https://doi.org/10.63356/stes.ing.2026.001 УДК 624.131.1:631.445.12

STATISTIČKA ANALIZA PODATAKA O SLIJEGANJU TLA

Autor: MARIJA KAČAVENDA
e-mail: marija.kacavenda@student.aggf.unibl.org
Mentor: prof. dr Snježana Maksimović
Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci

Uvod: Slijeganje tla predstavlja složen geotehnički proces koji može ugroziti stabilnost objekata i infrastrukture.

Cilj: Izvršiti statističku obradu podataka rezultata mjerenja slijeganja tla na 89 geodetskih tačaka u periodu od 2013. do 2018. godine, sa ciljem prostorne analize slijeganja i identifikacije kritičnih zona.

Materijal i metode: Primijenjene su metode deskriptivne statistike, testovi normalnosti i neparametarski testovi (Spearman-ova korelacija, Friedman-ov i Wilcoxon-ov test). Analiza je sprovedena u programu SPSS.

Rezultati: Deskriptivna analiza je pokazala da se srednja vrijednost slijeganja kreće od –0,2 mm (2014) do –18,1 mm (2018), dok maksimalno zabilježeno slijeganje dostiže –297 mm. Identifikovane su kritične tačke sa ukupnim slijeganjem preko 100 mm, među kojima se izdvajaju GT048 (–297 mm; –59,4 mm/god), PT015 (–257 mm; –51,4 mm/god) i GT007 (–242 mm; –48,4 mm/god). Korelaciona analiza je pokazala snažnu pozitivnu vezu između ranog i srednjeg intervala (dH1–dH3: $\rho = 0{,}652$; $p < 0{,}001$), kao i veoma snažnu vezu između srednjeg i najdužeg intervala (dH3–dH5: $\rho = 0{,}860$; $p < 0{,}001$). Friedman-ov test je potvrdio statistički značajne razlike između godina ($\chi^2 = 16{,}011$; $p = 0{,}001$), a post-hoc Wilcoxon test je izdvojio tri faze: fazu najvećeg slijeganja (2014), stabilnu fazu (2015–2016) i fazu smanjenog intenziteta (2018).

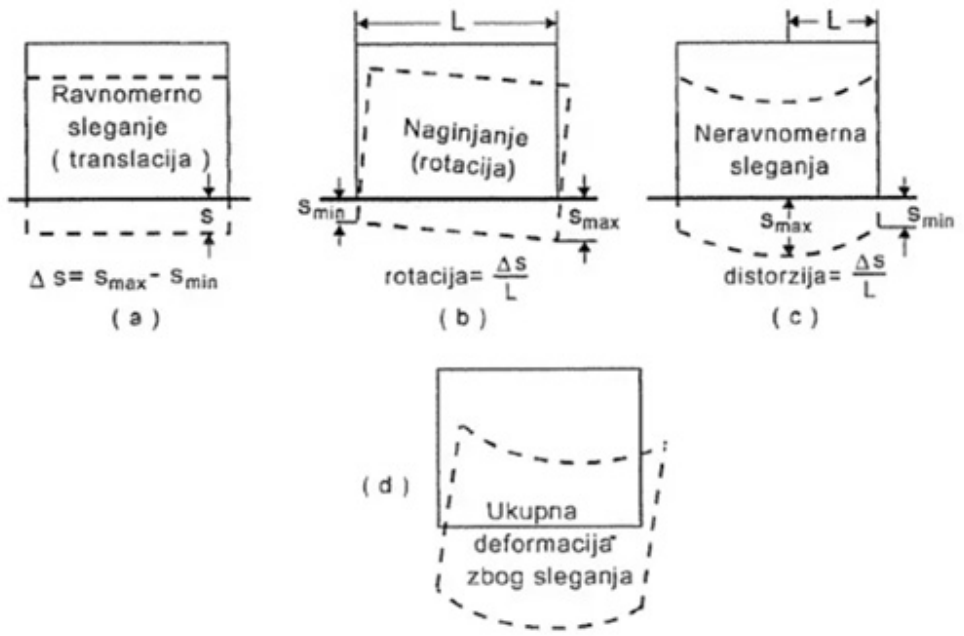
Zaključak: Rezultati ukazuju na potrebu za dodatnim geotehničkim mjerama i kontinuiranim monitoringom, posebno na kritičnim tačkama GT048, PT015 i GT007, gdje se predlažu dodatna geotehnička istraživanja i intervencije.

Ključne riječi: statistička analiza; neparametarski testovi; monitoring; slijeganje tla; geotehnika

UVOD

Usljed promjene opterećenja na određenoj površini mijenja se stanje napona u zemljištu, kao i njegova zapremina, sa odgovarajućim slijeganjem površine terena. Promijenjeno stanje napona prvo izaziva promjene u pornom pritisku, bez uticaja na efektivne napone. Promjene u efektivnim naponima, a samim tim i deformacije, mogu se desiti tek nakon promjene pornog pritiska. Kada se porni pritisak, usljed promjene stanja napona, izjednači sa stacionarnim hidrauličnim poljem podzemnih voda, proces slijeganja se završava [1]. Ukupna deformacija tla usljed slijeganja objekta je razdvojena na tri komponente. Ravnomjerno slijeganje se dešava u slučaju krutog simetričnog objekta na homogenom tlu. Čak i kada je relativno veliko, ravnomjerno slijeganje obično nema štetne posljedice po sam objekat, ali može oštetiti instalacije po konturi objekta. Naginjanje (čista rotacija) relativno krutog objekta može ostaviti štetne posljedice na konstrukciju i instalacije u njoj.

