

## UTICAJ PROMENE NAGIBA KOSINE TRUPA PUTA NA POVRŠINU EKSPROPRIJACIJE I KUBATURU MATERIJALA ZA IZRADU NASIPA

**Doc. dr Vladan Ilić<sup>1</sup>, master inž. građ.**

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, [vilic@grf.bg.ac.rs](mailto:vilic@grf.bg.ac.rs)

**V. prof. dr Dejan Gavran, dipl.građ.inž.**

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, [gavran@eunet.rs](mailto:gavran@eunet.rs)

**Doc. dr Sanja Fric, dipl.građ.inž.**

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, [sfric@grf.bg.ac.rs](mailto:sfric@grf.bg.ac.rs)

**Istraživač-saradnik Filip Trpčevski, master inž. građ.**

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, [ftpcjevski@grf.bg.ac.rs](mailto:ftpcjevski@grf.bg.ac.rs)

**Istraživač-saradnik Stefan Vranjevac, master inž. građ.**

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, [svranjevac@grf.bg.ac.rs](mailto:svranjevac@grf.bg.ac.rs)

**Asis. Miloš Lukić, master inž. građ.**

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, [mlukic@grf.bg.ac.rs](mailto:mlukic@grf.bg.ac.rs)

**Nikola Milovanović, master inž. građ.**

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, [milovanovic\\_nikola@outlook.com](mailto:milovanovic_nikola@outlook.com)

**Rezime:** Izbor optimalnog nagiba kosine trupa puta, naročito na deonicama sa visokim nasipima ili dubokim usecima, jedan je od najtežih zadataka za projektanta puta. Iako se, zbog sve većih troškova eksproprijacije i ograničenog slobodnog prostora, uvek teži što većem nagibu kosina, ograničavajući faktor predstavljaju inženjersko-geološke karakteristike terena na kome se gradi put i dimenzije samog objekta, pre svega projektovana visina nasipa, odnosno dubina useka. Na kosinama većeg nagiba se, osim problema obezbeđenja stabilnosti, često javlja pitanje zaštite od erozije i očuvanja vegetacionog pokrivača. U radu je na primeru idealizovanog nasipa fundiranog na kontinualnim padinama terena različitih nagiba pokazano kako promena nagiba kosine utiče na veličinu površine eksproprijacije i kubature materijala potrebnog za gradnju nasipa. Posebno je analizirana primena potpornih zidova za skraćivanje kosina i smanjenje površine eksproprijacije, kao i geosintetika za izradu potpornih zidova od armirane zemlje. Poređenjem zidova od armirane zemlje i konvencionalnih betonskih potpornih zidova, pokazano je da su sa aspekta troškova i brzine gradnje, uticaja na životnu sredinu i uklanjanja u postojeću prirodnu okolinu, potporni zidovi od armirane zemlje znatno prihvatljivije rešenje. Takođe, primenom potpornih zidova od armirane zemlje za izgradnju rampi denivelisanih raskrsnica, površina eksproprijacije smanjuje se od 1.5 do 2 puta, a kubature materijala za nasipe za više od 80%.

**Ključne reči:** nagib kosine, površina eksproprijacija, kubatura nasipa, vegetacioni pokrivač, potporni zidovi, geosintetici.

## IMPACT OF ROAD EMBANKMENT SLOPE CHANGE ON LAND ACQUISITION AND EARTHWORKS VOLUME

**Abstract:** The road embankment slope, especially on the road sections on high fills or in deep cuts, represents one of the most challenging tasks for road designer. Due to ever-increasing expropriation costs and limited available space, the steeper possible embankment slope is always welcome. But the limiting factors are local geology, geotechnical characteristics of the slopes to be constructed, as well as shapes and grades of slopes in concern. Besides providing for the mechanical stability, erosion control and preservation of vegetation cover must be considered, especially on steep slopes. This paper presents example of a virtual embankment constructed on uniform terrain surface with variable grades and discusses how the slope intensity affects the area to be acquisitioned and earthwork volumes. The paper also discusses deployment of walls and reinforced earth as a radical solution for reducing slope dimensions. By comparing reinforced earth and conventional concrete retaining walls, it was shown that, from the aspect of costs and speed of construction, environmental impact and compatibility with the existing natural environment, reinforced earth retaining walls are a much more acceptable solution. In addition, by applying reinforced earth retaining walls as interchange ramps embankment support, expropriated surface is reduced by 1.5 to 2 time, and the volumes of fill material by more than 80%.

**Keywords:** slope, land acquisition, earthworks volume, vegetation cover, retaining walls, geosynthetics.

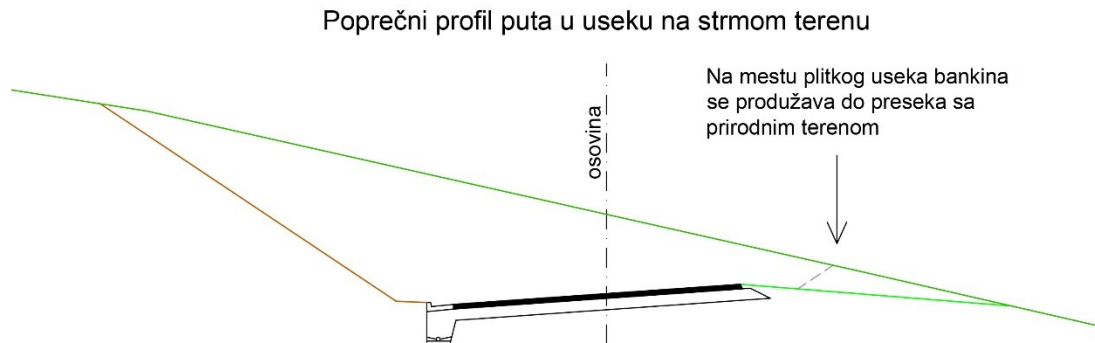
---

<sup>1</sup> Vladan Ilić: [vilic@grf.bg.ac.rs](mailto:vilic@grf.bg.ac.rs)

## 1. UVOD

Za stabilnost trupa puta, kao i cele putne konstrukcije, pravilno projektovane i izvedene kosine igraju vrlo značajnu ulogu. Takođe, pitanje nagiba kosine usko je vezano i za pejzažno uklapanje trupa puta u okolni teren, kao i celokupni vizuelni doživljaj putnog prostora s pozicije oka vozača. Štaviše, oblikovanje putnih kosina, njihova dužina i nagib direktno utiču na površinu ekspropisanog zemljišta i kubature materijala za izradu nasipa, odnosno kubature materijala iskopanog u useku, što predstavlja ekonomski i egzistencijalni problem od presudne važnosti za životnu sredinu područja kroz koje se prostire put.

Pored zadovoljenja uslova stabilnosti, prilikom oblikovanja kosina, treba poštovati i dodatne preporuke definisane u domaćim standardima [L.1]. Generalno pravilo je da manjim visinama trupa puta, kada je  $h_k \leq 2.00\text{m}$ , odgovaraju blaži nagibi kosina. S tim u vezi, u prostoru najprirodnije deluju one trase čije kosine umesto jednolikog nagiba imaju jednake dužine, što zahteva mnogo veće angažovanje od strane izvođača radova. Primenom nesimetričnih nagiba kosina poboljšava se optičko vođenje u oštrijim krivinama u useku, tako što se na unutrašnjoj strani krivine nagib kosine ublaži, a na spoljašnjoj strani krivine nagib poveća. Na padinskim trasama sa većim nagibima terena plitki nasipi i useci, koji se obično javljaju na jednom kraju profila trupa puta, najbolje se uklapaju u teren ako se bankina, odnosno kruna puta s niže strane, samo proširi do prirodnih kosina (Slika 1).



