



GEOTEHNIČKI ASPEKTI GRAĐEVINARSTVA I ZEMLJOTRESNO
INŽENJERSTVO - Vrnjačka Banja, 01-03. novembar 2023.

Milena Raković¹, Sanja Jocković², Veljko Pujević³, Nikola Obradović⁴

KLIMATSKE PROMENE I ZEMLJANI NASIPI

Rezime: Klimatske promene negativno utiču na životnu sredinu, privredu, zdravlje i bezbednost ljudi. Sa intenziviranjem klimatskih promena tokom 21. veka ugrožena je i geotehnička infrastruktura. Poznavanjem trenutnih i budućih klimatskih trendova u Evropi i Srbiji i klimatskih scenarija može se vršiti analiza i kvantifikacija rizika i odrediti uticaj na geotehničku infrastrukturu. U takvoj analizi, neizvesnost je neizostavan deo, kao i nepouzdanost/varijabilnost osnovnih ulaznih promenljivih. Analiza interakcije geotehničke infrastrukture sa atmosferom podrazumeva modeliranje termo-hidro-mehaničkih procesa koji se odvijaju u tlu i koji su povezani sa klimatskim i vegetacionim uslovima na površini tla. Termo-hidro-mehaničko sprezanje predstavlja najnapredniji numerički pristup u analizi uticaja klimatskih promena na infrastrukturne nasipe.

Ključne reči: klimatske promene, klimatski modeli, nasipi, termo-hidro-mehanički procesi

CLIMATE CHANGES AND SOIL EMBANKMENTS

Summary: Climate change has a negative impact on the environment, economy, health and safety of people. With the intensification of climate change during the 21st century, the geotechnical infrastructure is also threatened. By knowing current and future climate trends in Europe and Serbia and climate scenarios, it is possible to analyze and quantify risks and determine the impact on geotechnical infrastructure. In such analysis, uncertainty is an essential part, as well as the unreliability/variability of the basic input variables. The analysis of the geotechnical infrastructure-atmosphere interaction implies the modeling of the thermo-hydro-mechanical processes that take place in the soil and which are related to both climatic and vegetation conditions on the soil surface. Thermo-hydro-mechanical coupling represents the most advanced numerical approach in the analysis of climate change impact on infrastructure embankments.

Keywords: climate changes, climate models, embankments, thermo-hydro-mechanical processes

¹ Asistent-student doktorskih studija, mast. inž. građ., Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, mrakovic@grf.bg.ac.rs

² Docent, dipl. građ. inž., Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, borovina@grf.bg.ac.rs

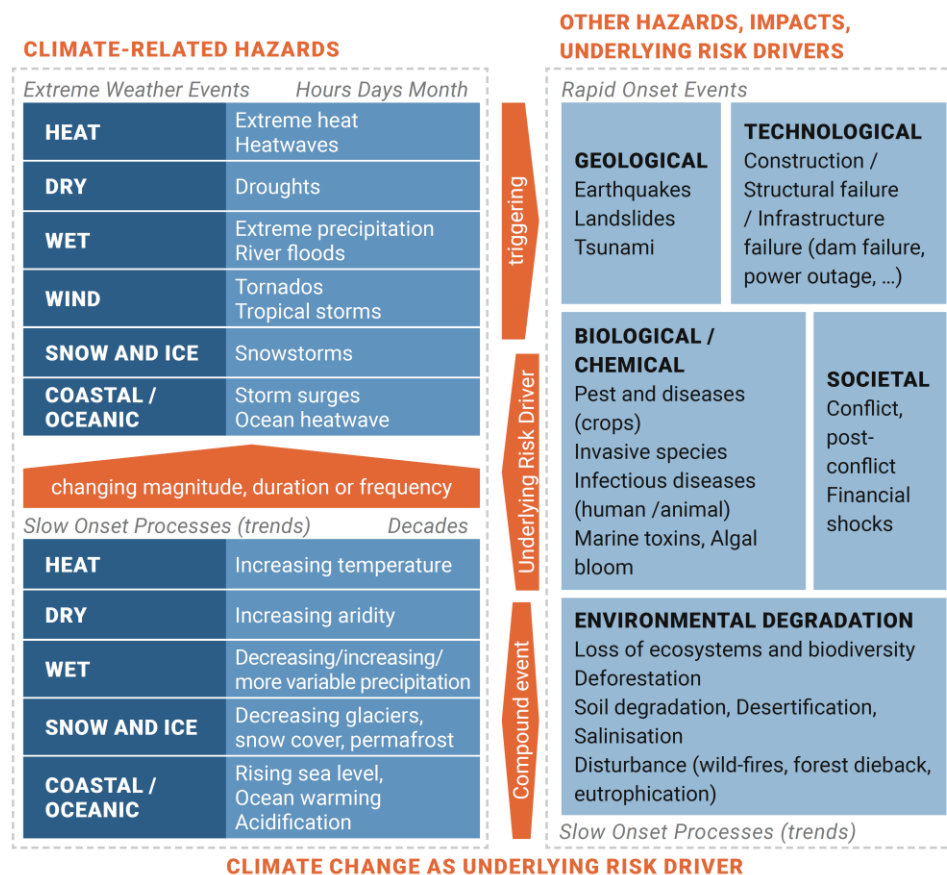
³ Docent, dipl. građ. inž., Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, vpujevic@grf.bg.ac.rs