Diferencijalna (neravnomjerna) slijeganja su ograničena fleksibilnošću konstrukcije i izazivaju deformacije u obliku zakrivljenosti koje mogu izazvati lokalna oštećenja objekta [2].



Slika 1. Osnovne komponente slijeganja objekta [2]

Metode za procjenu slijeganja tla mogu se klasifikovati u tri osnovne kategorije: empirijske metode, analitička rješenja i numeričke metode. Empirijske metode se zasnivaju na mjerenjima na realnim objektima i omogućavaju brzu procjenu stanja tla na osnovu određenih parametara. Analitička rješenja pružaju matematički precizne izraze, ali su često ograničena na idealizovane uslove. Numeričke metode, kao što je metoda konačnih elemenata, omogućavaju sveobuhvatnu analizu, jer uzimaju u obzir složenu geometriju, heterogenost i nelinearno ponašanje tla [2].

Praćenje slijeganja tla je izuzetno važno kako u fazi projektovanja, tako i u toku izgradnje i eksploatacije objekta. Kontinuirano praćenje pomjeranja tla omogućava identifikaciju sporog, postupnog slijeganja, kao i otkrivanje naglih promjena koje mogu ukazivati na potencijalnu opasnost za stabilnost građevinskih konstrukcija. Statistička analiza rezultata slijeganja tla omogućava sistematsko tumačenje prikupljenih podataka i daje osnovu za predviđanje budućeg ponašanja tla u geotehničkom inženjerstvu.

MATERIJALI I METODE

1. Rezultati mjerenja

U ovom radu korišteni su rezultati mjerenja slijeganja tla na ukupno 89 posmatranih tačaka, označene identifikacionim oznakama GT, PT, referentne tačke. Za svaku posmatranu tačku date su njene prostorne koordinate (X0, Y0), UTM (skraćeno od Universal Transverse Mercator) koordinate koje omogućavaju geografsko pozicioniranje svake mjerne tačke, kao i visinske vrijednosti dobijene kroz višegodišnji period, i to u novembru 2013. godine, junu 2014. godine, novembru 2015. godine, junu 2016. godine i septembru 2018. godine. Na osnovu razlika visina u odnosu na prve rezultate mjerenja (novembar,

2013) određene su vrijednosti slijeganja tla za pojedine vremenske periode, koje predstavljaju osnovne podatke za dalju statističku analizu. Tabela br. 1 objedinjuje prostorne i vremenske podatke, što omogućava sveobuhvatno sagledavanje ponašanja tla.

Tabela br. 1. Rezultati ispitivanja slijeganja tla

tac	Y0_nov201	X0n13	dH1(H1_H0)(mm)	dH2(H2_H0)	H3_H0	H5_H0	E(UTM34)	N(UTM34)
GT048	6554687	4932916	-47	-137	-178	-297	315929,77	4934315
PT015	6554855	4933112	-36	-116	-153	-257	316105,28	4934506
GT007	6554008	4933838	-36	-101	-114	-242	315285,76	4935262
GT023	6554784	4933243	-21	-57	-78	-135	316039,38	4934639
PT019	6554633	4933049	-13	-39	-50	-81	315880,78	4934451
GT033	6554998	4933153	-22	-31	-38	-67	316249,12	4934541
GT005	6554684	4934175	8	-72	-54	-63	315973,84	4935574
GT020	6554153	4933225	-6	-27	-32	-51	315407,61	4934644
GT024	6555046	4933256	-21	-3	-2	-35	316301,17	4934642
GT021	6554248	4933182	-3	-17	-21	-33	315501,15	4934598
GT006	6553781	4933822	-11	-21	-23	-30	315058,02	4935254
GT022	6554435	4933262	-2	-16	-18	-29	315691,28	4934670
GT002	6553862	4934190	-15	-17	-13	-28	315152,19	4935619
PT003	6553450	4934067	-2	-12	-15	-27	314736,51	4935511
GT019	6554035	4933311	0	-9	-11	-25	315292,68	4934734
GT057	6554452	4932898	-5	-13	-15	-22	315695,03	4934306
PT009	6554196	4933565	1	-5	-19	-21	315462,94	4934982
GT053	6554318	4932964	-1	-20	-19	-20	315562,61	4934378
GT044	6554144	4933048	-1	-11	-11	-20	315392,76	4934468
GT009	6554141	4933768	7	-2	-4	-14	315415,85	4935187
GT027	6554045	4933182	8	0	-5	-14	315298,17	4934606
GT015	6554676	4933506	-9	-24	-12	-12	315940,32	4934906
PT006	6553243	4933817	0	-8	-6	-12	314520,11	4935269
GT012	6553749	4933441	-2	-1	-1	-11	315011,9	4934874
GT030	6554352	4933101	-2	-7	-8	-11	315601,77	4934513
GT047	6554439	4933040	-2	-6	-8	-11	315686,69	4934449
GT032	6554556	4933144	14	11	3	-10	315807,42	4934548
GT014	6554044	4933439	3	4	3	-10	315306,5	4934862
GT039	6553947	4933061	1	1	1	-10	315196,04	4934488
GT011	6553996	4933562	-1	-4	-4	-9	315263,42	4934986
GT008	6554079	4933823	4	-5	-1	-9	315356,25	4935245
PT001	6552857	4934666	-23	-14	-7	-9	314165,02	4936132
PT024	6553958	4932791	0	-3	-2	-8	315196,84	4934218
GT040	6554037	4933080	1	1	1	-7	315286,64	4934503
GT037	6553722	4933063	3	-3	-2	-7	314971,35	4934498
GT031	6554437	4933171	7	8	9	-5	315690	4934580
PT018	6553928	4933327	0	-3	-3	-5	315186,52	4934755
GT028	6554149	4933102	3	-2	-1	-5	315399,57	4934522
PT002	6553130	4934180	11	24	27	-4	314419,97	4935636
GT036	6553598	4933134	3	-1	-1	-4	314849,74	4934573
PT007	6553421	4933849	17	-4	-4	-3	314698,76	4935294
PT014	6554577	4933192	14	6	5	-3	315829,82	4934595
GT034	6553646	4933184	1	-1	0	-2	314899,95	4934622
PT008	6553769	4933585	2	-1	0	-2	315036,9	4935018
GT026	6553964	4933153	4	7	3	-1	315215,82	4934579
GT025	6553877	4933099	1	1	2	-1	315127,54	4934529