**Slika 1.** Produženje bankine do preseka sa terenom u plitkom useku na strmijem terenu

Najpoželjniji nagibi kosina sa likovnog aspekta i estetskog utiska geometrije trupa puta su  $1:n \leq 1:2$ . Takođe, nagib kosina od 1:2 u našim klimatskim uslovima najpogodniji je za nasipe od sitnozrnog koherentnog materijala (razne vrste glina) i od nekoherentnog materijala, tj. mekih stenskih masa kao što su fliš, lapor i druge stene sedimentnog porekla. Ako se nasip gradi od lošeg zemljanog materijala veće stišljivosti, prema dosadašnjim iskustvima iz prakse, za preporuku je da se ne ide sa nagibom kosina strmijim od 1:3. Za nasipe od kamenog materijala preporučeni nagib je 1:1.5, a ako su takvi nasipi ojačani kamenom oblogom, njihove kosine mogu imati i nagib od 1:1. Na kontaktu kosine sa prirodnim terenom izvodi se zaobljenje sa tangentom veličine 2.00 do 3.00 [m] (Slika 2). Pored nagiba, bitan parametar je visina nasipa, odnosno dubina useka, od kojeg direktno zavisi dužina same kosine i površina eksproprijacije. Što je kosina duža, više je podložna riziku od pojava nestabilnosti izazvanih procesom erozije.

Visina kosine	$h \geq 2,0 \text{ m}$	$h < 2,0 \text{ m}$ ( $< 1,5$ ako je $n=2$ )
PUT NA NASIPU		
PUT U USEKU		
Stand. nagib	1 : 1,5 (1:2)	$k = 3,0 \text{ m}$
Nagib kosine	1 : n	$k = 2 n$
Duž. tangenti	3,0 m	1,5 h

**Slika 2.** Oblikovanje kosina i uklapanje puta u okolni teren (Izvor: L.1)

Najstrmiji nagib sa gledišta održavanja travnatog pokrivača je 1:1.5. U nedavno sprovedenim istraživanjima [L.2] na Pijemontskom platou, odnosno, visoravni između Apalačkih planina i Atlantskog okena na jugoistoku SAD-a, testirano je kako višegodišnje trave sa dubokim korenjem utiču na smanjenje erozije i stabilizaciju kosina. Testirane biljke sađene su na kosinama nagiba od 25° do 30°, koji je nešto blaži od nagiba 1:1.5 (33.7°). Od svih testiranih biljaka za stabilizaciju kosina najbolje se pokazao vetiver. Vetiver (*Vetiveria zizanioides*) je vrsta višegodišnje trave sa dubokim korenovim sistemom koja, za razliku od ostalih trava, raste na dole, stvarajući gusti splet korenja u zemlji, što ga čini idealnim za sprečavanje erozije i stabilizaciju tla. Koreni vetivera rastu u velikim grozdovima pod zemljom. Biljka je živopisne zelene boje, raste ravno i vertikalno i pripada porodici trava *Poaceae*. U našem klimatskom području se vetiver, koji potiče iz Indije, Indonezije i Šri Lanke, još uvek smatra egzotičnom biljnom vrstom.

Za stabilizaciju kosina i zaštitu od erozije za sve objekte linijske saobraćajne infrastrukture opšteprihvaćena je primena geosintetika, od kojih se na putnim objektima najviše koriste geotekstil, geogridovi, geomreže i geomembrane. Posebnu pažnju zahtevaju područja navoza na prilazu mostovskim konstrukcijama, gde se često javljaju i nasipi visine preko 6.0 [m]. Za stabilizaciju kosina trupa puta na tim prilaznim konstrukcijama u poslednjoj deceniji sve više se koriste trodimenzionalna saća ili 3D geosintetici u formi ćelija (Slika 3), najčešće heksagonalnog oblika, koje se polažu preko kosina, pune zemljanim materijalom i kasnije zatravljaju. Primenom ovih 3D geoćelija moguće je zasaditi i održati travnati pokrivač i na kosinama nagiba strmijeg od 1:1, tačnije čak do nagiba od 70°, prema katalogima pojedinih proizvođača ovih materijala [L.3].



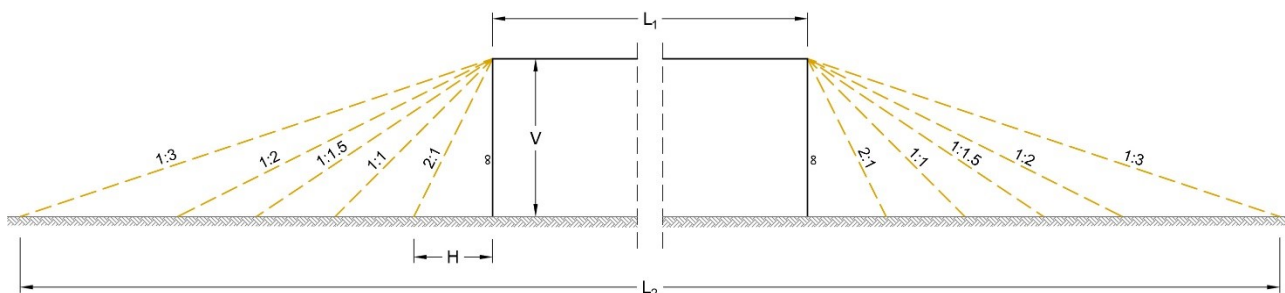
**Slika 3.** Stabilizacija kosina na prilaznoj konstrukciji mosta primenom trodimenzionalnih saća (Izvor: L.4)

Za stabilnost i dugotrajnost kosina stabilizovanih biljnim zasadima od ključne važnosti je redovno održavanje i mehaničko obrezivanje (šišanje) u predviđenim rokovima, pre svega zbog sprečavanja nekontrolisanog rasta agresivnih višegodišnjih vrsta (ostruga, grabić, gavez). Primena herbicida umesto mehaničkog obrezivanja za uništavanje brzorastućih i agresivnih vrsta na površinama kosina dosada se nije pokazala kao dobro rešenje, pre svega zbog zagađenja zemljišta, što potvrđuju i konkretna istraživanja [L.5].

## 2. ODNOS NAGIBA KOSINE I POVRŠINE EKSPROPRIJACIJE

Nagib kosina direktno utiče na veličinu eksproprijacije, odnosno, na razmeru ukupne planirane investicije za izgradnju ili rekonstrukciju puta. Na Slici 4 prikazan je reprezentativni primer trupa puta u nasipu sa različitim

nagibima kosina u rasponu od 1:3 do  $\infty$  (vertikalna kosina od 90°). Visina nasipa je označena sa  $V$ , širina krune puta na nivou planuma sa  $L_1$ , a širina kontaktne površine baze nasipa sa prirodnim tlom, tj. potrebna širina eksproprijisanog zemljišta, sa  $L_2$ . Posmatran je samo idealizovan slučaj kada je površina planuma puta horizontalna, kao i teren na kome se nasip gradi. Naravno, u praksi u širinu pojasa eksproprijacije puta ulaze svi fizički elementi prostorne strukture profila puta od segmentnih i/ili zaštitnih kanala za odvodnju, preko pratećih nekategorisanih poljskih i/ili šumskih puteva, do saobraćajne i putne opreme i ograde kod autoputa. U Tabeli 1 i na dijagramu na Slici 5 pokazano je kako smanjenje nagiba kosine utiče na širenje baze nasipa  $L_2$ , odnosno na uvećanje površine eksproprijacije i kubature nasipa za deonicu puta proizvodnje dužine  $S$ .

