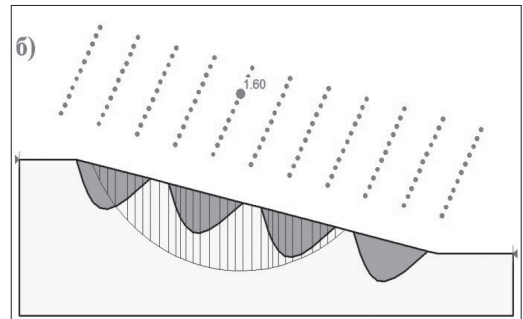
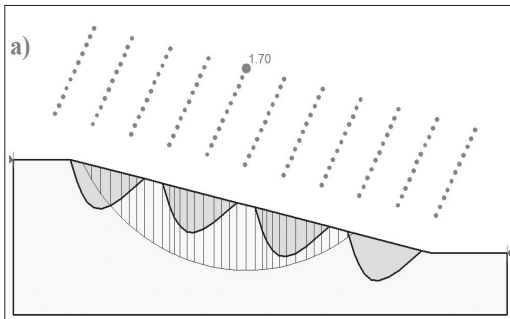
**Слика 3:** Анализа стабилности модела падине без утицаја вегетације (извор: аутор)

ности  $F_s=1,60$  (слика 4, б.). Применом обе врсте са срцастим обликом кореновог система постиже се задовољавајућа стабилност. С обзиром да су облик и димензије кореновог система обе примењене врсте исти, разлика у вредности кохезије „био-армираног“ земљишта од 5,5 КПа (табела 2) утицала је на повећање фактора си-

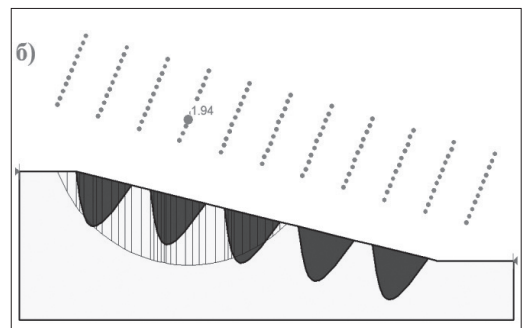
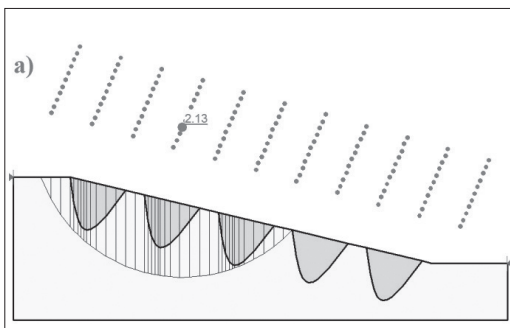
гурности за 0,10, у корист врсте *Pseudotsuga menziesii*.

Коришћењем биљних врста које одликује коренов систем са израженом срчаницом из групе 2, анализирана је стабилност модела падине, применом врсте *Pinus contorta* добијена је вредност фактора сигурности  $F_s=2,13$  (слика 5, а.), док је применом врсте *Pinus halepensis* фактор сигурности износи  $F_s=1,94$  (слика 5, б.). За обе примењене врсте фактор стабилности је испуњен,  $F_s \geq 1,5$ , те је модел падине са уведеним био-шиповима стабилан. Разлика у кохезији „био-армираног“ земљишта за наведена два прорачуна износ 2,8 КПа, док разлика у фактору сигурности износи 0,19.

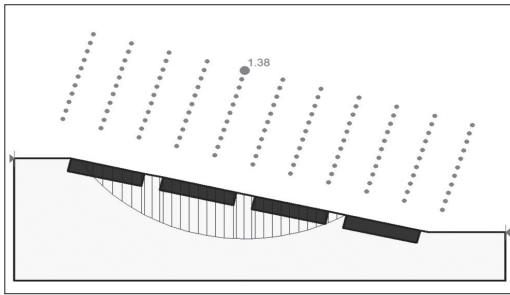
Група 3, биљне врсте са тањирастим кореновим системом, кроз прорачун анализирана је једна врста *Picea sitchensis*. Вредност фактора сигурности износи  $F_s=1,38$  (слика 6), услов стабилности није испуњен,  $F_s \geq 1,5$ , односно модел падине није стабилан.