⁴ Asistent-student doktorskih studija, mast. inž. građ., Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, nobradovic@grf.bg.ac.rs

1. UVOD

Klimatske promene jasno se mogu identifikovati u dugogodišnjim nizovima klimatoloških i meteoroloških podataka. Okarakterisane su na prvom mestu porastom temperature, ali i promenama u režimu padavina, njihovoj godišnjoj raspodeli i intenzitetu, kao i povećanoj frekvenciji ekstremnih vremenskih događaja i perioda sa ekstremnim klimatskim uslovima. Promene se osećaju gotovo svuda i negativno utiču na životnu sredinu, privredu, ali i na zdravlje i bezbednost ljudi.

Procesi ili trendovi koji se sporo razvijaju decenijama, kao što su porast nivoa mora, topljenje glečera, povećanje temperature itd. su u složenoj uzročno-posledičnoj vezi sa degradacijom životne sredine i biološkim, hemijskim i društvenim delovanjem. Osnovne posledice sporih procesa, izražene u 21. veku, su ekstremni vremenski događaji koji predstavljaju okidač za brojne geološke i tehnološke razorne događaje i povećavaju ranjivost područja i/ili stanovništva, Slika 1.



Slika 1. Hazardi povezani sa klimatskim promenama [16]

Analiza i kvantifikacija rizika, sveobuhvatno razmatranje efekata klimatskih promena sa punim spektrom opasnosti je ključno i strateško pitanje svake države.

2. TRENUTNI I BUDUĆI KLIMATSKI TRENDOVI U EVROPI I SRBIJI

Klimatske promene pogađaju celu Evropu, ali uticaj nije svuda isti. Predviđa se da će se najveći uticaj osetiti u južnoj i jugoistočnoj Evropi, kao i u priobalnim predelima zapadne Evrope. Ovi uticaji će postati još ozbiljniji u narednih nekoliko decenija [6]. Prema izveštaju [5] sve ukazuje na dugoročan trend povećanja prosečne godišnje temperature u odnosu na one zabeležene krajem 19. veka. Najbrži porast beleži se poslednjih decenija. Promena prosečnih godišnjih padavina u Evropi pokazuje više prostorne i vremenske varijabilnosti nego promena temperature. Od sredine 20. veka prosečne godišnje padavine se generalno povećavaju u većem delu severne Evrope, naročito zimi, ali se smanjuju u južnim delovima Evrope, i to najviše tokom leta. Pored ova dva najznačajnija parametra, analize pokazuju da će se u periodu do kraja veka broj hladnih i mraznih dana smanjivati, a broj tropskih dana povećavati. Toplotni talasi će imati veću učestalost i biće dugotrajniji, a suše će biti sve intenzivnije, pogotovo u južnoj Evropi. Takođe, predviđa se povećanje broja dana sa velikom količinom padavina. Kada su u pitanju oluje, one pokazuju značajnu varijabilnost širom Evrope tokom 20. veka, a dostupne projekcije klimatskih promena ne pokazuju jasan konsenzus ni u pravcu kretanja, ni u intenzitetu olujnih aktivnosti. Sve navedeno ukazuje na sve veću i nepovoljniju neravnomernost i promenljivost klimatskih parametara i u prostoru i u vremenu.

Predviđanja su vrlo slična i kada je u pitanju Srbija. Prema [4] cela teritorija Srbije suočena je sa znatnim povećanjem temperature od sredine prošlog veka, naročito u letnjoj i prolećnoj sezoni. Došlo je do značajnog porasta srednje, maksimalne i minimalne dnevne temperature, sa prosečnim trendom od 0,3°C po dekadi na godišnjem nivou. Takođe, kada su padavine u pitanju, uočeni su trendovi različitog znaka tokom godine, što ukazuje na promenu raspodele i intenziteta padavina u toku godine, i to u korist jakih kiša i većeg broja dana bez padavina. Ovakve promene će izazvati sve češću pojavu ekstremnih toplotnih talasa, jakih suša i padavina.