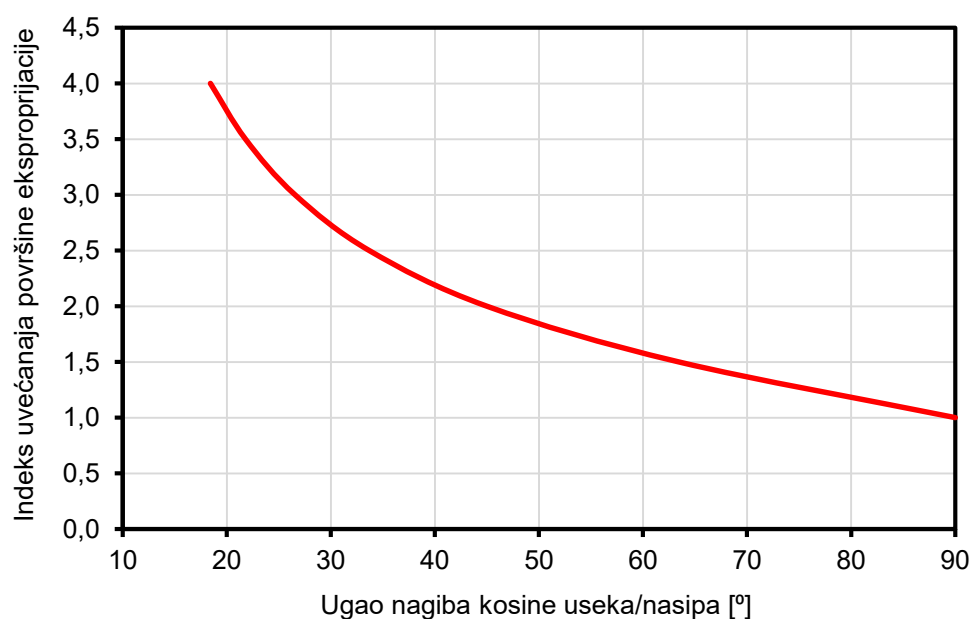


**Slika 4.** Rast površine eksproprijacije sa smanjenjem nagiba kosina na primeru idealizovanog nasipa

**Tabela 1.** Indeksi uvećanja površine eksproprijacije i kubature nasipa sa smanjenjem nagiba kosine

Nagib kosine		Dužina baze $L_2$ [ $\times L_1$ ]	Površina nasipa $F$ [ $\times L_1 \cdot V$ ]	Kubatura nasipa dužine $S$ [ $\times S \cdot L_1 \cdot V$ ]	Površina eksproprijacije nasipa dužine $S$ [ $\times L_1$ ]
Odnos V:H	Ugao [°]				
$\infty$	90.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2:1	63.43	1.50	1.25	1.25	1.50
1:1	45.00	2.00	1.50	1.50	2.00
1:1.5	33.69	2.50	1.75	1.75	2.50
1:2	26.57	3.00	2.00	2.00	3.00
1:2.5	21.80	3.50	2.25	2.25	3.50
1:3	18.43	4.00	2.50	2.50	4.00

**Zavisnost nagiba kosine nasipa i površine eksproprijacije**



**Slika 5.** Dijagram zavisnosti nagiba kosine nasipa i površine eksproprijacije - idealizovan slučaj

Iz Tabele 1 jasno se zaključuje da u prezentovanom slučaju idealizovanog nasipa površina eksproprijacije raste sa istim faktorom uvećanja kao i širina baze tog nasipa  $L_2$ . Takođe, iz iste tabele, vidi se da kubatura materijala za izradu idealizovanog nasipa raste sa istim faktorom kao i površina tog nasipa u poprečnom profilu puta.

Ako se identična analiza uradi za slučaj kada nagib terena na kome se gradi nasip nije horizontalan, dobijaju se još veći odnosi između širine planuma  $L_1$  i širine baze idealizovanog nasipa  $L_2$ , odnosno širine pojasa eksproprijacije. Naime, kao što se vidi u Tabeli 2, sa povećanjem nagiba terena i smanjenjem nagiba kosine, sve više raste širina baze nasipa  $L_2$ , a samim tim i površina eksproprijacije. Proračun je urađen za tri različita nagiba terena od 10 [%], 20 [%] i 30 [%].

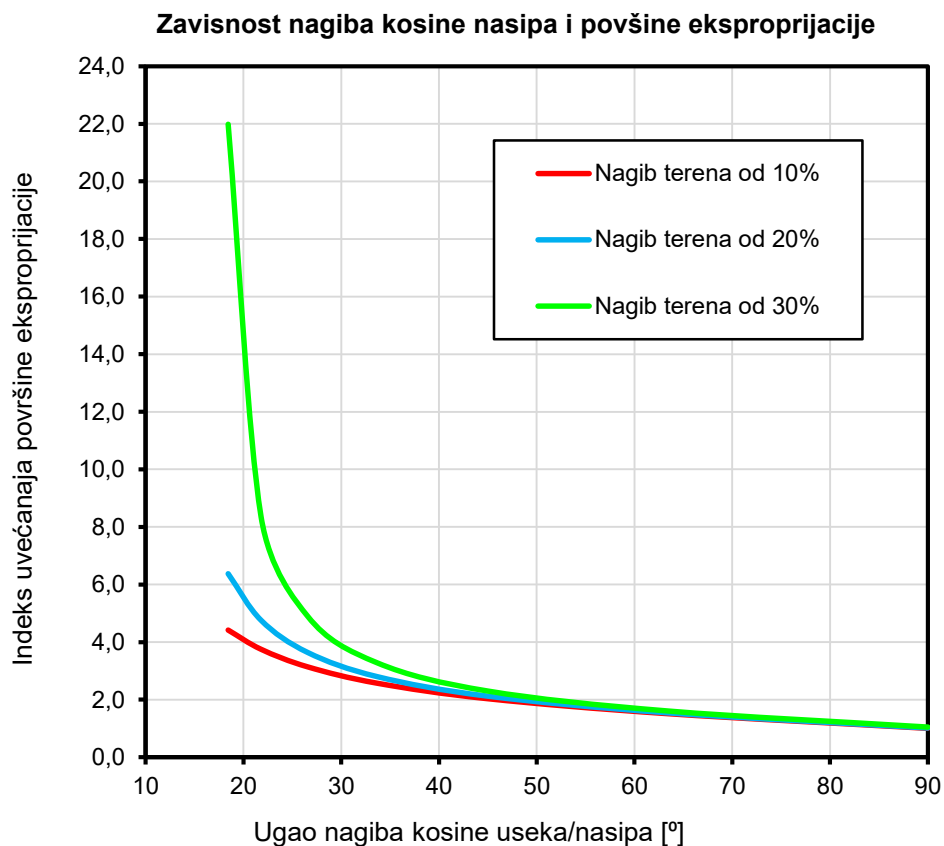
**Tabela 2.** *Indeksi uvećanja površine eksproprijacije i kubature nasipa za različite nagibe kosina i prirodnog terena na kome se gradi idealizovani nasip*