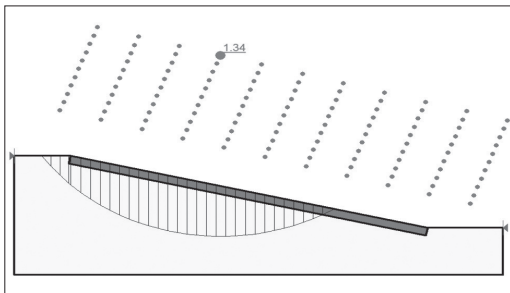
**Слика 4:** Анализа стабилности модела падине применом а) *Pseudotsuga menziesii* и б) *Alnus glutinosa* (извор: аутор)



**Слика 5:** Анализа стабилности модела падине применом а) *Pinus contorta* и б) *Pinus halepensis* (извор: аутор)



Слика 6: Анализа стабилности модела падине применом *Picea sitchensis* (извор: аутор)



Слика 7: Анализа стабилности модела падине применом травне смеше (извор: аутор)

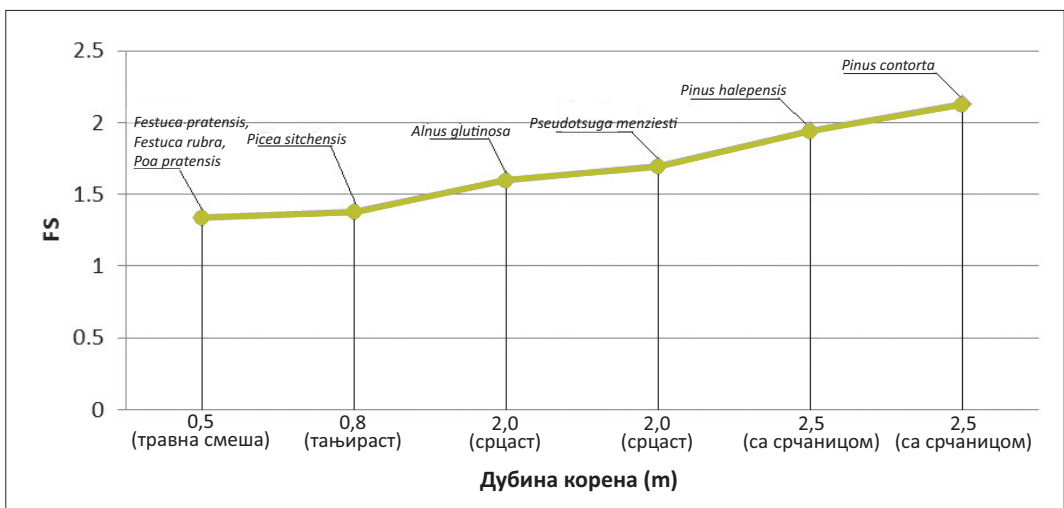
Анализом стабилности модела падине применом травне смеше из групе 4. (*Festuca pratensis*, *Festuca rubra*, *Poa pratensis*) добијен је фактор сигурности  $F_s=1,34$  (слика 7), услов ста-

билности није испуњен,  $F_s \geq 1,5$ , што указује да је падина нестабилна.

Увођењем у анализу стабилности падине, врсте са тањирастим и недефинисаним кореновим системом (травне смеше) није се постигла задовољавајућа стабилност.

Поређењем добијених фактора сигурности, у условима без вегетације и са применом вегетације може се утврдити да применом вегетације долази до повећања фактора сигурности. Увођењем у прорачун „био-шипове“ врста са срцастим обликом кореновог система постиже се повећање фактора сигурности за 0,38 (*Pseudotsuga menziesii*) односно 0,28 (*Alnus glutinosa*). Код врста са обликом кореновог система изражена срчаница постиже се повећање фактора стабилности од 0,81 (*Pinus contorta*) односно 0,62 (*Pinus halepensis*). Утврђено је незнатно повећање фактора сигурности од 0,06 за врсту са тањирастим и повећање од 0,02 за недефинисани облик кореновог система, у односу на фактор сигурности модела падине без вегетације.

Анализом облика кореновог система у функцији стабилности, највећи утицај је вегетације која има корен са израженом срчаницом, следи са срцастим кореном, док су тањираст и недефинисан корен имали најмањи утицај на стабилност (слика 8). Добијени резултати прорачуна стабилности указују да већу улогу у по-



Слика 8: Корелација фактора сигурности и дубине, облика кореновог система (извор: аутор)

већању фактора сигурности има облик и дубина кореновог система од самих вредности кохезије „био-армираног“ земљишта. Holsworth (2014) је добио сличне резултате анализом стабилности падине утицајем различитих типова кореновог система.