Ipak, trenutni nivo integracija klimatskih promena u sektorske i opšte razvojne strategije, nivo znanja, institucionalni i individualni kapaciteti, dostupne tehnologije i finansijski resursi na nacionalnom nivou još uvek nisu dovoljni za efikasnu i brzu reakciju na problem klimatskih promena u Srbiji.

3. KLIMATSKI MODELI, PREDVIĐANJA I SCENARIJI

Promene klime i projekcije u budućnosti mogu se dobiti na osnovu globalnih i regionalnih klimatskih modela koji koriste pretpostavke o emisiji gasova sa efektom staklene bašte u budućnosti. Klimatski modeli, GCM (General Circulation Models) i RCM (Regional Climate Model), su numerički modeli koji se koriste za simulaciju klimatskog sistema, na globalnom i regionalnom nivou, koristeći njegova fizička, hemijska i biološka svojstva. Klimatski modeli su najsavremenije alatke za modeliranje stanja klimatskog sistema i simulaciju njegovog odgovora na promenu koncentracije štetnih gasova u atmosferi. Modeli se razlikuju po složenosti, broju prostornih dimenzija i po načinu i složenosti opisivanja fizičkih, hemijskih i bioloških procesa. Simulacije budućih klimatskih uslova u velikoj meri zavise od graničnih uslova koji nisu dovoljno unapred poznati, pa su zato rezultati prilično neizvesni [6].

Pre primene ovih modela za predikciju budućih klimatskih uslova, važno je proceniti njihovu sposobnost da reprodukuju karakteristike klimatskih uslova i klimatskih promena u prošlosti. Ako su rezultati zadovoljavajući, onda se model koristi za predviđanje klime u budućnosti i to za različite scenarije emisije štetnih gasova. Iako klimatski modeli mogu da simuliraju mnoge aspekte klimatske varijabilnosti i ekstrema, i dalje ih karakterišu sistematske greške u simulaciji, kao i ograničenja u preciznoj simulaciji regionalne klime [1]. Svakako, ovakva predviđanja daju dosta dobre i verodostojne rezultate kada su u pitanju kontinentalne i veće razmere. Međutim, modeli imaju ograničenja, sa greškama koje su izraženije na manjim prostornim razmerama i u simulaciji specifičnih klimatskih pojava. Glavni izvor većine ovakvih grešaka je to što mnogi važni procesi manjeg obima ne mogu biti eksplicitno predstavljani u modelima, već se moraju uzeti u obzir u približnom obliku jer su u interakciji sa procesima većeg obima. Ovo se dešava delom zbog ograničenja u računarskoj snazi, a delom i zbog ograničenja u naučnom razumevanju ili dostupnosti detaljnih posmatranja nekih fizičkih procesa. Međutim, globalni modeli nastavljaju da se razvijaju, njihova rezolucija se povećava i postaju sveobuhvatniji u svom tretmanu klimatskog sistema. Takođe, jedan od načina da se ovakvi problemi u izvesnoj meri prevaziđu jeste upotreba regionalnih modela, posebno razvijenih za proučavanje klimatskih promena na regionalnom i lokalnom nivou.

Uprkos svim neizvesnostima, modeli su jednoglasni u predviđanju značajnog globalnog zagrevanja kao odgovora na povećanu emisiju štetnih gasova u atmosferu [6].

Postoji mnogo različitih timova za klimatsko modeliranje širom sveta. Kada bi svi koristili različite jedinice, pravili različite pretpostavke i polazne osnove, poređenje istaživanja ne bi bilo moguće. Scenariji pružaju okvir pomoću kojeg se klimatsko modeliranje može pojednostaviti. Međunarodni panel za klimatske promene IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) bavio se ovim pitanjem i u poslednje tri decenije objavio više različitih setova scenarija klimatskih promena zasnovanih na predviđanjima o socioekonomskim uslovima u budućnosti, kao i o emisiji štetnih gasova. Cilj rada sa scenarijima nije predviđanje budućnosti, već razumevanje neizvesnosti koju ona nosi [18].

4. UTICAJ KLIMATSKIH PROMENA NA GEOTEHNIČKU INFRASTRUKTURU

Skoro sva današnja infrastruktura projektovana je koristeći klimatske podatke dobijene na osnovu istorijskih klimatskih zapisa i uz pretpostavku da će prethodni ekstremi predstavljati i buduće stanje. Klimatske promene zahtevaju promenu paradigme procesa projektovanja u pogledu shvatanja ulaznih klimatskih podataka.