GT046	6554270	4933017	1	0	1	0	315516,73	4934432
GT010	6554769	4933911	-14	5	-7	0	316048,88	4935307
TUSANJ	6553366	4934070	1	-3		0	314652,27	4935518
PT023	6553264	4933090	0	0	0	0	314514,79	4934542
GT060	6554767	4932714	-3	-1	-2	0	316002,96	4934111
GT003	6553845	4934050	6	7	9	1	315129,94	4935480
GT041	6553867	4932944	0	-2	-1	1	315111,79	4934374
TUZLA	6555060	4932257	-1	-3	-3	1	316278,27	4933643
PT017	6553785	4933203	1	1	1	1	315038,89	4934635
PT004	6554243	4934425	4	18	2	2	315541,69	4935840
PT022	6554846	4932851	1	1	0	3	316086,74	4934245
GT049	6554106	4932858	-1	0	1	3	315347,06	4934279
GT001	6553451	4934296	2	3	4	4	314745,32	4935741
GT059	6554564	4932869	0	1	2	4	315805,5	4934273
GT018	6553688	4933283	4	3	3	4	314945,4	4934719
GT038	6553821	4933013	4	0	5	4	315068,59	4934444
GT054	6554247	4932800	-1	1	3	5	315486,22	4934216
GT042	6553994	4932945	1	1	3	5	315238,78	4934370
PT005	6554449	4934667	2	11	1	5	315756,71	4936074
GT013	6553938	4933468	2	3	4	5	315202,06	4934895
GT017	6553580	4933332	18	5	15	7	314838,63	4934772
GT058	6554554	4932820	1	3	5	7	315793,69	4934225
GT004	6554099	4934028	13	3	3	8	315383,24	4935449
PT020	6555126	4932952	-3	7	6	8	316370,54	4934335
GT043	6554038	4933001	2	5	7	9	315284,59	4934424
GT035	6553542	4933110	10	11	10	11	314792,56	4934552
PT010	6555040	4933654	9	14	10	11	316310	4935040
GT051	6554183	4932971	1	5	7	11	315428,44	4934389
PT026	6555504	4932576	26	12	12	12	316734,19	4933946
GT045	6554237	4933020	10	4	8	12	315484,13	4934436
PT011	6555730	4933278	4	16	1	13	316985,29	4934639
GT055	6554307	4932861	1	5	8	13	315547,84	4934275
GT052	6554278	4932938	3	7	9	15	315521,7	4934353
PT025	6554396	4932823	1	6	9	16	315636,3	4934234
GT056	6554441	4932879	4	9	12	16	315683,36	4934287
GT016	6553508	4933314	5	6	7		314766,33	4934757
GT029	6554192	4933108	-26				315442,66	4934525
GT050	6554197	4932884	1	5			315439,01	4934302
PT012	6554233	4933363	-4				315492,6	4934779
PT013	6554358	4933329	-2				315616,16	4934740
PT016	6553213	4933427	1	0	1		314476,16	4934880
PT021	6555145	4932865	29				316386,2	4934247
PANONICA	6554670	4933066	34	-14	-31		315919,1	4934467

