

## NEKI ASPEKTI SEIZMIČKE ANALIZE SLOŽENIH INŽENJERSKIH OBJEKATA

Radenko Pejović<sup>1</sup>, Radivoje Mrdak<sup>1</sup>, Olga Mijušković<sup>1</sup>

### REZIME:

Ovaj rad se bavi problematikom seizmičke otpornosti složenih inženjerskih objekata. Ova problematika je veoma aktuelna s obzirom na činjenicu da se najveći dio naše zemlje kao i okruženja nalazi u seizmički aktivnim zonama sa velikom vjerovatnoćom pojave zemljotresa. U radu su analizirani osnovni principi i savremeni pristupi u projektovanju seizmički otpornih objekata, zakonska regulativa, kao i problematika postojećih objekata. Kroz konkretne primjere jednog novog objekta (brane Andrijevo) i dva postojeća objekta (brana Grančarevo i rashladni toranj TE Pljevlja) ukazano je na bitne parametre proračuna i računski tretman objekta uključujući njegovu interakciju sa sredinom u kojoj se nalazi.

Osnovni cilj ovog rada je da stručnoj javnosti skrene pažnju na neke aspekte problematike projektovanja i konstruktivne koncepcije složenih inženjerskih objekata radi njihovog unapređenja.

**Ključne riječi:** Inženjerski objekti, seizmička analiza, proračunski model, linerana analiza, nelinearna analiza, energetska ravnoteža

## CERTAIN ASPECTS OF COMPLEX CONSTRUCTIONS SEISMIC ANALYSIS

### Summary:

The paper deals with the issue of the seismic resistance of the complex constructions. This is an ongoing issue concerning the fact that the biggest part of our country, as well as the region, is in the active seismic zones with the great possibility of experiencing earthquakes. The basic principles and modern approaches in designing seismic resistant constructions, the legislation, as well as the problematic of the existing constructions is analyzed in the paper. Through concrete examples of a new construction (Andrijevo dam) and two existing constructions (Grancarevo dam and Thermo plant Pljevlja cooling tower) the certain parameters of the calculation and calculation treatment of the construction are highlighted, including their interaction with the environment they are situated in.

The objective of the paper is to pay the special attention of the expertise public to the certain aspects of the designing problematic and constructive conceptions of the complex constructions referring to their improvement.

**Key words:** Constructions, seismic analysis, calculation model, linear analysis, non-linear analysis, energy balance

---

<sup>1</sup> Građevinski fakultet Univerziteta Crne Gore, Cetinjski put, 81000 Podgorica, Crna Gora

## **1. UVOD**

Najveći dio teritorije Crne Gore kao i okruženja nalazi se u seizmički aktivnim zonama u kojima su se do sada dešavali a i u budućnosti se mogu očekivati zemljotresi razornih intenziteta. Ovo znači da su objekti koji se nalaze u tim zonama, ili treba da se u njima grade, izloženi određenom seizmičkom riziku, te da se u toku njihovog eksploatacionog vijeka sa velikom vjerovatnoćom može dogoditi zemljotres, tj. oni i mi zajedno sa njima kao njihovi korisnici živimo sa određenim procentom rizika.

Zbog toga je veoma značajno usavršavanje metoda, analiza i projektovanja seizmički otpornih objekata. U tu svrhu sve zemlje, sa aktivnim seizmičkim područjima, planski i organizovano rade na eksperimentalnim i teorijskim istraživanjima radi usavršavanja metoda projektovanja i definisanja normi za projektovanje i građenje.

U našoj zemlji, nažalost, ovoj oblasti istraživanja se poklanja vrlo mala pažnja i ona je svedena na entuzijazam pojedinaca koji se bave ovom problematikom. Međutim, istraživanja u ovoj oblasti su neophodna za što bi bilo potrebno formirati posebni centar za istraživanja i obezbijediti odgovarajuću opremu. Pokušaja za njegovo formiranje je bilo u više navrata ali zbog nedostatka sredstava nijesu urodili plodom.

Postojeće objekte, koji uopšte nijesu analizirani na dejstvo zemljotresa ili su analizirani približnim metodama, potrebno je posebno analizirati savremenim metodama proračuna i ocijeniti njihovu statičku i dinamičku sigurnost.

Osnovni cilj ovog rada je da stručnoj javnosti skrene pažnju na neke aspekte problematike projektovanja, proračuna i konstruktivne koncepcije složenih inženjerskih objekata radi njihovog unapređenja.

## **2. VRSTA I KARAKTER OBJEKTA**

Predmet ovog rada su složeni inženjerski objekti. U ovu vrstu objekata u prvom redu spadaju objekti koji imaju veliku investicionu vrijednost, od čije ispravnosti i funkcionalnosti zavisi funkcionisanje kapitalnih tehničko-tehnoloških sistema, čiji poremećaji mogu izazvati katastrofalne posljedice, odnosno ugroziti ljudske živote, onemogućiti normalno funkcionisanje života i rada na velikom području države i uz sve to nanijeti velike materijalne štete.

Primjera radi, rušenje ili hvarija jednog energetskog objekta kao što su hidroelektrane ili termoelektrane ili nekih ključnih proizvodnih industrijskih pogona i sl. imalo bi nesagledive negativne posljedice na našu zemlju.

U složene inženjerske objekte spadaju:

- energetske objekte,
- visoke brane (svih tipova po konstrukciji i materijalu),
- industrijski dimnjaci,
- rashladni tornjevi,
- vodotornjevi,
- mostovi i vijadukti, velikih raspona,
- visoki potporni zidovi i nasipi,
- tuneli (saobraćajni i hidrotehnički),
- PTT i RTV antenski i dalekovodni stubovi,
- cjevovodi, kanali i pumpne stanice,
- silosi, bunker i sl.

U zavisnosti od vrste objekta, njegove veličine i složenosti i mogućeg negativnog uticaja na okolinu, naprijed navedeni inženjerski objekti se svrstavaju u dvije kategorije i to: objekti van kategorije i objekti I kategorije.

### **3. PROJEKTOVANJE I PRORAČUN**

Osnovni koncept, odnosno filozofija projektovanja objekata u seizmički aktivnim područjima je da u eventualnom zemljotresu koji se može dogoditi u eksploatacionom vijeku objekta:

- životi ljudi ne budu ugroženi,
- oštećenja objekta budu ograničena,
- objekti od posebnog značaja moraju i poslije zemljotresa biti u funkciji.

Navedeni pristup je logičan, međutim, i pored zadovoljenja prethodnih principa može se desiti da posljedice po korisnika objekta budu veoma nepovoljne, tj., da objekat postane neupotrebljiv za korišćenje te da njegova popravka bude čak neisplativa.