## ЗАКЉУЧАК

Изградњом и реконструкцијом саобраћајница, падине поред пута остају незаштићене од утицаја ерозије, што узрокује гравитационо покретање земљишта, нарочито површинску ерозију и формирање клизишта.

За спречавање ерозионих процеса и стабилизацију нестабилног терена могу се примењивати правилно одабране дрвенасте, жбунасте и травне врсте. Одабир се мора вршити на основу услова средина, карактеристика врсте и реда садње. За санацију и настанак клизишта, дубине до 3 метара, велику улогу у одабиру врсте игра облик и дубина распрострањања кореновог система.

Анализом стабилности задатог модела падине поред пута, без утицаја вегетације, доби-

јен је фактор сигурности  $F_s=1,32$  чиме није испуњен услов стабилности  $F_s \geq 1,5$ . Увођењем вегетационих група у прорачун стабилности модела падине добијени су резултати у опсегу од  $F_s=1,34$  до  $F_s=2,13$ . Може се закључити да се применом свих вегетационих група повећава стабилност падине.

За потребе одбране саобраћајница, проналажењем оптималног облика кореновог система као алтернативног решења за стабилизацију падина поред путева, највећи утицај на стабилност имају Група 2.- вегетација која има корен са израженом срчаницом ( $F_s=2,13$ ,  $F_s=1,94$ ), следи Група 1.- са срцастим кореном ( $F_s=1,7$ ,  $F_s=1,6$ ), док су група 3, тањирасти корен, ( $F_s=1,38$ ) и група 4, недефинисани коренов систем ( $F_s=1,34$ ) дале најмање вредности.

Дубина и облик кореновог система, у односу на вредности кохезије „био-армираног“ земљишта ( $c_s$ ), имају највећи утицај на стабилност модела падина.

Извршеним анализама провере стабилности падине може се закључити да применом вегетације на нестабилним и условно стабилним падинама долази до повећања фактура сигурности.

## STABILITY ANALYSIS OF SLOPES ALONG ROADS IN BIO-REINFORCED SOIL CONDITIONS

Mladen Marković, PE, „Roads of Serbia“, Belgrade, Serbia, mladen.markovic@putevi-srbije.rs  
Nikola Živanović, University of Belgrade Faculty Forestry  
Grozdana Gajić, University of Belgrade Faculty Forestry

**Abstract:** Root system has ability to stabilize slopes, improving physical and mechanical properties of soil on which it develops. Morphology and tendency of root system to compose soil particles into one monolithic mass, which we call bio-reinforced soil, contribute to increasing the resistance of soil to shearing. In this paper, is presents a comparative analysis of slope stability along roads without and with the influence of root system. The analyzes were made for the needs of defense of roads, finding most optimal types of root system as an alternative solution for stabilization of the slopes along roads. On the slope model was simulated influence of four groups of vegetation, based on morphology of root system (plate, heart, tap and undefined). For each selected species, value of root cohesion ( $c_r$ ) has been adopted. Software for geotechnical numerical modeling-GeoStudio 2007, was used for all slope stability analyzes. Analyzing stability of the slope model without influence of vegetation, slope is unstable. By calculating stability of slope model with vegetation groups, an increase in stability of the slope model is achieved. The greatest influence on stability of the slope model has group 2.- vegetation with a tap root system, followed by group 1. - with a heart root, while group 3, plate root, and group 4, undefined types of root system, gave at least the values. The results from this paper, represent a contribution to choice of solutions for stabilization of slopes along roads and the prevention of erosion processes.

**Keywords:** root system, root cohesion, vegetation, slope stability, roads protection

## INTRODUCTION

Building activity during the construction of roads, often violates the natural balance of slopes along roads, which manifests it self in creation of various contemporary exogenous processes (Figure 1). Slopes along roads, after construction, remain unprotected from effects of erosion, which causes gravitational movement of soil and collapse of technical objects. Swanson and Dyrness (1975), by analyzing collected data on forests, revealed apparent increase in appearance of number of landslides as a result of clean cuts and roads construction. Vegetation is an effective solution for stabilization of slopes, eliminating or mitigating erosion process (Abe and Ziemer 1991, Lewis 2000, Greenwood et al., 2006, Mao et al., 2012). Resistance of soil, with a stable vegetation system, can be increased by 50-70% or significantly reduced with clean cutting on slopes (Norris et al., 2008). Vegetation acts as a protective barrier