4.1. Geotehnička infrastruktura i klimatske promene

Nepouzdanost je neizostavan deo proučavanja klime, kao i različitih modela klimatskih promena koji se koriste za predviđanje budućih klimatskih događaja. Ona, ujedno, u predviđanjima intenziteta i pravca u kojem će se kretati klimatske promene u budućnosti ograničava i mogućnosti projektovanja infrastrukture otporne na buduće klimatske uslove. Stoga, jako je važno da se te nesigurnosti u što većoj meri smanje i da

se projektovane vrednosti izračunaju sa što većom pouzdanošću, da se redovno ažuriraju kako bi odražavale klimu koja se menja. Kako je nepouzdanost prihvaćena kao sastavni deo građevinskih propisa i standarda, geotehničko projektovanje mora da obuhvati kvantifikaciju rizika i nepouzdanost/varijabilnost osnovnih ulaznih promenljivih, sa ciljem što preciznije evaluacije sigurnosti kroz primenu naprednih alata i metoda teorije pouzdanosti.

Iako je došlo do napretka u praćenju i razumevanju klimatskih promena, ostaju mnoge naučne, tehničke i institucionalne prepreke za precizno planiranje, prilagođavanje i ublažavanje njihovih efekata [11]. Rastuća zabrinutost istraživača rezultovala je povećanjem broja radova na ovu temu. Međutim, trenutno razumevanje uticaja klimatskih promena na geotehničku infrastrukturu je i dalje ograničeno, pa su dalja istraživanja neophodna kako bi se što bolje razumeli procesi koji se odvijaju u tlu pod uticajem promena u atmosferi. Neophodna su dalja laboratorijska ispitivanja, osmatranje i ispitivanje terena, za različite vrste tla, kako bi se razvili numerički alati za analizu i predviđanje dugoročnog ponašanja geotehničkih konstrukcija, uzimajući u obzir interakciju sa atmosferom [2].

Kako se tokom 21. veka očekuje intenziviranje klimatskih promena, jasno je da će one, bez sumnje, negativno uticati na nosivost i upotrebljivost geotehničkih konstrukcija kao što su prirodne i veštačke padine, nasipi, kosine useka, zemljane brane, obaloutvrde, temeljne i potporne konstrukcije [10]. Promena klime izaziva promenu opterećenja na geotehničke konstrukcije. Povećanje temperature, kao i sve češće i dugotrajnije suše izazivaju intenzivno isušivanje tla, koje za posledicu ima formiranje pukotina i posledično povećanje vodopropusnosti površinske zone. Prioritetni putevi infiltracije atmosfere vode formirani desikacionim pukotinama dovode do porasta godišnjih varijacija napona sukije u površinskoj zoni, što može biti posebno problematično sa stanovišta upotrebljivosti infrastrukture. Sa druge strane, povećanje količine padavina smanjuje sukiju što se direktno odražava na stabilnost nasipa. Intenzivne padavine mogu dovesti i do poplava i posledično iniciranja procesa poput erozije hidrotehničkih nasipa [17]. Takođe, pored promene u spoljašnjem opterećenju, kao posledica klimatskih promena može doći do promene svojstava (degradacije smičuće čvrstoće) tla zbog čestih varijacija u temperaturi i vlažnosti.

Kada je reč o infrastrukturnim nasipima povećanje učestalosti i intenziteta padavina može dovesti do opadanja čvrstoće tla usled povećane zasićenosti, povećanog rastvaranja minerala zbog različitih hemijskih i fizičkih procesa, povećane erozije, povećanog površinskog oticanja, nivoa i protoka podzemnih i površinskih voda, što direktno utiče na stabilnost zemljanih konstrukcija.