Nagib terena	Nagib kosine		Dužina baze $L_2$ [ $x L_1$ ]	Površina nasipa $F$ [ $x L_1 \cdot V$ ]	Kubatura nasipa dužine $S$ [ $x S \cdot L_1 \cdot V$ ]	Površina eksproprijacije nasipa dužine $S$ [ $x L_1$ ]
	Odnos V:H	Ugao [°]				
10%	$\infty$	90.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	2:1	63.43	1.51	1.26	1.26	1.51
	1:1	45.00	2.03	1.52	1.52	2.03
	1:1.5	33.69	2.57	1.80	1.80	2.57
	1:2	26.57	3.14	2.09	2.09	3.14
	1:2.5	21.80	3.75	2.41	2.41	3.75
	1:3	18.43	4.42	2.76	2.76	4.42
20%	$\infty$	90.00	1.02	1.00	1.00	1.02
	2:1	63.43	1.55	1.27	1.27	1.55
	1:1	45.00	2.12	1.58	1.58	2.12
	1:1.5	33.69	2.80	1.96	1.96	2.80
	1:2	26.57	3.64	2.43	2.43	3.64
	1:2.5	21.80	4.76	3.07	3.07	4.76
	1:3	18.43	6.37	4.00	4.00	6.37
30%	$\infty$	90.00	1.04	1.00	1.00	1.04
	2:1	63.43	1.60	1.30	1.30	1.60
	1:1	45.00	2.29	1.70	1.70	2.29
	1:1.5	33.69	3.27	2.28	2.28	3.27
	1:2	26.57	4.89	3.27	3.27	4.89
	1:2.5	21.80	8.35	5.40	5.40	8.35
	1:3	18.43	21.98	13.87	13.87	21.98

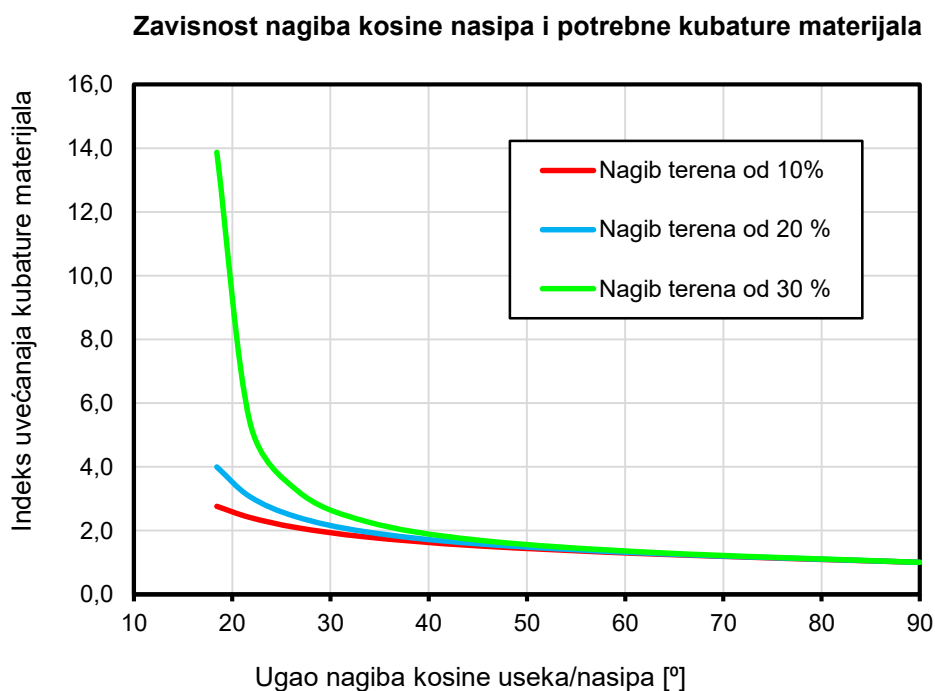
Sa povećanjem nagiba terena, kod nasipa sa manjim nagibima kosina ( $< 1:2$ , odnosno  $< 26[^\circ]$ ), te kosine postaju sve više "paralelne" sa terenom, a njihovi preseki sa linijom terena (nožice nasipa) sve dalji od osovine puta. To dalje, kao što se vidi na dijagramu na Slici 6, za posledicu ima naglo uvećanje površine eksproprijacije. Sve do nagiba kosine od 1:1.2 (ili  $40 [^\circ]$ ) povećanje nagiba terena do 30 [%], pod uslovom da je teren kontinualan, tj. linija terena ravna, ne utiče mnogo na rast površine eskproprijacije. Drugim rečima, ako se nasipi izvode od kvalitetnijeg kamenitog materijala sa nagibima kosina do 1:1.2, ili se primenjuju neke dodatne metode za armiranje nasipa i stabilizaciju kosina (geosinetetici), promena nagiba prirodnih padina do 30 [%] usled varijacija u topografiji terena ne utiče osetno na povećane površine eksproprijacije.

Sličan zaključak može se usvojiti i ako se za iste analizirane nagibe terena posmatra porast kubatura materijala potrebnog za izradu nasipa sa različitim nagibima kosina. Što je nagib terena veći i nagib kosina nasipa blaži, brže raste površina poprečnog profila nasipa, odnosno kubatura materijala koji je potrebno obezbediti i ugraditi. Međutim, indeksi uvećanja kubature materijala nasipa rastu sporijim intenzitetom u odnosu na indekse

uvećanja površine eksproprijacije kada se uporede nasipi istih karakteristika, odnosno nagiba kosina, što se može videti na dijagramu sa Slike 7.



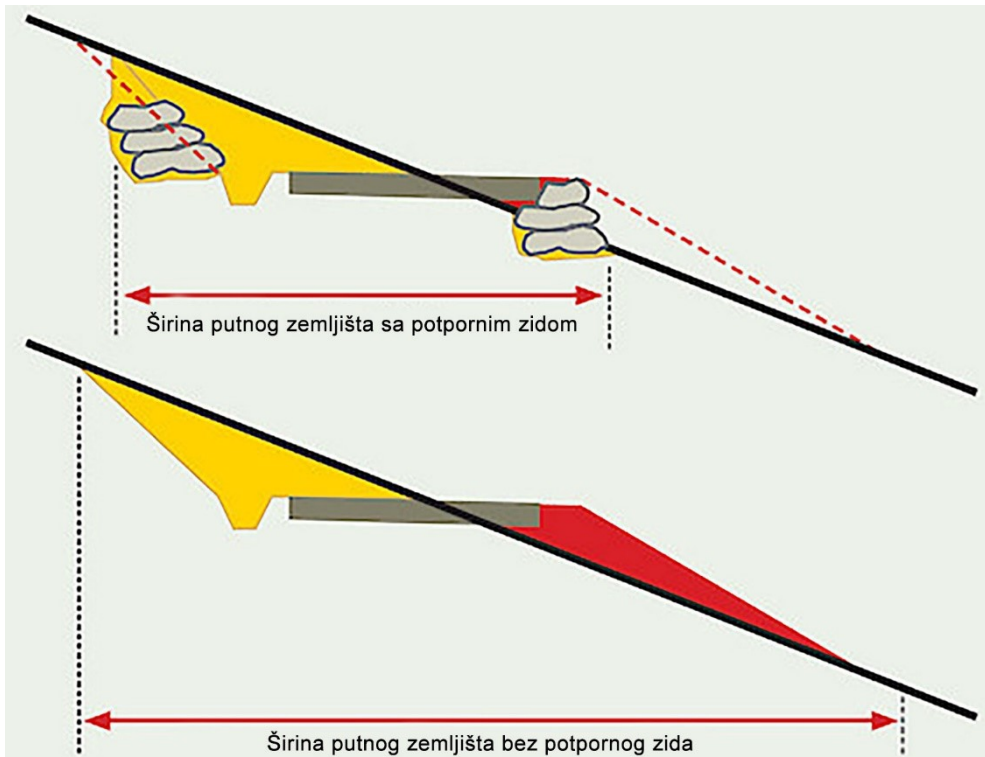
Slika 6. Dijagram zavisnosti nagiba kosine nasipa i površine eksproprijacije za različite nagibe terena