between soil and agents (biotic and abiotic) that stimulate degradation processes. Effectively protect against water and eolian erosion as well from wind gusts and snowdrifts. Root system improves physical and mechanical parameters of soil by its growth and development (increase cohesion, bulk density, internal friction angle) (Wu et al., 1979, Wo and Watson 1998, Greenwood et al., 2006, Гајић et al., 2013), which increases stability of slope. Diversity and variation of angle of root system increase soil resistance to shear (Abe and Ziemer 1991; Mickovski et al., 2007). Root system has tendencies to compose soil particles into one monolithic mass and thus contribute to increasing resistance of soil, primarily cohesion. Plant species have three main types of the root system (Köstler 1968): plate, heart and tap. Plate root system is developed shallow in surface of soil, has strong lateral roots and fine vertical roots.





**Figure 1:** Slope sliding after reconstruction of the road section Krupanj-Ljubovija (source: author)

„Bio-reinforcement” of soil, the species with the heart root system, significantly influences on reduction and elimination process of inside erosion and filtration forces in loosely unconsolidated soil, creating a specific and coherent biologically reinforced mass, that is more resistant to tangential forces and formation of landslides (Гајић 2014). Tap root system has developed morphological development, in analysis of stability and resistance to sliding is introduced as anchored group of „bio-piles”, provided root system is under shear plane in stable soil. Influence of root in calculating slope stability is expressed through root cohesion (c) (Mao et al., 2012). Research has shown that with planting and maintenance of vegetation on a potential sliding surface, factor of safety can be increased up to 10 % (Norris and Greenwood 2006).

In this paper, are presents analyzes and different scenarios of stability of slopes along roads without and with the influence of the root system. The analyzes were made for needs of defense of roads, finding most optimal types of root system as an alternative solution for stabilization of slopes along the roads.

**MATERIAL AND METHODS**

Analysis of stability of slope with influence and without the influence of root system was carried out on the prepared model of terrain with given dimensions and physical-mechanical values of soil (Table 1). The model is formed from one layer of soil with the values of physical-mechanical parameters for saturated soil condition, when resistant of soil characteristics are at least. Formation of slopes along the roads is often done only by filling and planning without soil compaction, resulting in a significant reduction of resistant soil characteristics.

Software for geotechnical numerical modeling-GeoStudio 2007, was used for all slope model stability analyzes, by method Morgenstern and Price (1965). The method is basically analytical with an arbitrary shear plane (circularly cylindrical), which analyzes the balance conditions for each lamella and entire main body. For soil layer in the given model, parameters of soil resistance to shear and bulk densitie are introduced. Software considers more potential shear planes in given model and provides a critical shear plane with the lowest factor of safety using following formula.

$$F_s = \frac{\sum\{c+l(N-u)\tan\phi\}}{\sum W \sin\alpha} \dots\dots\dots [1]$$

Where is: F<sub>s</sub>- factor of safety, c- cohesion, N- normal forces, u – pore pressure, φ- internal friction angle, W sinα- shear (tangential) force, l- length of slice, α- angle of shear plane

Stability condition is fulfilled when value of factor of safety is F<sub>s</sub> ≥ 1.5, if the value is lower, condition is not fulfilled, slope is unstable. In this paper, are presents shear planes with lowest factor of safety for adopted conditions of the slope model.

From aspect of vegetation influenced on stability of slope model, root system was analyzed as a slice with a single pile, respectively anchored „bio-

**Table 1:** Dimensions and soil physical-mechanical values of slope model

| Length (L) | Height (H) | Angle (α) | Bulk densitie (γ)    | Cohesion (c)        | Internal friction angle (φ) |
|------------|------------|-----------|----------------------|---------------------|-----------------------------|
| 19 m       | 7,5 m      | 13°       | 10 kN/m <sup>3</sup> | 5 kN/m <sup>2</sup> | 6,5°                        |

(source: author)

pile". Shape and dimensions of root system were adopted based on the morphology of selected species (Kokutse et al. 2006., Figure 2). In slices with „bio-pile“ influence of root system is introduced into calculation by increasing cohesion for  $c_r$ , which is represented by Mohr-Coulomb's equation of shear stress (Wo 2013.)