Iz navedenih razloga veoma važno pitanje je pitanje stepena zaštite objekata od zemljotresa.

Za proračun i projektovanje inženjerskih objekata u seizmičkim područjima, u našoj zemlji ne postoji zvaničan pravilnik, već se koristi nacrt Pravilnika o tehničkim normativima za projektovanje i proračun inženjerskih objekata u seizmičkim područjima, koji je objavljen 1985. godine ili propisi drugih zemalja. Intencije su, da ubuduće naša zemlja prihvati Evrokod 8 za projektovanje seizmički otpornih konstrukcija uz donošenje odgovarajućeg nacionalnog dokumenta za njegovu primjenu.

Analiza sigurnosti inženjerskih objekata podrazumijeva dvije vrste analize, odnosno provjeru na dejstvo dva tipa projektnih zemljotresa “Z1” i “Z2”, koje su posljedica različitih kriterijuma za projektovanje i sigurnost objekata.

Prvi nivo se odnosi na optimalno projektovanje, odnosno na uticaj zemljotresa tipa “Z1”, koji predstavlja najači očekivani zemljotres koji može da pogodi objekat u toku njegovog perioda eksploatacije. Pri dejstvu zemljotresa “Z1”, objekat mora ostati bez oštećenja konstruktivnog sistema i sa malim ili nikakvim oštećenjima nekonstruktivnih elemenata. Pri dejstvu ovog zemljotresa objekat treba da ostane u domenu linearne teorije elastičnosti.

Drugi nivo je procjena stabilnosti objekta, odnosno proračun na uticaj zemljotresa tipa “Z2”, koji može da pogodi objekat u bilo kom vremenskom periodu. Pri dejstvu ovog zemljotresa, objekti mogu pretrpjeti izvjesna konstruktivna i nekonstruktivna oštećenja, ali ne smije doći do parcijalnog ili potpunog rušenja objekta. Za ovaj nivo zemljotresa objekat prelazi u područje nelinearnog ponašanja.

Za analizu ponašanja objekata u novije vrijeme razvijene su savremene numeričke metode, koje omogućuju da se stekne detaljan i pouzdan uvid u stanje napona i deformacija u objektu i tlu. Savremeni proračunski modeli zasnivaju se na pretpostavkama o interakciji objekta i okolnog terena, dok se kod brana može uključiti i voda (interakcija: brana – fundament – rezervoar).

Osnovni kriterijumi za procjenu sigurnosti objekata su naponi i pomjeranja. Međutim, u novije vrijeme sve više se koristi kriterijum energetske ravnoteže. Često se dešava da su kriterijumi napona i deformacija zadovoljeni, a da objekat ne posjeduje energetska ravnotežu, što je karakteristično za visoke lučne brane. Ulaskom tijela brane u nelinearno područje deformisanja povećava se energetska kapacitet za energiju koja se utroši na plastičnim deformacijama i na trenju po spojnica, ali kod klasične obrade spojnica nije uvijek moguće dostići tačku bilansa energije.

Međutim, moguće je konstruisati spojnice sa odgovarajućim svojstvima u pogledu apsorpcije energije, tj. u njih treba ugraditi odgovarajuće disipatore energije radi zadovoljenja energetske ravnoteže.

Značajan broj postojećih objekata nije uopšte računat na dejstvo zemljotresa, ili je to rađeno veoma grubim i približnim metodama, koje su projektantima bile na raspolaganju u trenutku njihovog projektovanja. Imajući u vidu prednje, potrebno je za ove objekte uraditi detaljne računске analize, koristeći savremene metode proračuna, i u skladu sa važećim propisima ocijeniti njihovu statičku i dinamičku sigurnost i nakon toga po potrebi preduzeti odgovarajuće mjere.

U nastavku ovog rada kroz karakteristične primjene proračuna analizirani su neki aspekti seizmičke otpornosti složenih inženjerskih objekata.

## **4. PRIMJERI PRORAČUNA**

- Za proračun su odabrana tri karakteristična inženjerska objekta, i to:
- visoka lučna brana HE Andrijevo čija izgradnja se planira na Morači;
  - visoka lučna brana HE Grančarevo izgrađena 1967. godine na Trebišnjici;
  - rashladni toranj TE Pljevlja izgrađen 1979. godine.

Kroz navedene primjere proračuna analiziran je uticaj bitnih parametara na rezultate proračuna i postizanje odgovarajuće sigurnosti objekta, kao i uticaj grešaka pri izvođenju na ukupnu sigurnost objekta.

### **4.1. VISOKA LUČNA BRANA HE ANDRIJEVO**

#### **4.1.1. Osnovni podaci i proračunski parametri**

Za analizu su korišćeni podaci iz idejnog projekta koji je uradio Energoprojekt iz Beograda 1987. godine. Osnovni geometrijski parametri brane su sljedeći:

- građevinska visina 150 m;
- dužina osnove luka u kruni 182 m;
- debljina u dnu 17 m;
- debljina u kruni 3,5 m.

Na ovoj brani analiziran je uticaj proračunskog modela i deformacijskih karakteristika stijenske mase na rezultate proračuna, pri čemu su varirani sljedeći parametri:

- tip konačnih elemenata;
  - 2D - dvodimenzionalni konačni element (teorija tankih ljuski) proračunski model PM1;
  - 3D - trodimenzionalni konačni element – proračunski modeli PM2 i PM3;
- gustina mreže konačnih elemenata;
  - $D=d$  brane (debljina konačnog elementa jednaka debljini brane) – proračunski model PM2;
  - $D=1/3 d$  brane (debljina konačnog elementa jednaka 1/3 debljine brane) – proračunski model PM3;
- debljina angažovane stijenske mase;
  - u granicama od 0,0 h – 1,0 h (gdje je h visina centralne konzole) i to: 0,1 h, 0,33 h, 0,67 h i 1,0 h;
- deformacijske karakteristike stijenske mase;
  - Modul elastičnosti stijenske mase u granicama od  $E=7500 - 1500$  MPa i to:  $E=7500$  MPa,  $E=10000$  MPa,  $E=12500$  MPa i  $E=15000$  MPa.

