

UDK/UDC: 004.942:627.8.09

Prejeto/Received: 28.01.2016

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 22.11.2016

UPORABA METODE ODZIVNIH PLOSKEV PRI ANALIZI HIDROTEHNIČNIH OBJEKTOV APPLICATION OF RESPONSE SURFACE METHOD IN ANALYSIS OF HYDRAULIC STRUCTURES

Mateja Klun^{1,*}, Andrej Kryžanowski¹, Simon Schnabl²

¹Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova 2, 1000 Ljubljana

²Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Univerza v Ljubljani, Večna pot 113, 1000 Ljubljana

Izvleček

V članku so prikazani trije vzorčni primeri uporabe metode odzivnih ploskev pri analizi hidrotehničnih objektov: analiza pregrade HE Moste, analiza velike kotalne zapornice na pregradi HE Moste in analiza meritev vodnega skoka v vodnem žlebu. Pri analizi pregrade in zapornice smo metodo odzivnih ploskev uporabili na rezultatih numeričnega eksperimenta, v primeru analize meritev vodnega skoka pa za nadaljnjo interpretacijo izmerjenih količin. Na odzivnih ploskvah smo izvajali simulacije Monte Carlo. V delu želimo prikazati, kako lahko rezultati verjetnostne analize ponudijo dodatne informacije o obnašanju obravnavanega sistema, ki jih zgolj z uporabo determinističnih metod ni mogoče ovrednotiti.

Ključne besede: Metoda odzivnih ploskev, Monte Carlo, numerični model, verjetnostne metode, metoda najmanjših kvadratov, pregrada, zapornica, val.

Abstract

We present an application of a response surface method in analysis of hydraulic structures on three sample cases: analysis of Moste dam, analysis of large roller gate on the Moste dam, and analysis of measurements of hydraulic jump in the laboratory. In the first two cases the method is used to further analyse the results of a numerical experiment, while in the case of a hydraulic jump, the method is applied when dealing with measured data on a scaled physical model in a laboratory. Probabilistic analysis of structures can provide additional information about the behaviour of the system that cannot be identified using only deterministic approach. The three sample cases can present a broad prospect in use of response surface method for various types of analysis.

Keywords: Response Surface Method, Monte Carlo, Numerical Model, Probabilistic analysis, Least Square Method, Dam, Hydraulic Gates, Wave.

* Stik / Correspondence: mateja.klun@fgg.uni-lj.si

© Klun M. et al.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0.](#)

© Klun M. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – Non Commercial – Share Alike 4.0 Licence.](#)

1. Uvod

V običajni inženirski praksi se za analizo konstrukcij uporablja psevdo-deterministični pristop. Zadostno nosilnost in varnost objektov dosežemo z upoštevanjem pogojev mejnih stanj ter s primernim razmerjem med izračunano nosilnostjo konstrukcije in obtežbo, ki nanjo deluje.

Verjetnostne analize so redkeje v uporabi. V osnovi z uporabo teh metod le razširimo osnovno deterministično analizo. Izbrani vhodni podatek opišemo s porazdelitvijo in ne več zgolj z eno deterministično vrednostjo. Ta parameter se zato imenuje slučajna spremenljivka (X) obravnavanega fizikalnega pojava. To je zelo osnoven opis, dejansko so verjetnostne analize zelo kompleksne. Uporaba slučajnih spremenljivk močno poveča zahtevnost analize.

Varnost objekta ni fizikalna lastnost. Odvisna je od lastnosti konstrukcije, socialno-ekonomskih vplivov, časa, znanstvenega napredka, okolja, itd. (Choi, 2007). V življenjskem ciklu konstrukcij imajo naštetih vplivni parametri spremenljive oziroma slučajne vrednosti. Lahko so medsebojno odvisni ali pa popolnoma neodvisni. Zaradi velikega števila spremenljivk, ki imajo posredni ali neposredni vpliv na varnost konstrukcije, je za pojem varnosti mogočih več različnih interpretacij. Pri vprašanju varnosti konstrukcij je treba poskrbeti, da je opis varnosti ali zanesljivosti konstrukcije nedvoumen in jasen ter enakega pomena, ne glede na vplivne parametre okolja. Tak opis je mogoče zagotoviti le z verjetnostno analizo konstrukcij, pri kateri so vhodni podatki slučajne spremenljivke, odziv konstrukcije pa je izračunan in ovrednoten s statističnimi in verjetnostnimi metodami.

2. Teoretične osnove verjetnostne analize konstrukcij

Za izvedbo verjetnostne analize konstrukcije obstaja več različnih metod. Vsem metodam je skupna uporaba slučajnih spremenljivk za opis konstrukcije in obtežbe. Slučajne spremenljivke, ki bistveno vplivajo na varnost obravnavane

konstrukcije, se imenujejo osnovne ali bistvene. Število osnovnih spremenljivk pri verjetnostni analizi je lahko različno. V primeru uporabe več slučajnih spremenljivk se te s pomočjo korelacijske matrike kombinirajo v serije vhodnih podatkov (Turk, 1994; Choi in sod., 2007).

Metode za račun zanesljivosti konstrukcij se delijo v štiri osnovne skupine (Turk, 1994):

- metode prvega reda – FORM (First Order Reliability Method);
- metode drugega reda – SORM (Second Order Reliability Method);
- metode višjih redov – HORM (Higher Order Reliability Method);
- simulacije.

Odziv konstrukcije običajno ni linearen. Poleg tega, tudi v primeru, ko so osnovne spremenljivke med seboj neodvisne in porazdeljene normalno, funkcija odziva ni nujno normalno porazdeljena. Takšni funkciji ne moremo določiti prvih dveh momentov porazdelitve, s katerima matematično opišemo lastnosti slučajne spremenljivke. V tem primeru lahko približne vrednosti prvih dveh momentov ocenimo s pomočjo razvoja v Taylorjevo vrsto okoli izbrane točke x^* . Metoda prvega reda je primerna za uporabo takrat, ko je mejna ploskev odziva približno linearna in metoda drugega reda v primeru odziva, ki je podoben kvadratni ploskvi. Ploskve imajo pogosto drugačne oblike. Takrat običajno uporabimo metode višjih redov. Uporaba FORM, SORM in HORM metod ni zahtevna, vendar pa lahko rezultati teh metod postanejo vprašljivi takrat, ko obravnavamo močno nelinearne sisteme, ali sisteme z majhnimi verjetnostmi ugodnih izidov. Takrat je bolj primerno uporabiti simulacije. Glavna ovira pri uporabi simulacij je običajno ta, da za zanesljive rezultate potrebujemo veliko število ponovitev (Turk, 1994; Choi in sod., 2007).

Cilj verjetnostne analize je ocena vrednosti, da bo konstrukcija dosegla izbrano mejno stanje - običajno govorimo o porušitvi, čeprav mejno stanje ne pomeni nujno porušitve konstrukcije. Verjetnost porušitve lahko ocenimo eksperimentalno ali pa računsko z matematičnim

modelom (numeričnim eksperimentom). Fizični eksperimenti so lahko tehnično izredno zahtevni in dragi, zato se pogosteje namesto njih uporabljajo matematični modeli. Rezultat verjetnostne analize je lahko tudi porazdelitvena funkcija odziva. V tem primeru lahko za različne vrednosti osnovnih spremenljivk določimo verjetnosti prekoračitve izbranega mejnega stanja (Turk, 1994; Choi in sod., 2007).

2.1 Metoda odzivnih ploskev

Pogoj za uspešno verjetnostno analizo konstrukcije so znani podatki o odzivu obravnavane konstrukcije za različne scenarije. Račun odziva konstrukcije, ki natančno zajame ne le celotni spekter delujočih obtežb, ampak tudi vse njihove možne kombinacije, je lahko zelo obsežen. To dejstvo predstavlja eno večjih ovir širši uporabi verjetnostnih metod pri analizah konstrukcij. Metoda odzivnih ploskev je matematični postopek, ki močno zmanjša število ponovitev računa izbranega odziva konstrukcije. Bistvo te metode je, da lahko na osnovi manjšega števila izračunov odziva konstrukcije matematično določimo zadosti natančen zvezni in eksplicitno zapisan približni odziv na celotnem iskanem območju. Najbolj primerni matematični metodi za določitev ustrezne aproksimacije odziva sta metoda najmanjših kvadratov in metoda nevronske mreže (Turk, 1994). Postopek analize z uporabo metode odzivnih ploskev lahko razvrstimo v 4 osnovne korake, ki so prikazani tudi na sliki 1:

- priprava osnovnih spremenljivk in izbira odzivne slučajne spremenljivke;
- izvedba eksperimentov ali numeričnih izračunov;

- aproksimacija v zvezni odziv (približno odzivno ploskev);
- račun prekoračitve mejnega stanja z uporabo ene od verjetnostnih metod na aproksimiranem odzivu konstrukcije (Ditlevsen in Madsen, 1996).

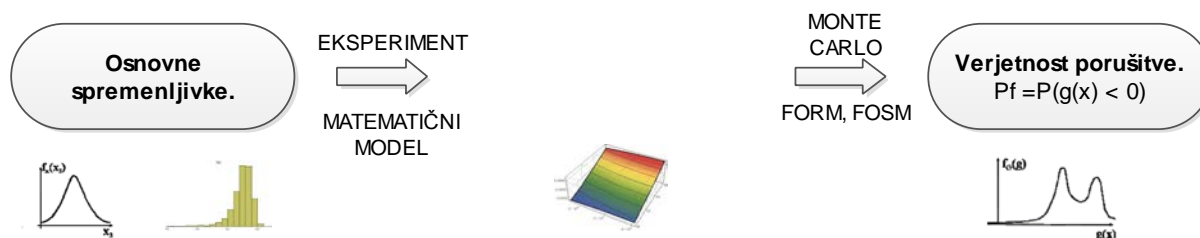
Vsak korak omenjene metode je bolj natančno predstavljen v naslednjih poglavjih.

2.1.1 Priprava osnovnih slučajnih spremenljivk in izbira odzivne slučajne spremenljivke

Izbira primernih osnovnih slučajnih spremenljivk je zelo pomembna. Za vsako osnovno slučajno spremenljivko je potrebno določiti njeno porazdelitev. Na voljo imamo dve možnosti: ali porazdelitev določimo na osnovi vzorcev, pridobljenih z meritvami, ali pa na osnovi fizikalnih lastnosti slučajne spremenljivke. Ko imamo za posamezno slučajno spremenljivko znano porazdelitev, sledi izbira računskih vrednosti za dano slučajno spremenljivko. Načrt izbire računskih vrednosti je lahko slučajni ali deterministični. Slučajni načrti izbire so razmeroma nenatančni in so zato zelo redko v uporabi. Najbolj pogosti so deterministični načrti (Turk, 1994):

- n^k faktorski in delni faktorski;
- simpleks;
- sredinski kompozitni načrt.

Vsem determinističnim načrtom je skupna izbira sredine načrta. Običajno se ta ujema s srednjo vrednostjo slučajne spremenljivke.