Slika 7. Dijagram zavisnosti nagiba kosine nasipa i potrebne kubature materijala za različite nagibe terena

### 3. PRIMENA POTPORNIH ZIDOVA ZA SMANJENJE POVRŠINE EKSPROPRIJACIJE

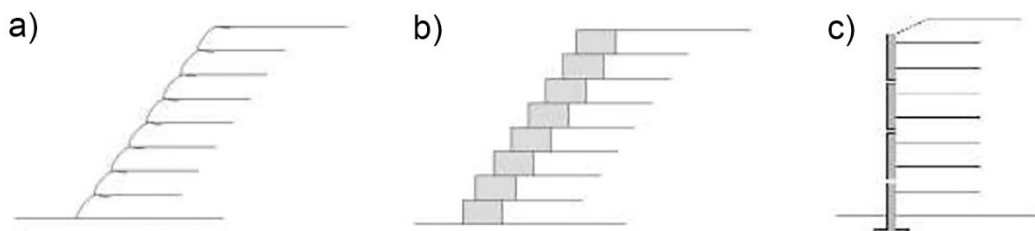
Primenom potpornih zidova na deonicama sa strmijim padinama terena mogu se značajno skratiti kosine, odnosno suziti širina putnog zemljišta (Slika 8). Izgradnjom potpornih zidova, osim povećane stabilnosti trupa puta, značajno se smanjuje potrebna površina eksproprijacije. Upravo iz tog razloga, ovakav vid vođenja trase puta u brdovitim i planinskim terenima, veoma često se primenjuje u zemljama sa izrazito visokim cenama zemljišta kao što su Japan i Švajcarska, gde je često jeftinije izgraditi potporne zidove i skratiti dužine kosina, nego isplatiti vlasnicima parcela uvećane površine zauzetog zemljišta. Pored geotehničkih i inženjersko-geoloških razloga, odluka o izboru tipa rešenja - da li graditi potporne zidove ili samo produžiti kosine do preseka sa prirodnim terenom - treba biti donesena na osnovu detaljnije tehno-ekonomske studije urađene za vreme izrade idejnog projekta.



**Slika 8.** *Primenom potpornih zidova smanjuje se širina putnog zemljišta i površina eksproprijacije (Izvor: L. 6)*

### 4. PRIMENA GEOSINTETIKA ZA STABILIZACIJU I ZAŠTITU KOSINA OD EROZIJE

Ako su planirani nagibi kosina veći od nagiba koje dozvoljavaju mehaničke karakteristike neojačanog (nearmiranog) zemljišta, za ojačavanje kosina u takvim slučajevima koriste se geosintetici. Ojačavanje kosina primenjuje se obično kod gradnje novih ili proširivanja postojećih nasipa, kao i pri sanacijama oštećenih i urušenih kosina. S obzirom na veće dozvoljene nagibe, ojačane kosine mogu da služe i kao alternativno rešenje potpornim konstrukcijama, čime mogu da se uštede značajne površine eksproprijisanog zemljišta. Tu se, za poboljšanje mehaničkih karakteristika tla prilikom armiranja kosina, odnosno, izradu potpornih konstrukcija od armiranog tla, koristi visoka zatezna čvrstoća geosintetika (Slika 9).

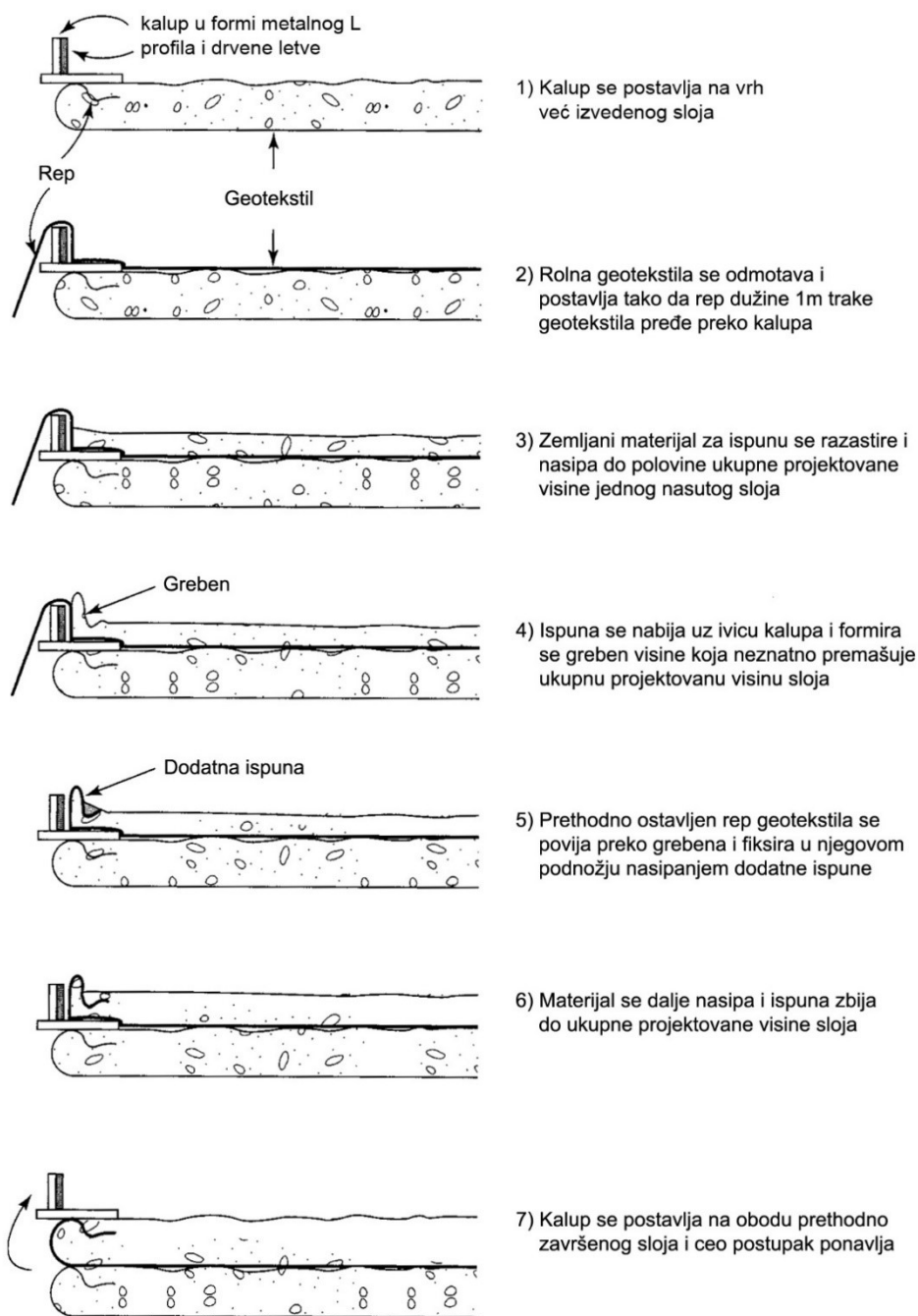


**Slika 9.** *Primeri armiranja kosina primenom armaturnog geosintetika: a) armirana kosina sa mekim čelom, uz pomoć uvijanja, b) armirana kosina sa zaštitom čela uz pomoć fleksibilnih elemenata (gabiona), c) potporna konstrukcija od armiranog tla sa zaštitom čela uz pomoć krutih elemenata (Izvor: L. 7)*