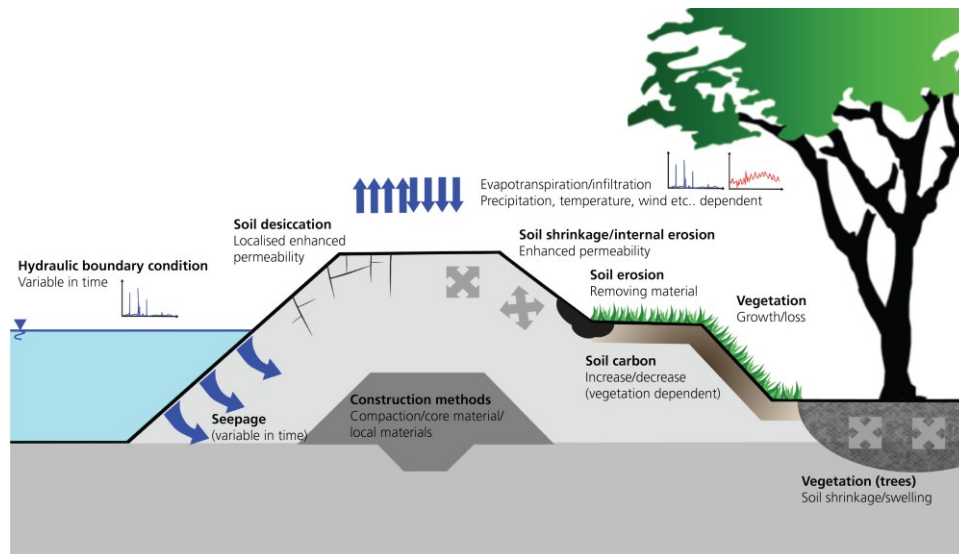
4.2. Interakcija geotehničke infrastrukture sa atmosferom

Geotehničke konstrukcije su uglavnom sastavni deo saobraćajne i železničke infrastrukture ili/i predstavljaju osnovnu meru za zaštitu od poplava. Gubitak stabilnosti ovakvih konstrukcija je retka pojava, ali ako do toga dođe, moglo bi, pored ugrožavanja ljudskih života, da izazove prekid transporta, poplave i da nanese jako veliku materijalnu štetu.

Vardon [17] ističe kako bi bilo prikladno podeliti geotehničke konstrukcije na postojeće i one koje će se tek graditi. Prilikom projektovanja novih konstrukcija treba reagovati preventivno, kako bi se u što većoj meri sprečio negativan uticaj klimatskih

promena u budućnosti, dok postojeće konstrukcije i promenljive uslove sredine treba temeljno proceniti radi efikasnijeg planiranja programa održavanja.

Vardon [17] na Slici 2 daje šematski prikaz potencijalnih interakcija geotehničkih infrastrukturnih nasipa sa atmosferom, uključujući direktne interakcije (kao što je razmena vlage) i posledice (npr. isušivanje tla ili erozija usled gubitka vegetacije).



Slika 2. Potencijalna interakcija između geotehničke konstrukcije i atmosfere [17]

Jedna od najkompleksnijih oblasti za analizu uticaja atmosferskih procesa na stabilnost geotehničkih zemljanih konstrukcija je granica tlo-atmosfera. Razmena vode između tla i atmosfere odvija se upravo preko ove granice. Interakcija između tla, vegetacije i atmosfere je dinamičan proces koji direktno utiče na kontinuiranu promenu stanja vode u tlu. Uticaj ovih promena je značajan i često jako nepovoljan kada je u pitanju sezonsko, ali i dugoročno ponašanje geotehničkih zemljanih konstrukcija kao što su nasipi i useci. Praksa pokazuje da je posebno ugrožena upotrebljivost infrastrukturnih nasipa izgrađenih od glinovitih materijala [14].

4.2.1. Porni pritisci

Razmena vode između tla i atmosfere odvija se kroz procese kao što su infiltracija padavina, isparavanje vode sa površine tla (evaporacija) i transpiracija kroz vegetaciju. Promena hidroloških uslova u tlu uzrokovana ovom interakcijom ogleda se u promeni vlažnosti tla i varijacijama pornog pritiska. Opšte je poznato da su veličina i varijabilnost pornog pritiska ključni parametri koji utiču na dugoročne performanse geotehničkih konstrukcija kao što su zemljani nasipi i useci. Promene pornih pritisaka direktno utiču na stanje efektivnih napona u tlu i samim tim na smičuću čvrstoću tla. Monotone varijacije pornog pritiska, svojstvene procesima konsolidacije ili bubrenja, dešavaju se usled izgradnje ili iskopa u tlu male vodopropusnosti. Sa druge strane, kompleksne nemonotone sezonske varijacije pornog pritiska su direktna posledica interakcije sa

atmosferom. Tokom letnjih sušnih meseci evaporacija je na vrhuncu i premašuje infiltraciju, dok je zimi situacija obrnuta. Ovi suprotni procesi izazivaju cikluse sušenja i vlaženja tla, što dovodi do pojave sezonskih nepovratnih deformacija i do problema u eksploataciji zemljanih konstrukcija, a u prekonsolidovanim glinama vremenom i do intenziviranja fenomena progresivnog loma uzrokovanog kontinuiranom akumulacijom plastičnih smičućih deformacija.