$$\tau = c + c_r + (\sigma - u) \cdot \tan \varphi \dots\dots\dots [2]$$


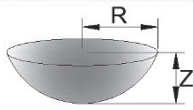

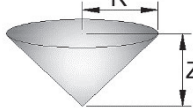

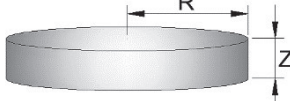
Where is:  $\tau$ - tangential stresses,  $c$ - soil cohesion,  $c_r$ - root cohesion,  $\sigma$ - normal stress,  $u$ - pore pressure,  $\varphi$ - internal friction angle

Bio-reinforcement of soil can increase stability in shallow landslides 2-3 m deep, while in deeper landslides, which are outside root system zone, this influence is negligible (Norris et al., 2008). Values of root cohesion ( $c_r$ ) and root types for selected species are shown in Tables 2. Dimensions of root system,  $R$  - radius,  $Z$  – depth and  $P$ - surface with root system, which have been adopted for purposes of this paper, are shown in Table 3. The use of „bio-piles“ in the slope model was carried out depending on the dimensions of geometric approximation of root system, in order to avoid overlapping and to comply with the minimum conditions of tree planting.

**Table 2:** Values of selected species  $c_r$  (Norris, Greenwood 2006) and shape of root system (Köstler 1968)

| Name of species   | Root types | $c_r$ - root cohesion (KPa) | Author                   |
|---|------------|-----------------------------|--------------------------|
| <i>Pseudotsuga menziesii</i>  | Heart      | 17,5                        | Burroughsand Thomas 1977 |
| <i>Alnus glutinosa</i>  | Heart      | 12,0                        | Endoand Tsuruta1969      |
| <i>Pinus contorta</i>   | Tap        | 21,0                        | Ziemer 1981              |
| <i>Pinus halepensis</i>   | Tap        | 18,2                        | VanBeek et al., 2005     |
| <i>Picea sitchensis</i>   | Plate      | 5,9                         | Wu et al., 1979          |
| * <i>Festuca pratensis</i> ,<br><i>Festuca rubra</i> , <i>Poa pratensis</i> | Undefined  | 13,4                        | Tobias 1995              |

\*Grass mix

| Облик корена | Морфологија корена  | Геометријска апроксимација   |
|--------------|---|--|
| Срцаст       |  |  |
| Срчаница     |  |  |
| Тањираст     |  |  |

**Figure 2:** Geometric approximation of root system (Kokutse et al. 2006)

**Table 3:** Dimensions of root system adopted for calculation

| Root types | Dimensions of root system              |
|------------|--|
| Heart      | R=2 m, Z=2 m, P=5 m <sup>2</sup>       |
| Tap        | R=1,5 m, Z=2,5 m, P=4,7 m <sup>2</sup> |
| Plate      | R=2 m, Z=0,8 m, P=3,2 m <sup>2</sup>   |
| Undefined  | Z=0,5 m                                |

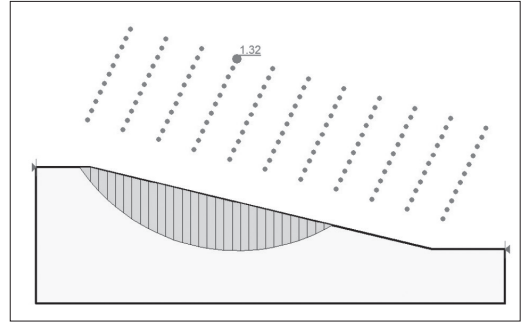
(source: author)

On the slope model, was simulated influence of four groups of vegetation, based on the shape of root system, and for each species is adopted value of root cohesion ( $c_r$ ). The slope model was analyzed with the following vegetation groups:

- **Group 1.** species with heart root system (*Pseudotsuga menziesii*, *Alnus glutinosa*)
- **Group 2.** species with tap root system (*Pinus contorta*, *Pinus nigra*)
- **Group 3.** species with plate root system (*Picea sitchensis*)
- **Group 4.** species with undefined root system (*Festuca pratensis*, *Festuca rubra*, *Poa pratensis*)

**RESULTS AND DISCUSSION**

Construction of roads in hilly-mountainous area requires cutting of slopes whose stability is questionable after a change in geometry of slope and disturbance ratio of stress in soil. After road construction has been completed, slopes along road are formed of excess of excavated soil which is in a loose condition, often without any compac-