Ovoj grupi geotehničkih objekata, koja se u literaturi često naziva i „mehanički stabilizovano tlo“ ili na engleskom „mechanically stabilized earth - MSE“, pripadaju i sve vrste zidova od armirane zemlje - MSE zidova sa kojima je moguće izvesti stabilne kosina nasipa u nagibu do 70 [°]. Zbog njihove sve masovnije primene u putogradnji, posebno će se analizirati izgradnja potpornih zidova od armirane zemlje i njihov uticaj na površinu ekspanzije i životnu sredinu, u poređenju sa klasičnim armirano betonskim (AB) potpornim zidovima.

#### 4.1 Gradnja potpornih zidova od armirane zemlje

Na funkcionalnost svih vrsta zidova od armirane zemlje najviše utiče način njihovog izvođenja. Početni korak u tom procesu je priprema odgovarajuće podloge na koju se oslanja zid, uklanjanjem slabonosivih i stišljivih površinskih slojeva zemljišta. Ova vrsta zidova obično nema betonske stope na svom dnu i prvi sloj geotekstila postavlja se direktno na zbijeno noseće tlo. Sam proces izvođenja ovih zidova sastoji se iz niza koraka koji se ciklično ponavljaju kao što je prikazano na Slici 10. Pri dimezionisanju MSE zidova obavezno se proveravaju unutrašnja stabilnost, stabilnost na preturanje i klizanje i granična nosivost temeljnog tla.



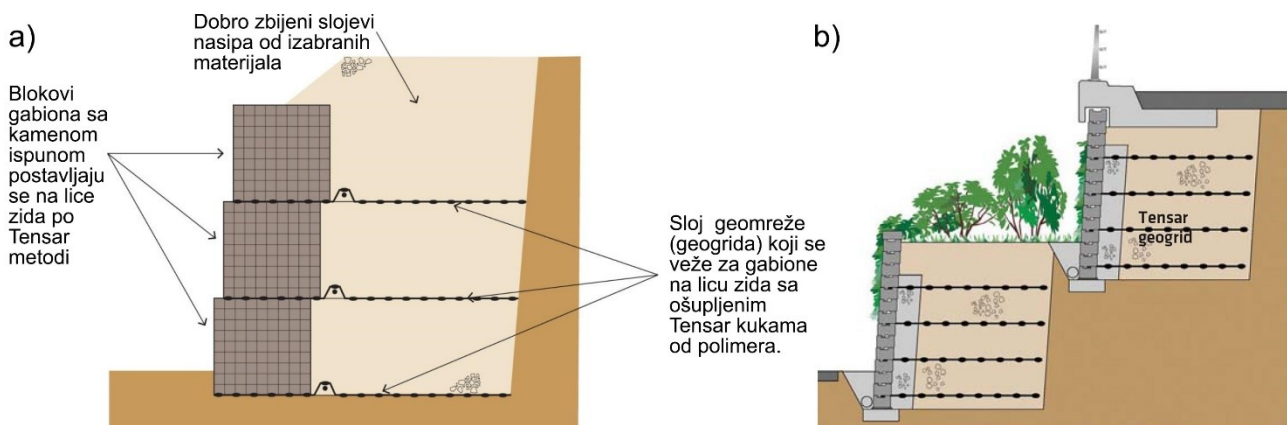
**Slika 10.** Fazna izrada slojeva obmotanih geotekstilom pri izgradnji zidova od armirane zemlje (Izvor: L.8)



Skoro isti princip armiranja koji je prikazan na prethodnoj slici može se, pored geotekstila, primeniti i na zidove armirane geomrežama. Ipak, kod zidova armiranih geomrežama, koji predstavljaju većinu među zidovima armiranih geosinteticima izgrađenih u poslednje dve decenije, češće se koristi nešto drugačija metoda gradnje. U suštini, postupak izrade i polaganja geosintetika ostaje isti kao na **Slici 10**, s tim što su komadi geomreža koji se koriste za armiranje nešto uži od geotekstilnih. Osnovna razlika između ove dve metode gradnje jeste korišćenje prefabrikovanih betonskih segmenata, koji prekrivaju lica zidova armiranih geomrežama, tako što se posebnim kukama kače za spoljašnje krajeve geomreža (**Slika 11**). Samim tim, nema potrebe za formiranjem ivičnih grebena od nasute ispune kao kod zidova armiranih geotekstilom, jer se u ovom slučaju kraj geomreže vezuje za lice budućeg zida, odnosno, ne postoji slobodan "rep" koji bi trebalo povijati i vraćati nazad u ispunu. Pored ovakvog rešenja obrade lica zida, zidovi od armirane zemlje mogu imati kao lice zida složene gabione (**Slika 12a**), ili armirano-betonske blokove (**Slika 12b**). U tom slučaju spoljni krajevi geosintetika fiksiraju se tako što se uvlače kao ispuna između redova gabiona ili betonskih blokova. Sam proces izvođenja je jednostavan i znatno brži u odnosu na izvođenje klasičnih betonskih zidova iste visine, a ukupno trajanje gradnje pre svega zavisi od dimenzija projektovanog zida.



**Slika 11.** Potporni zid od armirane zemlje sa licem od prefabrikovanih betonskih elemenata (Izvor: L.9)

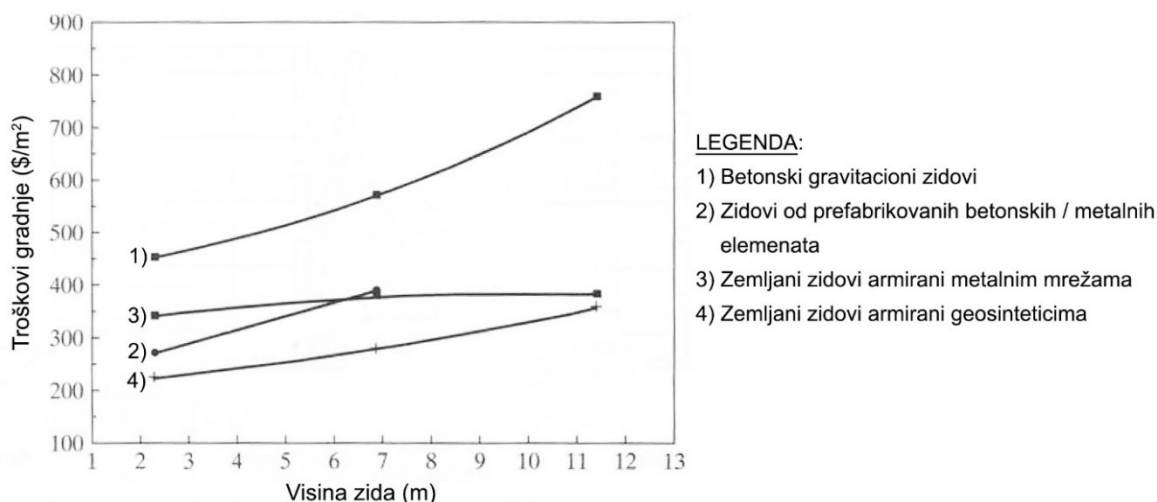


**Slika 12.** Obrada lica zidova od armirane zemlje postavljanjem: a) blokova gabiona ili b) armirano-betonskih blokova (Izvor: L. 10)