4.2.2. Vegetacija

Kako je već ranije navedeno, opšte je poznato da režim podzemnih voda predstavlja jedan od glavnih faktora koji reguliše ponašanje zemljanih nasipa i useka. Promena režima podzemnih voda direktna je posledica kombinovanog dejstva klimatskih uslova, gde se pre svega misli na padavine i vegetaciju. Uprkos velikom značaju ove interakcije na stabilnost nasipa, njeno predviđanje nije nimalo jednostavno. Poteškoće leže u dinamičnoj prirodi graničnih uslova i odgovarajućem hidro-mehaničkom odgovoru tla koji je kompleksan i nelinearan. Delimično zasićeno tlo iznad nivoa podzemne vode dodatno komplikuje analizu, čineći upotrebu numeričkih metoda neophodnim.

Prisustvo vegetacije na kosinama nasipa i useka ima brojne prednosti. Vegetacija može imati značajan doprinos stabilizaciji relativno slabih geomaterijala. Pozitivni efekti vegetacije uključuju: disipaciju pornih nadpritisaka, formiranje balasta sopstvenom težinom adekvatno pozicioniranih masivnih stabala, mehaničko ojačanje tla (mikroarmiranje korenim sistemom) i generisanje napona sukucije – negativnih pornih pritisaka koji direktno utiču na porast nivoa efektivnog naprezanja i posledično prirast smičuće otpornosti tla [14].

Vardon [17] ističe da se vegetacija koja utiče na stabilnost kosina može podeliti u dve grupe, jednu koja ima površinske efekte (trava) i drugu čiji uticaj seže dublje u tlo (drveće). Skot i drugi [15] primetili su značajne razlike između područja prekrivenih drvećem i travom, gde je izazvana sukucija za skoro ceo red veličine veća kod padina prekrivenih drvećem, nego kod onih prekrivenih travom. Štaviše, kretanja zabeležena na padinama bila su suprotnog smeru.

Iako je pitanje uticaja vegetacije na stabilnost zemljanih nasipa donekle poznato široj geotehničkoj zajednici, donedavno istraživači ovome nisu posvećivali dovoljno pažnje. Razlog za to je nedostatak adekvatnih alata koji bi omogućili kako eksperimentalni, tako i numerički tretman ovog složenog multidisciplinarnog problema [14].

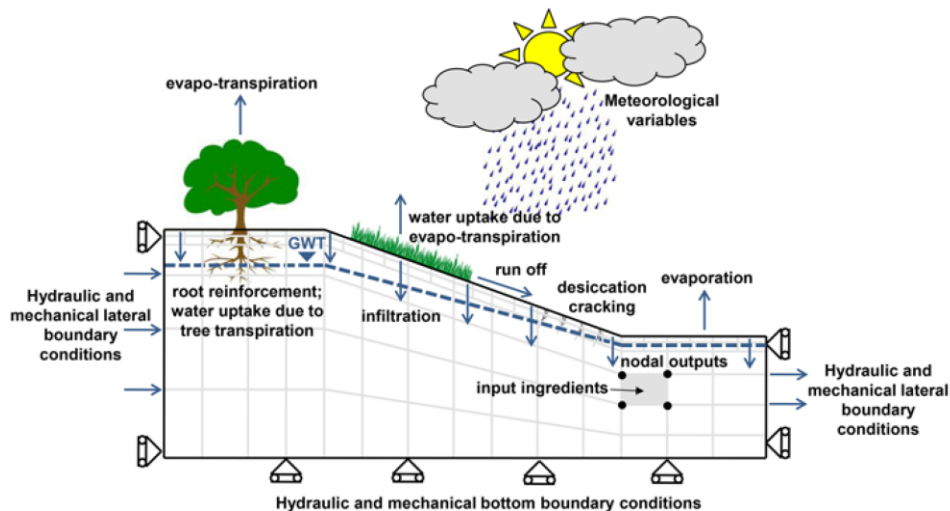
4.2.3. Eroziija

Promene pritiska u porama tla izazvane varijacijama klimatskih prilika i crpljenjem vode od strane korenja drveća mogu da izazovu eroziju tla, skupljanje, bubrenje i formiranje desikacionih pukotina, što dovodi do potencijalne degradacije čvrstoće tla sa dubinom [14].