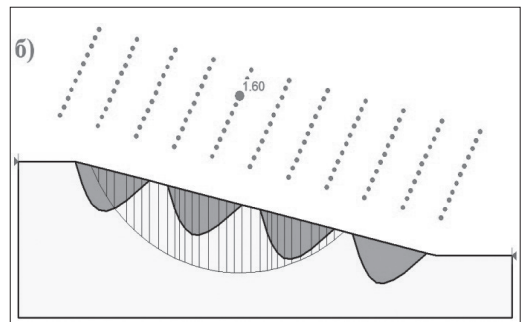
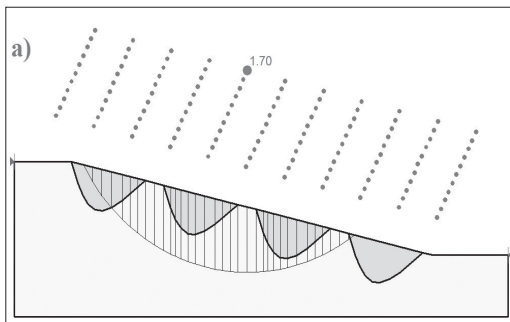


**Figure 3:** Analysis of stability of the slope model without influence of vegetation (source: author)

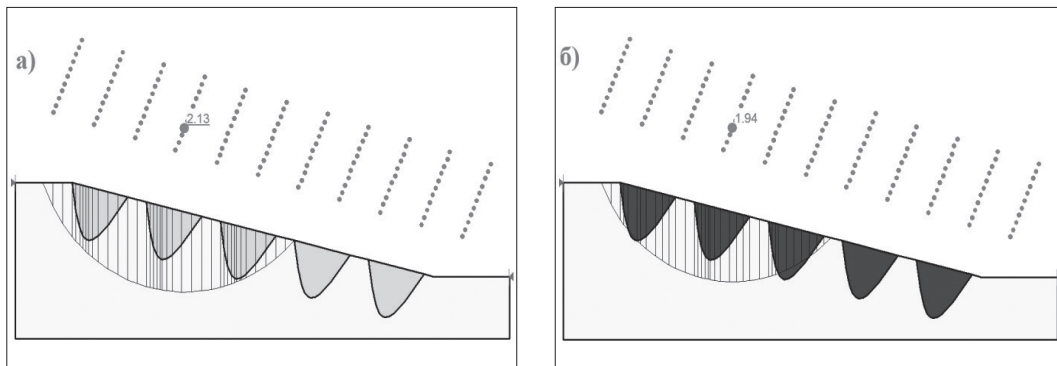
tion, because of that values of shear resistance parameters are significantly reduced compared to the natural ones.

By analyzing stability of the slope model without influence of vegetation with adopted soil parameter values, factor of safety  $F_s = 1.32$  was obtained, which did not fulfill stability condition  $F_s \geq 1.5$  (Figure 3), the slope model is unstable.

Vegetation with heart root system, group 1, it was used in calculation of slope stability, values of factors of safety for the two species are shown. Using species *Pseudotsuga menziesii* factor of safety is  $F_s=1.70$  (Figure 4, a.). The second used species is *Alnus glutinosaca* which gave factor of safety  $F_s=1.60$  (Figure 4, b.). By using both species with heart root system, satisfactory stability is achieved. Considering types and dimensions of root system of both species are same, difference in value of root cohesion from 5,5 KPa (Table 2) has influenced the increase factor of safety for 0,10, in favor of species *Pseudotsuga menziesii*.



**Figure 4:** Analysis of the slope model stability using a) *Pseudotsuga menziesii* and b) *Alnus glutinosa* (source: author)



**Figure 5:** Analysis of the slope model stability using a) *Pinus contorta* and b) *Pinus nigra* (source: author)

Using species with tap root system from group 2, stability of the slope model was analyzed, by using species *Pinus contorta* value of factor of safety  $F_s = 2.13$  was obtained (Figure 5, a.), whereas with species *Pinus halepensis*, factor of safety is  $F_s = 1.94$  (Figure 5, b.). For both used species factor of safety is filled,  $F_s \geq 1.5$ , the slope model with „bio-piles” is stable. Difference in root cohesion for these two mentioned calculation is 2,8 KPa, while the difference in factor of safety is 0.19.