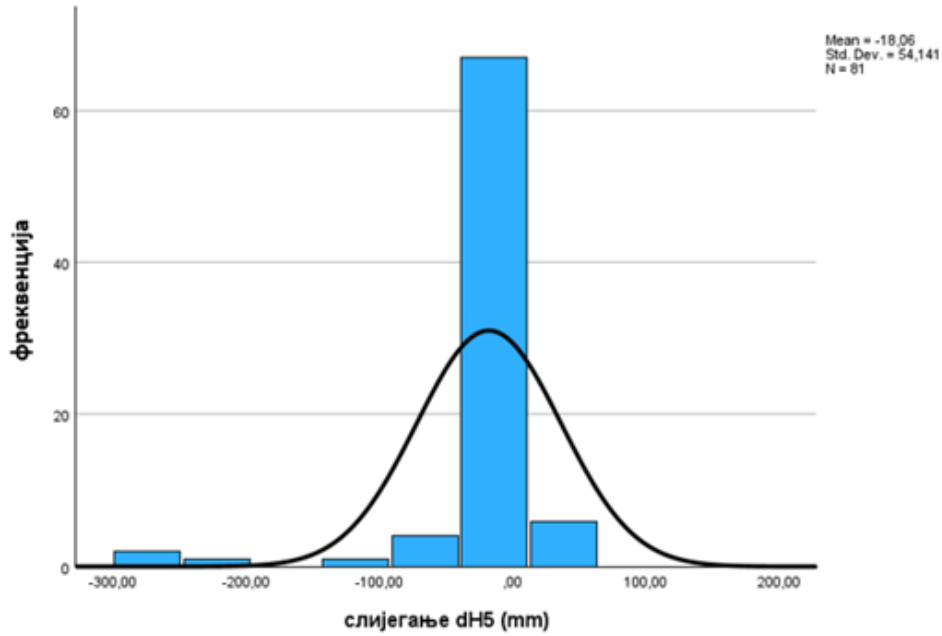
2. Statistička analiza podataka

Na osnovu podataka o vrijednostima slijeganja tla izvršena je statistička analiza podataka pomoću programa SPSS u rasponu od pet godina, od 2013. do 2018. godine. Dobijene vrijednosti slijeganja za svaku godinu mjerene su na osnovu referentne vrijednosti koja je izmjerena prve godine od početka istraživanja (2013. godine). U Tabeli br. 2 prikazane su vrijednosti deskriptivne statistike kao što su medijana, standardna devijacija, minimum i maksimum za različite vremenske epohe.

Tabela br. 2. Deskriptivna statistika

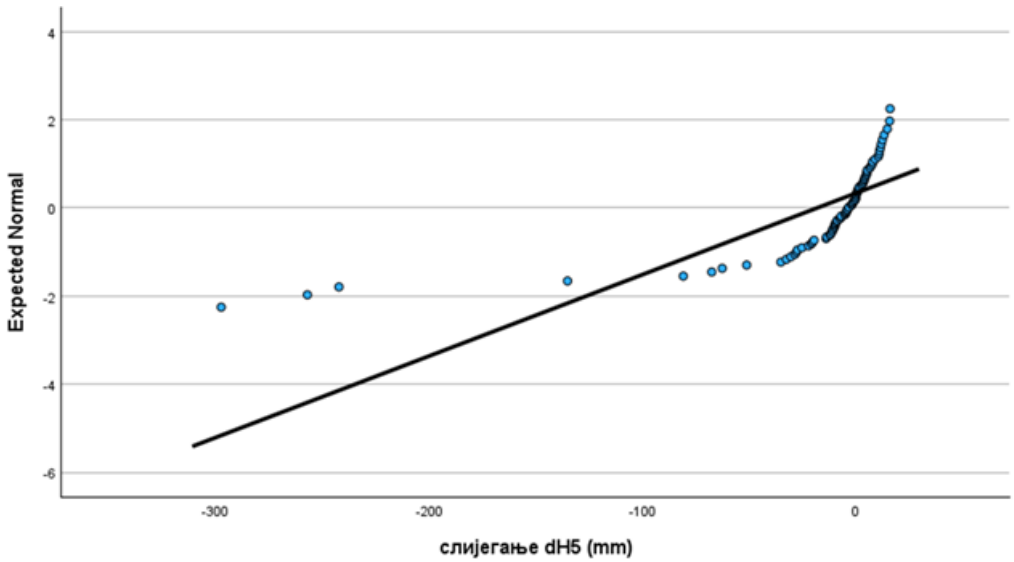
		dH1(H1_H0) (mm)	dH2(H2_H0)	H3_H0	H5_H0
Total	N	89	85	83	81
	Minimum	-46,89	-137,10	-178,30	-297,40
	Maximum	34,40	23,53	27,03	16,10
	Range	81,29	160,63	205,33	313,50
	Mean	-,2157	-7,0000	-9,1051	-18,0594
	Median	,8000	-,4000	-,1000	-3,2000
	Std. Deviation	12,17196	25,77173	31,60494	54,14088

Prije poređenja podataka, provjereno je da li podaci o slijeganju tla prate normalnu raspodjelu pomoću „Shapiro-Wilk" testa. Rezultati testa pokazuju da je $p < 0,001$, što ukazuje na statistički značajno odstupanje od normalne raspodjele. Grafički prikazi, kao što su histogram frekvencije i „Q-Q plot", potvrđuju ovaj zaključak. Iz histograma frekvencija jasno se vidi da su podaci asimetrično raspoređeni, sa izraženim negativnim repom. Većina mjernih tačaka ima vrijednosti bliske nuli, dok je prisutan manji broj ekstremnih vrijednosti.



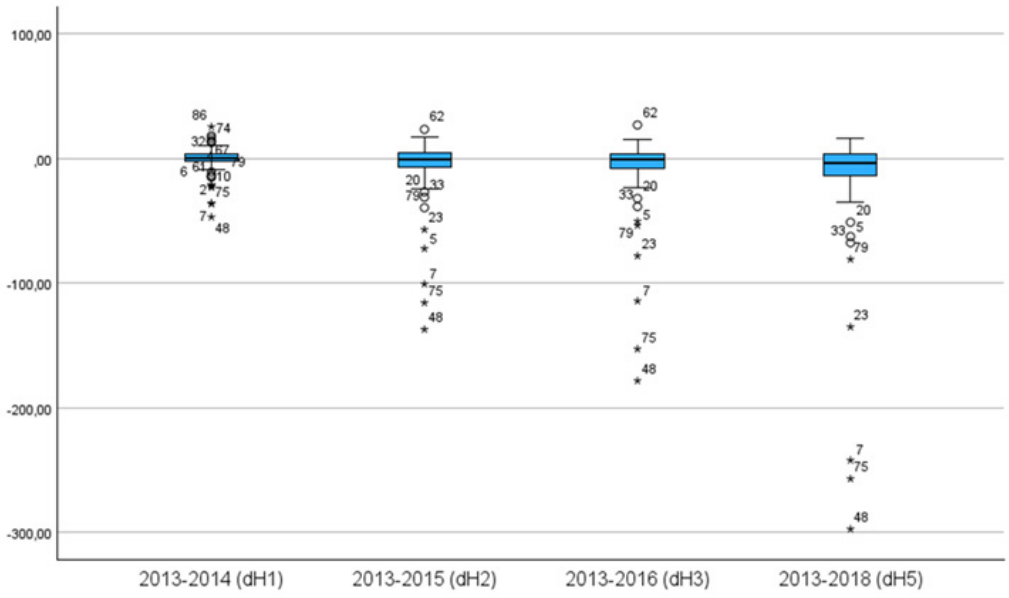
Slika 2. Histogram frekvencija slijeganja tla