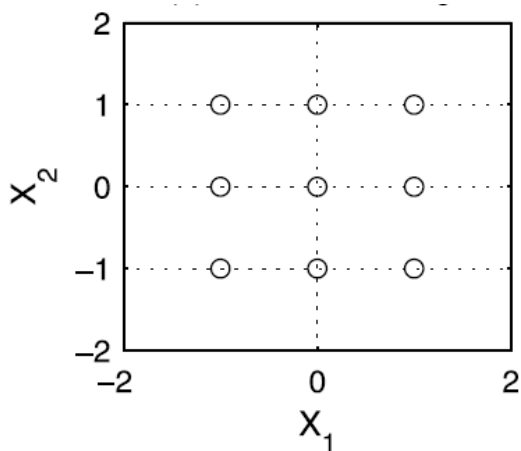


Slika 1: Uporaba metode odzivnih ploskev pri analizi sistema z dvema osnovnima slučajnima spremenljivkama.

Figure 1: Application of response surface method in analysis of a system with two basic random variables.

(i) *faktorski načrt*

Pri faktorskem načrtu n^k vsaka osnovna slučajna spremenljivka (faktor) nastopi na n nivojih. Običajno se uporabita dva ali trije nivoji. Število k pomeni število osnovnih slučajnih spremenljivk in hkrati tudi število dimenzij problema. Vsako osnovno slučajno spremenljivko kombiniramo z vsemi možnimi kombinacijami z ostalimi osnovnimi slučajnimi spremenljivkami. Število poskusov je tako enako n^k . Če na primer v analizi uporabimo dve slučajni spremenljivki in vsako predstavimo s tremi vrednostmi, potem bo število poskusov enako $3^2 = 9$ (Slika 2). Število eksperimentov zelo hitro narašča s povečevanjem nivojev ali faktorjev, zato se tak način izbire uporablja le v primerih z manjšim številom osnovnih slučajnih spremenljivk (tri ali manj). Pri delnih faktorskih načrtih se uporabi le del od n^k eksperimentov. Taki načrti so zato lahko nekoliko pristranski in so redkeje v uporabi (Turk, 1994; Kim in Na, 1997).



Slika 2: Primer sredinskega 3^k faktorkega načrta, v primeru ko je $\mu_1 = \mu_2 = 0$ in $\sigma_1 = \sigma_2 = 1$, $f=1$, $k=2$. Spremenljivke so transformirane tako, da imajo enak velikostni red (Kim in Na, 1997).

Figure 2: Example of 3^k factorial design when $\mu_1 = \mu_2 = 0$ and $\sigma_1 = \sigma_2 = 1$, $f=1$, $k=2$. Variables are transformed in such a way that they are of equal magnitude (Kim in Na, 1997).

(ii) *načrt simpleks*

Pri načrtu simpleks izbiramo vrednosti osnovnih slučajnih spremenljivk tako, da ležijo v ogliščih

pravilnega telesa (enakostranični trikotnik ali tetraeder). Točke oglišč so običajno izbrane tako, da so enako oddaljene od koordinatnega izhodišča. Za ta načrt je potrebno manjše število numeričnih eksperimentov kot pri faktorskem načrtu, to je le $k+1$, kjer je k število osnovnih slučajnih spremenljivk. Torej pri sistemu z dvema slučajnima spremenljivkama potrebujemo le 3 eksperimente (Turk, 1994).

(iii) *sredinski kompozitni načrt*

Sredinski kompozitni načrt sestavlja vsaj ena sredinska točka (n_0) in nato vsaj še dve točki na vsaki osi osnovnih spremenljivk. Te točke so od izhodišča oddaljene za faktor α . Za tak načrt potrebujemo $2^k + 2k + n_0$ eksperimentov (Turk, 1994).

2.1.2 Aproximacija v odzivno ploskev

V nadaljevanju je opisan postopek aproksimacije dejanskega odziva v približno odzivno ploskev z uporabo metode najmanjših kvadratov. Z numeričnim eksperimentom dobimo dejanski odziv $g(\mathbf{X})$ obravnavane konstrukcije v omejenem številu primerov. S pomočjo vrednosti dejanskega odziva nato odziv aproksimiramo v približni odziv $\hat{g}(\mathbf{X})$. Približni odziv odstopa od dejanskega za določeno napako. Skupna napaka aproksimacije vsebuje tudi napako numeričnega eksperimenta (Gavin in Yau, 2008; Kim in Na, 1997).

Ko aproksimiramo dejanski odziv sistema z dvema osnovnima slučajnima spremenljivkama s približnim, je dobljeni približen odziv ploskev v tridimenzionalnem prostoru. Imenuje se približna odzivna ploskev. Približna odzivna ploskev je najboljši možni približek dejanske odzivne ploskve, ki bi jo dobili, če bi račun izvedli z neskončno velikim številom numeričnih eksperimentov (Gavin in Yau, 2008).

Pogosto se ploskve aproksimirajo s polinomi. Najbolj osnovna oblika polinoma, ki se lahko uporabi, je polinom prve stopnje z nedoločenimi koeficienti a in b_i (Kim in Na, 1997):

$$\hat{g}(\mathbf{X}) = a + \sum_{i=1}^n b_i X_i. \quad (1)$$

Običajno se za aproksimacijo uporabi polinom druge stopnje z nedoločenimi koeficienti a , b_i in c_i (Gavin in Yau 2008):

$$\hat{g}(X) = a + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n c_i X_i^2. \quad (2)$$

Za bolj natančen opis nelinearnosti ploskve lahko v polinomu upoštevamo še mešane člene. Koeficienti d_{ij} v enačbi (3) predstavljajo nedoločene koeficiente mešanih členov (Gavin in Yau, 2008):

$$\hat{g}(X) = a + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n c_i X_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n d_{ij} X_i X_j. \quad (3)$$

Polinomi višje stopnje so redkeje v uporabi, avtorji običajno predlagajo uporabo polinomov druge stopnje (Allaix in Carbone, 2011). Avtorja Gavin in Yau, 2008 pa v svojem delu predlagata tudi uporabo polinomov višjih stopenj:

$$\hat{g}(X) = a + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} b_{ij} X_i^j + \sum_{q=1}^m c_q \prod_{i=1}^n X_i^{p_{iq}}. \quad (4)$$

V enačbi (4) predstavljajo: koeficienti b_{ij} člene z le eno slučajno spremenljivko, c_q mešane člene – produkt dveh ali več slučajnih spremenljivk, k_i predstavlja red polinoma, m končno število mešanih členov in p_{iq} red mešanih spremenljivk v mešanem členu (Gavin in Yau, 2008).

Ko je enkrat znana ploskev približnega odziva, lahko to ploskev uporabimo v vseh nadaljnjih analizah. Na taki ploskvi je mogoče direktno izvajati simulacije ali uporabiti katero izmed drugih verjetnostnih metod.

2.2 Uporaba metode Monte Carlo pri verjetnostni analizi konstrukcij

Metoda Monte Carlo je statistična poskusna metoda. Prednost te metode pred ostalimi je v tem, da ne glede na zahtevnost obravnavanega sistema – nelinearnost odzivne ploskve, ob zadostnem številu poskusov običajno poda zanesljiv rezultat. Metoda je primerna za uporabo, ko računamo verjetnosti pojava nekega dogodka z jasno znano mejno vrednostjo (porušitev objekta, presežen dovoljeni pomik). Ima pa tudi pomanjkljivosti, pri sistemih z

majhno verjetnostjo ugodnih izidov (primer zelo majhne verjetnosti porušitve konstrukcije) je za zanesljiv rezultat potrebno izvesti veliko število računskih simulacij. V tem primeru lahko ta metoda postane računsko preobsežna.

Uporaba simulacij z metodo Monte Carlo v kombinaciji z metodo odzivnih ploskev je dokaj enostavna, saj imamo v tem primeru za približen odziv podan eksplicitni izraz. Za izvedbo analize Monte Carlo moramo le še določiti meje računskega območja in mejni pogoj. Mejni pogoj na ploskvi bo mejna funkcija in običajno nas bodo zanimale vrednosti, ki padejo nad mejno funkcijo. Tako štejemo ugodne izidov N_f glede na mejni pogoj in jih na koncu primerjamo s številom vseh simulacij N . Če je mejni pogoj porušitev konstrukcije, potem lahko verjetnost porušitve konstrukcije P_f zapišemo z izrazom (Ditlevsen in Madsen, 1996):

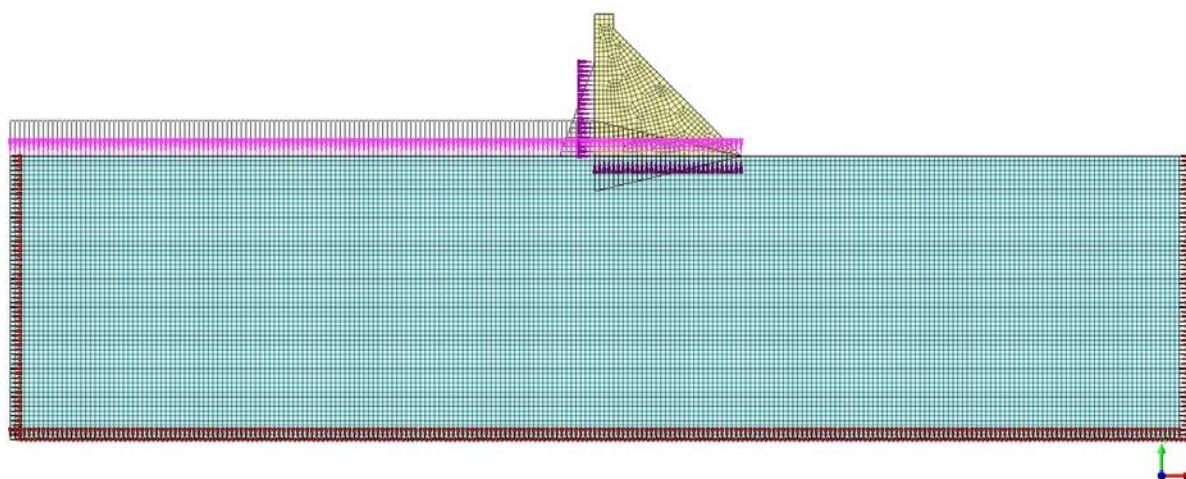
$$P_f = \frac{N_f}{N}. \quad (5)$$

Standardno napako (s) storjeno pri uporabi metode Monte Carlo ocenimo ob predpostavkah, da je eksperimentalna napaka normalno porazdeljena s srednjo vrednostjo 0 in da verjetnost porušitve P_f postane normalno porazdeljena, ko število ponovitev narašča (Dalsgaard Sorensen, 2004):

$$s = \sqrt{\frac{P_f(1-P_f)}{N}}. \quad (6)$$

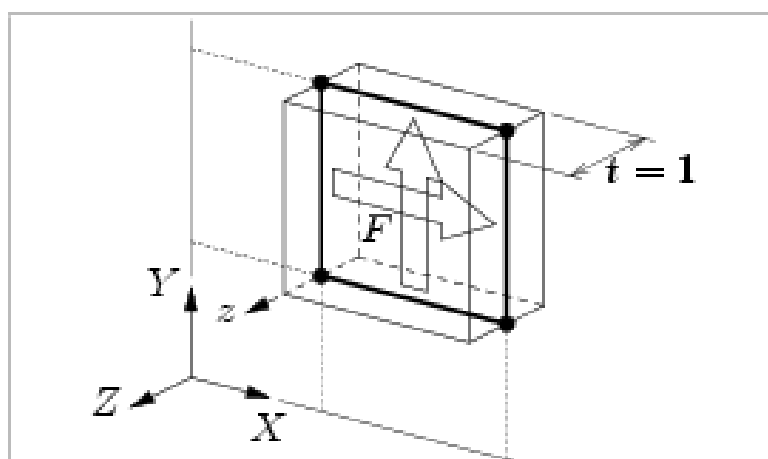
3. Analiza pregrade HE Moste

Uporabo metode odzivnih ploskev bomo prikazali na primeru ločno-težnostne pregrade HE Moste, ki je s 60 metri višine najvišja betonska pregrada v Sloveniji. S pomočjo programskega orodja *TNO Diana 9.4.3.* smo izdelali numerični model pregrade, temeljnih tal ter obtežbe (Slika 3). Uporabili smo ravninski deformacijski model (RDM) definiran v ravnini XY in sicer z enotsko debelino $t=1$ m. Pri analizi smo uporabili metodo končnih elementov. Uporabljeni ravninski končni element je prikazan na sliki 4 (DIANA User's Manual, 2010).