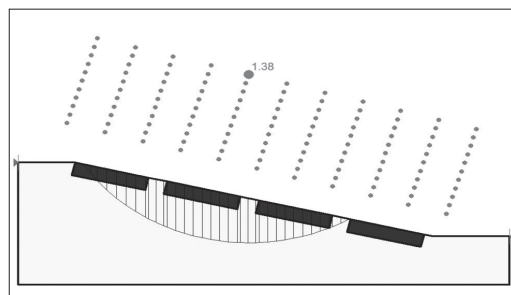
Group 3, species with plate root system, through calculation it was analyzed one species *Picea sitchensis*. Value of factor of safety is  $F_s = 1.38$  (Figure 6), stability condition is not fulfilled,  $F_s \geq 1.5$ , the slope model is unstable.

Analysis stability of the slope model using grass mixture from group 4. (*Festuca pratensis*, *Festuca rubra*, *Poa pratensis*) obtained factor of safety is  $F_s = 1.34$  (Figure 7), stability condition is not fulfilled,  $F_s \geq 1.5$ , the slope model is unstable.

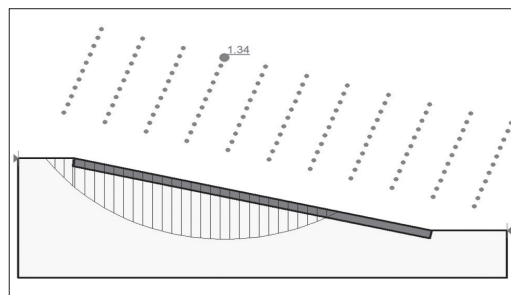
Analysis stability of the slope model, using species with plate and undefined root system (grass mix) satisfactory stability has not been achieved.

Comparing obtained factors of safety, in conditions without vegetation and with vegetation, it can be determined that use of vegetation increases factor of safety. „Bio-piles” with heart root system increase factor of safety for 0.38 (*Pseudotsuga menziesii*) and 0.28 (*Alnus glutinosa*). Species with tap root system increase factor of safety for 0.81 (*Pinus contorta*) and 0.62 (*Pinus halepensis*). Lower increases factor of safety was obtained for 0.06, species with plate root system, and for 0.02, undefined root system in relation to factor of safety of the slope model without vegetation.

Analysis types of root system, greatest influence of vegetation is with tap root, follow heart root, plate and undefined root system have the least influence on stability (Figure 8). Obtain results indicated that the greater role in increasing factor of safety has tapes and depth of root system, from value root cohesion. Holsworth (2014) obtained similar results by analyzing stability of slope by influence of different types of root system.



**Figure 6:** Analysis of slope model stability using *Picea sitchensis* (source: author)



**Figure 7:** Analysis of slope model stability using grass mix (source: author)

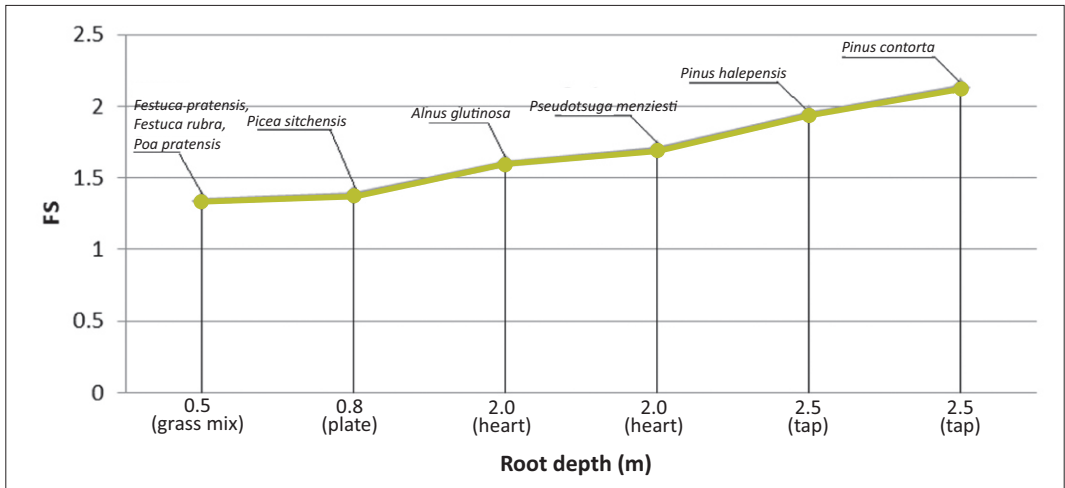


Figure 8: Correlation of FS and depth, tapes of root system (source: author)

## CONCLUSION

Construction and reconstruction of roads, slopes along road remain unprotected from effects of erosion, which causes gravitational movement of soil, especially surface erosion and landslide formation.