„Q-Q Plot" pokazuje značajna odstupanja stvarnih vrijednosti slijeganja u odnosu na očekivane, posebno na krajevima raspodjele.



Slika br. 3. Q-Q Plot

U cilju analize trendova slijeganja tla kroz vremenske periode (2014, 2015, 2016, 2018), konstruisani su box plotovi (box-whisker dijagram) za svaku godinu mjerenja.



Slika 4. Analiza slijeganja tla po godinama

Box plotovi četiri uzastopna mjerenja (2014, 2015, 2016, 2018) pokazuju jasan trend progresivnog slijeganja. Medijana se kontinuirano spušta od +5 mm (2014) do -10 mm (2018), što ukazuje da preko polovine mjernih tačaka ima negativnu promjenu visine. Interkvartilni raspon se takođe spušta i širi, što potvrđuje sistematsko pogoršanje stanja. Broj outlier-tačaka raste kroz godine sa četiri (2014) na preko sedam (2018), pri čemu

se identifikuju konstantni problemi na tačkama 48, 7, 23 i 75. Tačka 48 pokazuje najveće pogoršanje od -45 mm (2014) do -300 mm (2018), što predstavlja prosječno slijeganje od 60 mm godišnje. Vizuelna analiza box plotova nam otkriva:

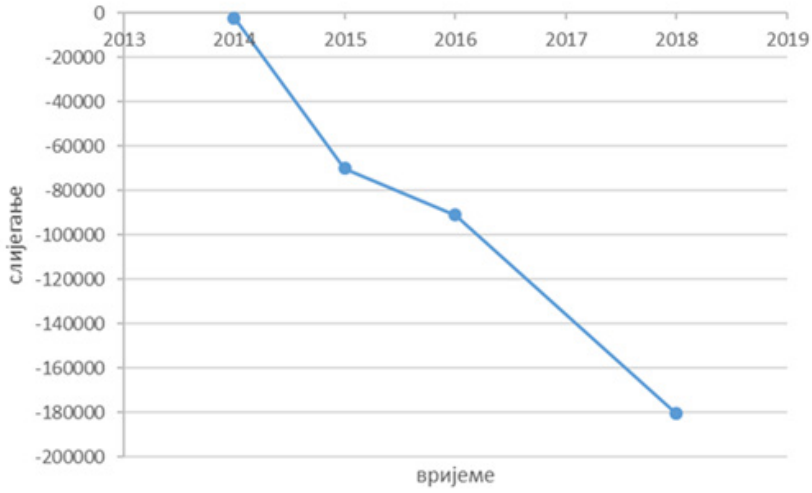
- sistematsko pogoršanje slijeganja tla kroz vrijeme,
- postojanje lokalizovane zone intenzivnog slijeganja (tačke 48, 7, 23, 79),
- da se problemi sa slijeganjem ne rješavaju s vremenom, već postaju intenzivniji.

Prethodnom grafičkom analizom raspodjele podataka, kao i na osnovu rezultata testa normalnosti, utvrđeno je da vrijednosti slijeganja ne prate normalnu raspodjelu. U cilju ispitivanja međusobne povezanosti rezultata slijeganja dobijenih u različitim epohama mjerenja, izvršena je korelaciona analiza. U nastavku ovog rada upotrijebljen je Spearman-ov test korelacije, pošto na osnovu prethodne analize podaci ne ispunjavaju uslove za primjenu Pearson-ve linearne korelacije [3]. Prvo je analizirana veza između promjene slijeganja u ranom intervalu posmatranja (dH1) i promjene slijeganja u srednjem vremenskom intervalu (dH3), u cilju ispitivanja promjene slijeganja tla s vremenom. Dobijena vrijednost testa je 0,652 ($p < 0,001$), što pokazuje da postoji snažna pozitivna korelacija između dH1 i dH3. Zatim su analizirane promjene slijeganja između srednjeg (dH3) i najdužeg intervala (dH5), gdje je dobijena vrijednost 0,860 ($p < 0,001$) koja pokazuje veoma snažnu pozitivnu korelaciju.

Tabela 3. Pregled Spearman-ovih korelacija

Poređenje intervala	Spearman ρ	Tumačenje
dH1 – dH3	0,652	snažna pozitivna korelacija
dH3 – dH5	0,860	veoma snažna pozitivna korelacija

U radu je, neparametarskim testom Man-Kendall, ispitan trend promjene izmjerenih vrijednosti slijeganja tačaka kroz vrijeme. Dobijena vrijednost Kendall-ovog koeficijenta $\tau = -1,000$ ukazuje na potpuno monotono negativan trend, odnosno na kontinuirano povećanje slijeganja tokom vremena bez promjene smjera procesa, što pokazuje i grafička analiza na Slici br. 5.