Slika 3: Numerični model pregrade, temeljnih tal in obtežbe.

Figure 3: Mathematical model of the dam, foundation and loads.



Slika 4: Lastnosti končnega elementa v RDM (DIANA User's Manual, 2010).

Figure 4: Characteristics of plane strain elements (DIANA User's Manual, 2010).

Temeljna hribinska podlaga pod pregrado je modelirana do globine dveh višin pregrade ter v skupni dolžini devetkratnika debeline pregrade v temelju. Značilnosti temeljne hribine in betona vgrajenega v pregrado so prikazane v preglednici 1. Elastični modul podlage smo privzeli večji od elastičnega modula pregrade, tako je temeljna hribina v primerjavi s konstrukcijo pregrade bolj toga. Podajnost temeljne hribine smo v modelu upoštevali preko definicije stičnega elementa na stiku pregrada-temeljna hribina. Temu elementu smo namenili posebno pozornost. Podajnost podlage je definirana z vrednostmi tangencialnega

in strižnega modula. Njune vrednosti so določene po priporočilih, kot jih navaja Chatterjee (2013) v svojem prispevku. S tem stičnim elementom so v modelu omogočeni diferenčni pomiki na stiku med pregrado in temeljno podlago in omogočen je nastanek razpoke na stiku. Vrednosti uporabljene v izračunih so prikazane v preglednici 2.

V skrajnih točkah modela smo z nepomično podporo v smereh x in y preprečili pomike na spodnjem robu. Levi in desni robni pogoj smo modelirali s preprečenim pomikom v smeri osi x. S tem so omogočeni posedki, hkrati pa na robu modela ne prihaja do nateznih napetosti.

Preglednica 1: Lastnosti betona vgrajenega v pregrado in temeljno hribino.

Table 1: Characteristics of concrete in the dam and in the foundation.

| | Elastični modul [MPa] | Poissonov količnik [-] | Gostota [kg/m ³] | Koeficient raztezanja [-] | Uporabljeni končni element |
|------------------|-----------------------|------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Beton v pregradi | Spremenljiv | 0,2 | 2400 | 0,00001 | Q8EPS |
| Temeljna hribina | 54000 | 0,2 | 2400 | - | Q8EPS |

Preglednica 2: Lastnosti stičnega elementa med pregrado in temeljno hribino.

Table 2: Characteristics of the connecting element between the dam and the slope foundation.

| | Tangencialni strižni modul [MN/m ³] | Normalni strižni modul [MN/m ³] | Dilatacijski kot [°] | Kot notranjega trenja [°] | Kohezija [N/m ²] | Uporabljeni končni element |
|----------------|---|---|----------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Stični element | 761,775 | 7617,75 | 10 | 30 | 700 | L8IF |

Preglednica 3: Lastnosti sedimenta v akumulaciji in apnenca na vkopanem delu pregrade.

Table 3: Characteristics of the sediment in the reservoir and the limestone in the underground part of the dam.

| | Strižni kot [°] | Prostorninska teža [kN/m ³] | Višina sloja [m] | Tip obtežbe |
|--------------------|-----------------|---|------------------|--------------|
| Mulj v akumulaciji | 22 | 16 | 8 | Porazdeljena |
| Temeljna hribina | 55 | 26 | 15 | Porazdeljena |

Vpliv zadrževalnika na betonsko pregrado in na temeljno hribino smo upoštevali kot porazdeljeno slučajno obtežbo. Torej višina vode v zadrževalniku predstavlja eno izmed izbranih osnovnih spremenljivk, ki je slučajne narave. Vzgon na mestu stika smo upoštevali po priporočilih FERC, (2002). Vzdolž stičnega elementa smo vnesli zvezno obtežbo, pri čemer smo upoštevali vpliv spremenljive višine vode v akumulaciji. Zasip zadrževalnika s sedimenti predstavljajo aktivni pritiski mulja s strižnim kotom 22 °. Podatek o višini sedimenta smo privzeli s spletne strani podjetja Vekton d.d. (<http://www.vektion.si/>), ki je izvajalo črpanje

mulja iz zadrževalnika HE Moste. Vkopanost pregrade v temeljno hribino je prav tako predstavljena kot aktivni pritisk skalnate hribine – apnenca na pregrado (efektivni pritiski). Globino vkopa smo pridobili iz načrta pregrade. S takšnim načinom modeliranja zasutja smo predpostavili pojav razpoke med zalednim zasutjem in pregrado. Hkrati pa smo upoštevali tudi polne hidrostatične tlake vse do pete pregrade, kar je v skladu s pojavom razpoke. Ta se po izkušnjah vedno pojavi zaradi horizontalnega pomika pregrade po prvi polnitvi (ICOLD, 2001). Lastnosti sedimenta v akumulaciji in apnenca v vkopanem delu stika so predstavljene v preglednici 3.

3.1 Osnovne spremenljivke v modelu

V modelu smo uporabili dve osnovni slučajni spremenljivki:

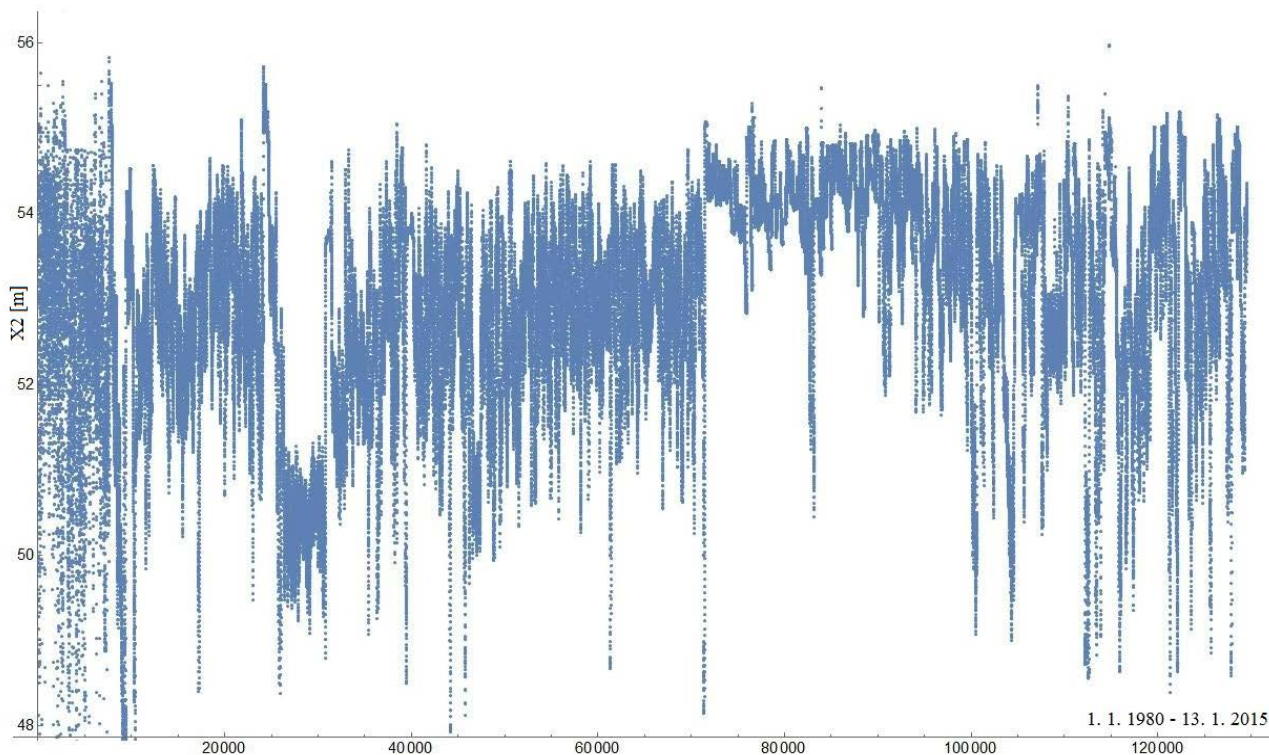
- X_1 = modul elastičnosti vgrajenega betona v pregradi;
- X_2 = višina vode v akumulaciji.

Podatki o višini vode v akumulaciji so rezultat meritev nivoja vode na pregradi, ki jih od leta 1980 izvaja upravitelj pregrade. Obravnavali smo vzorec urnih meritev v obdobju med 1980-2015. Kronološki potek gladin v akumulaciji v tem obdobju je prikazan na sliki 5. V tem obdobju je znašala maksimalna izmerjena gladina vode v akumulaciji 56,4 m, kar ustreza absolutni koti 524,75 m.n.m., najnižja pa 40,57 m, kar ustreza absolutni koti 508,92 m.n.m.