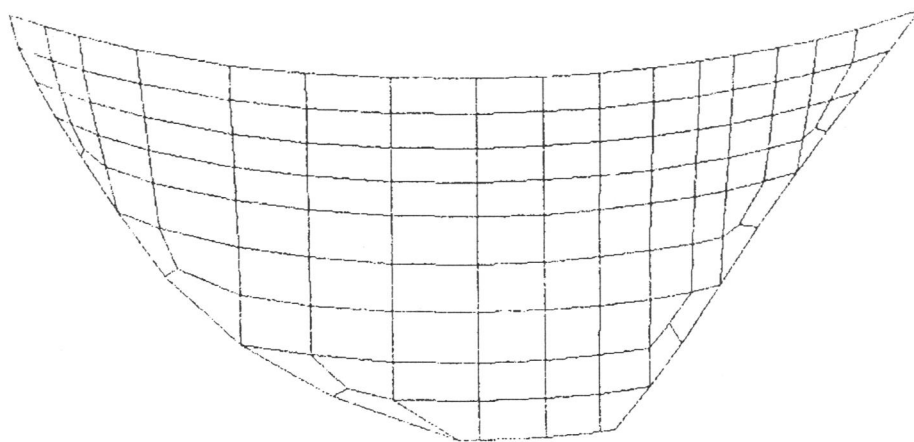
#### 4.1.2. Proračunski modeli

Apromksimacija tijela brane i okoline stijene urađena je mrežom konačnih elemenata pri čemu je korišćen proračunski program SAP 2000. Formirana su tri osnovna proračunska modela sa sljedećim osnovnim karakteristikama.

##### 4.1.2.1. Proračunski model PM1

Ovaj model konstruisan je u vidu mreže dvodimenzionalnih konačnih elemenata zasnovanih na teoriji tankih ljuski. Model je prikazan na sl.1. Za vezu brane sa stijenom usvojena je varijanta totalnog i elastičnog uklještenja. Za varijantu elastičnog uklještenja tlo je tretirano kao linearno elastičan prostor. Krutost tla je usvojena kao krutost zamjenjujućih opruga i ona je sračunata pomoću sljedećih formula:

- vertikalna translacija  $K=CzA$ ;
- horizontala translacije  $K= 0,7 CzA$ ;
- rotacije - savijanje  $K=2,0 CzJx$ ;
- rotacija - torzija  $K=1,5 CzJz$
- gdje je  $Cz$  modul reakcije tla u  $kN/m^3$ .

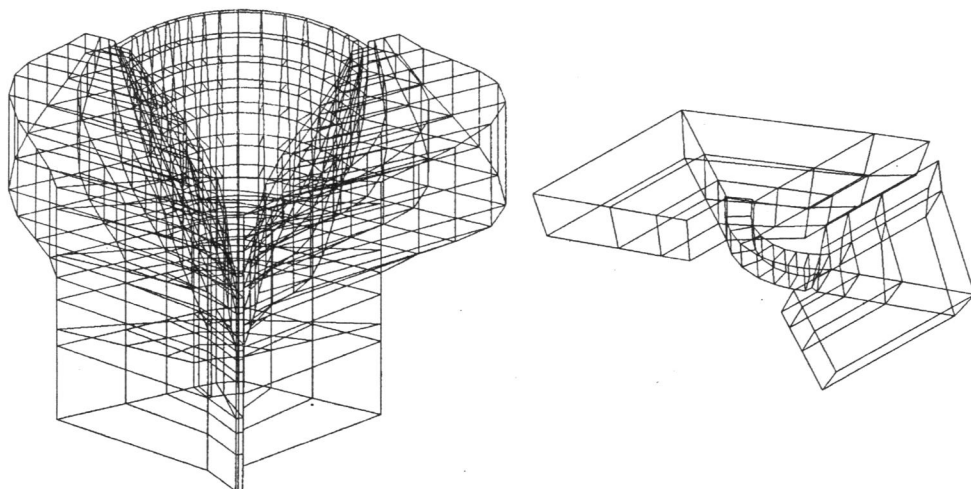


*Slika 1. Proračunski model MP1*

Ovaj model je, zbog svoje jednostavnosti pogodan za analize uticaja pojedinih parametara na rezultate dinamičke analize. Na njemu je analiziran uticaj zemljotresa različitih frekventnih karakteristika kao i uticaj na rezultate različitih metoda seizmičkog proračuna. Na njemu su sračunati i uticaji od hidrostatičkog i hidrodinamičkog pritiska sa ciljem upoređenja sa rezultatima dobijenim na modelima konstruisanim od trodimenzionalnih elemenata.

#### *4.1.2.2. Proračunski model PM2*

Kod ovog proračunskog modela tijelo brane i stijenski masiv su aproksimirani mrežom trodimenzionalnih konačnih elemenata. Za tijelo brane usvojena je debljina elementa jednaka debljini brane. Za stijenski masiv upotrijebljeni su elementi prizmatičnog oblika sa postepenim povećanjem dimenzija elemenata sa zalaženjem u stijensku masu. Proračunski model je prikazan na slici 2. i on predstavlja najprostiji proračunski model brane i okoline stijene konstruisan sa trodimenzionalnim elementima. Na njemu su proračunati uticaji od hidrostatičkog i hidrodinamičkog pritiska i inercijalnih sila od zemljotrsa spektralnom metodom za akcelerogram Petrovac.



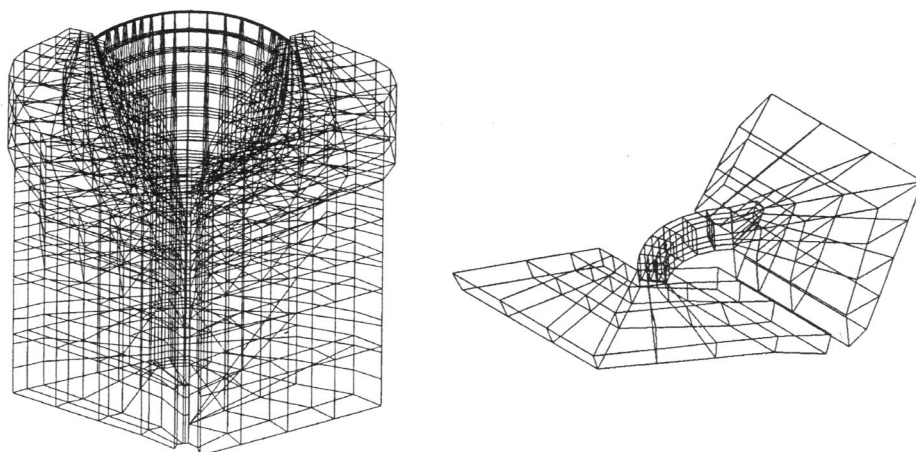
*a) Šema elemenata*

*b) Šema elemenata na 1/3 visine brane (50 m)*

**Slika 2.** *Proračunski model PM2*

#### *4.1.2.3. Proračunski model PM3*

Konstruisan je od trodimenzionalnih konačnih elemenata. Za tijelo brane usvojena je debljina elementa jednaka trećini debljine brane. Za stijenski masiv upotrijebljeni su elementi po obliku slični usvojenim u modelu PM2. Proračunski model je prikazan na slici 3. Na njemu su proračunati uticaji od opterećenja kao i na modelu PM2. Ovaj model može se prihvatiti kao realna aproksimacija brane i okoline stijene. Zbog toga su rezultati sračunati na ovom modelu korišćeni za ocjenu tačnosti rezultata proračuna na ostalim proračunskim modelima kao i za analizu uticaja mehaničkih karakteristika okolne stijene na rezultata proračuna.