Eroziija tla može biti unutrašnja i spoljašnja. Unutrašnja eroziija povećava propusnost i smanjuje čvrstoću, dok spoljašnja izaziva uklanjanje materijala i potencijalno izaziva nestabilnost padina. Ulogu korenskog sistema biljaka u smanjenju erozije tla teško je kvantifikovati. Mehanički, korenje smanjuje eroziju tla tako što vezuje njegove čestice na površini terena i pruža ojačanje [17].

5. NUMERIČKO MODELIRANJE

Stabilnost prirodnih ili veštačkih padina i nasipa zavisi od termo-hidro-mehaničkih procesa koji se odvijaju u tlu, a koji su povezani i sa klimatskim i sa vegetacionim uslovima na površini tla, Slika 3. Klimatske promenljive koje definišu atmosferske uslove su, pre svega, padavine, relativna vlažnost, temperatura, neto sunčevo zračenje i brzina vetra, koje zajedno sa vegetacijom, određuju gornje granične uslove za filtraciju koja se odvija kroz pore tla. Atmosferski uslovi variraju sa vremenom i, kao takvi, predstavljaju promenljive granične uslove koji izazivaju varijaciju distribucije pornog pritiska [8], [9], [12], [13].



Slika 3. Numerički model sa graničnim uslovima [7]

Kako se obično radi o delimično zasićenim materijalima, proces filtracije uključuje transport tečnosti i gasa i može biti pod uticajem termodinamičkih procesa koji se odvijaju unutar pora. Stoga, za proučavanje efekata interakcije između tla i atmosfere na performanse geotehničke infrastrukture, ključno je razumevanje kretanja vode u površinskoj nezasićenoj zoni, kao i kako promena stepena zasićenja utiče na ponašanje tla. U praksi, u zavisnosti od vrste radova i položaja freatske površi, vrlo često se, radi pojednostavljenja, zemljane konstrukcije modeliraju kao zasićene. Ova pretpostavka je razumna i opravdana činjenicom da su stanja zasićenja mnogih materijala bliska uslovima potpunog zasićenja. Međutim, infrastrukturni nasipi uglavnom ostaju nezasićeni tokom svog radnog veka. Osnovni razlog leži u činjenici da su materijali ispunjeni (sa značajnijim udelom glinovite frakcije), od kojih se prave nasipi, po svojoj prirodi zaista nezasićeni. To znači da su nezasićeni u vreme zbijanja i da obično ostaju takvi i u fazi eksploatacije, osim ako ne dođe do nepovoljnih uticaja spoljašnje sredine koji bi doveli do promene hidrauličkog režima nasipa [14].

Jasno je da je u poslednje vreme došlo do velikog napretka u modeliranju delimično zasićenih sredina, ali konstitutivnih modela za nezasićene materijale je i dalje značajno manje od zasićenih modela. Naravno, što je model sofisticiraniji, potrebno je definisati i veći broj parametara koji su vrlo često empirijski i nemaju direktno fizičko

značenje. Takve parametre nije ni jednostavno, a ni jeftino odrediti i stoga mora postojati kompromis između tačnosti i praktičnosti modela. Kada se razmatraju infrastrukturni nasipi primenom nezasićenih konstitutivnih modela, broj parametara koji figurišu u istima može biti jako veliki, što dovodi do toga da nema praktične prednosti u korišćenju složenih konstitutivnih modela. Stoga u nekom trenutku praktičnost prevazilazi veću tačnost koju nude napredni konstitutivni modeli [3].

Konačno, efekti temperature obično nisu u potpunosti uvedeni u numeričko modeliranje. Temperatura nije samo osnovni parametar za analizu klimatskih procesa na interfejsu između nasipa i atmosfere, već utiče i na mehaničko ponašanje tla. Dakle, termo-hidro-mehaničko sprežanje predstavlja najnapredniji numerički pristup u analizi uticaja klimatskih promena na infrastrukturne nasipe.

Iz navedenog se može zaključiti da je numeričko modeliranje takvih problema veoma složeno. U literaturi je predložen širok spektar pristupa od jednostavnih analiza metodom granične ravnoteže do naprednih numeričkih analiza. Napredniji pristupi, iako rigorozniji, zahtevaju složenije ulazne podatke kao što su krive vlaženja (SWRC), funkcije vodopropusnosti za domen filtracije kroz nezasićenu sredinu i konstitutivne modele za delimično zasićene sredine, koje je praktično nemoguće utvrditi konvencionalnim geomehaničkim laboratorijskim opitima.