Slika br. 5. Slijeganje tla kroz mjerne epohe

Međutim, s obzirom na to da je p-vrijednost testa p = 0,083, uočeni trend nije statistički značajan na nivou značajnosti 0,05. Ovo ukazuje da, iako vizuelna analiza pokazuje opadajući trend, on ne može biti potvrđen sa dovoljnom statističkom pouzdanošću, što je vjerovatno posljedica malog broja mjernih epoha i relativno malih apsolutnih promjena visine. Sa prethodnog dijagrama primjećujemo očiglednu razliku slijeganja između godina. Da bismo odredili kolika je i da li uopšte postoji određena zavisnost u slijeganju, koristićemo Friedman-ov test zato što ispitivanje sprovodimo na zavisnim uzorcima, odnosno vršimo mjerenja istih tačaka kroz različite godine.

Tabela br. 4. Friedman–ov test

	Mean Rank
dH1(H1_H0)(mm)	2,91
dH2(H2_H0)	2,47
H3_H0	2,52
H5_H0	2,10

N	80
Chi-Square	16,011
df	3
Asymp. Sig.	,001

Primjenjujući Friedman-ov test na podatke o slijeganju za periode 2014, 2015, 2016. i 2018. godine, dobijeni su sljedeći rezultati: $\chi 2(3) = 16,011$, p = 0,001. Dobijena p-vrijednost, koja je statistički veoma značajna na nivou značajnosti 0,05, ukazuje na veliku razliku u slijeganju između ispitanih godina. Rangovi pojedinačnih godina pokazuju da 2014. godina ima najviši srednji rang (2,91), što ukazuje na najintenzivnije slijeganje tla upravo u toj godini, dok 2018. godina ima najniži rang (2,10). Friedman ne upoređuje ukupno slijeganje, već godišnje promjene slijeganja. U 2014. godini visina tla je najviše opala što nam pokazuje i njen rang, dok se u 2018. godini visina tla smanjila za najmanju vrijednost. Nakon što je Friedman-ov test pokazao značajnu razliku između godina (p = 0,001), sprovedena je post-hoc analiza koristeći Wilcoxon test prema nivou značajnosti p < 0,0083 (0,05/6).

Tabela br. 5. Wilcoxon-ov test

	dH2(H2_H0) - dH1(H1_H0) (mm)	H3_H0 - dH1 (H1_H0)(mm)	H5_H0 - dH1 (H1_H0)(mm)	H3_H0 - dH2 (H2_H0)	H5_H0 - dH2 (H2_H0)	H5_H0 - H3_H0
Z	-3,179[b]	-3,364[b]	-4,381[b]	-,620[b]	-3,666[b]	-4,108[b]
Asymp. Sig. (2-tailed)	,001	<,001	<,001	,536	<,001	<,001

Post-hoc analiza koristeći Wilcoxon test otkrila je sljedeće značajne razlike: godina 2014. se statistički značajno razlikuje od svih ostalih godina (2015, 2016, 2018; p < 0,001 za sva poređenja). Dok s druge strane, 2015. i 2016. godina nisu pokazale statistički značajnu razliku (p = 0,536), što ukazuje na skoro isti nivo slijeganja u ovim prelaznim godinama. Godina 2018. se, takođe, značajno razlikuje od svih prethodnih godina. Za bolje razumijevanje prikazaćemo dobijene podatke u Tabeli br. 6.

Tabela br. 6. Pregled Wilcoxon-ovog testa

Poređenje	p – vrijednost	Značajnost ($p < 0.0083$)	Interpretacija
2014:2015	0,001	Da	Razlikuju se
2014:2016	< 0,001	Da	Razlikuju se
2014:2018	< 0,001	Da	Razlikuju se
2015:2016	0,536	Ne	Slične godine
2015:2018	< 0,001	Da	Razlikuju se
2016:2018	< 0,001	Da	Razlikuju se

Na osnovu dobijenih rezultata može se uočiti slijeganje tla kroz tri faze:

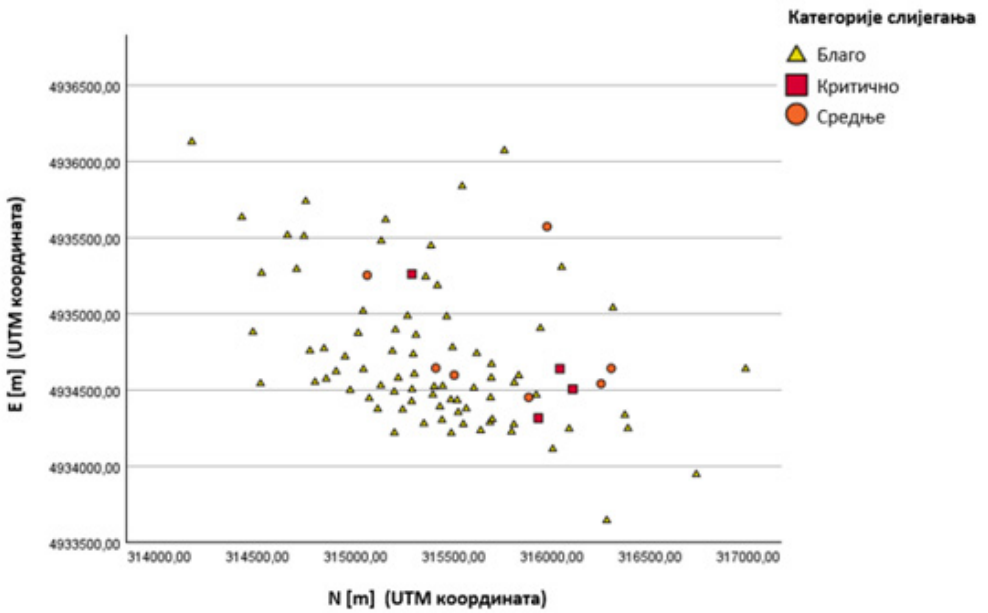
- Faza 1 (2014): najveće godišnje slijeganje, statistički značajno različita od kasnijih godina, može predstavljati početnu stabilizaciju tla nakon izgradnje;
- Faza 2 (2015–2016): sličan nivo slijeganja između godina, nema statistički značajne razlike, predstavlja relativno stabilan period u pogledu slijeganja;
- Faza 3 (2018): najmanji godišnji intenzitet slijeganja, statistički značajno različita od prethodnih godina, ukazuje na smanjenje brzine slijeganja tokom vremena.