Za merjeni vzorec globin vode smo poiskali primerno porazdelitveno funkcijo. Uporabili smo Gumbelovo porazdelitev z vrednostjo za največjo

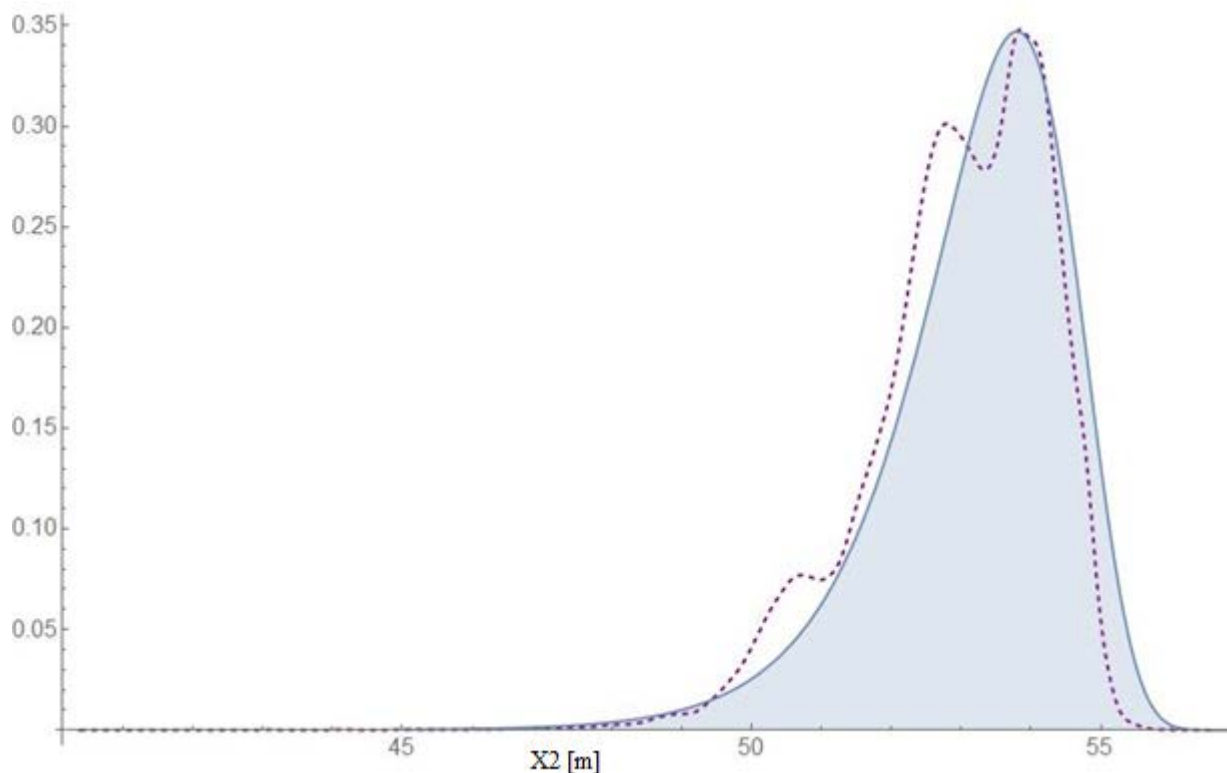
verjetnost pojava višine vode 53,8 m in vrednostjo standardnega odklona 1,3 m ter faktorjem $\beta=1,04$ (Slika 6).

Podatke o modulu elastičnosti betona smo pridobili iz raziskave ultrazvočne tomografije iz leta 1998, ki jo je izdelalo podjetje Euromin. Ultrazvočna tomografija je neporušna metoda za oceno stanja masivnega betona. Pri tej metodi po višini pregrade emitiramo ultrazvočne valove in jih zaznavamo v prečni in vzdolžni smeri s sprejemniki. Zvok med potovanjem od oddajnika do sprejemnika potuje z različnimi hitrostmi, ki so odvisne od lastnosti snovi (Haach in Juliani, 2014). Na osnovi analize širjenja zvočnih valov so bile določene vrednosti modula elastičnosti v analiziranih presekih: srednja vrednost modula elastičnosti betona vgrajenega v pregrado znaša $\mu_{X_1} = 28,14$ GPa in standardni odklon $\sigma_{X_1} = 4,22$ GPa; porazdelitev njegovih vrednosti pa smo opisali z normalno porazdelitvijo.



Slika 5: Meritve globin vode v obdobju 1980 – 2015.

Figure 5: Measured water depths in the period 1980 – 2015.



Slika 6: Zvezni histogram vzorca meritev višin vode v akumulaciji HE Moste (črtkano) in Gumbelova porazdelitev s faktorjema $\alpha=53,8$ in $\beta=1,04$.

Figure 6: Continuous histogram of sample of measurements of water heights in Moste reservoir and approximation with Gumbel distribution (dashed) with factors $\alpha=53.8$ in $\beta=1.04$.

Preglednica 4: Računske vrednosti osnovnih spremenljivk X_1 in X_2 .

Table 4: Computing values of variables X_1 and X_2 .

| | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Vrednost elastičnega modula betona [MPa] (X_1) | 15477 | 19698 | 23919 | 28140 | 32361 | 36582 | 40803 |
| Višina vode v akumulaciji [m] (X_2) | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 |

Za vsako od osnovnih računskih spremenljivk smo izbrali sedem računskih vrednosti. Za osnovo smo privzeli srednjo vrednost posamezne slučajne spremenljivke in od te vrednosti odmik za večkratnik standardnega odklona na vsako stran krivulje:

$$X_i = \mu_{X_i} + k \cdot \sigma_{X_i}, \quad (7)$$

$$k \in \{1, 2, 3, 0, -1, -2, -3\},$$

$$i \in \{1, 2\}.$$

Vrednosti obeh osnovnih spremenljivk so prikazane v preglednici 4. Za medsebojno

kombinacijo vrednosti osnovnih spremenljivk smo uporabili faktorski načrt. Na ta način smo dobili 49 parov vrednosti, ki smo jih vnesli v numerični model.

3.2 Aproksimacija v odzivno ploskev

Spremljali in beležili smo horizontalni pomik krone pregrade (pomik najbolj gorvodnega vozlišča v kroni pregrade = slučajna spremenljivka X_3). Na tem mestu je zaradi geometrije konstrukcije in načina delovanja obtežbe

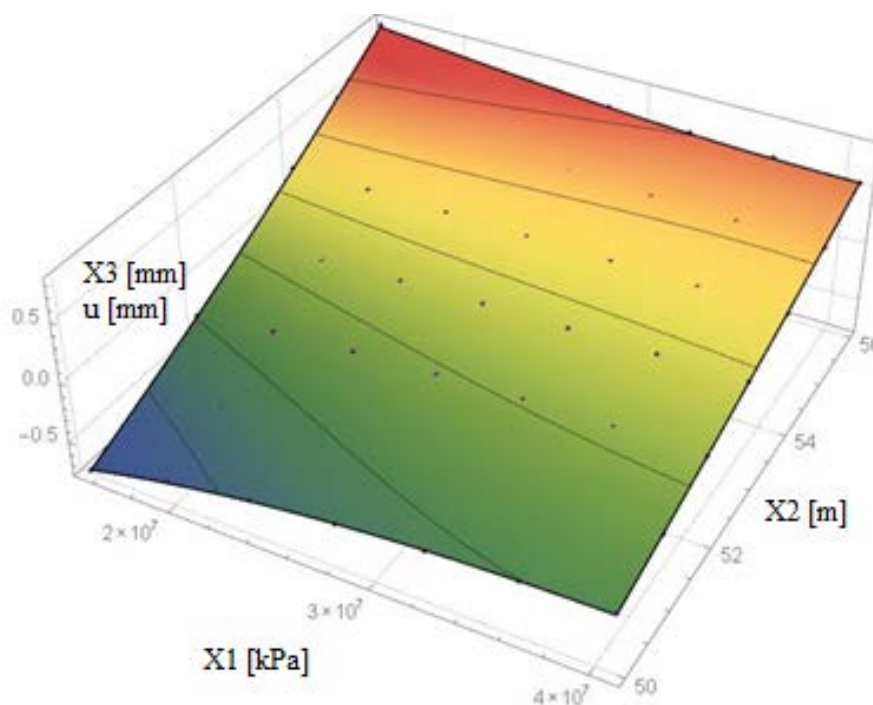
pričakovati največje pomike. Ob dejstvu, da obravnavamo že obstoječi objekt in za analizo uporabljamo merjene podatke na samem objektu, je pričakovati odziv pregrade v elastičnem območju. Zbrane vrednosti pomikov smo s predpisom oblike polinoma aproksimirali v približno odzivno ploskev. Pri tem smo uporabili pet različnih polinomov: polinom prve stopnje (I, x_1, x_2), polinom druge stopnje brez mešanih členov ($I, x_1, x_2, x_1^2, x_2^2$), polinom druge stopnje z mešanimi členi ($I, x_1, x_2, x_1^2, x_2^2, x_1 x_2$), polinom tretje stopnje ($I, x_1^3, x_1^2, x_1, x_2, x_2^2, x_2^3, x_1 x_2, x_1^2 x_2, x_1 x_2^2$) in polinom četrte stopnje ($I, x_1^3, x_1^2, x_1, x_2, x_2^2, x_2^3, x_1 x_2, x_1^2 x_2, x_1 x_2^2, x_1^4, x_2^4, x_1 x_2^3, x_1^3 x_2, x_1^2 x_2^2$). Izračunani približni odziv (to je pomik krone pregrade) je prikazan na sliki 7. Eksplicitni zapis funkcije zapišemo s polinom tretje stopnje v izrazu:

$$x_3 = 0,03375 + 1,51349 \cdot 10^{-10} x_1 - 1,02294 \cdot 10^{-17} x_1^2 + 7,57597 \cdot 10^{-27} x_1^3 - 0,00218 x_2 + 1,02568 \cdot 10^{-11} x_1 x_2 + 1,77172 \cdot 10^{-19} x_1^2 x_2 + 0,00004 x_2^2 - 2,35197 \cdot 10^{-13} x_1 x_2^2 - 1,59643 \cdot 10^{-7} x_2^3. \quad (8)$$

V zgornjem izrazu predstavljajo vrednosti slučajnih spremenljivk: x_3 – pomik krone pregrade [m], x_1 – elastični modul vgrajenega betona [MPa], x_2 – globino vode v akumulaciji [m].