## 4.2 Uporedna analiza betonskih potpornih i zidova od armirane zemlje pri izradi visokih nasipa

Za skraćanje dužine kosina kod visokih nasipa, a samim tim i površine eksproprijacije, mogu se primeniti kako klasični betonski potporni, tako i zidovi od armirane zemlje. U zavisnosti od primenjenog rešenja razlikuju se složenost i troškovi izvođenja, troškovi eksploatacije, životni vek objekta kao i njihov uticaj na životnu sredinu. Ovde treba odmah istaći da se visoki nasipi kao geotehničko rešenje po pravilu primenjuju kada je podtlo na kome se grade ti nasipi povoljnih geomehaničkih karakteristika, tj. kada je tlo izgrađeno od stabilnih stenskih masa. Visoki nasipi mogu se graditi i u nepovoljnim uslovima, odnosno na slabonosivom tlu, ali to uvek povlači sa sobom mnogo složenije uslove gradnje i primenu niza rešenja za sprečavanje klizanja kosina, uključujući i duboko temeljenje na šipovima do slojeva tla veće nosivosti. Ipak, u ovom radu će, zbog češće gradnje visokih nasipa na dobrosivom tlu, uporedna analiza primene betonskih potpornih i zidova od armirane zemlje podrazumevati da se ti nasipi grade na podtlu dobre nosivosti.

Troškovi izvođenja, kako betonskih tako i zidova od armirane zemlje, zavise pre svega od dimenzija tih zidova i vrste korišćenog materijala. Od svih vrsta geosinetetika, za izradu zidova od armirane zemlje najčešće se koriste geomreže i geogridovi. Troškovi izrade zidova armiranih geogridovima niži su za 25-50% u odnosu na klasične potporne AB zidove. Sa povećanjem visine zida, ova razlika u troškovima postaje još veća u korist zidova od armirane zemlje, jer betonski potporni zidovi moraju imati značajno veće dimenzije i masivniju konstrukciju, da bi zadržali istu nosivost sa porastom njihove visine. Tako na primer, prema podacima iz SAD-a, sa porastom visine masivnog betonskog zida od 2 [m] do 12 [m] njegova cena raste sa 450 \$/m<sup>2</sup> na 800 \$/m<sup>2</sup>, dok u slučaju zidova armiranih geomrežama cena ide od 200 \$/m<sup>2</sup> do 400 \$/m<sup>2</sup>. Pri tome je rast cena gradnje zidova od armirane zemlje, sa povećanjem njihove visine, približno linearan, što se vidi i na dijagramu na **Slici 13** (kriva br. 4)).



**Slika 13.** Porast cene gradnje u zavisnosti od visine za različite vrste potpornih zidova u SAD (Izvor: L.11)

Troškovi održavanja i eksploatacije MSE zidova takođe su niži od AB zidova iste visine. Na osnovu istraživanja i studija u SAD [L.8], uočeno je da su zidovi od armirane zemlje otporniji na klimatske promene i delovanje atmosferilija u poređenju sa AB zidovima, zato što je kod AB zidova znatno veća površina betona izložena atmosferskim uticajima. Dodatna prednost MSE zidova je što se oni ne fundiraju na dubokim temeljima, što znatno olakšava eventualne sanacije ili rekonstrukcije.

Od početka 21. veka na teritoriji SAD-a urađen je veći broj obimnijih naučnih studija u kojima se poredi uticaj geotehničkih objekata, a među njima i potpornih zidova, na životnu sredinu. Većina ovih studija [L.8, L12] kao rezultat istraživanja ima isti zaključak, a to je da zidovi od armirane zemlje (MSE) izazivaju višestruko manje negativnih uticaja na okolinu u poređenju sa betonskim potpornim zidovima. U studijama je pokazano da su projektovane emisije gasova staklene bašte, pre svega ugljen-dioksida (CO<sub>2</sub>), i ukupna potrebna energija za gradnju potpornih konstrukcija istih dimenzija, drastično niži kod MSE zidova u odnosu na sve vrste masivnih gravitacionih i AB potpornih zidova. Osnovni razlog za ovakve rezultate istraživanja leži u činjenici da se za gradnju MSE zidova koristi značajno manja količina betona, armature i metalnih elemenata konstrukcije, u poređenju sa konvencionalnim AB potpornim zidovima. Veliki doprinos zaštiti životne sredine ostvaruje se kroz značajno redukovanu površinu eksproprijacije i kubature materijala korištenih za gradnju. Naime, primenom potpornih zidova od armirane zemlje za izradu nasipa na kojima se oslanjaju rampe denivelisanih raskrsnica, površina eksproprijacije smanjuje se od 1.5 do 2 puta, a kubature materijala za nasipe za više od 80%.

Uklapanje visokih potpornih zidova u postojeći teren i prirodne oblike lokalne sredine uvek predstavlja veliki izazov, kako zbog dimenzija samih objekata, tako i zbog karakteristika materijala od kojih su ti zidovi izgrađeni. Zbog ukupnog vizuelnog utiska i estetskog doživljaja putnog objekta, treba maksimalno težiti da se što više umanjí doživljaj grubog sukoba sa postojećim oblicima terena i prirodnim padinama. Kod potpornih zidova od armirane zemlje to je lakše izvesti zbog dodatnih mogućnosti obrade površine prefabrikovanih blokova ili elemenata koji formiraju lice potpornog zida. Pažljivim kombinovanjem tipskih elemenata različite teksture graviranih površina i boja elemenata prilagođenih ambijentu lokalne sredine, moguće je, pored uštede površine eksproprijacije i materijala za nasipe, dobiti vizuelno dopadljiva i estetski mnogo prihvatljivija rešenja u poređenju sa sivim jednoličnim površinama klasičnih betonskih zidova. Sa estetskog i likovnog stanovišta, primena MSE zidova pokazala se naročito uspešnom prilikom pejzažnog uređenja i oblikovanja lica oporaca mostovskih konstrukcija i kosina rampi denivelisanih raskrsnica u skućenim prostornim uslovima (**Slika 14**).



**Slika 13.** Primeri estetski uspešnog uklapanja MSE zidova na putnim objektima u postojeće prirodne oblike i ambijentalnu sredinu (Izvor: L.9 i L.12)

## 5. ZAKLJUČAK

Pitanje nagiba kosina nasipa ili useka puta direktno je vezano za veličinu potrebne površine eksproprijacije i neophodnih kubatura nasutog ili iskopanog materijala, odnosno, posledično i za veličinu ukupne investicije po km novoizgrađenog putnog pravca. Sa povećanjem dužine deonice puta na visokim nasipima (ili u dubokim usecima), ovo pitanje sve više dobija na značaju. Stoga je u ovom radu najviše pažnje posvećeno odnosu između promene nagiba kosina nasipa i uvećanja površine eksproprijacije, odnosno kubature materijala.