Properly selected tree, shrubs and grass species can be used to prevent erosion processes and stabilize unstable terrain. The selection must be based on conditions of environment, characteristics of species and plan of planting. For rehabilitation and formation of landslides, depths up to 3 meters, the major role in selecting species have tapes and depth of root system.

Analysis stability of given slope model along road, without influence of vegetation, factor of safety  $F_s = 1.32$  was obtained, which did not fulfill stability condition  $F_s \geq 1.5$ . Using vegetation groups in calculations stability of the slope model, results were obtained in range from  $F_s = 1.34$  to  $F_s = 2.13$ . It can be concluded that the use of all vegetation groups increases the stability of slope.

For needs of defencing roads, finding the most optimal form of root system as an alternative solution for the stabilization of slopes along road, the greatest influence on stability has group 2.- vegetation with tap root ( $F_s=2.13$ ,  $F_s=1.94$ ), followed by group 1.- with heart root ( $F_s=1.7$ ,  $F_s=1.6$ ), while group 3, plate root, ( $F_s = 1.38$ ) and group 4, undefined root, ( $F_s = 1.34$ ) gave at least values.

Depth and tapes of root system, relative to value of root cohesion ( $c_r$ ), have greatest influence on stability of the slope model.

Presented analyzes of slope stability can be concluded that use of vegetation on unstable and conditionally stable slopes leads to an increasing factor of safety.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Abe K. and Ziemer R.R. (1991): "Effect of Tree Roots on Shallow-Seate dLandslides", USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-130.
- Greenwood J.R., Norris J.E., Wint J. (2006): "Site investigation for the effects of vegetation on ground stability", Geotechnical and Geological Engineering, 24: p. 467–481, Springer, DOI 10.1007/s10706-005-4140-0
- Kokutse N., Fourcaud T., Kokou K., Neglo K., Lac P. (2006): „3D Numerical Modelling and Analysis of the Influence of Forest Structure on Hill“, Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides, Slopes Stability 561-567.
- Köstler JN, Brückner E, Bibelriether H (1968): „Die Wurzelnder Waldbäume“,Verlag Paul Parey, Hamburg&Berlin.
- Lewis L. (2000): „Soil Bioengineering An Alternative for Roadside Management“, San Dimas Technology&Development Center San Dimas, California

- Mao Z., Saint-Andre L., Genet M., Mine F.X., Jourdan C., Rey H., Courbaud B., Stokes A. (2012): "Engineering ecological protection against landslides in diverse mountain forests: Choosin cohesion models", *Ecological Engineering* 45, p 55–69 doi:10.1016/j.ecoleng.2011.03.026
- Morgenstern N.R., Price V.E. (1965): "The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces", *Géotechnique*, 15(1), p 79–93. doi:10.1680/geot.1965.15.1.79
- Norris JE, Greenwood JR (2006): „*Assessing the role of vegetation on soil slopes in urban areas*“, IAEG2006, Geological Society of London, Paper no. 744, 1-12.
- Norris JE, Stokes A, Mickovski SB, Cammeraat E, Beek R, Nicoll BC, Achim A. (2008): „*Slope stability and erosion control: Ecotechnological solution*“, Springer, The Netherlands.
- Swanson F.J., and Dyrness C.T. (1975): "Impact of clear-cutting and road construction on soil erosion by landslides in the western Cascade Range, Oregon", *Geology* 3, p 393-396, doi: 10.1130/0091-7613
- Wo T.H., (2013): "Root reinforcement of soil: review of analytical models, test results, and applications to design", *Can. Geotech. J.* 50, p. 259–274 dx.doi.org/10.1139/cgj-2012-0160
- Wo T.H., Watson A., (1998): "In situ shere tests of soil blocks with roots", *Can. Geotech. J.* Vol 35, p. 579–590
- Wu TH, McKinnell WP, Swanston DN (1979): „*Strength of treer oot and landslides on Prince of Wales Island*“, Alaska.
- Гајић Г. (2014): „*Санација клизишћа*“, Шумарски факултет у Београду, материјал за припрему испита.
- Гајић Г., Дамњановић В., Миљановић И., Живановић Н., Мирјана С., Павловић М. (2013): „Упоредна анализа ефеката биолошког „армирања“ и њихов утицај на унутрашњу ерозију“, *Ерозија*, Универзитет у Београду, Шумарски факултет, 39, 0350-9648.