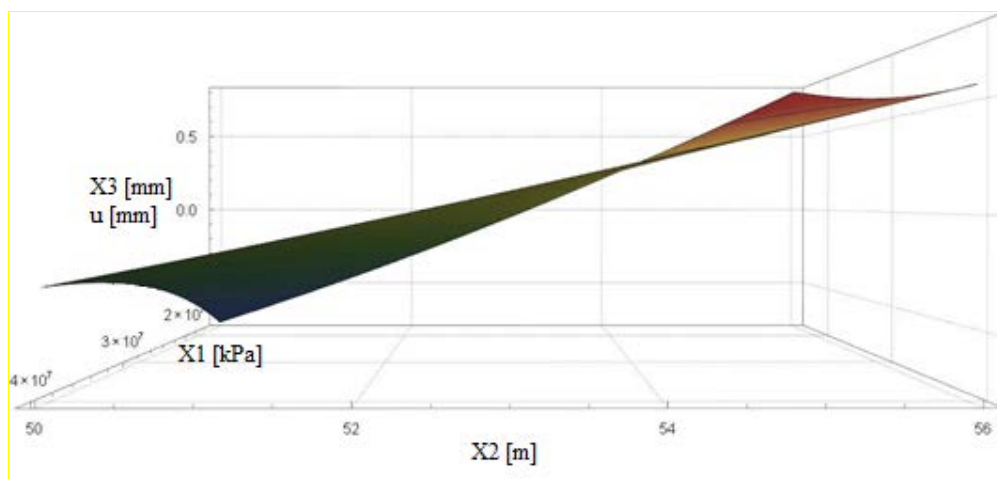
Izraz (8) lahko zapišemo tudi tako, da izpustimo člene z zanemarljivim vplivom. Zanemarili smo tiste člene, ki imajo po vrednotenju vrednost manj kot 10^{-2} [m].

$$x_3 = 0,03375 - 0,00218 x_2 + 0,00004 x_2^2 - 2,35197 \cdot 10^{-13} x_1 x_2^2 - 1,5964 \cdot 10^{-7} x_2^3. \quad (9)$$



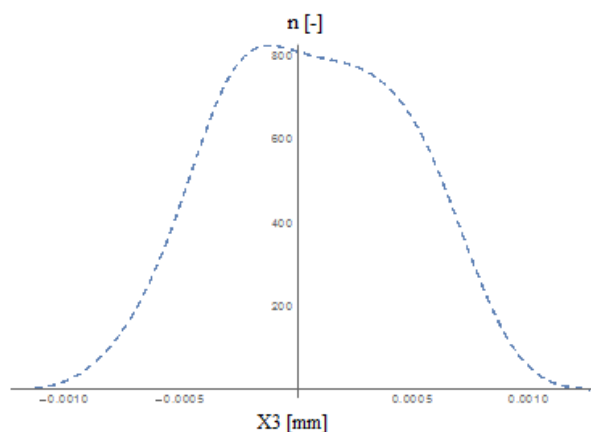
Slika 7: Odzivna ploskev pomika krone pregrade v odvisnosti od modula elastičnosti vgrajenega betona in višina vode v akumulaciji za pregrado. Pike predstavljajo računске točke za izračun dejanskega odziva.

Figure 7: Response surface – displacement of the crown of the dam in relation to elastic module of the concrete and reservoir water height. Purple dots mark the values of the actual response calculated with the numerical experiment.



Slika 8: Stranski pogled na odzivno ploskev pomika krone pregrade za boljši prikaz nelinearnosti ploskve.

Figure 8: Side view of the response surface.



Slika 9: Gostota porazdelitve pomika krone pregrade.

Figure 9: Probability density function of displacements of the Moste dam.

3.3 Rezultati analize pregrade HE Moste

Odzivna ploskev konstrukcije v izbrani točki v kroni pregrade HE Moste je rahlo nelinearna. Različne stopnje polinoma uporabljenega za aproksimacijo odziva vrnejo zelo podobne približne odzivne ploskve. Odstopanja so minimalna. Rezultat analize pomika krone pregrade z uporabo metode Monte Carlo v obravnavanem obdobju, po letu 1980, pokaže, da znaša srednja vrednost horizontalnega pomika krone pregrade $\mu_{X_3} = 0,06$ mm (Gostota porazdelitve pomika krone pregrade je prikazana na sliki 9). Maksimalni računski pomik pregrade v smeri dolvodno znaša 0,82 mm. Maksimalni pomik na pregradi, izmerjen med potresom leta 1998, pa

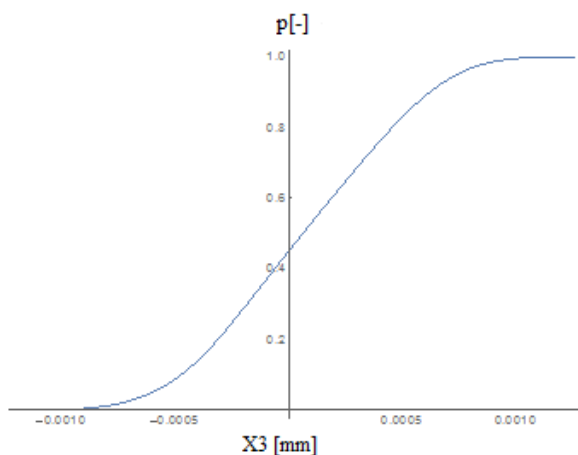
je bil 1,27 mm (Sedaj in sod., 2010). Torej je bil merjeni pomik krone pregrade pri delovanju izjemne obtežbe za 0,42 mm večji od maksimalnega računskega pomika zaradi vpliva višine vode in kakovosti vgrajenega betona. Računske pomike lahko aproksimiramo z normalno porazdelitvijo. Kot lahko vidimo na grafu kumulativne porazdelitvene funkcije (Slika 10), se pregrada v 65 % obtežnih situacijah premakne v smeri dolvodno in v 35 % v smeri gorvodno. Iz enačbe (9) je mogoče videti, da ima višina vode prevladujoč vpliv na odziv konstrukcije. Elastični modul betona vpliva manj. V primeru, ko je globina vode v akumulaciji vsaj 54 m, se pregrada pomakne dolvodno, pri nižjih vodostajih pa je pomik pregrade usmerjen

gorvodno. To je pričakovano. Pregrade so namreč zasnovane na način, da čim bolj učinkovito prenašajo obtežbo vode. Krona pregrade pa je običajno razširjena iz drugih razlogov – promet, komunikacija, kar v primeru nižjih vodostajev pomeni, da bo rezultanta sil v kroni pregrade usmerjena gorvodno, kar vodi do pomika krone v smeri rezultante. Tako je tudi v primeru pregrade HE Moste.

Preverili smo tudi kako na rezultat vpliva število simulacij v metodi Monte Carlo. Najprej smo preverili, pri katerem številu ponovitev se rezultat ustali. Analizo smo začeli z desetimi ponovitvami in jih nato povečevali do vrednosti 10^7 . Analizo smo izvedli na ploskvah odziva različnih stopenj. Rezultati analize so prikazani na sliki 11, kjer je prikazan delež pomikov pregrade, večjih od 0,4 mm. Razlike zaradi uporabe različnih stopenj polinoma za aproksimacijo ploskve odstopajo med seboj za 3 %. Pri polinomih nižje stopnje se rešitve ustalijo prej kot pri polinomih višjih stopenj. Tako se pri polinomu prve stopnje rezultat ustali že pri 10^3 ponovitvah, pri polinomu druge stopnje pri 10^4 ponovitvah, pri polinomih višjih stopenj pa pri 10^5 ponovitvah. To je pričakovan rezultat, saj se s povečevanjem stopenj polinoma povečuje nelinearnost približne odzivne ploskve. Na sliki 12 so prikazani tudi računski časi glede na uporabljeni aproksimacijski polinom. Prikazani so računski časi za 10^5 , 10^6 in 10^7 ponovitev. Kot lahko vidimo

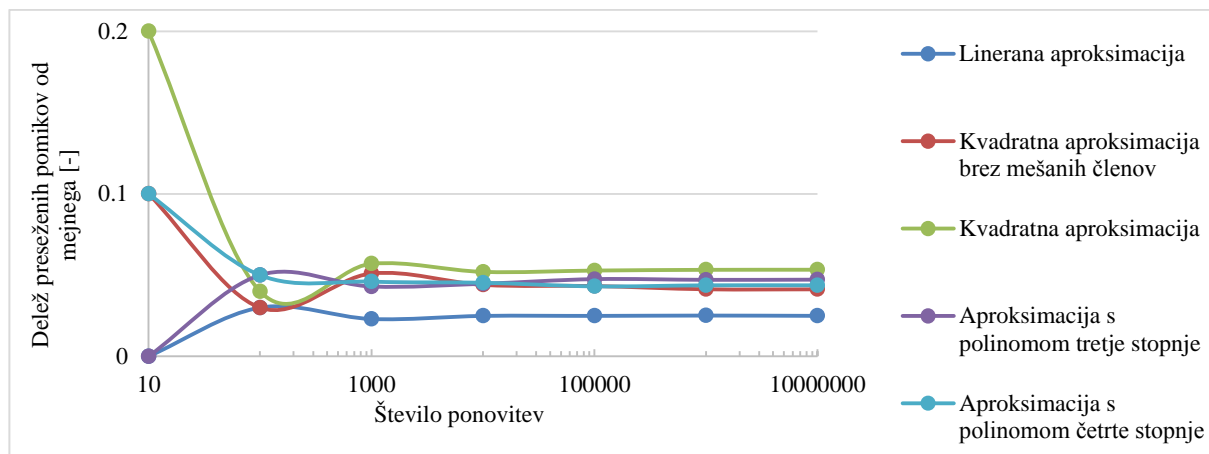
na sliki 12, na celotno trajanje izračuna vplivata tako stopnja uporabljenega polinoma kot tudi število ponovitev. Slednje vpliva bolj. Čas izračuna sledi povečevanju ponovitev in se med 10^5 in 10^6 ponovitvami poveča za 10 krat. Enako se zgodi med 10^6 in 10^7 ponovitvami. Račun se najhitreje zaključi takrat, ko uporabimo polinom prve stopnje in izvedemo 10^5 ponovitev in sicer v 1,2 s. V povprečju pa smo za izračun, ne glede na uporabljeni polinom, pri 10^5 ponovitvah potrebovali manj kot 2 s, pri 10^6 približno 17 s in pri 10^7 približno tri minute.

S pomočjo izraza (6) smo preverili še standardno napako pri postopku Monte Carlo. Standardna napaka je odvisna od števila vseh ponovitev in od števila ugodnih izidov – v našem primeru od števila pomikov, ki prekoračijo mejno vrednost. Preverili smo, kaj se dogaja z rezultatom v odvisnosti od števila ponovitev in od števila ugodnih izidov. Rezultati so prikazani na sliki 13. V primeru, ko je mejni pomik nekje na robu odzivne ploskve (majhna verjetnost preseženega pomika), je pri 10 ponovitvah eksperimentalna napaka velikostnega razreda nekaj stotink odstotka, s povečevanjem števila ponovitev pa strmo pade in je skoraj nezaznavna. Če je mejni preseženi pomik manjši in je mejni pogoj nekje v osrednjem delu odzivne ploskve (večja verjetnost prekoračitve pomika), pa je napaka nekoliko večja, vendar je prav tako pri 10^5 ponovitvah že skoraj nezaznavna.



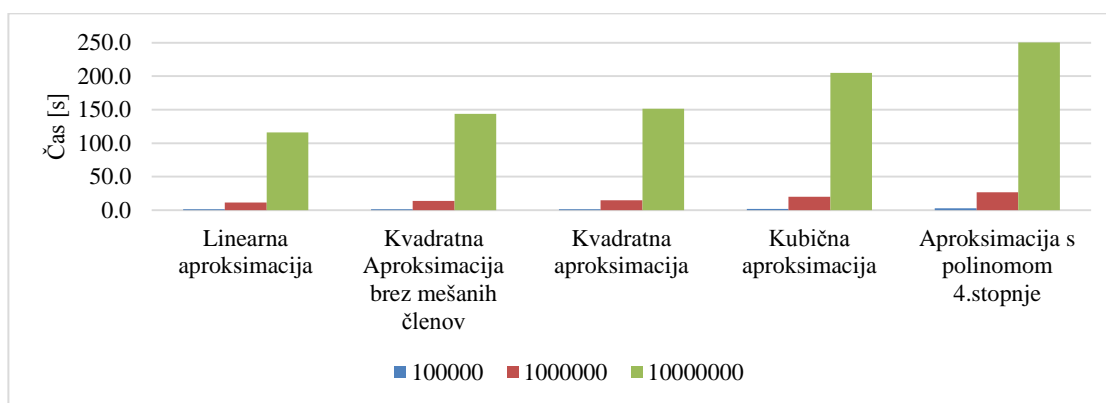
Slika 10: Kumulativna porazdelitvena funkcija pomika krone pregrade.