3. Identifikacija kritičnih zona i prostorna analiza slijeganja

Slijeganje tla se rijetko manifestuje ravnomjerno na čitavoj površini terena. U praksi, deformacije su često koncentrisane u posebnim zonama gdje se kombinuju nepovoljni geološki uslovi, povišeno opterećenje ili promjene u hidrološkom režimu. Identifikacija ovih kritičnih zona predstavlja ključni korak u procjeni rizika i planiranju odgovarajućih zaštitnih mjera. U prethodnim poglavljima analizirana je vremenska dinamika slijeganja kroz statističke metode koje su ukazale na opšti trend slijeganja i međugodišnje razlike. Međutim, za potpuno razumijevanje procesa neophodno je sprovesti i prostornu analizu koja će otkriti da li postoje oblasti sa visokim intenzitetom slijeganja, kao i da li se ove tačke grupišu u određenim dijelovima terena. Primjenom prostornog pristupa, tačke su kategorisane prema intenzitetu slijeganja, uz identifikaciju najkritičnijih slučajeva koji zahtijevaju posebnu pažnju. Cilj je bio identifikovati tačke sa najvećim slijeganjem i odrediti brzinu njihove deformacije, analizirati prostornu raspodjelu kritičnih tačaka i utvrditi da li formiraju određene zone i procijeniti dobijene rezultate u svrhu monitoringa i održavanja infrastrukture. Prostorna vizuelizacija omogućena je korištenjem UTM koordinata (E, N), što je omogućilo kreiranje mape raspodjele koja jasno prikazuje geografski kontekst svake tačke. Definisane su tri kategorije tačaka na osnovu ukupnog slijeganja u periodu od 2013–2018 (dH5):

- Kritične tačke ($\Delta H \leq -100mm$);

- Tačke sa srednjim slijeganjem (-100mm < Δ ≤ -30mm);
- Tačke sa blagim slijeganjem (ΔH > -30mm).



Slika br. 6. Prostorna raspodjela mjernih podataka

Analizom dijagrama prostorne raspodjele mjernih tačaka (Slika br. 6) uočavamo sljedeće:

- Neravnomjerna raspodjela slijeganja, nije jednako raspoređeno po terenu;
- Tačke sličnog intenziteta imaju tendenciju grupisanja u određenim dijelovima terena;
- Kritične tačke koncentrisane su u srednjem i istočnom dijelu terena, grupisane su i ne pojavljuju se slučajno;
- Periferni dijelovi terena imaju blago ili srednje slijeganje.

Tabela 7. Pregled najkritičnijih tačaka

Tačka	Ukupno slijeganje (mm)	Prosječno godišnje slijeganje (mm/god)	Kategorija	UTM koordinate (E,N)
GT048	-297	-59.4	Kritično	315929,77; 4934315,16
PT015	-257	-51.4	Kritično	316105,28; 4934505,71
GT007	-242	-48.4	Kritično	315285,76; 4935261,91
GT023	-135	-27	Kritično	316039,38; 4934639,07
PT019	-81	-16.2	Srednje	315880,78; 4934450,88

Tabela br. 7 prikazuje pet tačaka sa najvećim ukupnim slijeganjem. Za svaku tačku dati su: identifikacija, ukupno slijeganje u milimetrima, prosječna godišnja brzina slijeganja, kategorizacija prema intenzitetu i UTM koordinate za geografsku orijentaciju. Tačka GT048 predstavlja najekstremniji slučaj sa ukupnim slijeganjem od –297 mm i prosječnom brzinom slijeganja od –59,4 mm/godišnje. Tačke PT015 i GT007 takođe pokazuju izuzetno visoke vrijednosti slijeganja (preko –240 mm), sa godišnjim brzinama preko –48 mm, dok tačke GT023 (–135 mm) i PT019 (–81 mm) predstavljaju sekundarne kritične tačke, ali sa znatno nižim intenzitetom od prve tri. Prostorni raspored ovih tačaka ukazuje na dva različita slučaja:

- Tačka GT048 je relativno izolovana, što može ukazivati na lokalnu, geološku nepovoljnost tla;
- Tačke PT015, GT007 i GT023 formiraju grupu u srednjoj zoni terena, što nam sugeriše na pogoršane geotehničke uslove.

ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedene statističke analize rezultata mjerenja slijeganja tla u periodu od 2013. do 2018. godine može se zaključiti da na posmatranoj lokaciji postoji izražen i vremenski kontinuiran proces slijeganja tla. Deskriptivna statistička analiza i grafički prikazi (Slika br. 2. do Slika br. 5.) ukazuju na sistematsko pogoršanje stanja tla kroz vrijeme, uz pojavu lokalizovanih zona sa znatno većim intenzitetom slijeganja u odnosu na ostatak terena. Rezultati testova normalnosti pokazali su da podaci ne prate normalnu raspodjelu, što je dovelo do primjene neparametarskih statističkih metoda. Spearman-ova korelaciona analiza ukazala je na snažnu i veoma snažnu pozitivnu povezanost između slijeganja u različitim vremenskim intervalima, što pokazuje da tačke sa izraženijim slijeganjem u ranijim fazama nastavljaju da pokazuju povećane deformacije i u kasnijim periodima. Ovi rezultati su u skladu sa teorijom konsolidacije tla i ukazuju na postojanje stabilnog trenda ponašanja tla tokom vremena. Friedman-ov test potvrdio je postojanje statistički značajnih razlika u godišnjim promjenama slijeganja između posmatranih godina, pri čemu je identifikovana početna faza sa najvećim intenzitetom slijeganja, zatim prelazna stabilna faza, kao i kasnija faza sa smanjenom brzinom slijeganja. Prostorna analiza dodatno je ukazala na neravnomjernu raspodjelu slijeganja, sa jasno izdvojenim kritičnim zonama u središnjem i istočnom dijelu terena. Na osnovu dobijenih rezultata tokom istraživanja, navodimo preporuke za budući monitoring i intervencije:

- Za tačke GT048, PT015 i GT007 predlaže se sprovođenje dodatnih geotehničkih istraživanja i razmatranje tehničkih intervencija (injektiranje tla, ojačavanje temelja).
- Pojačati monitoring za sve kritične tačke i uvesti mjerenje na svakih šest mjeseci umjesto godišnjih mjerenja.
- U budućim projektima izbjegavati izgradnju u identifikovanim zonama visokog rizika ili predvidjeti dodatne mjere stabilizacije.

Na osnovu dobijenih trendova i prosječnih brzina slijeganja, moguće je izvesti procjene budućih deformacija. Kritične tačke zahtjevaju najveću pažnju:

- Tačka GT048 (-59,4 mm/god): Ukoliko se trend nastavi, u narednih pet godina očekuje se dodatnih -297 mm slijeganja, što će dovesti do ukupnog pada od -594 mm za desetogodišnji period.
- Tačka PT015 (-51,4 mm/god): Procijenjeno slijeganje za desetogodišnji period je –514 mm.
- Tačka GT007 (–48,4 mm/god): Procijenjeno slijeganje za 10 godina je –484 mm.

Na osnovu vremenske i prostorne analize podataka zaključujemo da kontinuirani monitoring i sistematska obrada podataka slijeganja tla predstavljaju neizostavan preduslov za očuvanje stabilnosti i bezbjednosti kako samog tla, tako i svih građevinskih objekata koji se na njemu nalaze.

LITERATURA

[1] Nonveiller, E. (1979). *Mehanika tla i temeljenje građevina*, Zagreb, Školska knjiga.
[2] Roje-Bonacci, T. (2007). *Mehanika tla*. Treće izdanje. Split. Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet.
[3] Jakšić, S., & Maksimović, S. 2020. *Vjerovatnoća i statistika*. Univerzitet u Banjoj Luci, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet, Banja Luka, str. 223–233.
[4] Maksimović M. 2005. *Mehanika tla*, Beograd.
[5] Preradović Lj., & Đajić V. (2011). *Analitičke i statističke tehnike u savremenim istraživanjima*, AGGf.
[6] Baecher, G. B., & Christian, J. T. (2003). *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. John Wiley & Sons.
[7] Benjamin, J. R. Cornell, C. Allin (2014). Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers. Dover Publications.
[8] EN 1997-1:2004. Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules.

STATISTICAL EVALUATION OF GROUND SUBSIDENCE DATA

Author: MARIJA KAČAVENDA
e-mail: marija.kacavenda@student.aggf.unibl.org
Mentor: Full Prof. Snježana Maksimović
Faculty of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, University of Banja Luka

Introduction: Ground subsidence represents a complex geotechnical process that may significantly compromise the stability of structures and infrastructure.

Objective: This study presents a comprehensive statistical analysis of subsidence measurements collected at 89geodetic control points over the period from 2013 to 2018, with the purpose of spatial analysis of subsidence and identification of critical zones.

Materials and Methods: Descriptive analysis showed that mean subsidence ranged from –0.2 mm (2014) to –18.1 mm (2018), while the maximum recorded subsidence reached –297 mm. Critical points with cumulative subsidence exceeding 100 mm were identified, most notably GT048 (–297 mm; –59.4 mm/year), PT015 (–257 mm; –51.4 mm/year), and GT007 (–242 mm; –48.4 mm/year). Correlation analysis revealed a strong positive relationship between the early and middle intervals (dH1–dH3: $\rho = 0.652$; $p < 0.001$), and a very strong relationship between the middle and final intervals (dH3–dH5: $\rho = 0.860$; $p < 0.001$). Friedman's test confirmed statistically significant differences between years ($\chi^2 = 16.011$; $p = 0.001$), and the post-hoc Wilcoxon test identified three phases: the phase of highest subsidence (2014), a stable phase (2015–2016), and a phase of reduced intensity (2018).

Conclusion: The results indicate the need for additional geotechnical measures and continuous monitoring, particularly at critical points GT048, PT015 and GT007, where further investigations and interventions are recommended.

Keywords: statistical analysis; non-parametric tests; monitoring; ground subsidence; geotechnical engineering