a) Šema elemenata

b) Šema elemenata na 1/3 visine brane (50 m)

**Slika 3.** Proračunski model PM3

#### 4.1.3. Rezultati proračuna

Kod analize i upoređivanja rezultata proračuna, pošlo se od realne pretpostavke da je proračunski model PM3 koji je konstruisan od guste mreže trodimenzionalnih konačnih elemenata realna aproksimacija brane i okolne stijene, zbog čega su rezultati dobijeni na proračunskim modelima PM1 i PM2 upoređivani sa njim.

Imajući u vidu navedenu pretpostavku, uticaji pojedinih parametara koji su varirani u provedenim analizama su sljedeći:

- tip konačnog elementa  
PM2, PM3: PM1 = (0,111 – 1,454)
- gustina mreže konačnih elemenata  
PM3: PM2 = 0,95 – 1,05
- debljina angažovane stijenske mase  
(PM-0,1 h) : (PM – 1,0 h) = 0,662 – 1,258  
(h – visina centralen konzole)
- deformacione karakteristike stijenske mase  
PM 7500 : PM 15000=(0,552 – 1,289).

#### 4.1.4. Zaključak

Proračunski model PM3 koji je konstruisan od guste mreže trodimenzionalnih konačnih elemenata je i u odnosu na proračunske modele PM1 i PM2 najrealnija aproksimacija brane i okolne stijene.



Uprošćeni model PM2 ima prednost jer rezultati sračunati na modelu PM1 daleko više odstupaju od dobijenih na modelu PM2 u odnosu na model PM3. Pri tome, ako se teži uprošćavanju modela, povoljnije je ići na smanjenje broja trodimenzionalnih elemenata njihovim ukрупnjavanjem nego na aproksimaciju brane dvodimenzionalnim elementima.

U proračunski model potrebno je uključiti stijensku masu najmanje do dubine koja iznosi jednu visinu centralne konzole brane.

Uticaj deformacijskih karakteristika tla na rezultate statičke i dinamičke analize je vrlo velika. Dobro ispitana i ispravno modelirana stijenska masa je preduslov zadovoljavajuće analize kod visokih brana.

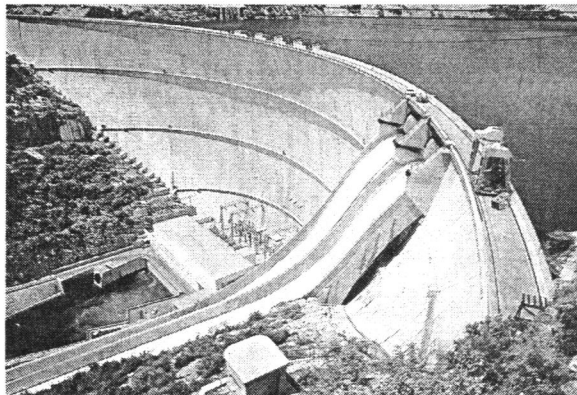
## **4.2. VISOKA LUČNA BRANA HE “GRANČAREVO”**

### **4.2.1. Osnovni podaci o brani i proračunski parametri**

Visoka lučna brana HE “Grančarevo” izgrađena je 1967. godine na rijeci Trebišnjici. Osnovne geometrijske karakteristike brane su:

- građevinska visina 123,0 m
- debljina u vrhu 4,6 m
- debljina u dnu 26,9 m
- dužina u kruni po ekstradosu 439,9 m.

Izgled brane prikazan je na slici 4.



*Slika 4. Brana Grančarevo*

Za analizu ponašanja ove brane korišćene su sljedeće podloge:

- rezultati ispitivanja mehaničko-deformacijskih karakteristika betona brane izvedenih od strane Građevinskog fakulteta iz Podgorice 1998. godine;
- rezultati ispitivanja mehaničko-deformacijskih karakteristika tla izvedenih prije i u toku gradnje brane;

- rezultati eksperimentalnih istraživanja dinamičkih karakteristika brane koje je izvršio IZIS iz Skoplja 1980. godine;
- rezultati oskultacija brane i okolnog terena u toku probnog punjenja i u toku eksploatacije. Ovi rezultati su dali mogućnost kontrole i baždarenja proračunskog modela i upoređivanja izmjerenih i sračunatih vrijednosti.

Brana je izvedena od nearmiranog betona kao niz vertikalnih konzolnih blokova koji su međusobno vezani kontaktnim spojnicama. Po vertikali je izvedena u slojevima od lučnih segmenata gdje je obavljen prekid u betoniranju i na taj način su formirane i horizontalne spojnice.

Za ovu branu, urađena je analiza stabilnosti za statičke i seizmičke uticaje. Posebna pažnja je posvećena energetskej analizi odnosno ocjeni da li brana u postojećem stanju posjeduje energetskeu ravnotežu. Takođe je analizirana mogućnost povećanja energetskeg kapaciteta ugrađivanjem u spojnice prigušivača sa karakteristikama gume.

Proračuni su provedeni za sljedeće uticaje i njihove odgovarajuće kombinacije:

- sopstvena težina;
- temperatura;
- hidrostatički pritisak;
- zemljotres.

Seizmička analiza je urađena za dva tipa projektovanog zemljotresa Z1 sa max  $a=0,25$  g i zemljotres Z2 sa max  $a=0,40$  g. Za linearnu seizmičku analizu su korišćene spektralna metoda i direktna dinamička analiza, a za nelinearnu seizmičku analizu direktna dinamička analiza. Spektralna metoda je rađena za sedam spektara apsolutnih ubrzanja (Petrovac, Dubrovnik, Titograd 2, Gacko, El centro, H. Novi i Ston). Direktna dinamička analiza je rađena za tri ekcelerograma (Tirograd 2, Petrovac i El centro).