Figure 10: Cumulative distribution function of displacements of the Moste dam.



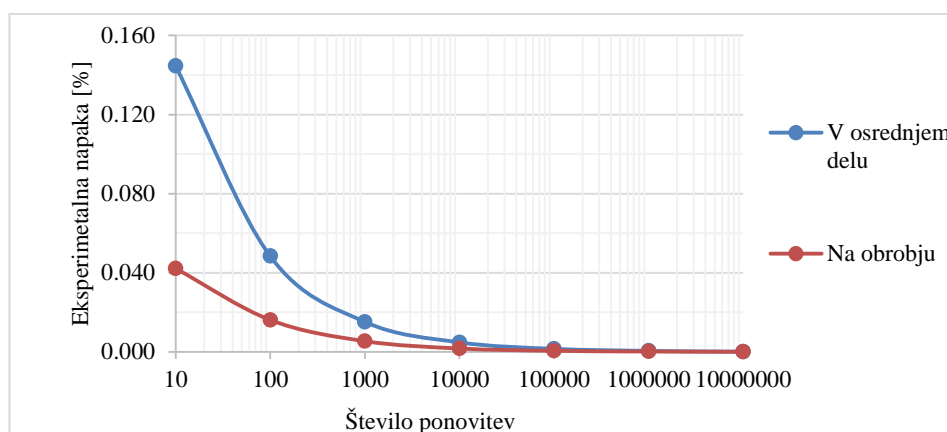
Slika 11: Vpliv števila ponovitev v metodi Monte Carlo na rezultat izračuna. Prikazan je računski delež pomika, večjega od 0,4 mm.

Figure 11: Portion of displacement of the crest of the dam larger than 0,4 mm - in dependence on the number of repetitions within procedure Monte Carlo and the rate of response surface.



Slika 12: Čas trajanja izračuna v odvisnosti od števila ponovitev v postopku Monte Carlo in stopnje uporabljenega polinoma. Račun je potekal na povprečnem osebni računalniku.

Figure 12: Duration of the calculation in dependence on number of repetitions within Monte Carlo procedure and the rate of response surface. Calculations were performed on an average personal computer.



Slika 13: Vpliv števila ponovitev pri postopku Monte Carlo na računsko napako.

Figure 13: Influence of number of repetitions on the computational error in Monte Carlo procedure.

4. Analiza velike kotalne zapornice na HE Moste

4.1. Vhodni podatki v modelu

Na pregradi HE Moste se nahajajo 4 tablaste kotalne dvodelne zapornice, 2 manjši in 2 veliki (Slika 14). Izvedli smo mehansko analizo velike kotalne zapornice z dimenzijami: višina 2,5 m in širina 14,25 m. Pri analizi smo upoštevali končno višino zapornice po načrtu. Celotni segment je sestavljen iz zapornice in dvostranskega vodilnega okvirja, v katerem so nameščena kolesa. Zapornica je vijačena iz dveh enakih konstrukcijskih delov višine 1,25 m, na mestu stika pa je nameščena prečna ojačitev (SEL, 2001). Na sliki 16 je prikazan prečni prerez numeričnega modela zapornice. Prikazana je tudi deformirana oblika po izračunu.

S pomočjo programa *Radimpex Tower 6* smo izdelali poenostavljeni 3D numerični model zapornice. Podatke o geometriji zapornice smo pridobili iz načrtov. Upoštevali smo materialne lastnosti jekla S235. V modelu smo uporabili dve slučajni spremenljivki. Prva slučajna spremenljivka je bila debelina prečne ojačitve na mestu stika obeh konstrukcijskih delov zapornice, druga pa gladina vode za zapornico. V projektu

Preglednica 5: Računske gladine.

Table 5: Computing water levels.

| | | | | | | | | |
|----------------------------------|---|-----|---|-----|---|-----|---|-----|
| Gladina vode za zapornico - H[m] | 0 | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 |
|----------------------------------|---|-----|---|-----|---|-----|---|-----|



Slika 14: Zapornice na HE Moste. (Avtorska slika).

Figure 14: Hydraulic gates on Moste dam.

zapornice je predvideno, da se lahko v skrajnem primeru gladina vode za zapornico dvigne 1 m nad zgornjo koto zapornice in se čez njo preliva. V analizi smo obravnavali tudi ta primer, vendar vpliva dinamike vodnega toka pri prelivanju preko zapornice nismo upoštevali. Na podlagi vzorca meritev smo izvedli tudi analizo gladinskega stanja za zapornico v času obratovanja. Le v 41 % je merjena gladina vode dosegla ali preseгла koto fiksnega prelivnega praga, na katerem nalegajo zapornice (253,50 m. n. m.).

Izvedli smo 16 numeričnih eksperimentov, pri tem smo upoštevali 8 različnih gladinskih stanj in 2 možni debelini ojačitve v osrednjem delu (2 in 10 cm). Debelina ojačitve je izbrana deterministično. Za gladino vode smo izbrali vrednosti iz območja meritev, te so prikazane v preglednici 5. Maksimalna dosežena gladina za zapornico je 2,93 m, srednja gladina pa 0,66 m (SEL, 2001), spremenljiv vpliv gladine za zapornico smo aproksimirali z normalno porazdelitvijo, s parametri $\mu = 0,66$ m in $\sigma = 0,41$ m. Vrednosti gladin za zapornico so izbrane enakomerno znotraj vrednosti normalne porazdelitve, dodatno pa smo dodali še vrednost 3,5, ki predstavlja projektirano maksimalno vrednost. Ta seveda še ni bila izmerjena.

4.2. Aproksimacija in analiza rezultatov numeričnega eksperimenta

Spremljali smo maksimalni horizontalni pomik zapornice (U_y), ki se pojavi v osrednjem delu zapornice. Rezultate numerične analize smo po metodi najmanjših kvadratov aproksimirani v približno odzivno ploskev. Uporabili smo polinom 2. stopnje. Dobljena približna odzivna ploskev, ki prikazuje vpliv debeline ojačitve (d) in višine vode na pomik zapornice, je prikazana na sliki 15. Uporabili smo polinom zapisan v enačbi 10:

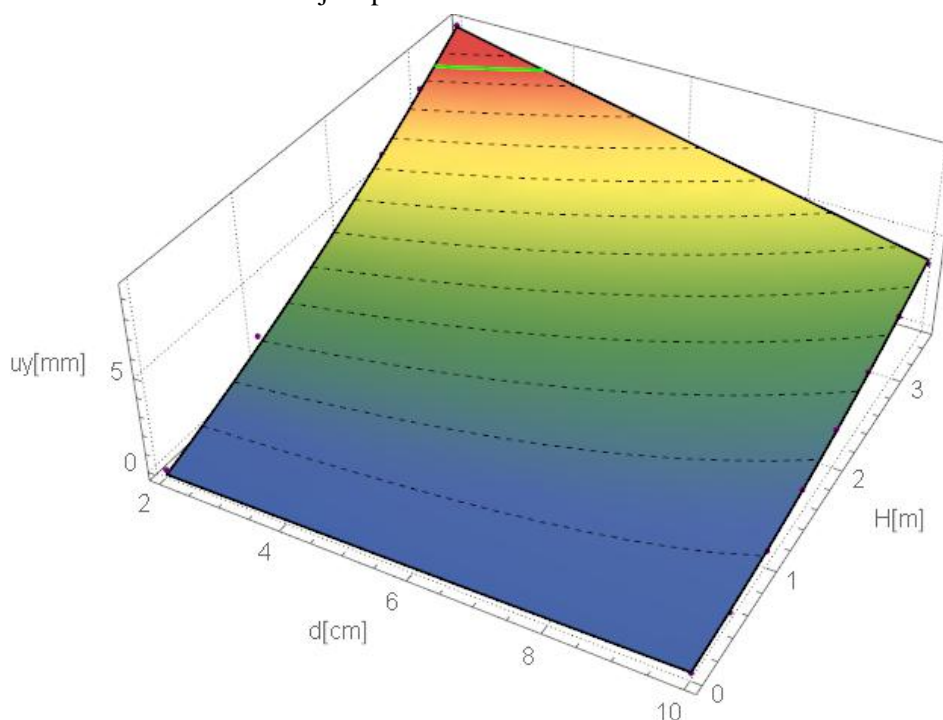
$$u_y = -0,325625 + 0,0370833 x + 2,30226 y - 0,207173 x y + 0,250595 y^2. \quad (10)$$

V zgornji enačbi u_y predstavlja pomik zapornice v mm, x predstavlja debelino ojačitve v cm in y višino vode v m. Polinom ima kvadratne člen le za spremenljivko y , saj smo debelino ojačitve spremenili le dvakrat, kar ni dovolj za aproksimacijo druge stopnje.

S pomočjo enačbe ploskve je mogoče določiti, kakšen bi bil pomik pri vmesnih vrednostih debeline ojačitve. Izbrali smo si mejni pomik

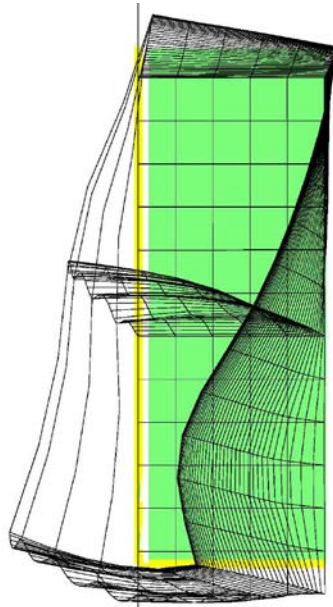
zapornice 8,33 mm oziroma $L/150$, kjer L predstavlja razdaljo med dvema ojačitvama. Vrednost mejnega pomika je s poudarjeno črto prikazana na ploskvi odziva. Ob upoštevanju dveh pogojev: maksimalne globine vode in maksimalnega dovoljenega pomika, smo poiskali debelino ojačitve, ki ustreza obema pogojema. Oba pogoja sta izpolnjena, ko znaša debelina ojačitve vsaj 4 cm.