6. ZAKLJUČAK

Istraživanja u oblasti klimatskih promena ukazuju na sve veću i nepovoljniju neravnomernost i promenljivost klimatskih parametara u prostoru i vremenu. Očekuje se da će promene vremenskih obrazaca, kao i povećanje varijabilnosti ekstremnih događaja, bitno uticati na geotehničku infrastrukturu širom sveta. Trenutno razumevanje potencijalnih uticaja klimatskih promena na infrastrukturu je i dalje veoma ograničeno, pa su dalja istraživanja neophodna kako bismo u budućnosti mogli da donosimo važne odluke. Analiza i kvantifikacija rizika, sveobuhvatno razmatranje efekata klimatskih promena sa punim spektrom opasnosti je ključno i strateško pitanje svake države.

Nepouzdanost u predviđanjima intenziteta i pravca u kojem će se kretati klimatske promene u budućnosti ograničavaju i mogućnosti projektovanja infrastrukture otporne na buduće klimatske uslove. Kako je nepouzdanost prihvaćena kao sastavni deo građevinskih propisa i standarda, geotehničko projektovanje mora da obuhvati kvantifikaciju rizika i nepouzdanost/varijabilnost osnovnih ulaznih promenljivih, sa ciljem što preciznije evaluacije sigurnosti kroz primenu naprednih alata i metoda teorije pouzdanosti.

Prilikom planiranja, projektovanja i izgradnje nove infrastrukture, važno je da se klimatske promenljive redovno ažuriraju kako bi odražavale najnovije klimatske događaje. Numeričko modeliranje predstavlja važan korak u predikciji ponašanja nasipa u interakciji sa atmosferom u kontekstu klimatskih promena. Od ključne važnosti je realno modelirati termo-hidro-mehaničke procese koji se odvijaju u tlu, koji su povezani i sa klimatskim i sa vegetacionim uslovima na površini tla. Takođe, istraživanja treba usmeriti ka razvijanju naučnih metodologija za inkorporiranje projekcija klimatskih promena u inženjerske kodove, standarde i praksu.

7. REFERENCE

- [1] Auld H, Maclver D: Changing Weather Patterns, Uncertainty and Infrastructure Risks: Emerging Adaptation Requirements, Occasional paper 9, Adaptation and impacts research division (AIRD), Environment Canada, 2007.
- [2] Cui Y: Soil-atmosphere interaction in earth structures, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022., 14.1: 35-49.
- [3] Davies O: Numerical analysis of climate change on slope stability, PhD thesis, Newcastle University, 2011.
- [4] Drugi izveštaj Republike Srbije prema Okvirnoj konvenciji Ujedinjenih nacija o promeni klime, Ministarstvo zaštite životne sredine Republike Srbije, 2017.
- [5] EEA, Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012, European Environmental Agency, Publications Office of the European Union, 2012.
- [6] EEA, Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016, European Environmental Agency, Publications Office of the European Union, 2017.
- [7] Elia G, Cotecchia F, Pedone G, Vaunat J, Vardon PJ, Pereira C, Springman SM, Rouainia M, Van Esch J, Koda E, Josifovski J: Numerical modelling of slope-vegetation-atmosphere interaction: an overview. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 2017 Aug; 50(3):249-70.
- [8] Fredlund DG, Rahardjo H & Fredlund MD: *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. Wiley, New York, 2012.
- [9] Gens A: Soil-environment interactions in geotechnical engineering. *Géotechnique*, 2010, 60, 3-74.
- [10] Insana A, Beroya-Eitner A, et al.: Climate Change Adaptation of Geo-Structures in Europe: Emerging Issues and Future steps, *Geosciences*, 2021., 11(12) 488.
- [11] Karl TR, Trenberth K: Modern global climate change, *Science*, 2003., 302.5651: 1719-1723.
- [12] Lu N & Godt JW: *Hillslope Hydrology and Stability*. Cambridge University Press, Cambridge, 2013.
- [13] Lu N & Likos WJ: *Unsaturated Soil Mechanics*. Wiley, New York, 2004.
- [14] Pujević V: Numerical modeling of the vegetation and atmosphere effect on the behavior of civil infrastructure embankments, PhD thesis, University of Belgrade - Faculty of Civil Engineering, 2021.
- [15] Scott J, Loveridge F, O'Brien AS: Influence of Climate and Vegetation on Railway Embankments, *Proceedings XIV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2007.
- [16] UNDRR, *Technical Guidance on Comprehensive Risk Assessment and Planning in the Context of Climate Change*, United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2022.
- [17] Vardon P: Climatic influence on geotechnical infrastructure: a review, *Environmental Geotechnics*, 2015., 2.3: 166-174.
- [18] Wayne G, *Representative Concentration Pathways*, *Skeptical Science*, 2013.