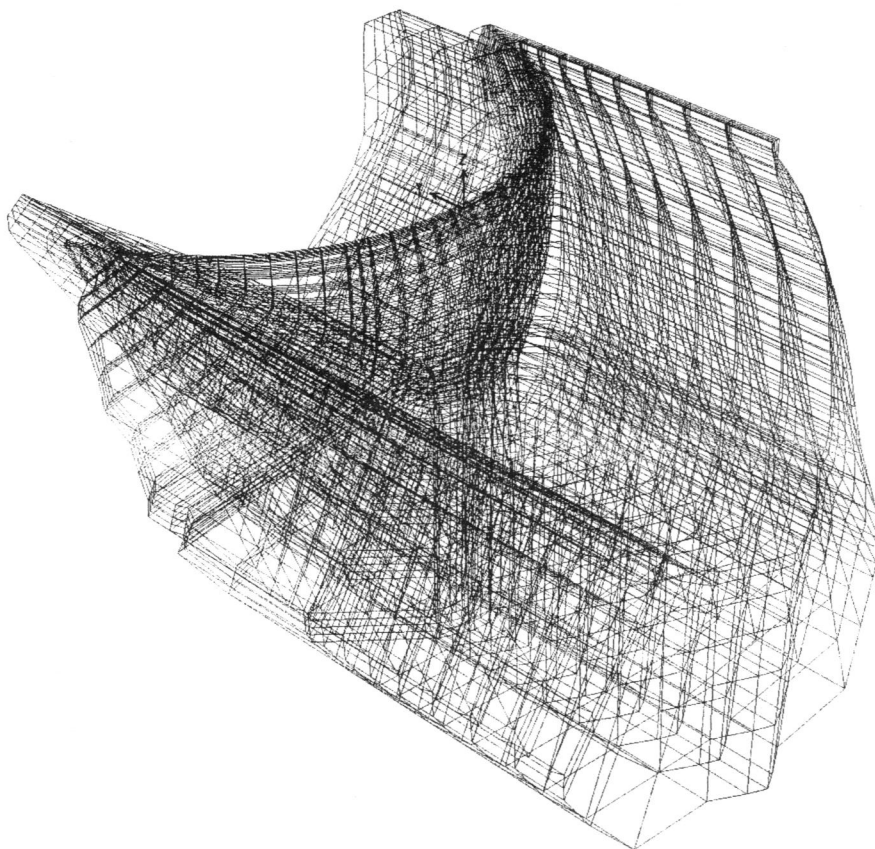
#### **4.2.2. Proračunski modeli**

Za branu Grančarevo konstruisana su dva proračunska modela i to za linearnu i nelinearnu analizu koji su bazirani na numeričkej analizi simultanog interaktivnog sistema brana – fundament – rezervoar korišćenjem 3-D konačnih elemenata. Pri proračunu su usvojeni sljedeći parametri i pretpostavke:

- angažovana debljina stijene je 1,5 visina centralne konzole;
- angažovana dužina akumulacije 2 visine centralne konzole;
- blokovi su linearno elastični;
- spojnice primaju samo sile pritiska;
- disipacija energije se ostvaruje kroz viskozno prigušenje i trenje u spojnicama;

- za povećanje energetske kapaciteta u spojnice su ugrađeni prigušivači sa karakteristikama gume;
- za tijelo brane je usvojena debljina elementa jednaka četvrtini debljine brane.

Proračunski model za linearnu analizu prikazan je na slici 5.

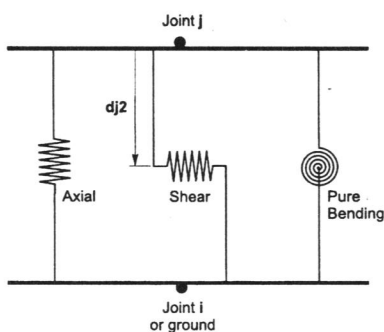


*Slika 5. Proračunski model brane Grančarevo za linearnu analizu*

Proračunski model za nelinearnu analizu formiran je na principu da je brana izvedena od nearmiranog betona kao niz vertikalnih konzolnih blokova. Blokovi su međusobno povezani nearmiranim kontaktnim spojnica koje ne primaju napone zatezanja i predstavljaju potencijalno mjesto za pojavu prslina. Prelazak iz linearnog u nelinearno područje deformisanja nastaje usljed prekoračenja čvrstoće betona na zatezanje u spojnica. Od početnog monolitnog stanja tijelo brane se transformiše u niz blokova sa nelinearnim vezama duž spojnica. Zbog relativno niskog nivoa napona u stijeni ne dolazi do prslina pa je fundament tretiran kao linearno elastičan i pri nelinearnoj analizi.

Za nelinearnu analizu usvojen je modifikovani model brane koji je korišten za linearnu analizu. Modifikacija se sastoji u unošenju u model nelinearnih elemenata. Nelinearni elementi se postavljaju u vertikalne, spojnice između solid elemenata gdje su u modelu za linearnu analizu sračunata zatezanja.

Za simulaciju realnih pomjeranja primijenjeni su kontaktni elementi tipa nelinearnih opruga koji su ugrađeni u čvorovima mreže konačnih elemenata duž vertikalnih spojnica u zoni i okolini zone u kojoj su se pojavila zatezanja. Svaki nelinearni element sastavljen je od šest opruga, za svaku od šest unutrašnjih deformacija od kojih je nelinearna horizontalna opruga upravna na spojnicu. Odnos napon - deformacija ovih opruga je nezavisan jedan od drugih. Na slici 6. prikazane su tri opruge za tri deformacije: aksijalnu, smicanje i čisto savijanje u ravni 1-2.

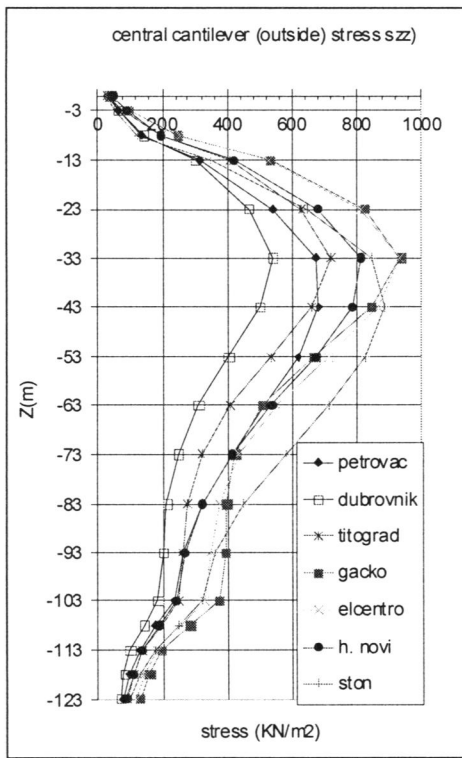


Slika 6. Nelinearni element u ravni 1-2

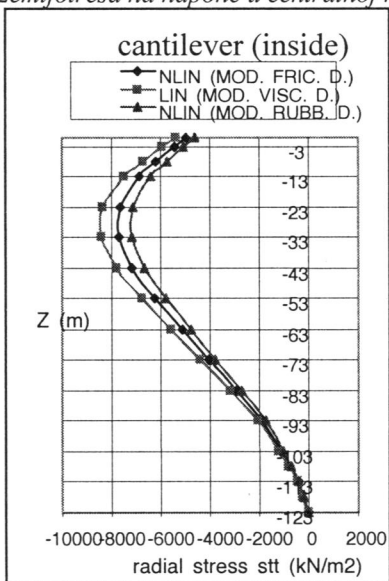
### 4.3. REZULTATI PRORAČUNA

Dobijeni rezultati provedenih računskih analiza pokazali su sljedeće:

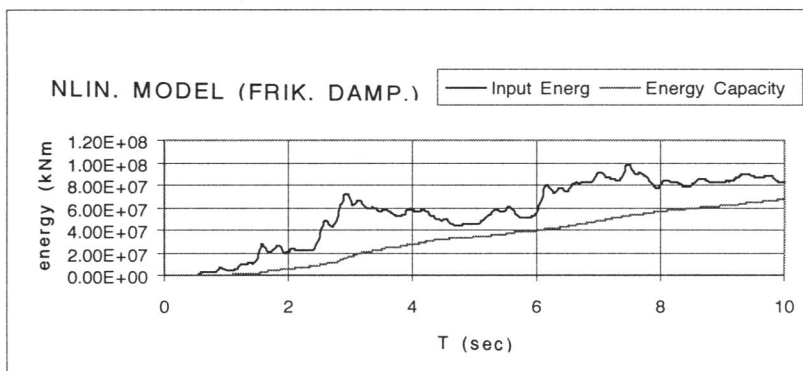
- Naponi i deformacije od usvojenog projektog zemljotresa (Z1) i maksimalno mogućeg zemljotresa (Z2) su u dozvoljenim granicama;
- Dinamički odgovor proračunskog modela, dobijen usled dejstva zemljotresa različitih frekventnih sastava, se kreću u veoma širokim granicama, što ukazuje na veliku važnost istraživanja seizmičkih parametara mikro lokacije. Za dobijanje ekstremnih uticaja nije moguće konstruisati sintetički projektni zemljotres, zbog čega je potrebno tražiti dinamički odgovor za što veći broj zemljotresa različitog frekventnog sastava. Navedeno potvrđuje dijagram na slici 7.
- Ulaskom brane u nelinearno područje ponašanja sa stvarnim karakteristikama spojnica dolazi do značajne redukcije uticaja (slika 8);
- U slučaju ugradnje prigušivača u spojnice dolazi do velike redukcije uticaja;



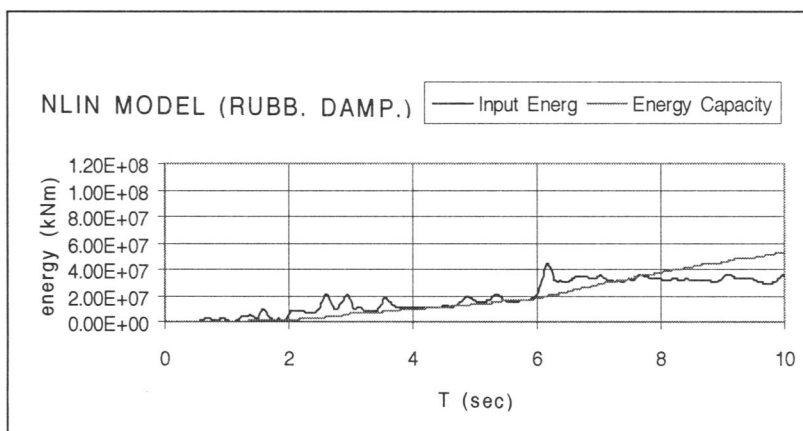
Slika 7. Uticaj različitih zemljotresa na napone u centralnoj konzoli (linearna analiza)



Slika 8. Uticaj tipa prigušenja na napone u centralnoj konzoli



*Slika 9. Dijagrami inputne energije i energetske kapaciteta za postojeće stanje (nelinearna analiza)*



*Slika 10. Dijagrami inputne energije i energetske kapaciteta za stanje ugrađenih apsorbera (nelinearna analiza)*

- Stabilnost brane nije dokazana u pogledu energetske bilansa. Slika 9 pokazuje da je kod brane veći input energije usljed dejstva zemljotresa od energetske kapaciteta. Pokazano je da je energetski kapacitet nedovoljan zbog malih apsorpcionih kapaciteta krutih spojnica;
- Radi povećanja energetske kapaciteta proračunskog modela uključeni su gumeni prigušivači. Ugrađivane apsorbera energije u spojnica može se uspostaviti energetski bilans što se jasno uočava na slici 10. Pri tome, se ostvaruje smanjenje uticaja usljed zemljotresa za preko 50% i umanjjenje ukupnih napona usljed mjerodavnih opterećenja za oko 10%.

#### **4.3.1. Zaključak**

Na osnovu provedenih analiza može se zaključiti sljedeće:

- Za praćenje ponašanja postojećih brana, ocjenu njihovog stanja i održavanje neophodno je vršiti stalne oskultacije;
- Konstruisati i izbaždariti odgovarajući proračunski model, prilagođen izvedenom stanju i rasporedu mjernih mjesta, koji će omogućiti brzu i efikasnu provjeru i ocjenu stanja objekta za konkretne uslove, da bi se na osnovu toga po potrebi preduzele odgovarajuće mjere;
- Otpornost objekta na dejstvo zemljotresa treba posvetiti posebnu pažnju, što, između ostalog, podrazumijeva posebno istraživanje seizmičkih parametara mikrolokacije;
- Kod novih objekata, pored dokazivanja stabilnosti brane u pogledu naponskih i deformacijskih stanja neophodno je dokazati stabilnost u pogledu energetskog balansa, što znači da energetski kapacitet brane mora biti veći od energetskog inputa. Kod postojećih objekata treba provjeriti energetski balans;
- Energetski kapacitet novih objekata može se znatno povećati ugrađivanjem apsorbera energije i spojnice.