Sledila je še analiza verjetnosti pojava mejnega pomika v odvisnosti od debeline ojačitve. Z metodo Monte Carlo smo izvedli 10^5 simulacij. Na izbrani ploskvi je verjetnost, da bo pomik večji ob 8,33 mm le 0,9 %. S pomočjo enačbe (6) smo določili še standardno napako našega izračuna. Ta je velikostnega reda 10^{-3} [mm]. Iz prikaza ploskve na sliki 15 lahko opazimo, da je mejni pomik prekoračen v skrajnem levem robu ploskve, torej pri manjših debelinah ojačitve in maksimalnih višinah vode za zapornico. Zanimala nas je še optimalna debelina ojačitve, ob pogoju da na zapornici ne sme priti do preseženega mejnega pomika. Izkaže se, da je optimalna debelina $d = 4$ cm.



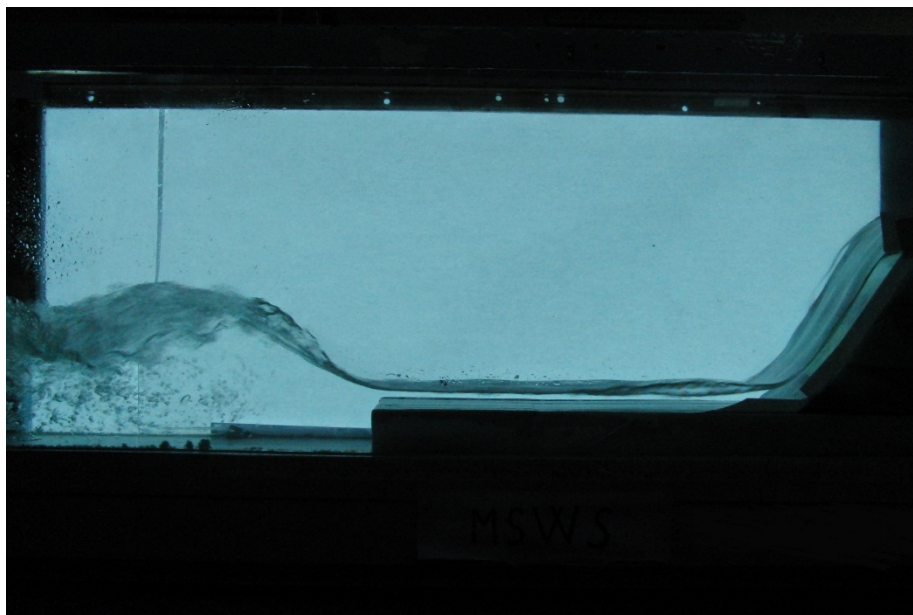
Slika 15: Odzivna ploskev pomika zapornice. Z zeleno črto je označen mejni pomik 8,33 mm.

Figure 15: Response surface representing displacements of the hydraulic gate. Threshold of 8,33 mm is marked with a green line.



Slika 16: Prečni prerez zapornice in deformirana oblika.

Figure 16: *Deformed shape of the hydraulic gate.*



Slika 17: Primer meritve v vodnem žlebu.

Figure 17: *Example of a measurement in a hydraulic gully.*

5. Analiza meritev stoječega vala za vodni šport z uporabo metode odzivnih ploskev

Metodo odzivnih ploskev je mogoče uporabiti za analizo različnih tehničnih problemov. Še posebej je uporabna pri interpretaciji rezultatov meritev v laboratoriju. S pomočjo te metode smo izdelali

dodatno analizo meritev vodnega skoka v vodnem žlebu. Obravnavali smo 18 končnih meritev pojava vodnega skoka z izvedbo poglobitve podslapja s stopnico pod drčo preliva.

Model v laboratoriju je bil izdelan v enotnem merilu 1:10 po vseh geometrijskih oseh in ob upoštevanju načel Froudove modelne podobnosti.

Na modelu smo spreminjali sledeče parametre: geometrijo podslapja, pretok ter globino vode v podslapju, skupno 5 parametrov, njihove vrednosti smo spreminjali naključno. Zanimala nas je zveza med višino vala in spreminljivimi parametri na modelu. Pri eni meritvi smo hkrati spremenili več parametrov: pretok (Q) smo spreminjali v območju 4,7-9,5 l/s, globina poglobitve (h_v) je bila ali 2 cm ali 5 cm. Dolžino stopnice pod prelivno drčo (L) smo spremenili 3 krat. Posnetek modela med meritvijo v hidravličnem žlebu je prikazan na sliki 17. Ker se globina poglobitve spremeni le dvakrat, smo meritve razdelili v dve skupini in za vsako izmed poglobitev izvedli ločeno analizo. Pri spreminljivkah, ki se jim vrednost spremeni le dvakrat, je zanesljivo možno napovedati le trend med obema vrednostnima, kar pa se lahko enostavno naredi tudi z uporabo linearne interpolacije. Bolj natančno je načrt eksperimentov prikazan na sliki 18. Za aproksimacijo merjenih točk v ploskev je bil uporabljen polinom 2. stopnje. V enačbi (11) je zapisan polinom za primer, ko je bila v podslapju narejena poglobitev 3 cm. V nadaljevanju tudi predstavljamo rezultate za ta primer. Spremenljivka x v enačbi (11) predstavlja pretok Q in spremenljivka y predstavlja oddaljenost mesta poglobitve od pete preliwa:

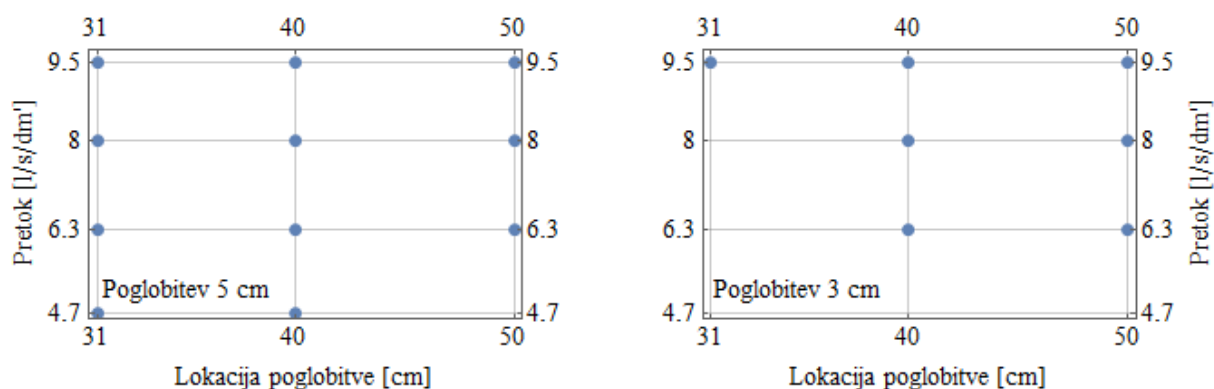
$$h_v = -26,0997 + 3,96386 x - 0,368873 x^2 + 0,920715 y + 0,0659028 x y - 0,0176764 y^2. \quad (11)$$

Ploskev je prikazana na sliki 19. Za interpretacijo rezultatov je morda bolj nazoren prikaz ovojnic v ravnini. Te prikazuje slika 20. Korelacija merjenih in računskih točk pri prvi poglobitvi (3 cm) je 0,96 in pri drugi poglobitvi (5 cm) 0,91.

Najvišje višine valov se pojavijo, ko je pretok v vodnem žlebu vsaj 9 l/s ali več, pri dolžini stopnice pod prelivno drčo med 40-45 cm. Ta rezultat je pričakovan, saj je višina vala in učinkovitost vodnega skoka odvisna od vrednosti Froudovega števila. Optimalne razmere za nastanek vala so, ko je razmerje med globino poglobitve (y) in prve konjugirane višine (h_1) v območju nizkega padca, ki ga opiše izraz (12) (Brater in King, 1976):

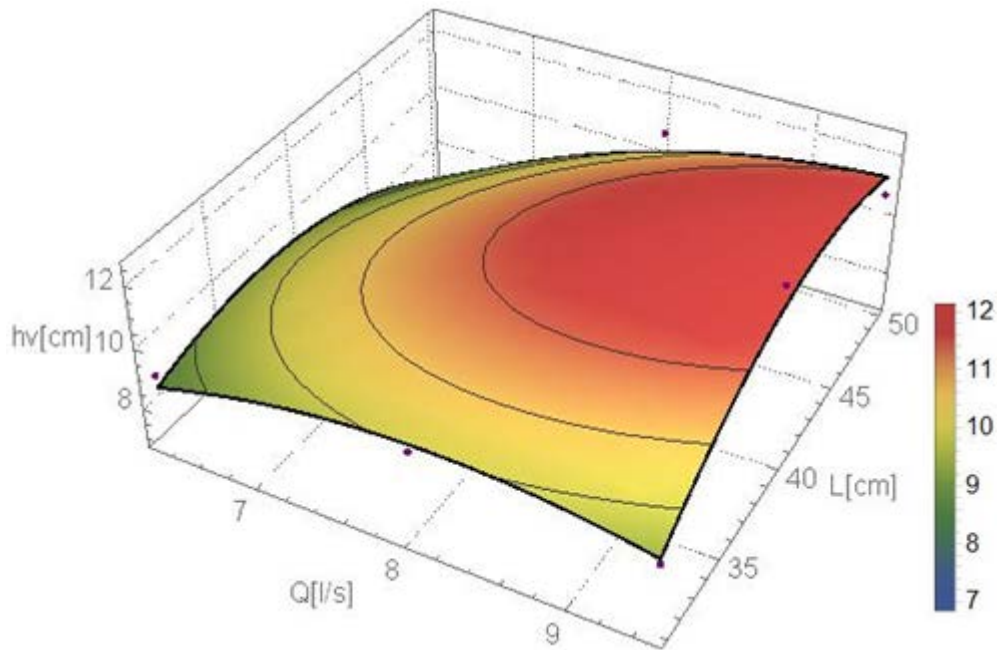
$$\sim 1 \leq \frac{y}{h_1} \leq \sim 8,0. \quad (12)$$

Pri manjših padcih nastane valovit vodni skok, pri večjih padcih pa pride do nastanka potopljenega vodnega skoka. Višina potopljenega vodnega skoka je omejena, poleg tega pa je ta oblika vodnega skoka tudi nevarna zaradi pojava podvodnega vrtninca vode (Brater in King, 1976).



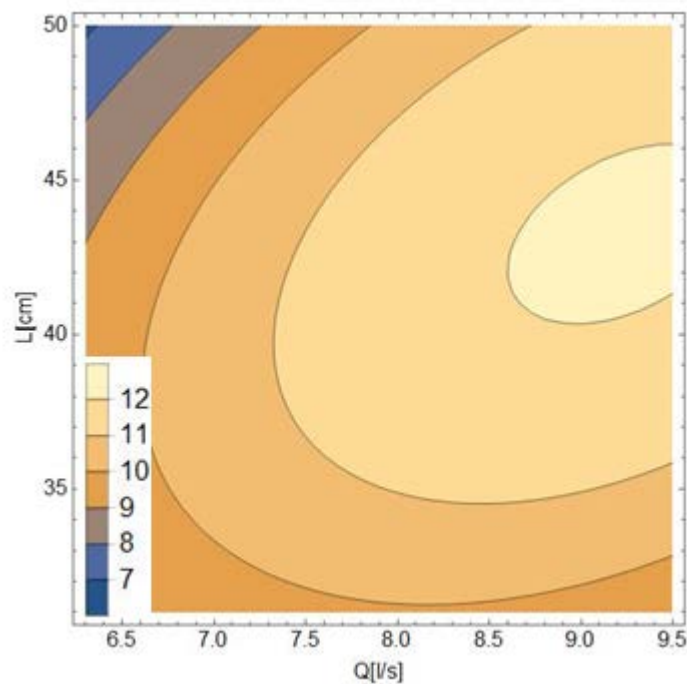
Slika 18: Načrt izbire slučajnih spremenljivk pri meritvah vodnega skoka.