Granični nagib kosina za održanje travnatog vegetacionog pokrivača u našim klimatskim uslovima je 1:1.5, izuzev, ako se površine kosina prethodno ne stabilizuju geosinteticima trodimenzionalne strukture (geočelijama), koji formiraju stabilnu podlogu za usađivanje busenova travnatog pokrivača sve do nagiba od 70°. Rezultati inostranih istraživanja pokazali su da se biljka vetiver najuspešnije održava na kosinama strmijih nagiba od 1:2, zahvaljujući duboko razvijenom korenovom sistemu koji se širi ispod površine kosine.

Na primeru poprečnog profila trupa puta na idealizovanom nasipu, koji se oslanja na ravan teren različitog nagiba, pokazano je da za kosine nagiba strmijeg od 1:1.2 (ili 40 [°]) povećanje nagiba padina terena do

30 [%], ne utiče na rast površine eksproprijacije. To zapravo znači da inženjeri uvek trebaju težiti da projektuju nasipe sa kosinama nagiba strmijeg od 1:1.2, kako promena nagiba prirodnih padina terena (do 30 [%]) ispod baze nasipa, usled varijacija u topografiji terena, ne bi značajno uticala na povećane površine eksproprijacije. Kada je na raspolaganju kvalitetniji kameniti materijal za izradu nasipa, i kada je podtlo ispod baze nasipa dogovarajuće nosivosti, to nije previše težak zadatak. Međutim, pošto kvalitetan materijal za izradu visokih nasipa najčešće nije lako dostupan, ili je postojeći materijal u lokalnim pozajmištima "problematičnog" kvaliteta, da bi se ova ideja realizovala u praksi inženjeri su primorani da koriste razne vrste geosintetika za armiranje nasipa i stabilizaciju kosina, ili da grade klasične potporne zidove. Zato je u drugoj polovini rada najviše pažnje posvećeno zidovima od armirane zemlje (MSE) i njihovim karakteristikama u poređenju sa konvencionalnim betonskim i AB potpornim zidovima.

Osnovna prednost MSE zidova sa obrađenim licem, bilo slaganjem gabiona ili prefabrikovanih betonskih elemenata, je brža gradnja i manja cena po m<sup>2</sup> površine za istu visinu zida u odnosu na tradicionalne betonske potporne zidove. Takođe, zbog manjeg utroška cementa, betona i čelika za njihovu gradnju, oni su ekološki znatno prihvatljivije rešenje u odnosu na sve vrste masivnih gravitacionih i AB potpornih zidova, pre svega u pogledu ukupne emitovane količine ugljen-dioksida (CO<sub>2</sub>) i utrošene energije tokom gradnje. Pažljivim izborom tipa prefabrikovanih elemenata za oblaganje lica MSE zidova, tačnije njihove boje i teksture površine, mogu se postići veoma skladna rešenja koja su likovno dobro uklopljena u postojeću sredinu. Shodno tome, sa aspekta estetskog doživljaja i pejzažnog uređenja trupa puta, zidovi od armirane zemlje (MSE) često su za putnike vizuelno mnogo ugodniji od monotonog utiska koji na njih ostavljaju sive jednolične površine klasičnih betonskih potpornih zidova. Primenom MSE potpornih zidova značajno se smanjuju površine eksproprijacije i kubature materijala, naročito pri izgradnji rampi denivelisanih raskrsnica u skućenim prostornim uslovima.

## Literatura

- [1] Pravilnik o uslovima koje sa aspekta bezbednosti saobraćaja moraju da ispunjavaju putni objekti i drugi elementi javnog puta. (2011). S. glasnik R. Srbije, br. 50/2011, (on-line) dostupno na: [https://www.putevi.srbije.rs/images/pdf/regulativa/Pravilnik\\_o\\_uslovima\\_koje\\_sa\\_aspekta\\_bezbednosti\\_saobraćaja\\_moraju\\_da\\_ispunjavaju\\_putni\\_objekti.pdf](https://www.putevi.srbije.rs/images/pdf/regulativa/Pravilnik_o_uslovima_koje_sa_aspekta_bezbednosti_saobraćaja_moraju_da_ispunjavaju_putni_objekti.pdf) (10.02.2023)
- [2] Asima, H.; Niedzinski, V.; O'Donnell, F.C.; Montgomery, J. 2022. Comparison of Vegetation Types for Prevention of Erosion and Shallow Slope Failure on Steep Slopes in the Southeastern USA. Land 2022, 11, 1739. <https://doi.org/10.3390/land11101739>
- [3] ABG - creative geosynthetic engineering, Earth Retaining Wall System, Webwall Geocell, (2023). (on-line) available at: <https://www.abg-geosynthetics.com/products/geocells/webwall-geocell/> (12.02.2023)
- [4] Presto Geosystems - Plan, Partner & Build (2023). (on-line) available at: [https://www.prestogeo.com/gallery\\_presto/applications/roads-highways/?page\\_num=2&type=casestudy](https://www.prestogeo.com/gallery_presto/applications/roads-highways/?page_num=2&type=casestudy) (1.03.2023)
- [5] Parsakhoo, A.; Hosseini, S.A.; Pourmajidian, M.R. 2009. Plants canopy coverage at the edge of main communications network in Hyrcanian forests. Journal of Ecology and Natural Environment, 1(2): 37-44. <http://www.academicjournals.org/JENE>
- [6] NZ Forest Road Engineering Manual (2023). Stabilizing cut and fill slopes during construction, (on-line) available at: <https://docs.nzfoa.org.nz/live/nz-forest-road-engineering-manual/5-road-and-landing-construction/5.10-stabilising-cut-and-fill-slopes-during-construction/> (11.02.2023)
- [7] Konstruktivni elementi puta - 8, Zemljani radovi - 8.1. (2012). SRDM - Priručnik za projektovanje puteva u Republici Srbiji. (on-line) dostupno na: [https://www.putevi-srbije.rs/images/pdf/harmonizacija/prirucnik\\_za\\_projektovanje\\_puteva/SRDM8-1-zemljani-radovi\(120430-srb-konacna\).pdf](https://www.putevi-srbije.rs/images/pdf/harmonizacija/prirucnik_za_projektovanje_puteva/SRDM8-1-zemljani-radovi(120430-srb-konacna).pdf) (20.02.2023)
- [8] Koerner, R.M. 2012. *Designing with Geosynthetics - 6th Edition Vol. 1*. Xlibris Corporation, USA. 526 p.
- [9] Reinforced Earth, Mechanically Stabilized Earth (MSE) Retaining Walls. (2023). (on-line) available at: <https://reinforcedearth.com/projects/architectural-gallery/> (17.02.2023)
- [10] Tensar, Reinforced Soil Retaining Walls & Slopes. (2023). (on-line) available at: <https://www.tensar.co.uk/applications/earth-retaining-walls-reinforced-slopes> (18.02.2023)
- [11] Koerner, R. M.; Koerner, J.; Soong, T.-Y. (2001). Earth Retaining Wall Costs in the USA. In Proceedings of the Geosynthetics Conference 2001, Portland, OR, IFAI Publishers, 2001. pp. 483-506.
- [12] Berg, R.R.; Christopher, R. B.; Samtani, C.N. (2009). Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes - Volume I, Report No. FHWA-NHI-10-024, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. Washington, D.C.