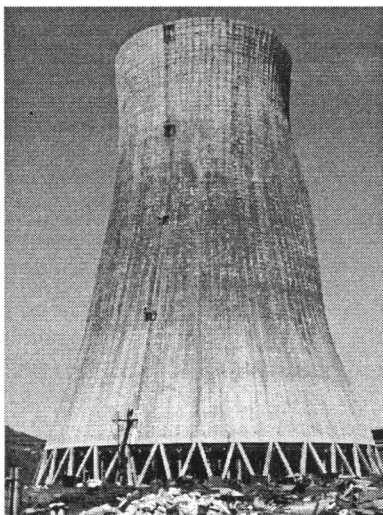
### **4.4 RASHLADNI TORANJ TE PLJEVLJA**

#### **4.4.1. Osnovni podaci o tornju i proračunski parametri**

Rashladni toranj TE Pljevlja projektovan je kao armiranobetonska rotaciona hiperbolična ljuska koja je po donjoj ivici, oslonjena na 32 para "V" stubova visine 7,2 m. Stubovi su oslonjeni na prstenasti temelj. Toranj je visine 93,20 m. Projektovani prečnici su na dnu ljuske 66,20 m, u grlu 37,8 m i na vrhu 40,44 m. Debljina ljuske je promjenljiva tako da se od kote 7,20 (kota oslanjanja na stubove) do kote 29,53 mijenja od 50 do 16 cm, od kote 29,53 do kote 79,90 je konstantne debljine 16 cm i od kote 79,90 do vrha debljina se mijenja od 16 do 38 cm.

Toranj je izveden sa znatnim odstupanjem od projektovane geometrije. Za utvrđivanje izvedene geometrije i osmatranje rashladnog tornja postavljena je mreža od 80 geodetskih tačaka. Nakon geodetskih mjerenja, uz primjenu višestepenih interpolacionih funkcija, aproksimirana je izvedena geometrija spoljne površi. Na osnovu ovih mjerenja utvrđena su najveća odstupanja u srednjoj trećini visine ljuske. Najveće registrovano odstupanje je na koti 57,50 m, gdje razlika u odosu na projektovani poluprečnik iznosi 2,76 m ili 13,7%. Na ostalim djelovima geometrijske imperfekcije se kreću u granicama od 3,5%.

Za ocjenu postojećeg kvaliteta betona tornja i provođenja računskih analiza, odgovarajućim ispitivanjima je utvrđen postojeći kvalitet betona i njegove naponsko-deformacijske karakteristike.



*Slika 11. Izgled tornja*

Za ovaj toranj analiziran je uticaj geometrijske imperfekcije na njegovo ponašanje kao i uticaj različitog tretmana tla.

Uporedna analiza za projektovano i izvedeno stanje provedena je za sljedeće uticaje:

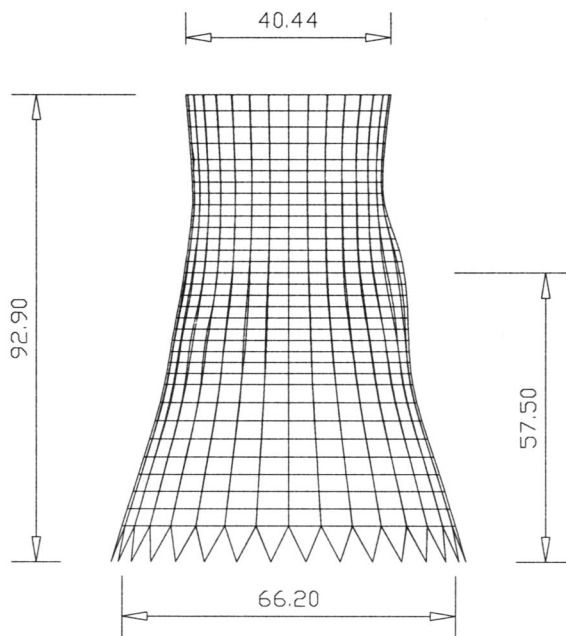
- sopstvenu težinu,
- temperaturu,
- zemljotres.

Seizmička analiza je urađena za dva nivoa zemljotresa. Prvi nivo je linearna analiza za uticaje zemljotresa različitih frekventnih karakteristika koji su skalirani na nivo projektnih zemljotresa Z1 (DBE – design basic earthquake). Drugi nivo analize je rađen za uticaje maksimalnog zemljotresa koji je mjerodavan za ocjenu stabilnosti objekta Z2 (MCE – maximal credible earthquake).

#### **4.4.2. Proračunski modeli**

Za linearnu analizu su urađeni proračunski modeli za projektovano i izvedeno stanje geometrije objekta. Za oba proračunska modela su korišćena 1-D i 2-D konačni elementi kojima su aproksimirani stubovi i ljuska tornja. Tlo je modelirano upotrebom zamjenjujućih kontaktnih elemenata. Za konstrukciju je usvojen koeficijent prigušenja od 5%, a za tlo od 10%. Na slici 12. prikazan je proračunski model konstrukcije rashladnog tornja.





*Slika 12. Proračunski model tornja*

Model za nelinearnu analizu formiran je modifikovanjem modela tornja koji je korišćen za linearnu analizu. Modifikacija se sastoji u modeliranju tla nelinearnim elementima tipa nelinearnih opruga. Svaki nelinearni element sastavljen je od šest opruga, za svaku od šest unutrašnjih deformacija. Usvojeno je da su odnosi napon - deformacija opruga nezavisni jedan od drugog.

Na slici 6 prikazane su opruge za tri deformacije: aksijalnu, smicanje i čisto savijanje u ravni 1-2. Ostale tri opruge predstavljaju preostale tri deformacije: torziju, smicanje i čisto savijanje u ravni 1-3.

#### **4.4.3. Rezultati proračuna**

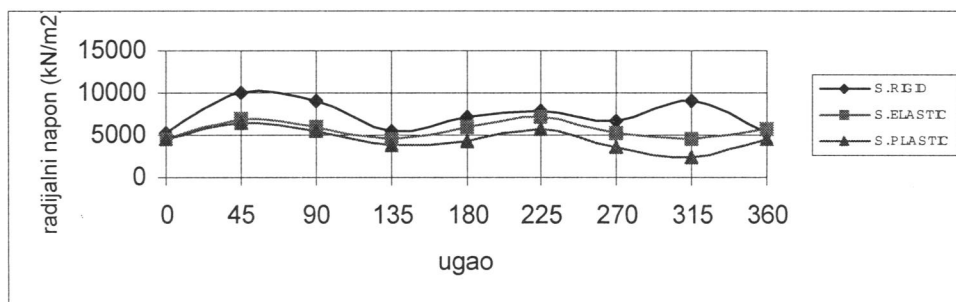
Na osnovu provedenih uporednih analiza dobijeno je da povećanja napona usljed uticaja imperfekcije dostižu sljedeće vrijednosti:

- usljed temperature do 1%;
- usljed sopstvene težine 1,47 puta;
- usljed dejstva vjetrova do 2,12 puta;
- usljed dejstva zemljotresa 5,30 puta.