Figure 18: Experimental design for the measurements of the hydraulic jump.



Slika 19: Odzivna ploskev višine valov v odvisnosti od merjenih parametrov pri globini poglobitve 3 cm (h_v – višina vala, Q – pretok, L – oddaljenost mesta poglobitve).

Figure 19: Response surface showing wave height at 3 cm depth of the plunge pool.



Slika 20: Ovojnice višin valov v odvisnosti od merjenih parametrov pri globini poglobitve 3 cm.

Figure 20: Contours of the wave height at 3 cm depth of the plunge pool.

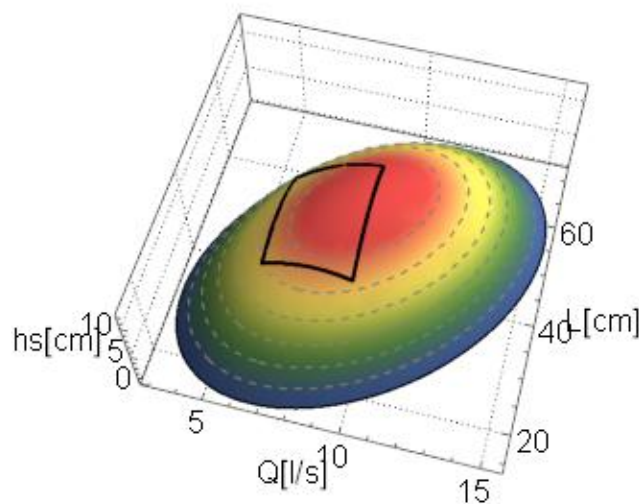
Sliki 19 in 20 prikazujeta aproksimirano ploskev znotraj območja meritev. Opazimo, da se maksimalne vrednosti pojavijo ravno na robu

merjenega območja. Teoretično bi se lahko pri dani geometriji objekta, upoštevanem izrazu (12) ter ob upoštevanju omejitvi hitrosti vodnega toka na

vrednosti, ki omogočajo drsenje surferske deske (5-10 m/s) (Oliviero, 2010), primerni stoječi valovi pojavili pri pretokih, ki so veliko večji od teh, pri katerih so potekale meritve. V žlebu v laboratoriju je mogoče doseči pretoke med 4,5-10 l/s (podatek velja za enotski širinski izsek in ne predstavlja absolutne vrednosti). Po enačbi (8) pa so možni valovi tudi pri pretokih večjih od 30 l/s. Trdimo lahko, da je dejansko območje seveda manjše. Obstoječo enačbo ploskve smo razširili na teoretično območje in upoštevali le pozitivne vrednosti. Na sliki 21 je prikazano razširjeno območje prvotne ploskve, prikazane so vse pozitivne vrednosti ploskve, ki se pojavijo v območjih pretokov 3-15,5 l/s in oddaljenosti poglobitve od pete preliva na razdaljah 14-72 cm. Temni pravokotnik prikazuje območje, v katerem smo izvajali meritve, območje leži večinoma v območju maksimalnih višin vala. Glede na to, da gre za pojav v hidravliki nestalnega toka, bi bile za potrditev poteka ploskve na širšem območju potrebne dodatne meritve, ki bi zajele območja z

nižjimi višinami valov. Območje veljavnosti odzivne ploskve torej omejimo med vrednostmi, ki smo jih uporabili pri meritvah: pretok v območju 6,8-9,5 l/s ter oddaljenost mesta poglobitve med 31-50 cm.

Na ploskvi, ki je prikazana na sliki 18, smo izvedli tudi verjetnostno analizo pojava višine vala v odvisnosti od pretoka in lokacije vala v podslapju. Preglednica 6 prikazuje rezultate te analize, vsi merjeni valovi so bili višji od 6 cm, pravzaprav je 99 % valov višjih od 8 cm. Če upoštevamo modelno pravilo, to pomeni 80 cm visoke valove na prototipu. Za surfanje so primerni tudi že nižji valovi, sploh v primeru, če bi napravo uporabljali manj izkušeni športniki, zato bi bilo v prihodnje zanimivo eksperimentalno raziskati, kaj se dogaja pri nižjih pretočnih razmerah, saj bi bili rezultati te analize uporabni pri morebitni implementaciji objekta v prostor. 7% valov preseže višino 12 cm, to se pojavi v primeru maksimalnega pretoka v žlebu in v območju srednjih oddaljenosti mesta nastanka vala.



Slika 21: Pozitivne vrednosti aproksimirane ploskve višine valov.

Figure 21: Positive values of response surface.

Preglednica 6: Verjetnostna analiza višine vala.

Table 6: Wave height probability analysis.

| Mejni pomik [cm] | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|------------------|-----|------|----|----|----|----|----|----|
| p [%] | 100 | 99,9 | 99 | 94 | 76 | 45 | 7 | 0 |

6. Zaključki

Verjetnostni pristop k analizi konstrukcij je bistveno zahtevnejši od determinističnega. Zgolj s tradicionalnim načinom analize, pri katerem upoštevamo relativno visoke varnostne faktorje, lahko pridemo do zmotne predstave, da je mogoče doseči stanje absolutne varnosti. Tega pa seveda ni mogoče doseči. Negotovosti so del sveta v katerem živimo in jih zato pri načrtovanju in tudi v kasnejših fazah ne smemo povsem zanemariti.

Glavni cilj raziskave je bil prikazati uporabo metode odzivnih ploskev v gradbeništvu, kjer je nekoliko manj uveljavljena kot v drugih panogah. Z metodo odzivnih ploskev smo analizirali tri različne primere: masivno betonsko konstrukcijo, jekleno zapornico in fenomen vodnega skoka. V vseh treh primerih smo s pomočjo metode odzivnih ploskev dobili dodatne informacije o obnašanju sistema. Metodo smo potrdili kot primerno za obravnavo objektov v hidrotehniko in gradbenih konstrukcijah nasploh. Njena glavna prednost je predvsem enostavna in hitra uporaba. Dobljene odzivne ploskve smo uporabili pri nadaljnji analizi z metodo Monte Carlo. Pomanjkljivost te metode je ta, da je rezultat v splošnem odvisen od števila ponovitev. Vendar z razvojem računalnikov to ni več nujno problem, kot smo prikazali s prikazom računskih časov za naše analize. V primeru analize pregrade HE Moste smo pokazali, da za dovolj natančen rezultat zadošča 10^6 simulacij, te pa smo na povprečnem računalniku uspeli izvesti v manj kot 30 s. Čas računa je odvisen od računskega primera, vendar z razvojem računalnikom postaja ta metoda vedno bolj aktualna in zato tudi široko uporabljana.

Verjetnostne metode bi morale postati stalna praksa pri obravnavi strateško pomembnih objektov in objektov, ki bodo v svoji življenjski dobi izpostavljeni zelo spremenljivim vplivom. Z uporabo metode odzivnih ploskev lahko v fazi načrtovanja objektov pridobimo dodatne informacije o odzivu objekta na zelo različne scenarije, v katerih se lahko konstrukcija znajde v svoji življenjski dobi. Tako se nam odpre možnost za pripravo varnostnih scenarijev, morebitno spremembo zasnove ali pa nam navsezadnje tudi

lahko pomaga pri odločitvi, da nekega posega ne bomo izvršili. Z uporabo metode na že obstoječih objektih pa lahko preverimo njihovo dejansko varnost. Tako dobimo dodatne informacije, ki nam pomagajo pri odločitvi o ukrepih na objektu ali o sanaciji, rekonstrukciji ali pa odstranitvi objekta. Hkrati pa dobimo dodatno znanje, ki je koristna informacija pri prihodnjih podobnih objektih. Na podlagi izkušenj in analiz že obstoječih objektov lahko izboljšamo zasnovo vseh prihodnjih objektov in tako pripomoremo k izboljšanju varnosti in optimalni umestitvi konstrukcij v prostor.

Viri

Allaix, D.L., Carbone, V.I. (2011). An improvement of the response surface method, *Structural safety* 33(2011), 165–172. doi:10.1016/j.strusafe.2011.02.001.

Brater, E. F., King, H. W. (1976). *Handbook of hydraulics for the solution of hydraulic engineering problems*. McGraw-Hill, New York, 313 p.

Chatterjee, P. (2013). Frequency Response Analysis of a Generic Dam-Fluid-Foundation Model, DIANA White Papers, 1–5.

Choi, S., Grandhi, R. V., Canfield, R. A. (2007). *Reliability - based structural design*. Springer, London.

Dalsgaard Sorensen, J. (2004). *Notes in structural reliability theory and risk analysis*. Institute of building technology and structural engineering, Aalborg university.

Ditlevsen, O., Madsen, H. O. (1996). *Structural reliability methods*. Chichester; Wiley, New York.

Gavin, H. P., Yau, S. C. (2008). High-order limit state functions in the response surface method for structural reliability analysis. *Structural safety* 30(2), 162–179.

Haach, V.G., Juliani, L.M. (2014). Application of ultrasonic tomography to detection of damages in concrete. Proceedings of the 9th international conference on structural dynamics, EURO DYN 2014, Porto, 3351–3358.

ICOLD (2001). Bulletin 122, Computational procedures for dam engineering.

Kim, S. H., Na, S. W. (1997). Response surface method using vector projected sampling points. *Structural safety* 19, 3–19.

Oliviero, L. (2010). Hydrodynamics of planing hulls: a power prediction method for warped v-bottom hull forms. Doctoral Thesis, Università degli studi di Napoli Federico II.

SEL (2001). Pregrada akumulacijskega bazena HE MOSTE Zamenjava lesenega provizorija z regulacijskimi zapornicami -TEHNIČNI OPIS (Interno gradivo Savske elektrarne Ljubljana, d. o. o) (Moste dam, Replacement of the provisional wooden gate with control weir – Internal technical document) (in Slovenian).

Sedej, A., Širca, A., Ravnikar Turk, M. (2010). Varnost pregrad v Sloveniji (Dam safety in Slovenia). Proceedings of the 12. SLOCOLD meeting, Krško (in Slovenian).

TNO DIANA BV. (2012). DIANA Finite element analysis release 9.4.4. User's manual.

Turk, G. (1994). Analiza zanesljivosti konstrukcij z upoštevanjem geometrijske in materialne nelinearnosti (Analysis of the reliability of structures with respect to geometric and material nonlinearities). Doctoral Thesis, University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, 110 p. (in Slovenian).