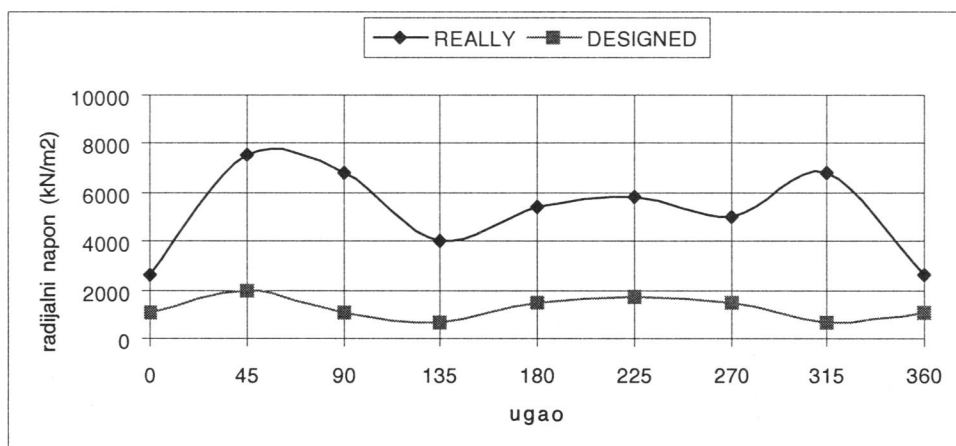
Uticaj različitog tretmana tla na radijalne napone kreće se u sljedećem odnosu:

Plastično: elastično : kruto = 1:1,96: 383.

Karakteristični rezultati proračuna prikazani su na slikama 13 i 14.



Slika 13. Radijalni naponi u nivou maksimalne imperfekcije za različite varijante modeliranja tla



Slika 14. Radijalni napon usljed zemljotresa na nivou maksimalne imperfekcije

#### 4.4.4. Zaključak

Navedene analize pokazale su veliki uticaj imperfekcije na povećanje napona u ljusci izuzimajući uticaj temperature koji je zanemarljiv. Povećanje uticaja se ne lokalizuje samo na zonu imperfekcije.

Uticaji od sopstvene težine povećavaju se za 1,47 puta, a uticaji vjetra za 2,12 puta.

Seizmičke analize rashladnog tornja pokazale su izrazito veliki uticaj imperfekcije na veličinu napona u ljusci koji je u odnosu na projektovano stanje veći i do 5,3 puta. Dinamički odgovor proračunskog modela, dobijen usljed dejstva zemljotresa različitog frekventnog sastava se kreće u veoma širokim granicama i ukazuje na veliku važnost istraživanja seizmičkih parametara mikrolokacije.

Pokazano je da tlo može bitno da utiče na ponašanje, odnosno odgovor sistema. Toranj fundiran na deformabilnoj osnovi manje je osjetljiv na dejstvo zemljotresa. Smanjenju uticaja doprinosi pored promjene dinamičkih karakteristika modela i prigušenje u tlu.

## **5. OPŠTI ZAKLJUČAK**

Imajući u vidu sve navedeno, a posebno na osnovu prezentiranih seizmičkih analiza može se zaključiti da se na smanjenje seizmičkog rizika složenih inženjerskih objekata može bitno uticati sljedećim aktivnostima:

- donošenje odgovarajućih propisa za projektovanje, izvođenje, osmatranje i održavanje inženjerskih objekata na bazi savremenih naučnih saznanja i dostignuća;
- detaljna istraživanja mehaničkih karakteristika tla i seizmičkih parametara kao podloga za projektovanje i proračun;
- pri projektovanju koristiti savremene softvere i proračunske modele koji realno opisuju konstrukciju i medije u kojima se ona nalazi (modeli sa interakcijom tla i objekta);
- za izgradnju objekta koristiti odgovarajuće materijale koji zadovoljavaju projektovani kvalitet, sigurnost i trajnost objekta;
- pri izvođenju radova vršiti strogu kontrolu izvođenja i kontrolu kvaliteta primijenjenih materijala;
- u toku izvođenja i u toku eksploatacije vršiti permanentno osmatranje objekta radi kontrole ponašanja i stabilnosti objekta;
- sve postojeće objekte koji nijesu analizirani na odgovarajući savremeni način potrebno je posebno analizirati i ocijeniti njihovu postojeću sigurnost i po potrebi preduzeti odgovarajuće mjere;
- stalno usavršavanje i povećanje nivoa znanja inženjera koji se bave ovom problematikom kao i osavremenjavanje i usavršavanje numeričkih modela za proračun;
- rezultate oskultacija i ispitivanja postojećih objekata treba koristiti za istraživanje, usavršavanje i baždarenje proračunskih modela i projektovanja;
- po mogućnosti za specifične objekte vršiti eksperimentalna istraživanja na modelima.

## 6. LITERATURA

- [1] Mrdak R., Pejović R., Kovačević V., Janjević S.: *Uticaj proračunskog modela na rezultate statičke i dinamičke analize lučne brane*, I kongres Jugoslovenskog društva za visoke brane, 1997, str. 267-275.
- [2] Pejović R., Mrdak R., Kovačević V.: *Uticaj deformacijskih karakteristika stijene na rezultate statičke i dinamičke analize visoke lučne brane*, I kongres Jugoslovenskog društva za visoke brane, 1997, str. 257-265.
- [3] Pejović R., Mrdak R., Sekulović G., Mijušković O.: *Numerička analiza sigurnosti betonske brane Grančarevo*, II kongres JDVG, Kladovo 2003.
- [4] Pravilnik o tehničkim normativima za projektovanje i proračun inženjerskih objekata u seizmičkim uslovima (nacr) Savezni zavod za standardizaciju, Beograd 1985.
- [5] Radomir F.: *Evrokod 8 projektovanje seizmički otpornih konstrukcija*, Jugoslovensko savjetovanje Evrokodovi i Jugoslovensko građevinsko konstrukterstvo, Beograd, 1995., str. 289-319.
- [6] Sekulović M., Pejović R., Mrdak R.: *Earthquake response of high arch dams*, XI European Conference on Earthquake Engineering, Pariz 1998.
- [7] Sekulović M., Pejović R., Mrdak R.: *Analysis of earthquake safety of a large arch dam*, 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zeland, Auckland 2000.
- [8] Sekulović M., Mrdak R., Pejović R., Mijušković O.: *Analysis of the seismic response of the cooling tower with geometrical imperfections*, FIP 2003. Symposium, Atina 2003.
- [9] Sekulović M., Mrdak R., Pejović R., Mijušković O.: *Analysis of seismic response of high arch dam on the basis of energy balance*, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada, Vancouver 2004.